



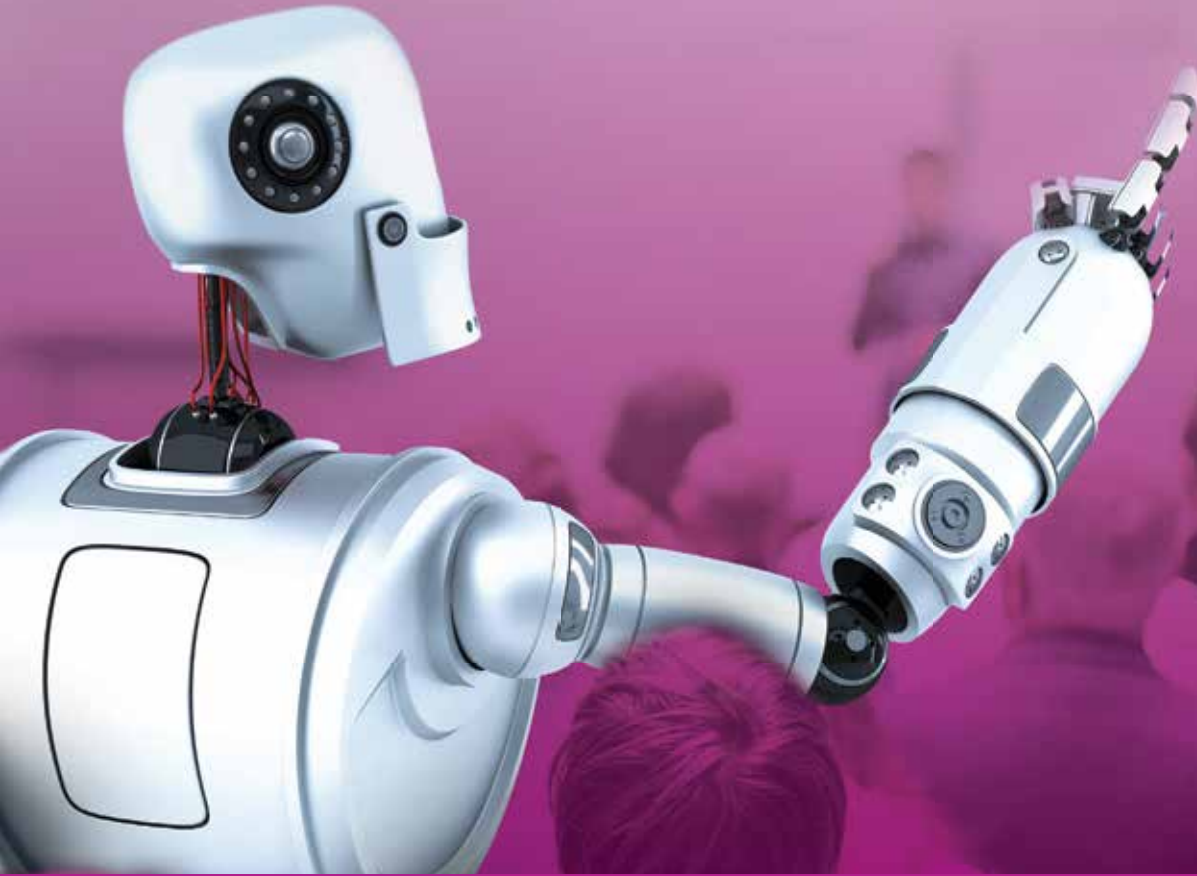
İstanbul  
**GEDİK**  
Üniversitesi



# TÜRKİYE ROBOTBİLİM KONFERANSI

2-3 KASIM 2016 - İSTANBUL

## ToRK 2016 Bildiriler Kitabı



Konferans Sponsorları



OTC DAIHEN EUROPE GmbH

FESTO

**GIMATIC**  
OTOMASYON

**ROBOT SEPETİ** e.com





İstanbul  
**GEDİK**  
Üniversitesi



# **TÜRKİYE ROBOTBİLİM KONFERANSI**

**ToRK 2016**

**Bildiriler Kitabı**

**2 - 3 Kasım 2016**

**İSTANBUL**

T.C.  
İstanbul Gedik Üniversitesi  
Cumhuriyet Mahallesi İlkbahar Sokak No: 1-3-5  
Yakacık 34876 Kartal İstanbul  
Telefon: 444 5 438  
Fax: +90 (216) 452 87 17  
e-mail: info@gedik.edu.tr

Editörler

Editorial Board

Yrd. Doç. Dr. Savaş DİLİBAL  
Doç. Dr. Erol ŞAHİN  
Yrd. Doç. Dr. Haydar ŞAHİN  
Doç. Dr. Sinan KALKAN  
Doç. Dr. Sanem SARIEL

Yayın Danışma Kurulu

Editorial Advisory Board

Prof. Dr. Levent AKIN - Boğaziçi Üniversitesi  
Prof. Dr. Çağatay BAŞDOĞAN - Koç Üniversitesi  
Prof. Dr. Aydan ERKMEN - Orta Doğu Teknik Üniversitesi  
Prof. Dr. Veysel GAZİ - Kemerburgaz Üniversitesi  
Doç. Dr. Sinan KALKAN - Orta Doğu Teknik Üniversitesi  
Doç. Dr. Erhan ÖZTOP - Özyeğin Üniversitesi  
Doç. Dr. Volkan PATOĞLU - Sabancı Üniversitesi  
Doç. Dr. Uluç SARANLI - Orta Doğu Teknik Üniversitesi  
Doç. Dr. Sanem SARIEL - İstanbul Teknik Üniversitesi  
Doç. Dr. Erol ŞAHİN - Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Redaksiyon

Redaction

Arş. Gör. Canberk Sözer

ISBN Numarası

ISBN Number

9786058557215

Baskı

Printed by

Özlem Matbaacılık ve Reklamcılık LTD. ŞTİ.  
2. Matbaacılar Sit. Litros Yolu D2BB4 Zeytinburnu İstanbul  
Tel: (0212) 501 66 00

Değerli ToRK 2016 Katılımcıları,

3ncü Türkiye Robotbilim Konferansı, 2-3 Kasım tarihleri arasında İstanbul Gedik Üniversitesi ev sahipliğinde Pendik GreenPark Otel ve Kongre Merkezinde yoğun ilgi ve katılımı gerçekleştirildi. Robotik alanda çalışan akademisyenler ile endüstride robotlu üretim yapan sanayi temsilcilerini bir araya getiren ve üniversite-sanayi işbirliğini amaçlayan konferansta robotik sistemlerdeki güncel gelişmeler katılımcılarla paylaşıldı. Geçen yıllarda yapılan konferanslardan farklı olarak, ilk kez bu konferansta sanayi temsilcileri de bilimsel oturumlar ve çalıştaylarda aktif olarak yer aldı. Türkiye genelinden konferansa farklı üniversite ve sanayi firmalarından ilk gün 196, ikinci gün 161 katılım sağlandı. Bu yılki konferansın ana teması “İnsan-Robot Etkileşimi” ve “İşbirlikçi Robotlar” idi.

Ana sponsorun OTC Daihen endüstriyel robot firması olduğu konferansta, Festo, Gimatic ve Robot Sepeti firmaları da sponsor olarak konferansa destek verdi. Konferans fuaye alanında sponsor firmalar yanında, Mekatronik Mühendisleri Derneği, IEEE Robotics Automation Society ve farklı üniversitelerin robotik kulüplerinin de çalışmaları sergilendi.

Açılış konuşmalarını Konferans Başkanı ve İstanbul Gedik Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği Bölüm Başkanı Yrd.Doç.Dr.Savaş Dilibal ve İstanbul Gedik Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Danışmanı ve Gedik Holding CEO’su Dr.Mustafa Koçak’ın yaptığı konferans, iki ayrı salonda ilerleyen bilimsel oturum ve çalıştaylar ile devam etti. Yrd.Doç.Dr.Savaş Dilibal yaptığı konuşmasında, endüstriyel uygulamalardan günlük yaşama kadar birçok alanda yaygınlaşan robotik sistemlerle ilgili, akademik alanda disiplinlerarası çalışmaların gerekliliğini vurguladı. Dr.Mustafa Koçak ise robotik alanda yapılan çalışmaların sanayi kanadından desteklenmesinin ve işbirliğinin önemine değindi. Davetli konuşmacılar Avustralya Wollongong Üniversitesi’nden Prof.Dr.Gürsel Alıcı “Robot Bilimdeki Akademik Araştırma ve İlgili Sanayi Aynı Amaçlara Kilitlenebilir mi?” ve Japonya OTC Daihen Endüstriyel Robot Firmasından Sistem Mühendisi Shinichiro Nakagawa “Robotik Kaynak Teknolojisinde Son Gelişmeler” konulu sunumlar gerçekleştirdiler.

İnsan-robot etkileşimi, robot kontrolü, arama ve kurtarma robotları, sağlık sektöründe robotlar, endüstriyel robotlar, insansız araçlar, bilişsel robotbilim, haptik sistemler, biyolojik ilhamlı robotlar konulu bilimsel oturumların gerçekleştirildiği konferansta 10 ayrı bilimsel oturumda 41 sözlü bildiri sunumu yapıldı. Ayrıca, 10 poster, 7 Çalıştay ve eğitim sunumları da gerçekleştirildi.

Yerli endüstriyel işbirlikçi robot üretimi konusunda somut adımların tartışıldığı “Türkiye’de Yerli Robota Doğru” çalıştayında; İstanbul Gedik Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği Bölüm Başkanı Yrd.Doç.Dr.Savaş Dilibal, GeKa Robot & Otomasyon Bölümü Müdürü Y.Müh.Bülent Özçelik, Tofaş Üretim Süreç Arş. & İnovasyon Yöneticisi Önder Tokçalar ve Bana Technology Genel Müdürü Y.Müh.Gökhan Berker tarafından yerli robot konusunda gelecekte birlikte yapılacak çalışmalar aktarıldı. Çalıştay sonunda yapılan değerlendirmede; yerli robot üretiminde ilerleme sağlanabilmesi için, seri üretim altyapısına ve tedarik zincirine sahip olunması, devlet desteğinin sağlanabilmesi ve alt modüllerde disiplinlerarası işbirliğinin gerekli olduğu vurgulandı.

“Tıp ve Rehabilitasyon Robotları” konulu çalıştayda Boğaziçi Üniversitesi’nden Yrd.Doç.Dr.Evren Samur “Robotik Kol Protezleri İçin Temas Hissi Geribesleme Sistemi”, Özyeğin Üniversitesi’nden Yrd.Doç.Dr.Özkan Bebek “Biyopsi İçin Ultrason Yönlendirmeli Robotik Sistem Geliştirilmesi”, Marmara Üniversitesi’nden Doç.Dr.Erkan Kaplanoğlu

“Tasarımdan Üretime Biyosinyal Kontrollü Çoklu Kavramalı Üst Uzun Protezi” konularında yaptıkları çalışmalarını katılımcılarla paylaştılar.

“Servis ve Sosyal Amaçlı Robotlar” konulu çalışmada İstanbul Teknik Üniversitesi’nden Doç.Dr.Hatice Köse “İnsan Robot Etkileşiminde örnek uygulamalar”, Boğaziçi Üniversitesi’nden Binnur Görür “Yaşlı Kişiler için Geliştirilmiş Otonom Egzersiz Eğitmeni” ve Yeditepe Üniversitesi’nden Yrd.Doç.Dr.Ayşe Küçükylmaz “Dokunsal Etkileşim ile Öğrenen İşbirliği Robotları” konulu araştırma çalışmalarını aktardılar.

Dünyada katmanlı imalat teknolojisinin gelişmesiyle önemi hızla artan esnek robotik sistemlerle ilgili uygulamaların aktarıldığı “Esnek Robotik Sistemler” çalışmada, Wollongong Üniversitesi’nden Prof.Dr.Gürsel Alıcı, İstanbul Gedik Üniversitesi’nden Yrd.Doç.Dr.Savaş Dilibal, Yrd.Doç.Dr.Haydar Şahin ve Arş.Gör.Canberk Sözer, Wollongong Üniversitesi Elektromalzeme Mükemmeliyet Merkezi ile İstanbul Gedik Üniversitesi Robot Teknolojileri Uygulama ve Araştırma Merkezi (RTUM) Laboratuvarlarında yapılan ArGe çalışmalarını ve uygulamalarını katılımcılarla paylaştılar.

Ayrıca, Işık Üniversitesi’nden Yrd.Doç.Dr.Kerem Altun “Optimal kestirim ve kalman filtresinin matematiksel temelleri” ve Ortadoğu Teknik Üniversitesi’nden Doç.Dr.Sinan Kalkan “Derin öğrenme ve robotbilim uygulamaları” konularında detaylı eğitim verdiler.

Konferansın poster sunumları bölümünde, “Sürü robot sistemleri için piezo-eyleyicili tutucu tasarımı” konusundan “Baş ve boyun hareketleri ile motor kontrolü” konusuna kadar 10 ayrı başlıkta poster sunumu gerçekleştirildi.

Konferans katılımcılarının bir araya geldiği Gala Yemeğinde, İstanbul Gedik Üniversitesi Rektörü Prof.Dr.Berrak Kurtuluş, İstanbul Gedik Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Danışmanı ve Gedik Holding CEO’su Dr.Mustafa Koçak ve Mühendislik Fakültesi Dekanı Prof.Dr.Sunullah ÖZBEK tarafından, başta konferansın yapılmasında büyük destek sağlayan Gedik Holding Yönetim Kurulu Başkanı ve İstanbul Gedik Üniversitesi Mütevelli Heyet Başkanı Hülya GEDİK olmak üzere konferans sponsorları ve konferans hazırlıklarında katkı sağlayan akademisyenlere plaket verildi.

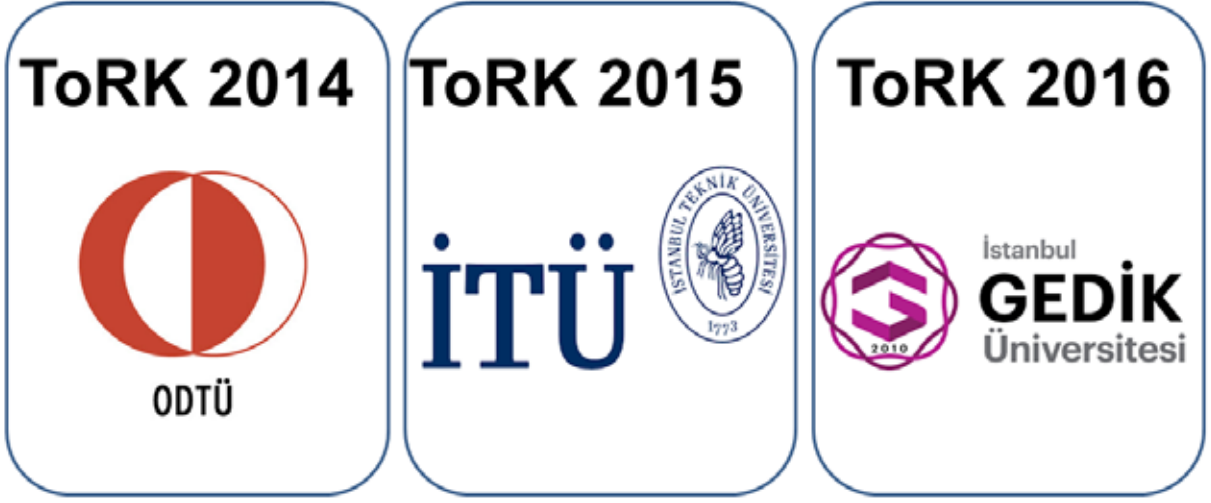
ToRK konferansları içinde bu yıl ilk defa, danışma kurulu tarafından seçilen en iyi üç özgün bildiri sahipleri, birer dizüstü bilgisayar ile ödüllendirildi. Birincilik ödülünü Okan Aşık ve Levent Akın “RoboCup Arama Kurtarma Benzetim Ortamında Monte Carlo Ağaç Araması Yöntemiyle Planlama” bildirisi ile, ikincilik ödülünü Sinan Şahin Candan, Uluç Saranlı ve Yiğit Yazıcıoğlu “Esnek Bacaklı robotlarda Dört-Çubuk Mekanizması ve Sarmalı Kam ile Bacak Sertliğinin Sentezlenmesi” bildirisi ile, üçüncülük ödülünü Mohammad Aziziaghdam, Koray Kuyucu, Remzi Artar ve Evren Samur “Investigating the Effect of Force Feedback on a Virtual Task” bildirisi ile aldı.

Konferansın bildiri sunumları ve çalıştaylarında aktif olarak temsil edilen üniversiteler: (Alfabetik sıraya göre) Bahçeşehir Üniversitesi, Bilkent Üniversitesi, Boğaziçi Üniversitesi, Çankaya Üniversitesi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, İstanbul Gedik Üniversitesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İzmir Yüksek Teknoloji Üniversitesi, Karabük Üniversitesi, Kemerburgaz Üniversitesi, Okan Üniversitesi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Özyeğin Üniversitesi, Marmara Üniversitesi, Sabancı Üniversitesi, Türk Hava Kurumu Üniversitesi, Yıldız Teknik Üniversitesi.

Konferansa katılım gösteren kurumlar: OTC Daihen, Gedik Kaynak, GeKa Robot, Festo, Gimatik, Gilbo Makina, Roketsan, Tofaş, Figes, İnovasyon Mühendislik, Penta Elektronik, Hugo Boss Tekstil A.Ş., Polin A.Ş., Sedef Tersanesi.

Yrd.Doç.Dr.Savaş DİLİBAL

ToRK-2016 Konferans Başkanı



Konferansın ilk günü toplu fotoğraf çekimi



İstanbul Gedik Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Danışmanı ve Gedik Holding CEO'su Dr.Mustafa Koçak'ın açılış konuşmaları



Konferans Başkanı ve İstanbul Gedik Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği Bölüm Başkanı Yrd.Doç.Dr.Savaş Dilibal'ın açılış konuşması



Avustralya Wollongong Üniversitesi'nden davetli konuşmacı olarak katılan Prof.Dr.Gürsel Alıcı'nın sunumu



Japonya OTC Daihen Endüstriyel Robot Firmasından davetli konuşmacı olarak katılan Shinichiro Nakagawa'nın sunumu



Konferans A Salonunda gerçekleştirilen sunumlardan görüntü



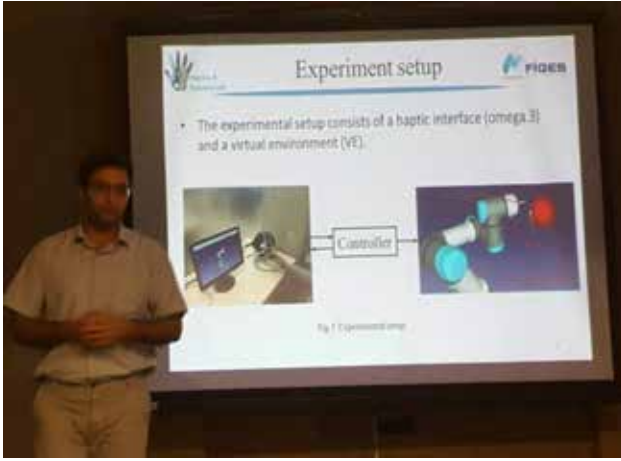
Konferans Gala Yemeğinde yapılan plaket töreninden görüntüler



Konferans sözlü bildiri sunumlarından



Konferans A Salonunda gerçekleştirilen sunumlardan



Konferans B Salonunda gerçekleştirilen sözlü sunumlardan



“Servis ve Sosyal Amaçlı Robotlar” konulu çalıştayda İstanbul Teknik Üniversitesi’nden Doç.Dr.Hatice Köse’nin sunumu



“Esnek Robotik Sistemler” çalıştayında Yrd.Doç.Dr.Savaş Dilibal’ın sunumu



“Tıp ve Rehabilitasyon Robotları” konulu çalıştayda Marmara Üniversitesi’nden Doç.Dr.Erkan Kaplanoğlu’nun sunumu



“Tıp ve Rehabilitasyon Robotları” konulu çalıştayda Boğaziçi Üniversitesi’nden Yrd.Doç.Dr.Evren Samur’un sunumu



“Servis ve Sosyal Amaçlı Robotlar” konulu çalıştay sonrası



Konferans Başkanları Yrd.Doç.Dr.Savaş Dilibal ve Yrd.Doç.Dr.Haydar Şahin, OTC Daihen Endüstriyel Robot Firmasından davetli konuşmacı olarak katılan Sistem Mühendisi Shinichiro Nakagawa ile



Konferansta görev alan İstanbul Gedik Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği öğrencileri ile



Konferans Başkanlarından ODTÜ Bilgisayar Müh. Öğretim Üyesi Doç. Dr. Erol Şahin'in sunumu



Konferans Gala Yemeđi



İstanbul Gedik Üniversitesi Rektörü Prof.Dr.Berrak Kurtuluş, Mühendislik Fak.Dekanı Prof.Dr.Sunullah Özbek ve Konferans Başkanı Yrd.Doç.Dr.Savaş Dilibal Konferans Organizasyon ve Tanıtım Komitesi ile

### **Konferans Başkanları**

Yrd. Doç. Dr. Savaş DİLİBAL - İstanbul Gedik Üniversitesi  
Doç. Dr. Erol ŞAHİN - Orta Doğu Teknik Üniversitesi  
Yrd. Doç. Dr. Haydar ŞAHİN - İstanbul Gedik Üniversitesi

### **Yerel Düzenleme Komitesi**

Prof. Dr. Sunullah ÖZBEK - İstanbul Gedik Üniversitesi  
Doç. Dr. Dilek KURT - İstanbul Gedik Üniversitesi  
Yrd. Doç. Dr. Savaş DİLİBAL - İstanbul Gedik Üniversitesi  
Yrd. Doç. Dr. Haydar ŞAHİN - İstanbul Gedik Üniversitesi  
Yrd. Doç. Dr. Özden ASLAN ÇATALTEPE - İstanbul Gedik Üniversitesi  
Yrd. Doç. Dr. Serpil BOZ - İstanbul Gedik Üniversitesi  
Yrd. Doç. Dr. Tuba KARAHAN - İstanbul Gedik Üniversitesi  
Yrd. Doç. Dr. Zeynep TASLIÇUKUR - İstanbul Gedik Üniversitesi  
Yrd. Doç. Dr. İlknur KOÇAŞ - İstanbul Gedik Üniversitesi  
Yrd. Doç. Dr. Murat DANIŞMAN - İstanbul Gedik Üniversitesi  
Doç. Dr. Gökhan BULUT - İstanbul Gedik Üniversitesi  
Yrd. Doç. Dr. Serpil YILMAZ - İstanbul Gedik Üniversitesi  
Arş. Gör. Canberk SÖZER - İstanbul Gedik Üniversitesi  
Arş. Gör. Çağrı ÇERÇİ - İstanbul Gedik Üniversitesi  
İskender BİRİNCİ - GeKa Robot Otomasyon Proses Yöneticisi

### **Program Komitesi**

Doç. Dr. Sinan KALKAN - Orta Doğu Teknik Üniversitesi  
Doç. Dr. Sanem SARIEL - İstanbul Teknik Üniversitesi

### **Danışma Kurulu**

Prof. Dr. Levent AKIN - Boğaziçi Üniversitesi  
Prof. Dr. Çağatay BAŞDOĞAN - Koç Üniversitesi  
Prof. Dr. Aydan ERKMEN - Orta Doğu Teknik Üniversitesi  
Prof. Dr. Veysel GAZİ - Kemerburgaz Üniversitesi  
Doç. Dr. Sinan KALKAN - Orta Doğu Teknik Üniversitesi  
Yrd. Doç. Dr. Erhan ÖZTOP - Özyeğin Üniversitesi  
Doç. Dr. Volkan PATOĞLU - Sabancı Üniversitesi  
Yrd. Doç. Dr. Uluç SARANLI - Orta Doğu Teknik Üniversitesi  
Doç. Dr. Sanem SARIEL - İstanbul Teknik Üniversitesi  
Doç. Dr. Erol ŞAHİN - Orta Doğu Teknik Üniversitesi

### **Workshop Komitesi**

Doç. Dr. Duygun EROL BARKANA - Yeditepe Üniversitesi  
Yrd. Doç. Dr. Ayşe KÜÇÜKYILMAZ - Yeditepe Üniversitesi  
Yrd. Doç. Dr. Berke GÜR - Bahçeşehir Üniversitesi  
Recep SÜTÇÜ - GeKa Robot Tasarım İmalat Yöneticisi  
Ali Kemal AYAR - GeKa Robot Otomasyon Yöneticisi

### **Onursal Başkanlar**

Prof. Dr. Berrak KURTULUS - İstanbul Gedik Üniversitesi Rektörü  
Dr. Mustafa KOÇAK - İstanbul Gedik Üniversitesi Bilim ve Tekn. Danışmanı - Gedik Holding, CEO

## **Bilim Kurulu**

Prof. Dr. Gürsel ALICI, Wollongong Üniversitesi Avustralya  
Doç. Dr. Hatice KÖSE İstanbul Teknik Üniversitesi  
Doç. Dr. Sinan KALKAN, Orta Doğu Teknik Üniversitesi  
Yrd. Doç. Dr. Berke GÜR, Bahçeşehir Üniversitesi  
Prof. Dr. Veysel GAZİ, Kemerburgaz Üniversitesi  
Prof. Dr. Nihat AKKUŞ, Marmara Üniversitesi  
Prof. Dr. Şeniz ERTUĞRUL, İstanbul Teknik Üniversitesi  
Prof. Dr. Feza KERESTECİOĞLU, Kadir Has Üniversitesi  
Prof. Dr. Abdülkerim KAR, Marmara Üniversitesi  
Doç. Dr. Sanem SARIEL, İstanbul Teknik Üniversitesi  
Doç. Dr. Tolga EREN, Kırıkkale Üniversitesi  
Dr. Haluk BAYRAM, Boğaziçi Üniversitesi  
Yrd. Doç. Dr. Erkan DURSUN, Marmara Üniversitesi  
Yrd. Doç. Dr. Turan ŞİŞMAN, Haliç Üniversitesi  
Yrd. Doç. Dr. Evren SAMUR, Boğaziçi Üniversitesi  
Yrd. Doç. Dr. Savaş DİLİBAL, İstanbul Gedik Üniversitesi  
Yrd. Doç. Dr. Haydar ŞAHİN, İstanbul Gedik Üniversitesi  
Yrd. Doç. Dr. Gökhan İNCE, İstanbul Teknik Üniversitesi  
Yrd. Doç. Dr. Esra KADIOĞLU, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi  
Yrd. Doç. Dr. Ali Emre TURGUT, Orta Doğu Teknik Üniversitesi  
Yrd. Doç. Dr. Mustafa KILIÇ Adana Bilim ve Teknoloji Üniversitesi  
Yrd. Doç. Dr. Cem EMEKSİZ Gaziosmanpaşa Üniversitesi  
Prof. Dr. Çağatay BAŞDOĞAN, Koç Üniversitesi  
Yrd. Doç. Dr. Erhan ÖZTOP, Özyeğin Üniversitesi  
Doç. Dr. Sırma YAVUZ, Yıldız Teknik Üniversitesi  
Yrd. Doç. Dr. Gökhan BAYAR, Bülent Ecevit Üniversitesi  
Prof. Dr. Işıl BOZMA, Boğaziçi Üniversitesi  
Doç. Dr. Erhan İlhan KONUKSEVEN, Orta Doğu Teknik Üniversitesi  
Yrd. Doç. Dr. Mehmet ERBAŞ, Kemerburgaz Üniversitesi  
Dr. Eren Erdal AKSOY, Karlsruhe Institute of Technology  
Doç. Dr. Ayşe KÜÇÜKYILMAZ, Yeditepe Üniversitesi  
Yrd. Doç. Dr. Buğra KOKU, Orta Doğu Teknik Üniversitesi  
Dr. Ozan ÇELİK, Colorado School of Mines  
Doç. Dr. Volkan PATOĞLU, Sabancı Üniversitesi  
Yrd. Doç. Dr. Albert Ali SALAH, Boğaziçi Üniversitesi  
Yrd. Doç. Dr. Emre UĞUR, Boğaziçi Üniversitesi  
Prof. Dr. Osman PARLAKTUNA, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi  
Yrd. Doç. Dr. Kerem ALTUN, Kemerburgaz Üniversitesi  
Doç. Dr. Esra ERDEM, Sabancı Üniversitesi  
Dr. Tekin MERİÇLİ, Carnegie Mellon University

# ToRK-2016 ÇALIŞTAYLARI

## A1. Tıp ve Rehabilitasyon Robotları Çalıştayı

### A1.1. Biyomekatronik ve Uygulama Alanları

**Konuşmacı: Doç.Dr. Erhan AKDOĞAN (Yıldız Teknik Üniversitesi - Mekatronik Müh. Bl)**

Biyomekatronik, mekanik, elektronik, bilgisayar ve tıp bilimleri ile ilişkili mekatroniğin alt çalışma alanlarından biridir. Biyomekatronik sistemlerin amacı; insan vücudunun desteklenmesi veya güçlendirilmesi, sorunlu vücut fonksiyonlarını yerine getiren mekanizmaların işler hale getirilmesi veya vücut fonksiyonlarını yerine getiren mekanizmaların işlevlerini bizzat yerine getirmektir. Bu çalıştayda biyomekatronik sistemler ve işlevleri tanımlanacak, uygulama alanları tanıtılarak, günümüzde ve gelecekte biyomekatroniğin önemi irdelenmiştir.

### A1.2. Robotik Kol Protezleri İçin Temas Hissi Geribesleme Sistemi

**Konuşmacı: Yrd. Doç. Dr. Evren SAMUR (Boğaziçi Üniversitesi - Makine Müh. Bl)**

Dokunma duyusunun kaybı, günümüz robotik kol protezlerinin en temel sorunudur. Dokunma hissinin, ellenen nesnelere ayırt etmede ne kadar önemli olduğu bilinmektedir. Bu konuşmada, protez bir elin nesnelere teması esnasında oluşan ivme sinyallerinin duysal geri bildirim olarak kullanıldığı bir yöntemden bahsedilmiştir. Robotik kol protez kullanıcıları için geliştirilmiş, omuza takılabilen bir haptik cihazı sunulmuştur.

### A1.3. Biyopsi İçin Ultrason Yönlendirmeli Robotik Sistem Geliştirilmesi

**Konuşmacı: Yrd. Doç. Dr. Özkan BEBEK (Özyeğin Üniversitesi - Makine Müh.Bl)**

Bu çalıştayda, Özyeğin Üniversitesi Robotik laboratuvarında geliştirilen ameliyat içi görüntüleme rehberliği ile yapılan iğneli cerrahi müdahalelerde kullanılacak robotik sistemi anlatılmıştır. Robotun yapısı ve denetiminin yani sıra tıbbi görüntü işleme ve sistem entegrasyonu konusunda bilgiler paylaşılmıştır.

### A1.4. Tasarımdan Üretime Biyosinyal Kontrollü Çoklu Kavramalı Üst Uzuv Protezi

**Konuşmacı: Doç.Dr. Erkan KAPLANOĞLU (Marmara Üniversitesi - Mekatronik Müh. Bl)**

Bu çalıştayda, bir üst uzuv protezi geliştirilirken nelere dikkat edileceği konusunda bilgiler sunulmuştur. Günlük yaşamda, gerekli olan hareket fonksiyonlarının protez tarafından nasıl karşılanabileceği ve kısıtlamalar göz önünde bulundurularak nasıl bir eyleyici seçilebileceği konuları irdelenmiştir. Protezin biyosinyal tabanlı kontrol sisteminin nasıl oluşturulacağı ile ilgili yol haritası

verilerek, örnek bir uygulama üzerinde detaylar açıklanmıştır. Ayrıca ülkemizdeki mevcut durum hakkında da bilgiler paylaşılmıştır.

## **A2. Türkiye’de Yerli Robota Doğru**

### **Konuşmacılar:**

**Yrd.Doç.Dr.Savaş DİLİBAL (İstanbul Gedik Üniversitesi Mekatronik Müh. Bl.)**

**Y.Müh.Bülent Çağatay ÖZÇELİK (GeKa Robot)**

**Y.Müh.Gökhan BERKER (Bana Teknoloji)**

**Müh.Önder TOKÇALAR (TOFAŞ - Üretim Süreç Arş. & İnovasyon Yöneticisi)**

Bu çalıştayda, Türkiye’de sanayinin ihtiyaçlarını karşılayabilecek işbirlikçi endüstriyel robot üretimi konusunda işbirlikleri ve atılması gereken adımlar detaylı olarak görüşülmüştür. İşbirlikçi endüstriyel robotlar ile ilgili günümüzdeki gelişmeler aktarılmıştır. GeKa Robot, İstanbul Gedik Üniversitesi, TOFAŞ ve Bana Teknoloji firması tarafından bu alanda yapılan çalışmalar ile ilgili detaylı bilgi verilmiştir. İşbirlikçi endüstriyel robot olarak tasarlanan yerli robotun alt sistemleri ve modülleri görüşülerek mekanik, elektrik, elektronik, kontrol ve yazılım modüllerinin yerleştirilmesi konusu ele alınmıştır.

## **A3. Esnek (Soft) Robotik Sistemler**

### **Konuşmacılar:**

**Prof.Dr.Gürsel ALICI (Avustralya Wollongong Üniv. Mkn, Malzeme ve Mekatronik Müh)**

**Yrd.Doç.Dr. Savaş DİLİBAL (İstanbul Gedik Üniversitesi - Mekatronik Müh. Bl)**

**Yrd.Doç.Dr. Haydar ŞAHİN (İstanbul Gedik Üniversitesi - Mekatronik Müh.Bl)**

**Arş Gör.Canberk SÖZER (İstanbul Gedik Üniversitesi - Mekatronik Müh. Bl)**

Robotik sistemlerde esnek hareket kabiliyeti manipülatör eklemlerinin ve uç işleyici olarak görev yapan gripper sistemlerinin kinematik yörüngesinde geleneksel eyleyiciler kullanılarak yapılabilen hareketler dışında farklı çalışma uzaylarının elde edilmesini sağlamaktadır. Bu sayede tasarımdan üretim ve uygulamaya kadar tüm alt parametrelerin bu sisteme göre geliştirilmesi gerekmektedir. Katmanlı imalat teknolojisinin esnek robotik sistemlerde kullanılması ile ilgili ArGe ve inovasyon çalışmaları İstanbul Gedik Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü bünyesinde devam etmektedir. Esnek robotik sistemlerin başta endüstriyel uygulamalar olmak üzere birçok alanda kullanılması konusunda, İstanbul Gedik Üniversitesi Robot Teknolojileri Uygulama & Araştırma Merkezi ve Avustralya Wollongong Üniversitesi Elektromalzeme Mükemmeliyet Merkezi ortak çalışmalara başlamıştır. Esnek robotik sistemlerle geliştirilen sistemin mekatronik tasarımını geleneksel katı model tasarımı ve kontrolünden farklı bir şekilde değerlendirmek gerekmektedir. Bu çalıştayda, polimerik malzemeler kullanılarak geliştirilen esnek robot sistemler, nikel-titanyum (NiTi)

şekil bellekli alaşımlar (ŞBA) ve pnömatik eyleyici sistemleriyle tahrik edilen esnek robotik sistemler örnek senaryolar içerisinde aktarılmıştır.

#### **A4. Servis ve Sosyal Amaçlı Robotlar Çalıştayı**

##### **A4.1. Dokunsal Etkileşim ile Öğrenen İşbirliği Robotları**

**Konuşmacı: Yrd. Doç. Dr. Ayşe KÜÇÜKYILMAZ (Yeditepe Üniv.- Bilgisayar Müh. Bl)**

Son yıllarda robotik alanındaki ilerlemeler ile algılayıcı ve eyleyici teknolojilerindeki gelişmeler, robotların tipik olarak kullanıldıkları kontrollü fabrika ortamlarından çıkarılıp insanlarla birebir etkileşimde çalışabilecek hale getirilmesine olanak sağlamaktadır. Bu kapsamda, insanlarla fiziksel işbirliği kurabilecek robotların tasarımı önem kazanmaktadır. Bu tarz robotlar, beraber çalıştıkları insanlar ile farklı duyular üzerinden doğal bir iletişim kurabilmeli, insanların amaç ve niyetlerini anlayabilmeli ve ne zaman işi yönetip ne zaman kontrolü insana bırakacaklarına dair bir görev dağılımı yapabilmelidir. Bu konuşmada, robotların insan davranış ve ihtiyaçlarına kolayca uyum sağlamasına izin verecek bazı makine öğrenmesi yöntemlerinden bahsedilmiştir.

##### **A4.2. İnsan Robot Etkileşiminde örnek bir uygulama: İTÜ Kütüphane Robotu - ARITAR**

**Konuşmacı: Doç. Dr. Hatice KÖSE (İstanbul Teknik Üniversitesi - Bilgisayar Müh.Bl)**

Bu çalıştayda İTÜ Multidisipliner Robotik Projesi "İTÜ Kütüphane Robotu" çalışması kapsamında farklı disiplinlerden gelen öğrencilerin oluşturduğu ortak bir insan-robot etkileşimi çalışması özetlenmiştir. Bu çalışma İnsan-Robot Etkileşimi doktora dersi kapsamında geliştirilmiştir.

##### **A4.3. Yaşlı Kişiler için Geliştirilmiş Otonom Egzersiz Eğitmeni Robotu**

**Konuşmacı: Binnur GÖRER (Boğaziçi Üniv. - Bilgisayar Müh. Bl)**

Çevre destekli yaşama kavramı, yaşlı kişilerin sağlıklı bir biçimde hayatlarına devam edebilmeleri için teknolojik çözümlerden faydalanmayı önerir. Bu çalışmada, başarılı yaşlanma hedefi çerçevesinde geliştirilen otonom egzersiz eğitmeni robotu anlatılmaktadır. Robot taklit etme yolu ile egzersiz hareketlerini bir insan eğitmenden öğrenir. Öğrendiği bu hareketleri yaşlı kişinin önünde sergileyerek onun da hareketleri yapmasını sağlar ve bu esnada yaşlı kişiyi izleyerek ona performansı hakkında sözlü geri bildirimlerde bulunur. Çalışmada kullanılan egzersiz hareketlerinin belirlenmesi ve yaşlılara uygun bir egzersiz programının hazırlanması için bir huzurevi ile beraber çalışılmıştır. Sistemin ön testleri bu huzurevindeki bir grup yaşlı ile yapılmış, kullanıcıların geri bildirimleri ve deneyler sırasındaki gözlemlerin analizlerine göre eksik görülen kısımlar geliştirilmiştir. Sistemin son testleri bir başka yaşam evindeki yaşlılar ile çoklu seanslar halinde yapılmıştır. Deneyler sırasında toplanan video kayıtları ve kullanıcıların anket bazlı değerlendirmeleri analiz edilerek sistemin genel performansı ölçülmüştür. Yaşlılar robotun asistanlığında egzersiz seanslarını başarılı bir biçimde tamamlamışlardır. Çoklu seanslar boyunca robotla etkileşime girme isteklerinde belirgin bir azalma görülmemiştir.

## **B1. Optimal Kestirim ve Kalman Filtresinin Matematiksel Temelleri Eğitimi**

**Eğitmen: Yrd. Doç. Dr. Kerem ALTUN (Işık Üniv. - Makine Mühendisliği Bl.)**

Bu eğitim oturumunda öncelikle statik kestirim kuramı bağlamında parametre kestirimi için optimal yöntemlerden bahsedilecek ve matematiksel temelleri açıklanmıştır. Daha sonra dinamik sistemlerde durum kestirimi problemi ele alınacak, statik kestirim yöntemleri genişletilerek ayrık doğrusal dinamik sistemler için Kalman filtresi denklemleri verilecek ve bu denklemlerin sezgisel olarak yorumu ve türetimi tartışılmıştır. Öğrencilere ilk karşılaşmalarında oldukça zor ve karmaşık gelen bu yöntem gerçek fiziksel sistemlerden örnekler ile berraklaştırılmıştır. Doğrusal olmayan modeller için temel Kalman filtresi modeli üzerine önerilmiş Genişletilmiş Kalman Filtresi ve Parçacık Filtresi yöntemlerine en temel seviyede giriş yapılmıştır.

## **B2. Derin Öğrenme ve Robotbilim Uygulamaları Eğitimi**

**Eğitmen: Doç. Dr. Sinan KALKAN (Orta Doğu Teknik Üniversitesi – Bilgisayar Müh.Bl.)**

Bu eğitimde derin öğrenme: özellikleri, yetenekleri, avantajları ve dezavantajları, yapay Sinir Ağları, denetimsiz öğrenme yöntemleri, evrimsel sinir ağları, dizi öğrenme/modelleme için çözümler ve robotbilimde derin öğrenmenin durumu ve geleceği açıklanmıştır.

## İÇİNDEKİLER

Önsöz.....	iii
Kurullar.....	xvi
Çalıştaylar.....	xviii
RehabRoby Sistemi için Fizik Tedavinin Zorluk Derecesinin Bireyin Duygusal Durumuna Göre Uyarlanması.....	1
Elektromekanik Kontrol Tahrik Sisteminin Matematiksel Modellenmesi ve Kontrolü.....	5
Robotların Manipülasyon Modellerini Öğrenmek için Nesnelerin Yönelimlerinde Bağlanım.....	9
Bükülebilir Sistoskop Sisteminin Tasarımı ve Deney Düzeneği.....	12
Önetkin Sosyal Bir Ortamda Derin Niyet Ortaya Çıkartmak İçin İnsan-Robot Etkileşimlerinin Kullanılması.....	16
Esnek Bacaklı Robotlarda Dört-Çubuk Mekanizması ve Sarmalı Kam ile Bacak Sertliğinin Sentezlenmesi.....	20
Alışveriş Merkezinde İnsan-Robot Etkileşimi İçin Bir Kontrollü Doğal Dil Yaklaşımı.....	24
Uygulamalı Eğitim Amaçlı Seri Elastik Eyleyici Tahrikli Robot.....	26
Active Body Weight Support with Inertia Compensation.....	28
Motion Control of a Kinetically Redundant Overground Device.....	30
Seri Eyleyici Tahrikli Esnek Robotik Bacakların Sanal Sönümlenme ile Senkronizasyonu.....	32
Endüstriyel Robot Programlamada Yeni Bir Yöntem.....	36
Hibrit montaj sistemleri orta yük kapasiteli robotlarda insan-robot etkileşimi.....	40
Rota Takibi ile Tek Bacaklı Zıplama Kontrolü.....	44
Bağlamın Hiyerarşik Doğası.....	48
Robotlarda Bağlam ve Kavram: Fazla Yakın, Çok Uzak.....	52
Okul Öncesi Eğitim için Mekatronik Sistem Tasarımı.....	56
Tek Bacaklı Zıplayan Bir Robot Platformu Geliştirilmesi Üzerine.....	60
Manyetik Rezonans Görüntülemesi Uyumlu Seri Elastik Eyleyici Tasarımı ve Kontrolü.....	64
Experimental Evaluation of Hybrid Conditional Planning for Service Robotics.....	66
Robotların Deneyimlerinden Sembolik Sayısal Kısıtları Öğrenmesi.....	69
Özyeğin Biopsy Robot: System Integration and Active Relative Motion Compensation.....	73
Visual Tracking of Targets in 2D Ultrasound Assisted Robotic Biopsies.....	77
Eksik Tahrikli Seri Eklemler Bir Robotun İzdüşüm Yöntemi ile Konum Kontrolü.....	81
Düzlemsel Pergel Yürüme Modelinin Bilekte Seri Yaylı Eyleyici ile Denetimi ve Kararlılığı.....	85
RoboCup Arama Kurtarma Benzetim Ortamında Monte Carlo Ağaç Araması Yöntemiyle Planlama.....	89

Kapalı Alanlarda Robot Konumlaması için Stereo Görüntüler ve Eylemsizlik Duyucusu Kullanılarak Kamera Yörüngesinin Kestirilmesi.....	93
Eksik Eyleyicili Kendini Dengeleyen Küresel Tekerlekli Mobil Robot için Yol Takibi ile Reaktif Hareket Planlaması.....	97
Bir Mars Gezgininin Mekanik Tasarımı.....	101
Bir Mars Gezgininin Denetimi için Elektronik Tasarım.....	105
Mikroakışkan Çip İçerisinde Yüzeyle Temas Etmeden Hareket Edebilecek Mikro Robot Üretimi ve Simülasyon Doğrulaması.....	109
Üç Serbestlik Dereceli Paralel Rehabilitasyon Eyleyicinin Ateş Böceği Algoritması Kullanılarak Boyutsal Olarak Eniyilemesi.....	112
Seri Elastik Tahrikli Dikey Zıplayan Robotun Karakterizasyonu ve Kontrolü.....	116
Mobil Robotlar için RF Tabanlı Hassas Konumlandırma Birimi Geliştirilmesi.....	119
Planör Tipi Katlanabilir İnsansız Hava Aracı.....	123
Dört Bacaklı Robotlar için Önizleme Kontrolü ve Sıfır Moment Noktası Esaslı Yürüyüş Yörüngesi Üretimi.....	127
Dört Bacaklı Robotlarda Merkezi Örüntü Üretici ve Genetik Algoritmalar ile Referans Sentezi.....	131
Katmanlı İmalat Tekniği Kullanılarak Endüstriyel Robot Gripper Üretimi ve Operatör Eklem Hareketleri ile Manipülasyonu.....	135
Investigating the Effect of Force Feedback on a Virtual Task.....	138
EMG Tabanlı El Hareketlerinin Sınıflandırılması ile Mobil Robot Kontrolü.....	142
Akıllı Tekerlekli Sandalye Uygulaması için Üçlü Etkileşimde Yardımın Gösterimden Öğrenilmesi.....	146



# RehabRoby Sistemi için Fizik Tedavinin Zorluk Derecesinin Bireyin Duygusal Durumuna Göre Uyarlanması

Yunus Palaska, Fatih Özkul, Duygun Erol Barkana  
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü  
Yeditepe Üniversitesi  
İstanbul, Türkiye

Email: yunuspalaska@gmail.com, fatihozkul85@gmail.com, duygunerol@yeditepe.edu.tr

**Özetçe—***Bu bildiri, deneklerde üst-ekstremité rehabilitasyonu için daha önceden TÜBİTAK 108E190 no'lu proje kapsamında üretimi gerçekleştirilen robot-destekli rehabilitasyon sistemi RehabRoby ile fizik tedavi sırasında, denegin duygusal durumunu değerlendiren, fizik tedavi egzersizin zorluğunu uyarlamalı bir şekilde değiştirebilen, denek için en uygun fizik tedavi programının belirlenmesine imkan sağlayarak denegin memnuniyetini arttırmayı amaçlayan sistem hakkında bilgi verilmektedir.*

**Anahtar Kelimeler—***robot-destekli rehabilitasyon sistemleri, üst-ekstremité rehabilitasyonu, biyogeribildirim algılayıcılar, makine öğrenme algoritmaları.*

## I. GİRİŞ

Ortopedik ve nörolojik hastalık, sinir sisteminin zedelenmesi ve kazalar sonucunda kas, iskelet ve eklemlerin işlevlerini yerine getirememesidir. Sinir sisteminin zedelenmesi kas sisteminin işlevini yerine getirmesini engeller, ve bunun sonucunda hastalarda yürüme ve kollarını eşgüdömlü şekilde hareket ettirme sorunları görülür. Ortopedik ve nörolojik hastalığı olan denekler, motor işlevlerini ve gerileyen fonksiyonlarını tekrar kazanabilmeleri için yoğun fizik tedavi programlarına katılmaktadırlar. Ancak bu tür fizik tedavi programlarının hastalara uygulanması sırasında fizik tedavi uzmanlarının ve fizyoterapistlerin harcaması gereken zaman artmakta, ve bu da tedavi maliyetlerinin artmasına neden olmaktadır. Ayrıca fizik tedavi uzmanının kontrol edilebilir, tekrarlanabilir ve ölçülenebilir hareket desteği vermesi de oldukça güç bir iştir.

Robot-destekli rehabilitasyon sistemlerinin kullanımının fiziksel tedaviye kıyasla daha etkin rol oynayabileceği, ve bu robot destek sistemlerin kontrol edilebilir, tekrarlanabilir ve ölçülebilir hareket desteği verebileceği klinik çalışmalarca gösterilmiştir. Ancak, çoğu robot-destekli rehabilitasyon sisteminin fizik tedavi sırasında hastaların ne hissettiklerini yani duygusal durumlarını (sıkılma, stres v.b.) göz önünde bulundurmadıkları gözlenmiştir. Halbuki,

Türkiye Robotbilim Konferansı, 2016

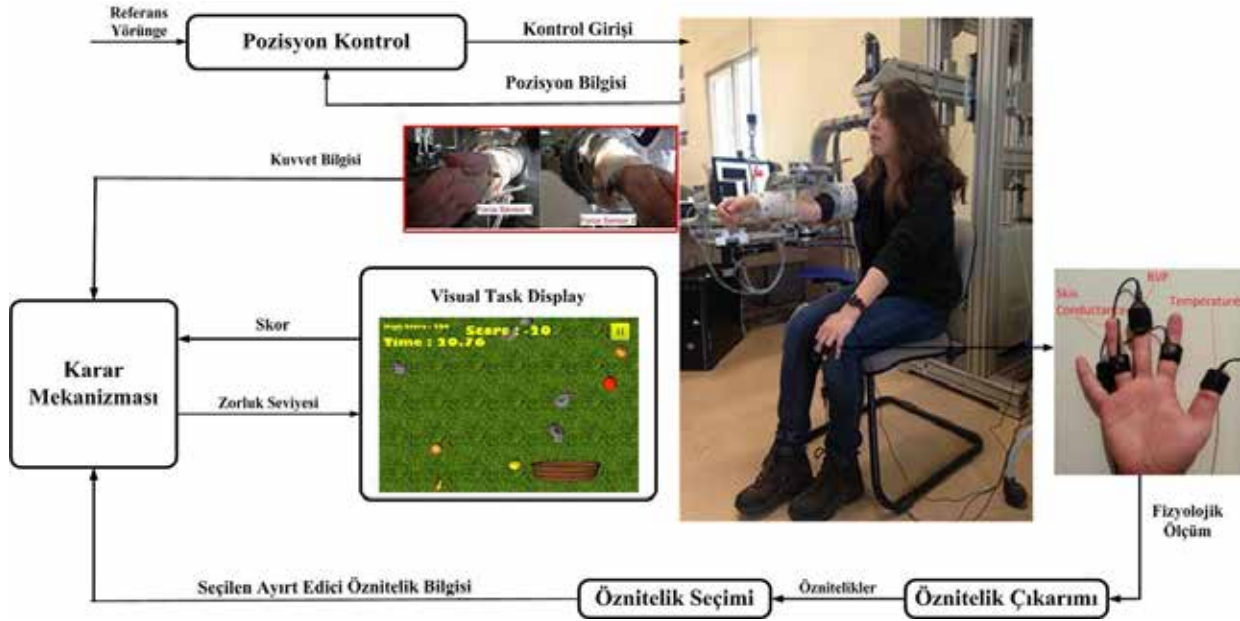
son yıllarda hastaların fizik tedaviye olan ilgilerinin ve motivasyonlarının değerlendirilmesinin fizik tedavi sürecinin başarılı olması için önemli bir faktör olduğu birçok çalışmada gösterilmiştir.

Duygu tanıma insan-makine (robot) etkileşiminde ilgi çeken güncel bir araştırma konusudur. Duygu tanıma için bireyin sesinden, yüzünden ve/veya hareketlerinden faydalanılacağı gibi vücudun fizyolojik tepkilerinden de faydalanılabilir. Son yıllarda robot-destekli rehabilitasyon sistemleri ile fizik tedavi sırasında hastanın duygusal durumu da kontrol döngüsünün içine dahil edilmeye başlanmıştır. Duygular istemsiz sinir sistemi tepkilerini etkiler (Kalp atış hızı, solunum, deri sıcaklığı gibi). Hastanın fizik tedavi programı sırasındaki duygusal durumunu değerlendirmek, egzersiz çeşidi veya zorluğunu kişiye uygun değiştirmek, her hastaya uygun egzersizi uygulamak, ve dolayısıyla daha verimli bir rehabilitasyon süreci sağlamak mümkündür.

Bu çalışmada, üst-ekstremité rehabilitasyonu için geliştirilmiş robot-destekli rehabilitasyon sistemi RehabRoby ile fizik tedavi sırasında, denegin duygusal durumunu değerlendiren, fizik tedavi egzersizin zorluğunu uyarlamalı bir şekilde değiştirebilen, denek için en uygun fizik tedavi programının belirlenmesine imkan sağlayarak denegin memnuniyetini arttırmayı amaçlayan sistem hakkında bilgi verilecektir.

## II. GENEL MİMARİ

Deneklerin duygusal duruma göre rehabilitasyon işlerinin zorluk derecesini değiştirecek sistemin genel mimarisi Şekil 1'de görülmektedir. Şekil 1'de görüldüğü gibi deneklerden RehabRoby'i kullanarak rehabilitasyon görevine benzeyen bir oyunu oynamaları istenmektedir. İlk önce oyun sırasında biyogeribildirim algılayıcılardan alınan verilerden deneklerin fizyolojik verileri ölçülüp, bu veriler işlendikten (öznitelik çıkarımı, öznitelik seçimi) sonra ayırt edici öznitelikler çıkarılmaktadır. Ayırt edici öznitelik değeri, ve oyun performansı (skor) çıkarımları, zorluk ayarlama mekanizması ile deneye uygun bir sonraki zorluk seviyesini belirlemede kullanılmaktadır.



Şekil 1: Zorluk Derecesi Uyarlanabilir Robot-Destekli Rehabilitasyon Sistem Mimarisi

### III. REHABROBY

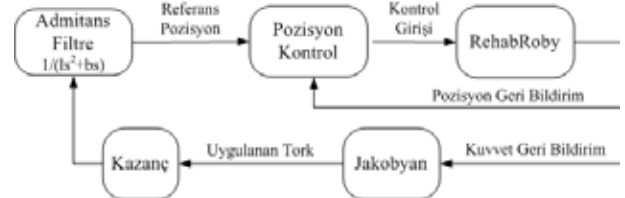
Bu çalışmada dış iskelet (ekzoskeleton) tip bir robot destekli rehabilitasyon sistemi olan RehabRoby kullanıldı (Şekil 1) [1]-[4]. RehabRoby pasif mod, aktif-yardımlı mod ve dirençli mod terapi uygulayabilecek, farklı boy ve kol uzunluklarındaki insanlar için kolayca ayarlanabilecek, hem sağ hem de sol kol rehabilitasyonu için kullanılabilir şekilde tasarlandı. RehabRoby omuz hareketleri olan ekstansiyon, fleksiyon, abduksiyon, adduksiyon, iç ve dış rotasyon; ön kol pronasyon ve süpinasyon ile birlikte günlük yaşam aktiviteleri için gerekli olan hareketlerin kombinasyonlarını sağlayabilmektedir. RehabRoby için hareket aralıkları, eklemlerinin hızları ve ivmeleri iki günlük yaşam aktivitesi (çorba ve kahve içme) sırasında sağlıklı katılımcıların yaptıkları hareketlerin ölçümleri kullanılarak belirlendi.

RehabRoby'ye omuz ve önkolu destekleyen termoplastik bir kol ateli tasarlanarak eklendi. Velkro bantlar yardımıyla kola takılan atel, katılımcıların kol uzunluğuna göre ayarlanabilmektedir. Bol geldiği durumda ise, ilave yumuşak malzeme (plastazote) ile aradaki boşluk giderilerek uyumu sağlanmakta, ve bu şekilde olası hareket kaybı önlenmektedir (Şekil 1). Atelin önkol parçasının dorsal yüzü ile cilt arasına ekstansör kaslar üzerine Kistler marka bir kuvvet algılayıcısı (9313AA1) yerleştirildi. Sistemin güç kaynağına bağlanması ile sistemdeki elektriksel kesintilerden meydana gelebilecek çökmeler engellendi deneklerin güvenliği sağlandı. RehabRoby'yi herhangi bir anda devre dışı bırakabilmek için ise acil durum düğmesi sisteme dahil edildi.

RehabRoby'nin yazılımında hızlı ve kolay sistem geliştirilmesine imkan sağlayan Matlab Simulink/Realtime Workshop kullanıldı. Bilgisayar ve diğer elektriksel

donanım arasında gerçek zamanlı iletişimi sağlaması için Humusoft Mf624 model veri toplama kartı seçildi. RehabRoby'nin eklemlerinin hareketi için Maxon model fırçalı doğru akım motorları tercih edildi. Eklemlerinin pozisyon ölçümlerinde yüksek hassasiyet elde edebilmek için yüksek çözünürlüklü dijital artımlı enkoderler DC motorlar ile birleştirildi.

RehabRoby'nin alt düzey denetçisi olarak kullanılan iç pozisyon kontrol döngüsünü de içeren admitans kontrol blok şeması Şekil 2'de görülmektedir [1]-[4].



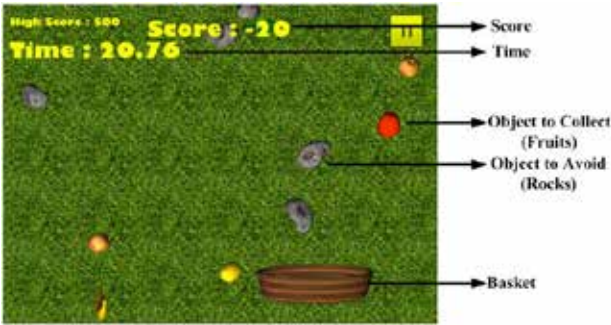
Şekil 2: RehabRoby'nin alt düzey denetçisinde admitans filtre ile referans pozisyon oluşturulması

### IV. OYUN

Deneğin RehabRoby ile fizik tedavisi sırasında duygusal durumunu değiştirebilecek, ve aynı zamanda RehabRoby ile fizik tedavi hareketlerini gerçekleştirebileceği meyve yakalama oyununu tasarlanmış, ve RehabRoby'e entegre edildi. Meyve yakalama oyunu sepet, meyveler ve kayalar içermektedir [5]. Oyun çeşitli parametrelerden oluşmaktadır. Bu parametreler şunlardır: sepet hızı, sepet büyüklüğü, meyve sayısı, meyvelerin düşüş hızı, kaya sayısı, kayaların düşüş hızı, ortaya çıkmak için bekleme süresi, ve dalga bekleme süresi. Ek olarak, deneği motive etmek için, deneğe elde ettiği skorlarda ekranda gösterilmektedir. Oyunda deneklerin duygularının sıkılma ile stres duyguları arasında

değişmesi için basitten başlayan giderek zorlaşan farklı seviyeler tanımlanmıştır. Bu zorluk seviyelerini belirlerken yukarıdaki parametrelerin değerleri değiştirildi. Örneğin, seviyeyi zorlaştırmak için kayaların düşüş hızları ve sayısı artırıldı.

Oyunda meyveler ve kayalar sürekli olarak düşmektedir. Şekil 3’ de görüldüğü gibi, deneklere meyveleri toplamaları ve kayaları yakalamamaları istendi. Oyunun amacı, sepeti hareket ettirerek meyveleri yakalamak ve kayalardan kaçmaktır. Denek her topladığı meyve karşılığında 10 puan kazanıyor, ve her topladığı kaya karşılığında 20 puan kaybediyor. Denek, RehabRoby robotunda dirsek fleksiyon ve ekstansiyon hareketini yaparak meyve yakalama oyunundaki sepetin hareketini gerçekleştirmektedir. Denek RehabRoby robotunda fleksiyon hareketini gerçekleştirdiğinde oyunda sepet sola doğru hareket etmektedir. Aynı şekilde, denek RehabRoby robotunda ekstansiyon hareketini gerçekleştirdiğinde, oyundaki sepet sağa doğru hareket etmektedir. Başlangıçta, sepet monitörün tam ortasında yer almaktadır. Bu yüzden, denek oyuna başlarken RehabRoby sisteminde kollarının konumu 45° lik açıdadır ve oyuna bu şekilde başlamaktadır. İnsan anatomisi gereği kolu 0° ile 90° arasında hareket etmektedir. Örneğin; deneğin kolu 0° ise oyundaki sepetin konumunda en soldadır.



Şekil 3: Oyun Görsel Arayüzü

#### IV. ÖZNETELİK ÇIKARIMI VE ÖZNETELİK SEÇİMİ

Yüz, ses ve / veya jestler daha önce yapılan çalışmalarda duygu tespiti için kullanılmıştır [6]. Bir kişinin konuşma, jest ya da yüz ifadeleri ile hissettiği duyguları tam olarak ifade etmesi bazen mümkün olmayabilir. Bu durumda, fizyolojik sinyallerdeki değişimlere bakılarak duygu durumunun tespitinin daha iyi bir sonuç verebileceği daha önce yapılan çalışmalarda gösterilmiştir. Birçok çalışmada fizyolojik sinyalleri elde etmek, ve insan-bilgisayar etkileşimindeki duyguları tespit etmek için biyogeribildirim algılayıcıları kullanılmıştır. Robot-destekli rehabilitasyon çalışmaları sırasında, kan basıncı, deri iletkenliği, deri sıcaklığı algılayıcıları yardımıyla hastaların duygusal durumu (heyecanlı, aşırı

stresli, sıkılmış) sınıflandırılmıştır [7],[8]. Fizyolojik tepkilerin (kalp atışı, deri iletkenliği cevabının frekansı, solunum hızı) ölçülmesiyle hastanın duygusal durumu (uyarılma-değerlik) rehabilitasyon ortamında tahmin edilmiştir [9]. Terapinin adaptif ve dinamik olarak değişimi için nabız, deri iletkenliği, deri sıcaklığı bilgileri kullanılmıştır [10]. Bizim sistemimizde deri iletkenliği, deri sıcaklığı ve kan hacmi algılayıcıları kullanıldı, ve bu algılayıcılardan öznetelikler çıkarıldı.

Kan hacmi orta parmağın üzerine yerleştirilen Şekil 1 de görüldüğü gibi BVP Flex-Pro algılayıcısı kullanılarak kaydedildi. Deri iletkenliği deri iletkenliği algılayıcısı kullanılarak kaydedildi. Deri iletkenliği algılayıcısında, elektrotlar işaret parmağı ile yüzük parmağının orta kısmına takıldı (Şekil 1). Deri sıcaklığı başparmağın parmak ucuna takılan bir sıcaklık algılayıcısı kullanılarak kaydedildi. Algılayıcılar giyilebilir, hafif, non-invasive ve FDA onaylıdır. Fizyolojik sinyaller Procomp Infinity Encoder ve MATLAB yazılımı kullanılarak 20 Hz örnekleme alınarak kaydedildi.

Bu çalışmada kullanılan deri iletkenliği tepkisi, ortalama deri iletkenliği, deri iletkenliğinin varyansı, ortalama deri iletkenliğinin türevi öznetelikleri deri iletkenliği algılayıcı verisinden elde edildi. Ortalama deri sıcaklığı, deri sıcaklığının varyansı, ortalama deri sıcaklığının türevi öznetelikleride deri sıcaklığı algılayıcı verisinden bulundu. Nabız, interbeat aralığının standart sapması, kan hacminin toplam gücü, çok düşük frekans ( $0 < f < 0.04$ ), düşük frekans ( $0.04 < f < 0.15$ ), yüksek frekans ( $0.15 < f < 0.4$ ), düşük frekansın yüksek frekansa oranı, çok düşük frekansın toplam güce oranlanması sonucunda oluşturulan çok düşük frekansın yüzdesi, düşük frekansın toplam güce oranlanması sonucunda oluşturulan düşük frekansın yüzdesi, yüksek frekansın toplam güce oranlanması sonucunda oluşturulan yüksek frekansın yüzdesi, düşük frekansın normu, yüksek frekansın normu, frekansların oranı, ortalama kan hacmi, kan hacminin varyansı, ortalama kan hacminin türevi öznetelikleride kan basıncı algılayıcı verisinden çıkarıldı. 2 yönlü ANOVA testi kullanılarak hangi özneteliklerin ayırt edici olduğuna karar verildi.

#### IV. KARAR MEKANİZMASI

RehabRoby ile yapılacak rehabilitasyon egzersizinin zorluk düzeyinin kullanıcıyı motive edecek fakat aşırı zorlamayacak şekilde ayarlanması için “Kısmi Sıralı Küme Yönetici” (Partially Ordered Set Master) algoritmasının kullanıldı [11]. Bu algoritma egzersiz boyunca yapılan gözlemleri değerlendirerek uygun zorluk ayarlarını tahmin etmektedir. Kısmi sıralı küme yönetici algoritması birbirleri arasında “daha zor” formunda bir ilişki bulunan zorluk ayar kümesine ihtiyaç duyar. Bu ilişki RehabRoby ile yapılan rehabilitasyon egzersizlerinde tanımlanabilmektedir.

Kısmi sıralı küme yönetici algoritmasının diğer yaklaşımlara göre çevrimdışı alıştırma ve deneğin davranışı hakkında arka plan bilgisi gerektirmemesi, algoritmanın farklı oyunlar ve oyun türlerine kolay bir şekilde aktarılabilir olması, ve algoritmanın uygun ayarı öğrenmeden önce yapabileceği maksimum hata sayısı teorik olarak garanti edilmesi gibi üç ana avantajı bulunmaktadır. Kısmi sıralı küme yönetici algoritmasında zorluk düzeyinin dinamik olarak ayarlanma problemi “yönetici” ve “oyuncu” arasında oynanan oyun olarak tanımlanır. Oyun sırasıyla şu üç adımdan oluşur:

- Yönetici bir zorluk ayarı tahmin eder
- Denek egzersizi belirli bir süre içerisinde bu ayarda gerçekleştirir
- Yönetici bu zorluk seviyesinin deneğe uygunluğu ile ilgili geri bildirim alır.

Bu geri bildirim şu bilgilerden birini içerir, i) sıkılma-tahmin edilen zorluk ayarı yeterli değildir, ii) motive- tahmin edilen zorluk ayarı denek için uygundur, ve iii) aşırı zorlanma- tahmin edilen zorluk ayarı deneğin beceri düzeyinin üzerindedir. Bu adımlar egzersiz sonuna kadar devam eder ve yöneticinin görevi deneği mümkün olduğunca uygun zorluk ayarında tutmaktır.

Kısmi sıralı küme yönetici algoritmasının amacı sonlu sayıdaki kısmi sıralı olası ayarlar kümesinden  $(K, \geq)$  doğru ayarı tahmin etmektir. Sıralama  $\forall i, j \in K$  için eğer  $i > j$  ise  $i, j$ ' den daha zor olacak şeklindedir. Algoritmanın gözlemediği olası cevaplar şunlardır:

- +1 ; zorluk düzeyi “sıkılma” durumunda
- 0 ; zorluk düzeyi “motive” durumunda
- 1 ; zorluk düzeyi “aşırı zorlanma” durumunda

Algoritmanın gözlemediği olası cevaplardan bir diğeride ayırt edici öznelik değerleride değerlendirilip deneğe uygun zorluk seviyesi belirlemektir.

#### IV. GELECEK ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada sunulan genel mimaride belirtilen biyogeribildirim algılayıcı verilerini kullanarak deneklerin duygusal durumunu tahmin edip bu duruma uygun egzersiz zorluk seviyesinin belirlenmesinin gerçek zamanlı deneyleri üzerinde çalışmalar devam etmektedir.

#### TEŞEKKÜR

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından 114E614 no' lu proje kapsamında desteklenmiştir.

#### KAYNAKÇA

[1] F. Ozkul, D. Erol Barkana, “Upper-Extremity Rehabilitation Robot RehabRoby: Methodology, Design, Usability and Validation”, International Journal

of Advanced Robotic Systems, vol.10, no.401, pp.1-13, 2013a.

- [2] F. Ozkul, D. Erol Barkana, “A Robot-Assisted Rehabilitation System–RehabRoby”, in Interdisciplinary Mechatronics: Engineering Science and Research Development, M. K. Habib, J. Paulo Davim, Eds. New York: Wiley, 2013b, pp. 145-162.
- [3] F. Ozkul, D. Erol Barkana, E. Masazade, “Admittance filter parameter adjustment of a robot-assisted rehabilitation system (RehabRoby)” in Proceedings 2nd Int. Conf. on Mechatronics and Robotics Engineering, 2016.
- [4] F. Ozkul, D. Erol Barkana, S. B. Demirbas, S. Inal, “Evaluation of elbow joint proprioception with rehabroby: a pilot study” Acta orthopaedica et traumatologica turcica, vol. 46, no. 5, pp. 332–338, 2012.
- [5] H. Erdogan and H. K. Ekenel, “Game design for physical therapy and rehabilitation using kinect,” in Medical Technologies National Conference (TIPTEKNO), 2015. IEEE, 2015, pp. 1–4.
- [6] S. Koelstra, C. Muhl, M. Soleymani, J.-S. Lee, A. Yazdani, T. Ebrahimi, T. Pun, A. Nijholt, and I. Patras, “Deap: A database for emotion analysis; using physiological signals,” IEEE Transactions on Affective Computing, vol. 3, no. 1, pp. 18–31, 2012.
- [7] A. Koenig, X. Omlin, L. Zimmerli, M. Sapa, C. Krewer, M. Bolliger, F. Muller, and R. Riener, “Psychological state estimation from physiological recordings during robot-assisted gait rehabilitation”, J Rehabil Res Dev, vol. 48, no. 4, pp. 367–86, 2011.
- [8] A. Koenig, D. Novak, X. Omlin, M. Pulfer, E. Perreault, L. Zimmerli, M. Mihelj, and R. Riener, “Real-time closed-loop control of cognitive load in neurological patients during robot-assisted gait training”, IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, vol. 19, no. 4, pp. 453–464, 2011.
- [9] M. Mihelj, D. Novak, and M. Munih, “Emotion-aware system for upper extremity rehabilitation”, in Virtual Rehabilitation International Conference, 2009. IEEE, 2009, pp. 160–165.
- [10] F. J. Badesa, R. Morales, N. Garcia-Aracil, J. M. Sabater, C. Perez- Vidal, and E. Fernandez, “Multimodal interfaces to improve therapeutic outcomes in robot-assisted rehabilitation”, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, vol. 42, no. 6, pp.1152–1158, 2012.
- [11] L. Ilici, J. Wang, O. Missura, T. Gartner, “Dynamic Difficulty for Checkers and Chinese Chess”, IEEE Conference on Computational Intelligence and Games (CIG), 2012, pp. 55 – 62.

# Elektromekanik Kontrol Tahrik Sisteminin Matematiksel Modellenmesi ve Kontrolü

Ümit Yerlikaya  
BLS-Sistem Mekanik Tasarım Birimi  
Roketsan A.Ş.  
Ankara, Türkiye  
Email: umit.yerlikaya@roketan.com.tr  
umit.yerlikaya@metu.edu.tr

Tuna Balkan  
Makina Mühendisliği Bölümü  
Orta Doğu Teknik Üniversitesi  
Ankara, Türkiye  
Email: balkan@metu.edu.tr

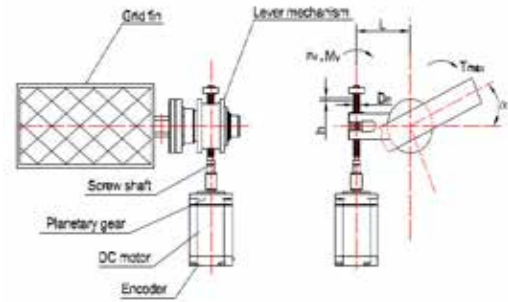
*Elektromekanik eyleyiciler uçak ve füzelerde olmak üzere birçok uygulamada sıklıkla kullanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında, fırçasız doğru akım motoru, bilyalı vida ve kaldıraç mekanizmasından oluşan bir elektromekanik kontrol tahrik sistemi ele alınmıştır. Bu tip kontrol tahrik sistemlerinde, kaldıraç mekanizmasının kendisinden, limitlerden, Coulomb sürtünmelerinden, boşluklardan ve kaldıraçın ilk montaj konumlanmasından kaynaklanan bazı doğrusal olmayan durumlar ve simetri bozuklukları mevcuttur. Kontrolcü tasarımı ve kontrolcü parametrelerinin en iyilenmesi için tüm hareket denklemleri türetilmiş, sistemin ayrıntılı doğrusal ve doğrusal olmayan matematiksel modelleri elde edilmiştir. Bu parametreler, doğrusal olmayan model kullanılarak MATLAB Response Optimization Tools yardımıyla elde edilmiştir. Kaldıraç mekanizmalı ve bilyalı vidalı elektromekanik kontrol tahrik sisteminin ilk prototipi üretilmiştir ve prototip üzerinde gerçek zamanlı testler yapılarak doğrusal olmayan benzetim modeli doğrulanmıştır.*

**Anahtar Kelimeler:** Kontrol Tahrik Sistemi, Elektromekanik Eyleyici, Fin, Fırçasız Doğru Akım Motor Kontrolü, Cevap Eniyileme, PID

## I. GİRİŞ

Kontrol tahrik sistemi (KTS) güdümlü füzelerde kullanılan en önemli alt sistemlerden biridir. KTS'nin kullanılma amacı füzenin hedefe yönlendirilmesi için kontrol yüzeylerini istenilen konuma getirmektir [1], [2], [3]. Havacılık ve savunma sistemlerinde elektromekanik, elektrohidrolik ve elektrohidrostatik KTS'ler kullanılmaktadır. Servo motor teknolojisinin gelişmesi ile beraber elektromekanik eyleyiciler sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır. [1], [2] ve [3] numaralı referanslardaki benzer çalışmalarda, sistemde kanard konumuna göre değişen aktarma oranı, sabit alınarak modelleme yapılmıştır. Bu çalışmada ise aktarma oranı kanard konumuna göre değişen bir şekilde kinematik ilişkiler tanımlanmış ve kontrolcü parametreleri bu doğrusal olmayan model kullanılarak MATLAB en iyileme araçları yardımıyla elde edilmiştir. Bu çalışma kapsamında, **Şekil 1**'deki sisteme benzer, fırçasız doğru akım motoru, bilyalı vida ve kaldıraç mekanizmasından oluşan bir elektromekanik KTS'nin matematiksel modellenmesi ve gerçek zamanlı kontrolü ele alınmıştır. Sistemin doğrusal

ve doğrusal olmayan matematiksel modeli elde edilmiş olup, bu modellerin doğrulanması için sistemin ilk prototipi üretilmiştir. Üretilen prototip üzerinde yapılan gerçek zamanlı testler sonucunda doğrusal olmayan model ile gerçek zamanlı test sonuçları karşılaştırılmıştır.



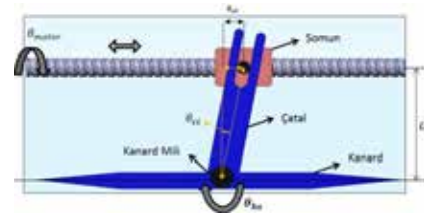
**Şekil 1: Elektromekanik KTS [1]**

## II. MATEMATİKSEL MODEL

Elektromekanik KTS'nin detaylı matematiksel modeli, mekanik ve elektriksel olmak üzere iki bölümden oluşmaktadır. Mekanik bölüm, sistem kinematiğinin çözümü ve hareket denklemlerini yazılması ile oluşturulmuştur. Elektriksel bölümde ise doğru akım fırçasız motoru ve motor sürücüsü ele alınmaktadır.

### Mekanik Bölüm

Doğru akım motor rotoru dahil tüm sistem incelenmiş ve hareket denklemleri yazılmıştır. Kinetik çözümlmeye başlamadan önce mekanizmalar arasındaki kinematik ilişkiler **Şekil 2**'deki gibi tanımlanmıştır.



**Şekil 2: KTS'nin İlk Konumu [3]**

**Şekil 2**'deki kinematik ilişkiler incelendiğinde ;

Motor ve kanard açısı arasındaki ilişki denklem (1)'deki gibi bulunabilmektedir.

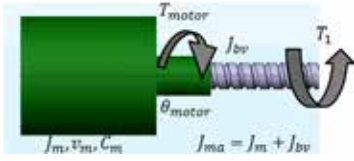
$$\theta_{motor} = \frac{1}{\lambda} [\tan(\theta_{ka} + \theta_{ci}) d - x_{si}] \quad (1)$$

Motor ve kanard açısal hız ve ivmeleri arasındaki ilişkiler ise denklem (1)'in sırasıyla birinci ve ikinci türevleri alınarak denklem (2) ve (3)'teki gibi bulunabilmektedir.

$$\dot{\theta}_{motor} = \frac{d}{\lambda} \left[ \frac{1}{\cos^2(\theta_{ka} + \theta_{ci})} \right] \dot{\theta}_{ka} \quad (2)$$

$$\ddot{\theta}_{motor} = \frac{d}{\lambda} \left[ \frac{\ddot{\theta}_{ka} \cos^2(\theta_{ka} + \theta_{ci}) + \dot{\theta}_{ka}^2 \sin(2\theta_{ka} + 2\theta_{ci})}{\cos^4(\theta_{ka} + \theta_{ci})} \right] \quad (3)$$

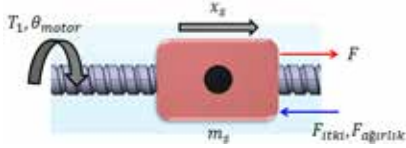
Hareket denklemleri yazılırken sistemdeki tüm bileşenler ayrı ayrı incelenmiştir.



Şekil 3: Motor ve Bilyalı Vida İkilisi

Şekil 3'teki bileşenler için hareket denklemleri denklem (4)'teki gibi yazılmıştır.

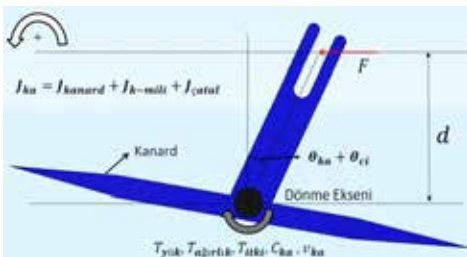
$$T_1 = T_{motor} - C_m \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_{motor}) - J_{ma} \ddot{\theta}_{motor} - v_m \dot{\theta}_{motor} \quad (4)$$



Şekil 4: Bilyalı Vida ve Somun İkilisi

Şekil 4'teki bileşenler için hareket denklemleri denklem (5)'teki gibi yazılmıştır.

$$F = \frac{T_1}{\lambda} - \lambda m_s \ddot{\theta}_{motor} + F_{itki} + F_{ağırlık} \quad (5)$$



Şekil 5: Kanard, Kanard Şaftı ve Çatal Üçlüsü

Şekil 5'teki bileşenler için hareket denklemleri denklem (6)'daki gibi yazılmıştır.

$$F = \frac{1}{d} [T_{yük} + T_{itki} + T_{ağırlık} + C_{ka} \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_{ka}) + v_{ka} \dot{\theta}_{ka} + J_{ka} \ddot{\theta}_{ka}] \quad (6)$$

Denklem (4)'teki  $T_1$  ifadesi denklem (5)'e girildiğinde elde edilen  $F$  değeri ile denklem (6)'daki  $F$  değerlerinin

eşitlenmesiyle tüm sistemin doğrusal olmayan hareket denklemleri denklem (7)'deki gibi bulunmuştur.

$$\begin{aligned} \lambda (J_{ka} \ddot{\theta}_{ka} + v_{ka} \dot{\theta}_{ka}) + d [(J_{motor} + m_s \lambda^2) \ddot{\theta}_{motor} + v_m \dot{\theta}_{motor}] \\ + \lambda C_{ka} \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_{ka}) + d C_m \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_{motor}) \\ + \lambda [T_{yük} + T_{itki} + T_{ağırlık} \\ + d (F_{itki} + F_{ağırlık})] = d T_{motor} \end{aligned} \quad (7)$$

Kullanılan kaldıraç mekanizmasından dolayı sistemin hareketi doğrusal olmadığı gibi, çatal bileşeninin ilk montaj açısından dolayı sistem kanardın sıfır konumuna göre simetrik de değildir. Kanard açısı,  $\theta_{ka}$  için küçük açı varsayımı ve sistemin her iki hareket yönüne göre simetrik (çatalın ilk montaj açısı olan,  $\theta_{ci}$  değerini ise sıfır kabul etmek) olduğu varsayımı yapılarak, denklem (7) aşağıdaki gibi doğrusallaştırılabilir. ( $\theta_{motor} = \frac{d}{\lambda} \theta_{ka}$ )

$$\begin{aligned} \left[ \lambda J_{ka} + (J_{motor} + m_s \lambda^2) \frac{d^2}{\lambda} \right] \ddot{\theta}_{ka} + \left( \lambda v_{ka} + \frac{d^2}{\lambda} v_m \right) \dot{\theta}_{ka} \\ + (\lambda C_{ka} + d C_m) \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_{ka}) \\ + \lambda [T_{yük} + T_{itki} + T_{ağırlık} \\ + d (F_{itki} + F_{ağırlık})] = d T_{motor} \end{aligned} \quad (8)$$

Denklem (8)'deki katsayılar aşağıdaki gibi tanımlanırsa;

$$C_1 = \frac{1}{d} \left[ \lambda J_{ka} + (J_{motor} + m_s \lambda^2) \frac{d^2}{\lambda} \right] \quad (9)$$

$$C_2 = \frac{1}{d} \left( \lambda v_{ka} + \frac{d^2}{\lambda} v_m \right) \quad (10)$$

$$F_c = \frac{1}{d} [(\lambda C_{fin} + d C_m) \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_{fin})] \quad (11)$$

$$D^* = \frac{\lambda}{d} [T_{yük} + T_{itki} + T_{ağırlık} + d (F_{itki} + F_{ağırlık})] \quad (12)$$

Hareket denklemleri aşağıdaki gibi bilindik formda yazılabilir.

$$C_1 \ddot{\theta}_{fin} + C_2 \dot{\theta}_{fin} + F_c + D^* = T_{motor} \quad (13)$$

Denklem (13)'teki  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $F_c$  ve  $D^*$  terimleri sırasıyla, motor eksenine indirgenmiş eşdeğer atalet momentini, sönümlenme katsayısını, Coulomb sürtünme torkunu ve bozunum yüklerini ifade etmektedir.

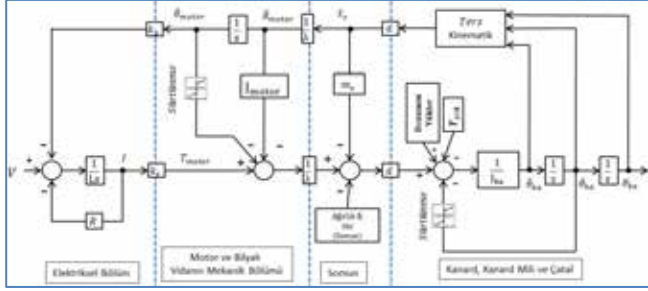
### Elektriksel Bölüm

Elektromekanik KTS'nin elektriksel bölümü, fırçasız doğru akım motoru, servo motor sürücüsü ve gerçek zamanlı kontrolcüden oluşmaktadır. Servo motor sürücülerinde kullanılan akım döngüsü çok hızlı olduğundan, fırçasız doğru akım motoru ve servo motor sürücüsü ikilisi fırçalı motor gibi modellenenmektedir. Fırçalı motorlar için uygulanabilen denklemler aşağıdaki gibidir.

$$V = R I + L \frac{dI}{dt} + k_b \dot{\theta}_{motor} \quad (14)$$

$$T_{motor} = k_t I \quad (15)$$

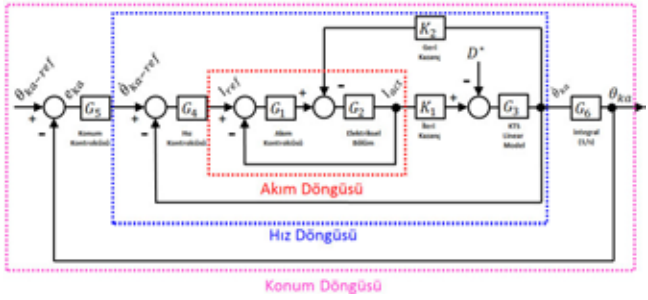
Elektromekanik KTS'nin mekanik ve elektriksel bölümlerinin birleşimiyle, doğrusal olmayan blok şeması **Şekil 6**'daki gibi oluşturulmuştur. Blok şemasında akım, hız ve konum döngüleri henüz konulmamıştır.



**Şekil 6: KTS'nin Doğrusal Olmayan Blok Şeması**

Blok şemasında görüleceği üzere KTS'deki mekanik parçalar rijit olarak modellendiğinden geri dönüş yollarında atalet momenti ve kütle bulunmaktadır.

Motor sürücülerinde, akım, hız ve konum olmak üzere üç çalışma modu bulunmaktadır. Bu çalışma kapsamında motor sürücü akım modunda kullanılmış, hız ve konum döngüleri gerçek zamanlı kontrolcüde oluşturulmuştur.



**Şekil 7: KTS'nin Doğrusal Blok Şeması**

Sistemin doğrusal blok şeması Şekil 7'deki gibidir.

### III. KONTROLÇÜ TASARIMI

Elektromekanik KTS'de kanard konum kontrolü yapılması istenmektedir. Konum kontrolcü gereksinimleri **Tablo 1**'de verilmiştir.

**Tablo 1: Konum Kontrolcü Gereksinimleri**

$r$	Yükselme Zamanı (s) [%90 yükselme]	$\leq 0.1$ s
$s$	Oturma Zamanı (s) [%1]	$\leq 0.5$ s
$OS\%$	Aşma	$\leq 2\%$
$BG$	Bant Genişliği @ -3 dB	$\geq 10$ Hz
$e_{ss}$	Kalıcı Rejim Hatası ( $^{\circ}$ )	$\pm 0.1^{\circ}$

Bu gereksinimlere göre;

Kapalı çevrim konum transfer fonksiyonu denklem (16)'daki gibidir.

$$\frac{\theta_{ka}}{\theta_{ka-ref}} = \frac{K_1 G_1 G_2 G_3 G_4 G_5 G_6}{K_1 G_1 G_2 G_3 G_4 G_5 G_6 + K_1 G_1 G_2 G_3 G_4 + K_1 K_2 G_2 G_3 + G_1 G_2 + 1} \quad (16)$$

Bozucu etkilerin ( $D^*$ ) kanard konum hatasına ( $e_{ka}$ ) etkisini gösteren transfer fonksiyonu ise denklem (17)'deki gibidir.

$$\frac{e_{ka}}{D^*} = \frac{G_1 G_2 G_3 G_6 + G_3 G_6}{K_1 G_1 G_2 G_3 G_4 G_5 G_6 + K_1 G_1 G_2 G_3 G_4 + K_1 K_2 G_2 G_3 + G_1 G_2 + 1} \quad (17)$$

Doğrusal blok şemasındaki terimler yanda verilmiştir.

$$\begin{aligned} G_1 &= K_p + \frac{K_I}{s} & K_1 &= k_t & K_2 &= k_b \frac{d}{\lambda} \\ G_2 &= \frac{1}{Ls + R} & G_3 &= \frac{1}{C_1 s + C_2} & G_6 &= \frac{1}{s} \end{aligned}$$

Hız döngüsü sisteme ek sönümleme katması amacıyla oluşturulduğundan hız döngüsündeki kalıcı rejim hatası önemsenmemektedir. Dolayısıyla hız döngüsü için oransal, P kontrolcü kullanmak yeterli olacaktır. Hız kontrolcüsü;

$$G_4 = K_{pv} k_v \quad (18)$$

Kontrolcü gereksinimlere göre, denklem (16)'daki transfer fonksiyonunun verilen adım komutu için 1'e, denklem (17)'deki transfer fonksiyonunun ise 0'a yakınsaması gerekmektedir. Son değer teoremi uygulanarak, konum kontrolcüsü olarak PI kontrolcüsünün kullanılmasının yeterli olduğu sonucuna varılmıştır. Pozisyon kontrolcüsü;

$$G_5 = K_{pp} + \frac{K_{pl}}{s} \quad (19)$$

Kontrolcü tasarımı tamamlandıktan sonra, hız ve konum kontrolcü katsayıları "MATLAB Response Optimization Tool" [4] yardımıyla doğrusal olmayan model kullanılarak bulunmuştur. Hız ve konum kontrolcü parametreleri aşağıdaki gibi bulunmuştur.

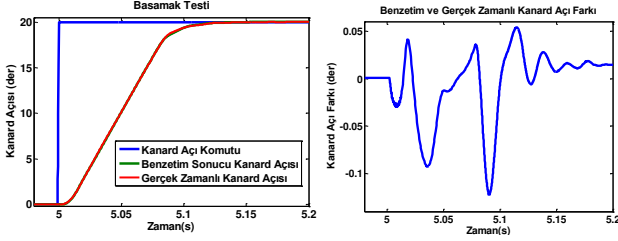
$K_{pv}$	Motor Sürücüsü Hız Kont. Oransal Kazancı	6.85	$\frac{V \cdot s}{rad}$
$K_{pp}$ <th>Motor Sürücüsü Konum Kont. Oransal Kazancı</th> <td>60.2</td> <td><math>\frac{rad}{rad \cdot s}</math></td>	Motor Sürücüsü Konum Kont. Oransal Kazancı	60.2	$\frac{rad}{rad \cdot s}$
$K_{pl}$ <th>Motor Sürücüsü Konum Kont. İntegral Kazancı</th> <td>7.1</td> <td><math>\frac{rad}{rad \cdot s^2}</math></td>	Motor Sürücüsü Konum Kont. İntegral Kazancı	7.1	$\frac{rad}{rad \cdot s^2}$

### IV. BENZETİM VE TEST SONUÇLARI

Doğrusal olmayan KTS modelini doğrulamak için bir takım gerçek zamanlı testler yapılmıştır. Testler kapsamında bir adet KTS prototipi üretilmiş ve kullanılmıştır.

#### **Basamak Testi**

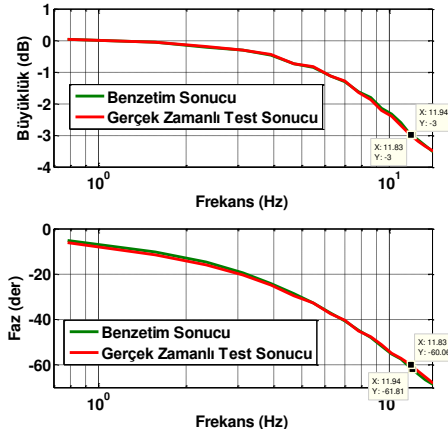
Basamak testi sonucu, gerçek zamanlı kanard açısı ve benzetim sonucu elde edilen kanard açıların değişimleri ve bu iki açı arasındaki fark **Şekil 8**'da verilmiştir.



Şekil 8: Basamak Cevabı, Açık farkı

### Frekans Testi

Sistemin bant genişliğini görmek için frekans testleri yapılmıştır. Benzetim ve gerçek zamanlı test sonuçları Şekil 9'deki gibidir. Sistemin -3dB'deki frekansı (~12 Hz), sistemin bant genişliğini vermektedir. Gerçek zamanlı sistem ve benzetim modeli farklı frekanslarda da çok yakın davranışlar göstermektedirler.



Şekil 9: Frekans Testi (Bant Genişlik Testi)

Elektromekanik KTS parametreleri ve kullanılan terimlerin tanımları Tablo 2 ve 3'te verilmiştir.

Tablo 2: Elektromekanik KTS Parametreleri

$R$	Motor Direnci	$0.07 \text{ ohm}$	$I$	Motor Akımı	$-A$
$L$	Motor İndüktansı	$2E - 4 H$	$d$	Moment Kolu	$0.06 m$
$V$	Motor Voltajı	$39 V$	$\lambda$	Bilyalı Vida Adımı	$7.96 E$ $- 4 m/rad$
$k_v$	Akım Kazancı	$8.2 A/V$	$v_m$	Motor Eksenindeki Sönümlenme Katsayısı	$0.0023 Nms/rad$
$k_t$	Motor Tork Sabiti	$0.12 Nm/A$	$v_{ka}$	Kanard Eksenindeki Sönümlenme Katsayısı	$0.0001 Nms /rad$
$k_b$	Geri EMF Katsayısı	$0.11 Vs /rad$	$C_m$	Motor Eksenindeki Coulomb Sürtünmesi	$0.65 Nm$
$J_{ma}$	Motor ve Bilyalı vida Atalet Momenti	$2.4E - 4 kgm^2$	$C_{ka}$	Kanard Eksenindeki Coulomb Sürtünmesi	$0.1 Nm$
$K_p$	Motor Sürücüsü Akım Oransal Kont. Kat.	$5.05 V/A$	$J_{ka}$	Kanard, Kan. Mili ve Çatal Atalet Momenti	$0.323 kgm^2$
$K_I$	Motor Sürücüsü Akım Integral Kont. Kat.	$0.15 \frac{V}{A.s}$	$\theta_{ci}$	Çatalın İlk Montaj Açılal Konumu (rad)	$-0.151 rad$

Tablo 3: Kullanılan Terimlerin Tanımlanması

$x_s$	Somunun Doğrusal Konumu (m)	$T_{motor}$	Motorun Ürettiği Tork (Nm)
$x_{si}$	Somunun İlk Doğrusal Konumu (m)	$T_{yük}$	Kanard Eksen. Aerodinamik Yükler (Nm)
$\theta_{motor}$	Motorun Açılal Konumu (rad)	$T_{ağırlık}$	Yerçekiminin ve Füze İtkisinin Kanard Ekseninde Kanard, Kanard Mili ve Çatal Üzerinde Yarattığı Yük (Nm)
$\theta_{ka}$	Kanardın Açılal Konumu (rad)	$T_{itki}$	Yerçekiminin ve Füze İtkisinin Somun Üzerinde Yarattığı Kuvvet (N)
$F$	Somunun Çatala İlettiği Kuvvet (N)	$F_{ağırlık}$	Yerçekiminin ve Füze İtkisinin Somun Üzerinde Yarattığı Kuvvet (N)
$T_1$	Vidanın Somuna İlettiği Tork (Nm)	$F_{itki}$	

Yapılan gerçek zamanlı testler sonucunda doğrusal olmayan elektromekanik KTS'nin benzetim modelinden ve prototipinden alınan performans değerleri Tablo 4'teki gibidir. Sonuçlar benzetim modelini doğrulamaktadır.

Tablo 4: Model ve Gerçekleşen Performans Değerleri

Başarım İsterleri		İstenilen	Model	Gerçekleşen
$t_r$	Yükselme zamanı (s) [%90 rise]	$\leq 0.1s$	<b>0.084 s</b>	<b>0.083 s</b>
$t_s$	Oturma/Yerleşme Zamanı (s) [%1]	$\leq 0.5 s$	<b>0.117 s</b>	<b>0.119 s</b>
%OS	Aşma	$\leq \%2$	<b>%0.125</b>	<b>%0.1</b>
BG	Bant Genişliği @ -3 dB	$\geq 10 \text{ Hz}$	<b>11.94 Hz</b>	<b>11.83 Hz</b>
$e_{ss}$	Kalıcı Rejim Hatası	$\pm 0.1^\circ$	<b>0</b>	<b><math>-0.03^\circ</math></b>

## V. SONUÇLAR

Elektromekanik KTS'nin elde edilen doğrusal olmayan matematiksel modeli yapılan gerçek zamanlı testlerle doğrulanmıştır. Bu tip sistemlerde kontrolcü tasarımının hem doğrusal hem de doğrusal olmayan modellerin kullanılarak yapılabildiği gösterilmiştir. Kanard konum kontrolünde bozucu yükler altında kalıcı rejim hatasının oluşmaması için, hız ve konum kontrolcüsü olarak sırasıyla P ve PI kontrolcülerin kullanılmasının yeterli olduğu sonucuna varılmıştır. Benzetim modelinin basit olması açısından, fırçasız motor ve sürücü ikilisi eşdeğer fırçalı motor gibi modellenmiştir. Fakat daha gerçekçi bir model elde edilmesi adına motor ve sürücü daha detaylı ele alınabilir. Ayrıca istenilen bant genişliği frekansı, kritik olan motor mili ve vida ikilisinin doğal frekansından çok daha düşük olmasından dolayı sistem rijit olarak modellenmiştir. Fakat yüksek bant genişliği frekansları için motor mili ve vida ikilisinin esnek modellenmesi gerekecektir. Gerçek zamanlı testler sonucunda, elektromekanik KTS'lerin belli bant genişliklerine kadar uygulanabilir seçenek oldukları görülmüştür.

## KAYNAKÇA

- [1] Ristanović, M.R, Čojbašić, Ž., Lazic, D.V., (2012) "Intelligent Control of DC Motor Driven Electromechanical Fin Actuator", J. Control Engineering Practice, Vol. 20, pp. 610-617.
- [2] Habibi S., Roach J., and Luecke G., (2008) "Inner-loop Control for Electro-Mechanical (EMA) Flight Surface Actuation Systems", ASME J. of Dyn. Syst., Meas.Control N5, V130, pp. 51002-1 - 51002-13
- [3] Yerlikaya, Ü., (2016), "Dynamic Modeling and Control of An Electromechanical Control Actuation System" Yüksek lisans Tezi, ODTÜ, Ankara, Turkey
- [4] Matlab, Response Optimization Tool  
<http://www.mathworks.com/help/sldo/parameter-estimation.html>

# Robotların Manipülasyon Modellerini Öğrenmek için Nesnelerin Yönelimlerinde Bağlanım

Ratnesh Madaan  
Robotics Institute  
Carnegie Mellon University  
Pittsburgh, PA, USA  
ratneshmadaan@gmail.com

Erol Sahin  
KOVAN Research Lab.  
Computer Engineering Dept.  
Middle East Technical University  
Ankara, Turkey  
erol@metu.edu.tr

Robert Paolini  
Robotics Institute  
Carnegie Mellon University  
Pittsburgh, PA, USA  
rpaolini@cmu.edu

Matthew T. Mason  
Robotics Institute  
Carnegie Mellon University  
Pittsburgh, PA, USA  
matt.mason@cs.cmu.edu

**Özetçe** —Bu bildiride, bir manipülasyonun ardından katı bir nesnenin son yönelimini, ilk yöneliminden bağlanım yaparak öğrenen bir metot önerdik. Nesnenin yönelimini kuaterniyon olarak temsil edip, bu yönelimlerin dağılımını birim kuaterniyon uzayında Bingham dağılımları şeklinde modelledik. Nesnenin düz yüzeylerden olduğunu ve bir düzlemde sadece belli yönelimlerde olabileceğini varsayıp, daha önceki etkileşim verisinden, nesnenin ilk yönelimini son yönelimine bağlayabildik. Geliştirilen metodu belli bir yükseklik ve rasgele bir yönelimde bırakılan zarın düz bir yüzeye düştüğü zaman alacağı pozları öngörmekte kullandık. Zarın ilk pozuna bağlı olarak aldığı son pozun öngörüsünü, sınıflandırma ve onu takip eden bağlanım problemlerine ayırdık. Sınıflandırma adımı, zarın ilk yönelimini, zarın son halinde altı yüzünden hangisi üzerine düştüğüne bağladı. Bağlanım adımı zarın  $SO(3)$ 'deki  $3B$ 'lu yönelimini,  $SO(1)$ 'deki  $1B$ 'lu son yönelimine bağladı. Metodu bir fiziksel simülasyon paketinden elde edilen veriler üzerinde uygulamp, sonuçlar değerlendirildi.

**Anahtar Kelimeler**—Manipülasyon, kuaterniyon, Bingham dağılımı

## I. GİRİŞ

Manipülasyon bir nesnenin pozunun dünya koordinat sisteminde değiştirilmesi olarak nitelendirilebilir. Robotik manipülasyon eylemlerinin nesne üzerindeki etkisinin modellenmesi kinematik ve dinamik modeller kullanılarak analitik olarak yapılabilir bile, nesnenin ortamdaki yüzeyler ve manipülatör ile arasındaki karmaşık etkileşimi etkileyen parametrelerin (sürtünme sabitleri gibi) bilinmiyor olması, bu modellerin yetersiz kalmasına neden olur. Bu bildiri, manipülasyon eylemlerinin en iyi, gerçek fiziksel etkileşimler sırasında nesnenin eylem öncesindeki ve sonrasındaki pozlarının kaydedilmesi ve bunlar arasındaki dönüşümün öğrenilmesiyle modellenebileceği iddiasındadır.

Katı bir nesnenin pozunu, nesnenin uzaydaki pozisyonu ve yönelimi olarak tanımlanır ve 6-Boyutlu  $SE(3) = \mathbb{R}^3 \times SO(3)$  uzayında yer alır. Burada  $SO(3)$  yönelimlerin tanımlı olduğu “special orthogonal group”u,  $\mathbb{R}^3$  ise pozisyonların tanımlı olduğu 3-boyutlu uzayı temsil etmektedir. Bir nesnenin ilk ve son pozları arasındaki  $SE(3) \mapsto SE(3)$  eşleşmesini yapabilecek öğrenme metotlarına ihtiyaç vardır. Ancak  $SO(3)$  uzayının özellikleri nedeniyle yönelimler arasındaki  $SO(3) \mapsto SO(3)$  dönüşümünü bile öğrenebilecek metotlar henüz geliştirilebilmiş değildir.

Bu bildiride bir nesnenin ilk yönelimi ile son yönelimi arasındaki dönüşümü için, genel  $SO(3) \mapsto SO(3)$  problemini çözmeden, nesnelerin robotik manipülasyonunda genellikle tutan varsayımlar altında, bir bağlanım çözümü önereceğiz.

## A. Yönelimlerin temsili

Yönelimler matematiksel olarak, Euler açıları, dönme matrisleri, eksen-açı sistemi ve birim kuaterniyonlar ile temsil edilebilirler. Bu çalışmada, Euler açıları ve eksen-açı sistemleri gibi tekilliği olmayan, ve aradeğerleme ve yönelim dağılımlarını temsil için daha uygun olan birim kuaterniyonları kullandık.

Kuaterniyonlar Hamilton [?] tarafından bir vektörün, diğer bir vektöre göre göreceli uzunluk ve yönelimini temsil edebilmek için önerilmiştir. Kuaterniyonlar  $q = [s, \vec{v}]^T$  olarak tanımlanır. Bu tanımda  $s \in \mathbb{R}$ ,  $\vec{v} \in \mathbb{R}^3$ 'dir.

Yönelimler  $\|q\| = 1$  koşulunu sağlayan birim kuaterniyonlar ile temsil edilebilirler. Euler'in dönme teoremi 3-boyuttaki her dönüşün, bir eksen etrafındaki tek bir dönmeye denk olduğunu ispatlamıştır ve bu ispat eksen-açı temsillerinin temelini oluşturur. Birim kuaterniyonlar herhangi bir  $\hat{n}$  eksen etrafındaki  $\theta$  dönüşünü  $q = [\cos(\theta/2), \sin(\theta/2)\hat{n}]^T$  olarak temsil eder. Bu temsilin eksen-açı temsillerine göre en büyük avantajı, tekilliğinin olmamasıdır.

Kuaterniyon temsili, tekilliğinin olmaması ve kompakt olması nedeniyle diğer temsillerden daha çok tercih edilir ve aradeğerleme ve yönelim dağılımlarını temsil için daha uygundur. Kuaterniyonlar arasında tanımlı metrik uzayın, yönelimler arasındaki jeodezik uzaklıklarla tutarlı olması bu temsil için büyük bir artıdır. Birim kuaterniyon temsili  $\hat{n}$  eksen etrafındaki  $\theta$  dönüşü,  $-\hat{n}$  eksen etrafındaki  $-\theta$  dönüşüne denktir, dolayısıyla her dönme iki farklı şekilde temsil edilir. Birim kuaterniyon temsili dönüş uzayını çifte kaplaması bu temsilin en büyük zafıdır.

## B. Yönelim dağılımlarının modellenmesi

Bingham dağılımı,  $\mathbb{R}^{d+1}$  uzayında yer alan sıfır ortalamalı çok-değişkenli Gaussian'ın  $\mathbb{S}^d$  hiperküresi üzerindeki keşişiminden çıkarılmıştır. Formal olarak  $\mathbb{S}^3$  uzayındaki Bingham

olasılık dağılım fonksiyonu

$$\begin{aligned} f(\mathbf{x}; \Lambda, V) &= \frac{1}{F(\Lambda)} \exp\{\mathbf{x}^T V \Lambda V^T \mathbf{x}\} \\ &= \frac{1}{F(\Lambda)} \exp\{\sum_{i=1}^3 \lambda_i (\mathbf{v}_i^T \mathbf{x})^2\} \end{aligned} \quad (1)$$

olarak tanımlanır. Bu tanımda  $\vec{x}$ ,  $\mathbb{S}^3$  hiperküresi üzerinde bir birim vektörü,  $\Lambda$   $\lambda_1 \leq \lambda_2 \leq \lambda_3 \leq 0$  yoğunluk parametrelerini içeren  $3 \times 3$ 'lük bir köşegen matrisidir.  $V$  ise  $(v_1, v_2, v_3)$  eigen vektörlerinden oluşan  $4 \times 3$  lük bir matris ve  $F(\Lambda)$  de normalizasyon sabitidir. Bingham dağılımı  $x$  ve  $-x$  değerleri için aynı değeri verir. Bu yönüyle,  $\mathbb{S}^3$ 'te tanımlanan Bingham dağılımı,  $\mathbb{S}^4$  uzayında yer alan kuaterniyon dağılımlarını modellemek için idealdir.

### C. Yönelim dağılımlarını Bingham dağılımları ile modellemek

Glover,  $\vec{X} = [x_1, \dots, x_N]$  olarak verilen bir kuaterniyon kümesine enbüyük olabilirlik kestirimi kullanılarak bir Bingham dağılımı oturtma problemi olarak ortaya koydu [1]:

$$(\vec{\Lambda}, \vec{V})_{MLE} = \underset{(\vec{\Lambda}, \vec{V})}{\operatorname{argmax}} f(x; \vec{\Lambda}, \vec{V}) \quad (2)$$

Ve sonrasında,  $\vec{V}$ 'yi  $\vec{X}$ 'nin eigen vektörleri olarak hesaplayıp,  $\vec{\Lambda}$ 'yı da  $F(\vec{\Lambda})$  fonksiyonunu  $\vec{\Lambda}$ 'ya göre optimize ederek kestiren bir metod geliştirdi.

Gauss Karışım Modellerine benzer olarak, daha karışık yönelim dağılımları Bingham karışımları olarak modellenilebilir:

$$f(x; \vec{\Lambda}, \vec{V}, \vec{\alpha}) = \sum_{i=1}^k \alpha_i f(x; \vec{\Lambda}_i, V_i) \quad (3)$$

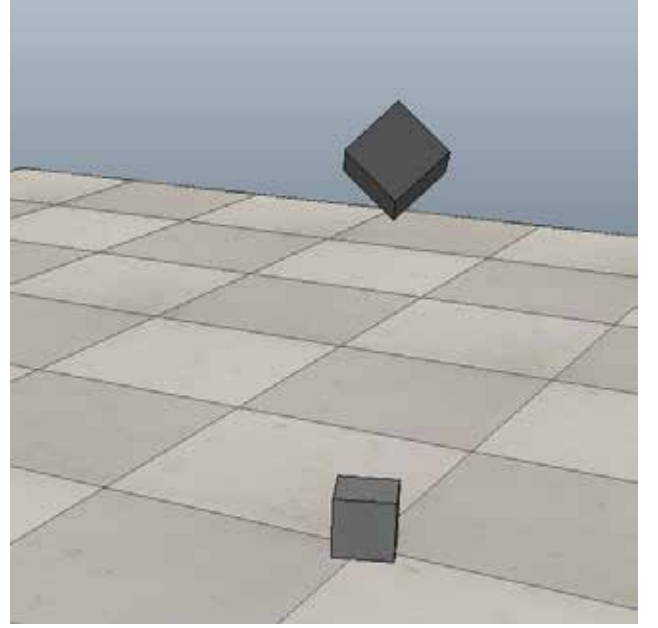
Burada  $k$  karışımdaki Bingham'ların sayısını, toplamları 1 eden  $\alpha_i$  pozitif değerleri karışım parametrelerini ve  $\vec{\Lambda}_i$  ve  $V_i$ ,  $i$ 'inci Bingham'ın parametreleri gösterir.

Glover, [1] çalışmasında verilen bir kuaterniyon kümesine RANSAC [2] (ing. Random-Sampling-Consensus) benzeri bir algoritma ile bir Bingham Karışım Modeli (BMM: Bingham Mixture Model) oturtacak bir metod önerdi. BMM-SAC adı verilen bu metod, kuaterniyonları 4'lü kümelerle bölüp, her küme için Bingham oturtur. Her Bingham için, uçdeğerler için minimum  $l_{min}$  veren bir kayıp fonksiyonu hesaplanır ve kayıp değeri  $l_{thresh}$  eşik değerinden büyük olan en iyi Bingham karışıma eklenir. Bu Bingham tarafından karşılanan içdeğerler veri kümesinden çıkartılır ve süreç tekrarlanır. Kalan kuaterniyonlara yeni bir Bingham dağılımı oturtulamaması durumunda, geri kalan bütün noktaları için  $\vec{\Lambda} = \vec{0}$  olan bir tekdüze Bingham dağılımı oturtulur ve karışıma eklenir.

Katı bir nesnenin düz bir yüzeyde, bir yüzü üzerinde iken alabileceği değişik yönelim dağılımını modelleyen Bingham'ın yoğunluk parametreleri  $\vec{\Lambda} = [-\infty, -\infty, 0]$  formundadır. Bu tip dağılımları bulabilmek için BMM-SAC algoritmasının her iterasyonunda oturtulan Bingham'ın parametrelerinin  $\lambda_{1,2} \leq \epsilon_\infty$  ve  $\lambda_3 \geq \epsilon_0$  olup olmadığı kontrol edilir. Bu çalışmada  $\epsilon_\infty = -300$  ve  $\epsilon_0 = -10$  olarak kullanılmıştır. Eğer oturtulan Bingham bu şartları sağlamazsa, reddedilir ve bir sonraki iterasyon ile devam edilir. Bu değişiklik sadece robotik manipülasyon etkileşimlerinde ortaya çıkan tipik yönelim dağılımlarının oturtulmasını sağlar. Ek olarak, daha önceki Bingham modelleri ile kapsanan bazı kuaterniyonlar, karışımda

Bingham	Ağırlıklar	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$
1	0.187000	-529.000000	-484.000000	-0.267990
2	0.251000	-441.000000	-441.000000	-0.270377
3	0.224000	-900.000000	-900.000000	-0.219205
4	0.163000	-900.000000	-900.000000	-0.250000
5	0.108000	-400.000000	-380.250000	-0.181197
6	0.067000	-900.000000	-900.000000	-0.213922

Tablo I: mBMM-SAC algoritmasının düşürülen bir küpün yönelimleri üzerinde çalıştırılmasıyla ortaya çıkarılan 6 Bingham içeren Bingham Karışım Modelinin parametreleri.



(a)

Şekil 1: Deney: Bir zar belli bir yükseklikten ve rasgele bir yönelim (tekdüze bir Bingham dağılımından örneklenen) ile düşürüldü. Zarın ilk ve son pozları kaydedildi. Zarın son pozundaki yönelimler düştüğü yüze göre 6 değişik sınıfa karşılık geldi.

yer alan diğer Bingham'ların kesişiminde olabilmesi nedeniyle, kümeden çıkarılmaz. Bu değişikliklerin yapılmış olduğu algoritmayı mBMM-SAC (ing. modified BMM-SAC) bir küpün rasgele düz bir yüzeye düşürülmesinden sonra aldığı yönelimlerin modellenmesine uyguladık. Tablo I'da görülebileceği gibi, algoritma tutarlı bir şekilde her seferinde 6 Bingham'dan (küpün 6 yüzüne karşılık gelen) oluşan bir karışım modeli ortaya çıkarmıştır.

### D. Deney: Zar atmada yönelim öngörüsü

Küp şeklindeki bir zarın belli bir yükseklik ve tekdüze bir Bingham dağılımından seçilmiş rasgele bir yönelimde bırakıldığı zaman küpün alacağı son pozları düşünelim. Zarın ilk pozuna bağlı olarak aldığı son pozun öngörüsünü, sınıflandırma ve onu takip eden bağlanım problemleri olarak ayrılabilir. Sınıflandırma adımı, zarın ilk yönelimini, zarın son halinde altı yüzünden hangisi üzerine düştüğüne bağlar. Bağlanım adımı ise zarın  $SO(3)$ 'deki 3 boyuttaki yönelimini,  $SO(1)$ 'deki 1 boyuttaki son yönelimine bağlar.

	Yüz 1	Yüz 1	Yüz 3	Yüz 4	Yüz 5	Yüz 6	Toplam
Yüz 1	936	0	17	25	14	41	1033
Yüz 2	0	884	40	54	37	15	1030
Yüz 3	18	8	900	0	16	14	956
Yüz 4	25	15	0	896	25	18	979
Yüz 5	43	18	19	19	933	0	1032
Yüz 6	10	28	27	21	0	874	960
Toplam	1032	953	1003	1015	1025	962	5990

Tablo II: İlk yönelimler için hata matrisi.

Önce zarın son yönelimleri mBMM-SAC ile gözetimsiz olarak, her biri ayrı bir yüzeye karşılık gelen, 6 değişik sınıfa ayırdık. Zarın ilk yönelimlerini, zarın son yüzleri kullanarak 6 değişik kümeye böldük. Daha sonra her yüzeye karşılık gelen ilk yönelimleri BMM-SAC kullanarak aşağıdaki gibi modelledik:

$$\text{BMM}_i^{\text{init}}(x) = \sum_{j=1}^{k_i} \alpha_j^i B(x; \vec{\Lambda}_j, \vec{V}_j), \quad i = 1, \dots, 6 \quad (4)$$

Burada  $k_i$ ,  $i$ 'nci Bingham Karışımındaki Bingham sayısını göstermektedir. Burada, zarın ilk yönelim dağılımı hakkında hiçbir varsayım kullanılmadı ve standart BMM-SAC algoritması kullanıldı.

Sınıflandırma problemini enbüyük olabilirlik yaklaşımı kullanarak tanımlayıp çözdük:

$$\hat{\beta}_{\text{MLE}} := \underset{i \in 1 \dots 6}{\operatorname{argmax}} \text{BMM}_i^{\text{init}}(x) \quad (5)$$

Atılan zarın düştüğü yüzü sınıflandırma ile öngördükten sonra, ikinci adımda  $SO(3) \mapsto \mathbb{S}^1 = SO(1)$  eşlemesini yaparak zarın son yönelimini öngördük. Bunu yapmak için zarın  $q_{\text{init}}$  olarak ifade edilen ilk yönelimini  $\theta$  adlı dairesel değişkene bağlanımını hesapladık. Bu hesaplama için Gauss Süreçleri (ing. Gaussian Processes (GP)) kullandık. Bu eşleme sırasında yönelimler arasındaki jeodezik uzaklığı

$$k(q, q') = \sigma_f^2 \exp\left(-\frac{(\arccos^2(\langle q, q' \rangle))}{2\lambda^2}\right) \quad (6)$$

kuaternion yay kernel'i[3] kullanarak hesapladık. Burada  $\sigma_f$  ve  $\lambda$  üssel kernel'in hiper-parametrelerini temsil etmektedir.

Son olarak bağlanım için  $\theta$ 'nın dairesel değişkenin doğasını gözönüne alarak, SinCos-GP[4] kullandık. Bu metotta, ilk yönelimleri, biri açının sinüsüne, diğeri ise cosinüsüne eşleyecek iki GP eğitildi. Bu GP'ler kullanılarak son yönelim açısı

$$\theta = \operatorname{atan}(\theta_{\sin}, \theta_{\cos}) \quad (7)$$

şeklinde öngörüldü.

Bu deney için, VREP simülöründe [5] bir küpü sabit yükseklik ve rasgele yönelimlerden düz bir yüzeye düşürdük. Küpün ilk ve son yönelimleri kuaterniyon olarak kaydedtik. Yukarıda anlatılan metodun uygulanması sonucunda elde edilen öngörülerin hata matrisi Tablo II görülebilir. Öğrenilen model, 90.53% kesinlikle, zarın hangi yüzünün üzerine düşeceğini kestirebilmektedir.

Doğru olarak sınıflandırmalar için sonrasında yapılan bağlanımın yaptığı hatalar Table III gösterilmiştir. Bu tabloda, SinCos-GP bağlanım metodunu, 1) 1-en-yakın komşu metodu

	1-en-yakın komşu metodu	SLERP	Sin-Cos-GP metodu
Ortalama	13.29	15.79	0.61
Standart sapma	17.51	41.72	2.69
En büyük	132.99	179.98	7.22

Tablo III: Rasgele ilk yönelimler için yapılan açısal öngörü hataları.

ve (2) SLERP (ing. spherical linear interpolation) [6] metotları ile karşılaştırdık. Sonuçlar, önerilen metodun diğer iki metoda göre çok daha başarılı olduğunu gösterdi.

## II. TARTIŞMA

Robotların katı nesnelere manipülasyonu sırasında nesnelere yönelimleri, kendi olduğu kadar, tutucunun ve ortamdaki yüzeylerin geometrik özellikleri tarafından sınırlanır. Düzlemsel yüzeylere sahip nesnelere tutucu iç yüzeyleri ve ortamlarda, nesnelere yönelimleri, sınırlı sayıda sınıflardan birinin içinde 1B'lu dairesel bir açı ile tanımlanabilir. Bu bildiri, bu gözleme dayanarak, henüz çözülememiş olan  $SO(3) \mapsto SO(3)$  eşleme problemini, bir sınıflandırma ve onu takip eden bir dairesel bağlanım problemine indirgemmiştir.

## III. TEŞEKKÜRLER

Bu çalışma Avrupa Komisyonu tarafından FP7 içinde Marie Curie International Outgoing Fellowship programı içinde FP7-PEOPLE-2013-628854 nolu proje içinde desteklenmiştir.

## KAYNAKÇA

- [1] W. R. Hamilton, "Li. on quaternions; or on a new system of imaginaries in algebra," *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, vol. 25, no. 163, pp. 10–13, 1844.
- [2] J. M. Glover, "The quaternion bingham distribution, 3d object detection, and dynamic manipulation," Ph.D. dissertation, Massachusetts Institute of Technology, 2014.
- [3] M. A. Fischler and R. C. Bolles, "Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography," *Communications of the ACM*, vol. 24, no. 6, pp. 381–395, 1981.
- [4] M. Lang, O. Dunkley, and S. Hirche, "Gaussian process kernels for rotations and 6d rigid body motions," in *Robotics and Automation (ICRA), 2014 IEEE International Conference on*. IEEE, 2014, pp. 5165–5170.
- [5] P. Guerrero and J. Ruiz del Solar, "Circular regression based on gaussian processes," in *Pattern Recognition (ICPR), 2014 22nd International Conference on*. IEEE, 2014, pp. 3672–3677.
- [6] C. Robotics, "Virtual robot experimentation platform (v-rep). 2010."
- [7] K. Shoemake, "Animating rotation with quaternion curves," in *ACM SIGGRAPH computer graphics*, vol. 19, no. 3. ACM, 1985, pp. 245–254.

# Bükülebilir Sistoskop Sisteminin Tasarımı ve Deney Düzenegi

Canberk Sözer, Hüseyin Üvet  
Mekatronik Mühendisliği Bölümü  
Yıldız Teknik Üniversitesi  
İstanbul, Türkiye

Email: canberksozer@gmail.com, huvet@yildiz.edu.tr

**Özetçe - Minimal invaziv cerrahisi, açık ameliyatlarda hasta vücuduna açılan büyük kesiler yerine küçük kesilerden müdahale etme yöntemidir. Bu bildiride minimal invaziv yönteminin ürogenital sistem üzerinde kullanılmasını sağlayan sistoskopun tasarımı, deney düzenegi ve doğrulaması sunulmaktadır. Geliştirilen sistoskop, mesaneye düşen böbrek taşlarının vücuttan atılmak üzere yüzeyinin deforme edilmesi ve prostat bölgesinin küçültülmesini amaçlamaktadır. Bu işlem, sistoskop üzerinde bulunan hidrodinamik kavitasyon tüpünün hedef bölgeye yönlendirilmesiyle gerçekleştirilmektedir. Sistoskop üzerinde, bükülebilir uç işlevcinin Stewart platformu tarafından manipüle edilmesini sağlayan paslanmaz çelik halatlar, görüntülemeyi ve ışıklandırmayı sağlayan 2 mm çaplı kamera ve aydınlatma sistemi ile müdahaleyi sağlayan hidrodinamik kavitasyon tüpünün yerleştirileceği çalışma kanalı bulunmakta olup sistemin toplam çapı 10 mm'dir. Geliştirilen sistoskop, 2 serbestlik dereceli bükülebilir bir uç işlevciye sahiptir. Uç işlevci, iki serbestlik derecesinde en az +40° ile +40° aralığında bükülebilmektedir. Sistemin 3 boyutlu (3B) yazıcı ile ara prototipleri oluşturulmuş ve son prototipi DMLS (Direct Metal Laser Sintering) yöntemi ile metal tozlarından üretilmiştir. Üretilen son prototipin uç işlevci konumu görüntü işleme yöntemiyle bulunmuştur.**

**Anahtar Kelimeler - Bükülebilir sistoskop, bükülebilir uç işlevcinin manipülasyonu, görüntü işleme**

## I. GİRİŞ

Tıptaki gelişmeler ile hastaya tanı koyma veya operasyon amacıyla yapılan girişimler, geleneksel ameliyatlardaki büyük kesiler yerine küçük kesiler ya da doğal deliklerden girilerek yapılmaya başlanmıştır. Bu gelişmeler, operasyon sonrasında hastadaki ağrı, hastanede kalma ve iyileşme süresi gibi olumsuz etkileri azaltmaktadır [1]. Endoskopi, iç anlamına gelen endo ve görüntüleme anlamına gelen skopi kelimelerinin birleşiminden oluşmaktadır ve vücut içinin görüntülenmesi - müdahale edilmesini sağlayan yöntemlerin genel adı olarak tanımlanabilir. Endoskopi, uygulandığı bölgeye göre farklı isimler ile anılmaktadır. Görüntüleme ve müdahale etmek için başlıca kullanıldığı yerler; genel cerrahide laparoskopi, kalın bağırsakta kolonoskopi, mide ve yemek borusunda gastroskopi, ürolojide ise sistoskopidir. Yapılan çalışmada, mesane taşlarının yüzeyini deforme etmeyi ve prostat bölgesini traşlamayı hedefleyen bir sistoskop geliştirilmiştir. Sistem üzerinde; soğuk ışık kaynağı, kamera, paslanmaz çelik halatlar ve hidrodinamik kavitasyon tüpü için çalışma kanalı bulunmaktadır.

Ürogenital sistemdeki minimal invaziv uygulamalarında kullanılan sistoskopun rijit ve bükülebilir olmak üzere iki çeşidi vardır. Denholm tarafından yapılan kontrollü deneylere göre, rijit sistoskop ile ameliyat edilen hastaların operasyon sonrasındaki şikayetleri %76 iken, bükülebilir sistoskop ile ameliyat edilen hastaların operasyon sonrasındaki şikayetleri %33 oranına düşmüştür [2].

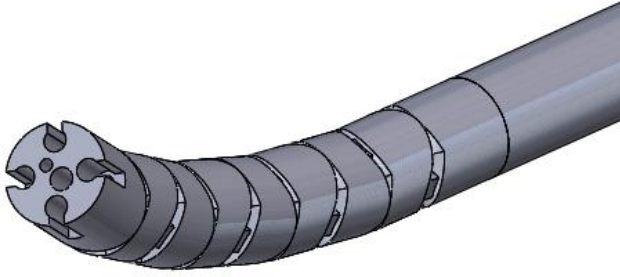
Mesane taşlarının yüzeyini deforme etme [3] ve prostat [4] bölgesini traşlama işlemini hidrodinamik kavitasyon tüpü içerisinde geçen sıvı gerçekleştirir. Tüp içerisindeki ani çap düşüşü sonucunda sıvının basıncının düşmesi ve hızının artmasıyla su jeti oluşmaktadır. Bu su jetinin canlı hücreler üzerinde yıkıcı etkisi vardır.

Geliştirilen sistoskop üzerinde iki adet çalışma kanalı ve etrafına 90° aralıklarla konumlandırılmış dört adet paslanmaz çelik halat kanalı yer almaktadır. Çalışma kanallarının birinde hidrodinamik kavitasyon tüpü, diğesinde ise soğuk ışık kaynağı ve kamera bulunmaktadır. Hidrodinamik kavitasyon tüpü, kavitasyonun oluşmasını sağlayarak taş ve prostat bölgesine müdahalede etmekte, karanlık bölgeyi ışıklandıran soğuk ışık kaynağı ve kamera ise görüntülemeyi sağlamaktadır. Kamera, soğuk ışık kaynağının ışıklandığı bölgeyi operatöre ekrandan göstererek görsel geribildirim vermektedir. Operatör hidrodinamik kavitasyon tüpü ucunun hedef bölgeye yönlendirilmesini joystick ile kontrol eder. Joystick'ten alınan komutlar, oluşturulan algoritma ile Stewart platformunu hareket ettirir. Bu hareket paslanmaz çelik halatlar sayesinde uç işlevciye iletilir.

Bu bildiri geliştirilen sistoskopun tasarımını, deney düzenegini ve uç işlevcinin pozisyonunun bulunmasını sunmaktadır. Sistoskop, 10 mm çaplı ve X - Y eksenlerinde en az -40° ile +40° aralığında hareket edebilecek 2 serbestlik dereceli bükülebilir uç işlevciye sahip olacak şekilde hesaplanmış, malzemesi ise cihazın prostat ve mesane bölgesinde çalışması göz önüne alınarak paslanmaz çelik olarak seçilmiştir. Tasarlanan sistemin, SolidWorks programı kullanılarak katı modeli oluşturulmuş ve ara prototipler, 3B yazıcı kullanılarak önce plastik bazlı oluşturulmuştur. Tasarım doğrulandıktan sonra 3B yazıcıdan metal tozları kullanılarak DMLS yöntemiyle üretilmiştir. Üretilen son prototipin doğrulanması ise görüntü işleme ile yapılmıştır.

## II. SİSTOSKOP TASARIMI

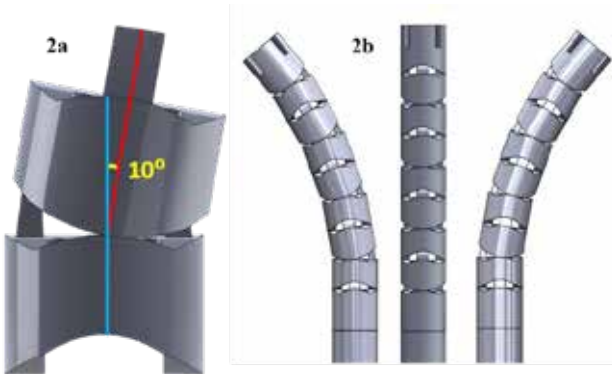
Geliştirilen sistem, hedef bölgedeki böbrek taşına veya prostat bölgesine yönlenebilmek için bükülebilir bir uç işlevciye sahiptir. Eğilme hesapları yapıldıktan sonra katı model SolidWorks programında oluşturulmuştur (Şekil 1).



Şekil 1 Sistoskop sisteminin SolidWorks programında çizilen genel görünümü

Bükülebilir uç işlevci, X ve Y eksenlerinde en az  $40^{\circ}$  eğilmeyi sağlayan 2 serbestlik derecesine sahiptir. Böylece mesanenin dar alanı içerisinde bulunan taşlara yapılacak müdahale, operatör tarafından joystick kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir.

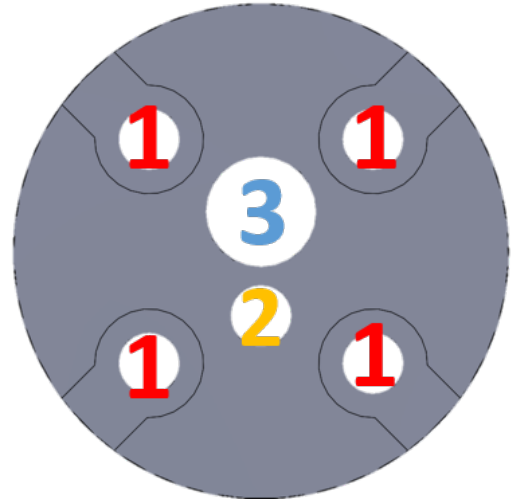
Sistoskopun uç işlevcisini oluşturan her iki eklem arasında  $10^{\circ}$  den fazla eğilme sağlanabilmektedir (Şekil 2a). Bu link çiftlerinin birleşmesiyle oluşan eklemler, bükülebilir uç işlevci boyunca her iki eksen için 4 adettir. Bu şekilde iki eksen de en az  $40^{\circ}$  eğilme sağlanabilmektedir (Şekil 2b). Sistemin uç işlevcisinin manipüle edilmesi için kullanılan paslanmaz çelik halatların bir ucu, sistoskopun uç işlevcisine, diğer ucu ise Stewart platformu üzerine sabitlenmiştir. Bu şekilde Stewart platformu, istenilen açıya getirilerek uç işlevcinin konumu kontrol edilebilmektedir.



Şekil 2a iki link arasındaki 10 derecelik eğilme; 2b uç işlevcinin Y eksenindeki  $-40^{\circ}$ ,  $0^{\circ}$  ve  $+40^{\circ}$  derecelerindeki pozisyonu

## A. BÜKÜLEBİLİR SİSTOSKOP BİLEŞENLERİ

Bükülebilir sistoskop sistemi içerisinde altı adet kanal yer almaktadır. Hidrodinamik kavitasyon tüpüne bükülme hareketini yaptırabilmek için kullanılacak paslanmaz çelik halatların geçeceği kanallar Şekil 3'te 1 numara ile gösterilmiştir.  $90^{\circ}$  ile yerleştirilen 4 kanalın her birinin çapı 1.25 mm'dir. Hidrodinamik kavitasyonu gerçekleştirecek tüpün geçeceği kanal, Şekil 3'te 2 ile gösterilmiştir. Bu kanalın çapı da 1.25 mm'dir. Şekil 3'te 3 numara ile gösterilen kanal kamera ve soğuk ışık kaynağının geçeceği kanal gösterilmiş olup, çapı 2.25 mm olarak tasarlanmıştır. Tüm bu parçaları içeren bükülebilir sistoskopun toplam dış çapı 10 mm'dir.



Şekil 3 Sistoskopun kesit görünümü

## B. DENEY DÜZENEĞİ

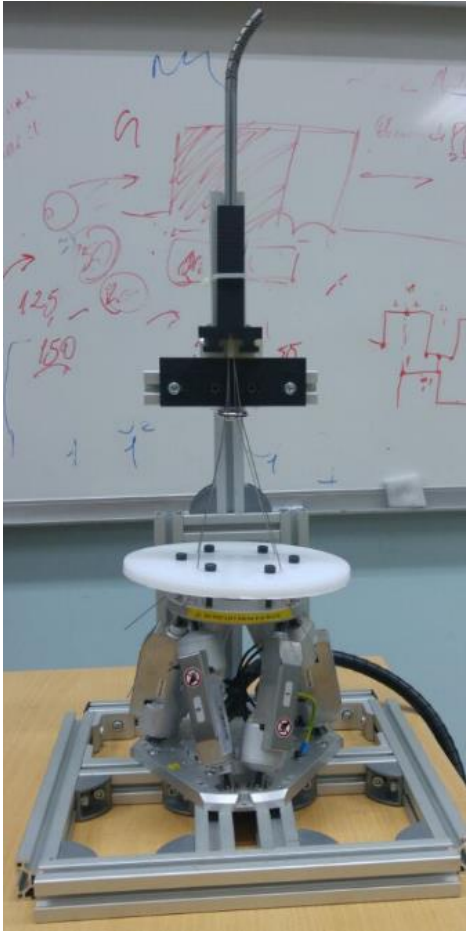
Sistemin manipüle edilebilmesi için, Stewart platformu kullanılmaktadır.  $90^{\circ}$  ile yerleştirilen 4 adet paslanmaz çelik halatın bir ucu sistoskopun uç işlevcisine, diğer ucu da Stewart platformuna sabitlenmiştir. Stewart platformunun tablası, X eksenindeki dönme sonucu yuvarlanma (roll) ve Y eksenindeki dönme sonucunda yunuslama (pitch) hareketlerini yapmaktadır. Bu pozisyon değişimleri ile sistoskop sisteminin bükülebilir ucunda en az  $-40^{\circ}$  ile  $+40^{\circ}$  arasında eğilme meydana gelmektedir. Uç işlevcinin eğilmesi, iki ucu kavisli olan ve  $10^{\circ}$  eksenel pozisyon değişimine izin veren linklerin birbirleri üzerinde kaymalarıyla oluşmaktadır.

Sistoskop cihazının bileşenleri hesaplamalar yapıldıktan sonra 3B yazıcı ile düşük maliyetli üretilmiştir. Bu prototip üzerinde iyileştirmeler yapıldıktan sonra, son prototip metal tozlarından lazer sinterleme metoduyla 3B DMLS yazıcı kullanılarak üretilmiştir (Şekil 4).



Şekil 4 Metal olarak üretilen son prototipin, en uç noktadaki pozisyonu

Parçalar üretildikten sonra her bir link bir diğerinin üzerine uygun bir şekilde monte edilmiştir. Dört adet paslanmaz çelik halatın bir ucu, uç işlevcinin en uç noktasına, diğer ucu ise gerdirilerek Stewart platformuna monte edilen pleksi plakaya sabitlenmiştir. Böylece Stewart platformunun yaptığı hareketlerin direkt olarak uç işlevciye iletilmesi sağlanmıştır (Şekil 5).



Şekil 5 Bükülebilir sistoskopun ve Stewart platformunun monte edilmiş durumu

### III. UÇ İŞLEVCİ POZİSYONUNUN DOĞRULANMASI

Deney düzeneği oluşturulduktan sonra, uç işlevcinin metal bazlı son prototip üzerinde, amaçlanan  $40^{\circ}$  'ye ulaşip ulaşmadığı kontrol edilmiştir. Kontrol için görüntü işleme yöntemi kullanılmıştır. MATLAB'de yazılan kod sayesinde, işaretlenen noktalar arasında oluşturulan doğrular arasındaki açının bulunması amaçlanmıştır. Noktaların fark edilebilirliğini arttırmak için fosforlu renklerin kullanılmasına dikkat edilmiştir. Böylece beyaz zemin üzerindeki kırmızı ve yeşil noktalar arasında doğrular oluşturulmuş ve açılar elde edilmiştir. Yapılan doğrulamada, uç işlevcinin hedeflenen  $40^{\circ}$  'den fazla eğilme şartını sağladığı görülmüştür (Şekil 6).



Şekil 6 Uç işlevci pozisyonunun doğrulanması

### IV. SONUÇLAR

Sistoskopun, proje tamamlandığında joystick ile kontrol edilebilmesi amaçlanmaktadır. Operatör, kameradan görsel geribildirim alacak ve joystick yardımıyla hidrodinamik kaviteye tüpünü hedef bölgeye yönlendirebilecektir. Son metal prototip üretimi, deney düzeneği kurulumu ve uç işlevci açı pozisyonunun görüntü işleme ile belirlenmesi tamamlanmıştır. Cihaz uç işlevcinin hedeflendiği gibi  $40^{\circ}$  'den fazla açığa ulaştığı görülmüştür. İleriki aşamalarda ise sistem tanımlama yöntemi ile joystick ve uç işlevci arasındaki matematiksel ilişki kurulacaktır.

### V. TEŞEKKÜR

Bu çalışma TÜBİTAK 1003-Öncelikli Alanlar Ar-Ge Projelerini Destekleme Programı kapsamında 113S092 koduyla desteklenmektedir.

#### KAYNAKÇA

[1] Lacy, A. M., García-Valdecasas, J. C., Delgado, S., Castells, A., Taurá, P., Piqué, J. M., & Visa, J. (2002). Laparoscopy-assisted colectomy versus open colectomy for treatment of non-metastatic colon cancer: a randomised trial. *The Lancet*, 359(9325), 2224-2229.

[2] Denholm, S. W., Conn, I. G., Newsam, J. E., & Chisholm, G. D. (1990). Morbidity following cystoscopy: comparison of flexible and rigid techniques. *British journal of urology*, 66(2), 152-154.

[3] Perk, O. Y., Şeşen, M., Gozuacik, D., & Koşar, A. (2012). Kidney stone erosion by micro scale hydrodynamic cavitation and consequent kidney stone treatment. *Annals of biomedical engineering*, 40(9), 1895-1902.

[4] Ghorbani, M., Yildiz, M., Gozuacik, D., & Kosar, A. (2016). Cavitating nozzle flows in micro-and minichannels under the effect of turbulence. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 30(6), 2565-2581.

# Önetkin Sosyal Bir Ortamda Derin Niyet Ortaya Çıkartmak İçin İnsan-Robot Etkileşimlerinin Kullanılması

Nur Baki Er  
Elektrik-Elektronik Mühendisliği  
ODTÜ  
Ankara, Türkiye  
Email: baki.er@metu.edu.tr

Aydan M.Erkmen  
Elektrik-Elektronik Mühendisliği  
ODTÜ  
Ankara, Türkiye  
Email: aydan@metu.edu.tr

*Özetçe — Derin niyetler, insanların gündelik hayatlarında sıklıkla yaptıkları ya da anlık olarak yüzeye çıkmaya da belirli şartlarda yapmayı isteyebilecekleri dürtüler olarak tanımlanmıştır. Bu çalışmanın amacı, insanlarla etkileşime girebilecek robotların olduğu bir ortamda, önceden belirlenmiş bir niyetin denek insan tarafından yapılmasını sağlamak için robotlar tarafından uygun insan-robot etkileşimlerinin seçilmesinin sağlanmasıdır. Bu doğrultuda, özel tasarlanan oda içerisinde hareket eden insanın hareketleri bir tavan kamerası tarafından kaydedilip, işlenip takip ettiği yol bilgisi çıkarılmaktadır. Çıkarılan bu yörunge bilgisi özel bir sinir ağ çeşidi olan Autoencoder ağları ile işlenmektedir. Sinir ağların çıkışı “tavsiye vektörleri”dir ve hangi robotların denek ile etkileşime girmesi sonucunda derin niyetin ortaya çıkmasını sağlayacağını olasılıksal olarak gösteren vektörlerdir. Bu vektörlerin sonucuna göre odada bulunan insan-robot etkileşimlerinden en yüksek olasılığa sahip olanlar aktive edilmektedir. Etkileşimlerin sonucunda, denek insanın önceden belirlenen derin niyetinin ortaya çıkıp çıkmadığı, sistem başarısı olarak ölçülmüştür. İnsan-robot etkileşimleri ile derin öğrenme metotlarının beraber kullanıldığı bu özgün çalışma ile önerilen fikrin uygulanabilirliği basit ancak etkin ve başarılı bir şekilde doğrulanmıştır.*

*Anahtar Kelimeler—derin niyet, insan-robot etkileşimi, derin öğrenme, niyet şekillendirme.*

## I. GİRİŞ

İnsan-Robot etkileşimlerinin kendisini gösterdiği en önemli alanlar arasında endüstriyel uygulamaların[1] yanı sıra servis robotu olarak uygulamaları da [2][3] ön plana çıkmıştır. Özellikle son yıllarda servis robotların gündelik hayatta yer almaları için önemli çalışmalar yapılmaktadır. Bu amaç doğrultusunda insanlarla etkileşime girip, bu etkileşimlerden aldığı dürtülerle karar verme yetisine sahip ve hatta insanların davranışlarını etkileyip değiştirebilecek robotlara ihtiyaç duymaktayız. Böyle bir işbirliğine erişebilmek için de robotların insanları anlaması, duyu analizi, niyet tahmini yapabilecek yetilere sahip olması gereklidir. Fakat insanların duyu, düşünce ve hareketleri, birçok faktörden etkilenen ve çok geniş çeşitlilik gösteren unsurlar olduğu için istenilen insan-robot etkileşimine ulaşmanın zorluğu yadsınamaz. İnsanla etkileşime girmek için robotların mutlaka insan ile girdiği etkileşimleri analiz etmesi ve elde ettiği analiz sonuçlarına göre karar verme ve sentezleme mekanizmasına sahip olması gereklidir.

İnsan-robot etkileşimlerinin en önemli unsurlarından birisi robotların insan niyetlerini anlamaları ve gerekli durumlarda bu niyetleri değiştirebilecek yetilerinin olmaları önemlidir. İnsan niyeti değiştirme üzerine yapılan çalışmalar[4,5,6] son yıllarda artarak ivme kazanmıştır. Önceki çalışmalar arasında ODTÜ-MRC laboratuvarında yapılan çalışmalar, bu alana yeni bakış açıları kazandırmıştır [7,8]. Durdu [7] tarafından tamamlanan insan niyetini anlamlı robot hareketleriyle değiştirme çalışması bu alandaki çalışmaların ilkleri arasında yer almaktadır. Sonrasında çalışma [8] insan-robot arasındaki güven duygusu oluşturacak robot hareketleri tanımlayarak, insanın niyet değiştirmeye karşı direnişinin kırılmasını sağlamıştır. Bu bildiride tanımlayacağımız çalışma ise önceki çalışmaların birikimlerini de kullanarak ancak farklı olarak, “derin niyet ortaya çıkarma” konseptini ortaya koyan özgün bir yaklaşımdır.

Derin niyet, insanların gündelik hayatlarında yaptıkları ya da yapma içgüdülerinin bulunduğu hareketler olarak tanımlanmıştır. Bunlar insanın her gün monoton bir şekilde tekrar etmeleri zorunlu aktiviteler olabileceği gibi, kitap okumak, resim yapmak vb. hobiler de olabilir. Derin niyet tanımının en önemli noktası, derin niyet olarak tanımlanan aktivitenin hedef kişi tarafından yapılma içgüdüünün kişide bulunması gerekliliğidir. Örneğin ilaç alması gereken ancak unutulabilen niyetler veya bir öğrencinin ders kitabı okumak istemediğinde baskılanan derin niyetlerdir.

Bu çalışmada derin niyeti ortaya çıkarmak için gündelik yaşamımızda anlamı olan ancak robotlaştırılan ve etkileşime girebilen eşyaların bulunduğu, ve bir insanın yapabileceği birçok sıradan günlük aktivite barındıran (kitap okuma, bilgisayar kullanma, kahve içme vb.), özel bir oda tasarlanmış olup bu odadaki insan hareketleri analiz edilmiştir. Bu analiz sonucunda, önceden belirlenen bir derin niyetin ortaya çıkartılması için hangi insan-robot etkileşimlerine ihtiyaç duyulacağı, bu amaçla eğitilen bir derin sinir ağı yardımıyla belirlenmiştir. Seçilen insan-robot etkileşimleri sonucunda ise kullanıcının derin niyetinin ortaya çıkıp çıkmaması durumu sistemin başarısı olarak ölçülmüş ve incelenmiştir.

İlk bölümde Problem Tanımı yapıp tasarlanan oda, özgün yazılımımız ve donanımımız anlatılmaktadır. Daha sonra yapılan deneyler ve elde edilen sonuçlar tartışılmıştır.

Sonuç kısmında ise çalışmanın sonuçları üzerinden bir analiz verilmiştir.

## II. PROBLEM TANIMI

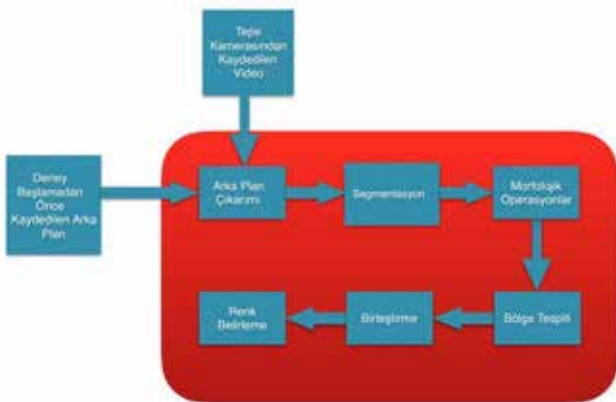
Bu çalışmanın amacı, insanın derin niyetini önetkin ortam değişkenleri aracılığıyla (insan-robot etkileşimleri ile görsel/işitsel odak değiştiriciler) ortaya çıkarabilen akıllı bir ortam oluşturmaktır. Geliştirilen bu ortama giren insanların robotlarla etkileşimleri gözlenerek, yeni bir denek üzerinde bu kişinin derin niyetini ortaya çıkartacak uygun önetkin ortam değişkenlerinin seçilmesi en önemli hedeflerden birisidir.

Çalışma gözlem aşaması ve karar verme aşaması olarak iki ana adımda uygulanmıştır. Gözlem aşamasında, insanın odadaki hareketi ile oluşturduğu yol bir tavan kamerası ile kaydedilmiştir. Karar verme aşamasında ise izlenen yol analiz edilerek, uygun ortam değişkenleri ile derin niyeti ortaya çıkarmak için insan-robot ve insan-nesne etkileşimleri gerçekleştirilmiştir.

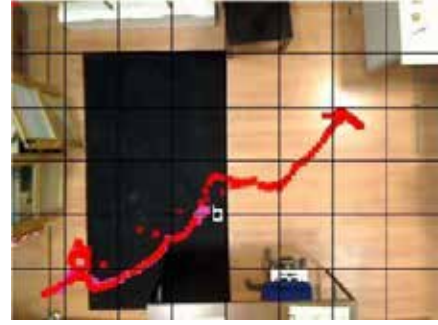
### Gözlem Aşaması

Gözlem aşamasında bir tavan kamerası aracılığıyla kaydedilen insan hareketleri, Şekil 1'deki görüntü işleme akışı uygulanarak analiz edilmiştir. İzlenen yol 240\*320 piksel boyutunda bir yörünge olarak bu aşamanın çıktısı olarak oluşturulmuştur. Bu akıştaki adımlar: parça bölümlenme (segmentation), morfolojik operasyonlar, bölge tespiti (blob detection), birleştirme (merging) ve renk belirlemedir (color detection).

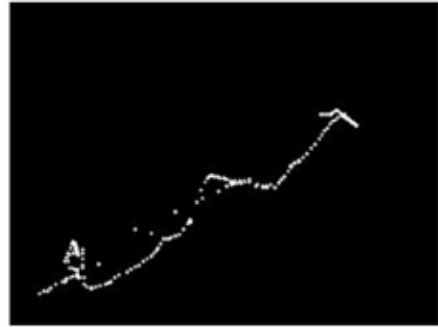
Kameranın çektiği video görüntüsüne (Şekil 2) Şekil 1'deki adımlar uygulanarak bulunan yörünge verisi (Şekil 3) aynı piksel değerlerine sahiptir. Bunun sebebi oda içerisindeki niyet değiştirme amaçlı kullanılacak ortam değişkenleri ile insanın konumunun gerçek değerleriyle temsil edilmesini sağlamaktır. Bu bilgi, insanın hangi ortam değişkenleriyle etkileşime girmesinin daha olası olduğunu anlamak için odanın hangi kısımlarında daha çok vakit geçirdiğinin analiz edilmesi amacıyla kullanılmaktadır.



Şekil 1 - Görüntü İşleme Adımları



Şekil 2 - Görüntü İşleme adımları ile insanın izlediği yol.



Şekil 3 - Gözlem Aşamasının çıktısı olarak insan hareket yolunun 240\*320 piksel büyüklüğündeki yörüngesi.

### Karar Verme Aşaması

Karar verme mekanizmasının amacı gözlem aşamasının çıktısı olan insan yörüngesinin analiz edilerek, istenilen derin niyetin ortaya çıkması için hangi ortam değişkenlerinin ve buna bağlı hangi robot hareketlerinin aktive edilmesi gerektiğini belirten tavsiye vektörlerini oluşturmaktır. Tavsiye vektörleri ortam değişkenlerine ve robot hareketlerine 0-1 arasında ağırlık vermektedir. Bu ağırlıklar ortam değişkenlerinin hangisinin seçilmesi gerektiğini göstermektedir.

Karar verme 3 katmanlı istifli "Autoencoder" mimarisine dayalı yapay sinir ağları kullanılarak yapılmaktadır. Autoencoderlerin kullanılma amacı hem boyut düşürme yapması hem de özellik vektörlerinin oluşturulmasını sağlamasıdır. Yapay sinir ağının girdisi 240\*320 piksellik yörünge (Şekil 3), çıktısı da tavsiye vektörleridir.

İstifli Autoencoder mimarisini eğitirken "Greedy Layer-Wise Training" yaklaşımı uygulanmış olup, bu sayede rastgele başlangıç değerleri atama problemlerinden kaçınılmaya çalışılmıştır.

## III. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmaların en önemli adımlarından birisi, deneklerde ortaya çıkarılması istenen derin niyetin belirlenmesidir. Deneye tabi tutulan insanlar öğrenciler arasından seçildiğinden dolayı, her öğrencinin kitap okuma derin niyeti olduğu varsayılarak, derin niyet olarak kitap okumak seçilmiştir. Deneyler iki farklı öğrenci grubunun katılımıyla gerçekleştirilmiştir. İlk grup 15 öğrenciden oluşmakla beraber, bu gruptan elde edilen veriler İstifli Autoencoder ağını eğitmek amacıyla kullanılmıştır. İkinci grup ise 12 öğrenciden oluşup, test grubu olarak seçilmiştir.

Özgün sistemimizin derin niyet ortaya çıkarma başarısı 12 kişilik grupla beraber gerçekleştirilen deneylerin sonuçlarından yola çıkarak belirlenmiştir.

İlk aşamada deneysel çalışmalar Deney Odasının Tasarımı ve Deneylerin Uygulanması olarak iki başlık altında incelenebilir.

### Deney Odasının Tasarımı

Deney odasının tasarımı ortam değişkenleri ve odada yapılabilecek aktivitelere bağlı olarak yapılmıştır. Ortam değişkenleri, robotlar ve sesli/görsel odak değiştirici araçlardır. Bunlar karar vericinin sunduğu tavsiye vektörlerindeki en ağır basan üyesine göre aktive edilerek, denekte istenilen derin niyetin ortaya çıkmasını sağlamaktadırlar.

Deney odasında, insan ile etkileşime girebilecek iki adet robot bulunmaktadır. Bunlar kablosuz haberleşme aracılığı ile karar verici bilgisayar yazılımı tarafından kontrol edilen Şekil 4’teki merdiven ve sandalye robotlarıdır.



Şekil 4 - Merdiven ve Sandalye Robot

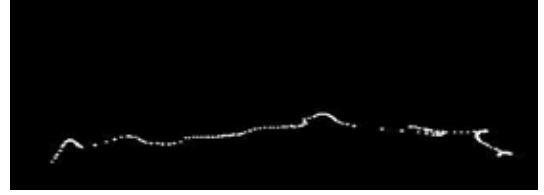
Bu robotlara ek olarak odanın farklı bölgelerine yerleştirilen lamba ve sesli uyarıcılar ile içerideki insanın dikkatinin yönlendirilerek uygun niyetler uyandırılmaktadır.

Derin niyet olan kitap okumanın dışında oda içerisinde yapılabilecek niyete dayalı aktiviteler: kahve içmek, bilgisayar ile oynamak, film posterlerine bakmak, müzik yapmak ve oturmaktır. Bu aktivitelerin yapılabileceği alanlar odanın farklı taraflarına rastgele bir şekilde yerleştirilmiştir.

### Deneylerin Uygulanması (Test Grubu)

Deneylerin uygulanmasını test grubundan bir örnek üzerinden açıklamak daha açıklayıcı olacaktır. Denek olan öğrenciye oda hakkında genel bir bilgi verdikten ve serbest bir şekilde odadaki her şeyle etkileşime geçebileceği söylendikten sonra (hareketli robotların olduğu bilgisi verilmemektedir) odaya girmesi istenmiştir. Odaya girişinden itibaren tavan kamerası ile hareketleri kaydedilmeye ve görüntü işleme teknikleri ile analiz edilmeye başlanmıştır. Bu örnekte öğrencinin odaya girişinden “oturma” niyetini gerçekleştirmesine kadar olan süreç Şekil 6’da verilmiştir.

Bu görüntüleri içeren videonun görüntü işleme sonrası verdiği çıktı Şekil-5’teki gibidir ve ilgili öğrencinin odaya girişinden sandalyeye oturmasına kadar geçen sürede izlediği yol gösterilmektedir.



Şekil 5 - Denek Öğrencinin izlediği yörünge



Şekil 6 - (a) Denek öğrencinin odaya girişi, (b)(c)(d)(e) Odayı inceleyerek yapmak istediği aktiviteyi (görünen niyet) seçmesi (f) Görünen (anlık) niyetini gerçekleştirerek sandalyeye oturması

Denek öğrencinin izlediği yörüngeye göre karar vericinin sunduğu tavsiye vektörü Şekil-7’deki gibidir.

$$\begin{bmatrix} \text{Merdiven Robot} \\ \text{Sandalye Robot} \\ \text{Bilgisayar} \\ \text{Sound} \\ \text{Işık} \\ \text{Kahve Makinesi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5413 \\ 0.3552 \\ 0.0997 \\ 0 \\ 0.0056 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Şekil 7 - Karar verici çıktısı olan Tavsiye Vektörü

Bu tavsiye vektörü ışığında, sandalye robot ve merdiven robot kullanılarak (en yüksek ağırlıklı üyeler) denek öğrencinin şimdiki niyetinden (oturmak) ayrılıp, ortaya çıkartılmak istenen derin niyetine (kitap okumak) yönlendirilmesi hedeflenecektir. Bilgisayar da 3üncü ağırlıkta üyedir. Dolayısı ile, sandalye robot hareketleriyle denek öğrencinin bilgisayara doğru gitmesi sağlanarak derin niyetten önce ara bir geçici niyet oluşturulmuştur. (Şekil 8)

Bu adımla denek öğrencinin sandalye robota oturarak bilgisayara doğru yönlendirilmesi sağlanmıştır. Ardından, tavsiye vektöründe belirtildiği gibi, merdiven robot aktive edilmiştir. Ve denek öğrencinin sandalyeden kalkıp kitaplığa doğru gitmesi hedeflenmiştir (Şekil 9). Sonuç olarak görünen niyeti “oturmak” olan bir öğrenci, insan-robot etkileşimleri kullanılarak derin niyeti olan “kitap okumaya” yönlendirilmiştir (Şekil 10).

Deneylerin arasında derin niyeti başarılı bir şekilde ortaya çıkartılan deneklerin yanı sıra, ortam değişkenleri ile

etkileşime girmeyi tercih etmeyen, derin niyetin ortaya çıkmasına direnen denek öğrenciler de olmuştur. Denek öğrencinin ortam değişkenleri ile etkileşime girmemesinin sebepleri arasında anlık niyetinin bağlayıcılığının önemli bir rolü vardır. Şekil 11-1’de anlık niyeti tablet ile oyun oynamak olan bir deneğin, sandalye robot ile geçici niyet oluşturmak için etkileşime girmemesi gösterilmiştir. Şekil 11-2’de merdiven robot deneğin dikkatini çekmeyi başarsa da, tabletin bağlayıcılığından dolayı derin niyetin ortaya çıkması sağlanamamıştır.



Şekil 8 – Sandalye robotunun hareketleri (a) Robotun ilk pozisyonu (b) Robotun “dikkat çeken” hareketi; bu hareket ile denek öğrencinin ilgisi çekilmekte ve robotla arasındaki güven bağının kurulması sağlanmaktadır. (c) Robotun son hareketi ile öğrenciyi bilgisayara yönlendirmesi



Şekil 9 – Sandalye robotunun dikkat çekme hareketiyle öğrencinin görme alanına girmesi(a) ve öğrencinin ilgisini çektikten sonra kitaplığa doğru yönlendirmesi.



Şekil 10 – Denek öğrencinin kitaplığa yönelmesi ve derin niyetinin ortaya çıkartılması

#### IV. SONUÇLAR

12 kişilik öğrenci grubu ile gerçekleştirilen deneyler sonucunda 8 öğrencinin derin niyeti insan-robot etkileşimleri ve odak değiştiriciler yardımıyla ortaya çıkartılmıştır. Bu başarı oranının farklı değişkenlere göre analizi yapılmıştır.



Şekil 11-1 - Sandalye robotunun geçici niyet oluşturmak amacıyla aktive edilmesi. 11-2 – (a,b,c) Merdiven robotunun derin niyeti ortaya çıkartmak için aktive edilmesi (d) Deneğin robotla etkileşime girmemesi ve tabletle oyun oynama niyetinden vazgeçmemesi

Bunlardan ilki denek öğrencilerin görünen(anlık) niyetlerine bağlanmaları için verilen süredir. Bir başka değişle denek öğrencinin anlık niyetini gerçekleştirilmesi ile ortam değişkenlerinin aktive olması arasında geçen süredir. Bu süre 30 saniye ile 5 dakika arasında değiştirilmiştir. Bağlılık süresi arttıkça deneklerin görünen niyetlerini bırakmalarının zorlaştığı ve sistem başarısının düştüğü gözlenmiştir.

Ek olarak, deneklerin görünen niyetlerinin bağlayıcılığı da önemli bir değişken olarak gözlenmiştir. Örneğin oda içerisindeki araçlarla müzik yapmanın bağlayıcılığı oturmaktan daha fazladır. Dolayısıyla müzik yapmayı tercih edenin derin niyetini ortaya çıkarma noktasında direnci daha fazla olmaktadır. Direnç kırma için oda içi aktivitelerin çeşitliliğinin ileriki uygulamalarımızda artırılması hedeflenmektedir.

#### V. KAYNAKÇA

1. Awais, M., & Henrich, D. (2013). Human-Robot Interaction in an Unknown Human Intention scenario, 89–94.
2. Carlson, T., & Demiris, Y. (2008). Human-Wheelchair Collaboration Through Prediction of Intention and Adaptive Assistance, 3926–3931.
3. Polani, D., & Dautenhahn, K. (2008). Towards Socially Adaptive Robots: A Novel Method for Real Time Recognition of Human-Robot Interaction Styles, 353–359.
4. Tahboub, K. A., & Member, S. (2005). Compliant Human-Robot Cooperation based on Intention Recognition, 1417–1422.
5. Control, P., & Karlsruhe, U. (2007). Proactive Robot Task Selection Given a Human Intention Estimate \*,726–731.
6. Han, J., & Kim, J. (2010). Human-Robot Interaction by Reading Human Intention based on Mirror-Neuron System, 561–566.
7. Durdu, A., Erkmen, I., & Erkmen, A. M. (2012). Observable operator models for reshaping estimated human intention by robot moves in human-robot interactions. INISTA, 2012 International Symposium on, 1–5.
8. Görür, O. C., & Erkmen, A. M. (2014). Elastic networks in reshaping human intentions by proactive social robot moves. RO-MAN’14 1012–1014

# Esnek Bacaklı Robotlarda Dört-Çubuk Mekanizması ve Sarmalı Kam ile Bacak Sertliğinin Sentezlenmesi

Sinan Şahin Candan  
Makina Mühendisliği Bölümü  
Orta Doğu Teknik Üniversitesi  
Ankara, Türkiye  
Email: sinan.candan@metu.edu.tr

Uluç Saranlı  
Bilgisayar Mühendisliği Bölümü  
Orta Doğu Teknik Üniversitesi  
Ankara, Türkiye  
Email: saranli@ceng.metu.edu.tr

Yiğit Yazıcıoğlu  
Makina Mühendisliği Bölümü  
Orta Doğu Teknik Üniversitesi  
Ankara, Türkiye  
Email: yigit@metu.edu.tr

**Özetçe** —Yay-kütle temelli modellerin hem doğadaki hayvanların hareketini modellemedeki, hem de bacaklı robotlarda koşma davranışının kontrolündeki kullanışlılıkları literatürde ortaya konmuştur. Bu sebeple, bu tür modellerin fiziksel mekanizmalar ile gerçeklemeleri robot platform tasarımında önem kazanmaktadır. Fakat, bu tasarımlarda kütle ve yay hareketlerinin radyal eksene kısıtlanmaları gerektiğinden, genellikle karmaşık yataklama ihtiyacı doğmakta ve bu da tasarımın zorluğunu artırmaktadır. Buna alternatif olarak, literatürde dört-çubuk mekanizmaları ile doğrusala yakınsayan harekete sahip mekanizmaların kullanımı önerilmiştir. Bu çalışmada ise, bu tür dört-çubuk mekanizmalarında hareket ekseninde istenilen yay kuvvet profilini elde edebilmek için uzuvlara monte edilen kablo sarımlı kam profilleri kullanılmasını önermekteyiz. Bu doğrultuda merkezleri sabit olan kamlar için gerçekleştirilen çalışmaları referans olarak, merkezleri hareket eden uzuv monteli kamlara sarılan kablounun esnettiği yay kuvvetinin istenilen profile sahip olacağı şekilde kam tasarımı gerçekleştirilmiştir. Önerdiğimiz yöntem sonucunda elde edilen kuvvet profilleri de incelenerek doğrulama sağlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler**—bacaklı robotlar, esnek bacak, sarmalı kam, dört çubuk mekanizması

## I. GİRİŞ

Engebeli arazilerdeki hareket üstünlükleri ile bacaklı robotlar günümüzde önem kazanmaktadır. Dolayısıyla, bu robotların kontrolü, tasarımı, analizi ve simülasyonu için koşma ve yürüme davranışlarını biyolojik canlılara yakın şekilde, ifadesi basit ve çözümü kolay modellerin ortaya konması gerekmektedir [1]. Yaylı Ters Sarkaç veya SLIP (Spring Loaded Inverted Pendulum) modeli bütün bu isterleri özellikle koşma hareketi için sağlamaktadır ve üzerine sıkça çalışılmaktadır [2]. Burada yaylar, robotlardaki gereksiz enerji kayıplarını önlemek, eklemlere binen kuvvetleri yumuşatmak, gerektiğinde uçuş fazında aktif bir şekilde enerji biriktirerek hareketi düzenlemek ve çarpma etkilerini yumuşatmak gibi birçok kullanıma sahiptir. [3] Bu nedenlerle, SLIP modelini gerçekleyecek robotların tasarımı, yayların sisteme entegrasyonu, robotların üretimi ve pratik kullanımı üzerine çalışma yapmak değer kazanmaktadır. SLIP modelinin bu doğrultuda kullanımında iki ana sorun bulunmaktadır. Birincisi, yay ve kütle hareketinin sadece radyal yönde olduğu için doğrusal mafsallar kullanılması gerekliliği ve bundan doğan yataklama problemleridir. Bu nedenle tasarım, üretim ve pratik kullanım oldukça zorlaşmaktadır. İkincisi ise, bacağın mümkün olduğunca hafif kalması ve ana kütlelinin yayın ucunda noktasala yakın toplanmış olması gerekliliğidir [4]. Literatürdeki

çalışmaların bazılarında bu sorunların çözümü için dört-çubuk mekanizmaları kullanılmış ve öncelikle doğrusal mafsallar yerine dönel mafsallar kullanılarak yataklama problemi büyük ölçüde çözülmüş ve buna ek olarak da gövde kütleline göre daha hafif bir bacak yapısı ortaya konabilmiştir. Şekil 1’de gösterilen ATRIAS Robotu buna bir örnektir ve SLIP denkleğini sağlamada etkili bir çözüm sunmuştur [4]. Ancak, bu sistemde de radyal esnekliğin tasarıma eklenmesi bir sorun kaynağı olmuştur. Zira, yayın radyal yönde etki etmesi ve kütlelinin radyal yöndeki hareketi ile doğru orantılı bir kuvvet profili vermesi SLIP modelinin geçerliliği için gerekmektedir. Eğer yay mekanizmaya radyal olarak yerleştirilirse, sıkışma durumunda çalışacağından; bükülme vb. problemlerin aşılması için yataklama gerekliliği tekrar ortaya çıkacak ve bu, tasarımı yine karmaşıklaştıracaktır.

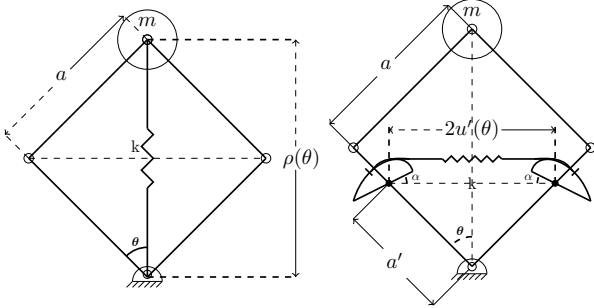


Şekil 1: ATRIAS platformu ve radyal yöndeki sanal SLIP. Bu platformda yaylar mafsal motorlarına eklenmiş fakat doğrusal olmayan bir profil yaratmışlardır.

Bu çalışmada, robot tasarımının SLIP denkleğini sağlaması için dört-çubuk mekanizmaları kullanılarak yukarıda problemlerin giderilmesine çalışılmaktadır. Bu doğrultuda, bir dört-çubuk mekanizmasında uygun eklemlere yerleştirilen merkezleri hareketli ve üzerlerine ip saran kam mekanizmaları kullanılmıştır. Böylece hem yataklama ihtiyacı ortadan kalkmış, hem de gövdeye istenilen yay kuvvet profilini uygulamak mümkün olmuştur. Buradaki ana fikir, Bölüm II’de bahsedileceği üzere istenen radyal yönlü yay kuvvetini gerçekleyecek fakat başka şekilde monte edilecek bir çekme yayını kullanmak için uygun kam profilini tasarlamaktır. Literatürde ip sarmalı kam mekanizmalarının tasarımı merkezleri sabit ve ipin ekstradan bir makara üzerinde tutularak kinematik olarak

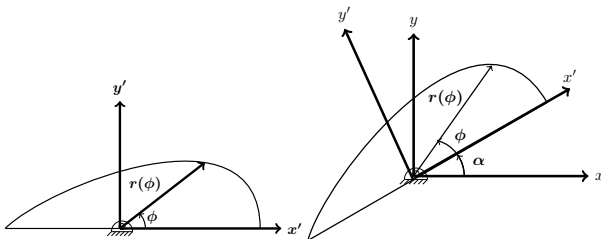
kısıtlandığı durumlar için gösterilmiştir[5][6]. Bu çalışmalar baz alınarak merkezleri hareketli kamların tasarımına yoğunlaşılacaktır.

## II. PROBLEM FORMÜLASYONU



Şekil 2: Sıkışma durumundaki radyal SLIP yayı (solda) ve dört-çubuk eklemine monte edilen ip sarmalı kam mekanizması ile hareket eden çekmeli yay (sağda)

Şekil 2'de gösterilen modellerde robot gövdesinin sadece dikey yönde hareket ettiği varsayılmış ve eklem uzunlukları eşit simetrik bir dört-çubuk mekanizması kullanılmıştır. Ayrıca uçuş fazında robotlar sadece birer kütle hareketi sergileyebileceği ve kinematik önemsiz olacağından, yere dokundukları andan itibaren davranışlar incelenecektir. Sıkışma ve çekme modellerinin eşdeğerliği sağlayacak kam mekanizmasını tasarlamak için, öncelikle rastgele verilen bir kam profili üzerine sarılan yayın davranışı analiz edilecek, ve bunu takiben optimizasyon yoluyla sentez gerçekleştirilecektir. Şekil 2'de sağda dört-çubuk mekanizması ve kam bağlantısı ile ilgili tanımlar gösterilmiştir. Mekanizmanın hareketi  $\theta$  genel koordinatına göre tanımlanmakta ve bu hareket mekanizma ve kamların ilk konumlarına göre kamları  $\alpha$  açısıyla etkilemektedir. Bu iki tanım  $\alpha = \theta - (\theta_0 - \alpha_0)$  ile ilişkilendirilebilir. Kamlar, alt uzunluğuna simetrik olarak bağlanmıştır. Kamlar ve ip dört-çubuğun dik köşegenine göre simetrik ve ip gergin olduğundan, yay yere paralel olacaktır. Kamların merkezleri arasındaki mesafe  $2u'(\theta)$  olarak tanımlanmıştır.

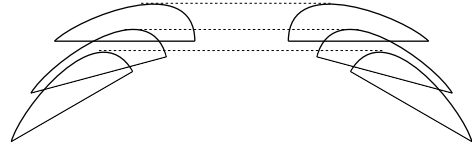


Şekil 3: Kam profili (solda) ve referans düzlemleri (sağda).  $\theta$  kamın bağlı olduğu eklem hareketini tanımlarken  $\phi$  ise kam profilini kam düzlemine göre tanımlamaktadır.

Şekil 3'de bir kamın kendi merkezine göre tanımları verilmiştir. Burada, robot gövdesine göre yönü sabit  $x - y$  eksenleri ile kamın dönüşünden etkilenen  $x' - y'$  eksenleri de tanımlanmıştır. Anlaşılabilirliği artırmak için kamın alt yüzeyi düz olarak gösterilmiştir ve  $x'$  eksenini bu alt yüz ile çakışık olarak gösterilmiştir. Bu başlangıç varsayımı kısıtlayıcı değildir. Tasarımcı,

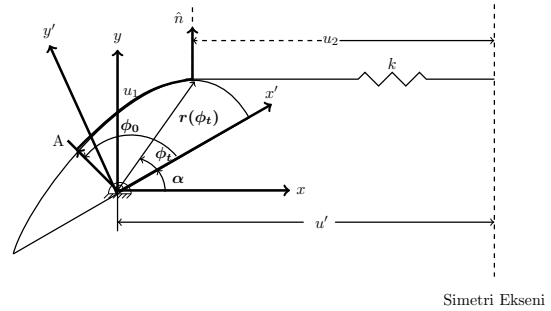
hareketli koordinat sistemini rastgele bir geometriye dilediği gibi yerleştirip aynı analizi yapabilir. Sentez bölümünde de bahsedileceği üzere tek kısıtlayıcı unsur, kam eğrisinin kavrisinin ip sarılmasını mümkün kılacak şekilde olması gerekliliğidir.

Şekil 3(a)'da gösterilen kam, kendi koordinat sisteminde  $\phi$  açısında merkeze uzaklığı  $r(\phi)$  olan bir eğri ile tanımlanmıştır. Robotun normalde yapacağı sıkışma hareketi boyunca, alt bacağa bağlı olan kamlar,  $x - y$  düzlemine göre  $\alpha$  açısı ile Şekil 3(b)'deki gibi hareket ettiğinde ip saracak ve yayı gerecektir. Bu durumda iki kam arasında oluşan göreceli hareket de Şekil 4'de gösterilmiştir.



Şekil 4: Kamların hareketleri ile oluşan yay gerilmesi

Sonuç olarak sistemde öngördüğümüz kullanımda kamların hem açıları değişmekte, hem de merkezleri hareket etmekte ve bu da analizi karmaşıklaştırmaktadır. Buna karşın, yayın yere paralel kalması ve kamların simetrisi önemli bir kolaylık sağlayacaktır. Bu nedenlerden ötürü, kamın bütün hareketlerinin kinematik olarak başka gövdelere verilmesinden ziyade; kamın bazı hareketleri terslenmiştir. Şekil 5'de görüleceği gibi dört-çubuğun dikey yöndeki simetrisi sebebiyle yay yalnızca  $x$  ekseninde gerilecektir ve her iki taraftaki kam da aynı sarılımlı gerçekleştirecektir.



Şekil 5: İp sarmalı kam mekanizmasının dikey eksene göre simetrik hareketi ve yay uzunluğunun sarılma ( $u_1$ ) ve havadaki ( $u_2$ ) bileşenlerinin gösterimi.

Burada  $\phi_t$  yayın o an kam profiline tanjant olduğu açı olarak tanımlanmıştır. Bu açı  $\alpha$ 'ya yani dolaylı olarak  $\theta$ 'ya bağlıdır. Ayrıca  $u'(\theta) = a' \sin(\theta)$  ise simetri ekseninin kama göre hareketidir ve yayın kam dışında kalan kısmı  $u_2(\theta) = u'(\theta) - r(\phi_t) \cos(\phi_t + \alpha)$  şeklinde hesaplanabilir.  $\phi_0$  yayın kama bağlandığı ilk konumdur ve  $u_1(\theta)$  ise bu konuma göre  $\phi_0$  ve  $\phi_t$  arasındaki ip sarılma miktarıdır.  $u_1(\theta)$ , polar koordinatlarda ark uzunluğu bilgisinden yola çıkılarak  $u_1(\theta) = \int_{\phi_0}^{\phi_t} \sqrt{r(\phi)^2 + \left(\frac{dr(\phi)}{d\phi}\right)^2} d\phi$  şeklinde hesaplanabilir. Ancak, ipin kama en uçtaki bağlantı noktası olan  $\phi_0$  açısının hareket boyunca  $\phi_t$ 'den büyük kalması gerekmektedir.

Bu bilgiler ışığında, tek bir kamın çıktısı olarak yayın her  $\theta$  için uzama miktarı

$$u(\theta) = u_1(\theta) + u_2(\theta) \quad (1)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada henüz bulunmamış olan önemli bir bilinmeyen ipin kamı terkettiği ve  $\theta'$ 'ya göre değişen  $\phi_t$  açısıdır. Şekil 5'da gösterildiği gibi simetri ve gerginlikten ötürü yay, kamdan ayrılma noktasında her zaman yatay kalacaktır. Böylece kam profil eğrisinin  $x-y$  koordinat sisteminde yatay olduğu nokta ipin kamı terkettiği nokta olacaktır. Bu koordinat sistemindeki dikey birim vektör  $\hat{\mathbf{n}} := [0 \ 1]^T$  olarak tanımlandığında bu durum

$$\left. \frac{d}{d\phi} (R(\alpha)\mathbf{r}(\phi)) \right|_{\phi=\phi_t} \cdot \hat{\mathbf{n}} = 0 \quad (2)$$

denklemleri ile ifade edilebilir.  $R(\alpha)$  standard rotasyon matrisidir ve kam ile dört-çubuk mekanizmasına bağlı koordinat sistemleri arasındaki geçişi ifade etmektedir. İfade açılırsa,

$$\left. \frac{dr(\phi)}{d\phi} \right|_{\phi=\phi_t} \sin(\phi_t + \alpha) + r(\phi_t) \cos(\phi_t + \alpha) = 0 \quad (3)$$

ifadesi elde edilir. Bu denklemler, kamların her türlü hareketli sisteme takılmasına göre modifiye edilebilir. Bu sadece yay doğrusunun açısını, yani  $\hat{\mathbf{n}}$  vektörünü ve  $u_1$  uzaklığını belirleyecektir. İlk açılar, sabit ve hareketli koordinatlar ve kam-mekanizma arasındaki açı farkları belirtildiğinde aynı analiz prosedürü her durum için gerçekleştirilebilir.

Sonuç olarak, verilen bir kam profili için öncelikle (3) kullanılarak robotun yapacağı harekete göre tanımlanan  $\theta$  aralığındaki her açı için  $\phi_t(\theta)$  nümerik bir yöntemle hesaplanabilir. Ardından da yine aynı aralığa göre (1) kullanılarak  $u(\theta)$  ve kamın yayı  $\theta$  ya göre nasıl gereceği hesaplanabilir. Dolayısıyla spesifik bir çıktı için parametrik halde verilen bir kam profilinin katsayıları optimize edilebilir. Elbette, denklemler nümerik çözülürken  $\phi_t$  gibi değerlerin hangi fiziksel sınırlar içerisinde kalacağı kısıt olarak yöntemle eklenmelidir. Bu bilgiler ışığında, robotun  $\theta_{as} < \theta < \theta_s$  hareket aralığında robot için beklenen bir  $u_{istenen}(\theta)$ 'ya yönelik, verilen parametrik bir  $r(\phi) = f(\mathbf{p}, \phi)$  kam eğrisi fonksiyonu ve  $\mathbf{p} := [p_1, p_2, \dots]$  vektöründen alınan parametrelerle bir  $u_{hesaplanan}(\theta)$  açıklanan prosedürle elde edilebilir. Ardından, uygun kam tasarımı,  $p$  vektörünün değiştirilmesiyle şöyle bir optimizasyon problemine dönüştürülebilir:

$$g(\mathbf{p}) := \int_{\theta_{as}}^{\theta_s} (u_{istenen}(\theta) - u_{hesaplanan}(\theta, \mathbf{p}))^2 d\theta \quad (4)$$

$$\mathbf{p}_{opt} = \underset{p}{\operatorname{argmin}} [g(\mathbf{p})] \quad (5)$$

Şimdi ise  $u(\theta)$  isterini ilk bölümde belirtildiği üzere  $\rho(\theta)$  denkliği baz alınarak hesaplamalıyız. Diğer bir deyişle, Şekil 2'deki iki sistemin dinamik denkliğini sağlamalıyız.

Kütlenin tamamı gövdede olduğundan, her iki sistemdeki kütle hareketleri aynıdır. Tek değişen bacaklara etkiyen yay kuvvetleri olmaktadır. Asıl amaç, bu yay davranışlarının kütelere yansımalarının eşleştirilmesidir. Kütlesiz bacak varsayımı altında yarı-statik sanal iş yöntemi ile yayların yaptığı işler analitik olarak eşleştirilerek bu sağlanabilecektir.

Detaya inmeden, sanal iş ifadesi her iki durum için de yazıp eşitlenirse

$$2k'(2u(\theta) - b') \frac{du(\theta)}{d\theta} \delta\theta = k(b - \rho(\theta)) \left(-\frac{d\rho(\theta)}{d\theta}\right) \delta\theta \quad (6)$$

denklemleri elde edilmektedir. Burada  $k'$  çekme durumundaki yayın yay sabiti,  $b'$  aynı yayın serbest uzunluğu,  $k$  sıkışma durumundaki yayın yay sabiti ve,  $b$  aynı yayın serbest uzunluğudur. Çekme durumunda iki ayrı kamın iş yaptığı unutulmalıdır. Çekme kuvveti de yine 2 kamın toplam germe miktarından oluşacaktır. Sıkışma durumunda  $\rho(\theta)$  azalacağından türevi eksi değer olacaktır. Hareket, radyal yaylı sistemin ilk duruştan son duruşa doğru basılması olarak düşünülmektedir. Eşlenik olarak da ikinci sistemdeki yaylar çekilecektir ve işler eşitlenecektir. Sanal işlerin işaretleri kuvvetlerin ve yer değiştirmelerin birbirilerine göre yönleriyle ilgilidir ve her iki durumda da çarpımlar negatiftir. Ve iş işaretleri belirtildiği için, kuvvetler pozitif olacak şekilde yazılmıştır. Ayrıca tasarım, sistemin çalışması boyunca  $2u(\theta) > b'$  ve  $b > \rho(\theta)$  eşitsizliklerinin sağlanacağı şekilde yapılmalıdır. Böylece kama bağlı yaylar hep çekme durumunda çalışacak ve bükülme engellenecektir.

İfadeye dönülürse, Şekil 2(a)'da görüleceği üzere  $\rho(\theta) = 2a \cos(\theta)$  olarak hesaplanabilir. Buradan yola çıkarak yukarıdaki denklem

$$(2k'u(\theta) - k'b') du = (kba \sin(\theta) - ka^2 \sin(2\theta)) d\theta \quad (7)$$

şekline dönüştürülebilir. Denklem düzenlenir ve integral alınır

$$u^2(\theta) - b'u(\theta) + \left[ \frac{kab \cos(\theta) - 0.5a^2 \cos(2\theta)}{k'} - \frac{k'}{C} \right] = 0 \quad (8)$$

denklemleri elde edilir.  $C$  integral sabitidir. İki taraf  $k'$ 'a bölünür ve  $D := C/k'$  ve  $E := (kab \cos(\theta) - 0.5ka^2 \cos(2\theta))/k' - D$  tanımları yapılırsa

$$u(\theta) = 0.5(b' + \sigma \sqrt{b'^2 - 4E}) \quad (9)$$

denklemleri elde edilir. Ayrıca, integral sabitini bulmak için bacak mekanizmasının tasarımcı tarafından belirlenecek veya analiz edilen duruma göre ifade edilecek ilk durumları kullanılarak  $D$  sabiti de

$$D = u^2(\theta_0) - b'u(\theta_0) + \frac{1}{k'} (kba \cos(\theta_0) - 0.5ka^2 \cos(2\theta_0)) \quad (10)$$

olarak elde edilebilir. Dolayısıyla denklik için olması gereken  $u(\theta)$  bilgisiyle istenen yay profili yukarıda tanımlanan minimizasyon problemi ile optimize edilerek çözülebilir. Sigmmanın işareti kamın çekme durumunda kullanılması istendiği için analiz sonucunda belirlenecektir. Zira, denkliği sağlayacak profil için sıkıştırma ve çekme olmak üzere iki ayrı çözüm vardır ve bunlar aynı enerjetik davranışları verecektir. Unutulmamalıdır ki, sanal iş ifadesinde  $u(\theta)$  iki ile çarpıldığı için bu tek bir kamın isteridir.

### III. ÖRNEK ÇALIŞMALAR VE SONUÇLAR

Önceki bölümde ulaşılan denklemler istenilen pratik ilk durumlar ile birleştirilirse çeşitli sayısal sonuçlara ulaşılabılır. Örneğin zıplayan bir robot için, havadan yere iniş anındaki genel açıyı  $\theta_0 = 20 \text{ deg}$  alırsak, ve yere inme anında yayların serbest uzunluklarına geldiklerini düşünürsek ve kamları

kolaylık açısından serbest uzunlukta  $\alpha = 0$  olacak şekilde taktıysak denklemler basitleşecektir. Ayrıca, kamlı sisteme kamsız sistemdeki yayın aynısını taktığımızı düşünebiliriz (Şekil 2). Bu durumda,  $k' = k$  ve  $b' = b$  olacaktır. Örnek olarak dört çubuk mekanizmasında  $a := 0.3$ ,  $a' = 0.2$ 'dir. Böylece  $u_{istenen}(\theta)$  bulunabilir ve optimizasyona gidilebilir. Yere düşen aynı sıkışma yaylı dört çubuk mekanizması için radyal uzunluk  $b = 2a\cos(\theta_0)$  olacaktır ve aynı durum  $u(\theta_0)$  için de geçerli olacaktır. Dolayısıyla  $2u(\theta_0) = 2a\cos(\theta_0)$ 'dur. Böylece iki durumda da yayların uyguladıkları kuvvet sıfırdır ve cisim beklediği üzere serbest düşüş yapmaktadır. Yere dokunma anı da ilk durumdur. Bu bilgiden yola çıkılarak 10. denklemden D;

$$D = -0.25b^2 + bacos(\theta_0) - 0.5a^2\cos(2\theta_0) = 0.5a^2$$

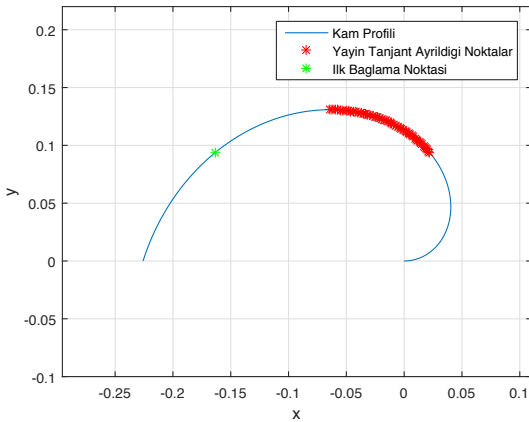
olarak elde edilir. E ise

$$E = bacos(\theta) - 0.5a^2\cos(2\theta) - D$$

olarak elde edilir ve 10. denkleminde bu bulgular yerine konularak  $u(\theta)$  bu özel durumlar uzayı için bulunabilir. Ve dört ana denklem kullanılarak (2,4,5,6), verilen çalışma aralığı, kam profili ve ilk konumlar için optimizasyon gerçekleştirilebilir.

#### A. Doğrusal Kam Profili

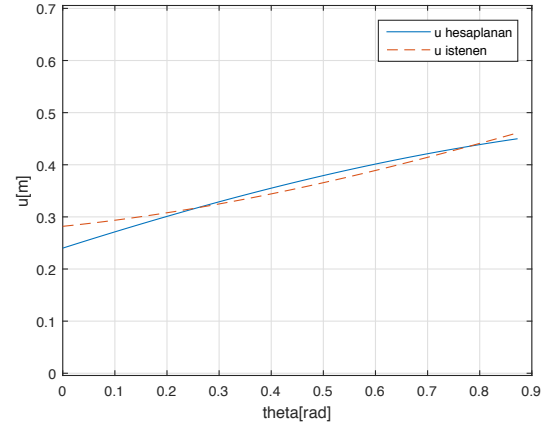
Fit edilmesi için seçilen  $R(\phi) = A\phi + B$  için ve 20 deg –70 deg aralığında verilen ilk koşullar için optimizasyon uygulandığında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 6: Kam Profili ve kullanılan yüzeyleri

Verilen profil ve ilk kabullerden yola çıkarak sırasıyla,  $\phi_t$ ,  $u_{hesaplanan}(\theta)$  elde edilmiş ve önceki bölümde bulunan  $u(\theta)$  bilgisiyle 4. ve 5. denklemlerdeki prosedür uygulanmıştır. Ayrıca, fiziksel olarak verilen bir açı için pozitif bir  $r(\phi)$  bekleneneğinden optimizasyonda A ve B için pozitiflik şartı konmuştur. Türetilen denklemlerin kontrolü için  $r(\theta)$  ve  $u(\theta)$ 'nın hareket boyunca yaylarda biriktirecekleri enerjiler karşılaştırılmıştır ve sıfır hata bulunmuştur.  $\phi_0$  ise etkisi irdelenmeksiz tasarım tarafından verilen bir parametre olarak kabul edilmiş ve 120 deg olarak alınmıştır. Kamın ip sarması için bu değer  $\pi$ 'ye yakın olması gereklidir ve tasarımcı tarafından uygun belirlenmelidir.

Şekil 6'da sonuçlardan elde edilen kam profili gösterilmektedir. MATLAB'deki optimizasyon sonucu sapma değeri



Şekil 7: Olması gereken u ve optimizasyon sonucu bulunan kamdan elde edilen uzama çıktısı, beklediği üzere çekme davranışı göstermekte.

0.0114 olarak bulunmuştur. Şekil 7'de de ihtiyaç olan ve 2. bölümde analitik olarak çözülen  $u(\theta)_{istenen}$  ve profilin optimizasyonu sonucu elde edilen çıktı  $u(\theta)_{hesaplanan}$  verilmiştir. A ve B parametreleri ile oynanarak çıktılar eşleştirilmeye çalışılmıştır. Bu örnek haricinde n. derece bir polinom, trigonometrik veya üssel fonksiyonların fit edilmesi denenebilir ve daha düşük hatalar elde edilebilir.

Sonuç olarak istenilen bir çıktıya göre bir kam profilinin nasıl tasarlanacağı açıklanmış ve robotik bir uygulamada bu bilgi kullanılmıştır. Sıkışma yayı yerine çekme yayı kullanılarak tasarım zorlukları aşılmış ve dört çubuk mekanizmalarının SLIP'i karşılayacak bacaklı robotlar olarak kullanılmalarında kolaylıklar sağlanmıştır. Çalışma boyunca tasarımcıların metodu başka uygulamalarda kullanmalarındaki önemli noktalar irdelenmiştir. Gelecekte, aynı çalışmaların analitik veya yarı-analitik yöntemlerle yapılmasına çalışılacak ve bulgular gerçek bir düzenek üzerinde test edilecektir. Doğrulan sonuçlar ile dikey hareket kısıtı kaldırılacak ve robotun yatay yönde de hareket etmesine izin verilecektir. Burada yine uygulanan yöntemin avantajları ve dezavantajları incelenecek ve arından kamlar ile farklı bacak sertliği profillerinin robotun davranışına etkisi gözlemlenecektir.

#### KAYNAKÇA

- [1] P. Holmes, R. Full, D. Koditschek, and J. Guckenheimer, "The dynamics of legged locomotion: Models, analyses, and challenges," *SIAM Review*, vol. 48, no. 2, pp. 207–304, 2006.
- [2] W. J. Schwind, "Spring loaded inverted pendulum running: A plant model," PhD, University of Michigan, 1998.
- [3] R. M. Alexander, "Three uses for springs in legged locomotion," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 9, no. 2, pp. 53–61, 1990.
- [4] J. A. Grimes and J. W. Hurst, "The design of ATRIAS 1.0 a unique monopod, hopping robot," in *Proc. of the International Conference on Climbing and Walking Robots*, 2012.
- [5] P. Tidwell, N. Bandukwala, S. Dhande, C. Reinholtz, and G. Webb, "Synthesis of wrapping cams," *ASME. J. Mech. Des.*, vol. 116, no. 2, pp. 634–638, 1994.
- [6] M. Kilic, Y. Yazicioglu, and D. Kurtulus, "Synthesis of a torsional spring mechanism with mechanically adjustable stiffness using wrapping cams," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 57, no. 1, pp. 27–39, 2012.

# Alışveriş Merkezinde İnsan-Robot Etkileşimi İçin Bir Kontrollü Doğal Dil Yaklaşımı

Ezgi Demirel, Kamil Doruk Gür, Esra Erdem  
Bilgisayar Bilimi ve Mühendisliği  
Sabancı Üniversitesi, İstanbul, Türkiye  
Email: ezgidemirel,dgur,esraerdem@sabanciuniv.edu

**Özetçe** — Alışveriş merkezlerinde müşterilere yol göstererek yardım etmeye çalışan robotların insanlarla etkin bir etkileşimi için, müşterilerin ve robotların birbirlerini kolaylıkla anlayabilmeleri amacıyla anlam karışıklarına izin vermeyecek şekilde bir kontrollü doğal dil (CNL) geliştirdik. Robotların insanlarla daha doğal ve manalı bir iletişim kurabilmeleri amacıyla, bu dili alışveriş merkezleri ile ilgili çeşitli bilgileri içeren bilgi tabanlarıyla ilişkilendirdik. Bu özet, insan-robot etkileşimi için geliştirdiğimiz bu kontrollü doğal dili tanımlayıp örnekler vermektedir.

**Anahtar Kelimeler**— İnsan-Robot Etkileşimi, Kontrollü Doğal Diller.

## I. GİRİŞ

İnsanların ve robotların bulunduğu dinamik ve karışık ortamlarda, insan-robot etkileşimi kaçınılmazdır. İnsanlardan gelen girdiyi grafiksel bir kullanıcı arayüzünden almak yerine, robotların doğal dili anlamalarını sağlamak daha doğal bir etkileşim sağlar. Maalesef, doğal diller anlamsal karmaşıklıklar içerdiğinden, robotların doğal dilde sorulan bir soruyu veya verilen bir bilgiyi anlamaları mümkün olmayabilir. Bu sebepten dolayı, alışveriş merkezi gibi özel bir ortam için, insan-robot etkileşimlerini kolaylaştırmak amacıyla, belirsizliklerin ve anlam karmaşıklıklarının olmadığı bir kontrollü doğal dil (CNL) geliştirdik.

Geliştirdiğimiz dil iki farklı CNL'den oluşmaktadır: H2R-CNL ve R2H-CNL. H2R-CNL, insanın robota yol tarifi ile ilgili soruları (örneğin; bir dükkâna nasıl gideceğini öğrenme) ve talimatları (örneğin; bir dükkâna yol gösterme) için tasarlanmıştır. R2H-CNL, robotun insana anlamsal karmaşıklığı gidermek amacıyla sorduğu çok seçenekli soruları (örneğin; iki çeşit dükkân arasından hangisi olduğu), robotun insanda yardım istekleri (örneğin; asansörün düğmesine basılması) ve daha da önemlisi robotun insana yol tarifi (örneğin; bir dükkâna nasıl gideceğini açıklamak) için tasarlanmıştır.

Robotların CNL sorgularını/cümlelerini anlaması ve insanlara yardım edebilmesi ve yol gösterebilmesi için alışveriş merkezleriyle ilgili özel bilgi tabanları oluşturduk. Bu bilgi tabanları alışveriş merkeziyle alakalı sağduyu bilgilerini (örneğin; taksonomik bilgi) ve dükkânların özelliklerini/ilişkilerini (örneğin; dükkânların isimleri, yerleri ve ne sattıkları) içerir. Geliştirdiğimiz CNL'leri bu bilgi tabanlarıyla ilişkilendirdik. Böylece, geliştirdiğimiz

CNL'lerin manalı olmayan soruları ve cümleleri desteklemesi önlenmektedir.

Bu özetle, insan-robot etkileşimi için geliştirdiğimiz bu kontrollü doğal dilleri tanımlayıp örnekler veriyoruz. Bu özet, "International Workshop on Controlled Natural Language" çalıştayında sunulmuştur [2].

## II. H2R-CNL

H2R-CNL, insanın robota yol tarifi ile ilgili soruları (örneğin; bir dükkâna nasıl gideceğini öğrenme) ve talimatları (örneğin; bir dükkâna yol gösterme) için tasarlanmıştır.

Tablo 1'de gösterildiği gibi H2R-CNL, alışveriş merkezi ortamıyla alakalı iki çeşit olası cümleyi destekliyor: "Where-Queries" ve "Imperative-Sentences". "Where-Queries", "Where is the women's restroom on the second floor?" (İkinci kattaki kadınlar tuvaleti nerede?) ya da "Where can I buy children's shoes?" (Nereden çocuk ayakkabısı alabilirim?) gibi soruları destekliyor. "Imperative-Sentences" robota bazı görevler/buyruklar vermek için kullanılabilir. Örneğin, bir müşteri paketlerinin taşınması için robotun yardımına ihtiyaç duyabilir ve "Please follow me to the parking lot" (Lütfen beni otoparka takip et.) diyebilir.

H2R-CNL dilinin ilgili bilgi tabanlarıyla ilişkilendirilmesi özel fonksiyonlar aracılığıyla yapılmaktadır. Tablo 1'de görülen *Adj()*, *Product()*, *Loc()*, *LocCon()* ve *Agent()* bu tür fonksiyonlardan olup, bilgi tabanlarından alakalı bilginin çekilmesinde kullanılmaktadır.

SENTENCE	→ WHEREQUERY QUESTIONMARK   IMPERATIVESENTENCE PERIOD
WHEREQUERY	→ Where can I buy <i>Adj()</i> <i>Product()</i> ONLOCATION   Where is the <i>Adj()</i> <i>Loc()</i> FORAGENT ONLOCATION
IMPERATIVESENTENCE	→ Please <i>ImpVerb()</i> (me to the <i>Adj()</i> <i>Loc()</i> ) FORAGENT ONLOCATION
ONLOCATION	→ on <i>LocCon()</i>   ε
FORAGENT	→ for <i>Agent()</i>   ε
QUESTIONMARK	→ ?
PERIOD	→ .

Tablo 1. H2R-CNL (Basitleştirilmiş hali).

İnsanlardan gelen soruları ve cümleleri belirli bir gramere göre ayrıştırmak için çeşitli araçlar mevcuttur. Bizim çalışmamızda, verilen bir sorunun veya cümlelerin H2R-CNL'e göre ayrıştırılması için Python'un Natural Language Toolkit [1] kütüphanesi kullanılmaktadır. Bu

kütüphane, Python programlama dili için geliştirilmiştir ve doğal dil verisi üzerindeki çalışmalarda kullanılmaktadır. Çok detaylı bir API dokümantasyonu olduğu için ve uygulaması kolay olduğu için, H2R-CNL için bu kütüphane ayrıştırıcı olarak kullanılmıştır. Bu kütüphaneyi kullanarak, verilen sorular ve cümleler H2R-CNL'e göre ayrıştırılarak bir sözdizimi ağacı oluşturulmaktadır. Daha sonra bu ağaç, soruların otomatik akıl yürütme ile yanıtlandırılması için kullanılmaktadır.

### III. R2H-CNL

R2H-CNL, robotun insana anlamsal karmaşıklığı gidermek amacıyla sorduğu çok seçenekli soruları (örneğin; iki çeşit dükkân arasında hangisi olduğu), robotun insandan yardım istekleri (örneğin; asansörün düğmesine basılması) ve daha da önemlisi robotun insana yol tarifi (örneğin; bir dükkâna nasıl gideceğin açıklamak) için tasarlanmıştır.

Tablo 2'de R2H-CNL kontrollü doğal dilinin tanımının bir kısmını göstermekteyiz. R2H-CNL, "Which-Queries" diye tabir edilen ve robotun bir belirsizlikle karşılaşmış fazladan detay istediği zamanlarda yapılan sorguları desteklemektedir. Örneğin, "Where is the restroom?" (Tuvalet nerede?) sorusunu cevaplayabilmek için robotun "Which one do you prefer: for women or men?" (Hangi tuvalet: bay mı bayan mı?) diye sorması gerekmektedir. Ayrıca robotlar, R2H-CNL'i kullanarak kendilerinin yetersiz kaldığı durumlarda insanlardan yardım isteyebilmektedir. Robotun herhangi bir manipülatörü olmadığı bir durumda, asansörle yukarı çıkabilmek için "Could you please push the elevator button to go upstairs?" (Yukarı basabilir misiniz?) diye sorabilmesi, buna bir örnektir.

SENTENCE	→ QUESTION   REQUEST   DESCRIPTION
QUESTION	→ WHICHQUERY QUESTIONMARK
REQUEST	→ COULDQUESTION QUESTIONMARK
DESCRIPTION	→ (Go <i>Dir()</i> until you reach <i>Loc()</i> )*
WHICHQUERY	→ Which one do you prefer AMBDISJUNCTION
COULDQUESTION	→ Could you please <i>Verb()</i> the <i>Obj()</i>
AMBDISJUNCTION	→ (ONLOCATION or)* ONLOCATION   (FORAGENT or)* FORAGENT
ONLOCATION	→ on <i>LocCon()</i>   $\epsilon$
FORAGENT	→ for <i>Agent()</i>   $\epsilon$
QUESTIONMARK	→ ?
PERIOD	→ .

Tablo 2. R2H-CNL (Basitleştirilmiş hali).

Bunların dışında, R2H-CNL dili, otomatik akıl yürütmeyle hesaplanan bir yolun müşterilere daha doğal ve

anlaşılabilir bir şekilde anlatılabilesine olanak sağlamaktadır.

### IV. SONUÇ

Alışveriş merkezindeki insanlar ve robotlar arasındaki etkileşim için, iki tip kontrollü doğal dil geliştirdik: H2R-CNL insanların robotlara sorularını ve talimatlarını desteklerken, R2H-CNL robotların hesapladığı matematiksel yapıları (örneğin; çizgeler üstündeki yolları) insanlara daha doğal bir şekilde açıklamaktadır. Bu iki CNL'in birleşimi bir insan/robot diyalogunu formel olarak tanımlayıp desteklemektedir.

Geliştirilen bu CNL'lerin insan-robot diyalogu için bir uygulaması insansı robot Nao Aldebaran ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 1).

**Teşekkürler.** Bu çalışma, TÜBİTAK 114E491 (Christ-Era COACHES) projesi tarafından kısmi olarak desteklenmiştir.



Şekil 1. İnsan-Robot Etkileşimi

### KAYNAKÇA

- [1] Bird, S., Klein, E., Loper, E.: Natural Language Processing with Python, O'Reilly, 2009.
- [2] Demirel, E., Gur, K. D., & Erdem, E., Human-Robot Interaction in a Shopping Mall: A CNL Approach. In *International Workshop on Controlled Natural Language* (syf. 111-122), Springer International Publishing, 2016.

# Uygulamalı Eğitim Amaçlı Seri Elastik Eyleyici Tahrikli Robot

Ata Otaran, Ozan Tokatlı, Volkan Patoğlu  
Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Sabancı Üniversitesi, İstanbul  
Email: {ataotaran, otokatli, vpatoglu}@sabanciuniv.edu

**Özetçe** —Mühendislik öğrencilerinin kendilerini fiziksel insan-robot etkileşimi konusunda geliştirebilmeleri için, fiziksel olarak etkileşim deneyim kazanabilecekleri, kuvvet geri beslemeli cihazlara erişebilmeleri önem taşımaktadır. Bu çalışmada tek serbestlik dereceli, seri elastik eyleyici tahrikli ve etkileşim sırasında güvenliği ve istenilen seviyede şeffaflığı sağlayabilmek için kapalı çevrim kuvvet denetimi kullanan bir eğitsel cihaz sunulmaktadır ve cihazın derslerde kullanımı için laboratuvar modülleri önerilmektedir. Ayrıca bu modüllerin kullanıldığı bir atölye çalışması sonrasında öğrencilerin doldurduğu anketler baz alınarak yapılan bir başarı analizine yer verilmektedir.

**Anahtar Kelimeler**—Seri elastik eyleme, eğitimsel robotlar, fiziksel (haptik) insan-makina etkileşimi

## I. GİRİŞ

Rehabilitasyon robotları, haptik sistemler, cerrahi robotlar ve başka pek çok alanda, insan-robot arasında güvenli ve doğal bir fiziksel etkileşim sağlamak amaçlanır. Bu alanlardaki uygulamaların artması, bu konularda gerekli alt yapıya sahip mühendislere olan ihtiyacı da beraberinde getirmektedir. Bu tür sistemlerin tasarımı ve denetimi konularında verilecek eğitimlerde, öğrencilerin fiziksel olarak etkileşebilecekleri test düzeneklerine erişiminin olması büyük önem taşımaktadır.

Pratik eğitimin temel mühendislik kavramlarını öğrenmede çok etkili olduğu bilinmektedir. Haptic Paddle isimli tek serbestlik dereceli kuvvet geri beslemeli cihazlar birçok üniversite tarafından eğitimde kullanılmıştır. İmpedans türü olan bu robotik cihazların ortak özelliği, öğrencilerin anlayabilmeleri ve kolayca kullanabilmeleri için basit, gürbüz ve düşük maliyetli olmalarıdır.

Bu çalışmada, impedans türü sistemleri tamamlayacak şekilde, admitans türü olan ve seri elastik eyleyici ile tahriklenen HandsOn-SEA sunulmaktadır. Ayrıca cihazın derslerde kullanılması için laboratuvar modülleri önerilmekte ve bu modüllerin başarı analizine yer verilmektedir. Bu modüller kapsamında öğrenciler, cihazın denetleyici özelliklerinin yanı sıra, eyleyici ve tutacak arasında kullanılan eklem esnekliğini, yani cihazın mekanik tasarımını değiştirebilmekte ve mekanik sistem parametrelerinin kapalı çevrim kuvvet denetiminin başarımının üstündeki etkilerini gözlemleyebilmektedir. Bu özetçe, [1]'de sunulan çalışmanın Türkçe özeti niteliğindedir.

## II. TASARIM

HandsOn-SEA Haptic Paddle tasarımlarıyla uyumlu olacak şekilde geliştirilmiştir. Haptic Paddle tasarımlarında olduğu gibi cihazla etkileşime giren kişinin uyguladığı kuvvete karşılık, istenen çıkış empedansını kullanıcıya hissettirmek için

Bu çalışma 115M698 numaralı TÜBİTAK projesi tarafından kısmi olarak desteklenmiştir.

Türkiye Otonom Robotlar Konferansı, 2016

sistem dönel eklemi çeviren bir eyleyici denetlenir. Haptic Paddle'dan farklı olarak tutacak ile eyleyici arasında kuvvet ölçümü amaçlı esnek bir eleman yerleştirilmiştir. HandsOn-SEA'nın tasarımında bu esnek eklem üç parçadan oluşur; dikdörtgen şeklinde kesilmiş şerit yay çeliği parçalar, kasnak ve tutacak bölümleri arasında yerleştirilir. Yayların esneme miktarı tutacak üzerine yerleştirilmiş bir Hall etkisi sensörü ve kasnak parçasının iç duvarlarına yerleştirilmiş mıknatıslar yardımıyla ölçülür. Analitik formüllerle hesaplanan yayların esneklik katsayısı kullanılarak sistemde doğrudan kuvvet ölçümü yapılır [1], [2].

## III. LABORATUVAR MODÜLLERİ

Sensör ve eyleyici arasındaki bağlantının esnek olması, başka bir deyişle sensör ve eyleyicinin aynı yerde olmaması, doğrudan kuvvet denetiminde kaçınılmaz bir kısıta yol açar. Kısıtın temel nedeni kapalı çevrim kazancının, aşıldığında sistem kararlılığının bozulmasıyla sonuçlanan, bir üst sınıra sahip olmasıdır. HandsOn-SEA, kuvvet denetiminde kaçınılmaz olan bu temel kısıtı ve seri elastik eyleyici kavramını öğrencilere öğretmek için tasarlanmıştır.

**1. Modül** Bu modülde öğrencilerden cihazın sadece DC motorunun hareket denetimi yapılması istenir. Motora ait doğrusal modelin ikinci dereceden denklemlerinin root-locus analizi yapılır. Konum denetimi için oluşturulan root-locus grafiğinde iki asimptot bulunduğundan, denetim kazançlarının artırılmasının kararsızlığa yol açmayacağı gözlemlenir. Öğrenciler, en iyi başarıyı elde etmek amacıyla, pratikte karşılaşılan kararlılık sınırlarını içerisinde kalarak, denetimci kazançlarını ayarlar. Motorun doyma noktasına (saturation) ulaşmasından kaynaklanan hareket bant genişliği deneysel olarak bulunur.

**2. Modül** Bu modülde sensör ve eyleyicinin aynı yerde olmamasının neden olduğu kaçınılmaz kararsızlık sınırı gözlemlenir. Öğrenciler, ilk önce seri elastik elemandan alınan kuvvet bilgisini kullanarak doğrudan kuvvet denetimi uygulamaları ve kuvvet kazanç değerlerinin bir seviyenin üzerine çıktığında kararlılığın bozulduğunu gözlemlerler. Kazanç üzerindeki limiti deneysel olarak gözlemleyen öğrenciler, sisteme ait ilk titreşim modunu içeren doğrusal sistem modelinin root locus analizini yaparak kararlılık sınırını analitik olarak da türetirler.

**3. Modül** Bu modül, öğrencilerin sensör esnekliği ve kuvvet denetimi kazanç değerleri arasındaki ödünleşimi içselleştirmeleri için tasarlanmıştır. Bu modülde öğrenciler sistemi farklı esnekliğe sahip seri elastik elemanlar kullanarak hayata geçirirler ve analitik modeli kullanarak her durum için sistemin dönel yay sabitini hesaplarlar. Sistemin kararlılığını bozmadan kullanılacak en yüksek kazanç değerini belirleyen öğrenciler, bu değeri sistem üzerinde yaptıkları deneylerde elde ettikleri

kazanç değerleriyle karşılaştırılır. Bu deneyler sayesinde öğrenciler kuvvet sensörünün esnekliğinin artmasına bağlı olarak kuvvet denetim kazancının artırabileceğini gözlemlerler.

4. *Modül* Bu modül, öğrencilerin HandsOn-SEA'yı daha iyi tanımlarını ve cihazla fiziksel etkileşime girmelerini hedefler. Öğrencilere, seri elastik eyleme (SEE) kavramının, sensör ve eyleyicinin aynı yerde olmamasına bağlı ortaya çıkan denetim kazanç sınırlamasına nedeniyle, kuvvet kazancını yükseltebilmek amacıyla sensörün esnekliğini arttırmak olduğu anlatılır. Kuvvet kazanç değerlerinin yükseltilmesinin sürtünme, boşluk ya da modellenemeyen etkenlere karşı daha gürbüz ve hızlı cevap veren bir kuvvet denetimi elde edebilmek için önemli olduğu belirtilir. Sensör esnekliğinin artırılmasının sistemin bant genişliğini düşürdüğü ve gürbüzlük bant genişliği arasındaki ödünleşim tartışılır. Belirli bant genişliği içinde aktif geri-sürülebilirliğin sağlanabilmesi ve bu frekans değerleri üzerinde görülen üzerindeki frekanslarda sistemin hissedilen empedansının alçak geçirgen filtre özelliği kazanması gözlemlenir. Fiziksel alçak geçirgen filtre özelliğinin, sisteme uygulanan ani darbeler veya tork dalgalanmaları gibi bozucu etkenlere karşı sisteme gürbüzlük kattığı öğrencilere gösterilir ve sistemin tüm frekans bantlarında güvenli fiziksel etkileşim sağlayabilmesi açıklanır. Öğrencilerin, iki farklı esneklik seviyesine sahip cihazları kullanarak, kuvvet denetiminde bant genişliği ve denetim başarımı arasındaki ödünleşimi tecrübe etmeleri sağlanır.

5. *Modül* Bu modül, SEE için sıklıkla kullanılan iç içe geçmiş denetim yapısını anlatmak ve kuvvet takip başarımını değerlendirmek için tasarlanmıştır. Bu denetim mimarisinde en iç çevrimde hız denetimi, orta çevrimde kuvvet denetimi, ve en dış çevrimde empedans denetimi yapılmaktadır. En iç çevrimde kullanılan gürbüz hız denetiminin amacı, motor ve güç iletim sisteminin sebep olduğu sürtünme, boşluk, kayma gibi kusurlarının telafi edilip, belirli bir bant aralığı içerisinde ideal hız denetimi elde edilmesidir. Ortadaki çevrim Hall etkisi sensöründen alınan geri beslemeyi kullanarak kapalı döngü kuvvet takibi sağlamak amacıyla tasarlanmıştır. En dıştaki çevrim ise sistemin çıkış empedansını belirlemektedir. Öğrenciler denetleyiciyi farklı kazanç değerleri ile test edip, kazanç değerlerini sistemin enerji pasifliğini sağlayacak şekilde seçmeyi öğrenirler.

6. *Modül* Bu modül kapsamında öğrenciler farklı esnekliğe sahip sistemlerin düşük, orta ve yüksek kuvvet referans seviyelerine ait kuvvet bant genişliklerini deneysel olarak belirleyip, SEE'nin başarımındaki ödünleşimi gözlemlerler.

#### IV. DEĞERLENDİRME

HandsOn-SEA 6 lisans (3. ve 4 sınıf) ve 5 lisans üstü öğrencinin katıldığı bir atölye çalışmasında kullanılmıştır. Katılan öğrencilerin hepsinin sistem dinamiği ve denetimi konularında deneyimi bulunmasına karşılık, çoğu kuvvet denetimi ve seri elastik eyleyici konularında bilgili değildir. Kavramların anlaşılması için önerilen modüllerin hepsi uygulanmış ve öğrencilere cihaza erişim verilerek, farklı denetim yöntemlerinin, denetleyici kazanç değerlerinin ve sensör esnekliğinin kuvvet denetimi başarımına etkilerini tecrübe etmeleri sağlanmıştır. Atölye çalışması sonrasında öğrenciler cihazı ve modülleri hazırladığımız beş bölümden oluşan bir anket üzerinden değerlendirmiştir. Anketteki soruları [1]'de sunulmuştur.

Öğrenci yanıtlarının istatistiksel analizinden elde edilen sonuçlar, öğrencilerin sahip oldukları farklı seviyelerin ya da

eğitim geçmişlerinin değerlendirmelerde istatistiksel öneme sahip farklılığa sebep olmadığı belirlendiğinden, tüm sonuçlar birlikte analiz edilmiştir. 3.-5. bölümler ve tüm anket için hesaplanan Cronbach  $\alpha$  değerlerinin 0.7'nin üstünde çıkması anketin güvenilir olduğunu göstermektedir.

Anketin ilk sorusu öğrencilerin eğitim geçmişlerini anlamaya yöneliktir. İkinci soru cihazın kullanılabilirliğini ölçmek için, üçüncü soru hedef kitlenin belirlenmesi, dördüncü ve beşinci sorular cihazın yararlı yönlerini değerlendirmek için tasarlanmıştır. Sorularda kullanılan Likert skalası "1" *hiç katılmıyorum*, "5" *tamamen katılmıyorum* anlamına gelecek şekilde hazırlanmıştır.

İlk soruya verilen cevaplara göre modülleri tamamlamak için dinamik sistemler ve denetim teorisine dair alt yapıya sahip olmak gerekli ve ayrıca programlama bilgisine sahip olup ve donanıma aşina olmak faydalıdır. İkinci soruya verilen cevaplardan, öğrencilerin HandsOn-SEA'yı kolay anlaşılır ve kullanışlı bulduğunu anlaşılmaktadır. Üçüncü soruya verilen cevaplara göre, öğrenciler cihazın en çok mekatronik öğrencilerine ve robotik araştırmacılara yarar sağlayabileceği görüşündedir. Dördüncü soruya verilen cevaplar, modüllerin en çok kuvvet denetiminde karşılaşılan temel kavramların ve tasarımda yapılması gereken seçimlerin etkilerinin anlaşılmasına yardımcı olduğunu göstermektedir. Anketin bu bölümünün istatistiksel ortalamalarına göre öğrenciler genelde öğretilmeye çalışılan kavramların anlaşılmasında cihazın etkili olduğunu tamamen katılmaktadır. Beşinci bölümün istatistiksel ortalamaları, öğrencilerin, sistemin bütünleşmiş kuvvet sensörünü, güvenilir hız ölçümünü, basit programlama arayüzünü ve kolay kullanılabilir denetleyici yapısını çok faydalı bulduğunu göstermektedir.

#### V. SONUÇ

HandsOn-SEA varolan Haptic Paddle tasarımlarını tamamlar niteliktedir ve kuvvet denetiminde karşılaşılan temel kavramların eğitiminde etkin olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle [3], [4]'de önerilen laboratuvar çalıştırmalarına ek olarak, sensör ve eyleyicinin aynı yerde olmamasından kaynaklanan sınırlamaların tecrübe edilmesinde de kullanılabilir. Eklem esnekliğinin ve denetleyici kazanç değerlerinin cihazın bant genişliğine ve kuvvet ölçüm çözünürlüğüne etkisi gösterilebilir. Admittans ve iç içe geçmiş denetim yapıları uygulanabilir.

HandsOn-SEA robotik temalı bir mekatronik dördüncü sınıf dersinde ve kuvvet denetimi odaklı bir lisans üstü derste deney düzeneği olarak kullanılmaktadır. Derslerin sonunda yapılan anketlerle cihazın daha detaylı değerlendirmeleri yapılacaktır. Ayrıca cihazın üretim ve kullanımı açık kaynak olarak laboratuvarımıza ait internet sitesinde ilgilenecek herkese sunulmaktadır.

#### KAYNAKLAR

- [1] A. Otaran, O. Tokatli, and V. Patoglu, "Hands-on learning with a series elastic educational robot," in *Eurohaptics*, July 2016.
- [2] —, "Handson-sea: A series elastic educational robot for physical human robot interaction(under revision)," *IEEE Transactions on Haptics*, 2016.
- [3] A. M. Okamura, C. Richard, and M. R. Cutkosky, "Feeling is believing: Using a force-feedback joystick to teach dynamic systems," *Journal of Engineering Education*, vol. 91, no. 3, pp. 345-349, 2002.
- [4] K. Bowen and M. O'Malley, "Adaptation of haptic interfaces for a labview-based system dynamics course," in *Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, 2006, pp. 147-152.

# Active Body Weight Support with Inertia Compensation

Hammad Munawar

Volkan Patoglu

Faculty of Engineering and Natural Sciences, Sabancı University, İstanbul, Turkey

Email: {hammadmunawar,vpatoglu}@sabanciuniv.edu

**Abstract**—We present GRAVITY-ASSIST, a series elastic active body weight support and inertia compensation system for use in robot assisted gait rehabilitation. The device consists of a single degree of freedom series elastic actuator that connects to the trunk of a patient. The series elastic system is novel in that, it can provide the desired level of dynamic unloading such that the patient experiences only a percentage of his/her weight and inertia. Inertia compensation is important, since the inertial forces can cause significant deviations from the desired unloading force, specially at low support forces and fast walking speeds. Furthermore, this feature enables the inertia of the harness and force sensing unit attached to the patient to be compensated for, making sure that the device does not interfere with the natural gait cycle. We present a functional prototype of the device, its characterization and experimental verification of the approach.

**Keywords**—ToRK 2016, active, weight, support, inertia, compensation.

## I. INTRODUCTION

Body weight support (BWS) systems are an indispensable component of robot assisted gait rehabilitation. It has been clinically shown that gait rehabilitation can be made significantly more effective, when a percentage of patients' weight is supported by a BWS system, as compared to the case when patients have to bear their full weight. Furthermore, BWS is essential during robot assisted therapies, to ensure safety and to prevent falls.

In this paper, we summarize the work published in [1], where we present a series elastic active weight support and inertia compensation system for use in gait rehabilitation. The system is capable of providing dynamic weight support to patients while walking. In addition, it can provide compensation for the inertial forces caused by the vertical movements of the human body. Compensation of inertial forces has been largely ignored in the literature, even though these forces can cause significant deviations in the unloading force, specially when the support force is low and walking speed is fast.

### A. Body Weight Support in Gait Rehabilitation

Patients with walking disabilities are often unable to support their own weight, due to muscle weakness or paralysis. Consequently, an effective gait rehabilitation system must be capable of fully/partially supporting the weight of the patient. Such systems can help to reduce the force that patients encounter on their legs during walking. Efficacy of gait rehabilitation therapy while supporting the weight of the patient has been explored by many groups. Experimental results indicate that gait rehabilitation is more effective when the body weight of the patient is partially supported.

BWS systems are found in many gait rehabilitation devices to unload the patient weight during walking and to prevent falls. With respect to weight unloading, these systems can be categorized into i) static systems, ii) passive counterweight based systems, iii) passive elastic spring based systems, and iv) active dynamic systems.

Passive systems are not very effective for body weight support, as the patient does not feel a constant weight unloading during walking, interfering with the natural gait and potentially negatively affecting the efficacy of the therapy. *Active dynamic* systems are capable of generating unloading forces dynamically. In particular, these type of systems continually measure the interaction force between the patient and the BWS actuator and based on these measurements, a control system commands the actuator to move in such way that a constant amount of vertical force is felt by the patient, despite the vertical movements of the patient during walking.

### B. Inertia Compensation

When a patient is attached to a BWS system, the vertical movements of the body during walking cause inertial forces which are proportional to its acceleration. Considering the human mass and natural walking speeds, these inertial forces can become significantly large and hinder the operation of the BWS, by causing large deviations in the interaction force from the desired level unloading. While the compensation for patient/device weight and parasitic effects, such as friction and stiction, can be robustly achieved through a force controller, the inertia compensation is more challenging due to the stability issues it presents when used in a feedback control loop. After presenting the coupled stability limitations of closed-loop inertia compensation approaches, [2] proposes an *emulated inertia compensation* scheme that utilizes acceleration measurements to approximately compensate for the limb and exoskeleton inertia for a lower-extremity exoskeleton.

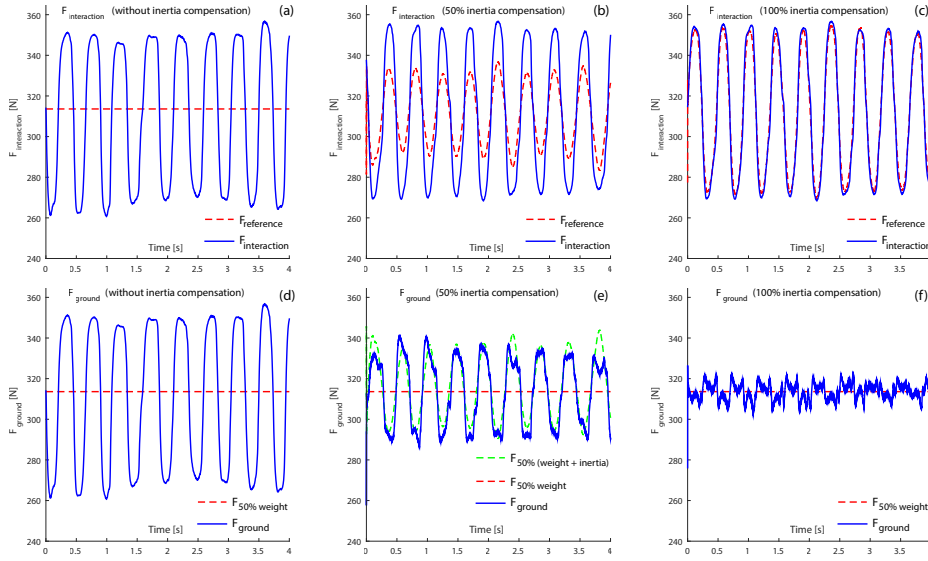
## II. GRAVITY-ASSIST

GRAVITY-ASSIST is a BWS that can dynamically compensate for inertial forces of the patient's body, in addition to unloading of patient's weight. It does not interfere with patient balance, ensures safety against falls, allows for unrestricted pelvic movements, provides an ergonomic and comfortable support, and enables low cost implementations. GRAVITY-ASSIST consists of three modules: series elastic element, motion controlled linear actuator, and harness with acceleration measurement unit.

A real-time cascaded controller is implemented for SEA. The cascaded controller consists of an inner robust velocity control loop and an outer force control loop. The velocity controller is implemented in hardware on the motor driver with fast control rate. The outer force control loop is implemented

---

This work has been partially supported by TUBITAK Grant 115M698.



Şekil 1. Forces between volunteer and device (a) without inertia compensation, (b) with 50% inertia compensation, and (b) with 100% inertia compensation. Forces between volunteer and ground (d) without inertia compensation, (e) with 50% inertia compensation, and (f) with 100% inertia compensation.

at 1 kHz for high fidelity force control. This loop imposes the desired level of support forces as determined by the therapist. The cascaded force controller [3] is augmented with emulated inertia compensation scheme as proposed in [2]. In particular, inertial forces to be compensated for are estimated based on low-pass filtered real-time acceleration measurements and the pre-determined mass of the device and the patient. Then, these inertial force estimates are provided to the force controller as a reference, in addition to the force reference used for weight unloading based a predetermined percentage of the patient weight set according to the therapy requirements.

### III. EVALUATION OF INERTIA COMPENSATION

We have experimentally evaluated the effect of inertia compensation on the assistance provided. For the trials, we mounted GRAVITY-ASSIST on a treadmill. A 26 years-old healthy volunteer was connected to the device. The volunteer signed an informed consent form approved by the IRB of Sabanci University before taking part in the experiments.

The experimental protocol consisted of attaching the device to the patient at a sitting position, raising him to a standing posture and asking him to walk forward at a natural pace. During all trials, the control system was set to actively support 50% of the volunteer's 64 kg weight. Three conditions have been tested for inertia compensation: 0% inertia compensation (simple gravity compensation case), 50% inertia compensation (to match the percentage of weight compensation) and 100% inertia compensation. After each experiment, the volunteer was also asked to report the comfort level of the assisted gait. The order of trials was randomized. The vertical acceleration of the volunteer was measured using the accelerometer attached to his chest and a cutoff frequency 3 Hz was used for low-pass filtering these measurements.

Figure 1 presents representative plots depicting reference assistance forces and measured interaction forces between the device and the volunteer, for weight unloading with and without inertia compensation. In this plot, one can observe relatively large deviations of the measured interaction force

from the reference due to inertial force contributions, which are as large as 15% of the assistance forces. As expected, the difference between the reference assistance forces and the measured interaction forces decreases as higher percentage of inertial forces are compensated, since the main disturbance acting on the force control system consists of the unaccounted inertial forces. Interview with the volunteer after the trials indicates that weight support without inertial compensation results in a gait that feels unbalanced and uncomfortable, the case with full inertia compensation lacks the dynamics of the gait, while the 50% compensation feels relatively more natural.

### IV. CONCLUSIONS

A series elastic BWS and inertia compensation system has been presented and experimentally characterized. The inertia compensation has been performed in a feed-forward manner based on online acceleration measurements taken from the trunk of the patient, while a cascaded force-motion controller has been used for force control for SEA. Initial experiments performed on a healthy volunteer indicate that deviations from desired interaction forces can be significantly reduced when inertia compensation is utilized. Furthermore, the volunteer states that the gait feels more natural when the inertia compensation matches the weight unloading.

### REFERENCES

- [1] H. Munawar and V. Patoglu, "Gravity-Assist: A Series Elastic Body Weight Support System with Inertia Compensation," in *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2016.
- [2] G. Aguirre-Ollinger, J. E. Colgate, M. A. Peshkin, and A. Goswami, "Design of an active 1-DoF lower-limb exoskeleton with inertia compensation," *Int. J. of Robotics Research*, vol. 30, no. 4, pp. 486–499, 2011.
- [3] A. Erdogan, B. Celebi, A. C. Satici, and V. Patoglu, "AssistOn-Ankle: A reconfigurable ankle exoskeleton with series-elastic actuation," *Autonomous Robotics*, 2016.

# Motion Control of a Kinematically Redundant Overground Device

Hammad Munawar

Mustafa Yalcin

Volkan Patoglu

Faculty of Engineering and Natural Sciences, Sabancı University, İstanbul, Turkey

Email: {hammadmunawar,myalcin,vpatoglu}@sabanciuniv.edu

**Abstract**—We present the redundant kinematics and workspace centering control of ASSISTON-GAIT, an overground gait and balance trainer designed to deliver pelvis-hip exercises to correct compensatory movements arising from abnormal gait patterns. ASSISTON-GAIT consists of an impedance controlled pelvis-hip exoskeleton module, supported by a motion controlled holonomic mobile platform. The exoskeleton module possesses 7 active degrees of freedom to independently control the rotation of the each hip in the sagittal plane along with the pelvic tilt, pelvic rotation and the horizontal, vertical and lateral displacements of the pelvis. The holonomic mobile base can track the movements of patients on flat surfaces, allowing patients to walk naturally, start/stop motion, vary their speed, sidestep to maintain balance and turn to change their walking direction. The kinematically redundant dual layer actuation enables the mobile base of the system to be controlled using workspace centering control strategy without the need for any additional sensors, since the patient movements are readily measured by the exoskeleton module. The workspace centering controller ensures that the workspace limits of the exoskeleton module are not reached, decoupling the dynamics of the mobile base from the exoskeleton dynamics. Consequently, ASSISTON-GAIT possesses virtually unlimited workspace, while featuring the same output impedance and force rendering performance as its exoskeleton module.

**Keywords**—ToRK 2016, workspace, centering, kinematic, redundant, control .

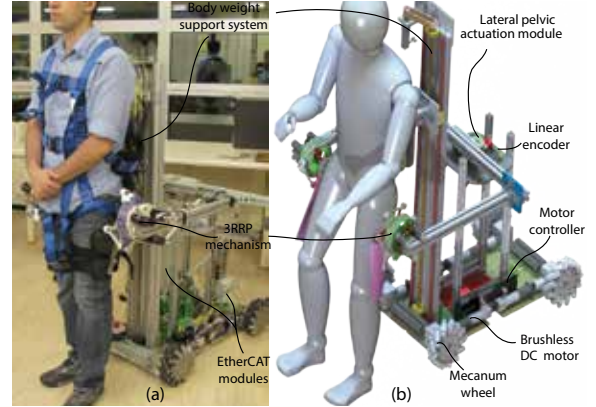
## I. INTRODUCTION

Six determinants of gait pattern have been identified to lead to efficient locomotion, minimizing the displacements of the body center of gravity. These determinants include *pelvic rotation* in the transverse plane, *pelvic tilt* in the coronal plane, the knee and hip flexion, the ankle plantar flexion, the foot and ankle rotations and the *pelvic displacements*. The irregularities in these determinants determine the difference between a natural or a pathological gait.

In this paper, we present the kinematically redundant design and the workspace centering control of ASSISTON-GAIT, an overground gait and balance trainer designed to deliver pelvis-hip exercises to correct compensatory movements arising from abnormal gait patterns. The device consists of an impedance controlled pelvis-hip exoskeleton module that can assist pelvic movements of patients, attached to a motion controlled holonomic mobile platform that allows patients to walk naturally on flat surfaces, start/stop motion, vary their speed, sidestep to maintain balance and turn to change their walking direction.

In our previous work, we have presented an earlier version of ASSISTON-GAIT as a robot assisted overground gait

This work has been partially supported by TUBITAK Grant 115M698.



Şekil 1. (a) Prototype of ASSISTON-GAIT attached to a volunteer (b) Solid model of ASSISTON-GAIT

rehabilitation device that consists of a pelvis-hip exoskeleton connected to a *series elastic* holonomic mobile base. The force rendering performance of the earlier design was limited (due to low bandwidth of Series Elastic Actuation) for the DoF associated with the mobile base movements. Secondly, in the earlier design, the lateral pelvic displacement relied on the movements of the mobile base, which caused continual lateral movements of the base throughout the gait therapy.

This paper summarizes the work presented in [1], where we propose design modifications and a control methodology to resolve both of these limitations. In particular, firstly, we add a redundant active DoF to the exoskeleton module to enable lateral pelvic displacements without the need for the movements of the mobile base. This addition ensures that ASSISTON-GAIT features dual layer (also called micro-macro) actuation [2]–[4], since the exoskeleton module can now span all the DoF covered by its holonomic mobile platform. Secondly, we implement a workspace centering motion controller [5], [6] for the mobile platform based on pelvis poses measured by the exoskeleton module, such that the workspace limits of the exoskeleton module are not reached during overground training. This controller not only provides the device with a virtually unlimited workspace, but also decouples the dynamics of the mobile platform from the exoskeleton dynamics. Consequently, the force rendering performance and output impedance of ASSISTON-GAIT is dictated only by its exoskeleton module.

## II. ASSISTON-GAIT

ASSISTON-GAIT provides patients with the ability to walk freely in all directions (forwards/backwards, turning, stepping sideways) while supporting their weight and actively controlling movements of their pelvis and hips. The holonomic mobile base follows the patient, carrying the weight of all the electrical and mechanical components. The hip-pelvis exoskeleton is

capable of independently actuating 7 DoF of the hip-pelvis complex. Finally, the active Body Weight Support (BWS) module can provide dynamic compensation of the patient weight.

When the exoskeleton module is attached to the mobile base, the overall system possesses 3 redundant active DoF. This redundancy is a design choice and is critical for ensuring transparent force control of the device. Thanks to this kinematic redundancy, the overall system can be decomposed into two subsystems, referred to as micro and macro structures. For ASSISTON-GAIT, the exoskeleton serves as the micro structure and the mobile base constitutes the macro one. Since, the reflected inertia of a kinematically redundant robot is upper bounded by the inertial properties of the micro structure [4], ASSISTON-GAIT inherits the inertial properties of its exoskeleton module and is independent of the inertia of the mobile base. Furthermore, it has been shown that if the friction/damping forces between the mobile base and the exoskeleton can be kept low, then the dynamics of the exoskeleton can be completely decoupled from the dynamics of the mobile base, as long as the workspace limits are not reached [5], [6].

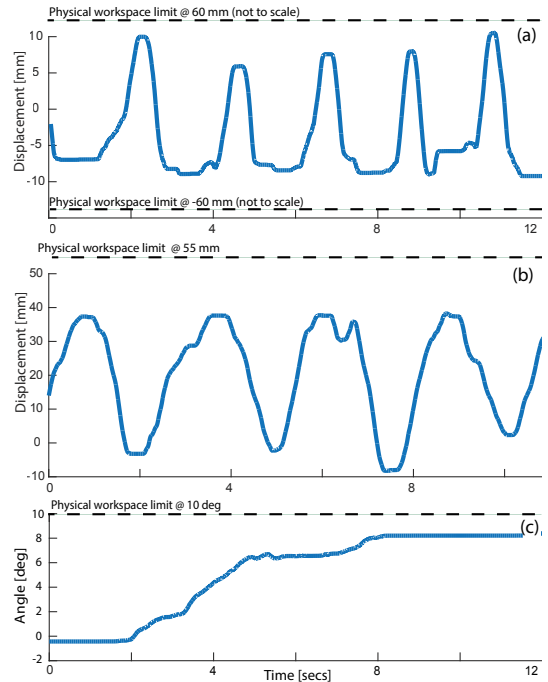
### III. WORKSPACE CENTERING CONTROL AND EXPERIMENTAL VERIFICATION

We implement a workspace centering motion controller [5], [6] for the mobile platform based on pelvis poses measured by the exoskeleton module, such that the workspace limits of the exoskeleton module are not reached during gait training. This controller not only provides the system with a virtually unlimited workspace, but having 6 Hz motion control bandwidth, this controller is fast enough to decouple the dynamics of the mobile platform from the exoskeleton dynamics during rehabilitation therapies. Consequently, since the exoskeleton is highly passively backdriveable and its workspace limits are not reached during gait and/or balance therapies, the force rendering performance and output impedance of ASSISTON-GAIT is dictated only by the design of its exoskeleton module.

For the experimental verification, a healthy volunteer (28 years old male) was connected to ASSISTON-GAIT and asked to walk naturally along a predefined path, while avoiding obstacles. Success of the experiment is evaluated by studying two factors: the exoskeleton must not reach the limit of its physical workspace and the mobile base should properly follow the human and not lead or lag in its motion. Results shown in Figure 2 indicate that the volunteer can move (forwards, sideways) and turn freely within the virtual fixtures without invoking any mobile base movements. Furthermore, it can be observed that the virtual fixtures are not violated (more than some predetermined margins), indicating that the mobile base can interfere in a timely manner to ensure the desired level of performance.

### IV. CONCLUSIONS AND FUTURE WORK

We have presented the redundant kinematics and workspace centering control of ASSISTON-GAIT, together with their experimental verification. We have argued that the kinematic redundancy between the mobile base and the exoskeleton module is crucial to ensure best possible force



Şekil 2. Experiment results: (a) Left hip displacement trajectories during forward walking with virtual fixtures set at  $\pm 10$  mm, (b) Lateral human displacement trajectories during side stepping with virtual fixtures set at  $\pm 35$  mm and (c) Pelvic rotation angle trajectories during turning with a virtual fixture set at  $8^\circ$ .

rendering performance and capitalized on this redundant kinematics to control the movements of the mobile base through position measurements of the exoskeleton module. The proposed workspace centering controller is implemented with mobile base that is fast enough to ensure that the workspace limits of the exoskeleton module are not reached, resulting in an unlimited overground training workspace for ASSISTON-GAIT. Furthermore, coupled to the passively backdriveable exoskeleton module, the workspace centering controller serves a crucial role by dynamically decoupling the mobile base and the exoskeleton module.

### REFERENCES

- [1] H. Munawar, M. Yalcin, and V. Patoglu, "Redundant kinematics and workspace centering control of assiston-gait overground gait and balance trainer," in *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE, 2016, pp. 3704–3710.
- [2] A. Sharon, N. Hogan, and D. E. Hardt, "The macro/micro manipulator: An improved architecture for robot control," *Robotics and computer-integrated manufacturing*, vol. 10, no. 3, pp. 209–222, 1993.
- [3] J. Salisbury and J. Abramowitz, "Design and control of a redundant mechanism for small motion," in *IEEE Int. Conference on Robotics and Automation*, vol. 2, 1985, pp. 323–328.
- [4] O. Khatib, "Inertial Properties in Robotic Manipulation: An Object-Level Framework," *International Journal of Robotics Research*, vol. 14, no. 1, pp. 19–36, 1995.
- [5] N. Nitzsche, U. D. Hanebeck, and G. Schmidt, "Design issues of mobile haptic interfaces," *Journal of Robotic Systems*, vol. 20, no. 9, pp. 549–556, 2003.
- [6] A. Formaglio, D. Prattichizzo, F. Barbagli, and A. Giannitrapani, "Dynamic performance of mobile haptic interfaces," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 24, no. 3, pp. 559–575, 2008.

# Seri Eyleyici Tahrikli Esnek Robotik Bacakların Sanal Sönümleme ile Senkronizasyonu

Merve Özen, Uluç Saranlı  
Bilgisayar Mühendisliği Bölümü  
Orta Doğu Teknik Üniversitesi  
Ankara, Türkiye

Email: merveozen@aselsan.com.tr, saranli@ceng.metu.edu.tr

**Özetçe** —Koşan bacaklı robotlar engebeli arazi koşullarında hızlı hareket, enerji verimliliği ve kararlılık konularında yüksek performans potansiyeline sahiptir. Genellikle koşma davranışını elde etmek için tek bacaklı robot modelleri yeterli olmalarına rağmen fiziksel robotlarda ek destek, çeviklik ve stabilizasyon için sıklıkla birden fazla bacak kullanılmaktadır. Bu şekilde birden fazla bacağına sahip robotlarda, tek bacak yerle temas halinde iken robot dinamikleri tek bacaklı davranış ile eşdeğer olabilir. Fakat, diğer bacakların davranış süresindeki konum ve hareketleri daha sonraki adımları ve genel koşma kararlılığını birincil olarak etkilemektedir. Bu kapsamda değişik yürüyüş biçimleri için farklı bacakların periyodik salınımları arasında belirli bir faz ilişkisi oluşturmak bu alanda odaklanılan genel bir problemdir. Bu bildiriye, seri elastik eyleyiciler ile tahrik edilen bacaklar varlığında sanal olarak ayarlanabilen sönümleme katsayıları kullanılarak bacaklar arasında istenilen bir şekilde senkronizasyon sağlanması için yeni bir yöntem üzerine odaklanılmıştır. Seri elastik eyleyici ile gerçekleştirilen bu sanal sönümleme katsayıları bacaklar arası faz farklarının geribeslemesi ile kontrol girdisi olarak kullanılmıştır. Önerdiğimiz yöntem ile ilk aşamada birbirlerinden bağımsız olarak çalışan iki bacağın enerji ve davranış içindeki fazları istenilen değerlere getirilebilmiştir. Bu yöntem ile çok bacaklı bir sistemdeki periyodik hareketlerin koordinasyonu için enerji verimliliği yüksek bir kontrolcü geliştirilmesi amaçlanmaktadır.

**Anahtar Kelimeler**—Bacaklı robotlar, senkronizasyon, sönümleme kontrolü

## I. GİRİŞ

Koşan canlıların zıplama ve koşma hareketlerini dinamik olarak modellemek için yaygın olarak Yaylı Ters Sarkaç (YTS, ing. SLIP) modeli kullanılmaktadır [1]. Basit noktasal bir kütle, pasif bir yaya sahip bir bacak ile birleşiminden oluşan bu modelin hibrid dinamikleri yerle temas ve uçuş olmak üzere iki farklı fazdan oluşmaktadır. YTS modeli temelde biyolojide koşma davranışını sergileyen, değişik boylardaki birçok canlının kütle merkezi hareketleri ve yere uyguladıkları kuvvetlerin analizi sonucu oluşturulmuş, ve bu kapsamda hassas olarak bu canlıların hareketlerini ifade edebilen bir model olarak ortaya konmuştur [2]. Buna ek olarak, aynı modeli temel alan birçok robot platformu ve bu platformların kontrolünü sağlayan denetim algoritmaları da gerçekleştirilmiştir [3].

YTS modelinin dinamik kontrolü için literatürde birçok yöntem önerilmiştir. Bacağın uçuştan yerle temas haline geçerkenki açısı bu yöntemlerin ortak noktası olsa da, sis-

Türkiye Robotbilim Konferansı, 2016

temin enerji seviyesinin kontrolü için değişik alternatifler mevcuttur. Bunlardan fiziksel gerçekleştirilmesi en az karmaşıklığa sahip olanlarından bir tanesi bacağın radyal yönünde etki eden bir seri esnek eyleyicinin kullanımudur. Bu kapsamda grubumuzun önermiş olduğu denetim algoritmalarından biri de bu eyleyicinin kullanılarak sanal olarak gövdenin baktan hissettiği sönümleme katsayısının seçilmesi ile enerjinin regüle edilmesidir [4]. Bu bildiriye sunduğumuz çalışma, bu denetim yöntemini temel alarak, YTS modelinden esinlenen fakat sadeleştirilmiş birden fazla bacağın periyodik hareketlerinin istenilen şekilde senkronize edilmesidir.

Normalde YTS modeli içinde sadece pasif bir yay ve sönümleyici bulunduğu zaman sistemin hibrid dinamiklerinin yaklaşık bir analitik çözümü bulunabilmektedir. Fakat sunumu sadeleştirilebilir için bu bildiriye sistemin hibrid özellikleri gözardı edilerek yalnızca yerle teması hiç kesilmeyen bir kütle yay sönümleme (KYS) modeli kullanılmıştır. Buradaki amaç, tanımlanan faz üzerinden bacakların senkronizasyonu için kullanılabilir olan fazın tanımını oluşturmak ve tasarlanan kontrolcü ile enerjinin istenilen enerji seviyesinde bacaklar arasında faz farkı oluşturarak senkronizasyonu sağlamaktır. Bu konuda öncelikli olarak literatürde Klavins'in çalışmalarında önerilmiş olan faz tanımı üzerinden sabit faz değişimine sahip bir uzay oluşturulmuştur [5].

Bu bildiriye seri elastik eyleyici kullanılarak sanal bir şekilde sönümleme katsayısı kontrol edilebilen birden fazla bacağın faz ve enerji farklarının geri bildirimleri kullanılarak zaman içindeki senkronizasyonunun sağlanması için bir yöntem önerilmektedir. İlk olarak Bölüm II'de kütle yay sönümleme modeli tanımlanarak, Bölüm III'de faz-enerji uzayındaki sistem modeli elde edilecek ve kontrolcü yapısı tanımlanacaktır. Daha sonra, Bölüm IV'de yapılan benzetim çalışmalarının sonuçları gösterilerek fazın ve enerjinin istenilen seviyelerde tutularak bacakları senkronize etme amacının gerçekleştirildiği gösterilecektir. Son olarak, Bölüm V'de sonuçlar verilecektir.

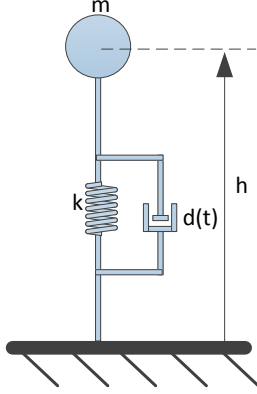
## II. KÜTLE-YAY-SÖNÜMLEME MODELİ

### A. Modelin Yapısı ve Dinamikleri

Yaylı Ters Sarkaç modeli ve buna benzer bacaklı koşma davranışları periyodik salınımlara sahip sistemlerdir. Normalde bu sistemlerin dinamikleri doğrusal olmayan ve çözümleri analitik olarak bulunamayan yapılara sahiptirler. Bu bildiriye bu yapıya karmaşıklığı en aza indirgeyerek odaklanabilmek için yer ile teması kesilmeyen basit bir kütle-yay-sönümleme

(KYS) sistemi üzerinde çalışacağız. Bu modelin analitik çözümü mümkün olduğundan sanal olarak kontrol edilebilen sönümlenme katsayısı üzerinden yapılacak kontrolün kullanımı için uygun bir ortam sunmaktadır.

Şekil 1’de, dikeyde  $h$  pozisyonuna sahip, yay sabiti  $k$ , ve sönümlenme katsayısı zamana göre parçalı sabit olarak kontrol edilebilen şekilde  $d(t)$  ve kütlesi  $m$  olan bir KYS modeli gösterilmektedir. Sanal olarak bu katsayının kontrolünün, Seçer’in çalışmasında öngörüldüğü şekilde seri elastik eyleyiciler aracılığı ile yapıldığı varsayılmaktadır [4].



Şekil 1: Sönümlenme katsayısı sanal olarak kontrol edilebilen ve bacağın yerden ayrılmadan periyodik olarak salınım yaptığı KYS modeli.

Bu modelin durum uzay denklemleri

$$\begin{bmatrix} \dot{h} \\ \ddot{h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -k & -d(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h \\ \dot{h} \end{bmatrix} \quad (1)$$

şeklinde türetilir. İlerleyen bölümlerde yapacağımız analizler, sanal sönümlenme katsayısı  $d(t)$ ’nin parçalı sabit bir şekilde değiştiği varsayımına dayanacaktır ki bu literatürde de yaylı ters sarkaç modeli için öngörülen, bacağın yerle teması sırasında sabit kalan fakat adımdan adıma değiştirilebilen sönümlenme katsayısı yöntemi ile uyumludur.

### B. Faz Uzayı

Salınım modelinde, uygun bir faz tanımı üzerinden senkronizasyon ve kontrol gerçekleştiren çalışmalar literatürde bulunmaktadır. Fakat, [6]’de gözlemlendiği şekilde bu sistemlerde uygun bir koordinat sistemi seçilmediği takdirde faz değişimi sabit olmadığı için sönümlenme gerçekleşmektedir. Bu nedenle, sabit faz değişimine sahip bir koordinat sistemine geçilmesi gerekmektedir. Bu doğrultuda

$$\mathbf{W} := \begin{bmatrix} w\sqrt{1+\beta^2} & \frac{\beta}{\sqrt{1+\beta^2}} \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{1+\beta^2}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

şeklinde bir koordinat değişim matrisi tanımlanarak, normal sistem durum vektörü  $\bar{\mathbf{h}} := [h, \dot{h}]^T$  yerine yeni tanımlanan  $\bar{\mathbf{y}} := [y_1, y_2]^T$  durumuna geçiş yapmak için

$$\bar{\mathbf{y}} = \mathbf{W}\bar{\mathbf{h}} \quad (3)$$

ilişkisi kullanılabilir. Bu yeni koordinat sisteminde dinamikler

$$\dot{\bar{\mathbf{y}}} = \begin{bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \end{bmatrix} = w \begin{bmatrix} -\beta & 1 \\ -1 & -\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = w \begin{bmatrix} -\beta & 1 \\ -1 & -\beta \end{bmatrix} \bar{\mathbf{y}} \quad (4)$$

şeklinde gerçekleşmektedir. Burada kullanılan sabitler

$$w := \pm \frac{\sqrt{4k-d^2}}{2} \quad (5)$$

$$\beta := \frac{d}{2w} \quad (6)$$

şeklinde tanımlanmıştır. Bu dinamikler kapsamında sistemin fazı

$$\theta := \tan^{-1}\left(\frac{y_2}{y_1}\right) \quad (7)$$

ve bunu tamamlayan enerji koordinatları

$$E := \bar{\mathbf{y}}^T \bar{\mathbf{y}} = \bar{\mathbf{h}}^T \mathbf{W}^T \mathbf{W} \bar{\mathbf{h}} \quad (8)$$

şeklinde tanımlanabilir. Bu tanımlar sonucunda ortaya çıkan yeni koordinat sisteminde faz değişkeni sabit hızla ilerleyecek, ve enerji serbestlik derecesi de sönümlenme katsayısına doğrudan bağlı şekilde değişecektir. Formal olarak bu gözlemler

$$\dot{\theta} = -w \quad (9)$$

$$\dot{E} = -2w\beta E \quad (10)$$

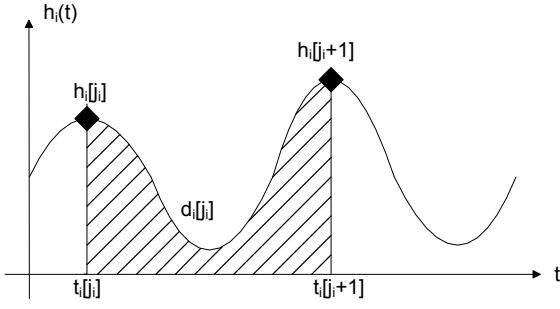
şeklinde ifade edilebilir. Bu koordinat değişikliği Bölüm III’de detaylandırdığımız faz kontrolcüsünün temelidir.

## III. SANAL SÖNÜMLEME KATSAYISI İLE BACAK SENKRONİZASYONU

Bu bölümde, normalde birbirinden bağımsız olarak çalışan ve hareket denklemleri (1) ile tanımlanan iki bacağın senkronizasyonu için gerekli matematiksel çerçeve oluşturularak, her iki bacağın sönümlenme katsayıları kullanılarak fazlarının senkronizasyonu ve eşzamanlı olarak enerjilerinin kontrolü gerçekleştirilecektir. Bu kapsamda daha önceden tek bir bacak için tanımlanmış olan değerler alt indisler ile iki bacak için ayırdedilecektir. Formal olarak,  $i \in \{1, 2\}$  ile, ilgili bacağın durum değişkenleri  $h_i$  ve  $\dot{h}_i$ , faz ve enerji değerleri ise  $\theta_i$  ve  $E_i$  olarak belirtilecektir.

### A. Faz ve Enerji Kontrolü

Yukarıdaki bölümlerde (4) ile verilmiş olan denklemlerin doğruluğu sönümlenme katsayısı  $d(t)$ ’nin zamana göre sabit olmasını gerektirmektedir. Aksi takdirde sistem matrisinin türevi de denklemlere katılmalıdır ki bu da kontrolcü tasarımını analitik olarak zorlaştırmaktadır. Bu problemin önüne geçmek için, kontrolcü tasarımıımızda  $d(t)$ ’nin parçalı olarak sabit olduğu ve hareket salınıminin belirli bir noktasında anlık olarak değiştiğini varsayacağız. Literatürde koşma davranışlarının analizinde sıklıkla yapılan bu uygulamada, salınımin “zirve” olarak adlandırılan en üst noktası ( $\dot{h} = 0$  ve  $\ddot{h} < 0$  ile) bir Poincare kesiti olarak düşünülmekte ve  $d(t)$  bu noktada anlık olarak değiştirilmektedir. Formal olarak,  $i$  bacağı için  $j_i$  sırasındaki zirve noktasının gözlemlendiği zaman  $t_i^{j_i}$  olarak adlandırılırsa,  $t_i^{j_i} < t < t_i^{j_i+1}$  zaman aralığında sönümlenme katsayısı değeri  $d_i(t) = d_i[j_i]$  şeklinde sabit olarak seçilecektir. Burada önemli bir nokta, iki farklı bacağın zirve zaman ve sayıları farklı olabileceğinden, her ikisi için



Şekil 2:  $i$  numaralı bacağın  $j_i$  sırasındaki adımı süresince sabit sönümlenme katsayısı  $d_i[j_i]$  ile salınımı.

kullanılan indislerin  $j_i$  şeklinde ayrıştırılmış olmalarıdır. Bu yapının tek bir bacadaki görünümü Şekil 2'de gösterilmiştir.

Bu çalışmada odaklanmakta olduğumuz uygulamada, iki bacak arasında  $\theta_d$  miktarında bir faz farkı elde etmek, ve her iki bacağın enerjisini de  $E_d$  seviyesine getirebilmek için bir kontrolcü tasarlamaktayız. İki bacadan herhangi birisi yeni bir zirve noktasına  $t = t_i^{j_i}$  anında ulaştığında, bu noktadaki faz farkı iki bacak için birseysel olarak fakat birbirleri ile tutarlı olarak şöyle tanımlanabilir:

$$\Delta\theta_i[j_i] := \theta_1(t_i^{j_i}) - \theta_2(t_i^{j_i}) - \theta_d. \quad (11)$$

Energilerdeki hata ise aynı zirve noktasında

$$\Delta E_i[j_i] := E_i(t_i^{j_i}) - E_d \quad (12)$$

şeklinde tanımlanabilir. Özellikle faz tanımında göz önünde bulundurulması gereken önemli bir nokta, faz açıları arasındaki fark alınırken bu değerlerin dairesel  $S^1$  uzayında tanımlanmış olmaları ve dolayısı ile farkın  $[-\pi, \pi]$  aralığında olacak şekilde kısıtlanması gerekliliğidir.

Bu faz farkı tanımı aslında her bir bacak için ayrık bir sistem tanımına da karşılık gelmektedir. Yanlız, her iki bacağın zirve noktalarının birbirlerine göre konumları ve sıraları zaman içinde değiştiğinden, bu ilişkiyi basit bir denklem ile ifade etmek mümkün olmamaktadır. Formal olarak, kontrolçümüzden istenen iki faz değişkeninin oluşturduğu  $S^1 \times S^1$  torus uzayında sabit bir faz ilişkisine sahip olan çizgisel bir alt kümenin kararlılığını sağlayacak olan bir vektör alanıdır. Bu durum global olarak ele alındığında zirve noktalarının göreceli konumlarının yol açtığı kombinatorik durumlardan kaçınmak için, istenen faz farkı etrafındaki lokal bir durumu öncelikli olarak ele alacağız. Bu durumda faz farkı bir önceki zirvedeki faz farkının ve sönümlenme katsayılarının bir fonksiyonu olarak

$$\Delta\theta_1[j_i + 1] = f_\theta(\Delta\theta_1[j_1], d_1[j_1], d_2[j_2], d_2[j_2 + 1]) \quad (13)$$

şeklinde yazılabilir. Bu örnek denklem ilişkiyi 1 numaralı bacak için vermektedir. Bu bacağın tek bir salınımı içinde diğer bacak iki farklı adım içinden geçecektir çünkü bu süre içinde faz farkı sıfırdan farklı olduğu için ister istemez kendi zirvesine ulaşacaktır. Bu sebeple 2 numaralı bacak için  $d_2[j_2]$  ve  $d_2[j_2 + 1]$  olarak iki ardışık sönümlenme katsayısı denkleme dahil edilmiştir.

Enerji hatası tanımı iki bacak arasında bağlantı kurmadığından enerjideki hata için oluşan ayrık sistem daha basit bir

şekilde

$$\Delta E_i[j_i + 1] = f_E(E_i[j_i], d_i[j_i]) \quad (14)$$

olarak ifade edilebilir. Burada istenilen kararlılığı elde etmek için tasarlanacak kontrolcünün seçeceği sönümlenme değerlerinin,

$$\Delta\theta_i[j_i + 1] = \alpha_\theta \Delta\theta_i[j_i] \quad (15)$$

$$\Delta E_i[j_i + 1] = \alpha_E \Delta E_i[j_i] \quad (16)$$

ilişkilerini elde edecek şekilde olmaları gerekmektedir. Eğer bu mümkün olursa iki bacak da istenilen faz farkı ve enerji seviyelerine ulaşarak kararlı şekilde ilerleyebileceklerdir. Buna ek olarak, kontrolcü tasarımıımızdaki diğer temel amaçlardan bir tanesi verimliliği sağlamak için istenilen faz farkı ve enerji seviyesine ulaşıldığı zaman  $d_1 = d_2 = 0$  olmasıdır. İki bacağın yay sabitleri aynı olduğu takdirde bu mümkün olacaktır ve gereksiz enerji tüketimi ortadan kaldırılmış olacaktır.

Bu amaçlar doğrultusunda, ilk olarak her bacağın tepe noktasında uygulanacak olan kontrolcülerini faz ve enerji için ayrı ayrı tanımlayacağız:

$$d_i[j_i + 1] = d_i^\theta[j_i + 1] + d_i^E[j_i + 1]. \quad (17)$$

Faz kontrolü için bir önceki salınımdaki faz ve enerji değerlerine göre kontrolcü anahtarlaması yaparak

$$d_i^\theta[j_i] = \begin{cases} \sqrt{4\alpha_\theta^2(\Delta\theta_i[j_i])^2 - 8\sqrt{k}\alpha_\theta(\Delta\theta_i[j_i])} & \text{if } \Delta\theta_i[j_i] > 0, E_i[j_i] > E_d \\ -\sqrt{4\alpha_\theta^2(\Delta\theta_i[j_i])^2 - 8\sqrt{k}\alpha_\theta(\Delta\theta_i[j_i])} & \text{if } \Delta\theta_i[j_i] > 0, E_i[j_i] < E_d \\ 0 & \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad (18)$$

Enerji kontrolünde ise her durumda enerjiiyi istenilen seviyeye çıkaracak bir sönümlenme değeri

$$d_i^E[j_i] = \alpha_E(E_i[j_i] - E_d)/E_i[j_i] \quad (19)$$

şeklinde seçilebilir. Bu kontrolcünün istenilen faz ve enerji kararlılığını sağlayalı sağlamadığını henüz teorik olarak gösterememiş olsak da, benzetim çalışmalarımız sonucunda istenilen sonucun elde edilebildiğini göstermiş bulunmaktayız.

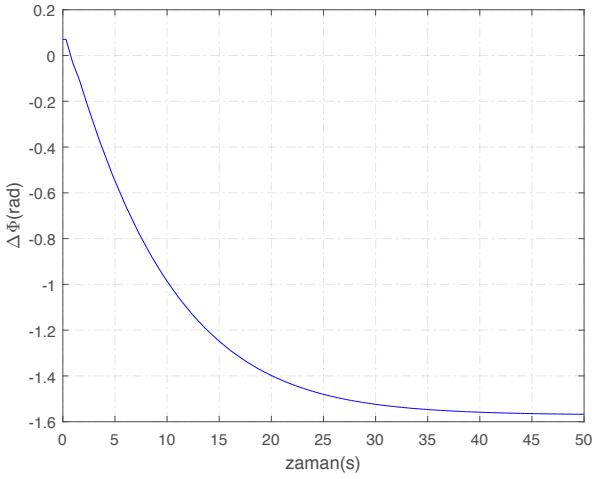
#### IV. BENZETİM SONUÇLARI

Bu bölümde yukarıda önerilen ve detaylandırılan kontrol algoritmasının KYS modeli ile MATLAB ortamında simüle edilerek değerlendirilmesi ile ilgili sonuçlar sunulmaktadır. Sunulan benzetim çalışmalarında Tablo 1'de gösterilen sistem parametreleri kullanılmıştır.

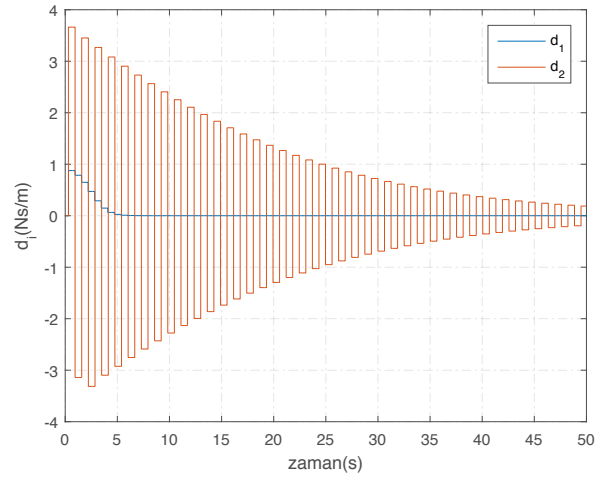
Tablo 1: Benzetim çalışmalarında kullanılan sistem parametreleri

Parametre	Değer	Açıklama	Birim
k	100	bacak yay sabiti	N/m
m	1	gövde kütlesi	kg
$\alpha_\theta$	0.06	Faz kazanç sabiti	-
$\alpha_E$	1	Enerji kazanç sabiti	-
$\theta_d$	$-\pi/2$	İstenilen faz farkı	rad
$E_d$	10	İstenilen enerji seviyesi	$kg \frac{m^2}{s^2}$

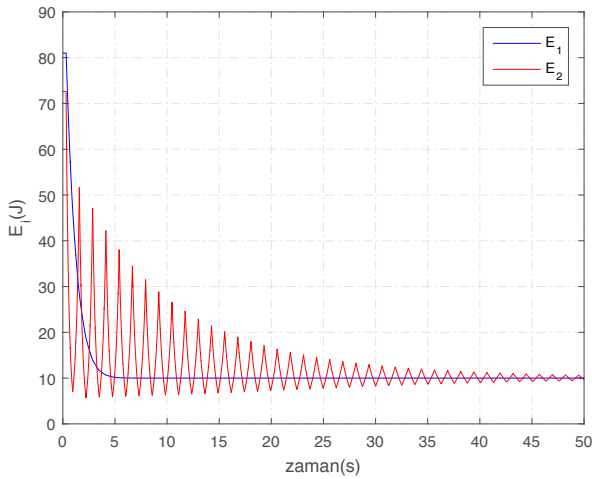
Bu parametreler kullanıldığında Bölüm III'de anlatılan kontrolcünün uygulanması ile oluşan faz farkının zamana göre değişimi Şekil 3'de gösterilmiştir ve istenilen değer olan  $-\pi/2$ 'ye yakınsamaktadır.



Şekil 3: İki bacağın salınımları arasındaki faz farkının faz ve enerji kontrolü altındaki davranışı.



Şekil 5: Önerilen faz ve enerji kontrolcüsünün kullanımı sırasında her iki bacak için seçilen sönümleme katsayısı değerleri.



Şekil 4: İki bacağın salınımları sırasındaki enerji seviyelerinin faz ve enerji kontrolü altındaki davranışları.

Şekil 4’de ise her iki bacağın enerji seviyeleri önerilen kontrolcü altında gösterilmiştir. Burada görüldüğü üzere ilk bacak istenilen enerji seviyesine yaklaşık olarak birinci dereceden üssel bir yapıya sahip olarak ulaşmıştır. İkinci bacak ise istenilen enerji seviyesine salınımlı bir şekilde ulaşmaktadır. Bunun sebebi ise, kullanılan kontrolcünün faz farkını istenilen seviyeye ulaştırmak için sönümleme katsayısını pozitif ve negatif olarak değiştirmek durumunda kalmasıdır. Bu durumun gerekliliği de, sönümleme katsayısının faz üzerindeki etkisinin her zaman aynı işarete sahip olması, ve bunun sonucu olarak enerji ve fazı aynı anda istenilen noktaya ulaştırabilmek için bu şekilde bir yapının gerekli görülmüş olmasıdır. Burada dikkat çeken diğer bir özellik ise faz kontrolü tamamlandıktan sonra enerjinin istenilen değere yaklaştığının gözlemlenmesidir.

Bu süreçte kullanılan sönümleme katsayısı her bir adım için parçalı değişmez olarak Şekil 5’de yer almaktadır. Enerjide görülen ikinci bacağın chattering davranışına sebep olan

sönümleme değerleri görülmektedir. Bunun sebebi kontrolcünün enerji seviyesine göre sönümleme değerinin işaretini anahtarlamasıdır.

## V. SONUÇLAR VE GELECEKTEKİ ÇALIŞMALAR

Bu bildiri de çok bacaklı robotlarda önemli uygulamaları olabilecek bir doğrultuda, iki adet birbirinden bağımsız salınan ve sönümleme katsayıları sanal olarak kontrol edilebilen bacak için faz ve enerji geri beslemesi kullanılarak bir senkronizasyon kontrolü önerilmiştir. Önerdiğimiz kontrolcünün bacaklar arasındaki faz farkı ve enerji hatalarını istenilen seviyelere ulaştırıldığı benzetim çalışmaları ile gösterilmiştir. Bu olumlu sonuca rağmen, özellikle enerji kontrolünde istenmeyen salınımlar olduğu gözlemlenmiştir. Bu sorunu giderebilmek, kontrolcülerin kararlılığı ve yakınsama zamanlarını iyileştirebilmek için öncelikle fazı sonra enerjiyi istenilen seviyelere taşıyacak kayma-modu kontrol yapısına geçilmesi planlanmaktadır. Daha sonra, KYS modelindeki kazanımlar düşünülerek YTS modeline geçilmesi ve kontrolcünün yapısının buna göre güncellenmesi gerçekleştirilecektir.

## KAYNAKÇA

- [1] W. J. Schwind, “Spring loaded inverted pendulum running: A plant model,” PhD, University of Michigan, 1998.
- [2] R. Blickhan and R. J. Full, “Similarity in multilegged locomotion: Bouncing like a monopode,” *Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology*, vol. 173, no. 5, pp. 509–517, Nov. 1993.
- [3] M. Raibert, *Legged robots that balance*, ser. MIT Press series in artificial intelligence. Boston: MIT Press, 1986.
- [4] G. Secer and U. Saranlı, “Control of hopping through active virtual tuning of leg damping for serially actuated legged robots,” in *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*. IEEE, 2014, pp. 4556–4561.
- [5] E. Klavins and D. E. Koditschek, “Phase regulation of decentralized cyclic robotic systems,” *The International Journal of Robotics Research*, vol. 21, no. 3, pp. 257–275, 2002.
- [6] M. W. Hirsch, S. Smale, and R. L. Devaney, “Differential equations, dynamical systems, and an introduction to chaos,” 2004.

# Endüstriyel Robot Programlamada Yeni Bir Yöntem

Sezgin Seçil, Osman Parlaktuna, Kaya Turgut  
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü  
Eskişehir Osmangazi Üniversitesi  
Eskişehir, Türkiye  
Email: ssecil, oparlak, kturgut@ogu.edu.tr

Metin Özkan  
Bilgisayar Mühendisliği Bölümü  
Eskişehir Osmangazi Üniversitesi  
Eskişehir, Türkiye  
Email: meozkan@ogu.edu.tr

**Özetçe** — Endüstriyel robot kolları, seri üretimde, hassas işlem gerektiren işlerde ve insanlar için zararlı işlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu robotların endüstriyel bir işlem uygulamak üzere programlaması için kullanılan geleneksel yöntemlerin, uygulanması uzmanlık gerektirmektedir. Robot operatörü istihdam etme sıkıntısı yaşayan küçük ve orta ölçekli firmaların, üretim süreçlerinde robot kullanması için kolay programlama yöntemlerine ihtiyaç vardır. Bu çalışmada, robotların kolay programlanması için yeni bir yöntem sunulmaktadır. Bu yöntemde, robot ucundaki algılayıcı ile parçanın yüzeyinden veri toplayarak 3B modelini oluşturan, kullanıcıya bu modeli ekranda gösteren ve kullanıcının modelin görseli üzerinden seçtiği noktalara işlem gerçekleştirmesini sağlayan bir sistem anlatılmaktadır. Yapılan gerçek bir uygulama ile yöntemin uygulanabilir olduğu gösterilmektedir.

**Anahtar Kelimeler**—Endüstriyel robot, 3B nokta bulutu, hareket planlama, robot yazılımı.

## I. GİRİŞ

Endüstriyel robot kolları, sürdürülebilir üretim kalitesini ve üretim hızını artırırken, üretim maliyetlerini de düşürmektedir. Bu nedenlerle, robot kullanımı ve talebi artmaktadır. Düşük, orta ve yüksek yüklerde kullanılabilen, yüksek hassasiyette çalışan değişik özelliklerde endüstriyel robot kollarının birçok küresel çaplı üreticisi bulunmaktadır. Ayrıca, daha düşük fiyatlara robot almak üzere, ikinci el piyasası da bulunmaktadır. Bu sayede, robot temini büyük ölçekli firmalar kadar küçük ölçekli firmalar için de mümkün olmaktadır. Robot kullanımında temel problem, robotun temininden çok programlanmasıdır. Gelişen robot teknolojilerine rağmen, robot programlama yöntemlerinde önemli bir gelişme olmamıştır.

Geleneksel robot programlama yöntemleri hataya açık, zaman tüketen yöntemler olması yanı sıra programlamanın başarısı programı yapan kişinin teknik becerileri ile de doğrudan ilintilidir. Bu yöntemleri kullanan endüstri alanlarında, robot kullanımının verimli olabilmesi için programlanmış olan robotun, gerçekleştirilen programlama ile büyük çapta üretim yapması gerekmektedir [1]. Robot programlama sürecinin uzun sürdüğü ve buna karşılık üretimi yapılan ürünün sayıca az olduğu veya ürün çeşitliliğinin fazlalığından kaynaklanan yeniden programlama gereksiniminin yüksek olduğu işletmelerde endüstriyel robot kullanımının zorluğu ön plana çıkmakta ve bu gibi işletmelerde robotların kullanımından uzak durulmaktadır [2]. Örneğin, otomobil gövdesi kaynağı yapması beklenen endüstriyel robotun geleneksel

yöntemlerle programlanması 8 aydan daha uzun bir süre almakta, fakat programlama süreci tamamlanan bir robotun ilgili işi gerçekleştirmesi 16 saatte tamamlanmaktadır. Bu durumda programlama zamanı, işletme zamanının yaklaşık olarak 360 katıdır. Üretim yapan işletmenin böyle bir durumda endüstriyel robot kullanabilmesi için üretilen üründen binlerce üretmesi gerekmektedir. Fakat küçük ve orta ölçekli endüstriyel işletmeler için bu durum söz konusu değildir. Haliyle, bu işletmelerin endüstriyel robot kullanımının sağladığı avantajlardan faydalanmaları mümkün olmamaktadır [3].

Önerilen yeni yöntem, robot programlamayı mevcut geleneksel yöntemlere göre daha kolaylaştırmaktadır. Sistem, robotik işlem uygulanacak parçanın 3B modelini oluşturmada, kullanıcının ekranda kendisine gösterilen 3B model üzerinden yapacağı işaretlemeler neticesinde robotik işlem tamamlanmaktadır. Önerilen yöntemin detaylı anlatımı yapılarak, gerçekleştirilen prototip uygulama ile uygulanabilir etkin bir yöntem olduğu gösterilmektedir.

## II. SİSTEM TASARIMI

Önerilen ve uygulanabilirliği gösterilen yöntem, yeni bir robot programlama yaklaşımını literatüre kazandırmaktadır. Mevcut yaklaşımlarla kıyaslandığında, bu yöntemin robot programlamayı daha kolay bir hale getireceği düşünülmektedir. Önerilen yaklaşımda, bir operatörün, robot kol ile bir parça üzerinde endüstriyel işlem uygulamak için şunları yapması yeterli olacaktır:

1. Öncelikle, işlem uygulanacak cisim, robotun hareket uzayı içinde kalan bir yere yerleştirilir.
2. Cismin sistem tarafından oluşturulan 3B görüntüsü gösterilir.
3. Operatör, 3B görüntüyü, sağa/sola ve aşağı/yukarı çevirebilmekte, yaklaşıp/uzaklaştırabilmektedir.
4. Operatör işlem uygulanacak, nokta ya da noktaları 3B görüntü üzerinde imleç ile tıklayarak seçmekte; bu noktalarda hangi işlemin (vidalama, kaynak, delik açma, kesme, çizme, vs.) yapılacağı belirtmektedir.
5. Robot seçilen noktalar için otomatik olarak hareket planı oluşturup, işlemi gerçekleştirmektedir.

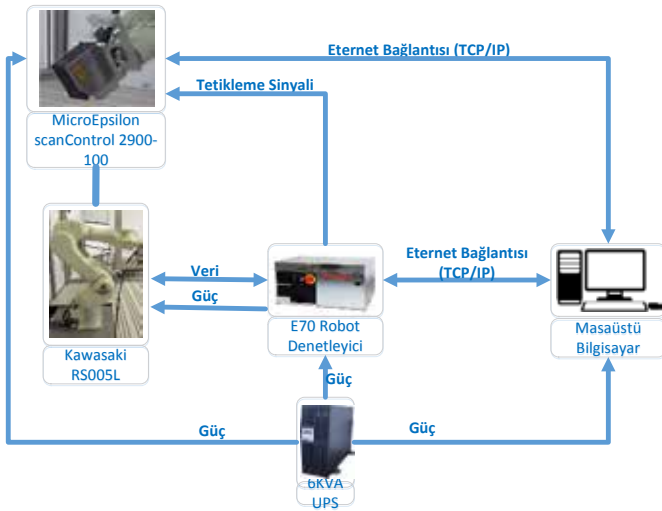
Görüldüğü gibi, operatör için robotu programlamak oldukça kolaylaşmaktadır. Bu senaryonun işletilebilmesi için, tasarlanan sistem üç farklı aktiviteyi yerine getirmektedir. Bu aktiviteler şu şekilde sıralanabilir:

- i) **Yüzey Verisi Toplama:** Bu aktivitede, robotun ucunda bulunan lazer profil algılayıcı cisim etrafında dolaştırılarak yüzey verisi toplanmaktadır. Bu süreç otomatik olarak ve veri toplanmamış bölge kalmayacak şekilde gerçekleştirilmelidir.
- ii) **Görselleştirme ve İşlem Noktası Seçimi:** Bu aktivitede, elde edilen cisim yüzey noktaları görselleştirilerek ekranda gösterilmektedir. Cismin 3B görüntüsü, döndürme/eğme, yakınlaştırma /uzaklaştırma işlemlerine tabi tutulabilmektedir. Cisim görseli üzerinde işlem uygulanacak noktalar seçilebilmektedir.
- iii) **Robotik İşlem Uygulama:** Bu aşamada, seçilen noktaların koordinatlarına robotun uç noktasının hareketi için, hareket planlaması yapılmakta ve robot hareketi ve işlem uygulaması gerçekleştirilmektedir.

Bu aktivitelerin gerçekleştirildiği donanım ve yazılım tasarımları aşağıda verilmektedir.

#### A. Donanım

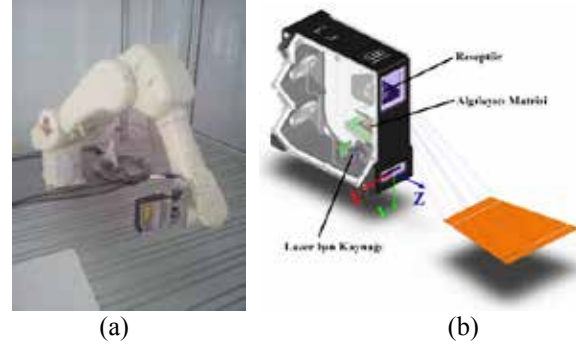
Önerilen yöntemin uygulamasının gerçekleştirilmesi için, donanımsal bir sistem tasarımı yapılmıştır. Bu sistem, benzer çalışmalar yapacak araştırmacılara kendi sistemlerini oluşturmada katkı sağlayacaktır. Donanımsal olarak, 6-eksenli endüstriyel robot kolu ve bir lazer profil algılayıcı sistemin iki temel bileşenini oluşturmaktadır. Ayrıca, güvenli ve verimli bir çalışma ortamı oluşturmak adına iş istasyonu, sistemin elektrik kesintilerinde etkilenmemesi için güç kaynağı ve algılayıcı montaj aparatı gibi yardımcı donanımsal bileşenler de sistemde yer almaktadır. Sistem donanım tasarımı, tüm donanım bileşenlerinin sisteme uygun bir şekilde bütünleşmiş halini yansıtmaktadır.



Şekil 1. Sistem Donanım Mimarisi

Şekil 1’de, sistemin donanım mimarisi gösterilmektedir. Endüstriyel robotun denetimi, bu robot için tasarlanmış olan robot denetleyicisi ile sağlanmaktadır. Kullanılan 6-eksenli endüstriyel robot kolu, Kawasaki firması tarafından üretilen,

RS005L model endüstriyel robot koludur. Şekil 2(a)’da görülen RS005L, Kawasaki firmasının ürettiği R serisi robot kollarından biri olup, küçük ve orta yükte endüstriyel işlemleri gerçekleştirebilmektedir. Normal yük taşıma kapasitesi 5 kg, tekrarlanabilirliği 0.03m, maksimum hızı ise 9300 mm/s’dir. Robot kolunun çalışma alanında yatayda erişimi 903 mm, dikeyde erişimi 1484 mm’dir. Robot kolu, Kawasaki E70 adlı robot denetleyicisi ile kontrol edilmektedir. Robotu elle veya öğretim yöntemiyle kontrol etmek için ayrıca robot denetleyicisine bağlanan kumanda paneli de bulunmaktadır.



Şekil 2. Sistem bileşenleri: (a) 6-eksen endüstriyel robot, (b) Lazer profil algılayıcı

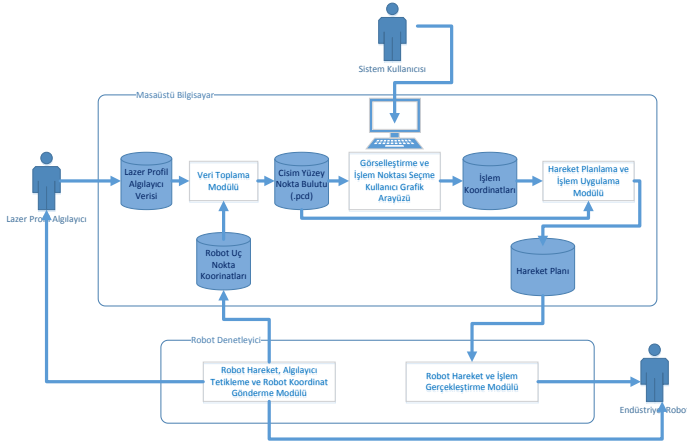
Robot ucunda, cisimlerin yüzey noktalarının ölçümünde kullanılan lazer profil algılayıcı ve işlem uygulama aparatı bulunmaktadır. Önerilen yöntem için örnek çalışma yapıldığı için, işlem uygulama aparatı olarak bir kalem yerleştirilmiştir. Gerçek uygulamada, bu kalemin yerini vidalama, törpüleme, kaynak tabancası gibi işleme uygun aparatlar alacaktır. Bu çalışmada, Micro-Epsilon firması tarafından üretilen scanCONTROL 2900-100 model lazer profil algılayıcı kullanılmıştır. Profil frekansı, 4000Hz’e kadar çıkabilen bu algılayıcı ölçüm oranı 2560000 nokta/sn, z eksenini ölçüm aralığı 265 mm’ye kadar, x eksenini ölçüm aralığı 143,5 mm’ye kadar, z eksenini referans çözünürlüğü 2 µm, x eksenini çözünürlüğü 1280 noktaya kadar ve doğruluk %±0.16 kadardır. Şekil 2(b)’de gösterilmektedir.

#### B. Yazılım

Geliştirilen yöntemin yazılım tasarımı, fonksiyonlarına göre sınıflandırılmış dört kısımdan oluşmaktadır. Bunlar;

- Robot Sunucu,
- Cisim Yüzey Verisi Toplama,
- Cismi 3B Görselleştirme ve İşlem Noktaları Seçme,
- Hareket Planlama ve İşlem Uygulama.

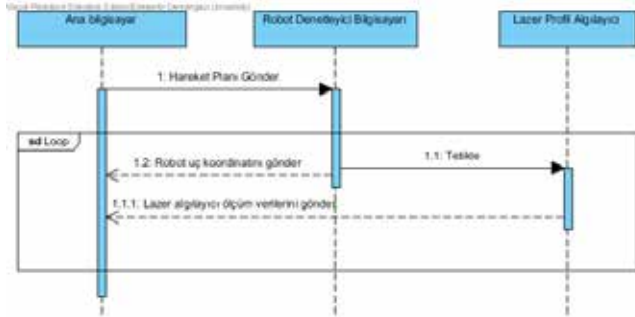
*Robot sunucu*, yüzey verisi toplama ve robotun denetimi sırasında robot denetleyicisi üzerinde koşan yazılımdır. Robot denetleyicisinin dili olan AS dilinde yazılmıştır. *Cisim yüzey verisi toplama* sürecinde, robottan pozisyon bilgileri ile lazer profil algılayıcıdan ölçüm verileri eşgüdümlü olarak alınmaktadır. *Cisim 3B görselleştirme ve işlem nokta seçiminde*, elde edilen yüzey verileri görselleştirilmektedir. Kullanıcı, görsel üzerinden işlem noktalarını seçmekte ve bu noktalar kaydedilmektedir. Son olarak, *hareket planlama ve işlem uygulama sürecinde*, seçilen noktalar için hareket planının üretilmesi ve robot denetiminin yapılması söz konusudur. Bu süreçlerin gösterildiği yazılım mimarisi Şekil 3’de gösterilmektedir.



Şekil 3. Yazılım Mimarisi

### Robot Denetleyici Yazılımı

Robot denetleyici yazılımı, Ethernet üzerinden TCP/IP protokolü ile servis sunmaktadır. Cisim yüzey verisi toplama sürecinde, bu program robotun ucundaki lazer algılayıcının hareket ettirilmesi, algılayıcının tetiklenmesi ve robot uç nokta pozisyonunun iletilmesini sağlamaktadır. Ana bilgisayardan robot denetleyici bilgisayarına hareket planı gelir. Robot denetleyici bilgisayarında yazılan program tarafından, robot harekete başlatılır. Hareket süresince, belirli zaman aralıklarında giriş/çıkış kartı üzerinden algılayıcıya tetikleme sinyali gönderilir. Sinyal gönderildiği anda, robotun uç noktasının koordinatı Ethernet üzerinden ana bilgisayara iletilir. Diğer taraftan lazer profil algılayıcı da, tetikleme sinyali ile birlikte lazer ölçüm değerlerini alarak, Ethernet üzerinden ana bilgisayara gönderir. Bu programın akış diyagramı, Şekil 4'de verilmektedir. [5]'de bu yazılımda kullanılan akış diyagramları ve detaylı anlatımı bulunabilir.



Şekil 4. Yüzey veri toplama sürecinde dizge diyagramı

### Cisim Yüzey Verisi Toplama Modülü

Veri toplama modülü, robot denetleyici bilgisayarından robot uç nokta pozisyon değerlerini, lazer profil algılayıcıdan algılayıcı verilerini alır. Alınan bu veriler doğrultusunda, yüzey noktalarının robot taban koordinat sistemine dönüştürülmesi ve verilerin birleştirilmesi, filtrelenmesi bu modül tarafından gerçekleştirilir.

Böylece, bu modülde iki aşamalı işlem yürütülmektedir. İlk aşamada, lazer algılayıcı ve robottan gelen veriler bir dosyaya kaydedilir. İkinci aşamada, veriler yerel koordinat eksenine göre dönüştürülerek, görselleştirme aşamasında kullanılacak nokta bulutu elde edilir. [5]'de bu yazılımda kullanılan akış diyagramları ve detaylı anlatımı bulunabilir.

### 3B Görselleştirme ve İşlem Noktası Seçim Modülü

Görselleştirme ve işlem noktası seçme modülü, PCL (Point Cloud Library) adlı açık kaynak kodlu kütüphanenin kullanımı ile gerçekleştirilmektedir. Bu modülün görevi, veri toplama modülünün oluşturduğu yüzey noktalarını kapsayan nokta bulut dosyasını kullanıp, görselleştirme işlemini gerçekleştirmek ve kullanıcıya görsel üzerinden istenilen 3B noktaların seçimini sağlamaktır. Kullanıcı görsel üzerinden, klavye ve fare kullanarak yakınlaştırma/uzaklaştırma, evirme/çevirme yapabilmektedir. Kullanıcı, en uygun görüntüyü elde ettiğinde, fare ile tıklayarak işlem uygulanacak yüzey noktalarının koordinatlarını kaydedebilmektedir. [5]'de bu yazılımda kullanılan akış diyagramları ve detaylı anlatımı bulunabilir.

### Hareket Planlama ve İşlem Gerçekleştirme Modülü

Robot işlem uygulama modülü, kullanıcının görselleştirme modülü aracılığıyla belirlediği noktalar için hareket planı oluşturan ve hareket planını robota ileten yazılımdan oluşmaktadır. Noktalar arasında hareket planı oluşturulurken, engellerin durumu da dikkate alınmakta ve engellere çarpmayacak şekilde plan oluşturulmaktadır. Bu modül, elde edilen hareket planındaki eklem pozisyonlarını robot denetleyici bilgisayarına ileterek, hareketin başlatılmasını tetiklemektedir.

Bu çalışmada, hareket planlama aşaması için, Open Motion Planning Library (OMPL) isimli açık kaynak kodlu hareket planlama kütüphanesi ve MoveIt isimli yazılım kullanılmaktadır. Bu yazılımda, çeşitli hareket planlama algoritmaları bulunmaktadır. Hareket planlama amacıyla, örnekleme dayalı ağaç tabanlı planlayıcılardan biri olan Rapidly-exploring Random Trees (RRT) algoritmasının bir varyasyonu olan RRT-Connect algoritması kullanılmıştır. RRT-Connect algoritması, varyasyonu olduğu RRT algoritmasından farklı olarak arama ağacını başlangıç durumunun yanında hedef durumunda da başlatmaktadır ve iki ağaç birbirlerine doğru genişlemektedir [6].

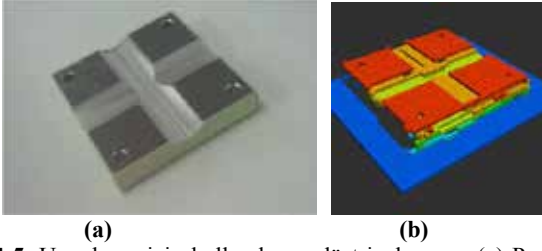
Bu modülde hareket planlama sonrası elde edilen yörünge'nin belirli zaman aralıklarında örneklenen eklem açı değerleri daha sonra robotun hareketi gerçekleştirebilmesi için Ethernet bağlantısı aracılığıyla robottaki işlem uygulama amaçlı sunucu yazılıma gönderilmektedir.

## III. UYGULAMA

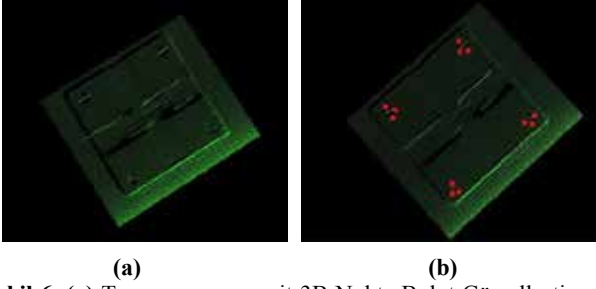
Önerilen yöntemin uygulanabilirliğini ve çalışmasını göstermek amacıyla tüm süreçlerin ortaya koyulduğu bir uygulama gerçekleştirilmiştir. Bu uygulamada, robotun CNC ile işlenmiş bir parça üzerinde bulunan 4 vida deliğine vidalama yapmasını kapsayan bir uygulama seçilmiştir. Burada, gerçek anlamda vidalama yapılmamakta, vidalama yapılmış gibi robot ucundaki kalem vida deliklerine götürülmektedir. Kullanılan parça, alüminyumdan üretilmiş ve vida delikleri içeren konkav özellikte endüstriyel bir nesnedir. Parçanın kendisi Şekil 5(a)'da gösterilmektedir.

### Veri Toplama ve Görselleştirme Aşaması

Gerçekleştirilen uygulama, ön tanımlı ve robot ucunun doğrusal bir yol izlediği hareket gerçekleştirilerek endüstriyel parçanın tek bir bakış açısından taranmasıyla başlamaktadır. Taranan endüstriyel parçadan elde edilen 3B nokta bulutu, daha sonra PCL yardımıyla, Şekil 6(a)'da görüldüğü gibi görselleştirilmektedir.



**Şekil 5.** Uygulama için kullanılan endüstriyel parça: (a) Parçanın resmi, (b) Planlama ortamına yüklenen grid model



**Şekil 6.** (a) Taranan parçaya ait 3B Nokta Bulut Görselleştirmesi, (b) Görsel üzerinden, her bir delik için üçer adet nokta seçilmesine ilişkin görüntü

#### *İşlem Noktası Seçim Aşaması*

Görselleştirme aşamasının tamamlanmasından sonra kullanıcıya, işlem noktası seçmesi için bir arayüz üzerinde taranan parçanın 3B nokta bulut modeli sunulmaktadır. Bu model üzerinde kullanıcının seçtiği noktalar kırmızı renkle işaretlenmektedir. Bu işlemlerin her biri, işlem noktası seçme modülü tarafından gerçekleştirilmektedir. Kullanıcının, her bir delik üzerinde seçtiği 3'er nokta Şekil 6(b)'de gösterilmektedir. Delik çemberi üzerinde seçilen 3 nokta kullanılarak delik merkez koordinatları hesaplanmaktadır.

#### *İşlem Uygulama Aşaması*

İşlem noktası seçim aşamasının tamamlanmasıyla birlikte işlemin uygulanması aşaması başlamaktadır. Bu uygulamada robot, hesaplanan vida delik merkezi koordinatlarına ve bu noktalarla birlikte tanımlanan geçiş noktalarına, sahip olduğu uç elemanını götürerek endüstriyel işlemi gerçekleştirmektedir.

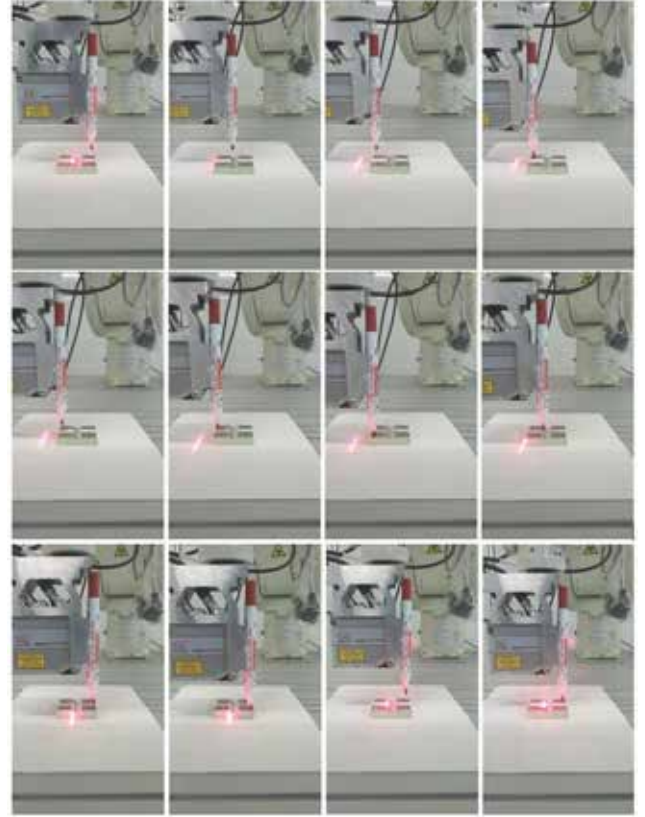
Hareket planlama sürecinde, işlem uygulanacak parçaya çarpma olmayan bir hareket planı oluşturulabilmesi gerekmektedir. Parçanın 3B nokta bulutu olarak elde edilen yüzey modeli, grid yapıya dönüştürülmekte (Şekil 5b) ve planlama algoritmasında kullanılmaktadır.

Şekil 7'de, robot tarafından gerçekleştirilen hareket videosundan alınan kareler görülmektedir.

#### IV. SONUÇLAR

Endüstriyel robotların, parçalar üzerinde endüstriyel işlemler uygulaması amacıyla programlamasını kolaylaştıracak yöntem geliştirmek hedeflenmiştir. Bu amaçla, kullanıcının işlem noktasını ekrana gelen 3B model üzerinden seçerek, programlama sürecini tamamlanması için bir yaklaşım önerilmiştir. Bu yaklaşımın gerçekleştirilmesi için, örnek bir çalışma tamamlanmıştır.

Önerilen yöntem, robot programlamada yeni bir yaklaşımı ortaya koymaktadır. Ancak, verimli bir şekilde kullanılabilmesi için aşamalarda iyileştirmelere ihtiyaç vardır.



**Şekil 7.** Endüstriyel işlemin gerçekleştirildiği süreçte sırayla alınan görüntüler

#### TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu tarafından 201315044 (2013-77) nolu proje olarak desteklenmiştir.

#### KAYNAKÇA

- [1] P. Neto, J.N. Pires and A.P. Moreira, "High-level programming and control for industrial robotics: using a hand-held accelerometer-based input device for gesture and posture recognition", *Industrial Robot-an International Journal*, 37 (2), 137-147, 2010.
- [2] J.N. Pires, T. Godinho, P. Ferreira, A. Loureiro, "Industrial robotic system programmed from CAD files - an update", *Industrial Robot-an International Journal*, 32 (4), 314-317, 2005.
- [3] Z. Pan, J. Polden, N. Larkin, S. Van Duin, J. Norrish, "Recent progress on programming methods for industrial robots", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 28 (2), 87-94, 2012.
- [4] M.H. Ang Jr, L. Wei, L.S. Yong, "An industrial application of control of dynamic behavior of robots-a walk-through programmed welding robot", *Robotics and Automation, Proceedings. ICRA'00. IEEE International Conference*, 3, 2352-2357, 2000.
- [5] S. Seçil, *Endüstriyel Robot Kolları için Kolay Programlama Yöntemi Geliştirme*, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2015.
- [6] J.J. Kuffner, S.M. LaValle, *RRT-Connect: An Efficient Approach to Single-Query Path Planning*, *IEEE Int'l Conf. on Robotics and Automation*, 2000.

# Hibrit montaj sistemleri orta yük kapasiteli robotlarda insan-robot etkileşimi

Önder K. Tokçalar, Resul İlhan, Ömer Şimşek, İsmail Durgun  
TOFAŞ Ar-Ge Merkezi, Bursa, Türkiye

onder.tokcalar@tofas.com.tr, resul.ilhan@tofas.com.tr, omer.simsek@tofas.com.tr, ismail.durgun@tofas.com.tr

**Özetçe** - Yaşam koşullarındaki iyileşmeler her geçen gün insan ömrünü uzatmakta, bu da çalışma hayatında yaşanan toplum yapısını beraberinde getirmektedir. Buna ek olarak kadın çalışan istihdamını desteklemek ve çalışma alanlarında ergonomik koşulları daha da iyileştirebilmek zorunlu hale gelmiştir. Dördüncü sanayi devrimi kapsamında geliştirilen işbirlikçi robotik sistemler (COBOT), giyilebilir teknolojiler, emek yoğun endüstriyel montaj operasyonlarında daha fazla robot kullanımını ve insanlar için katma değersiz işlemleri elimine edilmesini kolaylaştırmaktadır. AB FP7 7. Çerçeve programı ROBO-PARTNER projesi kapsamında gerçekleştirilen bu çalışmada, gelişmiş iş emniyeti ekipmanları ve yazılımlarının orta yük kapasiteli robotlara entegre edilmesiyle, otomotiv sanayii için hibrit bir montaj istasyonu tasarlanmıştır. İnsan-sistem etkileşim düzeyine göre montaj operasyonları fazlara ayrılmış ve bu alanda yeni emniyet stratejileri belirlenmiştir. Manuel robot yönlendirme sistemi olarak empedans mod kontrolü kullanılmış, insanla robotun ortak alanda çalışabilmesi için iş emniyeti uzay tarayıcı ekipmanı robotun yürünge sistemi ile ilişkilendirilmiş, artırılmış gerçeklik gözlükleriyle operatör bilgilendirilmesi yapılmış, akıllı saatler ile operatörün otomasyon sistemine komut vermesi sağlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler** - Hibrit montaj sistemleri, İnsan-robot etkileşimi, Dinamik iş emniyeti uzayı, Artırılmış gerçeklik, Giyilebilir teknolojiler

## *Human-robot interaction in hybrid assembly systems using medium payload robots*

**Abstract** - Enriched living conditions prolong human life span, which leads to employment of aging population on the shop floor. Furthermore, supporting women employment and improvement of ergonomic conditions in workspaces became obligatory. Collaborative robots (COBOT) and wearable technologies developed within the scope of 4th industrial revolution enable more usage of industrial robots and eliminating non-added value operations in the labor-intensive assembly processes. In this paper, hybrid assembly cell design, which integrates advanced safety systems onto the medium payload robots in automotive industry and is developed as a part of EU FP7 program project ROBO-PARTNER, is presented. The assembly processes are divided into phases in accordance with the human-robot interaction level and new safety strategies are defined. As manual robot guiding system, impedance mode is used. The 3D safety scanner is integrated in coordination with

*operation steps with augmented reality glasses and commands to the central automation system via smart watches.*

**Keywords** - Hybrid assembly system, Human-robot interaction, Dynamic safety zones, Augmented reality, Wearable technologies

## I. GİRİŞ

Günümüzde endüstride kullanılan robotların bir kısmı iş emniyeti kuralları nedeniyle çitler ile insan operatörlerden izole edilmiş ortamlarda bulunmakta ve sadece kendileri için tanımlanmış olan belirli görevleri yerine getirmektedirler. Bu durum atölyenin ihtiyaç duyduğu alanı artırırken istenilen esnekliği de olumsuz yönde etkilemektedir. Son yıllarda endüstriyel araştırmaların azımsanmayacak bir kısmı insan ile robotun birlikte çalışabildiği hibrit montaj sistemlerine odaklanmıştır [1, 2]. Bunun nedenleri arasında ergonomik açıdan destek ihtiyacı duyan orta yaş üstü insanların, engelli personelin ve kadınların endüstriyel ortamlarda istihdamı sayılabilir. İnsan ile robotun aynı alanda çalışmasının avantajları, düşünsel ve fiziksel olarak operatörü zorlayabilecek işlerin robota devredilmesini, katma değersiz işlemlerin elimine edilmesini, insan operatörün yalnızca yetenek gerektiren hassas işler yapmasını ve denetleyici olarak ortamda bulunmasıdır. Bu durum iş hücresinin ergonomisinde büyük iyileştirmeler sağlamaktadır. İşbirlikçi robotik sistemlerin kullanıldığı hibrit montaj sistemleri aynı zamanda endüstrinin ihtiyaç duyduğu esnekliği, tekrar konfigüre edilebilirliği ve kişiselleştirilmiş üretimi sağlamaktadır.

Bu çalışmada gelişmiş iş emniyeti ekipmanları ve yazılımlarının orta yük kapasiteli robotlara entegre edilmesiyle, otomotiv sanayiinde emniyet çitleri kullanmadan emniyetin sağlanabildiği hibrit bir montaj istasyonu tasarlanmıştır. İnsan-sistem etkileşim düzeyine göre montaj operasyonları fazlara ayrılmış ve bu alanda yeni emniyet stratejileri belirlenmiştir.

## II. HİBRİT MONTAJ HÜCRESİ KONSEPTİ

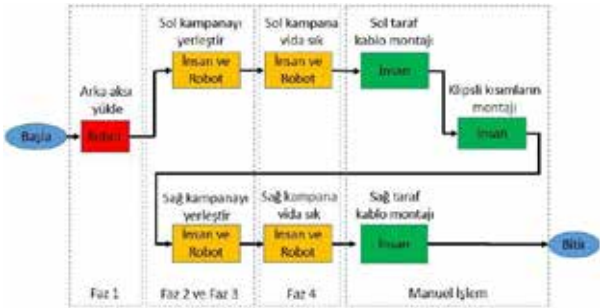
Uygulama olarak seçilen senaryoda montaj hücresinde yapılan işlem, otomotiv sektöründe aracın arka aksının montaj alanına taşınması, yerleştirilmesi ve arka tekerlek grubu ile montajının yapılmasıdır. Arka tekerlek grubu fren kampanası ve eyleyicilerde kullanılan esnek borulardan ve

kablolardan oluşmaktadır (Şekil 1). Mevcut durumda arka aksın kit alanından montaj alanına taşınması ve yerleştirilmesi işlemi operatör tarafından bir taşıyıcı ve dengeleyici (manipülator) yardımıyla yapılmaktadır. Operatör daha sonra her biri 10 kg üzeri olan fren kampanalarına monte edileceği kısma yaklaştırmaktadır. Vida sıkma aparatına gerekli vidaları yerleştirdikten sonra bir elinde kampana, diğer elinde vida sıkma aparatı ile kampananın montajını tamamlamaktadır. Farklı çaplardaki fren kampanaları, fren kampanalarının yerleşeceği uzayda hassas konumlandırma için aparat kullanımını zorlaştırmaktadır. Operatör bu adımdan sonra fren borusu ve kabloların montajını gerçekleştirmektedir. Aynı işlem aksın diğer tarafı için tekrarlanmaktadır. Aynı üretim hattından düzensiz olarak boyut ve ağırlık olarak farklı 4 çeşit aks grubunun geçmesi, çevrim süresinin 2 dakikadan az ve hücredeki parçaların ağırlığının yüksek olması fiziksel ve duşünsel ergonomik iyileştirme yapmayı zorunlu kılmaktadır.



Şekil 1: Örnek aks / kampana grubu

Yeni tasarlanan hücre konseptinde arka aksın kit alanından montaj alanına taşınması ve yerleştirilmesi tamamen robot tarafından yapılırken kampana montajı sırasında insan-robot işbirliği içinde çalışmaktadır (Şekil 2). Robot kampanayı monte edileceği alana yaklaştırdıktan sonra insan operatör eliyle robotu yönlendirerek kampanayı konumlandırdıktan sonra vida sıkma aparatı ile sıkma işlemi gerçekleştirmektedir. Yeni durumda insan operatör en fazla 1,5 kg ağırlıklı vida sıkma aparatını taşımaktadır. Robot diğer tarafa monte edilecek kampanayı getirirken insan operatör kablo ve boruların montajı yapmaktadır. Robot programlama sırasında insan operatör ses ya da kuvvet uygulayarak robotu kontrol edebilmektedir.



Şekil 2: Hibrit montaj fazları

Bu montaj hücresinde orta yük taşıma kapasitesi ve uygun erişme mesafesine sahip COMAU NJ 60 robotu kullanılmıştır.

### III. İNSAN-ROBOT İŞBİRLİĞİNDE EMNİYET

Robotlarla işbirliği operasyonları boyunca ortak ortamda çalışan insanlar, çeşitli emniyet stratejileri ile korunmalı ve emniyet stratejilerinin uygulanması da emniyet kontrolörleri ile kontrol altında olmalıdır. Operatörler gerektiği anda robot hareketlerini durdurabilmelidirler.

Kontrol sisteminin emniyet ilgili kısımlarının tasarımında EN ISO 13849-1: 2008 ve EN ISO 13849-2: 2013 standartları izlenmiştir. Emniyetli bir işbirliği sağlamak için öncelikle işbirliği modları tanımlanmıştır.

#### İnsan-robot işbirliği modları

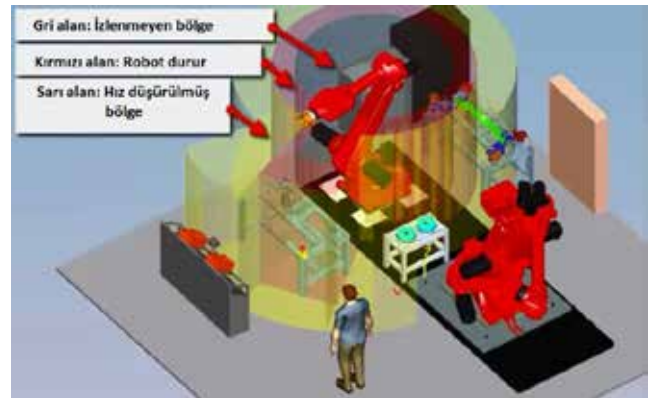
TOFAŞ senaryosunda kullanılan 3 adet işbirliği modu ISO/PDTS 15066, EN ISO 10218-1 ve EN ISO 10218-2 standartlarında tanımlanmıştır.

#### Emniyetli duruş (SOS: Safety-rated monitored stop)

Bu mod, insanla robotun belirli bir çalışma uzayında aynı anda çalışmasına izin vermez. Belirlenen uzaya insan girdiğinde robot tüm hareketlerini durdurur ya da IEC 60204-1 normuna uygun olarak robot hızını Kategori 2 düzeyinde düşürerek sıfırlar. Duruş sonrası sıfır hız durumu emniyetli bir kontrol sistemi tarafından izlenmelidir. İnsan operatör ortak çalışma alanında işini tamamlayıp ayrıldıktan sonra, robot harici bir reset butonu doğrulaması sonrası otonom çalışmaya devam edebilir.

#### Emniyetli hız ve mesafe izleme (SSM: Speed and Separation Monitoring)

Bu modda iken insan ile robot, robotun bu moddaki maksimum hızına uygun insan ve robot arasındaki mesafe bir limitin üzerinde kalması şartıyla birlikte çalışabilir. Projede, insan robot emniyetli mesafeyi izlemek için PILZ Safety eye [3] ürünü kullanılmıştır. Aradaki mesafe uyarı düzeyinin altına düşerse Şekil 3'de sarı bölge olarak gösterilen alanda robotun hızını emniyetli hız düzeyine düşürür. Robot ve insan arasındaki mesafe tehdit düzeyinin altına düşerse yani kırmızı bölgede, robot hareketine SOS moda uygun şekilde son verir. Projede, emniyet uzayları robotun birinci eksenine senkron çalışacak şekilde dinamik olarak güncellenmektedir. Güncellemeler, robotun ve üç boyutlu emniyet tarayıcı arasında emniyetli sinyallerle emniyetli haberleşme protokolleri üzerinden sağlanmaktadır.



Şekil 3: ROBO-PARTNER dinamik emniyet uzayları

Ayrıca projede robot, sanal emniyet çitleri olarak tanımlanabilecek emniyetli sanal eksen fonksiyonunu kullanarak insana zarar verecek tanımlı bir uzayda hareket etmektedir.

#### *El modu ile robot yönlendirme (Hand Guiding - HG)*

Bu mod ile operatör ve robot çok yakın bir şekilde birlikte çalışabilmektedir (Şekil 4). Buradaki önemli nokta robotun otonom hareket edememesi, bunun yerine robotun uç noktasına yada yakınına konumlandırılmış el ile kumanda ünitesi ile insanın robotu yönlendirmesidir. Robotun hızı sınırlandırılmış ve çalışma uzayı emniyetli bir şekilde tanımlanmıştır. İnsan operatör çalışma uzayına girdiğinde, robot önce SOS modda durmalı, HG modunda işlem sonrası ortak çalışma uzayını insan terk ettiğinde robot otonom hareketine devam edebilmelidir.

ROBO-PARTNER projesinde robot elle kumanda yöntemi olarak empedans mod [4] kullanılmıştır. Bu modda, insan robotun uç noktası yada yakınına konumlandırılmış bir noktaya kuvvet uygular, bu noktadaki kuvvet ve tork sensörleri bu etkiyi değerlendirerek robota hareket sağlar. Robot bu modda sanal kütle/yay/sönümleyici davranışı gösterir.



Şekil 4: Robot empedans çalışma modu

#### *Montaj fazları ve emniyet sistemleri*

TOFAŞ senaryosu için seçilen senaryoda montaj operasyonları dört faza ayrılmıştır (Şekil 2). Bunlar işlem sırasına göre:

- Faz1: Arka aks yüklemesi
- Faz2a: Sağ kampananın robot tarafından alınması
- Faz3a: Vidalama için robotun doğru pozisyona yönlendirilmesi
- Faz4a: Sağ kampananın vidalanması
- Faz2b: Sol kampananın robot tarafından alınması
- Faz3b: Vidalama için robotun doğru pozisyona yönlendirilmesi
- Faz4b: Sol kampananın vidalanması şeklinde sıralanabilir.

Her fazda kullanılan işbirliği modu, robotun birinci eksenine senkron çalışan 3B emniyet tarayıcının tara fonksiyonu, robot hız limitleri, robotun yörünge serbestisi ve elle kumanda modunda kullanılan orta konum şalteri (dead band switch) görevi tanımlanmıştır (Tablo 1).

MONTAJ FAZLARI	FAZ 1	FAZ 2	FAZ 3	FAZ 4
Robot-insan işbirliği modu	SSM	SSM	SOS+HG	SOS+HG
3B emniyet tarayıcı	Statik uzay	Dinamik uzay	Etkin değil	
Hız izleme	250 mm/saniye		20 mm/saniye	
Robot çalışma uzayı	Serbest		'Sanal' çitler ile sınırlı	
Orta konum şalteri	Etkin değil		Gripper üzerinde	Vida sıkıcı üzerinde

Tablo 1: Montaj fazları emniyet fonksiyonları

## IV. İNSAN ROBOT ETKİLEŞİM SİSTEMLERİ

### *Akıllı saat*

Akıllı saatlerin endüstriyel ortamlar dışında bir öğrenme aracı olarak [5], kalp masajı eğitimleri sırasında [6] ve kronik obstrüktif akciğer hastası kişilerin fiziksel aktivitelerini takip etmede [7] kullanılmasına yönelik çalışmalar bulunmaktadır. Kullanımının yaygınlaşmasından dolayı işlemci teknolojisini geliştirmeye yönelik çalışmaların yanında [8], üretim alanında kullanımı yaygınlaştıracak çalışmalar da [9, 10] yapılmaktadır.

Projede akıllı saat uygulaması ile operatör merkezi otomasyon sistemi ile etkileşimde bulunur ve işlem onay yada normal dışı durumlarda alternatif komutları iletir.

### *Artırılmış gerçeklik gözlükleri*

Artırılmış gerçeklik gözlükleri, kullanıcısının gerçek dünyayı görmesini engellemez ve diğer gözlüklerden farklı olarak istenilen dijital verileri gözlüğün ekranında gösterir. Bilgisayarlara erişimin zor olduğu ya da zamanın kısıtlı olduğu durumlarda 3B verilerin gözlükte istenilen şekilde görüntülenebilmesi için kullanılabilir [11]. Artırılmış gerçeklik gözlükleri tesis planlama [12], montaj işlemleri [13] ve ürün tasarımı [14] gibi endüstriyel birçok alanda kullanılabilir. Proje hibrit montaj hücrelerinde:

- Emniyet uzaylarının ve robot yörüngesinin görüntülenmesi,
- Görsel ve sesli bilgilerin alınması,
- Video, resim, görsel/yazılı uyarılar ile üretim adımlarının gösterilerek öğretilmesi,
- Üretim sırası bilgisi, hücrenin malzeme durumu gibi bilgilerin gösterilmesi amacıyla kullanılmaktadır.

### *Ses tanıma sistemleri*

Ses tanıma sistemleri, endüstri de kalite kontrol amaçlı olarak [15], android işletim sistemi ile birlikte robot kontrol sistemlerinde [16] kullanılabilirler. Ses sinyalleri endüstriyel ortamdaki gürültüden etkilendiğinden [17], ses alma sistemlerinin gürültülü ortamlardaki çalışma karakteristiği önemlidir.

Ses tanıma sisteminde kullanılmak üzere, gürültülü ortamdaki çalışma karakteristiği, USB bağlantı özelliği ve birçok işletim sisteminde çalışabilmesinden dolayı VXi Headset seçilmiştir. Proje kapsamında basit ses komutlarının verilmesi ile robotun yönlendirilmesi sağlanmıştır.

## V. SONUÇLAR

AB FP7 7. Çerçeve programı kapsamında gerçekleştirilen ROBO-PARTNER projesi için seçilen senaryoda, insan robot işbirliği için ilgili normlara uygun emniyet stratejileri uygulanmış, orta yük kapasiteli robotlarda emniyet çiti dışındaki çözümlerle insan robot işbirliği sağlanmıştır. Dördüncü sanayi devrimine yönelik bu çalışmanın, proje partnerlerinden olan Patras Üniversitesi LMS laboratuvarında denemeleri ve emniyet sertifikasyonu süreci devam etmektedir. Projenin ilerleyen sürecinde ekipmanların TOFAŞ'a sevkıyatı ve belirlenen pilot alanda uygulanması hedeflenmektedir. Projenin ergonomiye olan katkısı, uygulama senaryosunun öncesi ve sonrası karşılaştırmasıyla ISO/PDTS 15066 yarı statik etkileşimlerde ağır başlangıç seviyeleri dikkate alınarak değerlendirilecektir.

## VI. BİLGİLENDİRME

Bu çalışma AB FP7 programı kapsamında TOFAŞ Koordinatörlüğünde gerçekleştirilen ROBO-PARTNER projesi [18] kapsamında yapılmıştır.

## KAYNAKÇA

- [1] G. Michalos, S. Makris, N. Papakostas, D. Mourtzis, and G. Chryssolouris, "Automotive Assembly Technologies Review: Challenges and Outlook For A Flexible and Adaptive Approach", CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, Vol. 2, No. 2, pp. 81–91, 2010
- [2] Green S. A., Billingham M., Chen X., Chase G., Human-Robot Collaboration: A Literature Review and Augmented Reality Approach in Design", International Journal of Advanced Robotic Systems, 5(1): 1-18, 2008
- [3] <https://www.pilz.com/en-INT/eshop/00106002207042/SafetyEYE-Safe-camera-system>, son görüntüleme 10.2016
- [4] Vukobratovic M., Surdilovic D., Ekalo Y. and Katic D., "Dynamics and Robust Control of Robot-Environment Interaction", World Scientific, New Jersey, 2009
- [5] Neil Davie, Tobias Hilber, "Smartwatches As a Learning Tool: A Study of Student Attitudes", International Conference on Mobile Learning Vilamoura, Portugal, 2016

- [6] Agnes Grünerbl, Gerald Pirkl, Eloise Monger, Paul Lukowicz, "Smart-Watch Life Saver: Smart-Watch Interactive-Feedback System For Improving by Stander CPR", ISWC'15 Proceedings of the ACM International Symposium on Wearable Computers, 2015
- [7] Osamu Hataji, Tetsu Kobayashi, Esteban C Gabazza, "Smart Watch For Monitoring Physical Activity in patients With Chronic Obstructive Pulmonary Disease", Respiratory Investigation, 2016
- [8] Sanyam Mehta, Josep Torrellas, "Wear Core: A Core for Wearable Workloads", ACM International Conference on Parallel Architectures and Compilation Techniques, 2016
- [9] Gurbaksh Bhullar, "Wear" Is the Manufacturing Future: The Latest Fashion Hitting the Workplace", On the Move to Meaningful Internet Systems: OTM Workshops, pp. 49-56, 2015
- [10] Mario Aehnelt, Bodo Urban, "Follow-Me: Smartwatch Assistance on The Shop Floor", 16th International Conference on Human-Computer Interaction (HCI), At Crete, Greece, 2014
- [11] Chryssolouris G, Mavrikios D, Papakostas N, Mourtzis D, "Education in Manufacturing Technology & Science: A view on Future Challenges & Goals", Inaugural Keynote, (ICMAST) International Conference on Manufacturing Science and Technology Melaka, Malaysia, 2006
- [12] Pentenrieder K, Bade C, Doil F, Meier P, "Augmented Reality-Based Factory Planning - An Application Tailored to Industrial Needs", IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, pp.31-42, 2007
- [13] Yuan ML, Ong SK, Nee AYC, "Assembly Guidance in Augmented Reality Environments Using a Virtual Interactive Tool", Innovation in Manufacturing Systems and Technology, 2005
- [14] Sääski J, Salonen T, Hakkarainen M, Siltanen S, Woodward C, Lempiäinen J, "Integration of Design and Assembly Using Augmented Reality", Micro-Assembly Technologies and Applications - IPAS, Vol. 260, pp. 395-404, 2008
- [15] Tomasz Maniak, Chrisina Jayne, Rahat Iqbal, Faiyaz Doctor, "Automated Intelligent System For Sound Signalling Device Quality Assurance", Information Sciences, Vol. 294, pp. 600-611, 2015
- [16] Gaurav Chauhan, Prasad Chaudhari, "Robotic Control using Speech Recognition and Android", International Journal of Engineering Research and General Science, Vol. 3, Issue 1, 2015
- [17] Helga Silaghi, Ulrich Rohde, Viorica Spoial, Andrei Silaghi, Eugen Gergely, Zoltan Nagy, "Voice Command of An Industrial Robot in A Noisy Environment", Fundamentals of Electrical Engineering - ISFEE, 2014
- [18] [www.robo-partner.eu](http://www.robo-partner.eu), son görüntüleme 10 Ekim 2016

# Rota Takibi ile Tek Bacaklı Zıplama Kontrolü

Cemal Tuğrul Yılmaz, Halil İ. Baştürk

Makina Mühendisliği Bölümü

Boğaziçi Üniversitesi

İstanbul, Türkiye

Email: cemal.yilmaz, halil.basturk@boun.edu.tr

**Özetçe** —Yaylı Ters Sarkaç (YTS) modeli, canlıların koşu davranışının benzetiminde sıkça kullanılır. Bu bildiride, doğrusal eyleyici içeren YTS modelinin tek boyutlu hareketi ele alınmıştır. Modelin istenilen yüksekliğe belirlenen eyleyici limitleri içinde ulaşması için geri beslemeli bir kontrolcü önerilmiştir. Modelin yerde gevşeme fazındayken belirlenen bir rotayı takip etmesi istenmiştir. Buna ek olarak, kontrolçüde yay/sönümleyici sabitlerinin yanlış kalibrasyonu, zamanla değişimi sonucu ya da eyleyici limitleri nedeniyle oluşan hataları azaltmak için uyarlamalı kontrolcü uygulanmıştır. Bu kontrol yöntemlerinin performansları benzetim yöntemleriyle karşılaştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler**—yaylı ters sarkaç modeli, tek bacaklı robot, rota takibi, uyarlamalı kontrol.

## I. GİRİŞ

Günümüzde tekerlekli araçların aşamadığı engelleri aşmak için bacaklı sistemler ön plana çıkmaktadır. Bu sistemlerin istenilen hız ve yüksekliğe çıkarak dengeli bir şekilde hareket edebilmesi için birçok çalışma yapılmıştır. Bu konudaki çalışmalar, yaptıkları robotlarla ün kazanan Boston Dynamics'in kurucusu Raibert'in 1980'lerdeki çalışmalarıyla başlamıştır [1]. O zamandan itibaren de tek, iki ya da dört bacaklı robotlar geliştirilmiştir.

Koşan canlıların kütle merkezlerinin hareketi, yaylı ters sarkaç (YTS) modeli ile benzerlik göstermektedir [2]. Bu yüzden YTS modeli bacak hareketinin modellenmesi için yaygın şekilde kullanılmıştır. Bu modele eyleyiciler yardımıyla tork [3]–[5] ya da doğrusal hareket [6]–[10] uygulayarak aktif kontrol stratejileri geliştirilmiştir. Temel amaç istenilen gövde duruşunu, yatay hızı ve maksimum yüksekliği koşu esnasında sağlamak olmuştur.

Bu bildiride ele aldığımız bacak modeli sadece dikey zıplayan bir sistemdir. Bu sistemle ilgili literatüre baktığımız zaman gereken enerjiyi sisteme sağlamak için farklı tasarımlar ve kontrolçüler geliştirildiğini görebiliriz.

Harbick ve Sukhatme [6] tek boyutta hareket eden tek bacaklı robotun bacağına düşüş esnasında uygun bir uzunluğa getirerek yükseklik kontrolünü sağladılar. Kusano ve K. Tsutsumi [9] DC motorun dikey hareketiyle sistemde enerji değişimi sağladılar. DC motorun belirli bir yüksekliğe ulaştırılan optimum açısal hızını bulmak için takviyeli ve yapay sinir ağlarıyla öğrenmeye dayalı bir kontrol stratejisi geliştirdiler.

Michalska [7] motor yardımıyla somunu sıkıp ya da gevşetip doğrusal hareket uygulayarak sisteme enerji verdi.

Türkiye Robotbilim Konferansı, 2016

Yere basma öncesi uygulanan bazı limitler ile yerde uygulanacak geri beslemeli bir kontrolcü, sistemi istenilen limit döngüsünde tutmayı başardı. Prosser ve Kam da [8] DC motorun dikey hareketini kullandılar. Kontrol girdi voltajı, bir önceki ve bir sonraki yüksekliği içeren tahmini bir fonksiyon geliştirdiler. Fonksiyondaki parametreleri yükseklik sensöründen gelen hataya göre güncelleştirerek performansı artırdılar. Seçer ve Saranlı, doğrusal eyleyici bağlı, tek boyutta hareket eden robotun sönümlenme katsayısını sanal olarak değiştirerek sistemi kontrol ettiler [10].

Biz de bu bildiride dikey doğrultuda çalışan, doğrusal eyleyici içeren bir YTS'nin istenilen bir konum rotasını, gevşeme fazında uygulanan bir geri besleme kontrolçüsüyle takip etmesini amaçladık. Bunun yanında, yay/sönümleyici sabitlerinde sapma olması ya da eyleyicinin limitlerine dayanması sonucu oluşan hataları minimize etmek için uyarlamalı kontrolcü uyguladık.

Bu bildirinin içeriği özetle şöyledir: bölüm 2'de yaylı ters sarkaç modeli ve hareket denklemleri verilmektedir. Bölüm 3'te bu model için önerilen kontrol metotları belirtilmektedir. Daha sonra bölüm 4'te geniş bir parametre aralığında, önerilen kontrolçülerin performansları karşılaştırılmaktadır. Son olarak da bölüm 5'te elde edilen sonuçlar yorumlanmakta, gerçek hayatta uygulanabilirliği tartışılmakta ve uzun vadede yapılması planlanan işlerden bahsedilmektedir.

## II. YAYLI TERS SARKAÇ MODELİ

YTS modeli, koşan canlıların kütle merkezini noktasal bir kütle, bacakları da doğrusal bir yay olarak kabul eder. Bu çalışmada daha gerçekçi olması açısından sönümleyici de eklenmiştir. Şekil 1'de görüldüğü gibi doğrusal eyleyici yardımıyla sistem kontrol edilebilmektedir. Burada  $y$  gövdenin yerden yüksekliğini,  $g$  yerçekimini,  $k$  yay sabitini,  $d$  sönümleyici sabitini,  $m$  gövdenin kütlelerini,  $y_0$  bacağıın serbest durumdaki uzunluğunu,  $l_{de}$  doğrusal eyleyicinin çıkış şaftının gövde kütlelerine göre mesafesini ifade etmektedir.

Bir koşu döngüsü, esasında dört fazdan oluşur. Sistemin zirve noktasından yayın yere değdiği hareket alçalma fazı, yere değip dikey hızın sıfır olduğu hareket sıkışma fazı, hızın pozitif değer alıp yayın ayrılmasına kadar geçen hareket gevşeme fazı ve yerle temasının kesilip zirve yüksekliğe çıktığı hareket yükselme fazıdır.

YTS'nin sıkışma ve gevşeme fazlarını içeren yer durumundaki hareket denklemi şudur:

$$\ddot{y}(t) = -g - \frac{k}{m}(y(t) - y_0 - l_{de}) - \frac{d}{m}\dot{y} \quad (1)$$

Yerle teması kesilip uçuş durumuna geçtiği zamanki hareket denklemi

$$\ddot{y}(t) = -g \quad (2)$$

şeklinde yazılabilir. Eyleyici içermeyen pasif bir sistemde bu iki dinamik arasındaki geçiş, yerden ayrılma esnasında gövdenin yerden yüksekliğinin ( $y(t_a)$ ), yayın rahat durumdaki değere ( $y_0$ ) eşit olması durumunda gerçekleşir, ( $y(t_a) = y_0$ ). Bununla birlikte bu tip bir aktif sistemde geçiş için  $y(t_a) = y_0 + l_{de}(t_a)$  olmalıdır. Belirtilen gerçeğin aksine biz, bu çalışmada yay uzunluğunun  $y_0$ 'a varması durumunda bu geçişin olduğunu varsaydık.

### III. ÖNERİLEN KONTROL YÖNTEMİ

Herhangi bir dış etki olmadığı zaman sabit bir girdi ile simetrik zıplayışlar elde edilebilir. Fakat gerçek hayatta bu pek uygulanabilir değildir. Belirli zamanlarda belirli yüksekliğe çıkmak ya da düşmek gerekebilir. Bu bildiride istenilen yüksekliğe ulaşmak için gevşeme fazında uygulanan bir doğrusal eyleyiciyle sistemin belirli bir konum rotasını takip etmesi amaçlanmıştır. İlk olarak bir konum rotası denklemi elde edilmiş sonra sistem sabitlerinin bilindiği varsayılarak geri beslemeli bir kontrolcü geliştirilmiştir. İkinci olarak, kontrolcüdeki sistem sabitlerinin yanlış kalibre edilmesi ya da zaman içinde değişmesi durumunda oluşan hataları minimize etmek için uyarlamalı kontrolcü kullanılmıştır.

Gevşeme fazı, yayın  $y_0$  olduğu anda son bulur ve bu esnadaki istenilen hız

$$\dot{y}_a^* = \sqrt{2g(y_z^* - y_0)}$$

şeklindeki enerji korunumu denklemiyle hesaplanır. Burada  $y_z^*$  ulaşmasını istediğimiz zirve yüksekliği ifade eder. Gevşeme esnasında gövdenin yerden yüksekliğinin izleyeceği rota üçüncü dereceden bir denklem kullanarak belirlenebilir:

$$y_{rota}(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 \quad (3)$$

Bu denklemdeki katsayıları

$$y_{rota}(0) = y_b, y_{rota}(t_f) = y_0, \dot{y}_{rota}(0) = 0, \dot{y}_{rota}(t_f) = \dot{y}_a^*$$

şeklindeki rotanın ilk ( $t_0 = 0$ ) ve son anının ( $t_f$ ) konum ve hız değerleri kullanarak bulunabilir. Burada  $y_b$ , maksimum sıkışma anındaki yay uzunluğunu ifade eder.

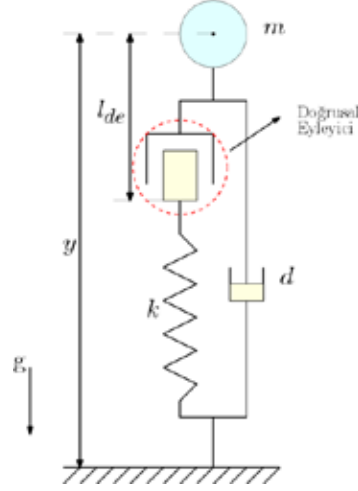
Bu katsayıları bulup (3)'te yerine koyduğumuz zaman genel rota denklemini şu şekilde elde ederiz:

$$y_{rota}(t) = y_b + \frac{y_0 - y_b - \dot{y}_a^* t_f + 2y_0 - 2y_b}{t_f^2} t^2 + \frac{\dot{y}_a^* t_f - 2y_0 + 2y_b}{t_f^3} t^3 \quad (4)$$

Burada kalkış süresi ( $t_f$ ) için

$$t_f = \frac{2(y_0 - y_b)}{\dot{y}_a^*} \quad (5)$$

denklemi kullanılmıştır.



Şekil 1: Doğrusal bir eyleyici bağlı yaylı ters sarkaç modeli (YTS)

#### A. Geri Beslemeli Kontrolcü

Elde ettiğimiz rotayı takip etmemizi sağlayan PD kontrolcü

$$l_{de}(t) = y(t) - y_0 + \frac{m}{k} \left( g + \frac{d}{m} \dot{y}(t) - c_1 e(t) + \ddot{y}_{rota}(t) \right) \quad (6)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada

$$e(t) = \dot{y}(t) - \dot{y}_{rota}(t) \quad (7)$$

ifade eder. Denklem (6), (1) içine sokulduğu zaman

$$\dot{e}(t) = \ddot{y}(t) - \ddot{y}_{rota}(t) = -c_1 e(t), c_1 > 0 \quad (8)$$

şeklinde üstel bir kararlılık elde ederiz.

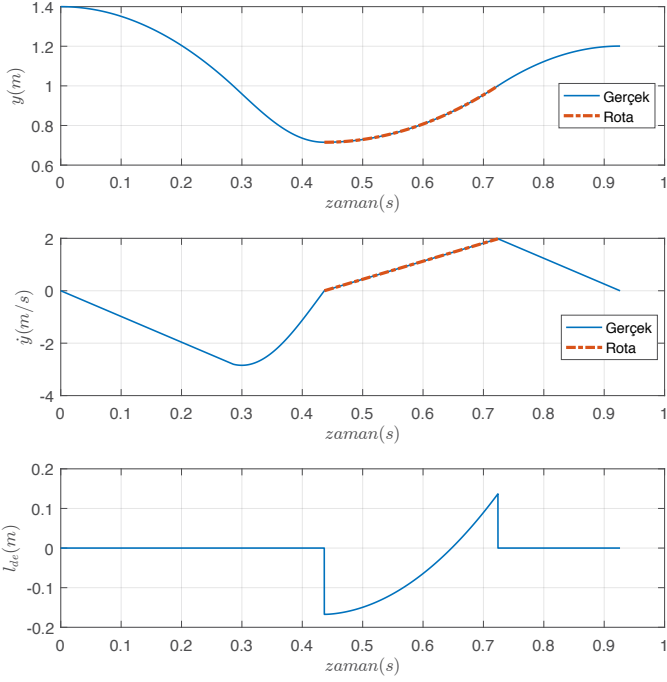
Şekil 2, 1.4 m yüksekliğinden bırakılıp 1.2 m yüksekliğe ulaşması istenen insansı bir modelin ( $y_0 = 1m, m = 70kg, k = 10kN/m$  ve  $d = 100Ns/m$ ) bu kontrolcü altındaki örnek zıplayışını göstermektedir.

#### B. Uyarlamalı Kontrolcü

Gerçeğe yakın olması açısından doğrusal eyleyiciye bazı konum ve hız kısıtlamaları uygulanmıştır. Maksimum eyleyici uzunluğu  $\pm 0.2$  m olarak belirlenirken, ( $l_{de,maks} = \pm 0.2m$ ), maksimum eyleyici hızı  $\pm 2$  m/s olarak belirlenmiştir, ( $\dot{l}_{de,maks} = \pm 2m/s$ ). Bu kısıtlamalardan ya da sistem sabitlerinin zamanla değişmesinden doğan kalıcı hataları gidermek için [11]'de önerilen uyarlamalı bir kontrolcü uygulanmıştır. Bu kontrolcü yerden ayrılma esnasındaki istenilen hızı her zıplayışta güncelleyerek maksimum yükseklik hatasını küçültmeyi amaçlar.  $n$ 'inci adımda yerden ayrılırken

$$\dot{y}_a^*(n+1) = \dot{y}_a^*(n) - \dot{y}_a(n) + \dot{y}_a^*$$

denklemi kullanılarak  $n+1$ 'inci adım için istenilen hız değeri güncellenir. Burada  $\dot{y}_a(n)$ ,  $n$ 'inci adımda yerden ayrılma esnasında ölçülen hız değerini gösterir.



Şekil 2: Düşey pozisyonu (üst), düşey hızı (orta) ve eyleyici girdisini (alt) içeren örnek bir zıplayış. Kırmızı kesikli çizilen hız ve konum rotası, gevşeme fazında kullanılır. Benzetim, insanı bir modeli ( $y_0 = 1m, m = 70kg, k = 10kN/m$  ve  $d = 100Ns/m$ ) esas almaktadır.

#### IV. BENZETİM SONUÇLARI

Bu bölümde, önerilen kontrol yöntemlerinin geniş bir aralıkta benzetimi ile elde edilen sonuçlar sunulmaktadır. Benzetim için kullanılan parametre aralık değerleri Tablo I'de verilmiştir.

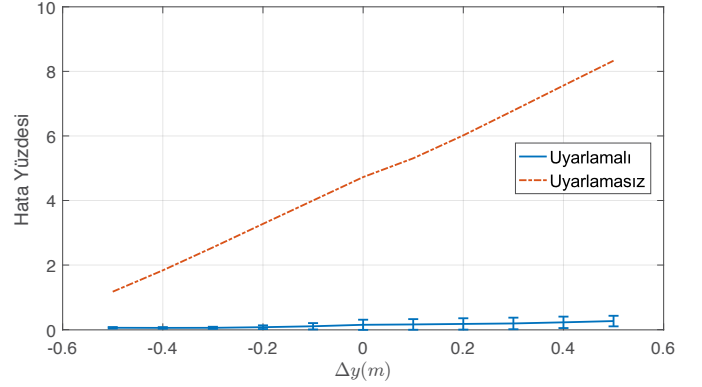
Tablo I: Benzetimde kullanılan hedef ve parametre aralıkları

$y_z^*$ (m)	$k$ (N/m)	$d$ (Ns/m)	$m$ (kg)
[1.2, 2.0]	[1000, 3000]	[5, 15]	70

Maksimum hızını  $\dot{l}_{de,maks} = \pm 2m/s$ , maksimum uzamasını  $l_{de,maks} = \pm 0.2m$  olarak belirlediğimiz eyleyici limitleri ile bu aralıklarda benzetim senaryoları oluşturduk. Senaryolarda eyleyicinin limitlerine geldiği zaman, hareket uzunluğunu ve hızını bu limitlerde tuttuğunu varsaydık. Kontrolcülerin performansını

$$\text{Hata Yüzdesi} = \frac{|y_z - y_z^*|}{y_z^*} 100$$

denklemini kullanarak değerlendirdik. Burada  $y_z$  ulaşılan zirve yüksekliğini belirtir. Şekil 3'te gösterilen ilk senaryoda, istenilen maksimum yükseklik ile havadan ilk bırakılan yükseklik arasındaki farka göre ortalama yüzde hatası grafiklerini elde ettik. Önce güncelleme olmadan geri beslemeli kontrolcü için beşinci adım esas alındı. İstenilen yükseklikte simetrik zıplayışlar için bu adım sayısı seçildi. Daha sonra yerden ayrılma esnasında istenilen hız değeri beşinci adımdan sonra güncellenerek onuncu adım için hatalar elde edildi. Geri beslemelide



Şekil 3: İstenilen yükseklik farkına göre uyarlamalı ve uyarlamasız kontrolde oluşan kararlı haldeki yüzdesel yükseklik hataları. Hatalar farklı ilk durumları, hedefleri ve parametreleri içeren geniş bir aralığın ortalamalarından oluşur. Dikey çizgiler standart sapmayı gösterir. Sapmalar büyük olduğu için uyarlamasız kontrol için çizilmemiştir.

oluşan hataların ana sebebi eyleyici limitlerinin olmasıdır. Uyarlamalı, yine bu limitler içinde çalışsa da ortalamada daha yüksek eyleyici gücü kullanarak hataları azaltabilmiştir.

Şekil 3'te, yatay çizgilerle kararlı halde elde edilen yükseklik hatalarının ortalamaları ve dikey çizgilerle standart sapmaları gösterilmiştir. Uyarlamasız kontrolde standart sapmalar büyük olduğu için görsellik adına dikey çizgileri çizilmemiştir. Uyarlamasız durumda ortaya çıkan ortalama %4.69'luk hata, uyarlamalı durumda ortalama %0.14'e indirilmiştir. Bununla birlikte, uyarlamasız durumda  $\Delta y$  arttıkça hataların da ciddi bir şekilde arttığı görülmektedir. Bunun sebebi,  $\Delta y$  küçükken eyleyici belirlenen limitler içinde hareket edebilirken  $\Delta y$  arttıkça bu limitlere dayanır.

İkinci senaryoda ise yay sabiti veya sönümleyici sabitinin zamanla değişmesi ya da kontrolcüde yanlış kalibre edilmesi durumunda oluşan ortalama hatalar esas alınmıştır. Şekil 4a ve Şekil 4b'de bu sabitlerin değişim oranına göre uyarlamalı ve uyarlamasız kontrolcülerin performansları karşılaştırılmıştır. Genelde yatay bir çizgi gösteren hataların, uyarlamalı kontrolcü ile %4.77 civarından %0.13 ve altına düşürüldüğü gözlemlenmiştir.

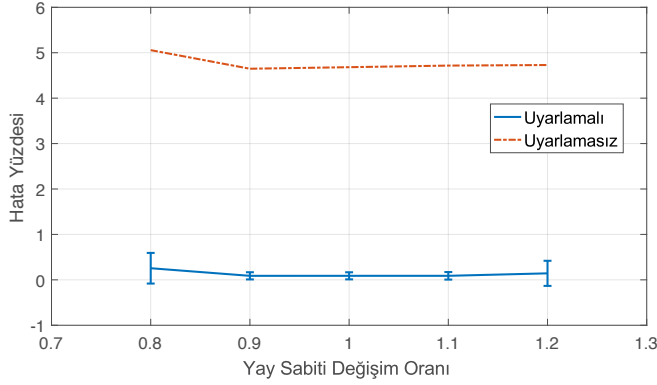
Bu senaryolarda elde ettiğimiz hata yüzdeleri ortalamaları ve standart sapmaları Tablo II'de özetlenmiştir. Burada YSDO, yay sabiti değişim oranını; SSDO, sönümleyici sabiti değişim oranını ifade eder.

Tablo II: Yüzdesel Yükseklik Hataları

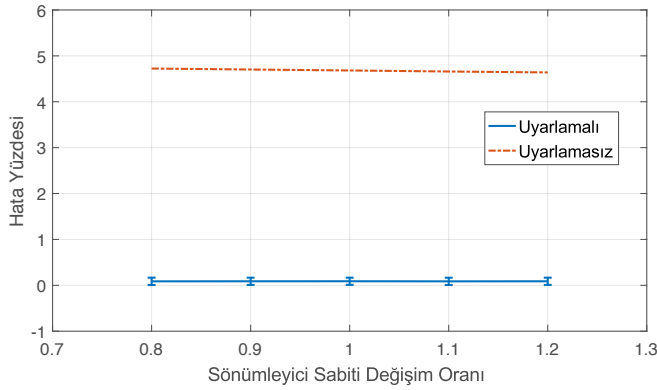
Hata Yüzdeleri:	$\Delta y$	YSDO	SSDO
Uyarlamasız	$4.69 \pm 2.56$	$4.77 \pm 3.61$	$4.68 \pm 3.45$
Uyarlamalı	$0.14 \pm 0.11$	$0.13 \pm 0.17$	$0.09 \pm 0.08$

#### V. SONUÇ

Bu bildiriye koşu davranışının modellenmesi için sıkça kullanılan yaylı ters sarkaç (YTS) modelinin, yaya seri bağlı doğrusal bir eyleyiciyle kontrolü ele alınmıştır. Tek



(a)



(b)

Şekil 4: (a) Yay Sabiti Değişim Oranına (YSDO) ve (b) Sönümleyici Sabiti Değişim Oranına (SSDO) göre uyarlamalı ve uyarlamasız kontrolde oluşan kararlı haldeki yüzdesel yükseklik hataları. Hatalar farklı ilk durumları, hedefleri ve parametreleri içeren geniş bir aralığın ortalamalarından oluşur. Dikey çizgiler standart sapmayı gösterir. Sapmalar büyük olduğu için uyarlamasız kontrol için çizilmemiştir.

boyutta hareket eden modelin, belirlenen bir yükseklik rotasını gevşeme evresindeyken geri beslemeli bir kontrolcüyle takip etmesi amaçlanmıştır. Gerçekçi olması açısından eyleyici için hız ve uzama kısıtlamaları uygulanmıştır. Bununla birlikte, önerilen bir uyarlamalı kontrolcüyle zirve yükseklik hatasının % 4.69'dan % 0.14'e indirildiği gösterilmiştir. Ayrıca, yay/sönümleyici sabitlerinde bir değişim olması ya da kontrolcünün yanlış kalibre edilmesi durumunda geri beslemeli kontrolcü %4.8'e yakın ortalama hata gösterirken, uyarlamalı kontrolcüyle bu hata %0.13 ve altına indirilmiştir.

Sunulan kontrol yönteminin en önemli dezavantajı, sadece gevşeme esnasında çalıştığı için süreklilik gösterememesidir. Maksimum sıkışma durumunda, eyleyicinin bir anda sıfır harici bir değerden başlayarak çalışmaya başlaması gerçek robotta uygulanmayı zorlaştırmaktadır. Bu problemi çözmek için sıkışma ve gevşeme evresini içeren yay uzunluğu rotası ile süreklilik gösteren bir kontrolcü geliştirilebilir. Bir diğer dezavantaj ise yayın yerden ayrılma durumundaki uzunluğunun sabit olarak kabul edilmesidir. Normalde bu uzunluk, serbest yay ve eyleyici uzunluğundan oluşur. Bunun gerçekte uygulanması karmaşık mekanizmalar gerektirebilir. Bunun için bu

problemi açacak tasarımların yapılması, önerilen kontrolcülerin iki boyutta hareket eden bir modele uygulanması ve bir robot platformunda test edilmesi uzun vadede düşünülmektedir.

#### KAYNAKÇA

- [1] M. H. Raibert, *Legged Robots That Balance*. MIT Press, 1986.
- [2] R. Blickhan, "The spring-mass model for running and hopping," *Journal of Biomechanics*, vol. 22, pp. 1217–1227, 1989.
- [3] U. Saranlı, M. Buehler, and D. E. Koditschek, "RHex: A simple and highly mobile robot," *International Journal of Robotics Research*, vol. 20, no. 7, pp. 616–631, 2001.
- [4] N. Cherouvim and E. Papadopoulos, "Control of hopping speed and height over unknown rough terrain using a single actuator," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Kobe, Japan, 2009.
- [5] I. Poulakakis, J. A. Smith, and M. Buehler, "Modeling and experiments of untethered quadrupedal running with a bounding gait: The Scout II robot," *International Journal of Robotics Research* 24, 239–256, 2005.
- [6] K. Harbick and G. Sukhatme, "Height control for a one-legged hopping robot using a one-dimensional model," Technical Report IRIS-01-406, Institute for Robotics and Intelligent Systems, USC, 2001.
- [7] H. Michalska, M. Ahmadi and M. Buehler, "Vertical motion control of a hopping robot," *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Minneapolis, USA, pp. 2712–2717, 1996.
- [8] J. Prosser and M. Kam, "Control of hopping height for a one-legged hopping machine," *Mobile Robot. VII*, vol. 1831, pp. 604–612, 1992.
- [9] Y. Kusano and K. Tsutsumi, "Hopping height control of an active suspension type leg module based on reinforcement learning and a neural network," *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2672–2677, 2002.
- [10] G. Secer and U. Saranlı, "Control of hopping through active virtual tuning of leg damping for serially actuated legged robots," in *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 4556–4561, 2014.
- [11] G. Piovan and K. Byl, "Two-element control for the active slip model," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 5656–5662, 2013.

# Bağlamın Hiyerarşik Doğası

Fethiye Irmak Doğan, Sinan Kalkan

Bilgisayar Mühendisliği Bölümü

Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Ankara, Türkiye

Email: {irmak.dogan,skalkan}@metu.edu.tr

**Özetçe** —Bağlam, insan bilişi için oldukça elzemdir ve du-  
ruş, davranış, konuşma biçimi gibi gündelik insan hayatı için  
önemli pek çok sürece etki etmektedir. Yakın zamanda hay-  
atımızda yer edinmesini beklediğimiz robotların da işlevlerini  
yerine doğru ve verimli bir biçimde getirebilmesi için, bağlamı  
algılama ve kullanma yeteneğine sahip olması beklenmektedir.  
Ancak bağlam, yapay veya doğal biliş için ne kadar elzem  
olsa da, bağlamın yapısı yeterince çalışılmış ve çözümlenebilmiş  
değildir. Bu çalışmada, bağlamın çözümlenememiş öğelerinden  
bir tanesine, bağlamın yapısının hiyerarşik olup olmadığına  
odaklanılmaktadır. Yaptığımız irdelemeye göre, bağlama ait  
muhtelif sosyal, uzamsal ve zamansal özellikler ve olgular,  
bağlamın hiyerarşik bir yapıya sahip olduğunu önermektedir. Bu  
konudaki sinirbilim, psikoloji bulguları ve bilişimsel modelleme  
çalışmaları irdelenmiş, bağlamı hiyerarşik yapan özelliklere yer  
verilmiş, bağlamı modellerken dikkat edilmesi gereken noktalara  
değinilmiş ve elde edilen vargılar sunulmuştur.

**Anahtar Kelimeler**—Bağlam, Bağlam Hiyerarşisi, Bilişsel  
Robotbilim

## I. GİRİŞ

Bağlam, insan bilişi için çok önemlidir ve insanların algı,  
tanıma, mantık yürütme, problem çözme gibi bilişsel süreç-  
lerini ve buna ek olarak, davranışlarını, konuşma biçimlerini  
vb. etkilemektedir [1], [2]. Bağlamın etkilerini gündelik insan  
hayatındaki en karmaşık olaydan en basit olaya kadar gö-  
zlemlemek mümkündür. Bizim gibi benzer bilişsel yeteneklere  
sahip olmasını beklediğimiz robotlar için de bağlamı algılaya-  
bilmek, öğrenebilmek ve kullanabilmek muhakkak önemlidir.  
Bağlam, insan bilişi ve yapay biliş için bu kadar elzem olsa da,  
bağlamın yapısı henüz çözümlenebilmiş değildir ve bağlamın  
yapısına dair elde edilecek sonuçlar birçok alandaki bilimsel  
çalışmalarda ön açıcı olacaktır.

Bağlamın yapısıyla ilgili vargılar elde edebilmek için,  
bağlamın özelliklerini incelemek gereklidir. Zimmermann'ın  
bağlamı tanımladığı makalesinde, bağlamın süregelen tanım-  
larında sosyal, uzamsal ve zamansal özelliklerine yer verildiği  
görülmüştür [3]. Sosyal özellikler ortamın bir arkadaşı ya da aile  
ortamı olması gibi özellikleri içerirken, uzamsal özellikler  
bağlamın kapalı ya da açık bir mekanla ilişkili olmasını ve  
zamansal özellikler de bağlamın sabah, öğle ya da akşam  
bağlamına ait olmasını içermektedir.

Sosyal, uzamsal ve zamansal özellikleri detaylı in-  
celediğimizde, bu özelliklerden dolayı bağlamın birbir-  
lerini içeren ya da birbirleriyle ilintili olduğu, hatta bağlamın  
hiyerarşik bir yapıda olması gerektiği sonucuna varılabilir.  
Örneğin “kahvaltı hazırlama” bağlamı, sosyal anlamda “aile”  
bağlamını, uzamsal anlamda “mutfak” bağlamını ve zamansal

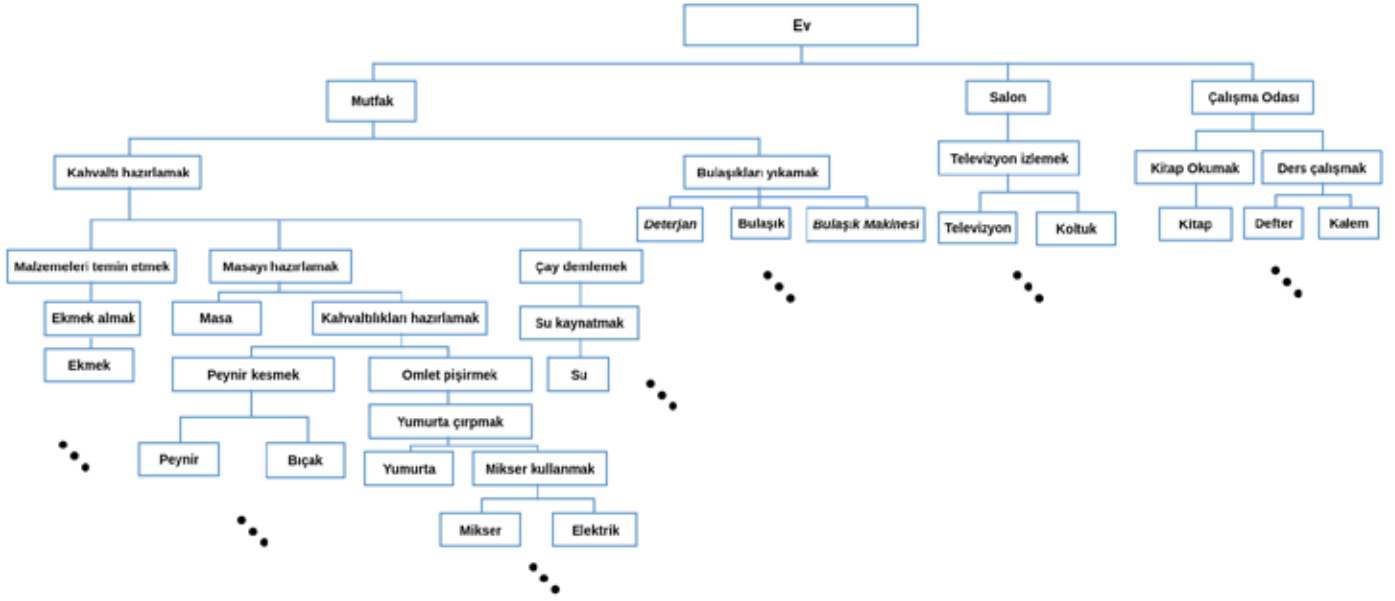
anlamda “sabah” bağlamını içerebilir ve bağlamların birbirini  
içermesi nedeniyle hiyerarşik bir yapı oluşturur – ev bağlamına  
ait örnek bir hiyerarşi için bkz. Şekil 1.

Bağlamın yapay zeka alanında kullanımı üzerine öncüler-  
den bir tanesi, McCarthy'dir. McCarthy, bağlamı formalize  
etmeye çalıştığı makalesinde bağlama ait aşağıdaki önemli  
özelliklere yer vermiştir [4]: (i) Bağlamlar, formal nesnelere  
dendir. (ii) Bağlamlar, tam olarak tanımlanabilirler. (iii) Bağlamlar ve  
bağlamsal fonksiyonlar arasında kullanışlı bağlantılar vardır  
ve bir bağlamdan çeşitli değişikliklerle (yeri, zamanı ya da  
durumu farklılaştırmak gibi) yeni bir bağlam elde edilebilir.

McCarthy'nin bağlam yapısından yola çıkarak, bağlam-  
ların dinamik olarak değişebildiği, bağlamlara diğer bağlamlar  
tarafından ulaşılabildiği, bir bağlamın öteki bağlamın sınır-  
larının içine girebildiği, bağlamın bu karmaşık yapısıyla baş-  
lamak için ilişkisel yapılar kullanmak gerektiği, ve bu yapıların  
bağlamın çeşitli ilişkilerini ve bağlamın dinamik yönünü  
desteklemesi gerektiği söylenebilir [5]. 20 yıldan daha uzun  
bir süre önce McCarthy tarafından yapılmış olan böylesi bir  
tanım da, aslında, bize bağlamlar arası ilişkilerin varlığını ve  
bağlamların birbirlerini içerdiğini, yani bağlamın hiyerarşik bir  
yapısının olduğunu vurgulamaktadır.

Barsalou, bağlam üzerine çalışmış diğer önemli bir isimdir  
ve Yeh ile birlikte yaptığı çalışmasında bağlamın insan bil-  
işine olan etkisine değinmiştir [1]. Bağlamın biliş üzerine  
etkisini olaysal bellek, nesne algısı ve dili kavrama gibi  
bilişsel süreçler üzerinden örnekleyerek açıklamıştır. Ayrıca  
kavramsal süreçlerin durumların tane büyüklüğünden (grain  
size) etkilendiğini söylemiş ve bir durumun uzun bir zamanda  
geniş bir alan kaplamasının da kısa bir zamanda ufak bir alan  
kaplamasının da mümkün olduğunu belirtmiştir. Durumların  
hiyerarşik olarak birleşmiş gruplarının bağlamı oluşturduğunu  
söylemiş ve bunun bağlama hiyerarşik bir yapı kattığına işaret  
etmiştir.

Bu bildiri, bağlamın hiyerarşik bir yapıya sahip olduğunu  
belirtir sinirbilimden, psikolojiden ve bilişimsel modellemel-  
erden elde edilen bulguları ve önermeleri incelemekte, ve  
bu bilgiler doğrultusunda, robotlarda bağlamı modellemeyi  
hedefleyen çalışmalar için bağlamın hiyerarşik olması gerekti-  
ğini önermektedir. Bağlamın hiyerarşik yapıda olması önemli  
olsa da, bu bilişsel bilimlerde hiç açık bir şekilde irdelen-  
memiştir; bu açıdan, bu çalışma önemli bir katkı sağlamaktadır.  
Ayrıca, bilgisayarlı görü çalışmalarında bağlam hiyerarşik bir  
biçimde modellenmeye başlamış olsa da, bu çalışmalar pek  
çok eksik barındırmaktadır. Bu kısıtlamalara rağmen bağlam  
hiyerarşisinin sağladığı katkılardan esinlenerek, robotbilim  
çalışmalarında bağlam hesaba katılacağı zaman, hiyerarşik  
bir yapıda modellenmesi gerektiği önerilmektedir. Bağlamın



Şekil 1: Varsayımsal bir ev bağlamı hiyerarşisi.  
(Yer sınırı nedeniyle hiyerarşinin belli kısımları gösterilmiştir.)

hiyerarşik modellenmemesi, bütün özelliklerinin ifade edilememesine, alınan sonuçların yetersiz kalmasına neden olabilir. **Bu çalışma özgün bildiri olmayıp, çalışmanın İngilizce hali CONTEXT-17 konferansına değerlendirilmek üzere gönderilmiştir.**

## II. BAĞLAMIN HİYERARŞİK YAPIDA OLDUĞUNU GÖSTERİR BULGULAR

Bu bölüm altında, bağlamın hiyerarşik bir yapıda olduğunu destekleyen veya öneren farklı disiplinlerden elde edilmiş bulgular sunulmaktadır.

### A. Sinirbilimden Bulgular

Hipokampus, beyinin hafızada önemli görevleri olan kısım ve bağlamın sinirsel gösterimini yarattığı bilinmektedir [6]. Ruddy, makalesinde bir çok araştırmacı tarafından hipokampal formasyonun davranışlardaki bağlam etkisinde çok büyük bir rol oynadığının kabul edildiğini yazmıştır [7]. Bununla ilintili olarak, Lila Davachi ise hipokampal sistemin kademelerinin daha sonra oluşan ilişkisel hafıza ile bağlantılı olduğunu söylemiş ve hipokampusun geniş alanlı bağlantısal işlemleri desteklediğini belirtmiştir [8]. Ayrıca, burnu saran (perirhinal) ve arka (posterior) parahipokampal mekanizmanın daha özel alanlı öğelere ve uzamsal bağlam kodlarına katkı sunduğunu eklemiştir.

Bağlam için önemli bir role sahip olan hipokampusun formasyonunun, hiyerarşik bir yapıya sahip olduğu düşünülmektedir: Örneğin, McKenzie vd., son buluşların hipokampal sinir sisteminin alakalı hafıza kısımlarını bağlayan hiyerarşik bir yapıya sahip olduğunu gösterdiğini önermiştir [9].

Hipokampusun bağlam oluşumunda temel görevleri üstleniyor olması, bağlamsal kodlamalara sunduğu katkı ve

kendi içerisindeki kademeli hiyerarşik çalışma yapısı bağlamın da hiyerarşik bir yapıya sahip olduğunu önermektedir.

### B. Psikolojiden Bulgular

Malesef psikoloji biliminde bağlamı hiyerarşik olarak modellemiş çalışmalara rastlamak mümkün olmamıştır. Psikoloji biliminin pek çok alanda hiyerarşik yapılar kullanırken henüz bağlamın modellenmesinde bu hiyerarşik yapılara yer vermemiş olması mevcut çalışmaların önemli bir eksikliğidir. Bağlamın hiyerarşik yapısı üzerine direkt olmasa da, dolaylı destek, Saaty'nin karar verme süreçlerinin hiyerarşik yapıda olduğunu gösterdiği çalışmasından gelmektedir [10]. Hiyerarşik bir yapının birden fazla faktöre bağlı kararların alınmasında iyi bir yaklaşım olması, birden fazla etmen içeren bağlamın modellenmesinde de iyi sonuçlara ulaşılabileceğini desteklemektedir.

### C. Bilişimsel Modelleme Çalışmaları

Bağlamı hiyerarşik bir yapıya kavuşturmaya çalışmış pek çok teşebbüs bulunmaktadır. Örneğin, Sun vd., zaman-mekansal (spatio-temporal) bağlamı videolarda hareket tanıma problemi için hiyerarşik bir şekilde modellemiştir ve 3 seviyeli, kendi tanımladıkları ve tasarladıkları bir bağlam yapısı kullanmıştır [11]. Bu seviyeler, nokta seviyesinde (point-level) bağlam, yörünge içi (intra-trajectory) bağlam (trajectory transition descriptor) ve yörüngeler arası (inter-trajectory) bağlam (trajectory proximity descriptor) şeklindedir. Bir başka çalışmada Wang ve Ji, güvenlik kameralarında olay tanıma için hiyerarşik bir bağlam yapısı kurmuştur [12], [13]. O da 3 seviyeli bir hiyerarşi benimsemiştir ve daha önceki çalışmaların genelde bağlamı tek bir seviyeden çıkarmaya çalıştığını, aynı zamanlı farklı seviyelerden farklı bağlamlar çıkarmaya çalışan çok çalışma olmadığını vurgulamıştır. Çalışmasında öznelik (feature) seviyesindeki bağlam, anlamsal (semantic) seviyedeki

bağlam ve önsel (prior) seviyedeki bağlamı eş zamanlı olarak çıkarıp birleştirmeyi ve güvenlik kameralarındaki olayları doğru bir şekilde tespit etmeyi amaçladıklarını söylemiştir. Bu çalışmalarda hiyerarşi, Şekil 1'de gösterildiği gibi anlamsal bir hiyerarşi değil, tasarlanmış, statik bir yapıda hiyerarşidir. Ayrıca, sadece belirli modalitelerde bağlam düşünülmüştür ve bu nedenle, bu çalışmaların kapsamı dar kalmıştır.

İlgi çekici bir diğer çalışmada ise, Choi vd., içerisinde çok fazla nesne kategorisi içeren bir veri kümesinde hiyerarşik bir bağlam çıkarmaya çalışmış, nesnelerin birlikte bulunma ve uzamsal ilişkilerine göre grafiksel bir ağaç yapısı modellenmiştir [14]. Bu ağaç yapısıyla nesne kategorileri arasındaki bağımlılıklar ortaya çıkarılmıştır. Ayrıca, öğrenilen bu ağaç yapısı nesnelere ve görüntüler arasında kendi doğalarında bulunan hiyerarşiyi ortaya koymuştur. Bu model nesnelere arası bağlam ilişkisini hiyerarşik bir şekilde ortaya koymuş, nesne ve sahne tanıma problemlerinin çözümünde önemli ilerlemeler yaratmıştır. Bu çalışmada nesnelere arasında anlamsal olarak modellenmiş bir hiyerarşi yaratılmış olsa da, sadece nesnelere arası bağlamsal ilişkilere yer verilmiş ve genel bir bağlam hiyerarşisi ortaya konmamıştır. Bu sebeple genel anlamsal bir bağlam hiyerarşisi modellenememiştir. Ayrıca nesnelere birlikte bulunma ve uzamsal özelliklerinin ön model olarak kullanılması bağlamın dinamik olması özelliğiyle tam olarak örtüşmemektedir.

Benzer bir çalışma Marszalek vd. tarafından yapılmıştır [15]. Bu çalışmada anlamsal hiyerarşik bir sınıflandırıcı oluşturulmuş ve bu sınıflandırıcı nesne tanıma problemlerinde kullanılmıştır. Bu model sınıflar arası benzerlik ve ilişkileri modellemeyi ve nesne sınıfları içindeki karmaşıklığı azaltmayı amaçlamıştır. Fakat bu çalışmada anlamsal hiyerarşik sınıflandırıcılardan bağlama gidilecek bütün özellikler düşünülmemiş, oluşturulan hiyerarşik bağlam hiyerarşisine genişletilmeyip, nesne tanımlanmasındaki anlamsal hiyerarşi ile sınırlı kalmıştır.

Başka bir çalışmada ise Li vd., cinsiyet, giyim şekli gibi insan özelliklerinin tanınmasına odaklanmış ve bunun için derin hiyerarşik bir bağlam yapısı kullanmıştır [16]. Bu derin hiyerarşik bağlam, insan bağlamı ve arka plandaki sahne bağlamını içermektedir. Bu bağlamı oluşturmak için Katmanlı Sinir Ağları (Convolutional Neural Networks) modeli kullanılmıştır. Bir başka deyişle derin katmanlı sinir ağları tarafından sadece insan vücudu ve özelliklerine özgül skorlar öğrenilmemiş, aynı zamanda derin hiyerarşik bağlamı oluşturan skor fonksiyonları da öğrenilmiştir. Özellikle insan ve sahne modellerinin skorlamasındaki işbirliği, insana ve sahneye bağlı bağlamların oluşturulmasında görev yapmıştır. İnsan ve sahne bağlamlarının birleşimi hiyerarşik bir bağlam yapısı oluşturmuştur. Bu çalışmada da genel bir bağlam yapısı ortaya konamamış, insan özelliklerine odaklanmış bağlamsal ilişkilere yer verilmiştir. Bu sebeple bu çalışma da genel bir hiyerarşik bağlam yapısı oluşturmada yetersiz kalmıştır. Ayrıca bu çalışma da hiyerarşiyi anlamsal olarak değil insan merkezli bağlam ve sahne merkezli bağlamların birleşimi olarak gösterip Şekil 1'deki anlamsal hiyerarşinin modellenmesinde eksik kalmıştır.

Bağlamın robotlarda kullanılmasının, bilişsel çalışmalarda özellikle algı ve planlamada performansı artırması yeni bir yaklaşım değildir ve bu düşünceyle robotlarda da bağlamı modelleyen ve kullanan çalışmalar yapılmıştır [17], [18], [19].

Ancak bu çalışmalar bağlamı genellikle hiyerarşik modellememiştir. Robotlarda hiyerarşik yapılar kullanarak öğrenme üzerine odaklanmış çalışmalarda (örn. [20], [21]) mekansal veya uzamsal hiyerarşik gösterimler önerilmiştir, ancak genel bir bağlam hiyerarşisi ortaya koyulmamıştır.

### III. VARGI: BAĞLAM HİYERARŞİKTİR

Bağlamın hiyerarşik yapısına dair sinirbilimden ve psikolojiden bulgulara bir önceki kısımda yer verilmiş, ayrıca bu konudaki bilişimsel modellerle çalışmaları gösterilmiştir. Bu çalışmalar, bağlamı tam anlamıyla hiyerarşik modellemekte her ne kadar yetersiz kalmış olsalar da bağlamın hiyerarşik bir yapıya sahip olduğuna dair önemli vargılar içermektedir.

Doğa, toplum, ve pek çok olgu kendi içinde seviyeli yani hiyerarşik bir yapıya sahiptir. Beynin hipokampal sisteminin hiyerarşik bir çalışma yapısına sahip oluşu [9] insan vücudunun hiyerarşik bir çalışma yapısı izlediğine; karar vermenin hiyerarşik bir yapıyla ifadesi [10] psikolojinin çalışma alanındaki konuların hiyerarşik doğaya sahip olduğuna sadece birer örnektir. Hiyerarşi, pek çok alanda çalışılmaktadır. Örneğin, Lane, hiyerarşi üzerine yaptığı çalışmasında toplum, kültür, ekonomi gibi unsurları birleştiren insana ait toplumsal hiyerarşilerin, fiziko-kimyasal (temel parçasık, çekirdek, atom, molekül arasındaki hiyerarşi gibi) ve biyolojik (organel, hücre, organ, çokhücreliler, popülasyon, tür, ekosistem arasındaki hiyerarşi gibi) hiyerarşilerden daha muğlak bir yapı içerdiğini söylemiştir [22]. Hiyerarşi bu denli geniş temas alanlarına sahipken, bu alanlardaki sosyal, uzamsal ve zamansal ilişkilere tekabül eden bağlamın da hiyerarşik bir yapı göstermesi olağan bir durumdur.

Bağlamın uzamsal, zamansal ve sosyal özellikler göstermesi [3], [4] ve bu özelliklerin hiyerarşik birleşimlerinin bağlamı oluşturması bağlamı kaçınılmaz olarak hiyerarşik yapmıştır.

Bağlam hiyerarşisinin videolarda hareket tanıma, nesnelere kategorilere ayırma ve insan özelliklerini çıkartma gibi pek çok farklı alanda kullanılıyor olduğu önceki kısımda gösterilmiştir. Bağlamın hiyerarşik modellenmesinden farklı alanlarda başarılı sonuçlar elde edebiliyor olması bağlamın hiyerarşik bir yapıya sahip olduğunu desteklemektedir. Bağlamı süregelen çalışmalarda genellikle tek bir seviyeden çıkarılmaya çalışılmıştır ve hiyerarşik modellenmemiştir. Bağlamı hiyerarşik modelleyen çalışmalar, bağlam çalışmalarının tek bir seviye içermesini eleştirmekte ve bağlamı birden fazla seviyeden çıkarıp birleştirmenin daha iyi bir yaklaşım olduğu savunmaktadır [12]. Bu savunu bağlamı hiyerarşik modellemenin daha doğru bir yaklaşım olduğuna işaret etmektedir.

### IV. ROBOTLARDA BAĞLAMIN HİYERARŞİK MODELLENMESİNE DOĞRU

Bağlamın hiyerarşik olarak modellenmesi için çözülmesi gereken hususlar aşağıda listelenmiştir:

**Gösterim:** McCarthy bağlamları formal, tam olarak tanımlanabilen nesnelere olarak nitelendirmiştir [4]. Bundan hareketle, bağlam modellemesinde karşılaşılabilecek ilk sorun, bağlamın doğru bir şekilde gösterilmesidir. Mevcut çalışmalar bağlamı formal bir şekilde gösterip tüm özelliklerini yansıtmak bir tanım yapmakta yetersiz kalmıştır.

## KAYNAKÇA

**Öğrenme:** Yine McCarthy'nin tanımından hareketle bağlamlar birbirleriyle ilişkisel yapılar içermektedir [4] ve bağlamı hiyerarşik modellemek için bağlamlar arası bu ilişkisel yapıların öğrenilmesi bağlamın kapsayıcı bir gösteriminin yapılmasının ardından baş edilmesi gereken başka bir problemdir. Bu konuda varolan çalışmalarda kullanılan yapılar incelendiğinde, derin öğrenme içeren yapıların doğaları gereği buldukları çok katmanlı yapı, hiyerarşik bağlamı daha iyi modelleyecek gibi görünmektedir. Aynı hiyerarşik bağlam yapısını modelleyen çalışmalardan derin modelleme kullanan çalışma daha başarılı sonuçlar vermiştir [13]. Ayrıca kurulan yapının öğrenilmesinde bağlamı öğrenmesi planlanan sistem de önemlidir. Örneğin hiyerarşik bağlam yapısını robotların öğreneceği düşünülürse arttırımlı öğrenme sisteminin kullanılması, yeni bir örnek geldiğinde öğrenmenin devam etmesi, öğrenilen bilgilerin yeni örneklerle göre ayarlanması ve öğrenme sürecinde yeterince örnek olmadığını kabul etmesi gibi özellikleriyle [23] robotbilimdeki veri yetersizliği soruna cevap verip hiyerarşik yapının öğrenilmesine uygun olacaktır.

**Bağlamın Kullanımı:** Oluşturulan hiyerarşik bağlam yapısının kullanımında hiyerarşinin hangi seviyesinin kullanılacağı doğru bir model için önem taşımaktadır. Bir bağlam farklı seviyelerde farklı bağlamlarla ilişkili olabilir ve her bağlamı amaca göre doğru seviyedeki doğru bağlamlarla ilişkilendirmek gereklidir.

## V. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada bağlamın hiyerarşik bir yapıya sahip olduğunu düşündüren bulgulara yer verilmiş, bağlamın hiyerarşik özellikleri belirtilmiş ve bağlamın hiyerarşik olarak robotlarda kullanımı yolundaki problemlerden bahsedilmiştir.

Bağlamların modellenmesine ilişkin önceki çalışmalar incelendiğinde çalışmaların genellikle bağlamı tek bir seviyeden çıkaran hiyerarşik olmayan yapılar olduğu gözlemlenebilir. Fakat bağlamın yapısı, sinirbilimsel ve psikolojik bulgular ve mevcut modellerin incelenmesinden elde edilen vargılar göz önünde bulundurulduğunda bağlamın hiyerarşik olarak modellenmesinin daha doğru olacağı söylenebilir.

Bağlamı hiyerarşik olarak incelemiş olan az sayıdaki çalışmada ise bağlamın probleme özel oluşu sorunu vardır. Bu çalışmalar genel bir hiyerarşik bağlam yapısı oluşturmakta eksik kalmışlar, kurulan modeller başka bağlamlar için de genişletilebilir özellikler göstermemektedir.

Bundan sonraki çalışmalarımızda bağlamın hiyerarşik modellenmesine doğru kısmında tariflendiği üzere bağlamın olabilecek en kapsayıcı tanımını yapıp, hiyerarşik bir modelini kurmak, derin öğrenmenin kendi içindeki seviyeli yapısından faydalanarak arttırımlı bir yapıyla bağlamın tüm seviyelerde ilişkilendiği bağlamları belirlemek gerekli olacaktır. Ayrıca kurulan hiyerarşik bağlam yapısının tüm bağlamlar için kullanılabilir genel bir model olması ve bağlamın dinamik yapısının bu modele yansıtılması gerekecektir. Tariflediğimiz bu hiyerarşik bağlam modelinin robotların bağlamları öğrenmesine uygun bir yapı olacağı düşünülmektedir.

## VI. TEŞEKKÜR

Bu çalışma, TÜBİTAK tarafından desteklenen 215E133 numaralı "Robotlarda Bağlam" projesi kapsamında yapılmıştır.

- [1] W. Yeh and L. W. Barsalou, "The situated nature of concepts," *The American journal of psychology*, pp. 349–384, 2006.
- [2] J. C. Turner, P. J. Oakes, S. A. Haslam, and C. McGarty, "Self and collective: Cognition and social context," *Personality and social psychology bulletin*, vol. 20, pp. 454–454, 1994.
- [3] A. Zimmermann, A. Lorenz, and R. Oppermann, "An operational definition of context," in *International and Interdisciplinary Conference on Modeling and Using Context*. Springer, 2007, pp. 558–571.
- [4] J. McCarthy, "Notes on formalizing context," *International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pp. 555–560, 1993.
- [5] S. Klarman and V. Gutiérrez-Basulto, "Description logics of context," *Journal of Logic and Computation*, 2013.
- [6] D. M. Smith and S. J. Mizumori, "Hippocampal place cells, context, and episodic memory," *Hippocampus*, vol. 16, no. 9, pp. 716–729, 2006.
- [7] J. W. Rudy, "Context representations, context functions, and the parahippocampal-hippocampal system," *Learning & memory*, vol. 16, no. 10, pp. 573–585, 2009.
- [8] L. Davachi, "Item, context and relational episodic encoding in humans," *Current opinion in neurobiology*, vol. 16, no. 6, pp. 693–700, 2006.
- [9] S. McKenzie, A. J. Frank, N. R. Kinsky, B. Porter, P. D. Rivière, and H. Eichenbaum, "Hippocampal representation of related and opposing memories develop within distinct, hierarchically organized neural schemas," *Neuron*, vol. 83, no. 1, pp. 202–215, 2014.
- [10] T. L. Saaty, "How to make a decision: the analytic hierarchy process," *European journal of operational research*, vol. 48, no. 1, pp. 9–26, 1990.
- [11] J. Sun, X. Wu, S. Yan, L.-F. Cheong, T.-S. Chua, and J. Li, "Hierarchical spatio-temporal context modeling for action recognition," in *CVPR*, 2009.
- [12] X. Wang and Q. Ji, "A hierarchical context model for event recognition in surveillance video," in *CVPR*, 2014.
- [13] —, "Video event recognition with deep hierarchical context model," in *CVPR*, 2015.
- [14] M. J. Choi, J. J. Lim, A. Torralba, and A. S. Willsky, "Exploiting hierarchical context on a large database of object categories," in *CVPR*, 2010.
- [15] M. Marszalek and C. Schmid, "Semantic hierarchies for visual object recognition," in *CVPR*, 2007.
- [16] Y. Li, C. Huang, C. C. Loy, and X. Tang, "Human attribute recognition by deep hierarchical contexts," in *ECCV*, 2016.
- [17] H. Celikkanat, G. Orhan, N. Pugeault, F. Guerin, E. Şahin, and S. Kalkan, "Learning context on a humanoid robot using incremental latent dirichlet allocation," *IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems*, vol. 8, no. 1, pp. 42–59, 2016.
- [18] Y. Jiang, H. Koppula, and A. Saxena, "Modeling 3d environments through hidden human context," *Tech Report*, 2015.
- [19] A. Anand, H. S. Koppula, T. Joachims, and A. Saxena, "Contextually guided semantic labeling and search for three-dimensional point clouds," *The International Journal of Robotics Research*, 2012.
- [20] H. Zender, O. M. Mozos, P. Jensfelt, G.-J. Kruijff, and W. Burgard, "Conceptual spatial representations for indoor mobile robots," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 56, no. 6, pp. 493–502, 2008.
- [21] B. Kuipers, "The spatial semantic hierarchy," *Artificial intelligence*, vol. 119, no. 1, pp. 191–233, 2000.
- [22] D. Lane, "Hierarchy, complexity, society," in *Hierarchy in natural and social sciences*. Springer, 2006, pp. 81–119.
- [23] X. Geng and K. Smith-Miles, *Incremental Learning*. Boston, MA: Springer US, 2009, pp. 731–735.

# Robotlarda Bağlam ve Kavram: Fazla Yakın, Çok Uzak

Mehmet Çelik, Sinan Kalkan

Bilgisayar Mühendisliği Bölümü

Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Ankara, Türkiye

Email: {mcelik,skalkan}@ceng.metu.edu.tr

**Özetçe** —Kavramlar, nesnelere, olayları ve durumları sınıflandırmamıza yardımcı olan; en temelde kelimeleri anlamıza yardımcı olan, biliş için oldukça elzem göstergilerdir. İçinde yaşadığımız dünyanın karmaşıklığı ve bu dünyayı çok alt seviye alanlar ile algılamak olmamız nedeniyle, insan biliş kavramları içinde buldukları arkaplan ile, daha doğrusu, bağlam ile işleme yeteneği geliştirmiştir. Bu sayede, kavramlar, içinde buldukları bağlama göre işlenmektedir. Yakın zamanda hayatımızda daha fazla yer etmesini beklediğimiz robotlar için de kavramlar ve bağlamlar oldukça önemlidir. Birbirinden çok farklı göstergiler veya olgular gibi görünse de, bağlamların da kavramlar gibi özellikler barındırdığı; hatta, bağlamın da bir tür kavram olduğuna dair bulgular ve hipotezler önerilmiştir. Bu çalışmada, bağlam ve kavram olgularına, ortak ve farklı yönleri psikoloji ve bilişimsel çalışmalar dikkate alınarak incelenmiş ve bu yönlerin, bu iki yeteneğin aynı gösterimde, çerçevede veya uzayda modellenmesi veya gösterimi hakkında önerileri çıkarımlar sunulmuştur.

**Anahtar Kelimeler**—Bağlam, Kavram, Bilişsel Robotbilim.

## I. GİRİŞ: KAVRAM VE BAĞLAM

Harnad'ın ifade ettiği gibi, nesnelere, olayları, eylemleri, olguları sınıflandırabilmek, biliş için oldukça elzemdir:

“To Cognize is to Categorize: Cognition is Categorization” (Türkçe: Bilmek / ayırt-etmek, sınıflandırmaktır: Biliş, sınıflandırmadır.) – S. Harnad [1]

Ancak, sınıflandırabilmek için, sınıflandırılana ait ön bilginin, bir soyutlamanın, bir gösterimin halihazırda var olması gerekmektedir. Aynı zamanda sınıflara ait kelimeleri anlamamızı ve anlamlandırmamızı sağlayan bu soyutlamaya, kavram diyoruz: Bir başka deyişle, kavramlar sayesinde kelimeleri anlayabiliyor, nesnelere tanıyabiliyor, olayları algılayabiliyoruz. Kavramlar üzerine inşa edilmiş bilişsel mekanizmalar ile varız (bknz. örneğin [2], [3]).

Kavram, biliş için oldukça elzem olsa da, kavramların içinde buldukları arkaplandan, bir başka deyişle, bağlamlarından ayırt edilemeyeceği önerilmiştir (bknz. örneğin [4]). Bağlam, Türk Dil Kurumu sözlüğünde şu iki şekilde tanımlanmıştır:

“Herhangi bir olguda olaylar, durumlar, ilişkiler örgüsü veya bağlantısı”

“Bir dil birimini çevreleyen, ondan önce veya sonra gelen, birçok durumda söz konusu birimi etkileyen, onun anlamını, değerini belirleyen birim veya birimler bütünü”

Türkiye Robotbilim Konferansı, 2016

Bu ve buna benzer bağlam tanımları pek çok kaynaktan mevcuttur ve çoğunlukla, bu tanımların birbirinden ayrılan kritik yönleri de bulunmaktadır [5]. Farklı tanımlar mevcut olsa da, her tanımda ortak olan nokta, nesnelere, olayları, olguları yorumlarken veya anlamlandırırken hep içinde buldukları durumun, yani bağlamın, önemli olduğudur [6], [7]. Örneğin, bir kupa, içindeki suyun sıcaklığına, içinin doluluk miktarına, acelemiz olup-olmamasına, çevremizde engeller olup-olmamasına gibi pek çok bağlamsal bilgiye bağlı olarak farklı şekillerde taşınabilir; ya da her gün görülen bir kapı komşusuyla konuşma şekli, insanın o an acelesi olup olmasından, sağlık durumundan veya ruh halinden etkilenebilir. Bir bilgi aktarmak için kurduğumuz cümleler ve cümlelerden çıkardığımız anlamlar farklı bağlamlarda değişebilmektedir.

Bağlam, muhakkak, yapay biliş veya zekaya ulaşmayı hedefleyen yapay zeka ve robotbilim çalışmaları için de oldukça elzemdir. Bu alandaki öncü isimlerden birisi, etmenlere bağlam yeteneğini mantıksal çerçeveler (logical formalisms) ile kazandırmaya çalışan McCarthy'dir [8]. McCarthy, bağlamın şu özellikleri barındırdığını iddia etmiştir:

- Bağlamlar, formal objelerdir.
- Bağlamlar, tam olarak tanımlanabilirler.
- Bağlamlar ve bağlamsal fonksiyonlar arasında kullanışlı bağlantılar vardır ve bir bağlamdan çeşitli değişikliklerle (yeri, zamanı ya da durumu farklılaştırmak gibi) yeni bir bağlam elde edilebilir.

Yapay ve doğal biliş için bu kadar önemli iki olgu olan kavram ve bağlam arasında nasıl bir ilişki olduğu, özellikle yapay zeka ve robotbilim çalışmaları için önemlidir. Bu çalışmada, sinirbilim, psikoloji ve bilişimsel çalışmalarında kavram-bağlam yakınlığını-uzaklığını inceleyeceğiz ve bu inceleme sonucunda robotbilim çalışmaları için çıkarımlar yapacağız.

İlk bağlam çalışmalarında McCarthy gibi araştırmacılar tarafından yapılan tanımlar bile kavram-bağlam yakınlığı-uzaklığı hakkında fikirler vermektedir. McCarthy'nin tanımladığı özellikler, bağlamın kavramlara benzer özellikler taşıdığını önermektedir. Psikolojik bulgular ve son zamanlarda yapılan bağlamı kavramlar cinsinden modelleyen robotbilim çalışmaları da [9], kavram-bağlam yakınlığı hakkında fikirler vermektedir.

**Bu çalışma özgün bildiri olmayıp, çalışmanın İngilizce hali CONTEXT-17 konferansına değerlendirilmek üzere gönderilmiştir.**

## II. KAVRAMIN YAPISI

Kavramın tanımı ve doğası üzerine, eski Yunan filozofları Aristo ve Eflatun'dan itibaren, yüzyıllar boyu çalışılmış ve kafa yorulmuştur, ve kavramların ne olması gerektiği üzerine farklı teoriler önerilmiştir [10], [11]. Bu teorileri üç ana başlıkta toplayabiliriz (aşağıdaki üç madde, yazarların önceki bir bildirisinden alınmıştır [12]):

- Kural-tabanlı kavramlama: Bu yaklaşımda, kavramlar katı eşiklerle belirlenmiş kurallar kümesi olarak tanımlanır. Örneğin, “renk = sarı VE  $10cm < boy < 12cm$ ” gibi kurallar ile öğelerin taşıdığı özellikler ifade edilir. Bu yaklaşımda, bir öğenin hangi kategoriye ait olduğu, öğenin özelliklerinin hangi kategorinin kurallarını sağladığına göre belirlenir.
- Prototip-tabanlı kavramlama: Bu yaklaşımda, kavramlar, kategori içerisindeki tüm öğelerin ortak yönlerinin bir nevi özeti diyebileceğimiz prototipler ile gösterilir. Bu yoğunlaştırılmış gösterimde, örneğin, “renk = %40 sarı, %30 mavi, %30 siyah” gibi özelliklerin tutarlı olanlarının dağılımı ifade edilir. Bir öğenin hangi kategoriye ait olduğu ise, öğenin özelliklerinin prototipe uyup uymadığı ile belirlenir.
- Örnek-tabanlı kavramlama: Bu yaklaşımda, kavramlar, kategorilerdeki tüm öğeler ile ifade edilir. Herhangi bir gösterim çıkarılmaz. Bir öğenin hangi kavrama ait olduğu ise, o öğenin tüm kategoriler içerisindeki tüm öğeler ile kıyaslanması ile, en benzer öğeyi içeren kategori olarak belirlenir.

Kavramın tekil bir varlığının olmayıp, başka kavramlar ile etkileşim içerisinde olduğu farklı araştırma ve bakış açıları belirtilmiştir. Bu, kavramların hiyerarşik bir yapı içerisinde bulunması şeklinde olmakla beraber [13], [14], [15] bu, aynı zamanda daha farklı etkileşimlere de imkan veren, bir kavram ağı şeklinde de olabilmektedir [16]. Örnek olarak, hiyerarşik bir yapı içerisinde tanımlandığında, “koyun” ve “at” kavramları, “omurgalılar” kavramı altında birbirleri ile ilişkilendirilmektedir. Daha karmaşık bir kavram ağı içerisinde de, “sert” sıfatını taşıyanları, bir “fincan” ile “tabağı” ilişkilendirmektedir.

Kavramların birbirleri arasında ilişkili olmaları ile beraber, tanımları içinde bir kavramın başka kavramların kompozisyonu şeklinde ifade ediliyor olması da mümkündür. Bu bakış açısının da eleştirileri olmak ile beraber [17], hem felsefe literatüründe kabul gördüğü [18], hem de uygulamalı çözümleri sağlaması ile değerli olduğu söylenebilir [19], [20]. Ayrıca kavramların kompozisyon yapısı ile ilgili nörolojik deliller de bulunmaktadır [21].

## III. KAVRAM-BAĞLAM YAKINLIĞI

Kavram-bağlam yakınlığını destekleyen formel yaklaşımlardan bir tanesi, bağlam üzerine yaptığı çalışmalarla yapay zekada çığır açan McCarthy olmuştur [8]. Kural temelli statik bir sistemde bağlamın sistem içerisinde nasıl temsil edileceğini çalışmaları ile açıklamıştır. Bunu gerçekleştirirken yaptığı iki önemli tanım, bağlamın soyut ve birinci sınıf objeler olduğudur. Bağlamları da içeren bir mantık sisteminde önermeler, içerisinde tanımlandıkları bağlam ile beraber bir doğruluk değerine sahip olmaktadır.

Daha basit kavramların kompozisyonundan oluşan “ofis”, “mutfak” gibi karmaşık kavramları düşündüğümüzde; bu kelimelerin aynı zamanda birer bağlamı ifade etmeleri, kavram ve bağlam arasında kesin bir çizgi olmadığını önermektedir. Genel itibarıyla, basit kavramlardan karmaşık kavramlara gidildikçe, kavramların kendisinin aynı zamanda bağlamlara tekabül ettiği görülmektedir.

Kavramların karmaşıklaşmasının, aynı zamanda bu kavramların anlamlarının daha geniş bir gerçeklik mümkünliğini (possible worlds) ifade eder hale gelmesine sebep olduğu görülebilir. Örnek olarak, “bardak” kelimesinin nasıl nesnelere tarif ettiğini ifade etmeye çalıştığımızda karşılaşacağımız çeşitlilik ile “mutfak” kelimesinin tarifi için karşılaşacağımız çeşitliliğin aynı seviyede olmadığı açıktır. “Mutfak” veya “ofis” tanımı, içerisinde başka kavramları da içermesi ile tarifi daha zor hale gelmektedir. Mesela “bardak” kavramı, “mutfak” ve “ofis” kavramlarının tarifi içerisinde ayrı ayrı kullanılabilir.

Buradan “mutfak” ve “ofis” kelimelerinin “bardak” tanımı için bir bağlam haline geçtiği gözlemine gelmekteyiz. “Bardak”, “mutfak”ta içerisinde sıvı tutulan bir kap olarak görüleceği gibi, “ofis” bağlamı içerisinde kalemlik olarak kullanılabilir. Dolayısı ile, “bardak” kelimesi anlamlandırılırken kendileri birer kavram olan “ofis” ve “mutfak” bağlam olarak işlev görmektedir. “Mutfak” bağlamı içerisinde “bardak”ın içerisinde sıvı bulunması daha muhtemel iken, “ofis” bağlamı içerisinde buna kalem de eklenmektedir.

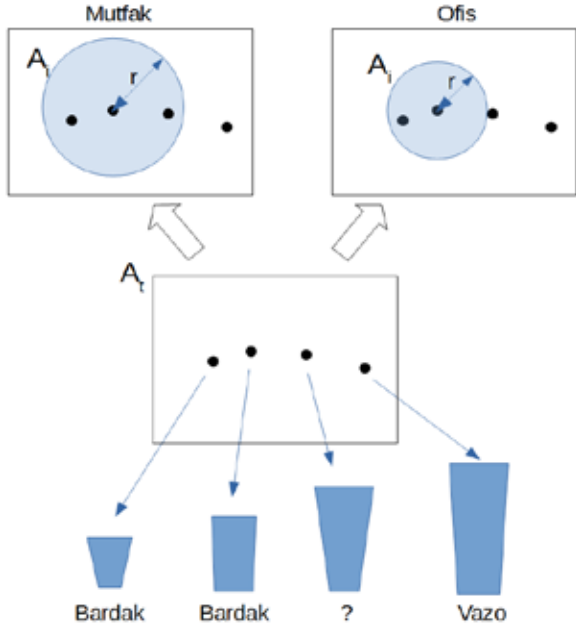
Kavram ve bağlam arasındaki ilişkide, bu örnekten hareketle, bağlamların, bir kavram olarak tanımları içerisinde bulunan ve kendileri ile ilişkilendirilebilecek diğer kavramların anlamını daraltan sınırlandırmalar olduğu söylenebilir.

## IV. KAVRAM-BAĞLAM UZAKLIĞI

Kavram tanımlaması için temel oluşturan bir çalışma olan, Gardenfors [22] tarafından önerilen kavram uzayı ve bu uzayı kullanarak yapılmış bağlam tanımlamaları da bulunmaktadır. Kavram uzayı, sembolik olmayan bilişsel teorilerde, kavramların tarif edilmesini hedef alagelmış önemli bir teoridir [22]. Bağlamın kavram uzayı içerisinde formalize edildiği [23] durumlarda bağlam, kavramı ifade eden boyutların ağırlığının değişmesi olarak görülebilir. Bağlamın bir vektör olarak ifade edildiği bu durumda, bağlam da farklı bir uzayda tanımlanmış bir vektör olmaktadır.

Ancak, kavram uzayı tanımında kabul edilen, kavramı tanımlayan bölgelerin dışbükey olması zorunluluğu, bazı kavram tanımlarında sıkıntı oluşturmaktadır [24]. Mesela, elma kavramı için yeşil ve kırmızı elmalar tanımlanabilirken, renk uzayında bunlar arasında kalan bölgede bulunan renklerin tamamı elma kavramı içerisinde yer almaktadır. Bu, kavramların komşuluk ilişkilerinin anlamlı olduğu bir uzayda tanımlanamayacağından ziyade, kavramların bu uzayda basit dışbükey bölgeler olarak tanımlanmaya çalışılmasının zorluğunu göstermektedir. Böyle bir tanımlamada da bağlamın, kavramlar uzayından ayrı bir uzay içerisinde tanımlanması gereği ortaya çıkmaktadır.

Bir nesnenin bardak olarak algılanmasında, yani bardak kavramına bir örnek olarak görülmesinde bağlamın etkisi, bu nesnenin sahip olduğu özelliklerin da farklı yorumlanmasını



Şekil 1. Bardak kavramının 2B bir kavram uzayında temsili. Burada mutfak ve ofis kavramlarından gelen sınırlandırmaların mutfakta bardak olan örneğin ofiste olmamasına sebep olması temsil ediliyor. Resimde  $r$  ile temsil edilen sınırlandırma, mutfak ve ofis kavramlarının bağlam olarak bardak kavramını sınırlandırmasını temsil ediyor ve bu kavramların kendisinden ileri geliyor.

sağlayabilir. “Mutfak” bağlamı içerisinde uzun bir bardak olarak algılanan nesne, “ofis” bağlamında vazo olarak algılanabilir. Burada bir kavram uzayı içerisinde kolayca temsil edilebilecek olan nesnenin boyunun, bardak ve vazo bölgeleri arasında bir sınır değere sahip olması gerekmektedir, bu sınır, farklı bağlamlarda farklı değerlerde olacaktır.

Bağlam, bu sınırlandırmaların tanımlandığı ve kendisi bir kavram ile ilişkilendirilebilse bile kavramdan farklı tanımlanması gereken bir olgu haline gelmektedir. Bağlamı, aktif kavramlar kümesi olarak modelleyen ve bu sayede, kavram ve bağlam arasında kesin bir çizgi çizen robotbilim çalışmaları da olmuştur [9].

## V. ÇIKARIMLAR VE SONUÇLAR

Bahsedilen kavramlar arası etkileşimin, bilincin de dahil olduğu karmaşık sistemlerin modellenmesinde kullanılan bağlamsal meydana çıkış (contextual emergence) modeli [26] içerisinde ifade edilmesinin bağlam-kavram ikilisinin anlaşılması için faydalı olacağı düşünülmektedir.

Bardak örneği ve bu örneğin bir kavram uzayı içerisinde temsili ile devam edilecek olursa, ferдин gözlemediği bardaklar  $A_t$  kümesi içerisinde tanımlanmaktadır. Bu alt seviye ve gözlemlenmiş tekil nesnelere olmaktadır. Bu gözlemlerin bir kısmının istatistikî mümkün olma durumu ve buna yakın örnekler  $A_i$  bölgesini oluşturmaktadır. Bu 5cm yüksekliğinde ve 10cm yüksekliğinde bardak gözlemlenmiş bir ferдин, 8cm büyüklüğünde bir bardağın varlığı hakkındaki yorumu olarak görülebilir. Yani  $A_i$  içerisinde 8cm bardakların varlığına bir ihtimal verilmektedir.  $A_i$  kavram uzayı içerisinde “bardağı” temsil eden bölge olmaktadır. Fark edilebileceği gibi  $A_i$ ’nin  $A_t$ ’den ne şekilde inşa edileceği bunun üzerinde bulunan tekil bardak tanımından gelmektedir.  $Y_t$  diyeceğimiz bu tekil bardak

tanımı  $A_t$ ’den hangi örneklerin kullanılacağını ve  $A_i$ ’nin hangi parametreler ile inşa edileceğini belirlemektedir. Şekil 1’de ifade edilmeye çalışılmış olan, bir nesnenin bardak mı yoksa vazo mu olduğuna karar vermeye çalışırken ferдин değerlendirileceği parametrelerin bağlam içerisinde gelmesidir.

Bu dinamik kavram tanımı içerisinde bağlamlar, kavramın anlamının belirlenmesinde hem gerekli hale gelmekte, hem de kavramların etkileşimi ile ortaya çıkmış olması ile onlardan ayrı bir varlığa sahip olmaktadır. Bağlamların kendilerinin bağlam olarak da ifade edilebilmeleri ile kavram ve bağlam arası ilişki hem bir birlerinden ayrılamayacak kadar yakın, hem de bir birlerinin yerine koyulamıyor olmaları ile de uzak görülmesine sebep olmaktadır.

## VI. TEŞEKKÜR

Bu çalışma, TÜBİTAK tarafından desteklenen 215E133 numaralı “Robotlarda Bağlam” projesi kapsamında yapılmıştır.

## KAYNAKÇA

- [1] S. Harnad, “To cognize is to categorize: Cognition is categorization,” *Handbook of categorization in cognitive science*, pp. 20–45, 2005.
- [2] L. Barsalou, “Perceptual symbol systems,” *Behavioral and brain sciences*, vol. 22, no. 4, pp. 577–660, 1999.
- [3] A. M. Borghi, “Object concepts and embodiment: Why sensorimotor and cognitive processes cannot be separated,” *La nuova critica*, vol. 15, no. 4, pp. 447–472, 2007.
- [4] L. Barsalou, “Situating concepts,” in *Cambridge handbook of situated cognition*, M. A. P. Robbins, Ed. New York: Cambridge University Press, 2008, pp. 236–263.
- [5] M. Bazire and P. Brézillon, “Understanding context before using it,” *Modeling and using context*, vol. 3554, pp. 29–40, 2005.
- [6] W. Yeh and L. W. Barsalou, “The situated nature of concepts,” *The American journal of psychology*, pp. 349–384, 2006.
- [7] J. C. Turner, P. J. Oakes, S. A. Haslam, and C. McGarty, “Self and collective: Cognition and social context,” *Personality and social psychology bulletin*, vol. 20, pp. 454–454, 1994.
- [8] J. McCarthy, “Notes on formalizing context,” in *Proceedings of the 13th International Joint Conference on Artificial Intelligence - Volume 1*, ser. IJCAI’93. San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1993, pp. 555–560.
- [9] H. Celikkanat, G. Orhan, N. Pugeault, F. Guerin, E. Şahin, and S. Kalkan, “Learning context on a humanoid robot using incremental latent dirichlet allocation,” *IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems*, vol. 8, no. 1, pp. 42–59, 2016.
- [10] L. Gabora, E. Rosch, and D. Aerts, “Toward an ecological theory of concepts,” *Ecological Psychology*, vol. 20, no. 1, pp. 84–116, 2008.
- [11] E. Rosch, “Natural categories,” *Cognitive psychology*, vol. 4, no. 3, pp. 328–350, 1973.
- [12] S. Kalkan, O. Yuruten, and E. Şahin, “Relating affordances with verbs, nouns and adjectives,” in *21st Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, 2013.
- [13] J. H. Gennari, P. Langley, and D. Fisher, “Models of incremental concept formation,” *Artificial intelligence*, vol. 40, no. 1-3, pp. 11–61, 1989.
- [14] M. Lebowitz, “Experiments with incremental concept formation: Unimem,” *Machine learning*, vol. 2, no. 2, pp. 103–138, 1987.
- [15] D. H. Fisher, “Knowledge acquisition via incremental conceptual clustering,” *Machine learning*, vol. 2, no. 2, pp. 139–172, 1987.
- [16] H. Celikkanat, G. Orhan, and S. Kalkan, “A probabilistic concept web on a humanoid robot,” *IEEE Transactions on Autonomous Mental Development*, vol. 7, no. 2, pp. 92–106, 2015.
- [17] M. Frixione and A. Lieto, “Representing concepts in formal ontologies. Compositionality vs. typicality effects,” *Logic and Logical Philosophy*, vol. 21, no. 4, pp. 391–414, jun 2013.

- [18] Z. G. Szabó, “Compositionality,” in *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, fall 2013 ed., E. N. Zalta, Ed., 2013.
- [19] P. D. Bruza, K. Kitto, B. J. Ramm, and L. Sitbon, “A probabilistic framework for analysing the compositionality of conceptual combinations,” *Journal of Mathematical Psychology*, vol. 67, pp. 26–38, 2015.
- [20] R. Socher, B. Huval, C. D. Manning, and A. Y. Ng, “Semantic Compositionality through Recursive Matrix-Vector Spaces,” in *Proceedings of the 2012 Joint Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing and Computational Natural Language Learning*, 2012.
- [21] T. M. Mitchell, S. V. Shinkareva, A. Carlson, K.-M. Chang, V. L. Malave, R. A. Mason, and M. A. Just, “Predicting Human Brain Activity Associated with the Meanings of Nouns,” *Science*, vol. 320, no. 5880, 2008.
- [22] P. Gärdenfors, “Symbolic, Conceptual and Subconceptual Representations,” in *Human and Machine Perception*. Boston, MA: Springer US, 1997, pp. 255–270.
- [23] M. Raubal, “Formalizing Conceptual Spaces,” *Formal ontology in information systems, proceedings of the third international conference*, vol. 114, pp. 153–164, 2004.
- [24] J. V. Hernández-Conde, “A case against convexity in conceptual spaces,” *Synthese*, pp. 1–27, may 2016.
- [25] H. Atmanspacher and T. Filk, “The relevance of bell-type inequalities for mental systems,” in *International Symposium on Quantum Interaction*. Springer, 2013, pp. 231–243.
- [26] H. Atmanspacher, “Contextual emergence of mental states,” *Cognitive Processing*, vol. 16, no. 4, pp. 359–364, 2015.

# Okul Öncesi Eğitim için Mekatronik Sistem Tasarımı

Binnaz Didem MENGÜ, Ali Emre TURGUT  
Makine Mühendisliği Bölümü  
Orta Doğu Teknik Üniversitesi  
Ankara, Türkiye  
Email: b.d.mengu@gmail.com, ali.turgut@gmail.com

*Özetçe — Ülkemizde 2013 yılında uygulanmaya başlayan MEB Okul Öncesi Eğitim Programı öğrenci merkezli, aktif öğrenmeyi destekleyen, yapılandırmacı yaklaşımı ile dikkat çekmektedir. Yeni programın uygulanmasının değerlendirilmesine yönelik yapılan çalışmalar, eğitimcilerin halen geleneksel yöntemleri tercih ettiklerini ve bu yöntemlerin öğrenci odaklı yeni sisteme tam uyum sağlayamadığını göstermektedir. Öğretmen merkezli eğitimin sorunları göz önüne alındığında yeni bir yöntem ihtiyacı doğduğu farkedilmiştir. Eğitimde robot kullanımının bu problemlere kolay ve ucuz bir çözüm alternatifi olacağı düşünülmüştür. Robotların okul öncesi eğitimde yapılandırmacı etkinlikler ile kullanılmasının çocukların tüm gelişim alanlarının(Bilişsel, Sosyal, Dil, Duyusal, Motor) gelişimine büyük katkılarda bulunabileceği ön görülmektedir. Bu amaçla, çözüm olarak eğitim sistemine entegre edilebilir yardımcı bir akıllı sistem tasarımı önerilmiştir. Bu sistem; gezer bir robot, tablet arayüzü ve akıllı bir matran oluşmaktadır. MEB Okul Öncesi Eğitim Programı ve Etkinlik Kitabı örnek alınarak sistem tasarımı yapılmıştır. Sistemin, Eğitim Programında belirtilmiş olan 60-72 aylık çocukların Bilişsel Kazanımlarının yüzde 90'ını vermesi hedeflenmiştir. Hassas hareket kontrollü, RFID etiket okuyabilen, sesli ve ışıklı uyarı verebilen, programlanabilir bir gezer robot, sade ve basit bir tasarımla algoritma geliştirmeyi ve robotu programlamayı sağlayan tablet arayüzü ve robotun üzerinde hareket edeceği, RFID etiketlerle donatılmış akıllı bir mat tasarımı gerçekleştirilmiştir. Sistemin teknik testleri yapılmış ve sistemde iyileştirmeler yapılmıştır. Sistemin teknik testlerden başarıyla geçmesi ile sistemin yapılabirliği kanıtlanmış, faydasının ölçülmesi ve kanıtlanması için hedef kitle ile denenmesi ve değerlendirmesinin yapılması aşamasına geçiş sağlanmıştır.*

*Anahtar Kelimeler— Okul Öncesi eğitim, Eğitimde robotlar, Robot.*

## I. GİRİŞ

Ülkemizde 2013 yılında uygulamaya giren MEB Okul Öncesi Eğitim Programı öncekinden farklı bir yaklaşım sunmaktadır [1]. Bu programda öğretmen merkezli eğitim sisteminin yerini öğrenci merkezli ve aktif öğrenmeyi temel alan bir eğitim sistemi alması öngörülmüştür. Ancak, yeni eğitim sisteminin uygulanmasını inceleyen çalışmalar, halen kullanılmakta olan geleneksel yöntemlerin yeni sistemin ihtiyaçlarını karşılamadığını ve amacına hizmet etmediğini göstermiştir [3]. Öğretmen merkezli eğitimde en temel sorunlar şu şekilde sıralanabilir:

-Verilen eğitim tamamen öğretmen ağırlıklı olduğu için bir günün içerisinde yapılabilecek faaliyetler öğretmenin zamanı ile kısıtlıdır.

-Verilen eğitimin kalitesi öğretmenin tecrübesine dayalıdır.

-Yapılan faaliyetler sırasında öğretmenin geri bildirim(doğru/yanlış) açısından tek tek çocuklarla ilgilenmesi gerekmektedir, bu durumda geri bildirim gerektiren faaliyetlerin yapılabirliğini kısıtlamaktadır.

Yukarıda özetlenen sorunlar göz önüne alındığında yeni bir yöntem ihtiyacı doğduğu farkedilmiştir. Bu sorunlara kolay ve ucuz bir çözüm alternatifi olarak, eğitimde araç olarak robot kullanımı düşünülebilir. Robot kullanımının getireceği faydalar şu şekilde sıralanabilir:

- Çocukların birebir veya grup halinde, gözetmene ihtiyaç duymaksızın kullanabilecekleri ve oyun esaslı öğrenim görebilecekleri bu sistem, çocukların aktif öğrenme sürecinin içerisine katılmalarına yardımcı olacaktır.
- Faaliyetler daha standart hale geleceği için öğretmenin tecrübe seviyesi, eğitim kalitesini çok fazla değiştirmeyecektir.
- Robotlar ile etkileşim çocukların daha çok ilgisini çekeceği için faaliyetler daha eğlenceli ve öğretici olacaktır.
- Robotlar geri bildirimlerde(doğru/yanlış) bulunabileceği için öğretmenlerin tek tek çocuklarla ilgilenmesine gerek kalmayacak, bu şekilde öğretmenler zamanlarını daha verimli kullanabileceklerdir.
- Faaliyetler sırasında çocuklar bir yandan algoritma kavramlarına giriş yapıp, çok basit düzeyde robot programlamayı öğreneceklerdir.

Yukarıda bahsedilenler düşünülerek, robotların okul öncesi eğitimde yapılandırmacı etkinlikler ile kullanılmasının çocukların gelişimine büyük katkılarda bulunabileceği ön görülmektedir. Yeni eğitim sisteminin amacına uygun, ihtiyaçlarını karşılayacak robotik bir çözüm önerisi bu bildiri kapsamında sunulmuştur.

## II. LİTERATÜR

Okul öncesi eğitim sistemi incelenmiş, araştırmalar iki ana başlıkta toplanmıştır. Bunlar; geleneksel eğitim yöntemleri ve eğitimde robot kullanımı.

### 2.1 Okul Öncesi Eğitim Sistemi

MEB tarafından hazırlanan Okul Öncesi Eğitim Sistemi iki temel bileşenden oluşmaktadır; Eğitim Programı [1] ve Etkinlik Kitabı [2].

*Eğitim Programı* içerisinde yaş grupları ve verilmesi gereken kazanımlar belirtilmiştir (Şekil 1). Öğrenciler üç yaş grubuna ayrılmıştır; 36-48 ay, 48-60 ay, 60-72 ay. Göstermeleri gereken gelişimler ise Bilişsel, Dil, Sosyal ve Duyusal, Motor, Öz Bakım olarak gruplanmıştır.

36-48 AYLIK ÇOCUKLARIN BİLİŞSEL GELİŞİMİ	48-60 AYLIK ÇOCUKLARIN DİL GELİŞİMİ	60-72 AYLIK ÇOCUKLARIN MOTOR GELİŞİMİ
<ol style="list-style-type: none"> <li>1) 2'ye kavramları ayırır eder.</li> <li>2) 1'den 10'a kadar söyler.</li> <li>3) Birine bir eşleştirme yapar.</li> <li>4) Üç kiple kopru yapar.</li> <li>5) 1'den 10'a kadar elan nesneler içinde istenilen sayıdaki nesneyi gösterir.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Sesin cızırtısını söyler.</li> <li>2) Sesin kaynağını ne olduğunu söyler.</li> <li>3) Birkaç cümleler kurar.</li> <li>4) 4-5 parçalı cümle kurar.</li> <li>5) Konuşmalarında bağlaçları kullanır.</li> <li>6) Konuşmalarında slamsuz sesleri yapıyor kullanır.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Engelini üzerinden koparak atar.</li> <li>2) Ritme uygun olarak ritme hareketli yapar.</li> <li>3) Tek ayak sıçrayarak 2-3 m ilerler.</li> <li>4) Topu tek elle atarak atar.</li> <li>5) Topu tek elle yarıdan yarılar.</li> <li>6) Belli bir mesafedeki hedefi vurur.</li> </ol>

Şekil 1: Okul Öncesi Eğitim Programı Örnek Kazanım Listeleri.

Öğrencilere belirlenen kazanımları verebilmek amacıyla kazanımlara yönelik etkinlik örneklerini içeren, bir *Etkinlik Kitabı* hazırlanmıştır. Bu Etkinlik Kitabında Eğitim Programında belirtilen yaş ve gelişim gruplarına uygun etkinlikler detaylı bir şekilde verilmiştir (Şekil 2).

### 3. BALONLARIN İÇİNDE NE VAR?

Etkinlik Değeri: Fen Bilimleri Örgün Etkinliği  
Yaş Grubu: 48 - 60 Ay

KAZANIMLAR VE GÖSTERGELERİ	ÖĞRENME SÜRECİ
<p><b>Bilişsel Gelişim</b></p> <p><b>Kazanım 1. Nesne/durum/salaya dikkatini verir. (Göstergeler: Dikkat edilmediği nesne/durum/salaya odaklanmaz.)</b></p> <p><b>Kazanım 2. Nesne/durum/salaya ilgili tahminde bulunur. (Göstergeler: Nesne/durum/salaya ilgili tahminde bulunur, tahmini de ilgili ipuçlarını açıklar. Çarpıcı duruma inceler. Tahmini ile gerçek durumu karşılaştırır.)</b></p> <p><b>Kazanım 3. Nesne ya da varlıklarını gözlemler. (Göstergeler: Nesne/durum/salaya ilgili, boyut/küçüklüğü, dokunmasını söyler.)</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Çocuklar için farklı nesneler koruyucu balonlardan birer tane alır. Akıllı nesne göre gruplarını oluştururlar.</li> <li>Çocuklar balonlara dokunarak içlerinde hangi malzemelerin olduğunu tahmin etmeye çalışır.</li> <li>Balonların içinde ne olduğu, büyüklüğü, şekli ya da yamağı olup olmadığını, kokusunu, kullanıldığı yerleri, şekilleri hakkında birbirlerine sorular yönelterek konuşurlar.</li> <li>Çocukların tahminleriyle ilgili çimen yapmalarına fırsat verir. Herkes bu tahminde bulduklarını söyler.</li> <li>Çocukların tahminleri öğrenen taraflardan (öğretmen) karşılanır.</li> <li>Çocukların içlerini gruplara göre masalara yerleştirir. Renklerinde hangi renk balonların olduğunu söylerler.</li> <li>Çocuklar balonunun içindeki nesnelere çıkararak yapmış oldukları çizmeleri de karşılaştırır.</li> <li>Öğretmen ve nesnenin hakkında konuşur.</li> </ul>
<p><b>MATERYALLER</b> İçinde su, nane, kum, mercimek, fasulye, boncuk gibi farklı malzemelerin olduğu su, mavi, sarı, kırmızı renkli jüjümlenmiş balonlar. Karton ya da kraft kağıdı, kalemler.</p> <p><b>SÖZCÜKLER</b></p> <p><b>KAVRAMLAR</b> Renk: Sarı, mavi, sarı, kırmızı. Duyu: Sert-yumuşak.</p>	

Şekil 2: Etkinlik Kitabı Aktivite Örneği.

### 2.2 Geleneksel Yöntemler

Günümüzde okul öncesi eğitim sisteminde evrensel olarak kabul görmüş ve kullanılan yöntem, araç ve gereçler literatürde 'geleneksel yöntemler' olarak tanımlanmaktadır. İlgili yaş grubuna hedef kazanımların verilmesi amacıyla planlanan bu yöntemleri konu alan çalışmalar incelenmiş

[3], dünyada kullanılan örneklerden birkaçı Tablo 1 de sunulmuştur.

Tablo 1: Okul Öncesi Eğitim de geleneksel yöntemler

Yöntem	Amaç
Peg Tapping	Yönetimsel kontrol ve hafıza güçlendirme
Kansas Reflection	Bilişsel gelişim, odaklanmayı kuvvetlendirme
Impulsivity Test	Belleği kuvvetlendirme ve şifreleme yeteneğini geliştirme
Digit Span	



Geleneksel yöntemlerin olumlu özellikleri evrensel olarak kullanılıyor olmaları ve faydalarının geniş test gruplarıyla kanıtlanmış olmasıdır [3]. Öğretmen merkezli eğitim sisteminde bu yöntemler çoğunlukla ihtiyacı karşılamaktadır. Ancak, öğrenci merkezli eğitim sisteminin amacına ve işleyişine tam uyum sağlayamamaktadır.

### 2.3 Robot Kullanımı

Geleneksel yöntemlere yardımcı ve alternatif olarak ilk aklı gelen çözüm, günümüz teknolojisi olan robot teknolojisini kullanmak olmuştur. Eğitimde robot kullanımını içeren araştırmalar incelendiğinde, araştırmaların iki alanda yapıldığı görülmüştür; robot-çocuk etkileşimi ve algoritma/programlama öğretme amaçlı. Özellikle okul öncesi eğitim araştırmaları incelendiğinde robot-çocuk etkileşimi amaçlı çalışmalar çoğunluktadır [4].

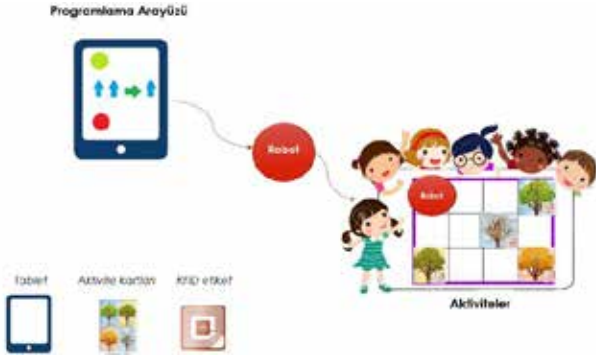
Algoritma/programlama öğretme amaçlı robot kullanımını inceleyen bilimsel araştırmalar ise oldukça az sayıdadır [5,6]. Ancak, endüstri incelendiğinde bu alandaki çalışmaların hızlandığı görülmektedir. Dünyada robotlarla tanışma, robot programlama yaşı okul öncesine çekilmiş, bu yeniliği karşılamak amacıyla ürünler geliştirilmiştir (Tablo 2).

Tablo 2: Okul Öncesi Eğitim de robot kullanımı

Sistem	Amaç	Gösterim
RUBI	Basit oyunlar üzerinden Robot-çocuk etkileşimini izleme	
KIWI	Programlama öğretme	

## III. METOT

Okul Öncesi Eğitim çalışmaları incelendiğinde, dünyada ve ülkemizde günümüz eğitim sistemini destekleyen yeni bir yöntem ihtiyacı doğduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışmada geleneksel yöntemler ile robot kullanımını birleştiren, robotları eğitim araç gereci niteliğinde kullanmayı öneren bir çözüm alternatifi düşünülmüştür. Bu ihtiyaca yönelik çözüm olarak eğitim sistemine entegre edilebilir, yardımcı bir akıllı sistem tasarımı önerilmiştir. Bu sistem; gezer bir robot, tablet arayüzü ve akıllı bir mattan oluşmaktadır (Şekil 3).



Şekil 3: Sistem tanımı.

Tasarlanan bu sistemin en önemli özelliği eğitim sistemine entegre edilebilir ve eğitime yardımcı bir sistem olmasıdır. Bu sebeple tasarıma Eğitim Programı ve Etkinlik Kitabı esas alınarak başlanmıştır. Hedef yaş grubu, gelişim grubu, kazanımlar seçilmiş, belirlenen kazanımlara yönelik aktivite planları yapılmış ve bu planlar doğrultusunda sistem gereksinimleri çıkarılmıştır.

### 3.1 Hedef Kazanımlar

Çalışma kapsamında 60-72 aylık çocukların *Bilişsel gelişim* grubundaki kazanımlar seçilmiştir. Eğitim Programında belirtilen kazanımların bir kısmı Şekil 4'de gösterilmiştir.

Önerilen sistemin başlangıç olarak bu kazanımların yüzde 90'ını vermesi hedeflenmiştir.

60-72 AYLIK ÇOCUKLARIN BİLİŞSEL GELİŞİMİ	
1)	İnsan resmindeki eksik vücut bölümlerini çizer.
2)	10-25 parçalı yapbozu tamamlar.
3)	Geometrik şekilleri birleştirilerek yeni şekiller oluşturur.
4)	6-10 nesneyi herhangi bir özelliğine göre gruplandırır.
5)	1'den 10'a kadar olan nesne grupları ile rakamlar arasında ilişki kurar.
6)	1'den 10'a kadar olan nesnelere kullanarak toplama yapar.
7)	1'den 10'a kadar olan nesnelere kullanarak çıkartma yapar.
8)	Yarım ve bütün olan nesnelere gösterir.

Şekil 4: Bilişsel Kazanımlar

### 3.2 Aktiviteler

Hedef kazanımların seçilmesinden sonra Etkinlik Kitabında ilgili kazanımların aktiviteleri incelenmiş, bu aktiviteler esas alınarak sistem ile uygulanabilecek benzer aktivite planları hazırlanmıştır. Ön çalışma için 10 adet plan çıkarılmıştır. Örnek aktivite listesi:

- Geometrik şekiller
- Hikaye sıralama
- Çevre bilgisi (geri dönüşüm)
- Toplama/çıkarma, ...

### 3.3 Gereksinimler

Hazırlanan örnek aktivite planlarının her biri için gereksinimler belirlenmiştir. Tüm aktiviteler için gereksinimler listelendiğinde sistem özellikleri ve ihtiyaçları ortaya çıkmıştır (Tablo 3).

Tablo 3: Sistem Gereksinimleri

Robot	Tablet arayüzü	Akıllı mat
Bluetooth haberleşme	Bluetooth haberleşme	Eşit birimlere bölünmüş
İleri, geri hareket	Temel komutlar (hareket, ses, ışık)	RFID etiketli resimlerle
90 derecelik sağ, sol dönüş	Hedef yaş aralığına uygun simgeler	donatılabilen
Işık ve ses üretme, RFID etiket okuma		

## IV. TASARIM

### 4.1 Robot Tasarımı

Sistem gereksinimlerini karşılayacak bir gezer robot tasarımı yapılmıştır. Gezer robot; Arduino MEGA, bluetooth modülü, RFID/NFC okuyucu kart, iki adet enkoderli motor, ses ve ışık elemanlarından oluşmaktadır (Şekil 5). Gereksinimler doğrultusunda Bluetooth ile haberleşen, hassas hareket kontrollü, RFID/NFC etiket okuyabilen, çeşitli sesli ve ışıklı uyarı verebilen bir robot tasarımı yapılmıştır (Şekil 6).



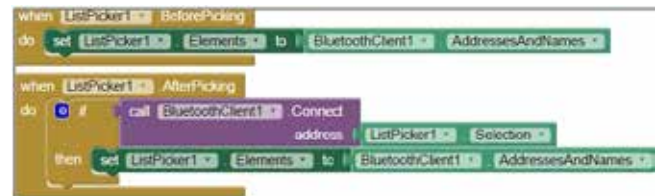
Şekil 5: Gezer robot.



Şekil 6: Dış tasarımlı gezer robot.

### 4.2 Tablet Arayüzü Tasarımı

Gezer robotu programlamak ve kontrol etmek için kullanılacak olan tablet arayüzü tasarlanmıştır. Bu arayüzün tasarımı için MIT App Inventor arayüz geliştirme ortamı (Şekil 7) kullanılmıştır.



Şekil 7: MIT App Inventor arayüz geliştirme ortamı tasarımcı ekran görüntüsü

Arayüzün tasarım sürecinde hedef yaş kitlesinin becerileri ve algıları dikkate alınarak, anlaşılabilir ve sade bir tasarım gerçekleştirilmiştir. İlk prototip olarak yapılan, temel komutları içeren, basit sembollerden oluşan, robotun uzaktan kontrolünü sağlayan kullanıcı arayüzünün ekran görüntüsü Şekil 8'de gösterilmiştir. Bu tasarımda haberleşme, hareket

(ileri,geri,sağ,sol), ışık yakma ve ses çıkarma fonksiyonları kullanılmıştır.



Şekil 8: Tablet kullanıcı arayüzü ekran görüntüsü.

#### 4.3 Mat Tasarımı

Gezer robotun üzerinde hareket edeceği, eşit birimlere bölünmüş, RFID etiketlerle ve aktivite resimleriyle donatılmış bir akıllı mat tasarımı yapılmıştır (Şekil 9). Bu tasarım aktivite senaryosuna göre değiştirilebilir, çeşitlendirilebilir, esnek bir tasarımdır.



Şekil 9: Test aktivite matı.

#### 4.4 Aktivite Planları

Etkinlik Kitabı esas alınarak hazırlanan örnek aktiviteler, tasarlanan sisteme uygun olacak şekilde iyileştirilmiştir. Aktivitelerin süreci, sistem ile nasıl kullanılacağı, hangi kazanımları hedeflediği ve aktivitelerden beklenen çıktılar neler olduğu planlanmıştır (Şekil 10).



Şekil 10: Aktivite planı örneği.

#### V. TEST

Sistemin kayda değer bir faydasının olup olmaması ve derecesi ancak hedef kullanıcı grubu ile kontrollü deneyler

sonucunda kanıtlanabilir olduğundan, bu bildiri kapsamında yalnızca teknik testler gerçekleştirilmiştir. Test adımları:

- Robotun temel fonksiyonları (haberleşme, hassas hareket kontrolü, RFID/NFC okuma, ses ve ışık üretme)
- Robot-arayüz haberleşme (Bluetooth veri gönderimi, alımı),
- Arayüz komut işlevselliği (Bluetooth ile tabletten gönderilen temel komutların robot tarafından anlaşılıp, çözümlenip uygulanması),
- Mat-robot haberleşme (robotun RFID etiketli kartlarla donatılmış mat üzerinde hareketi ve etiketleri okuyup, ilgili eylemi yapabilmesi),

sırasıyla yapılmış ve sistem tüm testlerden başarıyla geçmiştir.

#### VI. SONUÇ

Okul Öncesi Eğitimdeki ihtiyaca yönelik önerilen çözüm gerçekleştirilmiş ve tüm teknik testlerden başarıyla geçmiştir. Uygulanan testler ile önerilen akıllı sistemin yapılabiliği kanıtlanmıştır. Test sonuçlarının olumlu sonuçlanması ile bir sonraki aşama olan hedef kullanıcı grubu ile sistem testlerine geçilebileceği doğrulanmıştır. Tasarım ve test sürecinde yapılan gözlemler ve test sonuçları sistemin iyileştirilmesi için geniş bir bilgi havuzu oluşturmuştur. İyileştirmeden sonra hedef kullanıcı grubu ile testler yapılacaktır. Sistemin tahmin edilen fayda ve derecelerinin bilimsel olarak kanıtlanacağı öngörülmektedir.

#### KAYNAKÇA

- [1] MEB Temel Eğitim Müdürlüğü, 2013, Okul Öncesi Eğitim Programı
- [2] MEB Temel Eğitim Müdürlüğü, 2013, Okul Öncesi Etkinlik Kitabı
- [3] Deanna N. Meador, Kimberly A. Turner, Mark W. Lipsey, Dale C. Farran, 2013, Administering Measures from the PRI Learning-Related Cognitive Self- Regulation Study
- [4] Tanaka, F., Kimura, T., 2010, Care-receiving Robot as a Tool of Teachers in Child Education
- [5] Bers,M., Ponte,I., Juelich,K., Viera,A., Schenker,J., 2002, Teachers as Designers: Integrating Robotics in Early Childhood Education
- [6] Bers,M., Seddighin, S., Sullivan, A., 2013, Ready for Robotics: Bringing Together the T and E of STEM in Early Childhood Teacher Education

# Tek Bacaklı Zıplayan Bir Robot Platformu Geliştirilmesi Üzerine

H.Eftun Orhon, İsmail Uyanık, Hasan Hamzaçebi, Ömer Morgül  
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü  
Bilkent Üniversitesi  
Ankara, Türkiye  
Email: {orhon, uyanik, hasan, morgul}@ee.bilkent.edu.tr

Uluç Saranlı  
Bilgisayar Mühendisliği Bölümü  
Orta Doğu Teknik Üniversitesi  
Ankara, Türkiye  
Email: saranli@ceng.metu.edu.tr

**Özetçe** —Canlı yürüme davranışları her ne kadar bacak boyu, bacak sayısı ve hareket şekli açısından farklılık gösterse de tüm bu davranışlar basit bir yay-kütle modeli ile ifade edilebilmektedir. Yay-kütle modelleri bacaklı hareket davranışlarını modelleyebildiği gibi, aynı zamanda model-tabanlı kontrolcülerin geliştirilmesine de izin vermektedir. Ancak bu kontrolcülerin performansı büyük çoğunlukla benzetim ortamlarında doğrulanmış ve henüz gerçek bir robot platformunda ne kadar iyi sonuç verecekleri detaylı bir şekilde incelenmemiştir. Bu çalışma, yay-kütle modeli tabanlı kontrolcülerin fiziksel olarak gerçekleştirilmesi amacıyla geliştirilen tek bacaklı zıplayan bir robotun mekanik, elektronik ve yazılımsal altyapısını ortaya koymaktadır. Aynı zamanda geliştirilen robotun Matlab/Simulink tabanlı gerçek zamanlı veri toplama sistemi ilgili modellerin doğrulanabilmesi ve gerçek zamanlı kontrolcülerin geliştirilebilmesine olanak sağlamaktadır.

**Anahtar Kelimeler**—Model-tabanlı kontrol, gerçek zamanlı veri toplama, bacaklı robot, yay-kütle modeli

## I. GİRİŞ

Doğada da görüleceği gibi canlılar (özellikle karada yaşayan canlılar) [1] hareket edebilmek için bacaklarını kullanmaktadırlar. Bacaklı hareketler, zorlu arazilerde en iyi tutunma noktasının tercih edilebilmesi bakımından tekerlekli ya da paletli sistemlere göre büyük bir avantaj göstermektedir [2]. Her ne kadar hareket yapısı bakımından büyük bir avantaj sağlasa da bacaklı fiziksel sistemler oluşturabilmek büyük zorluklar içermektedir [3, 4].

Bacaklı hareket gerçekleştiren canlılar her ne kadar farklı bacak sayısı, bacak boyu ve hareket şekillerine sahip olsalar da, tüm bu davranışlar basit yay-kütle modelleri ile ifade edilebilmektedir [5]. Örneğin yaylı-ters-sarkaç (YTS) modeli birçok bacaklı davranışı hassas bir şekilde tanımlayabilmektedir (bir örneği Şekil. 1'de gösterilmektedir). Ancak bu modellere ait hareket denklemleri sistem dinamiklerindeki doğrusal olmayan öğeler nedeniyle analitik olarak ifade edilememektedir [6]. Buna karşın literatürde bazıları deneysel olarak da doğrulanmış [7] birçok yakınsamalı analitik çözüm yer almaktadır [8–10].

Yakınsamalı analitik çözümler sadece bacaklı hareket denklemlerini ifade edebilmek için değil aynı zamanda bacaklı robotlarda tam-hedef kontrolcülerin geliştirilebilmesi için de kullanılmaktadır. Ancak bu kontrolcüler genellikle benzetim ortamlarında YTS modelleri ve varyantları üzerinde

denenmektedir [8, 11]. Bu çalışmanın temel amacı model-tabanlı kontrolcülerin fiziksel doğrulamasının yapılabilmesi adına gerçek-zamanlı veri toplama ve kontrol sağlayabilen bir deneysel robot platformu geliştirmektir.

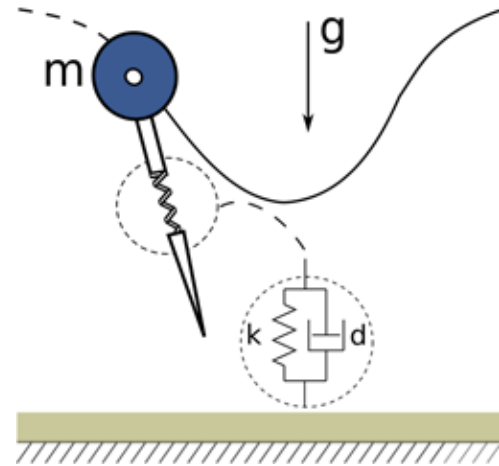
Daha önceki çalışmamızda [12] sadece bacak açısı kontrolü yapabilen bir tek bacaklı zıplayan robot platformunun geliştirilmesi anlatılmıştır. Bu bildiriye çalışmamız ise bu platformun bacak açısı ve tork kontrolü sağlayabilen bir yapıya getirilmesini amaçlamaktadır. Bu amaçla gerekli mekanik ve elektronik yenilemeler robot üzerinde gerçekleştirilmiştir. Daha önemli olan nokta ise bu çalışmada sunulacak robot platformunun Matlab/Simulink tabanlı gerçek zamanlı veri toplama ve kontrol özelliklerine sahip olmasıdır. Bu sayede robot platformu Matlab/Simulink gibi yüksek seviye bir arayüz tarafından programlanabilmekte ve gerçek zamanlı kontrol döngüsü elde edilebilmektedir.

Bu çalışma sunulan robotun mekanik ve elektronik altyapısını detaylı olarak anlatmakta ve robotun açık döngü koşu davranışından elde edilen ilk sonuçları sunmaktadır.

## II. ROBOT TASARIMI

### A. Mekanik Tasarım

Bu bölümde amacımız YTS modelini baz alarak geliştirilen robotun mekanik tasarım detaylarının sunulmasıdır. YTS



Şekil 1. Yaylı-Ters-Sarkaç Modeli

Tablo I. ROBOT PARAMETRELERİ

Dinamik model parametreleri		
$m$	Robot beden ağırlığı	$3.4kg$
$g$	Kütleçekim ivmesi	$9.81N/kg$
Yay dinamiği parametreleri		
$k$	Yay sabiti	$4500N/m$
$d$	Sönümleme katsayısı	$10Ns/m$

modeli basitçe noktasal bir kütleyle bağlanmış kütsüz bir yaydan oluşan ters sarkaç yapısıyla açıklanabilir. Bu modelde noktasal kütle gövdenin ağırlık merkezini ifade etmektedir. Dinamik model ve yay dinamiği parametrelerinin değerleri Tablo. 1 de görülmektedir. YTS modeli hibrit dinamik bir davranış yapısına sahiptir. Model bir adımı içinde uçuş ve temas fazları arasında geçişler yapmaktadır. Uçuş ve temas fazları bacağın havada ve yerde olduğu durum uzayları olarak tanımlanabilmektedir.

YTS modelinin fiziksel olarak gerçekleştirilmesi bazı temel prensipler üzerinde varsayımlar gerektirebilmektedir. Örneğin YTS prensibinde yer alan kütsüz bacak varsayımı gerçek hayatta sağlanması mümkün olmayan bir varsayımdır. Ancak mekanik tasarımda ağırlık yapan ekipmanların gövdeye aktarılması ve bacak üretiminde mümkün olan en hafif malzemelerin kullanılması bu varsayımın fiziksel koşullarda en iyi şekilde doğrulanmasını sağlamaktadır. Bunun yanı sıra literatür çalışmaları bacak ağırlığının sistem dinamiklerine büyük bir etki yapmadığını, sadece anlık çarpma sırasında bir enerji kaybına neden olduğunu ortaya koymaktadır [13]. Bu enerji kaybının YTS model dinamiklerini etkilemeden basit bir esnek olmayan çarpma fonksiyonuyla sistem dinamiklerine dahil edilebildiği literatürde gösterilmiş ve deneysel olarak doğrulanmıştır [7].

İkinci bir nokta ise çalışmamızda kullanılan düzlemsel YTS modelinin doğrulanabilmesi için tek bacaklı zıplayan robotun düzlemleyici bir platforma bağlanmasıdır. Bu nedenle robotumuzda merkezinde bir eyleyici bulunmayan, sadece yatay ve dikey hareketlerin ölçülmesini sağlayan iki kodlayıcı içeren ve sürtünmenin en aza indirilmesi için rulmanlarla yataklanmış bir düzlemleyici merkez ünitesi bulunmaktadır. Robot ise bu merkez ünitesine karbon fiber bir boru aracılığıyla bağlanmıştır. Şekil. 2'de de görülebileceği üzere robot düzlemleyici bir merkez etrafında yatay hareketini yaparken dört-çubuk sisteminin yardımıyla bacağın her zaman dik bir şekilde yere basması sağlanmıştır.

Yukarıda bahsedildiği üzere geliştirilen robot platformunda robotun bacak açısı ve temas fazında uygulanan tork olmak üzere iki kontrol girdisi bulunmaktadır. Tork girdisi sisteme enerji aktarımı, bacak açısı ise enerjinin yükseklik ya da yatay hıza yönlendirilmesi için kullanılmaktadır. Mekanik tasarım safhasında önemli bir kriter seçilecek motorun her adımda ortaya çıkan enerji kaybını karşılayacak tork girdisini sağlayabilecek nitelikte olmasıdır. Bu amaçla geliştirilen robot platformunda 268215 parça numaralı Maxon RE-30 fırçalı DC motoru kullanılmaktadır.

## B. Elektronik Tasarım

Robotun mekanik tasarımı tamamlandıktan sonra veri toplanmasını ve kalça motoru yardımıyla robotun istenen şekilde koşabilmesi için gerçek-zamanlı veri toplama ve kontrol destekleyen bir elektronik altyapı geliştirilmiştir. Literatürde

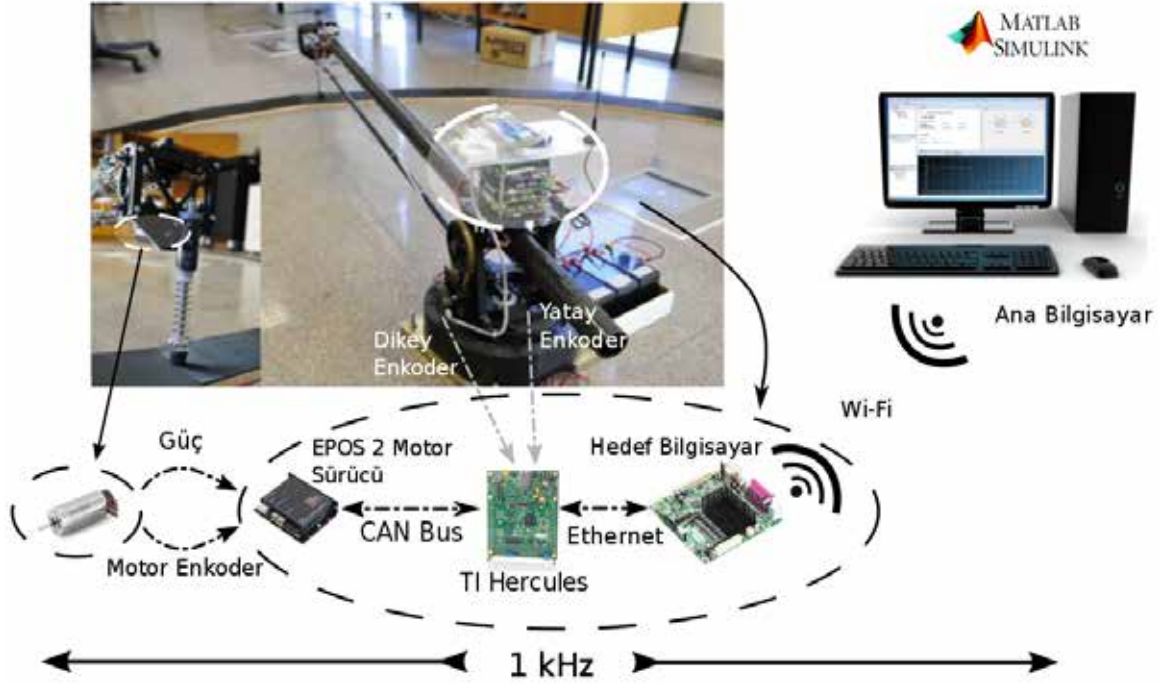
yer alan güncel bir çok robot platformu çeşitli gerçek-zamanlı işletim sistemleri kullanmaktadır. Bu çalışmada biz kolay ve hızlı programlanabilmesi açısından Matlab/Simulink Real Time altyapısını kullanılmaktadır. Aşağıdaki bölümler Matlab/Simulink tabanlı işletim sisteminin seçimi ve uygulanması konusunda gerekli detayları açıklamaktadır.

1) *Veri toplama sistemi:* Bilindiği üzere bir sisteme verilen girdi istenilen sınırlı bir zaman dilimi içinde gerekli işlemlerden geçip çıktı verebiliyorsa bu sistem gerçek-zamanlı sistem olarak sınıflandırılabilir. Gerçek-zamanlı sistemler belirlenen sürede işlemin gerçekleştirilmemesi durumunda ortaya çıkan büyük ve küçük hataların durumuna göre katı ve yumuşak gerçek-zamanlı sistemler olarak ikiye ayrılmaktadır. Bu çalışmada kullanılan Matlab/Simulink katı bir gerçek-zamanlı sistem olarak tanımlanmaktadır ve döngü frekansı bacaklı robotlardaki davranışların hassas bir şekilde gözlemlenebilmesi adına  $1\text{ KHz}$  olarak belirlenmiştir.

Robot üzerinde bulunan üç kodlayıcı sayesinde toplanan veriler robot platformunun yaptığı hareketin hassas bir şekilde ölçülebilmesini sağlamaktadır. Bunlardan motor dönüşünü ölçen kodlayıcı bacak açısının hassas bir şekilde ölçülebilmesini sağlamaktadır. Düzlemleyici platform merkezinde bulunan iki kodlayıcı ise robotun yatay ve dikey pozisyonlarının anlık olarak ölçülebilmesini sağlamaktadır. Şekil. 2'de de görülebileceği üzere yatay ve dikey dönüşün daha hassas ölçümünün alınabilmesi adına bu eksenlere  $1 \times 6$  oranında kasnaklar eklenmiştir. Bu kodlayıcılardan gelen veriler hem robotun hassas veri ölçümü için hem de kontrolcü yapısına geri besleme girdisi olarak kullanılmaktadır.

2) *İletişim altyapısı:* Her ne kadar Matlab/Simulink Real-Time yazılımı gerçek-zamanlı bir işletim sistemi için gerekli altyapıyı sağlasa da sistemin önemli bir dezavantajı kendisine uyumlu ya da desteği sunulan ürünlerin genellikle piyasada çok pahalı ve temin edilmesi zor ürünler olmasıdır. Bu nedenle bu donanımların yerini alabilecek farklı alternatif donanımların kullanılması ön plana çıkmaktadır. Ancak bu durumda geliştirilen donanım birimlerinin iletişim yapısının Matlab/Simulink Real Time işletim sistemine uyumlu olarak tasarlanması gerekmektedir. Aşağıdaki bölümler geliştirilen robot platformunda kullanılan iletişim altyapılarını detaylandırmaktadır.

a) *CAN:* Şekil. 2 de görüldüğü gibi kalça motorunu sürülebilmek amacıyla Maxon EPOS-2 motor sürücüsü kullanılmaktadır. Maxon EPOS-2 motor sürücüsü USB, RS-232 ve CANopen haberleşme protokollerini desteklemektedir. Simulink Real-Time işletim sisteminde kullanılan USB desteğinin çok sınırlı olması ve RS-232 haberleşme protokolünün istenen veriyi  $1\text{ KHz}$  frekansında aktarmasının mümkün olmaması nedeniyle motor sürücü iletişimi için CANopen protokolünün kullanılmasına karar verilmiştir. Ancak hedef bilgisayar ile motor sürücü arasındaki iletişimin CAN Bus üzerinden CANopen protokolü ile sağlanabilmesi için hedef bilgisayar tarafında Matlab/Simulink uyumluluğu bulunan ve CAN iletişimini destekleyen bir PCI kartı bulunması gerekmektedir. Bu kartlar gerek çok pahalı olmaları gerekse çok sınırlı çeşitlerde olmaları nedeniyle robot platformunun tasarımında tercih edilmemiştir. Ayrıca, böyle bir kart kullanılsa ile yatay ve dikey pozisyon kodlayıcılarından gelen verilerin hedef bilgisayara aktarılabilmesi amacıyla ayrı bir donanıma daha ihtiyaç duyulmaktadır.



Şekil 2. Elektronik altyapı diagramı(Sistem bileşenleri: 268215 parça numaralı Maxon motor, EPOS 2 motor sürücüsü, TI Hercules mikrokontrolcü, hedef ve ana bilgisayarlar)

Bu nedenle yukarıda bahsedilen problemleri çözecek ve hedef bilgisayar ile sistem donanımları (motor sürücüsü, yatay ve dikey kodlayıcılar) arasındaki bağlantıyı sağlayabilecek bir köprü elemanı tercih edilmiştir. Bu amaçla TI-Hercules mikrokontrolcü ünitesinin kullanılmasına karar verilmiştir. Bu mikrokontrolcü CAN Bus girişi bulundurması nedeniyle CANopen protokolü kullanarak motor sürücüsüne komut gönderebilmekte ve motor verilerini alabilmektedir. Aynı zamanda üzerinde bulunan donanımsal kodlayıcı sayaçları sayesinde hedef bilgisayara yük bindirmeden yatay ve dikey dönüş kodlayıcılarını sayarak konum ve hız verilerini oluşturmaktadır.

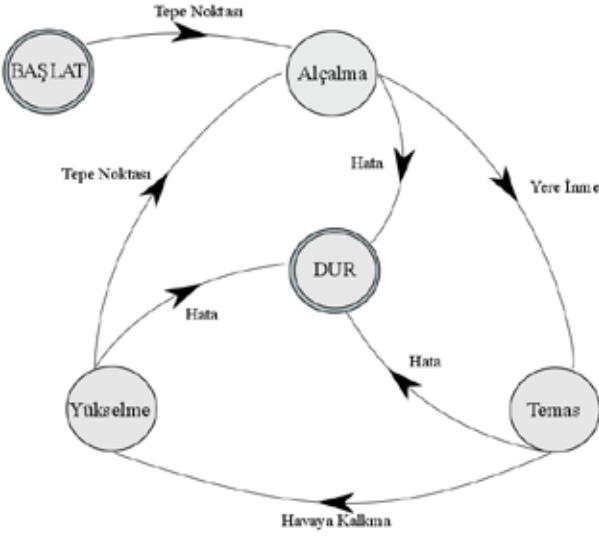
*b) Ethernet:* Yukarıda bahsedildiği üzere TI-Hercules mikrokontrolcüsü hedef bilgisayar ile veri alışverişini yapan diğer donanımların (motor sürücüsü, yatay ve dikey kodlayıcı) arasında bir köprü görevi üstlenmektedir. Burada önemli olan bir nokta ise mikrokontrolçüde toplanan yüksek miktardaki verinin 1 KHz döngü frekansını bozmayacak şekilde hedef bilgisayara aktarılmasıdır. Bu noktada yüksek transfer hızına sahip Ethernet altyapısı üzerinden ana bilgisayar ile mikrokontrolcü iletişiminin sağlanabilmesi hedeflenmektedir. Diğer donanım arayüzlerinde olduğu gibi hedef bilgisayarın bu durumda Matlab/Simulink Real-Time uyumlu bir ethernet kartına sahip olması gerekmektedir. Ancak ethernet kartı seçeneklerinin nispeten daha fazla olması ve fiyatının düşük olması bu seçeneği CAN kartı gibi alternatifler karşısında güçlendirmektedir. Bu nedenle Intel 82559 modellenli ethernet kartı hedef bilgisayara takılarak mikroişlemci ethernet bağlantısı sağlanmıştır.

*c) Wi-fi:* Şekil. 2'de görüldüğü üzere hedef bilgisayar tek bacaklı zıplayan robotun düzlemleyici bölümünde döner eksen üzerine yerleştirilmiştir. Bu bilgisayardan dışarıya veri alınabilmesi için kullanılan arayüzlerin görüntülediği ana bilgisayar ile hedef bilgisayar arasında Wi-fi iletişim protokolü kullanarak veri transferi gerçekleştirilmektedir. Robotun 360 derece döner yapıda olması nedeniyle hedef bilgisayar ile ana bilgisayar arasında kablolu bir ethernet bağlantısı yapılması tercih edilmemiştir. Ancak iki tarafta da ethernet arayüzünü kablosuz arayüze çeviren dönüştürücü modüller kullanarak basit bir şekilde kablosuz iletişim sağlanmıştır.

### III. AÇIK DÖNGÜ KOŞMA TESTİ

Geliştirilen robot platformunun performansını ölçebilmek adına öncelikle bir açık-döngü kontrolcü ile test edilmesi planlanmıştır. YTS modelinin benzetim çalışmalarında görülen en önemli özelliklerinden birisi sistem dinamiklerinin belirli ve sabit bazı açık döngü kontrol parametreleri varlığında kendiliğinden kararlı bir davranışa ulaşarak bir limit çevrimine yakınsamasıdır. Fiziksel dünyadaki model tutarsızlıkları ve gürültüler nedeniyle hassas bir limit çevrimine yakınsama beklenmese de benzer bir davranışın fiziksel robot platformunda da gözlemlenebilmesi beklenmektedir.

Bu amaçla Şekil. 3'de görüldüğü üzere üç ana fazlı bir sonlu durum makinası ile robotun sabit kontrol parametreleri altında açık döngü koşu algoritması gerçekleştirilmiştir. Bu fazlar arasındaki geçişleri sağlayan tepe noktası olayı, robotun dikey hızının sıfıra eşit olduğu ve robotun bulunduğu adımda ulaştığı

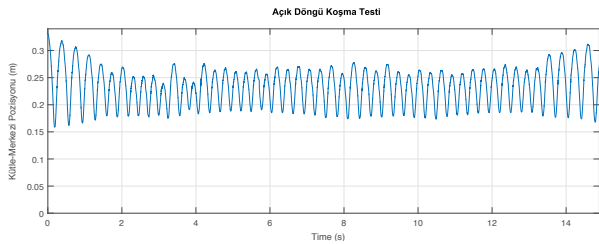


Şekil 3. Açık döngü koşma testi için sonlu-durum makinası

en yüksek noktayı temsil etmektedir. Yere inme olayı ise robot bacağına alçalma hareketi sırasında yere ilk temas ettiği anı, havaya kalkma olayı ise robot bacağına yerden temasının kesilerek yükselmeye başladığı ana karşılık gelmektedir.

Algoritmik olarak gerçekleştirilen açık döngü kontrol testinde tepe noktası esnasında sabit bacak açısı  $25^\circ$  olarak belirlenmiştir. Bu açı alçalma fazı boyunca bir PD kontrolcü yardımıyla sabit tutulup yere inme olayının tetiklenmesiyle beraber PD kontrolcü devre dışı bırakılmaktadır. Temas fazının başlamasıyla birlikte kalça motoru aracılığıyla robota  $8 N$  şiddetinde sabit bir tork profili uygulanmaktadır. Bu tork girdisi robotun yere çarpma ve yaylı sisteminde bulunan sönümlenme elemanı nedeniyle bir adımda kaybettiği enerjiyi sisteme geri aktarma amacıyla kullanılmaktadır. Havaya kalkma olayının gerçekleşmesiyle beraber tork girdisi sıfırlanır ve bacak tepe noktasına ulaşmadan sonraki adıma hazırlanır ve robotta bir hata uyarısı gelinceye kadar periyodik bir şekilde hareket devam eder.

Şekil. 4 robotun belirtilen açık döngü sabit kontrol parametreleri altında elde edilen deneysel yükseklik değerlerini göstermektedir. Görüleceği üzere robot kapalı döngü kontrolü olmaması nedeniyle hassas bir limit çevrimine yakınsayamasa da belirli bir enerji bandında osilasyon yaparak koşu davranışını gerçekleştirebilmektedir. Bu da robotun geliştirilecek kontrol-



Şekil 4. Açık döngü koşma testi robot kütle-merkezi pozisyon verileri

cüler altında bir limit çevrimine yakınsaması için gerekli altyapıyı oluşturmaktadır.

#### IV. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu bildiride YTS modeli için geliştirilen analitik çözümleri kullanan model-tabanlı kontrolcülerin performanslarını araştırmak için tasarladığımız tek bacaklı zıplayan robot platformunun tasarım, yapım ve test aşaması incelenmiştir. Robotun mekanik tasarımında, taban alınan modele fiziksel açıdan uygun olmak esas alınmış ve bu konuda karşılaşılan sorunlara bulunan çözümler anlatılmıştır. Aynı şekilde robotun elektronik tasarımı da detaylı olarak özetlenmiş ve bazı mikrokontrolcü altyapılarının kullanılmasıyla düşük maliyetli olarak nasıl Matlab/Simulink tabanlı gerçek-zamanlı işletim sistemlerinin gerçekleştirilebileceği gösterilmiştir.

Bu çalışmada geliştirilen robotun belirli bir enerji bandından kararlı şekilde koşu davranışını gerçekleştirebildiği gösterilmiştir. Çalışmanın devamı olarak tork girdili YTS modelinin deneysel platform üzerinde doğrulanması ve elde edilen modele bağlı kontrolcülerin geliştirilmesi hedeflenmektedir.

#### KAYNAKÇA

- [1] J. Seipel and P. Holmes, "A simple model for clock-actuated legged locomotion," *Regul. Chaotic. Dyn.*, vol. 12, no. 5, pp. 502–520, 2007.
- [2] M. H. Raibert, *Legged Robots That Balance*. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 1986.
- [3] U. Saranlı, M. Buehler, and D. E. Koditschek, "RHex: A simple and highly mobile robot," *Int. Journal of Robotics Research*, vol. 20, no. 7, pp. 616–631, July 2001.
- [4] M. Raibert, K. Blankespoor, G. Nelson, and R. Playter, "Bigdog, the rough-terrain quadruped robot," *{IFAC} Proceedings Volumes*, vol. 41, no. 2, pp. 10 822 – 10 825, 2008, 17th {IFAC} World Congress.
- [5] W. J. Schwind, "Spring loaded inverted pendulum running: A plant model," PhD Thesis, University of Michigan, Ann Arbor, MI, USA, 1998.
- [6] P. Holmes, "Poincaré, celestial mechanics, dynamical-systems theory and "chaos":," *Physics Reports*, vol. 193, no. 3, pp. 137–163, September 1990.
- [7] I. Uyanık, Ö. Morgül, and U. Saranlı, "Experimental validation of a feed-forward predictor for the spring-loaded inverted pendulum template," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 31, no. 1, pp. 208–216, Feb 2015.
- [8] U. Saranlı, O. Arslan, M. M. Ankaralı, and Ö. Morgül, "Approximate analytic solutions to non-symmetric stance trajectories of the passive spring-loaded inverted pendulum with damping," *Nonlinear Dynamics*, vol. 62, pp. 729–742, December 2010.
- [9] H. Geyer, A. Seyfarth, and R. Blickhan, "Spring-mass running: Simple approximate solution and application to gait stability," *Journal of Theoretical Biology*, vol. 232, no. 3, pp. 315–328, February 2005.
- [10] W. J. Schwind and D. E. Koditschek, "Approximating the stance map of a 2 dof monopod runner," *Journal of Nonlinear Sciences*, vol. 10, no. 5, pp. 533–588, July 2000.
- [11] H. E. Orhon, C. Odabaş, I. Uyanık, Ö. Morgül, and U. Saranlı, "Extending the lossy spring-loaded inverted pendulum model with a slider-crank mechanism," in *2015 Int. Conf. on Advanced Robotics (ICAR)*, 2015, pp. 99–104.
- [12] İ. Uyanık, "Adaptive control of a one-legged hopping robot through dynamically embedded spring-loaded inverted pendulum template," M.Sc., Bilkent University, Ankara, Turkey, August 2011.
- [13] F. Peucker, A. Seyfarth, and S. Grimmer, "Inheritance of slip running stability to a single-legged and bipedal model with leg mass and damping," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics*, 2012, pp. 395–400.

# Manyetik Rezonans Görüntülemesi Uyumlu Seri Elastik Eyleyici Tasarımı ve Kontrolü

Yusuf Mert Şentürk ve Volkan Patoğlu

Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Sabancı Üniversitesi, İstanbul

Email: ymert,vpatoglu@sabanciuniv.edu

**Özetçe** —Bu çalışmada, manyetik rezonans görüntülemesiyle (MRG) uyumlu, Bowden-kablo tahrikli, dönel bir seri elastik eyleyicinin (SEE) tasarımı ve kontrolü anlatılmaktadır. Beynin manyetik rezonans (MR) ile görüntülenmesi sırasında dış etkenlere bağlı olarak ortaya çıkabilen artefaktlar, beyin bölgelerinin etkinleşmesi hususunda yanlış yorumlamalara sebep olmaktadır. Bu sorunun önüne geçebilmek için sunulan eyleyici sadece yalıtılan malzemelerden oluşan bir yapıya, optik algılama sistemine, Bowden-kablolu bir seri elastik tahrik mekanizmasına sahiptir. Kablo tahriği sayesinde MRG ile uyumlu olmayan elektrik motorları, algılama ve kontrol birimleri MR odasının dışına yerleştirilebilmektedir. Bu sayede yüksek manyetik alanın içinde görüntülerde istenmeyen artefakt oluşturma ve güvenlik riskleri ortadan kaldırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler**—MRG uyumluluğu, kablolu tahrik, seri elastik eyleme

## I. GİRİŞ

Robotik rehabilitasyon sistemlerinin gelişip yaygınlaşması, yaşlanan toplumlarda hızla artan fiziksel işlevsizlik sorunlarına; rehabilitasyon seansları esnasında insan tarafından sağlanması zor olan hareket tekrarları, hareketlerin standartlaştırılması ve hasta performansının ölçülebilir hale getirilmesi yönlerinden çare olmaktadır. Bu tip bir çok cihazın geliştirilmesiyle beraber robotik terapinin etkinliğini garanti etmek ve terapi prosedürünü eniyilemek de önemli bir araştırma konusu olmuştur.

MRG esnasında sorunsuz olarak çalışabilecek cihazların geliştirilmesiyle, rehabilitasyon sırasında hastanın sensorimotor korteksinin aktifleşmesi gözlemlenebilir ve gözlemler sonucunda tedavinin etkililiği hakkında bilgi edinilebilir. Böylece kişiye özel rehabilitasyon rutinleri belirlenerek, hastanın kendi fiziksel işlevsizlik sorununa özgü çözümler bulunabilir.

MR odasında kullanılacak materyaller, algılama ve eyleme metodları sınırlıdır [1]. MRG sırasında kullanılacak cihazın çift yönlü uyumluluğu sağlanmalıdır. Yani cihazın görüntüleme işlemi etkilememesi ve aynı zamanda cihazın çalışmasının MRG makinesi içindeki yüksek ve değişken manyetik alandan etkilenmemesi gerekmektedir. Cihazların güvenlik açısından kesinlikle ferromanyetik materyaller içermemesi ve MR görüntü kalitesinin düşmemesi için yapılarında iletken malzemeler bulundurmaması tercih edilmektedir.

Literatürde çift yönlü uyumluluğu sağlamak için bir çok eyleme ve algılama metodu kullanılmıştır. Bunlar gerçekle-

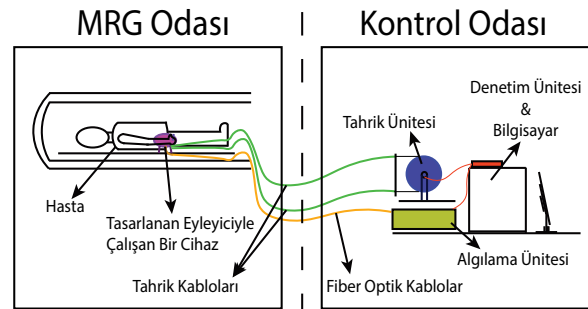
tirilen MRG uyumluluk testlerinde yeterli performans gösteren cihazlardır fakat elektromanyetik akışkanlarla ve partikül sıkıştırması gibi özgün yöntemlerle tahrik edilen cihazlar aktif olarak tahrik edilemedikleri sadece empedans özellikleri gösterebilmeleri, elektrostatik motorlar elektrik alan oluşturmaları, hidrolik eyleyiciler yüksek sürtünmeden dolayı performans kaybı ve yüksek basınç gerekliliği, pnömatik eyleyiciler gazın sıkışması dolayısıyla etkin kuvvet kontrolü yapamadıkları, ultrasonik motorlar yüksek maliyetli oluşları ve yapılarında iletken maddelerin bulunması dolayısıyla tarafımızdan tercih edilmemiştir. [2]–[6]

Bu bildiriye sunulan cihaz; Bowden-kablosuyla tahrik edilen, esnek eleman olarak iletken olmayan yaprak yayların, yayların esnemesini ölçmede özel olarak geliştirilen optik enkoderlerin kullanıldığı özgün bir SEE' dir. Bu tasarım kuvvet geri-bildirim kabiliyeti, MRG uygulamalarında çift yönlü uyumluluğu tamamen sağlaması, literatürdeki diğer cihazlara göre düşük maliyetli olması ve güvenliliği açısından tercih edilmiştir. Bu çalışma [7]' de sunulan bildirinin özeti niteliğindedir.

## II. MRG UYUMLU TASARIM

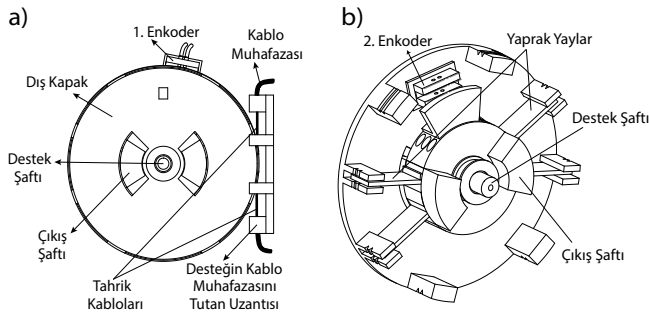
### A. Cihaza genel bakış

Cihazda MR odasına girecek olan materyaller tamamen MRG ile uyumlu olup, uyumlu olmayan elektrik motoru, sinyal işleme ve algılama üniteleri, denetim üniteleri ve bilgisayar MR odasının dışına konumlandırılmıştır. Şekil 1'de görüldüğü gibi, iki odadaki üniteler arasındaki tahrik iletimi kablolarla, bilgi alışverişi ise fiber optik kablolarla sağlanmaktadır. Doğru akım motoru ve diğer tahrik elemanlarının cihazdan ayrılması ise cihazın kütle ve boyutunu büyük ölçüde düşürerek MR makinesine rahatlıkla yerleştirilebilmesine olanak sağlamaktadır.



Şekil 1: Önerilen sistemin MRG odasına göre konumlandırılması

Bu çalışma, Sabancı Üniversitesi ve 115M698 numaralı Tübitak projesi tarafından kısmi olarak desteklenmiştir.



Şekil 2: a) Yandan görünüş b) İçten görünüş

### B. Mekanik Tasarım ve Malzeme Seçimi

Cihazın kapaklı bir yapısı olduğundan, iç yapının anlaşılabilmesi için Şekil 2’de cihazın farklı açı ve kesitlerden görüntüsü verilmiştir. Muhafaza içerisindeki kabloların hareket ettirdiği dış kapak istenen pozisyon verisine göre hareket etmektedir. Bu kapağa esnek elemanlarla bağlı olan çıkış şaftı üzerinde tork olmaması durumunda kapakla birlikte hareket etmekte, tork olduğu durumda esnek elemanlarda esneme gerçekleşmektedir. Esneme kapak ve çıkış şaftı arasında göreceli pozisyon değişikliğine neden olmakta bu da enkoder yardımıyla ölçülmektedir. Bütün sistem dışarıdan sıkıca desteklenmiş bir şaftın üzerinde dönel şekilde hareket etmektedir.

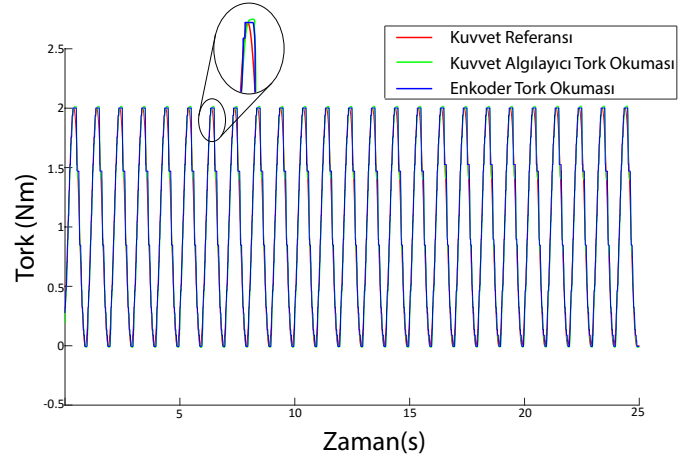
Cihazın kapak ve destek parçaları MRG uyumluluğu bilinen PLA malzemesinden üretilmiştir. Rulmanlar seramik, enkoderler delrin, yaprak yaylar ise Garolite malzemedendir. Kullanılan bütün malzemelerin seçiminde yalıtkanlığa ve malzemelerin kendi hacimleri dışında manyetik dalgalarla etkileşmemesine dikkat edilmiştir.

### C. MRG Uyumlu Fiberoptik Enkoder Tasarımı

SEE’ nin etkin bir şekilde çalışabilmesi için iki adet pozisyon ölçümüne ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle cihazda iki adet fiberoptik MRG uyumlu enkoder tasarlanıp kullanılmıştır. Birinci enkoder cihazın dönme miktarını ölçerken, ikinci enkoder esnek elemanda oluşan şekil değişimini ölçerek dönel eyleyicinin üstündeki torku belirlemektedir. Enkoderler basitçe yüksek hassasiyetle karşılıklı olarak açılmış delik çiftlerine karşılıklı olarak takılan fiber optik kablolar ve bu kablo çiftlerinin arasından geçen enkoder şeridinden oluşmaktadır. Encoder sinyalleri ışığın kablo, hava, enkoder şeridi arasında kırılması dolayısıyla oluşan gürültüyü yok etmek için tasarlanan sinyal işleme ünitesinde işlendikten sonra denetleme ünitesine gönderilmektedir.

### D. Denetleyici Tasarımı

Cihazın denetiminde seri elastik eyleyicilerde sıklıkla kullanılan iç içe geçmiş denetleme mimarisi kullanılmıştır. İçerideki döngüde motorun dinamiklerini ortadan kaldırarak ideal bir hız kaynağı gibi davranmasını sağlayan ve dışarıdaki döngüye göre hızlı bir hız denetimi, dışarıda ise kuvvet denetimini gerçekleştiren bir denetleyici vardır. Bu mimarinin detayları [8]’ de incelenebilir.



Şekil 3: Cihazın kuvvet takip performansı

## III. SONUÇ

Bu çalışmada sunulan eyleyicinin el bileği rehabilitasyonu için gerekli olan 1 Hz tork bant genişliğine, 2 N-m’ye kadar devamlı ve kararlı tork çıkışına ve 0.05 Nm tork algılama çözünürlüğüne sahip olduğu deneylerle doğrulanmıştır. Aynı zamanda cihaz modüler yapısı sayesinde hacimsel veya mekanik özellikleri bakımından rahatlıkla ölçeklendirilebilir ve istenen başka uzuvların rehabilitasyonuna uygun hale getirilebilir. Buna ek olarak eyleyicilerden birkaçı bir araya getirilerek çok serbestlik derecesine sahip bir rehabilitasyon robotunun tahriği gerçekleştirilebilir. Tasarımın MRG uyumlu materyallerle yapılmış olması sayesinde cihaz görüntüleme sırasında olabildiğince az gürültü üretecek ve görüntülerde mümkün olan en az artefakta neden olacaktır. Cihazın MRG uyumluluk testleri ve eniyilemesini devam etmekte olan çalışmalarımız arasındadır.

## KAYNAKLAR

- [1] R. Gassert, E. Burdet, and K. Chinzei, *Opportunities and challenges in MR-compatible robotics*, Engineering in Medicine and Biology Magazine, IEEE, vol. 27, no. 3, pp. 15–22, 2008.
- [2] S. Menon, A. A. Stanley, J. Zhu, A. M. Okamura, and O. Khatib, *Mapping stiffness perception in the brain with an fMRI-compatible particle jamming haptic interface*, Engineering in Medicine and Biology Magazine, IEEE, pp. 2051–2056, 2014.
- [3] R. Gassert, E. Burdet, and K. Chinzei, *Development of a 2-dof electrostatic haptic joystick for MRI/fMRI applications*, IEEE International Conference on Robotics and Automation, IEEE, pp. 1479–1484, 2009.
- [4] R. Gassert, R. Moser, E. Burdet, and H. Bleuler, *MRI/fMRI-compatible robotic system with force feedback for interaction with human motion*, IEEE ASME Transactions on Mechatronics, vol. 11, no. 2, p. 216, 2006.
- [5] N. Yu, C. Hollnagel, A. Blickenstorfer, S. S. Kollias, and R. Riemer, *Comparison of MRI-compatible mechatronic systems with hydrodynamic and pneumatic actuation*, IEEE ASME Transactions on Mechatronics, vol. 13, no. 3, pp. 268–277, 2008.
- [6] M. A. Ergin, M. Kühne, A. Thielscher, and A. Peer, *Design of a new MR-compatible haptic interface with six actuated degrees of freedom*, 5th IEEE RAS/EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, IEEE, pp. 293–300, 2014.
- [7] Y.M Şentürk ve V. Patoğlu, *Manyetik Rezonans Görüntülemesi Uyumlu Seri Elastik Eyleyici Tasarımı ve Kontrolü*, Otomatik Kontrol Türk Milli Komitesi Ulusal Toplantısı, TOK, 2016.
- [8] A. Erdogan, B. Celebi, A. C. Satici, and V. Patoglu, *Assist on-ankle: a reconfigurable ankle exoskeleton with series-elastic actuation*, 5th IEEE RAS/EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, IEEE, pp. 293–300, 2014.

# Experimental Evaluation of Hybrid Conditional Planning for Service Robotics

Ahmed Nouman, Volkan Patoglu, Esra Erdem  
Sabanci University, Istanbul, Turkey

Email: ahmednouman,vpatoglu,esraerdem@sabanciuniv.edu

**Abstract**—We introduce a novel method for hybrid conditional planning and investigate its usefulness for service robotics, by means of a set of experiments over dynamic simulations, from the perspectives of computational efficiency.

**Keywords**—conditional planning, hybrid planning, motion planning, task planning.

## I. INTRODUCTION

Conditional planning is concerned with planning the actuation actions of robots to achieve their goals in the presence of incomplete information and sensing actions [12, 15]. It is one of the most general and also one of the hardest planning problems studied in the literature [7, 17].

Despite such a high complexity, we can see a variety of work on conditional planning that has led to some online conditional planners, such as CLG [1], K-Planner [2], SDR [3] and HCP [9], and offline conditional planners, such as Contingent-FF [8], POND [4], PKS [13, 14] and CLG (offline version). Online computation of conditional plans is generally easier than offline planning because integrating online sensing with planning eliminates the need to plan for a potentially exponential number of contingencies; on the other hand, the goal may not be reached even if it is possible. Offline computation constructs conditional plans with decision points for sensing outcomes, and guarantees that the goal is reached if possible; the plan is more general since it can deal with alternative sensing outcomes. In this work, we focus on offline conditional planning.

The work on offline conditional planning can be summarized mainly in two groups. Search-based approaches view the conditional planning problem as a non-deterministic search problem in belief space and build planners (e.g., as in Contingent-FF, PKS, POND) utilizing search algorithms (e.g., forward search, heuristic search). Compilation-based approaches solve conditional planning problems utilizing classical planners. The idea is to compile “non-deterministic search problem in belief space” into “non-deterministic problem in state space” (e.g., as in CLG).

We introduce a novel offline compilation-based hybrid conditional planning method, which extends hybrid sequential planning with nondeterministic sensing actions and utilizes this extension to compute branches of a conditional plan in parallel. We evaluate its usefulness for service robotics, by means of a set of experiments over dynamic simulations, from the perspectives of computational efficiency.

This extended abstract is a summary of our paper [11] presented at the 2016 International Symposium on Experimental Robotics.

## II. TECHNICAL APPROACH

Our method first computes a hybrid sequential plan (if it exists) of actuation actions and sensing actions from an initial state to a goal state along with plan history using CCalc [10], where these two sorts of actions are described in action description language  $\mathcal{C}+$  [6]. This plan serves as the initial branch of a tree that characterizes a hybrid conditional plan. Next, from the root of the initial branch up to the leaf, for all the sensing actions and for all their possible outcomes new trees are computed recursively in order to construct a hybrid conditional plan. It is important to note that all these branches are computed in parallel in order to make the approach scalable with respect to time. Our approach also checks for necessary feasibility checks (e.g. collision checks, graspability, inverse kinematics) for each step while it is being computed in order to make sure that the generated hybrid conditional plans are feasible.

In the end, if the computed hybrid conditional plan has a maximum branching factor  $b$  and the maximum depth  $d$ , the conditional plan has at most  $b^d$  leaves. Therefore, our hybrid conditional planner calls the hybrid sequential planner CCalc at most  $b^d$  times to compute the branches of the conditional plan. Our method is generic and applicable to any robotic action domain with actuation actions and sensing actions.

## III. CASE STUDY

To demonstrate the feasibility and evaluate usefulness of our approach for complex robotics domains, we consider a service robotics scenario, where a bimanual mobile manipulator is responsible for setting up a kitchen table, as depicted in Figure 2 and dynamic simulation Figure 1. The mobile manipulator can navigate around the kitchen to pick up and place objects as long as collision free trajectories exist. Kitchenware, such as mugs, spoons, knives, plates may be found in cabinets or may be left on other flat surfaces, such as counter tops or shelves. In the kitchen, there also exists a faucet to clean kitchenware as required. Finally, there is a kitchen table, where the proper kitchenware must be placed on to comply with table setting etiquette.

For the table set-up scenario, four actuation actions are considered in our domain: *goto*, *pickup*, *placeon* and *clean*. Note that, in hybrid planning the feasibility of these actions needs to be checked. A probabilistic motion planner (based on



Figure 1. The robot is picking up a bowl from Cabinet B in dynamic simulator.

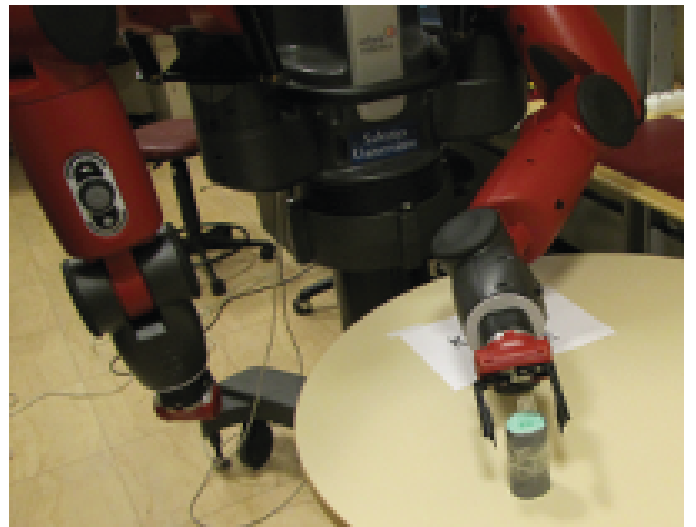


Figure 2. The robot is picking up an object from Cabinet B and placing it on kitchen table.

OMPL [16]) is used to implement the precondition of *goto* action, while reachability, graspability and inverse kinematics checks (based on OpenRAVE [5]) are implemented as preconditions of *pickup* and *placeon* actions.

Note that the environment is not completely observable during planning. Three types of possible sources of uncertainties are considered in this domain. First, the person might have different lunch preferences (soup, pizza, salad), which can only be revealed when directly communicated with the user during plan execution; that is, this information is not available for planning ahead of time. This uncertainty directly affects the plan, as the kitchenware to be placed on table varies based on the type of the meal (e.g., spoon and bowl are required for having soup, while these kitchenware are irrelevant for eating pizza). Second, the locations of kitchenware are uncertain and might not be known by the robot during the planning phase. These locations can be reliably gathered only if the robot actively searches for these objects when it needs to use them. Third, the cleanliness/dirtiness of the objects may not be known for sure. Along these lines, three sensing actions and information gathering are considered in our domain: *checkFoodType*, *checkLoc* and *checkisClean*. The first action *checkFoodType* is used to determine the type of food the user desires. The sensing action *checkLoc* is utilized

to resolve the uncertainty of the locations of kitchenware. Finally, *checkisClean* is introduced to determine cleanliness of kitchenware.

#### IV. EXPERIMENTAL EVALUATION

To evaluate our hybrid conditional planner, we consider 12 different scenarios in the kitchen table setting domain. These test scenarios are developed by varying initial setting, goal settings and possible uncertainty about the environment. The scenarios vary from simple ones with less partial observability to complex ones where the robot is very uncertain about its initial state. All experiments are performed on a Linux server with 32 2.4GHz Intel E5-2665 CPU cores and 64GB memory. For large problem instances, all 32 cores are utilized, while the experiments never require more than 3.5GB memory.

We evaluate the scalability of our approach to hybrid conditional planning over the 12 instances. The results are shown in Table I. For each instance, the total number  $L$  of leaves in the tree (i.e., the number of different hybrid sequential plans from an initial state to a goal state), the maximum length  $D_{max}$  of a branch from the root to a leaf (i.e., the maximum length of a hybrid sequential plan that can be executed by the robot) and the number  $A$  of actuation actions and the number  $S$  of sensing actions in that branch, the total number  $DN$

Table I. HYBRID CONDITIONAL PLANNING RESULTS

No.	$D_{max}(A+S)$	$BF_{max}(BF_{av})$	$L$	$DN$	$N$	Time
1	22 (18+4)	4 (3.33)	36	15	307	8.74
2	29 (25+4)	4 (2.21)	24	19	284	14.64
3	34 (29+5)	4 (2.16)	52	44	524	18.08
4	32 (27+5)	4 (2.98)	112	56	1280	22.64
5	37 (31+6)	4 (2.11)	144	129	1364	27.16
6	34 (28+6)	4 (2.35)	392	290	4795	48.08
7	36 (30+6)	4 (2.25)	272	216	2832	34.00
8	35 (29+6)	4 (2.24)	400	322	4057	46.44
9	40 (32+8)	4 (2.18)	1792	1516	17902	152.86
10	40 (32+8)	4 (2.20)	1984	1651	19553	167.55
11	40 (32+8)	4 (2.21)	2176	1797	21063	175.12
12	43 (34+9)	4 (2.13)	3968	3518	34001	271.41

of decision nodes that denote sensing actions, the maximum branching factor  $BF$  (i.e., the maximum number of sensory outcomes), and the total number  $N$  of nodes in the tree (i.e., the size of the tree) are reported.

Considering that the intractability of conditional planning is beyond NP-hard, as expected, both the size of the hybrid conditional plan and the computation time increase as the problems require longer and more branches. For Instance 12, a hybrid conditional plan including 34001 actions is computed in 271.41 seconds. Note that the hybrid conditional plan for Instance 12 represents 3968 different ways of reaching a goal under partial observability. Therefore, about 0.07 seconds is spent for each hybrid sequential plan of average length 40.

## V. CONCLUSIONS

We have introduced a novel hybrid conditional planning method, which extends hybrid sequential planning with nondeterministic sensing actions and utilizes this extension to compute branches of a conditional plan in parallel. We have applied it to a robotics applications, where a mobile service robot sets up a kitchen table under partial observability. We have empirically evaluated our algorithm over various scenarios in this domain.

*Acknowledgments.*: This work is partially supported by TUBITAK Grant 114E491 (Chist-Era COACHES).

## REFERENCES

- [1] Alexandre Albore, Héctor Palacios, and Hector Geffner. A translation-based approach to contingent planning. In *Proc. of IJCAI*, pages 1623–1628, 2009.
- [2] Blai Bonet and Hector Geffner. Planning under partial observability by classical replanning: Theory and experiments. In *Proc. of IJCAI*, pages 1936–1941, 2011.
- [3] Ronen I. Brafman and Guy Shani. Replanning in domains with partial information and sensing actions. *JAIR*, 45: 565–600, 2012.
- [4] Daniel Bryce, Subbarao Kambhampati, and David E. Smith. Planning graph heuristics for belief space search. *JAIR*, 26:35–99, 2006.
- [5] Rosen Diankov. *Automated Construction of Robotic Manipulation Programs*. PhD thesis, Carnegie Mellon University, Robotics Institute, August 2010.
- [6] Enrico Giunchiglia, Joohyung Lee, Vladimir Lifschitz, Norman McCain, and Hudson Turner. Nonmonotonic causal theories. *Artif. Intell.*, 153:49–104, 2004.
- [7] Patrik Haslum and Peter Jonsson. Some results on the complexity of planning with incomplete information. In *Proc. of ECP*, pages 308–318, 1999.
- [8] Jorg Hoffmann and Ronen I. Brafman. Contingent planning via heuristic forward search with implicit belief states. In *Proc. of ICAPS*, pages 71–80, 2005.
- [9] Shlomi Maliah, Ronen I. Brafman, Erez Karpas, and Guy Shani. Partially observable online contingent planning using landmark heuristics. In *Proc. of ICAPS*, 2014.
- [10] Norman McCain and Hudson Turner. Causal theories of action and change. In *Proc. of AAAI/IAAI*, pages 460–465, 1997.
- [11] Ahmed Nouman, Ibrahim F. Yalciner, Esra Erdem, and Volkan Patoglu. Experimental evaluation of hybrid conditional planning for service robotics. In *Proc. of ISER*, 2016.
- [12] M. A. Peot and D. E. Smith. Conditional nonlinear planning. In *Proc. of AIPS*, pages 189–197. 1992.
- [13] Ronald P. A. Petrick and Fahiem Bacchus. A knowledge-based approach to planning with incomplete information and sensing. In *Proc. of AIPS*, pages 212–222, 2002. URL <http://www.aaai.org/Library/AIPS/2002/aips02-022.php>.
- [14] Ronald P. A. Petrick and Fahiem Bacchus. Extending the knowledge-based approach to planning with incomplete information and sensing. In *Proc. of ICAPS*, pages 2–11, 2004. URL <http://www.aaai.org/Library/ICAPS/2004/icaps04-005.php>.
- [15] Louise Pryor and Gregg Collins. Planning for contingencies: A decision-based approach. *JAIR*, 4:287–339, 1996.
- [16] Ioan Alexandru Sucan, Mark Moll, and Lydia E Kavraki. The open motion planning library. *Robotics & Automation Magazine, IEEE*, 19(4):72–82, 2012.
- [17] Hudson Turner. Polynomial-length planning spans the polynomial hierarchy. In *Proc. of JELIA*, pages 111–124, 2002.

# Robotların Deneyimlerinden Sembolik Sayısal Kısıtları Öğrenmesi

Gokhan Solak, Abdullah Cihan Ak, Sanem Sariel  
Yapay Zeka ve Robotik Laboratuvarı  
Bilgisayar Mühendisliği Bölümü  
İstanbul Teknik Üniversitesi  
İstanbul, Türkiye  
Email: {solakg,akab,sariel}@itu.edu.tr

**Özetçe**—Bu çalışmada, robotların sembolik seviyedeki sayısal kısıtları öğrenilmesi için tümevarımlı mantık programlamaya (TMP) dayalı bir deneyim-tabanlı öğrenme yaklaşımı önerilmektedir. Çalışmada uzman bilgisini asgari seviyede tutacak yöntemlerin geliştirilmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla, gözlemlerden sayısal kısıtların türetilmesi için tembel değerlendirme bazı bir kısıt öğrenme yöntemi sunulmaktadır. TMP sistemi, bilinen bir kısıt çözücü ile geliştirilerek sembolik seviyede kısıtların öğrenilmesi sağlanmaktadır. Sunulan yöntemin, örnek senaryolar üzerinde mevcut yöntemlerin başarısız olduğu durumlar için de çözüm üretebildiği gösterilmiştir. Deney sonuçları, önerilen yöntem sayesinde robotun kendi gözlemlerini kullanarak sayısal kısıtları öğrenebileceğini göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler**—deneyim-tabanlı öğrenme, tümevarımlı mantık programlama, robotlarda sayısal akıl yürütme

## I. GİRİŞ

Robotlar görev yürütme esnasında değişik kısıtlar ile karşılaşır. Bu kısıtların çözülmesi, görevlerin başarıyla yürütülmesi için gereklidir. Bu kısıtlar alan uzmanları tarafından önceden belirlenebileceği gibi robotun kendisi tarafından da öğrenilebilir. Bu çalışmada, robotun ortamdaki kısıtları sembolik seviyede öğrenmesi üzerine yoğunlaşmıştır.

Kısıtların öğrenilmesi, robotun çalışma esnasında topladığı gözlemler aracılığıyla mümkün olur. Tasarımcı tarafından tanımlanan modeller kullanılmadığında, robotların hata durumlarında kısıtları keşfetmeleri gerekebilir. Robotların hata durumlarını deneyimler yoluyla öğrenmeleri için mevcut yöntemler bulunmaktadır [1]. Bahsedilen çalışmada, başarılı ve hatalı sonuçlara sahip eylemler Tümevarımlı Mantık Programlama (TMP) kullanılarak sınıflandırılmıştır. TMP, veri kümesindeki ilişkisel öznitelikleri ortaya çıkarabilen bir makine öğrenmesi yöntemidir ve hata koşullarının öğrenilmesi konusunda umut verici sonuçlar verdiği gösterilmiştir [1]. Ancak, bu yöntem belirli sayısal kısıtların alan uzmanları tarafından verilmesini gerektirir. Bu gereklilik TMP'nin sayısal çıkarsama eksikliğinden kaynaklanmaktadır. Önerilen yöntem, sayısal kısıtların insan gözetmenliği olmaksızın öğrenilmesini hedeflemektedir.

TMP'de sayısal muhakeme uzun geçmişi olan bir araştırma konusudur. Genel yaklaşım, alan uzmanları tarafından tanımlanan sembollerin bilgi birikimi (background knowledge) içerisinde kullanılmasıdır. Örneğin, *kısa* yüklemi bilgi biriki-

minde ' $kısa(X) :- X < 5$ ' Prolog cümlesi ile tanımlanırsa, TMP bu yüklemi kullanarak hedef kavramı öğrenebilir.

Ancak, uzman bilgisi kullanmanın bazı olumsuz yönleri vardır. Birincisi, bir gözetmenin gerekli ilişkileri öngörmesi ve sayısal değerleri hesaplaması gerekir. Bu gereklilik robotu gözetmene bağımlı kılar. Dahası, gözetmen gerekli ilişkileri gözden kaçırabilir ya da hesaplamalarda hata yapabilir.

İkincisi, aynı tipte ilişki farklı bağlamlarda farklı değerler alır. Örneğin, bir yük gemisine konteynır yerleştirme bağlamında, 2-3 metre *kısa* bir mesafedir. Ancak, masa üstünde küp yerleştirme bağlamında, kısalık değeri çok daha küçüktür. Bu kısıttan yola çıkarak, yapısal olarak benzer ancak ölçek olarak farklı olan bağlamlar için farklı bilgi birikimleri kullanılması gerektiği söylenebilir. Eğer sayısal değerlerin robot tarafından türetilmesi sağlanırsa tek bir bilgi birikiminin her iki bağlam için de yeterli olması mümkün hale gelebilir.

Bu çalışmada, sayısal ilişkilerin bir alan uzmanı tarafından tanımlanmasına gerek duyulmaksızın robotların hata koşullarını genelleştirebildiği bir yöntem sunulmaktadır. Bu yöntemin geliştirilebilmesi için, sayısal ilişkilerin TMP muhakeme prosedürüne dahil edilmesi konusunda var olan çalışmalardan yararlanılmıştır. Bu çalışma 16. IEEE-RAS Uluslararası İnsansı Robotlar Konferansında sunulacaktır [2].

Önerilen yöntem, ters gerektirmeye [3] dayalı bir TMP sistemi olan Aleph [4] üzerinde gerçekleştirilmiştir. Kısıt Tümevarımlı Mantık Programlama'ya (KTMP)[5] benzer şekilde bir kısıt çözücünden yararlanılarak ve TMP şablonunda nitelik esaslı prosedürlerin çalıştırılması için geliştirilen tembel değerlendirme [6] yönteminin kısmen değiştirilmiş bir hali kullanılarak Aleph sistemine eklemeler yapılmıştır.

Bir sonraki bölümde (II), sayısal kısıtların sembolik kurallar dâhilinde öğrenilmesi problemi sunulmuştur. III. bölümde, bu problemin çözümüyle ilgili öncül çalışmalar tartışılmıştır. Önerilen yöntem baz alınan yöntemlerle birlikte IV. bölümde açıklanmıştır. Yapılan deneyler V. bölümde anlatılmıştır ve sonuç bölümüyle bildiri sonlandırılmıştır.

## II. PROBLEM TANIMI

Robotların, sembolik seviyede sayısal kısıtlar içeren kuralları, bilgi birikiminde öntanımlı sayısal ilişkiler gereksiz öğrenmesi amaçlanmaktadır. Bunu yapabilmek için, sistem gerekli sayısal ilişkileri gözlemlerden çıkarsayabilmelidir.

Verilen belirli gözlemlerden genel bir teori öğrenilmesi için TMP yöntemi kullanılmaktadır. TMP verilen bilgi birikimini öğrenme sürecinde kullanabilir. Öğrenme için kullanılan gözlemler pozitif örnekler  $E^+$  ve negatif örnekler  $E^-$  olarak adlandırılır ve Mantık Programlama (MP) ile ifade edilir. Aynı şekilde MP ile ifade edilen bilgi birikimi  $\mathcal{B}$ , hem dünya durumunu hem de robotun alan bilgisini içerir.  $\mathcal{B}$  ve  $E$  kullanılarak, kavram hakkında genel kuralları temsil eden bir hipotezler kümesi  $\mathcal{H}$  öğrenilir (1).

$$\mathcal{B} \wedge \mathcal{H} \models E. \quad (1)$$

Bazı kavramları öğrenebilmek için sayısal ilişkilerin hipoteze eklenmesi gerekir. Bu çalışmada kavramların önceden tanımlanan sayısal ilişkilere gerek duyulmadan öğrenilmesi hedeflenmektedir. Bu çalışmada pozitif örnekler hatalı eylemleri, negatif örnekler başarılı eylemleri temsil etmektedir.

### III. LİTERATÜR ÖZETİ

Öğrenme ile robot sistemlerinin uzman bağımlılığı olmadan hatalardan deneyim kazanması sağlanabilir. Robotların deneyimlerinden öğrenmesi pekiştirmeli öğrenme veya [7] gözetimli/gösterimden öğrenme yoluyla sağlanabilir [8]. Bu yöntemler karmaşık sayısal kısıtların nitelik esaslı olarak öğrenilmesini mümkün kılar. Ancak, nitelik esaslı yaklaşım etkileşim içeren görevlerin gerekliliklerini çoğunlukla karşılayamaz. Bunun birinci sebebi, nitelik esaslı yaklaşımın ilişkisel bilgilerin ifade edilmesi için elverişsiz olmasıdır. Ayrıca [9]'da ve [10]'de belirtildiği gibi, nitelik esaslı öğrenme algoritmaları bilgi birikimi desteği ve bilgi aktarımı konularında yeterli olamamaktadır.

Tümevarımlı Mantık Programlama (TMP) gibi ilişkisel öğrenme yöntemleri tarafından öğrenilen sembolik kurallar bu eksiklikleri aşar [1]. Öte yandan, TMP algoritmalarının sayısal muhakeme yetenekleri nitelik esaslı öğrenme algoritmaları kadar iyi değildir. TMP ile sayısal muhakeme konusundaki ilk yaklaşımlardan biri sayısal ilişkilerin ön bilgi olarak verilmesidir [11]. [5] sayısal kısıtların öğrenilmesi için bir kısıt çözücü kullanır. [6] nitelik esaslı algoritmaların TMP süreci içerisinde yürütülmesi için bir *tembel değerlendirme* yaklaşımı kullanır. [12]'de kısıt öğrenme gibi özel amaçlı muhakeme yöntemlerinin TMP'ye dahil edilmesi faydalı bir gelişme olarak gösterilmiştir.

Bu çalışmada sayısal kısıtların sembolik seviyede öğrenilmesi için bir TMP sisteminin geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Sistemin bu kısıtları öğrenirken dünya durumunu tanımlayan bir semboller kümesi kullanılması sağlanacaktır. Bu semboller, uzmanlar tarafından tanımlanabileceği gibi deneyimsel öğrenme yöntemleri ile de üretilebilir [13], [14].

### IV. DENEYİMLERDEN KISIT ÖĞRENME

Geliştirilen yöntemde Aleph TMP sistemi [4] baz alınmıştır. Bu sistem, tembel değerlendirme ile TMP araması sırasında sayısal kısıtları otomatik olarak türeten bir kısıt çözücü kullanan bir kısıt öğrenme sistemi ile genişletilmiştir. Tembel değerlendirmenin, [6]'nın çalışmasında önerilene benzer şekilde yapılması planlanmıştır. Kısıt çözücü olarak CLP(FD) kütüphanesinin [15] YAP-Prolog uyarlaması kullanılmıştır.

İlerleyen alt bölümlerde, kısıt öğrenme problemini çözmek için geliştirilen yöntem ve baz alınan önceki çalışmalar tanıtılmaktadır. İlk üç altbaşlıkta baz alınan yöntemler, dördüncü altbaşlıkta önerilen geliştirmeler sunulmaktadır.

#### A. Ters Gerektirme

Aleph sisteminin temelinde ters gerektirme [3] vardır. Ters gerektirmede, bir aday hipotezde bulunabilecek tüm terimler, *taban cümlesi*  $\perp$  isimli bir cümleye eklenir. En az bir pozitif örneği kapsayan her hipotezin taban cümlesini kapsamaması gerektiği gösterilmiştir. Bundan yola çıkarak, hipotez araması sadece  $\perp$ 'ın alt kümeleri üzerinde yapılarak, aşağıdan daraltılmış bir arama uzayı elde edilir.

Bu teori kullanılarak, Aleph tarafından yapılan tümevarım iki aşamaya bölünmüştür. Her pozitif örnek için önce *doyurma* aşamasında taban cümlesi oluşturulur, sonra *indirgeme* aşamasında taban cümlesinin alt kümeleri aranır. Arama sırasında her alt kümeye kapsadıkları pozitif ve negatif örnek sayısına ve alt kümenin büyüklüğüne göre bir skor verilir. İndirgeme aşamasının sonunda en iyi skora sahip cümleler seçilir. Seçilen hipotezin kapsadığı tüm pozitif örnekler gözlem kümesinden çıkarılır ve geri kalan pozitif örnekler için yukarıdaki aşamalar tekrarlanır.

#### B. Tembel Değerlendirme

Sayısal ilişkilerin TMP içerisinde kullanılabilmesi için tembel değerlendirme isimli bir yöntem önerilmiştir [6]. Tembel değerlendirmede, bazı nitelik esaslı algoritmalar artalan yüklem (background predicate) olarak tanımlanır. Nitelik esaslı algoritmaların doğası TMP algoritmalarınınkinden farklı olduğu için [6]'nın çalışmasında bu yüklem (background predicate) değerlendirilmesi için farklı bir yordam sunulmuştur.

Nitelik esaslı fonksiyon yüklem (background predicate) bilgisi birikiminde *tembel değerlendirilecek* olarak işaretlenir. Bu yüklem (background predicate) ortak bir yapıya sahiptir; hepsinin girdi ve sabit tiplerinde argümanları vardır. Girdi argümanları, hipotez cümlesindeki diğer terimlerden gelen değerleri alır. Sabit argümanları ise bu fonksiyon tarafından değerlendirilir. Sabitler doyurma aşamasında henüz değerlendirilmezler. Bunların değerlendirilmesi indirgeme aşamasında, aday hipoteze eklendikleri zaman yapılır.

Örneklerin tekil olarak genellendiği TMP'nin aksine, nitelik esaslı algoritmalarda bütün pozitif ve negatif örnekler birlikte değerlendirilir. Bu yüzden, bir aday hipotez oluşturulduğunda, tembel değerlendirilecek olan yüklem (background predicate) tüm pozitif ve negatif örnekler için alabileceği girdiler bir küme halinde verilir. Bunun için yazının geri kalanında *argüman toplama* olarak bahsedilecek bir işlem yapılır. Argüman toplama için aday hipotezin baş kısmı tek tek bütün örneklerle bütünlüştürülür. Hipotezin gövde kısmı ise  $\mathcal{B}$ 'nin içerdiği olgularla eşleştirilerek her ihtimal argüman kümesine eklenir.

Tembel değerlendirilen yüklem (background predicate) tüm örneklerden gelen girdileri alarak sabitleri hesaplar. İndirgeme aşaması normal bir şekilde devam eder; hesaplanan sabitler hipotezin skorunun hesaplanmasında kullanılır. Yalnız bu sabitlerin farklı bir aday hipotez için tekrar hesaplanması gerekir, çünkü tembel değerlendirilen yüklem (background predicate) alacağı girdiler farklı olacaktır.

Yapılan ön çalışmada bu yöntemin sınıflandırma senaryolarında yeterli olmadığı gözlenmiştir. Argüman toplama

sırasında bir pozitif örneğin  $\mathcal{B}$ 'deki tüm olgular ile eşleştirilmesi, kavram ile ilgili olmayan bazı değerlerin de argüman kümesine eklenmesine sebep olmaktadır. Bu şekilde eklenen *ilgisiz* değerler sınıflandırmayı bazı durumlarda imkansız kılmaktadır. Yapılan deneylerle bu yöntemin problemi çözemediği görülmüştür. Bu sebeple, geliştirilen yöntemde tembel değerlendirme üzerinde değişiklik yapılmıştır.

### C. En Dışlayıcı Tanım Kısıtları

En dışlayıcı tanım kısıtları kavramı [5]'in çalışmasında tanımlanmıştır. Bu çalışmada, diğer TMP sistemlerinin aksine ifade dili olarak MP değil Kısıt Mantık Programlama (KMP) kullanılmıştır. Bir kısıt çözücü, pozitif örnekleri gerektirme ve negatif örnekleri dışlama gibi tanım kümesi işlemlerini yapmak için kullanılır.

MP cümlelerinin aksine, KMP cümleleri yorumlanabilir fonksiyon sembolleri içerebilir. Bir *KMP cümlesi* mantık terimlerine ek olarak kısıt terimleri de içerir ( $X=10, T>=2$  gibi).

Mantık cümleleri arasındaki genellik sırasını belirleyen  $\theta$ -kapsama tanımı [5] çalışmasında kısıtlı cümleleri de kapsayacak şekilde geliştirilmiştir. Geliştirilmiş  $\theta$ -kapsama dikkate alınarak, bir *en dışlayıcı kısıt* negatif örnekleri dışlayan ve negatif örnekleri dışlayan tüm kısıtlardan daha genel olan kısıt olarak tanımlanmıştır. Sonuç olarak, bir en dışlayıcı kısıt negatif örnekler hariç tüm örnekleri kapsar.

### D. Tembel Değerlendirme ile Kısıt Öğrenme

Bu bölümde, sembolik kısıt öğrenme problemini çözmek için Aleph ILP sistemi üzerinde yapılan geliştirmeler anlatılmaktadır. Geliştirilen yeni yöntemin temelinde, bir kısıt çözücü kullanarak, hipotezde yer alan değişkenlerin örnekleri pozitif yapan tanım kümelerini bulmak vardır. Her aday hipotezin içinde yer alan *kısıtlanabilir* değişkenler için *en dışlayıcı tanım kısıtları* türetilir. Bir değişkenin negatif değerlemeleri Tembel Değerlendirme (IV-B) kısmında anlatılan argüman toplama sürecine benzer şekilde yapılır. Ancak, o yöntemden farklı olarak yeni yöntemde argümanların pozitif değerlemeleri toplanmaz.

Tüm negatif değerler toplandıktan sonra, bu değerler kısıt çözücü kullanılarak değişkenin tanım kümesinden atılır. Bazı değerler atıldıktan sonra tanım kümesi, aralıkların mantıksal toplamı haline gelir. Bu aralıkların her biri tüm negatif değerleri dışlar, ancak bazı aralıklar gereksiz olabilir. Önerilen yöntemde, mevcut pozitif örnek tarafından karşılanmayan aralıklar gereksiz kabul edilir ve atılır. Bir aralığın, pozitif örneğin tüm değerlemeleri tarafından karşılanması gerekmez, çünkü bir cümlenin kanıtlanması için bir değerlemesinin doğru olması yeterlidir. Bu değişiklik ile önerilen yöntem önceki tembel değerlendirme yaklaşımının eksikliğini aşmaktadır.

En dışlayıcı tanım kısıtları aday hipoteze  $\text{discr}(V, D)$  biçimindeki özel terimler olarak eklenir. Burada  $V$  bir kısıtlanabilir değişkendir ve  $D$  onun tanım kümesidir. Hipotezin değerlendirilebilmesi için bu terimin tanımı ' $\text{discr}(V, D) :- V \text{ in } D$ ' şeklinde bir Prolog cümlesi olarak eklenmiştir. Bu cümleye göre  $\text{discr}(V, D)$  terimi ancak  $V$  değeri  $D$  tanım kümesinde yer alıyorsa doğrudur.

Yeni yöntemde Aleph'in hem *doyurma* hem de *indirgeme* aşamaları genişletilmektedir (bkz. IV-B). Doyurma

### Algorithm 1 Doyurma aşaması

---

**Require:**  $\mathcal{B}, e_p$

- 1: Yarat  $\perp$  ( $\mathcal{B}, e_p$  kullanarak)
- 2:  $\mathcal{B}$ 'den al  $C_s$  kısıtlanabilirler kümesi
- 3: **for all** *kısıtlanabilir*  $c_i \in C_s$  **do**
- 4:   Bul,  $\perp$  içerisindeki  $c_i$  ile eşleşen  $V_c$  değişken terimleri
- 5:   **for all** *değişken*  $v_j \in V_c$  **do**
- 6:     **if**  $v_j$  daha önce eklenmediyse **then**
- 7:        $\perp$ 'a ekle  $\text{discr}(v_j, 0)$
- 8: Gereksiz terimleri  $\perp$ 'tan çıkar

---

aşamasında, bilgi birikimi  $\mathcal{B}$  ve sıradaki pozitif örnek  $e_p$  kullanılarak, bir aday hipotezde yer alabilecek tüm terimler taban cümlesine ( $\perp$ ) eklenir. Doyurma aşamasının sonunda her kısıtlanabilir değişken için bir  $\text{discr}/2$  terimi  $\perp$ 'a eklenir. Kısıtlanabilir değişkenler önceden  $\mathcal{B}$ 'de belirtilmelidir. Bu aşamada  $\text{discr}$  terimlerinin ikinci argümanları henüz geçici bir değer alır. Bu argümanların esas değerleri indirgeme aşamasında hesaplanacaktır. Doyurma aşamasında yapılan geliştirme Algoritma 1 ile gösterilmiştir. Algoritmaya yapılan eklemeler 2 - 8 satırları arasında sunulmaktadır.

### Algorithm 2 İndirgeme aşaması

---

**Require:**  $\mathcal{B}, e_p, E^-$

- 1: Düğümü ilklendir  $n_s = \text{head}(e_p)$
- 2: **while** *çıkış kriteri sağlanmadı* **do**
- 3:    $n_s$  düğümünden *Succ* düğümlerine açıl
- 4:   **for all** *düğüm*  $n_i \in \text{Succ}$  **do**
- 5:     **for all** *terim*  $t_j \in n_i$  **do**
- 6:       **if**  $\text{functor}(t_j) \neq \text{discr}$  **then**
- 7:         Devam et
- 8:          $\text{discr}(v_c, i_c)$  ile  $t_j$ 'i eşitle
- 9:         İlklendir  $\text{dom}_c = (-\infty, \infty)$
- 10:          $v_c$ 'nin *Negs* değerlemelerini  $E^-$ 'de bul
- 11:         Bütün *Negs* değerlerini  $\text{dom}_c$ 'den çıkar
- 12:         **for all** *aralık*  $i_k \in \text{dom}_c$  **do**
- 13:           **if**  $v_c \in e_p$  sağlamıyor  $i_k$  **then**
- 14:              $i_k$  aralığını  $\text{dom}_c$ 'den çıkar
- 15:         **if**  $\text{dom}_c$  boş değilse **then**
- 16:           Yarat  $t_n = \text{discr}(v_c, \text{dom}_c)$
- 17:           Değiştir  $n_i$  içerisindeki  $t_j$  ile  $t_n$ 'i
- 18:         *Succ*'taki her düğüm için skor hesapla
- 19:         Sıradaki  $n_s$  düğümünü seç

---

İndirgeme aşamasında, Aleph  $\perp$ 'daki terimleri kullanarak arama düğümleri oluşturur ve düğümleri değerlendirerek aramayı yönlendirir. İlk düğüm sıradaki pozitif örneğin ( $e_p$ ) baş kısmından oluşur. Yeni düğümler  $\perp$ 'da yer alan terimler eklenerek elde edilir. Her düğüm bir aday hipotezi temsil eder ve bunların skorları arama sürecinde hesaplanır. Algoritmada yeni yapılan geliştirmeler ile arama sırasında  $\text{discr}/2$  terimlerinin tanım kümesi argümanlarının hesaplanması sağlanır. Tanım kümesi hesaplanması, aday hipotezde yer alan her  $\text{discr}/2$  terimi için yapılır. Bu hesaplanmanın amacı bu terimde yer alan değişken için en dışlayıcı tanım kısıtının bulunmasıdır. Bu tanım kümesi tüm negatif örnekleri dışlar ve en az bir pozitif örneği içerir. Bu işlemlere ilişkin yeni yöntemler Algoritma 2'de 4 - 18 satırları arasında gösterilmiştir.

## V. DENEYLER

Geliştirilen yöntemi doğrulamak için hipotetik olarak oluşturulan iki senaryo üzerinde deneyler yapılmıştır. Oluşturulan senaryoların amacı öğrenme yöntemlerinin sayısal değerler içeren ilişkisel kuralları öğrenebilme yeteneğini ölçmektir. Bu deneyler önerilen yöntem ve mevcut iki TMP yaklaşımı ile tekrarlanmıştır.

Birinci senaryo *yakına-koyma* (put-on-close) deneyi olarak adlandırılmıştır. Bu senaryoda robot kolu masa üzerinde bulunan kutuların yanına yeni bir kutu yerleştirmektedir. Eğer yeni yerleştirilen kutu, varolan kutulardan herhangi birine  $2\text{ cm'den}$  daha yakına yerleştirilmek istenirse ve bu kutunun rengi kırmızıysa, eylem başarısız olur. Renk kistasının eklenme amacı, gerçek dünyada ışık koşulları nedeniyle oluşabilecek hataları da modelleyebilmek ve yapılan geliştirmenin Aleph'in mantıksal tümevarımıyla birlikte çalıştığını doğrulamaktır. Yukarıdaki kistası sağlayan 24'ü pozitif etiketli 96 örnek oluşturulmuştur.

İkinci senaryo *oda-hatası* (room-failure) deneyi olarak adlandırılmıştır. Bu senaryoda bir gezgin robot yerdeki nesnelere toplamaya çalışmaktadır. Toplanması istenen nesne kırmızıysa ve konumu 5 ile 8 arasındaysa hata gerçekleşir. Bu koşulu sağlayan 26 örnek oluşturulmuştur, 4 tane örnek pozitifdir.

Oluşturulan veri kümeleri üzerinde üç yöntem uygulanmıştır: ilk olarak önceki tembel değerlendirme (bkz. IV-B) yöntemi kullanılmıştır. Sayısal kısıtları öğrenebilmesi için bir doğrusal sınıflandırma algoritması artalan yüklemi olarak tanımlanmıştır. İkinci yöntem, bilgi birikiminde ve örneklerde var olan sayısal değerleri birer sabit gibi kabul ederek klasik Aleph yaklaşımını kullanmaktır. Bu yöntemde, karşılaştırma işlemleri ( $=$ ,  $\geq$ ,  $\leq$ ) bilgi birikiminde tanımlanır. İşlemlerle sabitler eşleştirilerek elde edilen ilişkiler (örn.  $X \leq 3$ ) aday hipotezlere eklenir. Bu yöntem daha önceki TMP uygulamalarında kullanılmıştır. Son olarak, geliştirilen yeni yöntem uygulanmıştır.

a) yakına-koyma	b) oda-hatası
$\text{koyma\_hatası}(A, B) :-$ $\text{masada}(C) \text{ ve}$ $\text{konum}(C, D) \text{ ve}$ $\text{mesafe}(D, B, E) \text{ ve}$ $E = < 1 \text{ ve}$ $\text{renk}(A, \text{kırmızı}) .$	$\text{alma\_hatası}(A) :-$ $\text{konum}(A, B) \text{ ve}$ $5 = < B = < 8 \text{ ve}$ $\text{renk}(A, \text{kırmızı}) .$

Şekil 1. (a) yakına-koyma ve (b) oda-hatası deneyleri için önerilen yöntem tarafından bulunan hipotezler.

Deneyler sonucunda, önceki tembel değerlendirme yaklaşımının iki senaryoda da başarısız olduğu görülmüştür. Yakına-koyma deneyinde başarısız olması IV-B kısmında bahsedilen sebepten ötürüdür. Oda-hatası deneyinde başarısız olmasının sebebi ise hedeflenen sayısal ilişkinin doğrusal olarak ayrıştırılamaz olmasıdır. İkinci yöntem yakına-koyma deneyi için öğrenme kümesini sağlayan bir hipotez bulmuştur. Bulunan hipoteze göre koyulan nesne var olan nesnelere göre 1 cm ya da 12 cm uzaklıktaysa hata olur. Bu koşul deney kümesi tarafından sağlansa da, gerçek koşulu tam olarak karşılamamaktadır. İkinci yöntem oda-hatası deneyi için doğru bir hipotez üretememiştir. Önerilen yöntem her iki deney için de hata koşulunu açıklayan hipotezler bulmuştur. Bu hipotezler Şekil 1'te gösterilmiştir.

## VI. SONUÇ

Sembolik seviyede sayısal kısıtların öğrenilmesi için yeni bir yöntem sunulmuştur. Bu yöntem, var olan bir TMP sisteminin tembel değerlendirme ile kısıt öğrenme yaklaşımıyla geliştirilmesiyle elde edilmiştir. Robotların kendi gözlemlerinden sayısal kısıtları öğrenebilmeleri için önerilmiştir.

Deney sonuçları sunulan yöntemin, alternatif TMP yöntemleri tarafından öğrenilemeyen kavramları öğrenebildiğini göstermektedir. Var olan sayısal kısıtların gözlem verilerinden türetilmediği görülmüştür. Yöntemin, sürekli öğrenme senaryolarında robotlara esneklik sağlayacağı ve uzman bilgisinin kısıtlı olduğu senaryolarda çözümü mümkün kılacağı öngörülmektedir.

Yöntemin gerçek robotlar üzerinde uygulanması durumunda bir gürültü filtreleme aşaması gerekli olacaktır.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir. Proje No. 115E-368.

## KAYNAKÇA

- [1] S. Karapinar and S. Sariel, "Cognitive robots learning failure contexts through real-world experimentation," *Autonomous Robots*, vol. 39, no. 4, pp. 469–485, 2015.
- [2] G. Solak, A. C. Ak, and S. Sariel, "Experience-based learning of symbolic numerical constraints," in *IEEE-RAS Conference on Humanoids robots (Humanoids 2016), Cancun, Mexico*, 2016.
- [3] S. Muggleton, "Inverse entailment and prolog," *New generation computing*, vol. 13, no. 3-4, pp. 245–286, 1995.
- [4] A. Srinivasan, "The aleph manual," 2001.
- [5] M. Sebag and C. Rouveirol, "Constraint inductive logic programming," 1996.
- [6] A. Srinivasan and R. Camacho, "Numerical reasoning with an ilp system capable of lazy evaluation and customised search," *The Journal of Logic Programming*, vol. 40, no. 2, pp. 185–213, 1999.
- [7] R. S. Stansbury and A. Agah, "A robot decision making framework using constraint programming," *Artificial Intelligence Review*, vol. 38, no. 1, pp. 67–83, 2012.
- [8] B. D. Argall, S. Chernova, M. Veloso, and B. Browning, "A survey of robot learning from demonstration," *Robotics and autonomous systems*, vol. 57, no. 5, pp. 469–483, 2009.
- [9] I. Bratko and S. Muggleton, "Applications of inductive logic programming," *Communications of the ACM*, vol. 38, no. 11, pp. 65–70, 1995.
- [10] S. Džeroski, L. De Raedt, and K. Driessens, "Relational reinforcement learning," *Machine learning*, vol. 43, no. 1-2, pp. 7–52, 2001.
- [11] M. Botta and A. Giordana, "Smart+: A multi-strategy learning tool," in *IJCAI*. Citeseer, 1993, pp. 937–945.
- [12] D. Page and A. Srinivasan, "Ilp: A short look back and a longer look forward," *Journal of machine learning research*, vol. 4, no. Aug, pp. 415–430, 2003.
- [13] H. M. Pasula, L. S. Zettlemoyer, and L. P. Kaelbling, "Learning symbolic models of stochastic domains," *Journal of Artificial Intelligence Research*, vol. 29, pp. 309–352, 2007.
- [14] E. Ugur and J. Piater, "Bottom-up learning of object categories, action effects and logical rules: From continuous manipulative exploration to symbolic planning," in *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE, 2015, pp. 2627–2633.
- [15] M. Triska, "Library (clpfd): Constraint logic programming over finite domains," 2014.

# Özyeğin Biopsy Robot: System Integration and Active Relative Motion Compensation

Awais Ahmad

Department of Electrical and Electronics Engineering  
Ozyegin University  
Istanbul, Turkey  
Email: awais.ahmad@ozu.edu.tr

Ozkan Bebek

Department of Mechanical Engineering  
Ozyegin University  
Istanbul, Turkey  
Email: ozkan.bebek@ozyegin.edu.tr

**Abstract**—Ultrasound (US) guided percutaneous needle intervention can be a tedious procedure for the physicians and painful for the patients. This paper presents a complete system architecture of a robotic biopsy system for real time operations which can assist the physicians in the procedure and also increase it's accuracy. The system has individual functional blocks working simultaneously including a 5 DoF parallel robot, US imaging machine, two robotic manipulators and a motion capturing system. This paper presents the details of real time functionality of the robotic system components working with spatial and computational synchronization. This paper also presents two types of control laws for target tracking, where the target tissue is moving due to patient's breathing. Traditional feedback control and an Optimal Control Method are discussed. Motion compensation is demonstrated by tracking a moving target with the needle tip motion with an RMS error of 0.25 mm.

**Keywords**—Biopsy Robot, System Architecture, Motion Compensation, Model Predictive Control.

## I. INTRODUCTION

Needle biopsies are performed to collect tissue samples from the patient's body for analyses and diagnoses. Biopsies can be used to take samples from a patients muscles, bones and organs like liver and prostate. An imaging system is used for visual feedback during these procedures. Some commonly used imaging systems are Computed Tomography (CT), Magnetic Resonance (MR), and Ultrasound (US) technologies. In our study, 2D US imaging is used. In manual operations, the physician inserts the needle with one hand and US probe with the other and tries to reach the target by adjusting the needle trajectory multiple times. Needle Biopsy is a type of minimally invasive procedure. Minimally Invasive Surgery (MIS) has also found its way to popularity among surgical techniques due to the reduced post-surgical recovery time. A robot can be used to help the physician to maintain motion stability in long and tiring operations. Custom robotic systems have been developed for specific tissues like brain [1], breast [2], kidney [3], lung [4] and prostate [5].

Özyeğin Biopsy Robot is designed to perform in vivo needle biopsies on a moving target. OBR is a 5 DOF-robotic system and uses US imaging to detect motion of needle tip as well as the target tissue in real-time. OBR is designed for multi-purpose biopsy procedures, mostly focusing on the abdominal region. A target position is given by detecting an

anomaly using the US device. The robot can position itself with the desired attitude and the needle insertion is performed by the robot autonomously. Using a different end effector tool, drug delivery procedures could also be performed. This paper presents complete implementation of an autonomous robotic biopsy system. Design and implementation of feedback and feedback controllers are also presented to compensate the motion of a moving target.

## II. SYSTEM ARCHITECTURE

Architecture is the backbone of any complex system. The right choice of architecture can lead to meeting system requirements and smooth implementation while a bad choice can cause frustrating problems in the development and can also cause restrictions [6]. The system architecture adopted for OBR is Hybrid type [7] because it has many subsystems working as independent modules, but controlled by a Master module. All the subsystems or system components are connected as a client-server dependency via UDP networking. The modularity of the system gives it flexibility and more security as each module can be programmed to handle exceptions independently. In this section, each component of the system is discussed briefly as a module and later system integration is presented.

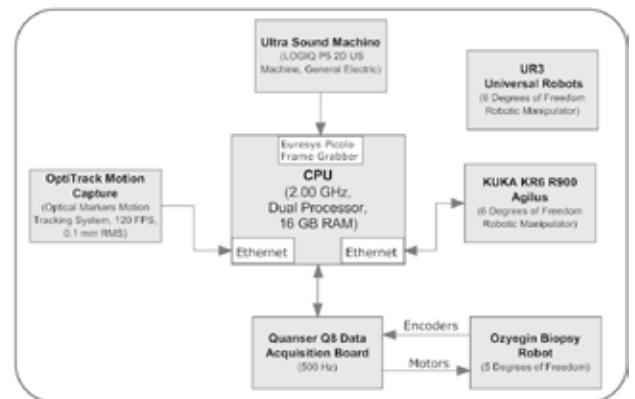


Figure 1. Data Flow Diagram. System Components and their Connection Topology

### A. System Components

In order to make it possible for the OBR to perform autonomous biopsies, other machines and sensors must work

together with OBR to make a whole system. Each component has a function of either an actuator or a sensor in the system. Fig. 1 shows the data flow between different components of the system.

The motion capture system is used to track the motion of all the moving parts of the project in 3D space. This motion capturing system is also used to calibrate the 2D US images in 3D space as discussed in [8]. In the experiments, a GE LOGIQ P5 2D US machine and a GE 11L linear 2D US probe was used to acquire images. A C++ application, henceforth named as *Tracking\_Manager*, is programmed with OpenCV Library to process the Ultrasound images at the rate of 15 Hz.

In the experiments, two industrial 6 axis robots are used. KUKA KR 6 R900 sixx and Universal Robot's UR3. The intended use of KUKA in this study is to move a target with a given reference signal and UR3 is used to manipulate the US probe. A communicator is programmed using Python language to communicate with both the robots over UDP. OBR is a 5 DoF robot and uses Quanser Q8 as its controller running at 500 Hz. The controller for OBR is developed using Simulink according to the control law discussed in [9]. The experimental setup can be seen in the Fig. 2.

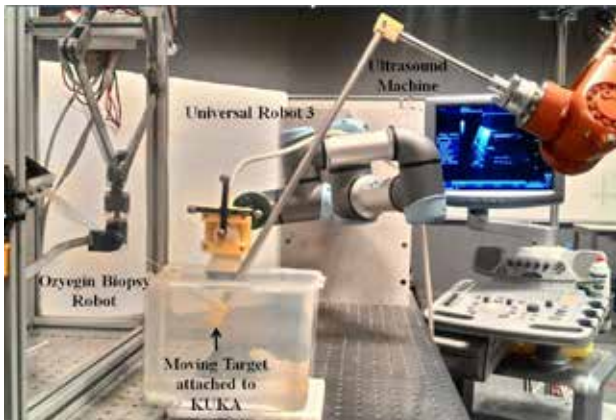


Figure 2. Özyeğin Biopsy Robot (OBR) System Components

### III. SYSTEM INTEGRATION

In this section we will discuss how all the components are integrated together in the system and are running in parallel. The MoCap system runs on a proprietary software called Motive [10]. The Motive streams the tracking data in real time to a UDP socket in Matlab. A python application, henceforth named as *server.py*, opens two UDP sockets, one to communicate with the KRC or UR3 through Ethernet port and the other one to receive correction values from another program for example *Tracking\_Manager*. OBR's controller has the similar mechanism of listening to a UDP socket for correction values from an external program. The controller first finds the joint angles of all the links from the Inverse Kinematics and then Calculated Torque Controller combined with PD Controller computes the motor currents [9].

Once all the subsystems are open and running, we need one main file, henceforth called as *Main\_Module*, which will behave as the Master Program and control the operation of these components and implement the control algorithms for the

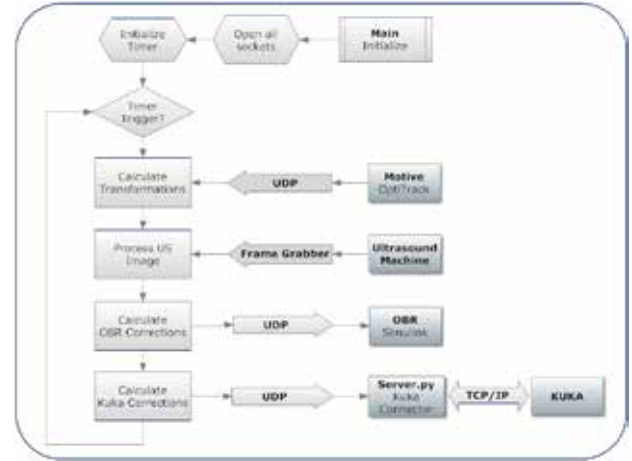


Figure 3. Control Flow Diagram

autonomous needle biopsies. In this study, *Tracking\_Manager* also behaves as the *Main\_Module*. The control flow diagram of this *Main\_Module* is shown in Fig. 3.

### IV. MOTION COMPENSATION

This study suggests a method in which the robot moves the needle with the moving target in order to cancel the relative motion. The organs inside the patient's body move due to respiratory or voluntarily movements of the patient. Sharma *et al.* [11] and Schwiekard *et al.* [12] have concluded in their studies that motion compensation of a respiratory motion is achievable. Riviere *et al.* [13] presented an adaptive controller which was able to model and predict the breathing motion of a target during needle interventions. Trejos *et al.* [14] discussed about the ability of a platform which allowed the surgeon to perform tasks on a motion-cancelled target.

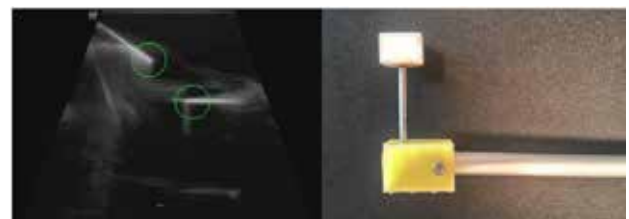


Figure 4. Left: Rubber Target and needle in US image. Right: Photo of the rubber target attached to the extension rod at the end effector of Kuka arm.

OBR has 5 degrees of freedom which makes it effective in reaching a target from any angle. Visual tracking method used in this study to simultaneously track needle tip and the target. Visual tracking method is an image based tracking method and it uses motion information in consecutive frames. Fig. 4 shows the real target and the US image of the target and the needle being tracked by the image processing software. In this section, two different control techniques to track a moving target are presented. One is a traditional PD controller and the other is Receding Horizon Model Predictive Control [15] (or simply called Model Predictive Control (MPC)).

### A. PD Controller

One of the simplest controllers that can be used in this situation is a PD controller. The feedback of both the needle tip and the target from the US imaging is available, also shown in Fig. 4. The image processing algorithm developed in [16] is used to get the position of both needle tip and moving target in real time. The algorithm was tested at different frequencies of 0.2 Hz to 1 Hz and peak to peak amplitudes of 1 cm to 3 cm. The RMS errors were 0.42 and 0.81 mm for x- and y-directions respectively. The reason for this high RMS error is processing time of images between the updates to the controller effort. This is also one of the reasons this controller is not suitable for higher frequencies. Sensor delay, which is discussed in the following section is also contributing to introduce lag in tracking.

### B. Sensor Time Delay - US Imaging Latency

All the sensors have some intrinsic latency in them which is the time delay between the actual event and the time when sensor reports the event. Ignoring this time delay can cause large tracking errors. Bowthorpe *et al.* in [17] present a similar problem. An experiment is designed to find the latency of US in our system. The latency delay is found by the difference between the occurrence of two events, one event is the actual movement by OBR and the other is the movement recorded by the US. The delay is calculated to be 150 ms.

### C. Receding Horizon Model Predictive Control

The results of tracking from feedback control were promising and below the acceptable error of 1 mm RMS. But this controller is expected to cross this safe limit of error on higher frequency of target motion. Also the sensor latency found in the previous section introduces a phase lag in the tracking. Design of a new controller is needed which can handle these problems. This section presents the design of a Model Predictive Control (MPC) [15] which utilizes the information of breathing model and sensor delays to optimize tracking problem.

Model Predictive Control optimizes the current state of the system taking the future states in account. A number of samples, for instance  $N$ , are selected as a design parameter, also called as Horizon, and the current state of the system is optimized over this Time-Horizon. The current state is optimized over  $[k, k+N]$  samples,  $k$  being the current sample, but only the current position is implemented. For the next position in time, the horizon is moved forward and the state is optimized over  $[k+1, k+N+1]$ . This gives this technique the name of Receding Horizon Model Predictive Control (RHMPC) [18]. The length of the horizon is finite for periodic systems. A pre-recorded breathing model can be used as a periodic signal hence one cycle can be used as Feedforward signal for the next cycle.

RHMPC is an iterative and multivariable process which uses the dynamic model of the system, history of previous control efforts and an optimization cost function over the length of horizon. The dynamic model of each joint of OBR is available as calculated during the system identification presented by Orhan *et al.* in [9]. Using the breathing model of previous cycle for prediction, a cost function can be defined

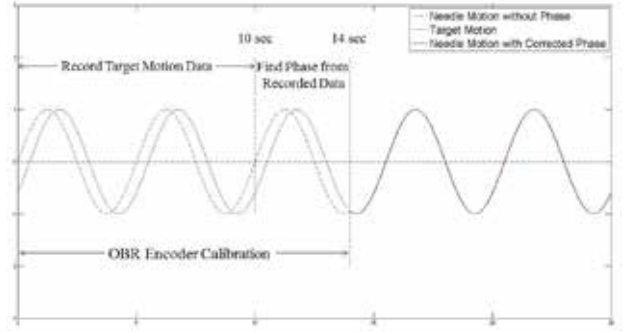


Figure 5. Timeline of Phase Offset detection

and an Optimal Control can be designed to minimize the cost function.

$$J[k] = \sum_{k=k_0}^{k_0+T} \left( (x[k] - x_{est}[k])^T \mathbf{Q} (x[k] - x_{est}[k]) + u^T[k] \mathbf{R} u[k] \right) \quad (1)$$

The optimal tracking problem goal is to find optimal control  $u$  for the system that will minimize the given cost function in Eq. 1. This will result in  $y$  tracking the signal  $y_{est}$ . When solved as Optimal Feedback Regulator [19], [20], the solution to this control problem is derived from [21] and becomes as follows:

$$u[k] = u_{fb}[k] + u_{ff}[k]. \quad (2)$$

The resulting control algorithm is composed of feedback and feedforward parts.

1) *Implementation:* As the target movement and the reference signal to RHMPC are independent from each other, both signals must be synchronised by phase. For the first 14 seconds when started, the encoders of OBR are being calibrated and no control algorithm is enabled. This time is utilized to find the phase offset of the target motion and added to the input signal of RHMPC. A parallel processing thread, henceforth named as *Phase\_Fit*, waits for an enabling signal from the OBR controller in order to synchronize the clock, and finds the phase and frequency information from the recorded data of the first 10 seconds. Figure 5 shows how the phase is calculated and added to the input signal.

The Kuka robot is programmed to move the target in a sinusoidal pattern. The algorithm is tested at frequencies of 0.2 Hz to 1 Hz and peak to peak amplitudes of 1 cm to 2 cm. Figure 6 shows the tracking of a target motion with 1 Hz and 1 cm amplitude with an RMS error of 0.267 mm.

### D. Comparison of RHMPC with PD

The tracking errors in case of RHMPC were well under the safe value of 1 mm with mean very close to zero which indicates perfect phase synchronization. On the other hand PD controller had a constant lag while tracking which causes the mean of error to move away from the zero value. Table. 1

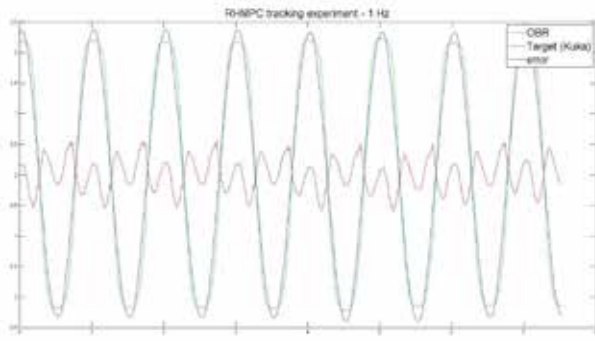


Figure 6. RHMPC Target Tracking. Target is moving with 1 Hz and 10 mm amplitude

represents the results of both of the controllers for different type of reference signals. It can be seen from the table that PD controller is not robust higher frequencies but responds reasonably to a signals based on breathing motion data. Meanwhile RHMPC performs well within the safe boundary on all frequencies.

Table I. RMS ERRORS OF PD AND RHMPC CONTROLLERS WITH DIFFERENT REFERENCE SIGNALS.

Controller Type	Frequency (Hz)	Amplitude (mm)	RMS Error
PD	(0.2, 0.05)	(8,1.5)	0.95
	0.5	20	1.27
	1	10	1.82
RHMPC	(0.2,0.05)	(8,1.5)	0.25
	0.5	20	0.26
	1	10	0.28

## V. CONCLUSIONS

This paper presented design and implementation of the architecture of a robotic system for autonomous biopsy on moving targets. Özyeğin Biopsy Robot's system architecture is designed in a way that all the system components exist as modules and one Master program controls the execution of tasks. The system was tested to perform biopsy on a target moving with different frequencies and amplitudes. In order to track a moving target, both Feedback and Feedforward controllers were designed. Feedback control with PD gains performed just around the minimum design requirement with RMS error of 0.95 mm. To handle the higher frequencies and dynamic behavior of the operation environment, a Model Predictive Control is implemented. The performance of the RHMPC was found to be very promising with a tracking RMS error of 0.25 mm at 1 Hz.

## ACKNOWLEDGMENT

This research was supported by TUBITAK under Grant No. 112E312.

## REFERENCES

[1] H. Zaidi, Y. Chao, Z. Lei, and Y. Wang, "Design and optimization analysis of open-mri compatible robot for neurosurgery," in *Bioinformatics and Biomedical Engineering, 2008. ICBBE 2008. The 2nd International Conference on*. IEEE, 2008, pp. 1773–1776.

[2] B. Yang, U. Tan, A. McMillan, R. Gullapalli, J. P. Desai *et al.*, "Design and implementation of a pneumatically-actuated robot for breast biopsy under continuous mri," in *Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference on*. IEEE, 2011, pp. 674–679.

[3] A. Majewicz, S. P. Marra, M. G. van Vledder, M. Lin, M. A. Choti, D. Y. Song, and A. M. Okamura, "Behavior of tip-steerable needles in ex vivo and in vivo tissue," *Biomedical Engineering, IEEE Transactions on*, vol. 59, no. 10, pp. 2705–2715, 2012.

[4] Y. Moon and J. Choi, "A compliant parallel mechanism for needle intervention," in *Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2013 35th Annual International Conference of the IEEE*. IEEE, 2013, pp. 4875–4878.

[5] G. S. Fischer, I. Iordachita, C. Csoma, J. Tokuda, S. P. DiMaio, C. M. Tempny, N. Hata, and G. Fichtinger, "Mri-compatible pneumatic robot for transperineal prostate needle placement," *IEEE/ASME transactions on mechatronics*, vol. 13, no. 3, pp. 295–305, 2008.

[6] E. Coste-Maniere and R. Simmons, "Architecture, the backbone of robotic systems," in *Robotics and Automation, 2000. Proceedings. ICRA'00. IEEE International Conference on*, vol. 1. IEEE, 2000, pp. 67–72.

[7] D. J. Musliner, E. H. Durfee, and K. G. Shin, "Circa: A cooperative intelligent real-time control architecture," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 23, no. 6, pp. 1561–1574, 1993.

[8] A. Ahmad, M. C. Cavusoglu, and O. Bebek, "Calibration of 2d ultrasound in 3d space for robotic biopsies," in *Advanced Robotics (ICAR), 2015 International Conference on*. IEEE, 2015, pp. 40–46.

[9] S. O. Orhan, M. C. Yildirim, and O. Bebek, "Design and modeling of a parallel robot for ultrasound guided percutaneous needle interventions," in *Industrial Electronics Society, IECON 2015-41st Annual Conference of the IEEE*. IEEE, 2015, pp. 005 002–005 007.

[10] OptiTrack, "Motive," <http://optitrack.com/products/motive/>.

[11] K. Sharma, W. S. Newman, M. Weinhaus, G. Glosser, and R. Macklis, "Experimental evaluation of a robotic image-directed radiation therapy system," in *Robotics and Automation, 2000. Proceedings. ICRA'00. IEEE International Conference on*, vol. 3. IEEE, 2000, pp. 2913–2918.

[12] A. Schweikard, G. Glosser, M. Bodduluri, M. J. Murphy, and J. R. Adler, "Robotic motion compensation for respiratory movement during radiosurgery," *Computer Aided Surgery*, vol. 5, no. 4, pp. 263–277, 2000.

[13] C. Riviere, A. Thakral, I. Iordachita, G. Mitroi, and D. Stoianovici, "Predicting respiratory motion for active canceling during percutaneous needle insertion," in *Engineering in Medicine and Biology Society, 2001. Proceedings of the 23rd Annual International Conference of the IEEE*, vol. 4. IEEE, 2001, pp. 3477–3480.

[14] A. L. Trejos, S. Salcudean, F. Sassani, and S. Lichtenstein, "On the feasibility of a moving support for surgery on the beating heart," in *International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention*. Springer, 1999, pp. 1088–1097.

[15] B. D. Anderson and J. B. Moore, *Linear optimal control*. Prentice-Hall Englewood Cliffs, 1971.

[16] M. Kaya, E. Senel, A. Ahmad, O. Orhan, and O. Bebek, "Real-time needle tip localization in 2d ultrasound images for robotic biopsies," in *Advanced Robotics (ICAR), 2015 International Conference on*. IEEE, 2015, pp. 47–52.

[17] M. Bowthorpe, M. Tavakoli, H. Becher, and R. Howe, "Smith predictor-based robot control for ultrasound-guided teleoperated beating-heart surgery," *IEEE Journal of biomedical and Health Informatics*, vol. 18, no. 1, pp. 157–166, 2014.

[18] W. H. Kwon and S. H. Han, *Receding horizon control: model predictive control for state models*. Springer Science & Business Media, 2006.

[19] E. F. Camacho and C. B. Alba, *Model predictive control*. Springer Science & Business Media, 2013.

[20] O. Bebek, "Robotic-assisted beating heart surgery," Ph.D. dissertation, Case Western Reserve University, 2008.

[21] M. C. Cavusoglu *et al.*, "Intelligent control algorithms for robotic-assisted beating heart surgery," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 23, no. 3, pp. 468–480, 2007.

# Visual Tracking of Targets in 2D Ultrasound Assisted Robotic Biopsies

Awais Ahmad, Mert Kaya, Enes Senel  
Department of Electrical and Electronics Engineering  
Ozyegin University  
Istanbul, Turkey  
Email: awais.ahmad, enes.senel@ozu.edu.tr  
mert.kaya@ozyegin.edu.tr

Ozkan Bebek  
Department of Mechanical Engineering  
Ozyegin University  
Istanbul, Turkey  
Email: ozkan.bebek@ozyegin.edu.tr

**Abstract**—Percutaneous needle procedures are mostly carried out with the guidance of 2D ultrasound (US) imaging. Due to noise and low resolution, target tracking with image processing algorithms can be challenging. This paper proposes visual tracking of multiple moving points, such as biopsy needles and targets, in 2D US images using normalized cross correlation and mutual information similarity functions. During the experiments, needle is inserted into phantoms using a needle insertion robot. Accuracies of the needle tip and moving target tracking methods were measured using an optical tracking system. The mean Euclidean error for the proposed method is 0.215 mm. This study shows that the proposed tracking method can be used to simultaneously track the needle tip and the targets in real-time in 2D US guided percutaneous needle procedures.

**Keywords**—*Ultrasound, Visual Servoing, Target Tracking.*

## I. INTRODUCTION

Biopsy is extraction of live tissue for examination of a disease. During these operations, a needle is inserted manually or with the assistance of a robot. Robot assisted biopsy procedure is a reliable way to reach the target tissue. Because, the needle trajectory can be preplanned and robots can move with high resolution. The insertions are done with the help of medical imaging devices that image the needle and the target tissue. Among the medical imaging devices, 2D US imaging is the most commonly used method. But, US images suffer from low signal-to-noise ratio and their resolutions are low. They also contain excessive number of artifacts. Hence, the needle and the target tissue tracking can be challenging. Visual tracking techniques can be used to simultaneously track the target and the needle during the biopsy procedures. This study proposes simultaneous visual tracking of the needle and the targets for both manual and robotic assisted interventions.

In our previous studies, Gabor filter was used to segment the needle pixels in 2D US images[1] and needle tip was estimated with a probability mapping method [2] and it was tracked in real-time using the Kalman filter[3]. Needle tip is visually tracked using sum of squared differences and sum of conditional variances [4]. During the tracking, needle loss was also detected using normalized cross correlation.

In this study, normalized cross correlation (NCC) and mutual information (MI) methods are used to track both moving and deformable targets. Affine motion model is used

to track moving targets, and thin plate spline motion model is used to track deformable targets. Templates are updated with a template update strategy to prevent tracking failures. Also, tracking outputs of NCC and MI are fused to minimize the registration error during the tracking. To the best of our knowledge, this method is the first to simultaneously track the needle tip and the target in 2D US images using visual tracking methods.

## II. VISUAL TRACKING OF NEEDLE TIP

Visual tracking is the process of locating an object over time in frame sequences. Generally, the previous appearance of the object, defined as template image- $I_t(\mathbf{p})$  and current appearance of the object, defined as current image- $I_c(\mathbf{w}_m(\mathbf{p}; \mathbf{r}))$  are aligned to find its location in the current frame, where  $\mathbf{p}$  vector contains  $x$ - and  $y$ - pixel coordinates of the current image [5]. This process is called image registration.  $\mathbf{w}_m(\mathbf{p}; \mathbf{r})$  is known as the warping function and it transforms the vector  $\mathbf{p}$ . The aim of image registration is to find  $\mathbf{r}$  vector which contains all motion parameters between current and template images. The process can be divided into two stages. In the first stage, similarity between an image pair is calculated. In the second stage,  $\mathbf{r}$  is iteratively calculated. Iterations last until difference between two images reaches global minimum.

In order calculate the similarity, NCC or MI similarity functions can be used. These similarity functions are commonly used in medical image registration [6], [7]. The robustness of these similarity functions are evaluated with respect to nominal conditions and global intensity changes using reference image. Reference image is captured while a needle is inserted into chicken breast. First template is cropped from the center of the reference template. In order to calculate the similarity value between the two images, first template is translated from -20 to 20 pixels with 1 pixel increments in  $x$ - and  $y$ -axes. Second template is obtained by changing intensity values of the first template. Similarities between the second template and the reference images are calculated. As a result, NCC and MI values reach a maximum value at the center even if the pixel intensities in the template image change significantly.

In the visual tracking of the needle tip, one of the most important steps is determining motion model of the needle. In our experiments, motion of the needle is translation motion

model. It provides 2-DOF motion information ( $\mathbf{r} = r_1, r_2$ ). But, needle template image contains both needle and tissue motion information. Although needle motion is rigid, tissue motion might be non-rigid components. Thus, affine motion model is chosen (1) for expressing motion model of the needle template because it can be used to express the motion of both rigid and non-rigid. Also, it provides 6-DOF motion information ( $\mathbf{r} = r_1, \dots, r_6$ ). In the rest of this section, calculation of  $\mathbf{r}$  vector using NCC and MI similarity functions are explained.

$$\mathbf{w}_m(\mathbf{p}; \mathbf{r}) = \begin{bmatrix} (1+r_1) \cdot x + r_3 \cdot y + r_5 \\ r_2 \cdot x + (1+r_4) \cdot y + r_6 \end{bmatrix} \quad (1)$$

#### A. Visual Tracking using NCC and MI

NCC value between  $I_i(\mathbf{w}_m(\mathbf{p}; \mathbf{r}))$  and  $I_t(\mathbf{p})$  is computed as

$$NCC(\mathbf{r}) = \frac{\sum_{\mathbf{p}} (I_i(\mathbf{w}_m(\mathbf{p}; \mathbf{r})) - \bar{I}_i) \cdot (I_t(\mathbf{p}) - \bar{I}_t)}{\sqrt{\sum_{\mathbf{p}} (I_i(\mathbf{w}_m(\mathbf{p}; \mathbf{r})) - \bar{I}_i)^2} \cdot \sqrt{\sum_{\mathbf{p}} (I_t(\mathbf{p}) - \bar{I}_t)^2}}$$

where  $\bar{I}_t$  and  $\bar{I}_i$  are mean values of the  $I_t(\mathbf{p})$  and  $I_i(\mathbf{w}_m(\mathbf{p}; \mathbf{r}))$ , respectively.

MI value between  $I_i(\mathbf{w}_m(\mathbf{p}; \mathbf{r}))$  and  $I_t(\mathbf{p})$  is computed as

$$MI(\mathbf{r}) = \sum_{m,n} P_{I_i I_j}(m, n, \mathbf{r}) \log \left( \frac{P_{I_i I_t}(m, n, \mathbf{r})}{P_{I_i}(m, \mathbf{r}) P_{I_t}(n)} \right)$$

where  $P_{I_i I_t}$  is the joint probability distribution between  $I_i(\mathbf{w}_m(\mathbf{p}; \mathbf{r}))$  and  $I_t(\mathbf{p})$ .  $P_{I_i}$  and  $P_{I_t}$  are marginal distributions of  $I_i(\mathbf{w}_m(\mathbf{p}; \mathbf{r}))$  and  $I_t(\mathbf{p})$ , respectively.

The main purpose of NCC and MI based visual tracking is to find  $\mathbf{r}$  vector which maximizes the similarity value between  $I_i(\mathbf{w}_m(\mathbf{p}; \mathbf{r}))$  and  $I_t(\mathbf{p})$  using Newton optimization. In order to calculate  $\mathbf{r}$ , similarity function ( $s(\mathbf{r})$ ) is represented with Taylor series expansion as:

$$s(\mathbf{r} + \Delta\mathbf{r}) \approx s(\mathbf{r}) + s'(\mathbf{r}) \Delta\mathbf{r} + \frac{1}{2} s''(\mathbf{r}) (\Delta\mathbf{r})^2 + HOT$$

According to Newton optimization, derivation of the similarity function equals to zero at the extremum point. For this purpose, the Taylor series representation of  $s(\mathbf{r})$  is computed:

$$\frac{\partial s(\mathbf{r} + \Delta\mathbf{r})}{\partial \Delta\mathbf{r}} = \frac{\partial s(\mathbf{r})}{\partial \Delta\mathbf{r}} + \frac{\partial (s'(\mathbf{r}) \Delta\mathbf{r})}{\partial \Delta\mathbf{r}} + \frac{1}{2} \frac{\partial (s''(\mathbf{r}) (\Delta\mathbf{r})^2)}{\partial \Delta\mathbf{r}}$$

$$0 = 0 + s'(\mathbf{r}) + s''(\mathbf{r}) \Delta\mathbf{r}$$

The equation above is valid for multiple dimensions ( $s : \mathbf{R}^n \mapsto \mathbf{R}$ ). In this case, gradient vector ( $\mathbf{g}$ ) and Hessian ( $\mathbf{H}$ ) matrix can be replaced with the first and second derivatives of  $s(\mathbf{r})$ , respectively. Then, the motion parameters can be calculated using gradient and Hessian as follows:

$$\Delta\mathbf{r} = -\mathbf{H}^{-1} \mathbf{g} \quad (2)$$

Computation of gradient vector and Hessian matrix for NCC and MI similarity functions can be found in [8] and [9], respectively. Parameters,  $\mathbf{r}$ , are iteratively calculated. Before iterations start,  $\mathbf{H}$  and its inverse are computed. At each iteration,  $\mathbf{g}$  is updated. Then,  $\Delta\mathbf{r}$  is calculated using (2) and it is accumulated to find all motion parameters ( $\mathbf{r} \leftarrow \mathbf{r} + \Delta\mathbf{r}$ ).

Iterations are repeated until  $\Delta\mathbf{r}$  becomes smaller than predefined threshold value to break iterations or number of iterations reaches predefined maximum iteration number.

#### B. Template Update Strategy

Template update strategy with drift correction is used to update the needle templates[10]. Schematic diagram of visual tracking using this strategy is illustrated in Fig. 1. After an image pair is registered, output image is registered with the master template of the needle. Then, template image is updated with the registration output. Thus, registration error is so minimized that template is not drifting along the needle path [4]. Initially, master template is the first needle template in the beginning of the tracking and it is updated in every 15 frames.

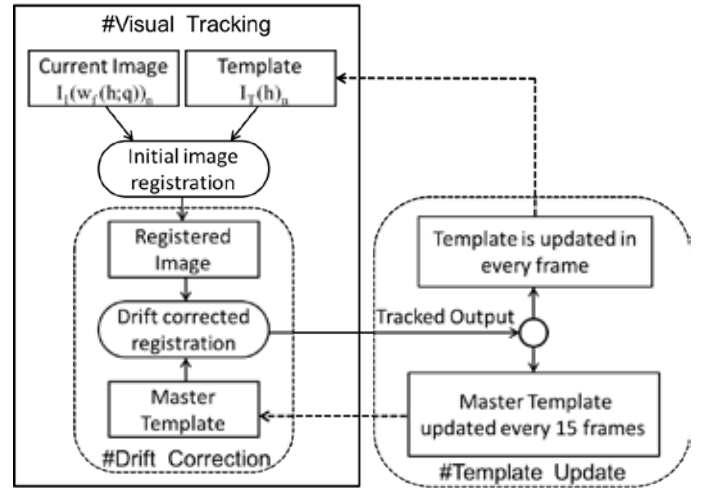


Figure 1: Schematic diagram of visual tracking using the template update strategy with drift correction.

### III. TARGET TRACKING

#### A. Small and Moving Target Tracking

During insertion, the target tissue also moves due to the probe motion or stick-slip forces [3]. In order to collect samples from the correct place, target also has to be tracked. In order to track small and moving targets, an affine motion model is used. Both non-rigid and rigid transformations in target tissue can be tracked using this motion model. If a more complex motion model is used, tracking might be unsuccessful because US images suffer from low signal-to-noise ratio. Thus, complex motion models can reduce the robustness of tracking in US images.

During target tracking experiments, US probe was vertically moved with respect to target. Also, US probe was pushed and pulled towards phantom to mimic the patient breathing. In these cases, target was successfully tracked using the affine model. Fig. 2 shows the results of successful target tracking using affine motion model. Needle tip and small target are simultaneously tracked in real-time.

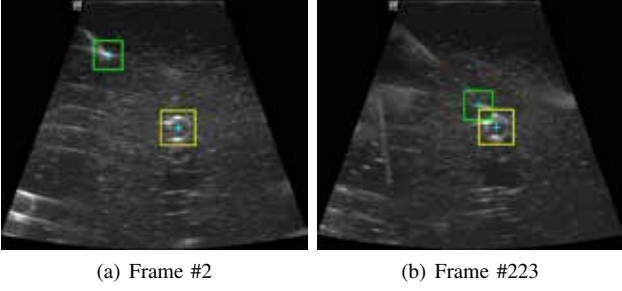


Figure 2: Results of simultaneous needle tip and moving target tracking in agar-gelatine phantom.

### B. Deformable Target Tracking

An example motion analysis of deformable phantom while needle is inserting is shown in Fig. 3. In this case, complete tissue should be tracked for accurate target tracking. Like small and moving targets, visual tracking methods can be used to track the deformable tissue. But, different motion model should be used.

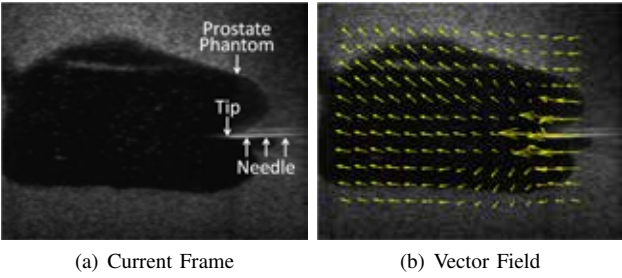


Figure 3: Motion analysis of deformable prostate phantom while needle is inserting. (a) Current US frame. (b) Optical vector field is overlaid onto current frame.

In order to express the motion of the deformable tissue, thin plate spline (TPS) deformable motion model is used. In the literature, it was previously used to track objects or targets in both photometric and medical images [11]. It is a radial basis function and it interpolates target point using given  $n$  control points. It minimizes the bending energy using the equation:

$$E_f = \iint_{R^2} \left( \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \right)^2 \partial x \partial y$$

The interpolated coordinate of a point  $(x, y)$  can be calculated using TPS:

$$f(x, y) = \begin{bmatrix} a_0 & a_1 \\ a_3 & a_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_2 \\ a_5 \end{bmatrix} + \sum_{i=1}^n \begin{bmatrix} w_x^i \\ w_y^i \end{bmatrix} U(\|(\hat{x}_i, \hat{y}_i) - (x, y)\|) \quad (3)$$

where

$$U(r) = r^2 \log r$$

and  $(a_0, \dots, a_5)$  are the affine parameters,  $(\hat{x}_i, \hat{y}_i)$  is coordinate of a control point,  $(w_x, w_y)$  is weights of a control point in  $(x, y)$  location.

TPS motion parameters ( $\mathbf{w}$  and  $\mathbf{a}$ ) can be obtained by solving the linear system:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{w} \\ \mathbf{a} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{K} & \mathbf{P} \\ \mathbf{P}^T & \mathbf{O} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{V} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}$$

where

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 0 & U(r_{12}) & \dots & U(r_{1n}) \\ U(r_{21}) & 0 & \dots & U(r_{2n}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ U(r_{n1}) & U(r_{n2}) & \dots & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{P} = \begin{bmatrix} 1 & \hat{x}_1 & \hat{y}_1 \\ 1 & \hat{x}_2 & \hat{y}_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \hat{x}_n & \hat{y}_n \end{bmatrix},$$

$\mathbf{O}$  and  $\mathbf{0}$  are  $3 \times 3$  and  $2 \times 3$  zero matrices, respectively.  $\mathbf{w}$  is the vector form of  $(w_x, w_y)$  parameters and  $\mathbf{a}$  is the vector form of  $(a_0, \dots, a_5)$ .  $\mathbf{V}$  is the vector that contains corresponding control points.

Equation (3) is used to express the motion of deformable tissue. During the visual tracking, motion parameters which minimize difference between current and template ( $\mathbf{r} = (a_0, \dots, a_5, w_x^T, w_y^T)$ ) are calculated and coordinates of target region are obtained.

Fig. 4 shows the results of deformable tissue tracking using TPS motion model while needle is inserting into prostate phantom. Four control points are selected and 2D  $15 \times 15$  nodes are created to show the deformation. The needle tip and the target are simultaneously tracked in the deformable tissue.

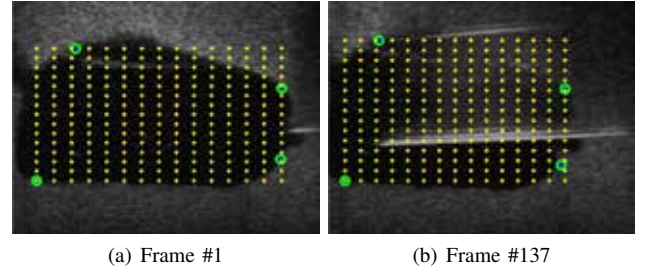


Figure 4: Results of deformable tissue tracking using TPS. Control points are shown with 'o' and '+' indicates nodes.

## IV. EXPERIMENTS

### A. Experimental Setup

In the experiments, a GE LOGIQ P5 2D US machine with a GE 11L linear 2D US probe were used. In order to test the proposed needle tip and target tracking methods, lamb meat, chicken breast, distilled water, and four different phantoms (water-ethanol mixture, gelatine, agar, agar-gelatine) were used according to recipes in [2].  $18G \times 15cm$  biopsy needles (Gallini Medical Devices) and a  $12G \times 25cm$  stainless steel shafts were used for needle insertion experiments.

2D US probe was mounted on to a 6-DOF robotic arm (KUKA KR 6 R9000 sixx), and needle was inserted using a 5-DOF needle insertion robot [12]. 11.4 mm diameter optical markers were attached onto the needle mechanism and the US probe to track the motion and measure accuracy of proposed methods. OptiTrack motion capture system was used to capture marker motion. The experimental setup is shown in Fig. 5.

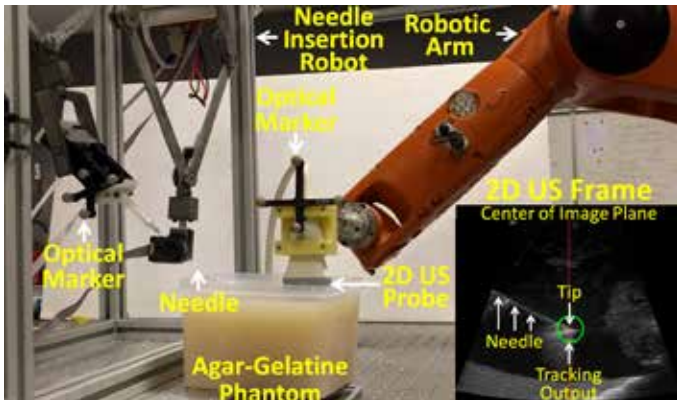


Figure 5: View of the experimental setup.

## B. Experimental Results

1) *Execution Time*: Proposed visual tracking methods were implemented in both MATLAB and C++ using OpenCV library; and ran on 64-bit Windows 7 workstation. During the experiments, size of the template images was  $61 \times 61$ . The maximum iteration number and threshold value for breaking the iteration loop were set 0.01 and 50, respectively. Execution times of visual tracking using NCC were  $660 \pm 170ms$  with Matlab and  $28 \pm 11ms$  with C++. Meanwhile Visual Tracking using MI was executed in  $1005 \pm 220ms$  in Matlab and  $42 \pm 6ms$  using C++. Execution time of visual tracking using NCC and MI was reduced twenty folds in C++ implementation. Thus, the target and the needle were simultaneously tracked in real-time.

2) *Accuracy of needle tip tracking*: In order to evaluate the proposed needle tip tracking an optical tracking system was used. Experiments were carried out in a water tank. First, 2D US was calibrated in 3D space using proposed calibration method in [13]. In the experiments, needle was inserted and retracted at different angles and velocities. Needle tip coordinates were simultaneously obtained using both optical tracking and visual tracking. Then, Euclidian distance between them was calculated for each frame. In total, 8296 frames were acquired. Errors of proposed needle tip tracking methods are below 0.3 mm with MI at  $0.2568 \pm 0.0389$ , NCC at  $0.2908 \pm 0.0406$ . Fusion of NCC and MI reduces tracking error over 15% with the mean error of  $0.2568 \pm 0.0389$

3) *Accuracy of visual servoing*: Visual servoing is to keep the target in image plane by moving the vision sensor. In our case, needle tip is kept in the US image plane by moving the US probe while following the motion of the needle tip. A PID controller is designed to servo the US probe [14]. The needle tip position was tracked using the proposed tracking method and the difference between the needle tip location and the set point (image center) is used as error for PID gains. The experiments were performed in both solid and liquid phantoms. Needle was inserted using an insertion robot and 2D US probe was attached to a robotic arm. The insertion robot was used to insert the needle both with a manual control and a predefined sinusoidal wave. RMS error of visual servoing was calculated as 2.13 mm. This accuracy is in the sufficient range for visual servoing of the needle tip.

## V. CONCLUSION

This study presents visual tracking of needle tip and targets for 2D US guided robotic percutaneous interventions. The main contribution to the literature is that needle tip, moving, and deformable targets are simultaneously tracked using NCC and MI similarity functions. Also, visual tracking outputs of NCC and MI are fused to minimize the registration error. Execution times of proposed tracking methods were substantially reduced in C++ implementation so needle and target were simultaneously tracked in real-time. Accuracy of proposed tracking methods were evaluated using an optical tracking system. Experimental results showed that accuracies of proposed tracking methods are in sufficient interval.

## ACKNOWLEDGMENT

This research was supported in part by TUBITAK under Grant No. 112E312.

## REFERENCES

- [1] M. Kaya and O. Bebek, "Needle localization using gabor filtering in 2D ultrasound images," in *Robotics and Automation (ICRA), 2014 IEEE International Conference on*. IEEE, 2014, pp. 4881–4886.
- [2] —, "Gabor filter based localization of needles in ultrasound guided robotic interventions," in *Imaging Systems and Techniques (IST), 2014 IEEE International Conference on*. IEEE, 2014, pp. 112–117.
- [3] M. Kaya, E. Senel, A. Ahmad, O. Orhan, and O. Bebek, "Real-time needle tip localization in 2D ultrasound images for robotic biopsies," in *Advanced Robotics (ICAR), 2015 International Conference on*. IEEE, 2015, pp. 47–52.
- [4] M. Kaya, E. Senel, A. Ahmad, and O. Bebek, "Visual tracking of biopsy needles in 2D ultrasound images," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2016*.
- [5] S. Baker and I. Matthews, "Lucas-kanade 20 years on: A unifying framework," *International journal of computer vision*, vol. 56, no. 3, pp. 221–255, 2004.
- [6] J. P. Plum, J. A. Maintz, and M. A. Viergever, "Mutual-information-based registration of medical images: a survey," *IEEE transactions on medical imaging*, vol. 22, no. 8, pp. 986–1004, 2003.
- [7] G. P. Penney, J. Weese, J. A. Little, P. Desmedt, D. L. Hill *et al.*, "A comparison of similarity measures for use in 2-d-3-d medical image registration," *IEEE transactions on medical imaging*, vol. 17, no. 4, pp. 586–595, 1998.
- [8] R. Richa, R. Sznitman, and G. Hager, "Robust similarity measures for gradient-based direct visual tracking," The Johns Hopkins University, Tech. Rep., 2012.
- [9] A. Dame and E. Marchand, "Second-order optimization of mutual information for real-time image registration," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 21, no. 9, pp. 4190–4203, 2012.
- [10] I. Matthews, T. Ishikawa, and S. Baker, "The template update problem," *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, no. 6, pp. 810–815, 2004.
- [11] R. Richa, P. Poignet, and C. Liu, "Three-dimensional motion tracking for beating heart surgery using a thin-plate spline deformable model," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 29, no. 2-3, pp. 218–230, 2010.
- [12] S. O. Orhan, M. C. Yildirim, and O. Bebek, "Design and modeling of a parallel robot for ultrasound guided percutaneous needle interventions," in *Industrial Electronics Society, IECON 2015-41st Annual Conference of the IEEE*. IEEE, 2015, pp. 005 002–005 007.
- [13] A. Ahmad, M. C. Cavusoglu, and O. Bebek, "Calibration of 2D ultrasound in 3D space for robotic biopsies," in *Advanced Robotics (ICAR), 2015 International Conference on*. IEEE, 2015, pp. 40–46.
- [14] S. Hutchinson, G. D. Hager, and P. I. Corke, "A tutorial on visual servo control," *IEEE transactions on robotics and automation*, vol. 12, no. 5, pp. 651–670, 1996.

# Eksik Tahrikli Seri Eklemlili Bir Robotun İzdüşüm Yöntemi ile Konum Kontrolü

Seda Korkmaz, Berke Gür  
Mekatronik Mühendisliği  
Bahçeşehir Üniversitesi  
İstanbul, Türkiye  
Email: seda.korkmaz, berke.gur@eng.bau.edu.tr

**Özetçe** — *Bu çalışmada, eksik tahrikli robot manipülatörlerinin izdüşüm operatörü ile dinamik analizi ve kontrolü üzerinde durulmuştur. Kontrolörler PHANTOM Omni robot için Matlab - VREP yazılımları kullanılarak test edilmiştir. Herhangi bir ekleme kontrol girişi uygulanmaması ile o eklem yapay olarak pasif hale getirilerek, eksik tahrikli robot kontrolü çalışılmıştır. Pasif olan eklemdaki torku karşılamak için, onunla aynı yönde tork üreten aktif eklem kullanılmıştır. Elde edilen denetleyiciler daha sonra Omni robot kullanılarak deneysel olarak uygulanmıştır.*

**Anahtar Kelimeler** — *Eksik tahrikli robotlar, izdüşüm operatörü, dinamik modelleme, robot kontrolü.*

## I. GİRİŞ

Pasif ya da elastik eklemler, esnek kollar ve robot dinamiğinden kaynaklanan kontrol edilemeyen serbestlik derecesi gibi nedenler ile robotlar, eksik tahrikli olarak tanımlanırlar. Kontrol giriş sayısının robotun serbestlik derecesinden az olması, eksik tahrikli manipülatörlerin kontrolünü zorlu bir problem haline getirmektedir.

Bu bildiride, pasif eklem nedeni ile eksik tahrikli olan robot manipülatörlerinin kontrolü için izdüşüm operatörü ile dinamik çözüm ve denetleyici tasarımları üzerinde durulmuştur. İzdüşüm yöntemi ile dinamik çözüm, [1] giriş kuvvetinin izdüşüm operatörü ile harekete ve ortam tepki kuvvetlerine neden olan bileşenlerine ayrılması temeline dayanır. Bu yöntem, hareket ve kuvvet için iki ayrı geri beslemeli kontrol şemasının geliştirilebildiği ve hareketin bilinmesi ile kuvvetlerin de öngörülebildiği bir formülasyon sunmaktadır. Eklem uzayında, hareketi bir yüzey ile sınırlanmış eksik tahrikli robotların kontrolleri, tepki kuvvetlerinin pasif eklemdaki hareketi telafi edecek şekilde tasarlanması ile sağlanır. [2]

Görev uzayında konum kontrolünde ise temel amaç, uç işlevcinin hedef yörüngeyi olabildiğince düşük bir hata ile takip etmesini sağlayan bir denetleyici tasarlamaktır. İzdüşüm yöntemi ile görev uzayında konum kontrolü için, öncelikle robot dinamiği izdüşüm yöntemine göre tanımlanır. Daha sonra pasif olan eklemdaki hareketi karşılayacak uygun kontrol girişleri hesaplanarak aktif eklemlere uygulanır. [3] Bu yöntem, hareketi kısıtlanmış robotlar ile birlikte, robotta yeterli sayıda kontrol girişi

bulduğunda hareket kısıtlaması olmayan durumlar için de uygulanabilir.

Eksik tahrikli robotların kontrolü için yapılan çalışmalarda, pasif eklemin hedeflenen açılal konuma ulaştığında frenlenerek durdurulması sıklıkla başvurulan yöntemlerden biridir. [4] Bu yöntemlerde pasif eklemin frenleme mekanizmasına sahip olması beklenmekte, aynı zamanda pasif eklemin tamamen hareketsiz hale gelmesi nedeni ile kısıtlanan çalışma alanında hareket planlaması güçleşmektedir. Bu çalışmada tercih edilen izdüşüm yöntemi ile robotlar, pasif eklemden herhangi bir frenleme mekanizması olmaksızın kontrol edilebilir.

Bu çalışmada, test için kullanılan denetleyicilerin elde edilmesi için öncelikle kontrol yönteminin temel aldığı dinamik formülasyon özetlenmiştir. Denetleyicilerin uygulandığı robot manipülatörü olan PHANTOM Omni için kinematik ve dinamik analizler açıklanmıştır. Son olarak elde edilen denetleyicilerin Matlab/Simulink-VREP benzetim ortamlarında ve deneysel olarak testleri yapılmıştır.

## II. İZDÜŞÜM OPERATÖRÜ İLE EKSİK TAHRİKLİ ROBOT KONTROLÜ

Eksik tahrikli robotlarda konum kontrolü yapılırken denetleyiciler, kontrolsüz serbestlik derecesindeki hareketi telafi edecek şekilde tasarlanır. İzdüşüm operatörü yöntemi ile eklem uzayında kontrol yapılırken tepki kuvvetleri kullanılırken, görev uzayında kontrol için aktif eklemlerdeki harekete neden olmayan sıfır uzay torkları kullanılır. İzdüşüm ters dinamiği (1)'de verilmiştir. [2]

$$M_p \ddot{q} + P(b + g) - D_p \dot{q} = P\Gamma \quad (1)$$

Denklemden  $M_p$  robotun bir yüzey ile kısıtlanması durumunda kütle matrisini ifade edip  $M_p = PM + I - P$  ile bulunur.  $P$  izdüşüm operatörü, kısıt Jacobian vektörü  $J_c$  kullanılarak,  $P = I - J_c^+ J_c$  eşitliği ile hesaplanır.  $b$  Coriolis ve merkezkaç kuvvetini,  $g$  yerçekimi ivmesini,  $D_p$  izdüşüm operatörünün zamana göre türevini ve  $\Gamma$  eklem giriş torklarını temsil etmektedir.  $J$  Jacobian matrisini göstermek üzere, eklem uzayında ifade edilen bu eşitliğin her iki

tarafının  $JM_p^{-1}$  ile çarpılması sonucu denklem, görev uzayına (2)'deki gibi transfer edilir:

$$\ddot{x} - \dot{J}\dot{q} + JM_p^{-1}(P(b + g) - D_p\dot{q}) = JM_p^{-1}P\Gamma \quad (2)$$

(2)'de  $J\dot{q} = \dot{x} - \dot{J}\dot{q}$  dönüşümü kullanılarak robot eklemlerindeki ivmelerin uç işlevciye dönüşümü yapılmıştır. Sadeleştirme için  $\Lambda_c = J^{-T}P^{-1}M_pJ^{-1}$  ifadesi kullanılarak (3) elde edilir:

$$\Lambda_c\ddot{x} + \Lambda_c(JM_p^{-1}P(b + g) - (J + JM_p^{-1}D_p)\dot{q}) = F \quad (3)$$

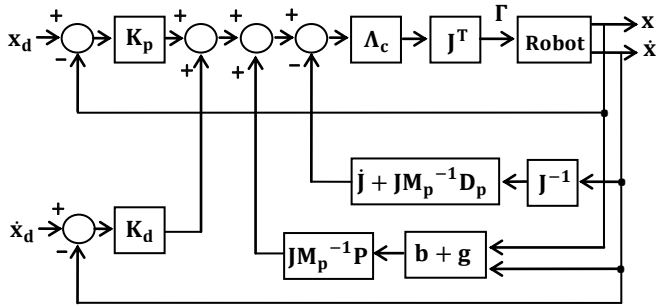
Görev uzayında uç işlevci kuvveti olarak hesaplanan kontrol girişleri,  $J^T$  ile eklem torklarına (4)'teki gibi dönüştürülür. [3]

$$\Gamma = J^TF \\ = J^T(\Lambda_c\ddot{x}_{des} + \Lambda_c(JM_p^{-1}P(b + g) - (J + JM_p^{-1}D_p)\dot{q})) \quad (4)$$

Hareket kontrolü görev uzayındaki konum ve hız hataları temel alınarak PD denetleyici şeklinde (5)'teki gibi tasarlanır:

$$\ddot{x}_{des} = K_p(x_d - x) + K_d(\dot{x}_d - \dot{x}) \quad (5)$$

İzdüşüm dinamiği kullanılarak tasarlanan bir denetleyicinin blok diyagramı Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1: İzdüşüm yöntemi blok şeması

İzdüşüm dinamiği ile tasarlanan denetleyicilerin eksik tahrikli manipülatörlerin kontrolünde kullanılması için yukarıdakilere ek olarak sıfır uzay torkları tanımlanır.  $N = I - J^TJ^\#$  ve  $J^\# = (JM_p^{-1}PJ^T)^{-1}JM_p^{-1}P$  olmak üzere, sıfır uzay torklarının dahil edildiği çözüm (6)'da verilmiştir:

$$\Gamma = J^TF + N\Gamma_0 \quad (6)$$

Robotta hangi eklemin pasif olduğu B matrisi ile tanımlanır; tüm eklemleri aktif olan bir robot için B matrisi robotun eklem sayısı boyutunda bir birim matristir. Eksik tahrikli bir robotun konum kontrolünü gerçekleştirebilmesi için (7) sağlanmalıdır.

$$J^TF + N\Gamma_0 = BJ^TF + BN\Gamma_0 \quad (7)$$

(7)'den sıfır uzay torkları  $\Gamma_0$  aşağıdaki gibi bulunur:

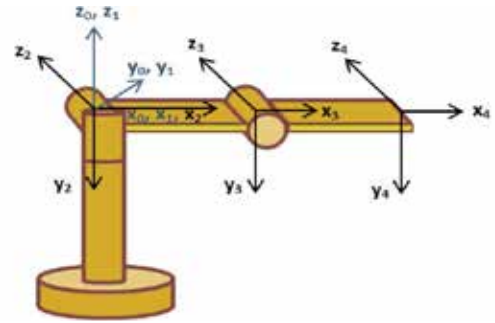
$$\Gamma_0 = -((I - B)N)^+(I - B)J^TF \quad (8)$$

Son olarak sıfır uzay torkları (6)'da yerine konularak eksik tahrikli robot için kontrolör (9)'daki gibi tanımlanır:

$$\Gamma = (I - N[(I - B)N]^+)J^TF \quad (9)$$

### III. ROBOTUN KİNEMATİK VE DİNAMİĞİ

Phantom Omni robot [5], üç aktif dönel eklem sahip seri eklemli bir robot olup, bilek kısmında bulunan üç pasif eklem ile birlikte toplamda 6 serbestlik derecesine sahiptir. Bu çalışmada aktif olan ilk üç eklem göz önünde bulundurulmuştur. Robotun kinematik ile dinamik analizlerinde temel alınan koordinat sistemi yerleşimi Şekil 2'de verilmiştir.

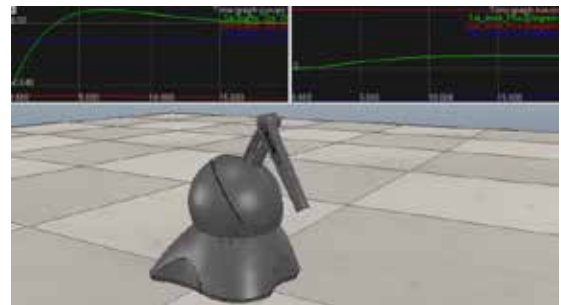


Şekil 2: Robotun koordinat sistemi yerleşimi

Denavit-Hartenberg yöntemi ile robotun ileri kinematiği, böylelikle uç işlevcinin konum ve yönelim eşitlikleri bulunmuştur. Newton-Euler yöntemi ile robotun dinamik parametreleri olan kütle matrisi, Coriolis ve merkezkaç vektörleri ile yerçekimi vektörleri belirlenmiştir.

### IV. BENZETİM VE DENEYLER

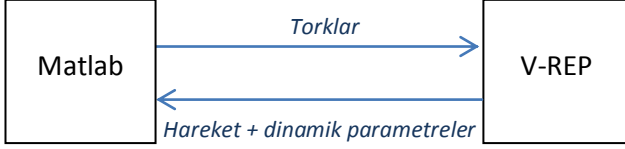
Robotların hareketlerini benzetim sırasında yakından gözlemlemek, dinamiklerinin benzetimi ve denetleyici tasarımında oldukça önemlidir. VREP benzetim yazılımı, robotun mekanik modelini görselleştirilirken, aynı zamanda modellenen dinamiğin ve tasarlanan denetleyicilerin katı model üzerindeki sonuçlarını da gözlemleme fırsatı vermektedir. PHANTOM Omni robotun VREP modeli Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3: VREP benzetim ortamı

VREP uzaktan uygulama programlama arabirimi (remote API) ile sunucu-istemci altyapısını kullanarak harici bir

programlama dili ile kontrol edilebilmektedir. Böylelikle denetleyiciler Matlab ile tasarlanarak eş zamanlı olarak VREP üzerinde test edilmiştir. Matlab-VREP arasındaki iletişim Şekil 4’teki gibi özetlenebilir:

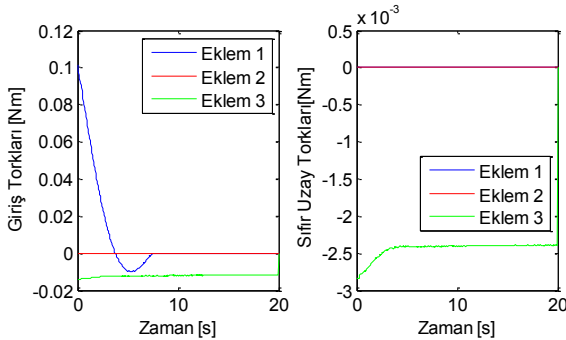


Şekil 4: Matlab-VREP iletişimi

Uç işlevcinin z-yönündeki hareketi hareket sınırı olarak belirlenip yalnızca x-y düzlemi üzerinde hareket edebilmesi için, robotun ileri kinematığı ile elde edilen z-yönündeki öteleme eşitliği kullanılır. Bu durumda z-yönünde hareketi kısıtlayan denklem (10)’daki gibi olmalıdır:

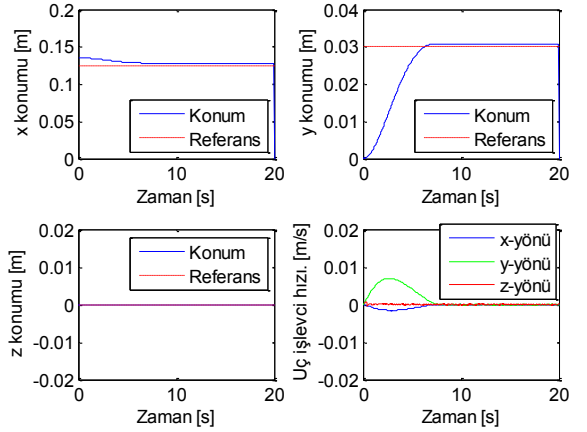
$$z(t) = \phi(t) = -l_1 s_2 - l_2 s_{23} = 0 \quad (10)$$

Kısıt Jacobian vektörü, (10)’un eklem değişkenlerine göre türevleri alınarak bulunur. Daha sonra izdüşüm matrisi P, kısıt Jacobian vektörü kullanılarak hesaplanır. Eksik tahrikli robot kontrol şemasını robotta test etmek üzere, B matrisi robotun 2. eklemine pasif yapacak seçilmiştir. Bu durumda uç işlevcinin x- ve y-yönünde  $x(0) = -0.01$  m ve  $y(0) = +0.03$  m hareketi için 1 ve 3 numaralı eklemlere gönderilen giriş torkları ve 2 numaralı pasif eklem hareketini telafi eden sıfır uzay torkları Şekil 5’te verilmiştir.



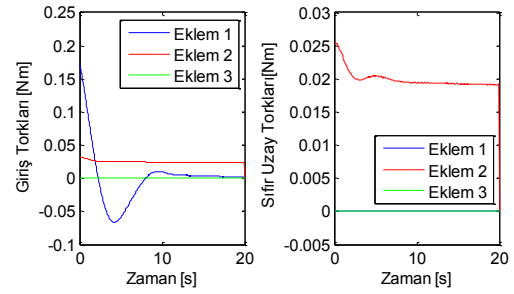
Şekil 5: 2 numaralı eklem pasif olması durumunda eklem torkları ve sıfır uzay torkları

Kontrolör (9) kullanılarak, pasif eklem hareketini telafi edip uç işlevciyi hedef konuma götürecektir şekilde tasarlanmıştır. Sonuç olarak pasif olan 2 numaralı eklem herhangi bir tork uygulanmıyorken, onunla aynı yönde tork üreten 3 numaralı eklemde sıfır uzay torku olduğu görülmüştür. PD kontrolör katsayılarının deneme yanılma ile sırasıyla 70 ve 150 olarak seçildiği durumda, sabit referans için kontrolör performansı Şekil 6’da verilmiştir. Uç işlevci, hedef konumlara kalıcı durumda x-ekseninde  $2 \times 10^{-4}$  m, y-ekseninde  $5 \times 10^{-5}$  m hata ile ulaşmaktadır. Robotun hedef konumunun x-eksenine göre y-ekseninde daha büyük olması nedeniyle, y-yönünde eklem 1 ile uygulanan kuvvetin daha fazla olduğu ve sonuçta robotun bu yönde daha hızlı hareket ettiği görülmektedir.



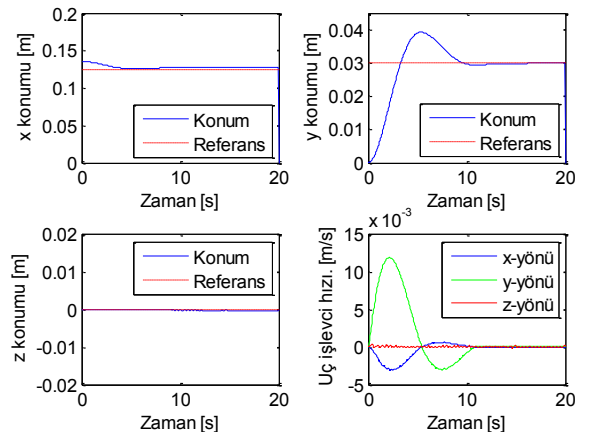
Şekil 6: 2 numaralı eklem pasif olması durumunda uç işlevci konum ve hızları

B matrisi robotun 3. eklemine pasif yapacak seçildiğinde, aynı hedefe ulaşmak için aktif olan 2. eklem üzerinde pasif eklem hareketini telafi etmek üzere sıfır uzay torkları oluşur. Giriş ve sıfır uzay torkları Şekil 7’de verilmiştir.



Şekil 7: 3 numaralı eklem pasif olması durumunda eklem torkları ve sıfır uzay torkları

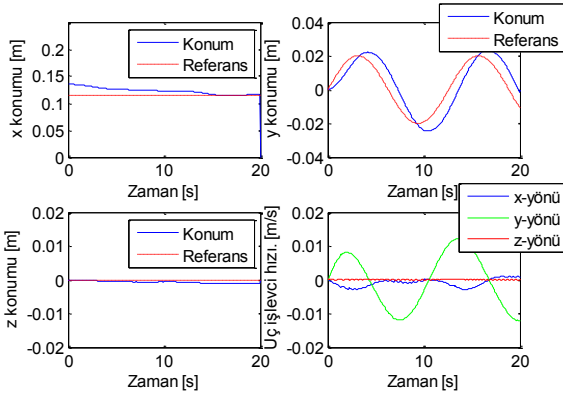
Uç işlevci konum ve hızları P kontrolör 70, D kontrolör 80 olarak seçildiğinde Şekil 8’deki gibi bulunmuştur. Uç işlevci x- ve y-eksenlerindeki konum hedeflerine kalıcı durumda  $1 \times 10^{-4}$  m ve  $4 \times 10^{-5}$  m hata ile ulaşmaktadır.



Şekil 8: 3 numaralı eklem pasif olması durumunda uç işlevci konum ve hızları

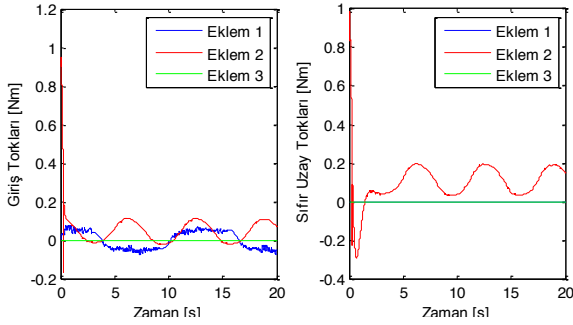
Kontrolörün zamanla değişen referans için performansı Şekil 9’da verilmiştir. 3 numaralı eklem pasif iken y-yönünde  $0.02 \times \sin(0.5t)$  m, x-yönünde sabit  $x(0) = -0.02$  m

hedef yörüngeler olarak belirlenmiştir. Zamanla değişen yörüngeyi takip ederken hatanın  $7 \times 10^{-4}$  m'ye kadar arttığı görülmüştür.

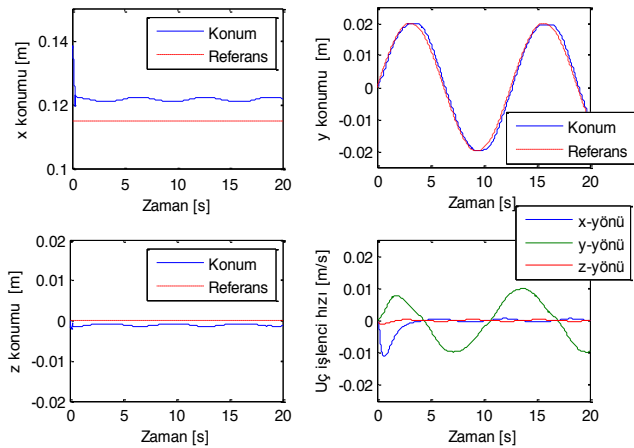


Şekil 9: 3 numaralı eklemin pasif olması durumunda sinüs giriş için uç işlevci konum ve hızları

Deney için motorların DAC değerleri ile giriş torkları arasında doğrusal bir ilişki olduğu varsayılmış ve sürtünme kuvvetleri ihmal edilmiştir. Bilgisayar üzerinden gerçek zamanlı kontrol için HIL API aracı, yazılım olarak Matlab/Simulink kullanılmıştır. Zamanla değişen referans için giriş ve sıfır uzay torkları Şekil 10'da, kontrolör performansı Şekil 11'de verilmiştir.



Şekil 10: Deneyde elde edilen eklem giriş torkları ile sıfır uzay torkları



Şekil 11: Deneyde elde edilen konum ve hızlar

3 numaralı eklem pasif iken x-yönünde hata yaklaşık  $8 \times 10^{-4}$  m'ye kadar artmaktadır. VREP ile kıyaslandığında hatanın x-yönünde arttığı, ancak zamanla değişen yörüngeyi takip ederken maksimum hatanın yaklaşık  $2 \times 10^{-5}$  m olduğu görülmektedir.

#### IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada, PHANTOM Omni robot için herhangi bir eklem kontrol girişi uygulanmaması ile o eklem yapay olarak pasif hale getirilerek, eksik tahrikli robot kontrol şemalarının uygulaması açıklanmıştır. Pasif olan eklemden torku karşılamak için, onunla aynı yönde tork üreten aktif eklem kullanılmıştır. PHANTOM Omni robotta ikinci ve üçüncü eklemler aynı yönde tork üretmektedir. Bu nedenle herhangi biri pasif olarak seçildiğinde kontrol aktif olan diğer eklem ile sağlanmaktadır. Elde edilen sonuçlar, pasif eklemle kontrol yöntemi ile hedef konumlara kalıcı durumda milimetre düzeyinde hatalarla varılabildiğini göstermektedir.

#### KAYNAKÇA

- [1] F. Aghili, "Inverse and direct dynamics of constrained multibody systems based on orthogonal decomposition of generalized force," *Proc. IEEE Conf. Robot. Autom.*, s. 4035–4041, Taipei, Taiwan, Eylül 2003.
- [2] F. Aghili, "A unified approach for inverse and direct dynamics of constrained multibody systems based on linear projection operator: applications to control and simulation," *IEEE Transactions on Robotics*, 21(5), s. 834–849, Ekim 2005.
- [3] M. Mistry, L. Righetti, "Operational space control of constrained and underactuated systems," *Proc. Robotics: Science and Systems*, Los Angeles, CA, Haziran 2011.
- [4] M. Bhave, S. Janardhanan, L. Dewan, "Configuration Control of Planar Underactuated Robotic Manipulator using Terminal Sliding Mode," *4th IFAC Conf. on Advances in Control and Optimization of Dynamical Systems*, s. 148–153, India, Şubat 2016.
- [5] M. H. Koul, P. Kumar, P. K. Singh, M. Manivannan, S. K. Saha, "Gravity compensation for PHANTOM Omni haptic interface," *1st Joint Int. Conf. on Multibody System Dynamics*, Lappeenranta, Finland, Mayıs 2010.

# Düzlemsel Pergel Yürüme Modelinin Bilekte Seri Yaylı Eyleyici ile Denetimi ve Kararlılığı

Deniz Kerimoğlu

Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü  
Bilkent Üniversitesi,  
Türk Hava Kurumu Üniversitesi  
Ankara, Türkiye  
Email: kerimoglu@ee.bilkent.edu.tr

Ömer Morgül

Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü  
Bilkent Üniversitesi  
Ankara, Türkiye  
Email: morgul@ee.bilkent.edu.tr

Uluç Saranlı

Bilgisayar Mühendisliği Bölümü  
Orta Doğu Teknik Üniversitesi  
Ankara, Türkiye  
Email: saranli@ceng.metu.edu.tr

**Özetçe** —Pasif dinamik yürüme modelleri, eğimli yüzeylerde herhangi bir eyleyici olmaksızın insan benzeri bir yürüyüş sergileyebilen ve yürüme davranışının temel özelliklerini ifade edebilen modellerdir. Bunlar arasında en yaygın olanı, noktasal bir gövde ve iki bacadan oluşan pasif pergel yürüyüş modelidir. Literatürde bu modele eklenen çeşitli eyleyiciler ile düz yüzeylerde yürüyüş davranışı elde edebilen çalışmalar mevcuttur. Biz bu çalışmamızda, insan ayağına seri elastik tahrik ekleyerek düz zeminde nasıl kararlı yürüyüş elde edildiğini incelemek ve bir alt-vücut robotik ortezin ayak bileği kontrolünde kullanmak için basit bir model önerdik. Bu çalışmada, modelin karma dinamik denklemlerini türeterek, dönel yörüngelerin bulunması için Poincaré analiz yöntemlerini kullandık. Böylece modelin asimptotik kararlı bir şekilde yürüyebildiğini gösterdik ve kararlılığın serbest yay uzunluğuna bağlılığını inceledik. Daha sonra modelin yürüyüşünde yay uzunluğunun artmasına bağlı olarak gerçekleşen periyot katlanarak çatallanma (period doubling bifurcation) ve kaotik rejimlerini inceledik. Son olarak da, modele doğrusal orantılı serbest yay uzunluğu kontrolü ekleyerek sistemin kararlılığını artırdık.

**Anahtar Kelimeler**—pasif pergel yürüyüş, seri-elastik eyleyici, çatallanma analizi, geri-beslemeli kontrol.

## I. GİRİŞ

İnsan ve diğer canlılarda yürüme davranışı sinir, iskelet ve kas sistemleri dahil birçok karmaşık bileşenin biraraya gelmesi ile mümkün olmaktadır. Teorik olarak tüm bu bileşenler dahil edilerek bu davranış tüm karmaşıklığıyla modellenilebilecek olsa da, binlerce değişken içerecek olan böyle bir modelin detaylı analizi veya kararlı kontrolü uygulanabilir değildir. Halbuki, insan yürüyüşünün temel özellikleri çok daha basitleştirilmiş bir model çerçevesinde açıklanabilirse, gerek analiz, gerekse kontrolcü tasarımı için çok daha uygun bir teorik zemin hazırlanmış olacaktır. Bu bağlamda, literatürde çeşitli pasif dinamik yürüme modelleri önerilmiştir ve pergel yürüme (compass gait) modeli de bunlardan en temel olanıdır [1]. Bu model hafif eğimli yüzeyde herhangi bir eyleyici olmadan sadece yerçekimi sayesinde kararlı bir şekilde yürüyebilmektedir ve insan yürüyüşünü basit çift sarkaç davranışı ile çok düşük özgülük derecesine indirgemektedir.

Pasif dinamik yürüme modelleri herhangi bir eyleyici olmaksızın asimptotik kararlı olmalarına rağmen çekim bölgeleri kısıtlı olmaktadır. Ayrıca bacağın yerle çarpışmasından dolayı meydana gelen enerji kaybının telafisi için eğimli bir yüzeye

ihtiyaç duymaktadırlar. Modelin kararlılık alanını genişletmek ve eğimli yüzey gereksinimini ortadan kaldırmak için literatürde çeşitli aktif kontrol yöntemleri önerilmiştir. Çalışmalar kalça ve ayak eklemlerinde tork tahriki, topuk teması esnasında ani enerji girdisi ve yaylı bacakların kullanımına odaklanmıştır. Pasif kontrol temel alınarak kalça ve ayak eklemlerine tork uygulamak suretiyle eğimli yüzeylerde dinamik yürüyüş elde edilmiştir [2]. PPY modelinin aktif kontrolü topuk temasının hemen öncesinde topuktan ani enerji girdisi sağlanarak ve temas bacağına tork uygulayarak sağlanır [3]. İki bacaklı robota minimalist kontrol yaklaşımı uygulayarak engebeli zeminlerde yürüyüş elde edilmiştir [4].

PPY modeline ayak modeli ekleyerek aktif kontrol uygulayan çalışmalar [5] bacağı ve dolayısıyla modele itme kuvveti sağlar. Bu bağlamda, PPY modelinin bozuk zeminde yürüyüşünü sağlamak için bacağın yerle çarpışmasından önce modele orantısız-türevsel (PD) kontrol döngüsü aracılığıyla ayak torku uygulanması incelenmektedir [6]. Yazarlar basit bir üç boyutlu pasif dinamik yürüme prototipini ayak bileklerine yunuslama ve yatma eksenlerine eyleyici ekleyerek yürütmüşlerdir [7]. Ayak modeli kullanan çalışmalara alternatif olarak topuk teması esnasında kaybolan enerjiyi telafi etmek için temas bacağından ani itme kuvveti uygulanması üzerine çalışılmıştır [8], [3].

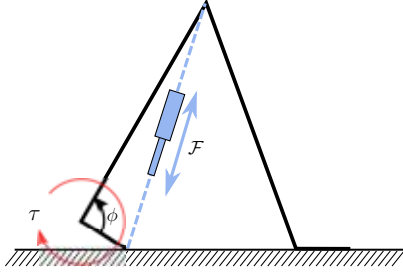
Biz bu çalışmamızda, PPY modeline yay ekleyerek sağlıklı yürüyüşün topuk kalkışı fazında gerçekleşen itme kuvvetini seri elastik eyleyici yapısı kullanarak modelledik. Modelin karma dinamik denklemlerini türetilip Poincaré analiz yöntemi aracılığıyla dönel yörüngeleri bulup belirli sistem parametreleri dahilinde sistemin asimptotik olarak kararlı olduğunu gösterdik. Daha sonra sistemin dönel yörüngelerini serbest yay uzunluğu parametresine bağlı olarak elde ettik ve kararlılık, çatallanma analizlerini gerçekleştirdik. Modele doğrusal orantılı serbest yay uzunluğu kontrolü ekleyerek elde ettiğimiz dönel yörüngeleri kararlı hale getirdik dolayısıyla modelin kararlılığını artırdık. Bu bildiri [9]'da kapsamlı bir şekilde yapmış olduğumuz çalışmaların derlenmiş bir özetiştir.

## II. AKTİF BİLEK EKLEMLİ PERGEL YÜRÜYÜŞ MODELİ

### A. Modelleme Varsayımları

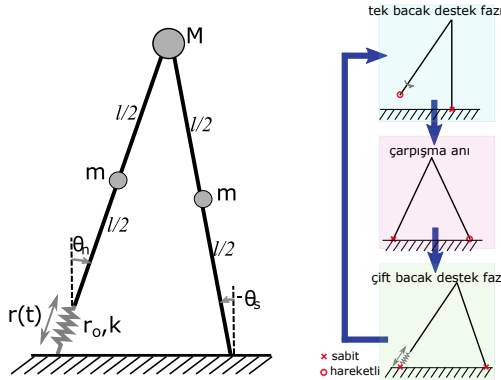
PPY modelinde, çarpışmadan kaynaklı enerji kaybı eğimli bir zemin ve yerçekimi sayesinde telafi edilmektedir. Bu gereksinimleri gidermek ve düz zeminde yürüyüş elde etmek için

literatürde önerilen eklem torku ve ani kuvvet girdisi yöntemlerinden farklı olarak PPY modeline seri elastik eyleyicili bir aktif bilek eklemine ekledik. Yürüyüş esnasında ayak bileğinin ürettiği tork, Şekil 1’de gösterildiği gibi ayağın manivela kolu işlevi sayesinde vücuda aktarılır. Ayak bilek eklemi ve ayak, bacak doğrultusunda kuvvet uygulayan noktasal bir topuk olarak modellenmiştir.



Şekil 1. Bilek torkunun doğrusal bir kuvvet girdisi ile modellenmesi.

Şekil 2’de önerdiğimiz aktif bilek eklemli pergel yürüyüş (ABEPY) modeli gösterilmiştir. Modelde insan gövdesi, kolları ve kafası noktasal bir kütle  $M$  ile, bacaklar ise kütleleri merkezlerinde konumlanmış şekilde  $m$  ve uzunlukları  $l$  olan çubuklar ile modellenmiştir. Yay sabiti  $k$  ve yayın serbest uzunluğu  $r_0$  olarak adlandırılmıştır.



Şekil 2. Aktif bilek eklemli pergel yürüyüş modeli (ABEPY) ve yürüme davranışının fazları.

Modelin yürüyüşü iki fazdan oluşmaktadır. Tek bacak desteği fazında, model çift sarkaç gibi davranır fakat bacakların birbirlerinin yanından geçerken yere değmediği varsayılır. Bu fazın sonunda ayaklar düz ve kaymaz bir yüzeye esnek olmayan çarpışma gerçekleştirirler ve ardından temas halinde olan bacağına bağlı sıkıştırılmış bilek yayı etkin hale getirilir. Böylelikle, arka temas bacağına bağlı yayın modele itme kuvveti sağladığı ve ön temas bacağının sabit topuk noktası etrafında serbestçe dönebildiği bir çift bacak destek fazına geçilir. Yay tüm enerjisini modele aktardıktan sonra yayın yerle temas halindeki ucu yerden kalkar ve bu bacak salınım fazına geçer. Şekil 2’te modelin bir yürüyüş döngüsü esnasında geçtiği fazlar resmedilmektedir.

### B. Tek Bacak Destek Dinamikleri

Bu fazda, bilek yayı sıkıştırılmış konumda olup, salınım yapan bacağın topuk temasına kadar bacağına kuvvet uygula-

mayacak şekilde sabit tutulduğu varsayılmaktadır. Bu fazda, ABEPY modeli PPY modeliyle aynı dinamiklere sahiptir. Konum değişkenlerinin (konfigurasyon) vektörü şöyle tanımlanır

$$\mathbf{q}_{ss} := [\theta_s, \theta_n]^T. \quad (1)$$

Modelin bu fazdaki dinamikleri literatürde PPY modeline odaklanmış çalışmalarda da [2] mevcuttur ve aşağıdaki şekildedir

$$\mathbf{M}_{ss}(\mathbf{q}_{ss})\ddot{\mathbf{q}}_{ss} + \mathbf{B}_{ss}(\mathbf{q}_{ss}, \dot{\mathbf{q}}_{ss})\dot{\mathbf{q}}_{ss} + \mathbf{G}_{ss}(\mathbf{q}_{ss}) = \mathbf{0}. \quad (2)$$

### C. Çarpışma Fonksiyonu

Salınım bacağı yerle temas ettiği anda plastik çarpışma meydana gelir ve arka temas bacağındaki sıkıştırılmış yay etkinleştirilir. PPY modelinin aksine, salınım bacağı yerle temas ettikten sonra her iki bacak da yerde kalmaya devam eder ve impulsif kuvvetlere maruz kalırlar. Bundan dolayı, çarpışma sonrası hızları hesaplamak için açısal momentumun korunumu prensibi kullanılamamaktadır. Dolayısıyla, çarpışma sonrası hızlarını bulmak için ABEPY modelinin salınım fazı esnasında temas bacağı yayı aktif durumdaykenki dinamik denklemler Lagrange metodu yardımıyla türetilmiştir. Bu amaçla, ilk olarak üç serbestlik dereceli sistemin çarpışma anı olarak nitelendirilen bu fazın konfigurasyon uzayını aşağıdaki gibi belirledik

$$\mathbf{q}_c := [\theta_s, \theta_n, r]^T. \quad (3)$$

Sistemin kinetik ve potansiyel enerjisi çarpışma esnasında meydana gelen impulsif kuvvetlerin bir fonksiyonu olarak yazılmış ve çarpışma esnasındaki dinamik denklemler aşağıdaki gösterildiği gibi türetilmiştir

$$\mathbf{M}_c(\mathbf{q}_c)\ddot{\mathbf{q}}_c + \mathbf{B}_c(\mathbf{q}_c, \dot{\mathbf{q}}_c)\dot{\mathbf{q}}_c + \mathbf{G}_c(\mathbf{q}_c) = \mathbf{J}_c(\mathbf{q}_c)\mathbf{F}_I. \quad (4)$$

Burada,  $\mathbf{F}_I$ , salınım bacağının impulsif temas kuvvetleri,  $\mathbf{J}_c(\mathbf{q}_c)$  ise genelleştirilmiş koordinatlardan topuk koordinatlarına geçişi sağlayan Jacobian matrisidir.  $\mathbf{M}_c(\mathbf{q}_c)$ , kütle matrisi,  $\mathbf{B}_c(\mathbf{q}_c, \dot{\mathbf{q}}_c)$  Coriolis kuvvetleri ve  $\mathbf{G}_c(\mathbf{q}_c)$  yerçekimi elemanlarıdır.

Çarpışma olayı ani olarak gerçekleştiği için (4) içinde sadece impulsif kuvvetler ve ivmelenmeler göz önünde bulundurulmuştur. Böylelikle çarpışma öncesi ve sonrasındaki hızlar aşağıdaki gibi ifade edilebilir

$$\mathbf{M}_c(\mathbf{q}_c)(\dot{\mathbf{q}}_c^+ - \dot{\mathbf{q}}_c^-) = \mathbf{J}_c(\mathbf{q}_c)\mathbf{F}_I. \quad (5)$$

Burada  $\dot{\mathbf{q}}_c^-$  ve  $\dot{\mathbf{q}}_c^+$  sırasıyla çarpışma öncesi ve sonrası hızlarını ifade etmektedir ve  $\mathbf{F}_I$  da impulsif çarpışma kuvvetlerinin genliğini ifade eder ve bu ilişki kullanılarak çarpışma sonrası hızları aşağıdaki gibi elde edilir [10]

$$\dot{\mathbf{q}}_c^+ = \mathbf{H}_c(\mathbf{q}_c^-)\dot{\mathbf{q}}_c^-. \quad (6)$$

Buradaki tanımlar ve denklemler yer kısıtından dolayı bu çalışmaya dahil edilmemiş olup detaylar yapmış olduğumuz şu çalışmadan edinilebilir [9].

### D. Çift Bacak Destek Dinamikleri

ABEPY modelinde salınım bacağı yere çarptıktan sonra arka temas bacağındaki yay tüm enerjisini modele aktarana kadar her iki bacak da yerle teması sürdürür. Çift bacak destek fazı dediğimiz bu fazda Şekil 2’de görüleceği üzere modelin

hareketi bir serbestlik derecesine iner. Biz bu serbestlik derecesini yayın radyal genişlemesi olarak seçtiğimizde modelin konfigürasyon uzayı aşağıdaki gibi olur

$$q_{ds} := r .$$

Bu fazda bacak açıları  $\theta_s$  ve  $\theta_n$  kısıtlanmış olup  $r$ 'ın kinematik fonksiyonları olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilirler

$$\theta_s = -\pi/2 + \arccos\left(\frac{d^2 - l^2 + (l+r)^2}{2d(l+r)}\right)$$

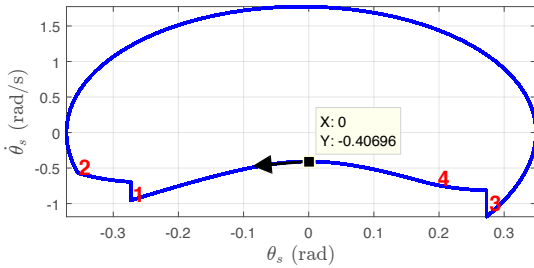
$$\theta_n = \pi/2 - \arccos\left(\frac{d^2 + l^2 - (l+r)^2}{2dl}\right) .$$

Bu denklemdeki  $d$  topuklar arasındaki mesafedir ve salınım bacağı yere çarptığı anda, sonrasında sabit kalacak şekilde belirlenir. Bu faz, yay serbest uzunluğuna ulaştığında yani potansiyel enerjisinin tamamını modele aktardığında sonlanır. Bu esnada prizmatik eklem kilitlendiği ve yayın havada bir eyleyici tarafından yeniden sıkıştırılmaya başlandığı varsayılır. Bu sırada arka temas bacağı salınıma başlayarak tekrar tek bacak destek fazına geçilmiş olur.

### III. BENZETİM ÇALIŞMALARI

#### A. Modelin Limit Çevrimi

Modelin karma (hybrid) dinamik denklemlerini türettikten sonra sayısal integral ve benzetim analizlerimizi gerçekleştirmek için Matlab ortamını kullandık. Benzetimimizde model parametrelerini  $M = 1kg$ ,  $m = 0.01kg$ ,  $l = 1m$ ,  $k = 500N/m$  ve  $r_0 = 0.014m$  olacak şekilde seçtik. Modelin benzetimini tek bacak destek fazından, durum değişkenleri  $\theta_s = 0rad$ ,  $\dot{\theta}_s = -0.364rad/s$ ,  $\theta_n = -0.011rad$ ,  $\dot{\theta}_n = 1.328rad/s$  olacak şekilde başlattık. Şekil 3 üzerinde 1 ile işaretlenmiş noktada salınım bacağı yerle temas eder ve impulsif çarpışma dolayısıyla sistemin hızlarında ani bir değişim meydana gelir. Bunu takiben 2 ile işaretlenmiş noktada, bilek yayı modele tüm enerjisini vererek serbest uzunluğuna ulaşmıştır. Bu noktada temas bacağı salınım, salınım bacağı ise temas bacağı olarak yeniden isimlendirilmiştir. 3 ve 4 ile işaretlenmiş noktalar ise diğer bacağın çarpışma ve yerden kalkma anlarıdır. Şekilde görüldüğü gibi bacağın yörüngesi bir limit çevrimine yakınsamaktadır ve model kararlı bir şekilde yürümektedir.



Şekil 3. ABEPY modelinin temas bacağının limit çevrimi. Çevrimin bir döngüsü modelin iki adımına karşılık gelmektedir. Önemli geçişler numaralarla işaretlenmiştir.

#### B. Tepe Noktası Poincaré Fonksiyonu ve Kararlılık

Limit çevrimlerinin varlığını ve kararlılığını incelemek için bu bölümde Poincaré kesit yöntemini kullandık. Bu doğrultuda öncelikle modelin tek bacak destek fazında ve  $\theta_s = 0$  ve

$\dot{\theta}_n > 0$  konfigürasyonunda olduğu varsayılarak durum uzayında bir Poincaré kesiti seçtik. Tepe noktası (apex point) dediğimiz bu durum, gövde kütesinin en yüksek olduğu ana denk gelmektedir. Sistem bu Poincaré kesitinden başlayarak sırasıyla topuk teması, çift bacak destek fazı ve diğer bacak için salınım fazından geçtikten sonra diğer tepe noktasına gelmektedir. Poincaré fonksiyonu tanımlamak için modelin  $i$ 'nci tepe noktasındaki durum vektörü  $x_i$  ve  $(i+1)$ 'inci tepe noktasındaki durum vektörü  $x_{i+1}$  olsun. Karma dinamikleri kullanarak sayısal olarak tepe noktası Poincaré fonksiyonunu aşağıdaki gibi elde edebiliriz

$$x_{i+1} = G(x_i) . \quad (7)$$

Burada  $x := [\theta_s, \theta_n, \dot{\theta}_n]^T$  modelin Poincaré kesiti üzerindeki durum vektörüdür. Modelin limit çevriminin varlığı ve kararlılığı elde ettiğimiz Poincaré fonksiyonunun sabit noktaları (fixed point) incelenerek belirlenebilir. Bu noktalar aşağıdaki denklemin çözümlerine karşılık gelmektedir

$$x^* = G(x^*) . \quad (8)$$

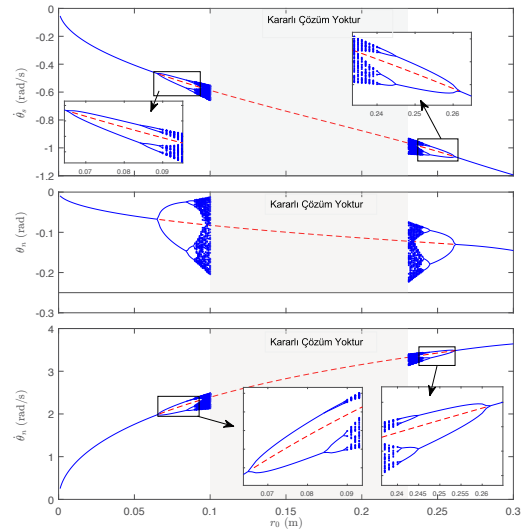
Burada  $x^*$  model yörüngeleri arasından limit çevrimi olanların Poincaré kesitiyle kesiştiği noktadır. Bu noktanın yerel kararlılığı aşağıdaki Jacobian matrisinin öz değerlerine (eigenvalues) bakılarak belirlenir

$$x_{i+1} - x^* \approx DG|_{x^*}(x_i - x^*) . \quad (9)$$

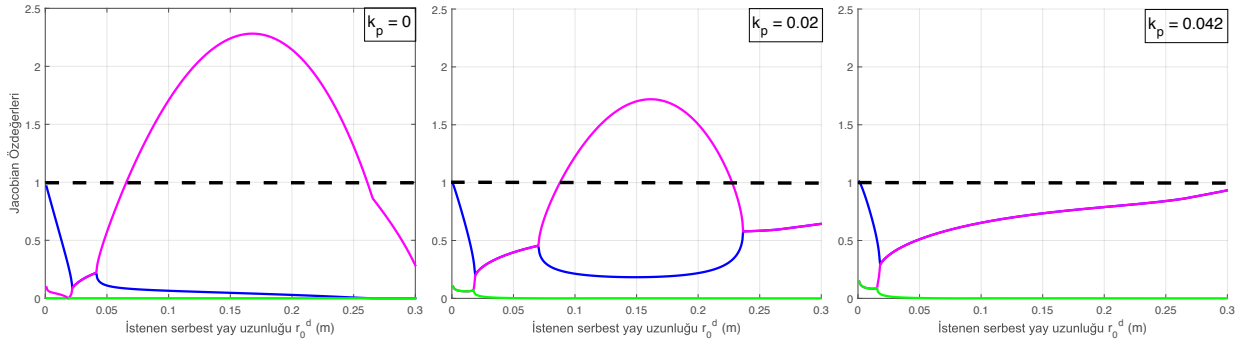
Poincaré fonksiyonunun ( $G$ ) kapalı formu mevcut olmadığından dolayı  $DG|_{x^*}$  Jacobian matrisini sayısal olarak hesapladık. Örnek olarak, önceki bölümde belirli parametre kümesi için elde ettiğimiz limit çevrimi Jacobian matrisininin  $[0.2944 + 0.4786i, 0.2944 - 0.4786i, 0]$  öz değerlerinin maksimum genliği birden küçük olduğundan sistem kararlıdır.

#### C. Çatallanma Analizi

Modelin davranışını daha kapsamlı inceleyebilmek için parametreleri önceki bölümlerde verdiğimiz gibi sabit seçip sabit noktaların serbest yay uzunluğuna ( $r_0$ ) bağlı grafiğini şekil 4'de görüldüğü gibi elde ettik. Küçük  $r_0$  değerleri için



Şekil 4. ABEPY modelinin  $k = 100N/m$  değeri için sabit noktalarının serbest yay uzunluğuna bağlı çatallanma grafiği.



Şekil 5. Sabit noktaların Jacobian matrislerinin özdeğerlerinin istenen serbest yay uzunluğuna bağlı grafiği. Kesikli çizginin altında kalan alan kararlı bölgeyi göstermektedir.  $k_p = 0.042$  değerinde tüm sabit noktalar kararlı hale gelmektedir.

kararlı periyot-1 yürüyüş şekli elde ettik.  $r_0$  değerini artırdıkça modele daha fazla enerji enjekte etmiş olmakla beraber periyot katlanarak çatallanma (periyot-2, periyot-4,...,periyot- $2^n$ ) ve nihayet kaotik yürüyüş formları elde ettik.  $r_0 > 0.1$  değerinden sonra kararlı yürüyüş formları bulamamaktayız. Fakat,  $r_0$ 'yu daha da artırdığımız zaman sırasıyla kaotik yürüyüş formundan başlayarak periyot- $2^n$ ,..., periyot-4, periyot-2 ve nihayet periyot-1 yürüyüş formları elde ettik.

#### D. Geri Beslemeli Serbest Yay Uzunluğu Kontrolü

Şekil 4'de görüldüğü gibi bu model ile sabit parametreler kullanarak her hız için kararlı bir davranış elde etmek mümkün olmamaktadır. Bu gözlem ışığında, modelin kararlılığını artırmak ve istediğimiz hızda yürüyüş elde etmek amacıyla bilek yayına geri beslemeli serbest bir yay uzunluğu kontrolü ekledik. Bu bağlamda, yayın serbest uzunluğunu her tepe noktası anında, doğru orantılı olarak temas bacağı hızının geri beslemesi ile aşağıdaki gibi kontrol ettik

$$r_0 = r_0(\dot{\theta}_s^d) + k_p(\dot{\theta}_s - \dot{\theta}_s^d). \quad (10)$$

Burada,  $r_0(\dot{\theta}_s^d)$  istenen hız karşılık gelen ve Şekil 4'ten elde edilen limit çevrimindeki serbest yay uzunluğu,  $k_p$  doğru orantı katsayısı,  $\dot{\theta}_s^d$  ise istenen temas bacağı hızıdır. Bu geribesleme sayesinde sabit serbest yay uzunluğu ile kararsız olan limit çevrimlerinden bir tanesini kararlı hale getirmeyi başardık.

Şekil 5'da çeşitli  $k_p$  kontrol katsayıları için elde ettiğimiz sabit noktalara karşılık gelen Jacobian özdeğerleri görülmektedir. İlk olarak  $k_p = 0$ , modele kontrol uygulanmadığı durumu göstermektedir ve modelin belirli sabit noktalarda kararsız olduğu görülmektedir.  $k_p = 0.02$  iken modelin kararsız olduğu bölge küçülmüştür.  $k_p = 0.042$  değerinde ise model tüm sabit noktalarda kararlı hale gelmektedir. Böylelikle yayda biriktirilen enerji miktarını temas bacağındaki hız hatasına doğrusal orantılı geri besleme aracılığıyla kontrol ederek modelimizin kararlılığını artırmış olduk.

#### IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada, ayak bileğine bağlı seri elastik bir eyleyici yardımıyla düz bir zeminde yürüyebilen düzlemsel bir dinamik yürüme modeli önerdik. Bu modelde bilek eklemine dönел hareketi basitleştirilmiş prizmatik eklem aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. İnsanın yürüyüş esnasında gerçekleştirdiği bilekten itme hareketini temel alarak yayı topuk teması esnasında

etkinleştirdik. Çalışmamızın hedefi, alt vücutları hasar görmüş olan hastaları yürütmek için kullanılan robotik ortezlerin ayak bilek eklemi kullanımındaki eksiklik göz önünde bulundurularak bilek eklemine eyleyici yardımıyla aktif hale getirilmesinin yürüyüş etkisini incelemektir.

Modelimizin karma dinamik denklemlerini türetip Matlab programı aracılığıyla sayısal Poincaré fonksiyonunu ve bu fonksiyonun sabit noktasını bulduk. Daha sonra yay sıkışmasının bir fonksiyonu olarak bu sabit noktaların Jacobian matrisini elde edip kararlılık analizi yaptık. Belirli bir parametre kümesi için düz bir zeminde asimptotik kararlı yürüyüş elde ettik ve yürüyüşün çatallanma yapısını ortaya çıkardık. Son olarak, bilek yayına geri beslemeli serbest yay uzunluğu kontrolü ekleyerek modelin kararlılığını artırdık.

#### KAYNAKÇA

- [1] T. McGeer, "Passive dynamic walking," *Int. J. of Robotics Research*, vol. 9, no. 2, pp. 62–82, Mar. 1990.
- [2] A. Goswami, B. Espiau, and A. Keramane, "Limit cycles in a passive compass gait biped and passivity-mimicking control laws," *Autonomous Robots*, vol. 4, no. 3, pp. 273–286, 1997.
- [3] A. D. Kuo, "Energetics of actively powered locomotion using the simplest walking model," *J. of Biomechanical Engineering*, vol. 124, no. 1, pp. 113–120, 2002.
- [4] F. Iida and R. Tedrake, "Minimalistic control of a compass gait robot in rough terrain," in *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 2009, pp. 1985–1990.
- [5] D. Maykranz and A. Seyfarth, "Compliant ankle function results in landing-take off asymmetry in legged locomotion," *J. of Theoretical Biology*, vol. 349, pp. 44–49, 2014.
- [6] K. Byl and R. Tedrake, "Approximate optimal control of the compass gait on rough terrain," in *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 2008, pp. 1258–1263.
- [7] R. Tedrake, T. W. Zhang, M.-f. Fong, and H. S. Seung, "Actuating a simple 3d passive dynamic walker," in *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, vol. 5, 2004, pp. 4656–4661.
- [8] P. A. Bhounsule, "Control of a compass gait walker based on energy regulation using ankle push-off and foot placement," *Robotica*, vol. FirstView, pp. 1–11, 4 2014.
- [9] D. Kerimoğlu, m. Morgül, and U. Saranlı, "Stability and control of planar compass gait walking with series-elastic ankle actuation," *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 2016. [Online]. Available: <http://tim.sagepub.com/content/early/2016/09/09/0142331216663823.abstract>
- [10] J. W. Grizzle, G. Abba, and F. Plestan, "Asymptotically stable walking for biped robots: Analysis via systems with impulse effects," *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 46, no. 1, pp. 51–64, 2001.

# RoboCup Arama Kurtarma Benzetim Ortamında Monte Carlo Ağaç Araması Yöntemiyle Planlama

Okan Aşık ve H. Levent Akın  
Bilgisayar Mühendisliği Bölümü  
Boğaziçi Üniversitesi  
İstanbul, Türkiye  
Email: okan.asik,akin@boun.edu.tr

**Özetçe** —RoboCup arama kurtarma benzetim ortamı çoklu karar verme problemleri için zorlu bir platform sunmaktadır. Bu çalışmada benzetim ortamında gerçekleşen bir deprem senaryosunda yangınları söndürmek için geliştirilen çoklu planlama yöntemimizi sunuyoruz. Literatürde daha çok kısıtlı eniyileme yöntemleriyle çözülen bu problemi karar verme literatüründeki yöntemlerle çözüyoruz. Problemi Markov Karar Süreci olarak modelleyip Monte Carlo Ağaç Araması yöntemiyle planlama yapıyoruz. Kullandığımız Monte Carlo algoritmasını özgün bir serme algoritması kullanarak iyileştiriyoruz. Markov Karar Süreci benzetim ortamı deneylerinde yeni sonuçlara çok yakın sonuçlar elde ettiğimizi gösteriyoruz. Ayrıca önerdiğimiz serme algoritmasının başarısının benzetim sayısının artmasına bağlı olarak arttığını gösteriyoruz.

**Anahtar Kelimeler**—Çoklu Markov Karar Süreci, Markov Karar Süreci, Monte Carlo Ağaç Araması, RoboCup Arama Kurtarma Benzetim Ortamı

## I. GİRİŞ

RoboCup Arama Kurtarma Benzetim Ortamı (RAKBO) [1] gerçek haritalar üzerinde deprem sonrası oluşacak yangın, yıkım ve insan davranışlarını benzetmektedir. RAKBO’da dört çeşit etmen bulunmaktadır: sivil, itfaiye, polis ve ambulans. Sivillerin davranışları benzetim ortamı tarafından kontrol edilirken itfaiyeler, polisler ve ambulanslar için kontrolçüler geliştirilmesi hedeflenmektedir. İtfaiyeler oluşan yangınları söndürüp, polisler kapanan yolları açarken, ambulansların görevi yaralıları toplama bölgesine götürmektir. Ana hedef değişik etmenlerin uyum içinde hareket ederek oluşabilecek can ve mal kayıplarını en aza indirecek algoritmalar geliştirmektir.

Literatürdeki çalışmalar ve yarışan takımlar [2] problemi görev dağılımı olarak modellemektedir. Örnek olarak yangın söndürme problemini ele alırsak, harita üzerinde değişik yerlerde çıkan yangınlara hangi itfaiye etmenlerinin müdahale edeceği hesaplanmaktadır. Her itfaiyenin müdahale edebileceği her yangın için bir fayda hesaplanmakta ve kısıtlı eniyileme yöntemleri kullanılarak tüm etmenler için en faydalı eşleşmeler bulunmaktadır. Bu yaklaşımın başarısı fayda fonksiyonunun doğruluğuna ve eniyileme yönteminin başarısına bağlıdır.

Markov Karar Süreci (MKS) karar verme problemleri için matematiksel bir model sunmaktadır. MKS problemlerinde, eniyi çözüm politikası değer döngüseli algoritmasıyla hesaplanmaktadır [3]. Değer döngüseli algoritması her durum için alınabilecek eniyi ödüllü yinelemeli olarak hesaplanmaktadır.

Türkiye Robotbilim Konferansı, 2016

Bizim ele aldığımız yangın söndürme problemi birden çok etmenin karar vermesini gerektirdiği için kullandığımız model Çoklu Markov Karar Verme Süreci (ÇMKS) olarak adlandırılmaktadır. Bu modelde eylem seti her etmenin eylemlerinin çapraz çarpımından oluşmaktadır. Eğer modelimizde 3 etmen varsa ve her etmenin iki eylemi varsa toplam eylem sayımız sekiz ( $2 \times 2 \times 2 = 8$ ) olacaktır. Yani eylem sayısı etmen sayısı ile üstel olarak artmaktadır. Eğer durum uzayında etmenlere bağlı faktörler varsa bunlar da modelin karmaşıklığını üstel olarak arttıracaktır.

Literatürde, zor MKS problemleri için geliştirilen yöntemleri iki gruba ayırabiliriz: model yakınsamaları ve yaklaşık algoritmalar. Model yakınsamaları modelin karmaşıklığını azaltacak soyutlamalar yaparak problemi klasik yöntemlerle çözülebilecek şekilde kolaylaştırmayı hedeflemektedir. Yaklaşık algoritmalar da algoritmanın başarısından feragat ederek bir sonuç elde etmeyi hedeflemektedir. Biz çalışmamızda hem model yakınsaması hem de yaklaşık algoritma kullanılmaktadır. RAKBO’yu tüm özellikleriyle MKS olarak modellemek mümkün değildir. Bu sebeple, problemi soyutlayarak daha basit bir ÇMKS modeli oluşturuyoruz. Oluşturduğumuz modeli, yaklaşık bir algoritma olan Monte Carlo Ağaç Araması (MCAA) yöntemiyle çözüyoruz.

Monte Carlo Ağaç Araması yöntemi mevcut durumdan başlayarak bir durum-eylem ağacı oluşturmaktadır. Bu ağaç başlangıç durumundan itibaren sürecin bitişine kadar süren benzetimlerle oluşturulmaktadır. En temelde benzetim sırasında toplanan ödüller durum-eylem ikililerinin beklenen değerini örneklemektedir. Belirli bir benzetim sayısına ulaşıldığında en yüksek ödüllü veren eylem o durum için seçilmiş olmaktadır.

MCAA algoritması her düğümde seçeceği eylemi üst güven limiti (upper confidence bound-UCB1) [4] algoritmasına göre seçer. Bu algoritmayla düğümlerdeki eylem seçimi çok kollu kumar makinesi (Multi-Armed Bandit) olarak modellenmiş olur. Benzetim sırasında henüz düğüm oluşturulmamış adımlarda serme (rollout) algoritması kullanılmaktadır. Bu algoritma eylem seçimini tamamen rastgele yapmaktadır. Bu çalışmada serme algoritması olarak sezgisel bir algoritma olan *fırsatçı* algoritma kullanılmaktadır.

Yöntemimiz oluşturduğumuz örnek ÇMKS problemlerinde denenmiştir. Bu problemleri küçük seçerek eniyi değerleri elde ediyoruz. Deneylerimize göre yaklaşımımızın %97 oranında eniyi sonuçlara yakın olduğunu gösteriyoruz.

## II. YÖNTEM

Yöntemimiz çevrimiçi bir planlama algoritmasıdır. Mevcut durumu kullanarak kullanabileceği tüm kaynakları (çalışma süresi) kullanarak bir planlama yapmaktadır. Hesaplanan plan uygulanır ve etmen kendisini yeni bir durumda bulur. İçinde bulunulan yeni durum için süreç tekrarlanır.

### A. RoboCup Arama Kurtarma Benzetim Ortamı Modellemesi

RoboCup Arama Kurtarma Benzetim Ortamı(RAKBO) Çoklu Markov Karar Süreci (ÇMKS) olarak modellenmektedir. Harita üzerindeki her bina ve yol çizge üzerinde birer düğüm olarak gösterilmektedir. Birbirlerine geçişin mümkün olduğu yol ve binalar çizge üzerinde kenarlar ile birbirine bağlanmaktadır.

- Çizge üzerindeki bina düğümlerinin yangın durumları ve etmenlerin çizge üzerinde buldukları düğümler ÇMKS'nin *durum* uzayını oluşturmaktadır.
- Her etmen bulunduğu düğüm üzerindeki kenarlardan diğer düğümlere geçebilir ya da bulunduğu düğümde durmaya devam edebilir. Tüm etmenlerin eylem kümelerinin çapraz çarpımı *eylem* uzayını oluşturmaktadır.
- Yanan binalar yanmayan binaların  $p$  olasılıkla yanmasını sağlamaktadır. Ayrıca etmenlerin bulunduğu binaların yangın durumları söndürülmüş olmaktadır.
- *Ödül* fonksiyonu yanmayan binaların alanlarının tüm harita üzerindeki binaların alanlarının toplamına oranıdır. Yani hiç bina yanmıyorsa ödül 1.0 ve tüm binalar yanmıyorsa 0.0 olmaktadır.

Bu model RAKBO'daki yangının yayılması ve söndürülmesi problemini soyutlamaktadır. RAKBO'da etmenler harita üzerinde hareket ederken kendilerine verilen maksimum mesafe boyunca hareket edebilirler. Diğer yandan bizim modelimizde her adımda sadece bir düğüm ilerleyebilmekteler. RAKBO'da binalar beş farklı yangın durumunda bulunabilirken, bizim modelimizde binalar sadece iki durumda (*yangın*, *sönmüş*) bulunabilirler. Bizim modelimizde yangın sadece başlangıçta yanan binalardan yayılmaktadır. Bu soyutlamalarla modelin karmaşıklığını azaltırken az bir performans kaybı elde etmeyi hedefliyoruz.

### B. Monte Carlo Ağaç Araması Yöntemi

Monte Carlo Ağaç Araması (MCAA) algoritması yaklaşık bir planlama algoritmasıdır. Algoritma etmenin bulunduğu durumdaki eylemleri bir çok kere benzeterek, her eylemden elde edilebilecek beklenen ödülü kestirmeyi hedeflemektedir. UCT [4] algoritması, arama ağacı oluşturulurken eylem seçiminde keşif ve istismarı dengelemektedir.

En başta arama ağacında başlangıç durumunu gösteren kök düğüm bulunur. Kök düğümden itibaren başlayıp sürecin sonlanmasına kadar süren her benzetim, arama ağacına yeni bir düğüm eklemektedir. Benzetim sonunda alınan ödüller hangi düğümler takip edilerek alındıysa o düğümlerden beklenen ödül değerleri güncellenir. Her düğüm kaç kere ziyaret edildiğini, hangi eylemin kaç kere seçildiğini ve bu düğümden itibaren yapılan benzetimlerden alınan ödülleri saklamaktadır.

### Algoritma MCAA

```
repeat
  arama(durum, 0)
until Bitiş
return Eniyi(durum, 0)
```

Şekil 1: MCAA Algoritması [4]

### Algoritma arama

```
if son(durum) then
  return 0
end if
if yaprak(durum, seviye) then
  return serim(s)
end if
action ← eylemSeç(durum, seviye)
(s', ödül) ← benzetim(durum, eylem)
q ← ödül +  $\gamma$  arama(durum', seviye + 1)
değeriGüncelle(durum, eylem, q, seviye)
return q
```

Şekil 2: MCAA Algoritmasının Arama Fonksiyonu [4]

Bu bilgiler sonraki benzetimlerde seçilecek eylemleri belirlemede kullanılır. Benzetim sırasında uç düğüme gelindiğinde bu düğümden itibaren rastgele eylem seçilerek elde edilebilecek ödüllerin kestirilmesi sağlanır. UCT algoritmasının detayları Şekil 1'de görülmektedir.

UCT algoritması düğümdaki eylem seçimini UCB1 algoritmasıyla yaparak en iyi eylemi seçmemekten kaynaklanan kaybı en aza indirirken mevcut kestirimine göre en iyi olan eylemden faydalanmayı sağlamaktadır. Düğümlerdeki durum-eylem ikililerinin değerleri şu formülle hesaplanmaktadır:

$$Q(s, a) = \text{ortalamaÖdül} + C \sqrt{\frac{\ln ns}{na}} \quad (1)$$

$ns$  düğümün ziyaret edilme sayısını,  $na$   $a$  eyleminin seçilme sayısını ve  $C$  keşif katsayısını göstermektedir. *ortalamaÖdül* bu düğümden itibaren toplanan ortalama ödülü göstermektedir ve ifadenin istismar kısmını oluşturmaktadır. Şekil 2'deki *eylemSeç* fonksiyonu Denklem 1 için en büyük değeri veren eylemi seçer.

Şekil 2'de *son* fonksiyonu sürecin bitmesini kontrol eder, *yaprak* bulunulan düğümün yaprak olmasını ve *benzetim* fonksiyonu verilen durum ve eylemi benzeterek bir sonraki durum( $s'$ ) ve alınan ödülü hesaplar. *serim* fonksiyonu, *serim* algoritması kullanılarak benzetilen süreçten elde edilen toplam ödülü hesaplar. *değeriGüncelle* fonksiyonu da bulunulan düğümdaki verileri günceller.

Literatürde MCAA yöntemlerini iyileştirmek için bir çok yöntem öne sürülmüştür [5]. Bu yöntemlerden en çok kullanılanı, uç düğümden sonra kullanılan rastgele eylem seçimi yapan serme algoritmasını daha iyi bir algoritma ile değiştirmektir. Daha önceki çalışmamızda [6] bu problem için fırsatçı algoritmaların iyi sonuçlar verdiğini göstermiştik.

MCAA algoritmasının varsayılan serme algoritmasını fırsatçı algoritma ile değiştirerek algoritmanın performansının en az fırsatçı algoritma kadar iyi olmasını sağlıyoruz. Kullanılan fırsatçı algoritma, her etmen için en yakın yanar binayı seçmeyi sağlamaktadır. Seçilen binalar için bir patika planlaması yapılır. Daha sonra etmen eylemini patika üzerinde ilerleyecek şekilde seçer. Bu yöntem *Fırsatçı-UCT* algoritması adını veriyoruz.

### C. Bencil Model Yakınsamaları

Markov Karar Süreci (MKS) karar verme problemleri için matematiksel bir model sunmaktadır. MKS dört öğeden  $\langle S, A, T, R \rangle$  oluşmaktadır:  $S$  durum kümesini,  $A$  eylem kümesini,  $T$  geçiş fonksiyonu, ve  $R$  ödül fonksiyonu göstermektedir. Denklem 2'de görüldüğü gibi her durum-eylem ikilileri için beklenen değer yinelemeli olarak hesaplanmaktadır.

$$Q(s, a) = R(s, a) + \gamma \sum_{s' \in S} T(s, a, s') V(s') \quad (2)$$

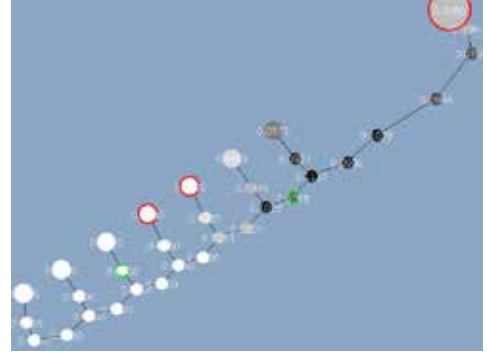
$$V(s) = \max_{a \in A} Q(s, a) \quad (3)$$

Denklemde  $s$  durumu,  $s'$  bir sonraki durumu,  $a$  eylemi ve  $\gamma$  gelecek indirim faktörünü göstermektedir. Bu formülün hesaplanabilirliği durum uzayının  $|S|$  büyüklüğüne ve eylem uzayının  $|A|$  büyüklüğüne bağlıdır. Sabit ufuklu MKS'ler için (sabit adım süren karar süreçleri) Denklem 2, ufuk adım sayısı kadar hesaplanmaktadır.

Çoklu Markov Karar Süreci (ÇMKS), MKS'ye etmen sayısının eklenmesi ve eylem kümesinin tüm etmenlerin eylem kümelerinin çarpaz çarpımı olacak şekilde değiştirilmesiyle oluşmaktadır. Dolayısıyla ÇMKS problemlerinin zorluğu etmen sayısı ile üstel olarak artmaktadır. Bencil model yakınsamasıyla etmen sayısına bağlı karmaşıklığı azaltmak mümkün olmaktadır. Bu yöntemle her etmen evrende sadece kendisi varmış gibi planlama yapmakta ama gelecek indirim faktörünü diğer etmenlerin toplam etkisine göre hesaplanmaktadır.

Yangın söndürme probleminde amaç etmenlerin birbirlerini etkilemeden belirli bölgedeki yangınları kontrol altında tutmalarıdır. Bu sebeple her etmen diğer etmenlerin davranışlarını tahmin edip bu duruma göre kendi davranışını planlayabilir. Tüm etmenlerin davranışlarını özetlemek için *bulunma ağırlığı*'ni [7] kullanıyoruz. Önce her etmen modelde sadece kendisi varmış gibi *Fırsatçı-UCT* algoritmasıyla planlama yapmaktadır. Bu planlama sonucunda durum-eylem ikililerinin ( $Q(s, a)$ ) beklenen değerleri kestirilmiş olmaktadır. Bu değerleri kullanarak başlangıç durumundan itibaren politika üzerinde ufuk adım sayısı kadar yürünmektedir. Bu yürüyüş sırasında bir durumdayken seçilecek eylemler adım sayısı ile sıcaklığı artan bir Boltzmann dağılımı olarak modellenmekte ve etmenin gelecek durumda bulunma olasılığı olarak Boltzmann dağılımınca hesaplanan değer kullanılmaktadır. *Bulunma ağırlığı* algoritması Şekil 4'de görülmektedir. Hesaplanan *bulunma ağırlığı* Şekil 3'de görüldüğü gibi harita üzerinde gösterilebilmektedir. Bu dağılıma baktığımızda etmenin planının en sağ üst köşedeki yangına müdahale etmek olduğunu görebiliyoruz.

Hesaplanan *bulunma ağırlığı*'ni kullanarak her etmen için MKS modelimizde tekrar planlama yapıyoruz. Her etmen



Şekil 3: Düğümlerin renklerinin koyulukları *bulunma ağırlığı*ni göstermektedir. Kenarları kırmızı düğümler yangın başlangıç noktalarını ve yeşil kenarlı düğümler etmenlerin buldukları yerleri göstermektedir.

#### Algoritma Bulunma Ağırlığı

```

for etmen in etmenler do
    gelecekDurumlar.ekle(mevcutDurum)
    h ← 0
    repeat
        for durum in gelecekDurum do
            qDeğerleri ← UCT.qDeğerleriAl()
            bDeğerleri ← boltzmann(qDeğerleri, h)
            for  $\langle a, p, gDurum \rangle$  in bDeğerleri do
                bulunmaEkle(a, p, gDurum)
                gelecekDurumlar.ekle(gDurum)
            end for
        end for
        h ← h + 1
    until h = ufuk
    end for

```

Şekil 4: Bulunma ağırlığı algoritması.  $a$  eylemi,  $p$  bulunma olasılığını,  $gDurum$  gelecek durumu göstermektedir.

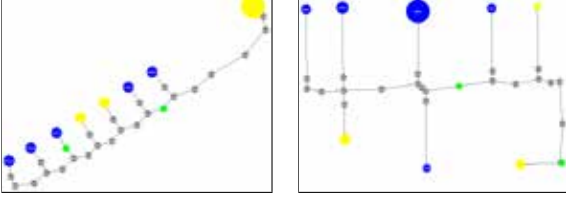
durumların değerini hesaplarken gelecek durumlardan alacağı değeri diğer etmenlerin bulunma oranına göre azaltıyor. Denklem 4'de görüldüğü gibi gelecek indirim ( $\gamma$ ) değeri dinamik olarak diğer etmenlerin bulunma olasılığı kullanılarak hesaplanıyor. Amacımız etmeni diğer etmenlerin bulunma olasılığı yüksek olan yerler için cezalandırmak.

$$pm_i(s'_i) = \sum_{j \neq i} Pr(s_j = s'_i | s) \quad (4)$$

$$\gamma_i = (1 - f_i pm_i(s'_i))$$

$$Q_i(s_i, a_i) = R(s_i, a_i) + \sum_{s'_i \in S_i} T(s_i, a_i, s'_i) \left[ \gamma_i V_i(s'_i) \right]$$

$f_i$  ölçeklendirme için kullanılıyor. Bu değeri deneylerimizde en yüksek ödülün, en yüksek değere oranı şeklinde kullandık ve böylece *bulunma ağırlığı*'nin etkisini azalttık.



Şekil 5: Örnek çizge modelleri: gri düğümler yolları, mavi düğümler binaları gösteriyor. Sarı düğümler yanan binaları ve yeşil düğümler de etmenlerin pozisyonlarını gösteriyor.

Tablo I: Algoritmaların adım başına aldığı ortalama ödül

Fırsatçı	UCT	Fırsatçı-UCT	Bencil-Fırsatçı-UCT	Eniyi
0.625	0.635	<b>0.686</b>	0.629	0.712
$\pm 0.189$	$\pm 0.165$	$\pm 0.159$	$\pm 0.155$	$\pm 0.147$
87.78%	89.19%	<b>96.35%</b>	88.34%	100%

### III. DENEYLER

Geliştirdiğimiz yöntemi eniyi sonuçlarla karşılaştırabilmek için küçük ÇMKS problemleri oluşturuyoruz. Ayrıca Monte Carlo yöntemi için üst parametre olan benzetim sayısının önerdiğimiz serme algoritmasına etkisini gösteriyoruz.

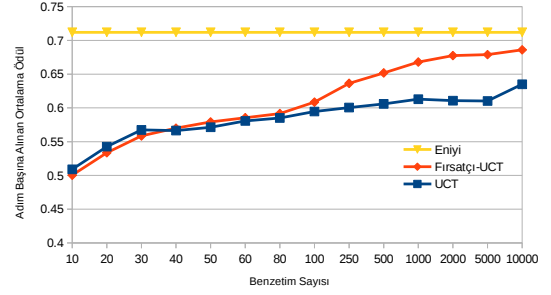
#### A. Eniyi Sonuçlarla Karşılaştırma

Elde edilecek sonuçlar hem çizgeye hem de başlangıç durumuna bağlı olduğu için RAKBO'daki beş değişik şehir (İstanbul, Eindhoven, Joao, Berlin, ve Kobe) haritasından 50 tane harita örnekliyoruz. Her haritada sekiz bina, etmenler için iki tane başlangıç noktası ve üç tane yangın başlangıç noktası seçiyoruz. Böylece 50 tane değişik ÇMKS problemi oluşturuyoruz. Yangının yayılma olasılığını,  $p = 0.05$  olarak seçiyoruz ve birbirine 50 metre yakınlıkta bulunan binaları birbirlerinin komşuları olarak belirliyoruz. Örnek modeller Şekil 5'de görülebilir.

Tablo I'de geliştirdiğimiz yöntemin başarısını göstermek için eniyi sonuçlarla karşılaştırıyoruz. Sunulan veriler 100 farklı deney üzerinden hesaplanmış ortalama sonuçlardır. UCT algoritmalarında keşif katsayısı olarak 5 ve benzetim sayısı olarak 10000 kullanılmıştır. *Fırsatçı* algoritması etmenlerin kendilerine en yakın yangını seçmelerini sağlar. *Fırsatçı-UCT* algoritması, ÇMKS modelinde planlama yapmaktadır. Eylem seçiminde, tüm etmenlerin eylem kümelerinin çapraz çarpımıyla oluşturduğu eylem kümesini kullanmaktadır. Ayrıca benzetim politikası olarak *fırsatçı* algoritmayı kullanmaktadır. *Bencil-Fırsatçı-UCT* algoritması, Bölüm II-C'de anlatılan ÇMKS problemini MKS'ye dönüştüren yaklaşımı kullanmaktadır. Tablo I'de görüldüğü gibi *Fırsatçı-UCT* yöntemi en yüksek başarıyı elde eden algoritma oluyor ama ne yazık ki eylem sayısı etmen sayısı ile üstel artmaktadır. Bu sebeple çok etmenli problemler için uygun değildir. *Bencil-Fırsatçı-UCT* algoritmasının eniyiye oldukça yakın sonuçlar elde ettiği görülmektedir ve bu algoritmanın karmaşıklığı etmen sayısı ile doğrusal olarak artmaktadır.

#### B. Fırsatçı Serme Algoritmasının Etkisi

Rastgele serme algoritması ile fırsatçı serme algoritması arasındaki fark Şekil 6'de gösterilmektedir. Bu iki algoritma



Şekil 6: UCT ve Fırsatçı-UCT Algoritmalarının Benzetim Sayısına Göre Performanslarının Değişimi

arasındaki performans farkı benzetim sayısını arttırdığımızda artıyor. Benzetim sayısı az olduğunda kullandığımız serme algoritmasının etkisinin çok az olduğunu görüyoruz.

### IV. SONUÇ

Çoklu karar verme problemi olarak ele alındığında mevcut yöntemlerle makul bir çözümü olmayan RoboCup Arama Kurtarma Problemini model yakınsamaları ve yaklaşık algoritmalar kullanarak çözdük. Kullandığımız Monte Carlo Ağaç Arama algoritmasını fırsatçı serme algoritmasıyla geliştirdik. Çoklu karar verme problemlerinin zorluğunu üstel olarak arttıran etmen sayısının etkisini doğrusal yapabilmek için bencil model yakınsamasını problemimize uyguladık. Geliştirdiğimiz deneylerde yöntemimizin eniyi sonuçlara %96.35 oranında yakın olduğunu gösterdik. Ayrıca önerdiğimiz serme algoritmasının etkisinin kullanılan benzetim sayısına bağlı olduğunu gösterdik.

Gelecekte geliştirdiğimiz yöntemi RoboCup Arama Kurtarma Benzetim Ortamında kullanmayı hedefliyoruz. Modelin gerçek probleme olan yakınlığı başarımızı etkileyeceği için öncelikle yangının yayılmasını, etmenlerin harita üzerinde hareket etmesi ve yangın söndürmesini benzetim ortamında alınan bir çok örnekleme öğrenmeyi planlıyoruz. Daha sonra öğrenilen üretken ÇMKS modelimizi geliştirdiğimiz MCAA yöntemiyle çözmeyi amaçlıyoruz.

### KAYNAKÇA

- [1] R. Federation, "Robocup rescue agent simulation," <http://roborecue.sourceforge.net/>, accessed: 2016-10-05.
- [2] R. Sheh, S. Schwertfeger, and A. Visser, "16 years of robocup rescue," *KI-Künstliche Intelligenz*, vol. 30, no. 3-4, pp. 267-277, 2016.
- [3] M. L. Puterman, *Markov decision processes: discrete stochastic dynamic programming*. John Wiley & Sons, 2014.
- [4] L. Kocsis and C. Szepesvári, "Bandit based monte-carlo planning," in *Machine Learning: ECML 2006*. Springer, 2006, pp. 282-293.
- [5] C. Browne and E. Powley, "A survey of monte carlo tree search methods," *IEEE Transactions on Intelligence and AI in Games*, vol. 4, no. 1, pp. 1-49, 2012. [Online]. Available: [http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=6145622](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6145622)
- [6] O. Aşık and H. L. Akin, "Effective multi-robot spatial task allocation using model approximations," in *RoboCup 2016: Robot Soccer World Cup XX*. Springer Berlin Heidelberg, 2016.
- [7] D. Claes, P. Robbel, F. A. Oliehoek, K. Tuyls, D. Hennes, and W. van der Hoek, "Effective Approximations for Multi-Robot Coordination in Spatially Distributed Tasks," in *Proceedings of the 14th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*, 2015, pp. 881-890.

# Kapalı Alanlarda Robot Konumlaması için Stereo Görüntüler ve Eylemsizlik Duyucusu Kullanılarak Kamera Yörüngesinin Kestirilmesi

Anıl Horasan, İsmail Mustafa Engiz  
Makine Mühendisliği Bölümü  
Orta Doğu Teknik Üniversitesi  
Ankara, Türkiye  
Email: anilhorasan@gmail.com, ismailmengiz@gmail.com

Melik Dölen, A. Buğra Koku  
Makine Mühendisliği Bölümü  
Orta Doğu Teknik Üniversitesi  
Ankara, Türkiye  
Email: dolen@metu.edu.tr, kbugra@metu.edu.tr

**Özetçe** —Görsel odometre, 6 serbestlik derecesine sahip konum bilgisi ve görsel çevre bilgisini sağlamakta, böylelikle robotların otonom hareketi için GPS'nin kullanılmadığı ortamlarda altyapı sağlamaktadır. Bu makalede, robot üzerinden alınan ikili (stereo) kamera görüntüleri ve eylemsizlik duyucusu verileri kullanılarak çevrimdışı çalışan robot yörüngesi kestirimi algoritması sunulmuştur. İki farklı duyucu sistemi kullanılmasının temel amacı duyucu hatalarının birbirlerini telafi edebilmesidir. Bu çerçeveye bağlı olarak şu aşamalar izlenmiştir: Görsel veriler ile özellik bulma ve çıkarma, ikinci imgede özellik eşleştirme ve derinlik haritasının çıkarılması, sıralı imgede özellik takibi, aykırı değerleri temizleme, konum kestirimi ve en iyileme aşamalarından oluşan yapay görü algoritması oluşturulmuştur. 3 eksen ivme ölçer ve jiroskoptan oluşan eylemsizlik duyucuları ise kendi içerisinde bir filtre ile tümleştirilerek sapma miktarları en aza indirgenmiş, açt, hız ve konum bilgileri elde edilmiştir. Son olarak, tahmin değerlerinin iyileştirilmesi için geliştirilmiş bir filtre kullanılarak eylemsizlik duyucusundan gelen veriler görsel veri ile birleştirilmiştir. Geliştirilen algoritma EuRoC MAV veri kümesi üzerinde test edilmiştir. Sonuçlar, ikili kamera ve eylemsizlik duyucusu sistemleri kullanılarak farklı kapalı alanlarda yüzde beşten daha düşük hataları yakalamanın mümkün olduğunu göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler**— İkili Kamera Sistemi, Görsel-Ataletsel Odometre, Robot Yörünge Kestirimi, Kapalı Alan Konumlaması, Duyucu Tümleştirme.

## I. GİRİŞ

Robotik komünitesindeki çalışmalar son yıllarda büyük gelişme kaydetmekte, özellikle insansız araçların geliştirilmesiyle dünya gün geçtikçe daha otonom hale gelmektedir. Bu doğrultuda, robotik elektrikli süpürgeler gibi servis robotları ile insansız hava araçları (İHA) ve sürücüsüz otomobiller gibi otonom araçlar geliştirilmiş ve marketteki yerini almıştır. Katlanarak artması beklenen bu gelişmeler [1] ile birlikte otonom sistemlerin kendi konumlarını tayin etmesi ve gidecekleri yöne tayin etmesi konusu büyük önem arz etmektedir. Bu problem literatürde hareket kestirimi ya da konumlama problemi olarak bilinmektedir.

Bu problemin çözümü için sunulan çözümler genellikle motorlu taşıtları kapsamaktadır. Bunun için en eski tekniklerden birisi parakete hesabıdır. Bu sistemlere enkoderler eklenerek tekerlek odometresi yapılmakta, böylelikle tekerleğin dönüşüyle aracın kat ettiği mesafe tayin edilmektedir. Ancak, özellikle deniz ve hava taşımacılığı için hassas ve genel geçer konumlama/navigasyon sistemlerine ihtiyaç duyulmuştur. Bunun için iki farklı teknoloji

kullanılmaktadır: eylemsizlik duyucuları ve küresel konumlandırma sistemi (GPS). GPS, mutlak olarak metre hassasiyetinin altında bir konum bildirmesine rağmen uzayda, kapalı alanlarda ve dağlık arazilerde kullanışsızdır. Hassas eylemsizlik duyucuları ise yüksek maliyetlidir, uzun süreli kullanımlarda sapma miktarı fazladır ve global bir konumlama sistemiyle doğrulanması gerekmektedir.

GPS ve eylemsizlik duyucularının birlikte kullanılması açık alanlarda güvenilir ve hassas sonuçlar verse de kapalı alanlarda konumlama ve navigasyon için uygulanabilir değildir. Bu sebeple, bilgisayarlı görü ve robotik dünyasında navigasyon duyucusu olarak kamera kullanımı yaygınlaşmıştır. Kamera ile hareket kestirimi için farklı yollar mevcuttur: Hareket Tabanlı Yapısal Algılama (SfM – Structure from Motion), Eş-Zamanlı Lokalizasyon ve Harita Çıkarma (SLAM – Simultaneous Localization and Mapping) ve Görsel Odometre (VO – Visual Odometry). SfM ve SLAM ile ortamın haritası da çıkarılmaktadır. VO ise haritalama yapmadan sadece hareket kestirimi yapmaktadır. Bu çalışmada kapalı alanlarda robot hareketinin kestirimi için eylemsizlik duyucusu ile desteklenmiş VO algoritması geliştirilmesi anlatılmıştır.

## II. GÖRSEL ODOMETRE

Görsel odometre ile ilgili çalışmalar 1980'lere dayanmakla birlikte terim olarak ilk defa Nistér [2] tarafından 2004 yılında kullanılmıştır. 2011 yılında kadar olan gelişmeler, kullanılan temel algoritmalar ve çalışmalar ise Scaramuzza'nın iki bölümlü çalışması [3, 4] ile özetlenmiştir.

Görsel odometre sadece tekli ya da çoklu kamera sisteminden alınan veriler kullanılarak hareketli bir platformun hareket yörüngesinin çıkarılması olarak tanımlanabilir. İsim olarak tekerleğin dönüş sayısını üst üste ekleyerek hareketin tahmin edilmesine dayanan tekerlek odometresinden ortaya çıkmıştır. Görsel odometre, sıralı kamera görüntülerinin işlenip üst üste eklenmesiyle ortaya çıkar ve geriye dönük bir haritalama hafızasına sahip değildir. Tekli kamera sistemlerinde kamera yörüngesini mutlak ve birebir ölçekli olarak tahmin etmek için başka verilere ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun için çevreden bilinen bir nesnenin boyutunun ölçülmesi, kameranın yerden yüksekliğinin ölçülmesi ya da farklı duyuculardan (ör. IMU, barometre, mesafe duyucusu) yardım alınması gerekmektedir. Yıllar boyunca tekli ve ikili kamera sistemleri ile ilgili yürütülen çalışmalar iki ayrı disiplin

olarak ilerlemiş, ancak özellikle Mars araçlarının geliştirilmesinde kullanılmasından ötürü ikili kamera sistemleri daha çok tercih edilmiştir [5]. Ancak, çevredeki objelere olan uzaklık iki kamera arasındaki uzaklıktan çok fazla olduğunda ikili kamera sistemleri tekli kamera sistemi gibi davrandığı için tekli kamera sistemleri ile ilgili çalışmalar da ilgi çekmektedir. Çalışmalar görsel odometre ile kat edilen mesafenin yüzde 0.1 ila 2'si arasında bir hata ile kestirilebileceğini göstermektedir [3].

Görsel odometre için sıralı görüntü dizilerindeki belirgin özellikler takip edilerek hareket tahmini yapılmaktadır. Bunun için imgedeki köşe noktaları [6, 7] ya da yerel tanımlayıcılar [8, 9, 10] kullanılmakta, daha sonra bu bulunan özellikler sıralı imgelerde eşleştirilmekte ya da takip edilmektedir [11, 12]. Hareket ise özelliklerin iki boyutlu (2B) ya da üç boyutlu (3B) tanınmasına göre farklı şekillerde kestirilmektedir. 2B-2B hareket kestiriminde epipolar kısıtlar kullanılarak oluşturulan Esas Matris [13] çarpınlarına ayrılarak dönme matrisi ve ötelenme vektörü ortaya çıkarılır. Bu şekilde ancak sıralı imgeler arasında belirli bir ölçekte hareket kestirimi yapmak mümkündür. 3B-3B hareket kestirimi sadece çoklu kamera sistemlerinde kullanılmakta olup üç boyutlu özellikler arasındaki mesafenin minimize edilmesiyle elde edilmektedir. Bu çalışmada da yararlanılan 3B-2B hareket kestirimi ise üç boyutlu özellik ile bu özelliğin imge üzerindeki izdüşümü arasındaki hatanın minimize edilmesiyle bulunmakta ve daha doğru sonuçlar vermektedir [2]. Daha iyi sonuçlar elde etmek için hareket kestirimi sırasında aykırı değerler atılmakta [2, 14] ya da aykırı olmayan, birbirine bağlı bir set oluşturulmaktadır [15]. Hareket kestirimindeki hatalar bir optimizasyon tekniği [16] tekniği kullanılarak en iyileştirilmektedir.

Bu çalışmanın görsel odometre safhasında [17] ve [15] uygulanmış, ardıl ikili görüntü çiftleri kullanılarak dönme matrisi ve ötelenme vektörü çıkarılmıştır. Öncelikle kamera iç ve dış parametre matrisleri oluşturulmuş, imge girdileri görüntü işleme aşamasından geçirilerek biçim bozuklukları giderilmiş ve ikili görüntü çiftlerinin epipolar çizgileri paralel olacak şekilde doğrultma işlemi uygulanmıştır. Daha sonra özellik bulma için Harris köşeleri [6], özellik takibi için ise KLT algoritması [11] kullanılmıştır. Özelliklerin imge üzerinde homojen bir şekilde seçilmesi için her imge 48 eşit parçaya ayrılmış ve bu parçalar içerisinde Harris değeri en yüksek olan köşeler seçilmiştir. Böylelikle imgenin belirli bir bölgesinde yoğunlaşan köşe noktalarından kaynaklı hareket kestirimi hatalarının önüne geçilmeye çalışılmıştır. Stereo imgeler kullanılarak ayrıklık haritaları çıkarılmış ve ardıl zamanlar için bulunan özelliklerin 3B karşılıkları elde edilmiştir. Birbirine bağlı aykırı olmayan özellik setleri bulunarak aykırı değerler temizlenmiş [15] ve 3B noktalar ile bu noktaların izdüşümlerine karşılık gelen imge özellikleri arasındaki fark minimize edilerek hareket kestirimi yapılmıştır [2]. Hareket kestirimi Levenberg-Marquardt yöntemi [13] ile en iyilenmiştir.

### III. GÖRSEL-ATALETSEL ODOMETRE

Maliyet ve kapladığı alan açısından mobil robotik alanında mikro elektro-mekanik sistemler (MEMS) teknolojisiyle üretilen ataletsel duyucular -ivmeölçer ve

jiroskoplar (IMU)- kullanılmaktadır [18]. Ataletsel duyucuların tamamlayıcı özellikleri sayesinde 6 eksen konum ve açı bilgisi elde edilebilmektedir. Ataletsel duyucularda kullanılan jiroskop, açısal hızı ölçmekle birlikte zamana bağlı integrali alınarak dönme açıları elde etme kullanılmaktadır [19]. Fakat, jiroskop ölçüm hatalarının integrali zaman içerisinde büyüyen hatalara sebep olmaktadır. Bu sebeple tek başına jiroskop kullanmak açıları saptamak için yeterli değildir. İvmeölçer yardımıyla yerçekimi vektörünün belirlenmesi ile jiroskoptan mutlak dönme açıları çıkarılabilmektedir. Ancak, hareket kaynaklı ivme değerlerinin yer çekimi ivmesinden ayrılması ve jiroskop ile birleştirilmesi için filtreye ihtiyaç duyulmaktadır.

Kalman filtresi [20], dönme açısı hesabında birçok uygulamaya temel oluşturmuştur. Ancak, hesaplama süresi göz önüne alınarak farklı alternatifler geliştirilmiştir [21, 22]. Bu çalışmada Madgwick'in gradyan iniş tabanlı tamamlayıcı filtresi [22] kullanılmış, dönmenin en fazla olduğu hareket eksenindeki sapmalar ise bir doğru uydurumu yöntemi ile azaltılmıştır. Bunun için öncelikle ivmeölçerden gelen ölçümler normalize edilmiş ve gradyan iniş metoduyla yerçekimi vektörünün yönü belirlenerek hata vektörü oluşturulmuştur. Bu vektör jiroskop ölçümlerinden çıkarılıp integrali alınmış ve normalize edilerek dönme açısı elde edilmiştir. Bu yöntem ek olarak doğru uydurumu yöntemi ile lineer bir trend oluşturan sapmalar elde edilen açı değerlerinden çıkarılmıştır.

Pozisyon kestirimi ise ivmeölçer verisinin iki defa integrali alınarak yapılmıştır. Her integral alma sonrasında yüksek geçiren filtre ile filtrelenmiş ve lineer trend oluşturan sapmalar temizlenmiştir.

Görsel odometre ile 6 eksen hareket kestirimi yapılabilen; ancak zaman içerisinde oluşan sapmalar sebebiyle ataletsel duyucularla doğrulama yapmak daha iyi sonuçlar sağlamaktadır [3]. Duyucu özellikleri sebebiyle kısa vadede ataletsel duyucular daha güvenilir olmakla birlikte uzun vadede görsel odometre sonuçları daha az hatalı sonuçlar vermektedir. Bu çalışmada jiroskoptan alınan veriler frekans bölgesinde işlenerek her zaman aralığı için bir büyüklük değeri saptanmıştır. En büyük değerlerin bulanık olan imge çiftlerine denk geldiği saptanmış ve bu imgeler tüm datadan çıkarılarak yeniden odometre hesabı yapılmıştır. Dönme açısı değerleri için ise sadece ataletset duyucudan elde edilen sonuçlar kullanılmıştır.

### IV. TEST SONUÇLARI VE TARTIŞMA

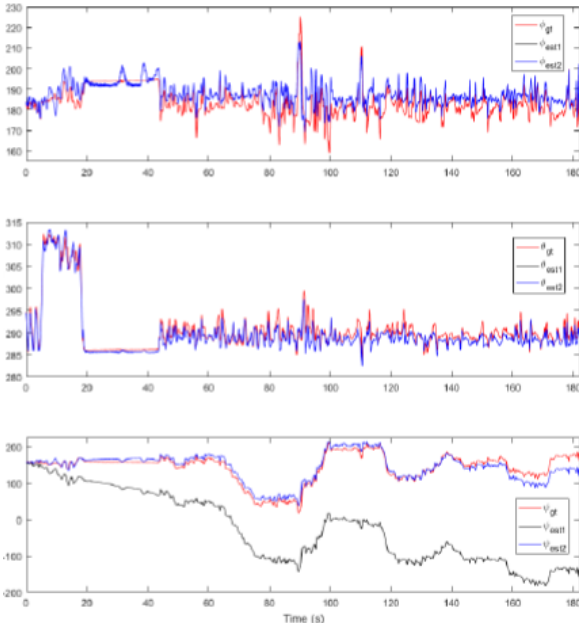
Geliştirilen algoritma *EuRoC MAV* veri kümesi [23] üzerinde test edilmiştir. Bu veri kümesi, ufak ölçekli bir insansız hava aracı (İHA) üzerinde bulunan siyah-beyaz *Aptina MT9V034* stereo kamera sistemi ile saniyede 20 imge çifti almakta, *ADIS16488* ile 3 eksen ivmeölçer ve 3 eksen jiroskoptan 200 Hz'de veri toplamakta ve aynı zamanda *Vicon* hareket takip sistemi ve *Leica MS50* lazer takip sistemi ile doğrulama yapmaktadır. Veriler *Vicon Room* ve *Machine Hall* olmak üzere iki farklı kapalı alanda alınmış, hız ve ışık miktarı farklı 11 veri kümesi oluşturulmuştur. Bu çalışma için *MH\_01* ve *V2\_01* veri kümeleri kullanılmıştır. *EuRoC MAV* veri kümesini kullanan çalışmalarda Oleynikova ve diğerleri [24] *MH\_01* veri kümesi ile 13 derecelik dönme

hatası ve 0.6 metrelik ötelenme hatası yakalamıştır.  $V2\_01$  veri kümesi ile ise Krombach ve diğerleri [25] 0.35 metre,  $F_u$  ve diğerleri [26] ise 0.43 metre ve 6.5 derece hata ile odometre kestirimi yapmıştır.

$MH\_01$  veri kümesinin elde edildiği makine dairesi daha büyük ve ışıklandırması zayıftır. Ayrıca fazla miktarda titreşim ve 40 saniye boyunca aynı konum etrafında küçük hareket içermektedir.  $V2\_01$  veri kümesinin elde edildiği oda ise daha küçük ve özellik sayısı kısıtlıdır. Ayrıca İHA kendi etrafında hızlı dönüşler yapmakta ve görüntülerde uçan perdeler bulunmaktadır.

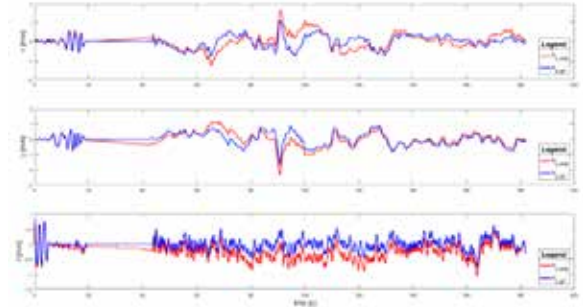
Bu çalışmada algoritmalar çevrimdışı çalıştırılmıştır ve görsel odometre için başlangıç pozisyonunun bilindiği varsayılmıştır. Sonuçlar görsel odometre çalışmalarında kullanılan RMS hataları cinsinden ifade edilmiş [3], ayrıca maksimum hata ve hatanın kat edilen mesafeye bölünmesiyle elde edilen yüzde hatalar da gösterilmiştir. Grafik sonuçları sadece  $MH\_01$  veri kümesi için verilmiştir.

Bu doğrultuda IMU verileri kullanılarak hesaplanan dönme açıları Şekil 1’de verilmiştir. Kuaterniyon olarak hesaplanan açı değerleri Euler açılarına çevrilmiş ve uç noktadaki tekillikler el ile düzeltilmiştir. Hareketin en fazla olduğu z ekseninde Madgwick’in uygulaması yüksek derecede sapma göstermiş, geliştirilen doğru uydurma yöntemi ile bu sapma iyileştirilmiştir. Şekil 2’de ivme verisinin bir defa integralinin alınması, daha sonra filtrelenmesi ve sapsmasının azaltılmasıyla elde edilen hız tahminleri verilmiştir. Şekil 3’te ise hesaplanan hız değerlerinin integralinin alınması ve filtrelenmesi ile elde edilen pozisyon tahminleri verilmiştir. Sadece ataletsel duyuçulardan elde edilen sonuçlar Tablo 1’de özetlenmiştir.

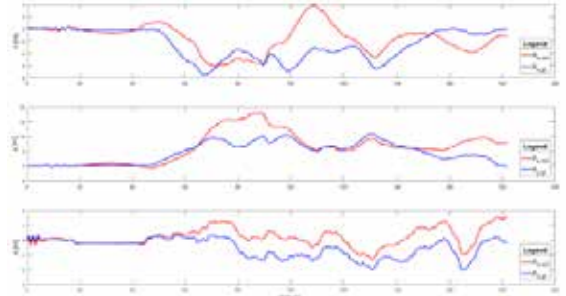


Şekil 1.  $MH\_01$  için Madgwick filtresi (siyah), iyileştirilmiş (mavi) ve veri kümesinden alınan doğrulanmış (kırmızı) dönme açıları

Görsel odometreden elde edilen pozisyon kestirimleri Şekil 4’te gösterilmiştir. Sonuçlar en büyük sapmanın z ekseninde olduğunu göstermektedir. Bunun sebebi ise İHA’nın ve dolayısıyla kameraların, hareketin 100. saniyesinde özellik bakımından kısıtlı bir yüzeye yaklaşmış uzaklaşması olduğu tahmin edilmektedir.



Şekil 2.  $MH\_01$  veri kümesi için elde edilen hız tahminleri (kırmızı) ve veri kümesinden alınmış doğrulanmış değerler (mavi)



Şekil 3.  $MH\_01$  veri kümesi için elde edilen pozisyon tahminleri (kırmızı) ve veri kümesinden alınmış doğrulanmış değerler (mavi)

Tablo 1.  $MH\_01$  ve  $V2\_01$  veri kümeleri için sadece ataletsel duyuçular ile elde edilen tahminler

		$MH\_01$		$V2\_01$	
		RMS	maksimum	RMS	maksimum
Dönme Açısı [°]	x	5.7213	17.9406	8.211	17.6025
	y	1.3815	5.7455	1.571	4.7835
	z	14.3926	45.4524	16.3872	34.4991
	$\Sigma$	15.5496	49.2016	18.3965	38.9804
	$\Sigma$ [%]	-	-	-	-
Hız [m/s]	x	0.3165	0.9649	0.2022	0.4693
	y	0.2802	0.7860	0.2062	0.4809
	z	0.2786	0.4931	0.1242	0.3367
	$\Sigma$	0.5063	1.3386	0.3144	0.7516
	$\Sigma$ [%]	-	-	-	-
Pozisyon [m]	x	3.5751	8.8311	3.4801	6.9696
	y	5.8735	10.4296	1.1163	2.2522
	z	0.5626	1.3047	0.1870	0.5215
	$\Sigma$	6.8990	13.7283	3.6595	7.3430
	$\Sigma$ [%]	8.56	17.03	10.03	20.12

Görsel-ataletsel odometre sonuçları ise Şekil 5’te verilmiştir. Ayrıca basit bir Kalman filtresi ile sonuçlar karşılaştırılmıştır. Tablo 2’de sadece görsel odometre sonuçlarıyla sunulan filtre ve Kalman filtresi sonuçları karşılaştırılmıştır.

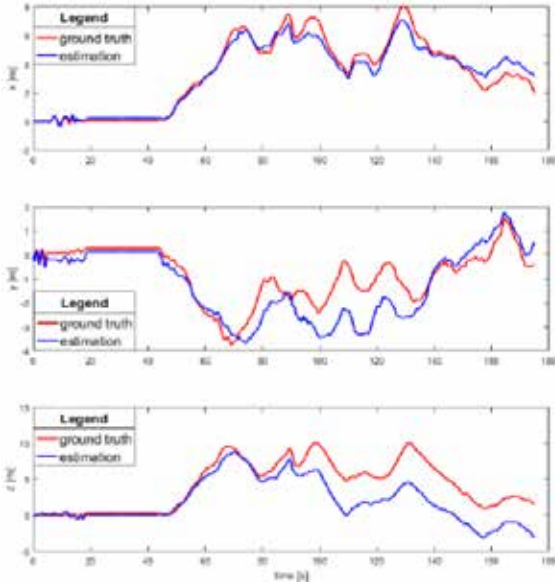
## V. SONUÇ

Görsel ve ataletsel duyuçular ile yapılan odometre tahminleri ayrı ayrı iyi sonuçlar vermekte; ancak zaman içerisinde oluşan sapsmaları engellemek için duyuç birleştirme algoritmalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada sunulan filtre ile duyuç birleşimi yapılmış, sonuçlar %5’in altında hatalar yakalamanın mümkün olduğunu göstermiştir.

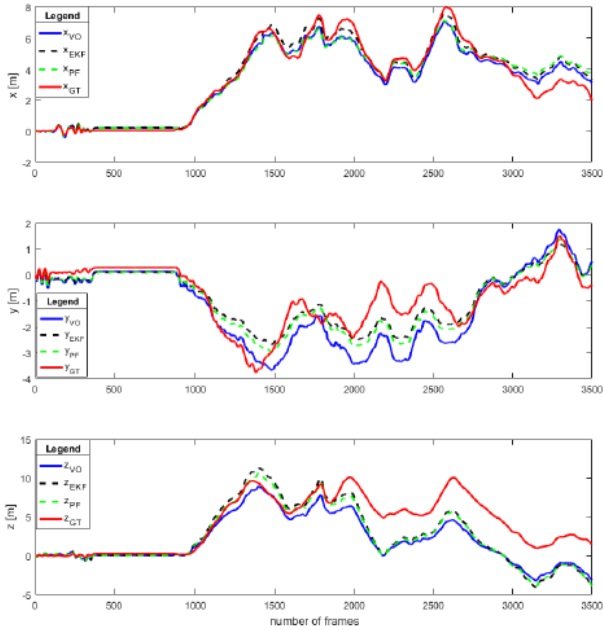
## VI. TEŞEKKÜR

Bu çalışma ODTÜ-BAP 20150431 nolu proje kapsamında ve TÜBİTAK 2210-A yüksek lisans burs programı ile desteklenmiştir.

## KAYNAKÇA



Şekil 4. MH\_01 veri kümesi için sadece görsel odometre kullanılarak elde edilen pozisyon tahminleri



Şekil 5. MH\_01 veri kümesi için görsel (mavi), Kalman filtresi (kesikli siyah), önerilen filtre (kesikli yeşil) ve veri kümesinden alınan doğrulanmış (kırmızı) pozisyon tahminleri

Tablo 2. Görsel-ataletsel odometre sonuçları

Veri Kümesi	Hata	Görsel Odometre	EKF	Sunulan Filtre
Machine Hall MH_01 veri kümesi	RMS (max) hata - x[m]	0.52 (1.27)	0.52 (1.45)	0.63 (1.73)
	RMS (max) hata - y[m]	0.83 (2.02)	0.55 (1.4)	0.58 (1.53)
	RMS (max) hata - z[m]	2.92 (5.59)	2.75 (5.46)	2.77 (5.28)
	RMS (max) hata - 3D[m]	3.08 (6.08)	2.85 (5.81)	2.90 (5.74)
	RMS (max) hata - 3D[%]	4 (7.9)	3.7 (7.55)	3.77 (7.45)
Vicon Room P2_01 veri kümesi	RMS (max) hata - x[m]	1.49 (2.68)	1.29 (2.14)	1.42 (2.55)
	RMS (max) hata - y[m]	0.84 (1.79)	0.6 (1.27)	0.85 (1.84)
	RMS (max) hata - z[m]	0.79 (1.79)	0.93 (2.03)	0.85 (1.82)
	RMS (max) hata - 3D[m]	1.88 (3.69)	1.7 (3.21)	1.86 (3.66)
	RMS (max) hata - 3D[%]	5.17 (10.12)	4.65 (8.81)	5.10 (9.96)

- [1] M. Hagele, "Robots Conquer the World [Turning Point]," *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 23, no. 1, pp. 118-120, 2016.
- [2] D. Nistér, O. Naroditsky and J. Bergen, "Visual odometry," *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, vol. 1, no. 1, pp. 652-659, 2004.
- [3] D. Scaramuzza and F. Fraundorfer, "Visual odometry [tutorial]," *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 18, no. 4, pp. 80-92, 2011.
- [4] F. Fraundorfer and D. Scaramuzza, "Visual odometry: Part II: Matching, robustness, optimization, and applications," *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 19, no. 2, pp. 78-90, 2012.
- [5] M. Maimone, Y. Cheng and L. Matthies, "Two years of visual odometry on the mars exploration rovers," *Journal of Field Robotics*, vol. 24, no. 3, pp. 169-186, 2007.
- [6] C. Harris and M. Stephens, "A combined corner and edge detector," *Alvey vision conference*, vol. 15, 1988.
- [7] E. Rosten and T. Drummond, "Machine learning for high-speed corner detection," *Computer Vision-ECCV*, pp. 430-443, 2006.
- [8] D. G. Lowe, "Distinctive image features from scale-invariant keypoints," *International journal of computer vision*, vol. 60, no. 2, pp. 91-110, 2004.
- [9] S. Leutenegger, M. Y. Chli and R. Siegwart, "BRISK: Binary robust invariant scalable keypoints," *IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, pp. 2548-2555, 2011.
- [10] H. Bay, T. Tuytelaars and L. Van Gool, "Surf: Speeded up robust features," *European conference on computer vision*, pp. 404-417, 2006.
- [11] C. Tomasi and T. Kanade, "Detection and tracking of point features," School of Computer Science, Carnegie Mellon Univ., Pittsburgh, 1991.
- [12] C. Tomasi and T. Kanade, "Shape and motion from image streams under orthography: a factorization method," *International Journal of Computer Vision*, vol. 9, no. 2, pp. 137-154, 1992.
- [13] R. Hartley and A. Zisserman, Multiple view geometry, Cambridge university press, 2003.
- [14] D. Scaramuzza, F. Fraundorfer and R. Siegwart, "Real-time monocular visual odometry for on-road vehicles with 1-point ransac," *ICRA'09 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 4293-4299, 2009.
- [15] A. Howard, "Real-time stereo visual odometry for autonomous ground vehicles," *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 3946-3952, 2008.
- [16] B. Triggs, P. F. McLauchlan, R. I. Hartley and A. W. Fitzgibbon, "Bundle adjustment—a modern synthesis," *International workshop on vision algorithms*, no. Springer Berlin Heidelberg, pp. 298-372, 1999.
- [17] D. Nistér, "An efficient solution to the five-point relative pose problem," *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, vol. 26, no. 6, pp. 756-770, 2004.
- [18] N. Yazdi, F. Ayazi and K. Najafi, "Micromachined inertial sensors," *Proceedings of the IEEE*, vol. 86, no. 8, pp. 1640-1659, 1998.
- [19] M. B. Ignagni, "Optimal strapdown attitude integration algorithms," *Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 13, pp. 363-369, 1990.
- [20] R. E. Kalman, "A new approach to linear filtering and prediction problems," *Journal of Basic Engineering*, vol. 82, pp. 35-45, 1960.
- [21] R. Mahony, T. Hamel and J. M. Pflimlin, "Nonlinear complementary filters on the special orthogonal group," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 53, no. 5, pp. 1203-1218, 2008.
- [22] S. O. Madgwick, A. J. Harrison and R. Vaidyanathan, "Estimation of IMU and MARG orientation using a gradient descent algorithm," *IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics*, pp. 1-7, 2011.
- [23] M. Burri, J. Nikolic, P. Gohl, T. Schneider, J. Rehder, S. Omari and R. Siegwart, "The EuRoC micro aerial vehicle datasets," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 0278364915620033, 2016.
- [24] H. Oleynikova, M. Burri, S. Lynen and R. Siegwart, "Real-time visual-inertial localization for aerial and ground robots," *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 3079-3085, 2015.
- [25] N. D. D. & B. S. Krombach, "Combining Feature-based and Direct Methods for Semi-dense Real-time Stereo Visual Odometry," *International Conference on Intelligent Autonomous Systems*, 2016.
- [26] C. Fu, A. Carrio and P. Campoy, "Efficient visual odometry and mapping for unmanned aerial vehicle using ARM-based stereo vision pre-processing system," *International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, pp. 957-962, 2015.

# Eksik Eyleyicili Kendini Dengeleyen Küresel Tekerlekli Mobil Robot İçin Yol Takibi ile Reaktif Hareket Planlaması

Ali Nail İNAL, Ömer MORGÜL  
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü  
Bilkent Üniversitesi  
Ankara, Türkiye  
Email: inal,morgul@ee.bilkent.edu.tr

Uluç SARANLI  
Bilgisayar Mühendisliği Bölümü  
Orta Doğu Teknik Üniversitesi  
Ankara, Türkiye  
Email: saranli@ceng.metu.edu.tr

**Özetçe** —Robotik hareket planlamada kullanılan reaktif yöntemler, büyük bozululara karşı gürbüzlük sağlayabilirler. Fakat, bu yöntemlerin eksik eyleyicili sistemlerde kullanımı zordur ve varolan çözümler ağırlıklı dinamik uygulanabilir gezinmelerin yüksek kazançlı takibini esas almaktadır. Küresel tekerlekli kendini dengeleyen sistemler (BallBot), eksik eyleyicili sistemlere güzel bir örnektir. Bu platformlarda da genellikle zamana bağlı yörünge denetimi yapılmaktadır. Fakat bu, doğrudan eyleyici tahrikli olmayan durum, değişkenlerden geribesleme yapmayı zorlaştırmaktadır. Bu çalışmada, ardışık-bileşim gibi bileşimsel metodlar göz önüne alınarak eksik-eyleyicili sistemler için reaktif bir hareket planlayıcısı ortaya konmaktadır. Öncelikle, genel hareket planlama problemi ele alınmış, gerekli yerel denetimci tanımlamaları yapılmıştır. Problem, BallBot'a göre ele alınmak üzere, yol takip denetleyicileri için genel problem tanımlanmış, ve bu kontrolcünün iki boyutlu dikey düzlem kontrolcülerinin paralel olarak birleştirilmesi ile nasıl oluşturulduğu açıklanmıştır. Yerel denetleyicinin performansı incelenmiş, ve yerel denetleyiciler arasındaki geçiş için uygun tanımlar yapılarak, daha pürüzsüz bir geçiş için tampon parça tanımı öne sürülmüştür. Problemin genel çözümünün, çoklu düğüm noktalarının varlığında ardışık bileşim ile nasıl ele alındığı açıklanmıştır.

**Anahtar Kelimeler**—Eksik Eyleyicili Sistemler, Kendini Dengeleyen Sistemler, Yol Takibi, Davranış Kontrolü.

## I. GİRİŞ

BallBot platformları, küresel tekerlekler üzerinde kendini dengeleyen ve yerçekimsel kuvvetleri gövde açıları üzerinden yatay ivmelere yansıtarak hareket eden mobil robotlardır [1] ve eksik eyleyicili sistemlere zengin bir örnek oluştururlar. Bu yapının ilk örneği, iki tahrikli merdanenin küresel topa kuvvet uyguladığı, ters toplu fare sürücüsü (inverse mouseball drive, IMD) adı verilen bir tasarıma sahiptir [2].

Ne yazık ki bu platformların eksik eyleyicili doğaları, hareket planlanması ve kontrolünde zorluklar oluşturmaktadır. Bu kapsamdaki ilk araştırmalar alt seviye temel denge kontrolü üzerine odaklanmıştır [2,3]. Bu temel duruş dengeleyicisi, etrafındaki bir döngü ile yatay düzlemde robot pozisyonunun kontrolü için PID [2] ve LQR [3] gibi bilinen kontrolcüler ile birlikte de kullanılmıştır. Bu yaklaşımlar eniyileme yöntemleri ile yatay düzlemde elde edilen açık döngü davranış yörüngelerinin, gövde açılarında yapılan ayarlamalar üzerinden gerçekleşmesi prensibini kullanılmaktadır [4]. Böylece çizgi

takibi gibi uygulamalar için makul hassasiyette yörünge takibi gerçekleştirilebilse de, elde edilen hareket yavaş ve hatalı olabilmektedir. Tüm bunlara rağmen, BallBot için yapılan hareket planlama çalışmalarının neredeyse tamamı şekil değişkenleri (shape variables) için yapılan ve reaktiviteyi sadece daha üst seviyelerde düzeltici eylemler olarak gören optimal yörünge planlayıcılarını kullanmaktadır [5].

Bu tür alt düzey denetleyicileri kararlılık ve takip performansları açısından kısıtlı kalabilirler. Bu sebeple daha geniş bir alanda ve muhtemel engellerin varlığında hareket planlaması bileşimsel yöntemler gerektirmektedir. Bunun bir örneği olan ardışık bileşim (sequential composition) yöntemi yerel kararlılığa sahip kontrolcülerini birleştirerek daha geniş etkinlik alanlarına sahip reaktif denetleyiciler elde eder [6]. Bu yöntemlerin BallBot platformlarına da uygulanması hakkında çalışmalar yapılmış, temel hareketlerin sıralandıklarındaki devamlılığı ve pürüzsüzlüğünü garantilemek için nasıl yöntemler kullanılabileceği incelenmiştir [7]. Ancak, bu çalışmalarda alt düzey denetleyiciler hala açık döngü yörüngelere dayanarak çalıştığından, temel hareketler için çekim yörelerinin (domains of attraction) bütünüyle karakterizasyonu mümkün olmamıştır. Bu durum, ardışık bileşimin reaktif yapısından sapmalara yol açar ve sistemin kararlılığını olumsuz yönde etkiler.

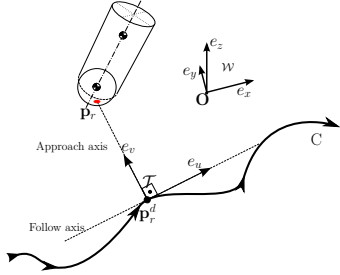
BallBot'un eksik eyleyicili doğası yörüngelerinde minimum-fazlı olmayan (non-minimum phase) davranışların görülmesine sebep olmaktadır [8]. Bu tür sistemlerde, zamana bağlı referans yörüngeleri yerine yol takibi (path-following) kullanarak sistem üzerindeki kısıtları rahatlatmak faydalı olabilmektedir [9]. Bu bildirideki çalışmamız, BallBot platformu için yerel denetleyicilerin yardımı ile daha geniş alanlarda yol takibi sağlayan metodlar için uygun denetleyiciler tanımlamak ve aralarındaki geçişler için gerekli altyapıyı hazırlamayı hedeflemektedir. Bu doğrultuda, BallBot için bileşimsel altyapıyı kullanabilecek genel denetleyiciler için uygun olan yerel denetleyici yöre (domain) tanımları verilmiştir. Bu tanımların kullanıldığı alanlarda, çizgi parçası takibi denetleyicilerinin çalışması sağlanmıştır. Bu çalışmada önerilen denetleyicilere ait kimi sonuçlar [10]'deki çalışmamızda yer almıştır. Bu kapsamda çalışmamızda, doğrusal yolların bu denetim yöntemi ile nasıl kararlı olarak takip edilebileceğini gösteren ve bu yollar arasında başarılı geçişlerin yapılabildiği, üç boyutlu BallBot modelimiz [11] ile gerçekleştirilmiş benzetimler sunulmuştur. Önerdiğimiz

denetim ve geçiş yönteminin, BallBot için ardışık bileşim çerçevesinde kullanılabilir bir reaktif denetim stratejisi için kullanılabilirliğine ve daha geniş alanların kapsanması için uygulanabilirliğine inanıyoruz.

## II. YOL TAKIBİ PROBLEMİ

Literatürde önerilen çoğu BallBot denetleyicisi zamana göre tanımlanmış yörünge fonksiyonlarını takip üzerine kuruludur [4]. Bu yöntemle yol takibi ancak, modele dayalı olarak önceden hesaplanmış yörüngeler ile dolaylı olarak gerçekleştirilebilir. Öte yandan, BallBot uygulamaları için görev seviyesinde bu tür katı, zamana bağlı yörüngeler kullanılması mecburiyeti yoktur. Örneğin  $z = 0$  ile tanımlanan bir çizgiyi takip etme görevi için, çizgi boyunca istenen bir hızda ilerlemek yeterlidir. Buradaki tek ister, bu çizginin sistem yörüngesinin zamanla yakınsadığı ve tutarlı halde ilerlediği bir şekilde değişmez (invariant) ve çekici (attracting) olmasıdır.

Bu bildiride önerdiğimiz yöntem yol takibi problemini, eğri üzerindeki ilerlemeyi sürdürmek (takip), ve eğriye yakınsamayı garantilemek (yaklaşma) olarak iki parçaya bölmek fikri üzerine kuruludur. Yaklaşma eksenini topun yola doğru asimptotik (veya sonlu zamanda) yakınsamasını ifade etmektedir. Buna karşın, takip eksenini yolun en yakın noktasına paralel bir yönde hareketin belirli bir hızda sürmesini ifade eder. Şekil 1'de görüldüğü gibi bu görevler birbirlerine dik



Şekil 1: BallBot'un genel yol takibi problemi. Eğri  $C$  hedef yolu tanımlar ve top konumu  $\mathbf{p}_r$ 'ye en yakın noktası  $\mathbf{p}_r^d$ 'dir.  $e_v$  ve  $e_u$ ,  $C$ 'nin  $\mathbf{p}_r^d$  noktasındaki normal ve teğet yönleridir.

eksenlerde tanımlanmıştır. Takip eksenini  $u$  yola teğet, yaklaşma eksenini  $v$  ise anlık top konumuna en yakın noktadaki dik eksen olarak tanımlanmıştır. Yöntemimiz, bu tanımları kullanarak, iki ayrı 2BD (iki boyutlu düzlemsel) BallBot modelini görev koordinat düzlemi ( $u - v$  koordinat düzlemi) dediğimiz bu eksenlerde konum koruyucu ve hız kontrolcülerini birlikte uygulamaya dayanmaktadır.

Düzlemsel iki boyutlu BallBot denetleyicilerini görev eksenlerine uygulayabilmek için, öncelikle 3B (üç boyutlu) BallBot durum değişkenlerini ataletsel  $\mathcal{W}$  koordinatlarından görev koordinatlarına dönüştürüyoruz.  $z$ -ekseni tüm eksenlerce paylaşıldığından, yatay dönüşümler yeterlidir. Bu dönüşüm sonrasında hem yaklaşım hem de takip eksenlerindeki denetleyicilerin çıktılarını 3B modeli sürmek için kullanılabilir. Böylece basit yollar için takip mümkün olabilmektedir.

## III. REAKTİF YOL TAKİBİ PROBLEMİ

Daha karmaşık yol takip planlarında olasılıksal olarak tüm alanı kapsamak için kullanılan metodlardan biri de ardışık bileşim yöntemidir. Burada, yerel performansı iyi olan davranış

denetleyicilerini birleştirerek daha geniş alanlara sahip reaktif kontrol stratejileri elde edilmesi sağlanmaktadır. Bunun için, her denetleyiciye ait çekim yöresi (domain of attraction) veya denetleyicinin sistemi hedefe bölgeye taşırken çalışması gereken yöre tanımlanmalıdır. Her yeni denetleyicinin hedef bölgesini bir başka denetleyicinin yöresine ekleyerek bütün yöreyi kaplamamız mümkün olacaktır. Bu amaçla, gelecek bölümde çizgi takip denetleyicisinin nasıl yerel kontrolcü olarak kullanıldığından bahsedilecektir.

### A. Çizgi Takip Problemi

Çizgi takip problemi engeller bulunan geniş bir alanda belirli bir yönde hareket etmek için tanımlanmıştır. Yerel denetleyicilerin çalışması için sınırlı çizgiler ve tanımlanmış yerel kontrol yöreleri gereklidir. Sınırlı çizgi parçası aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$L := \{p_s + t(p_e - p_s) | t \in [0, 1], p_s, p_e \in \mathbb{R}^2\}. \quad (1)$$

Burada  $p_s, p_e$  sırasıyla çizginin başlangıç ve bitiş noktalarını temsil etmektedir. Daha basit bir tanımlama için çizgi eksenlerinin orijin noktası bitiş noktası olarak seçilmiştir. Bu nedenle çizginin bitiş noktası aynı zamanda hedef noktasıdır,  $p_G$ . Sistem durum değişkenleri  $y = [q, \dot{q}]$  şöyle tanımlanır:

$$q = [p_r, \phi_f, \phi_a, \psi]. \quad (2)$$

Burada  $p_r \in \mathbb{R}^2$  topun konumu, ve  $p_r = [x_f, x_a]$ , sırasıyla kontrolcünün takip görev eksenini ve yaklaşma görev ekseninde topun konumu olarak tanımlanmıştır.  $\phi_f, \phi_a, \psi$ , takip görev, yaklaşma görev ve sapma eksenlerinde gövdenin davranış açılarıdır.

Böylece, hedef yöresi, durumları kullanarak çizgi parçası  $L$  için aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$\mathcal{G} = \{x_f, x_a, \dot{x}_f, \dot{x}_a \in \mathbb{R}^4 | \|z - z_G\| < \epsilon, \text{ ve } x_f = 0\}. \quad (3)$$

Burada bahsedilen  $z = [x_f, x_a, \dot{x}_f, \dot{x}_a] \in \mathbb{R}^4$ , topun konumu ve hızı için indirgenmiş bir durum vektörü,  $\epsilon$  hedef bölgesinin çapıdır. Her iki görevin denetleyici yöreleri birbirine bağlı olduğu için takip eksenindeki denetleyicinin yöresinin yaklaşma eksenindeki durumlara bağlı olarak tanımlanması gereklidir. Bu nedenle, yaklaşma eksenini denetleyicisinin yöre tanımlaması için takip eksenini denetleyicisinin yöresine bağlı bir çözüm oluşturulmuştur. Bu çözüm, basit bir biçimde istenen takip eksenini hızı ile ilişkili olduğundan, çeşitli durumların - gövde davranış açısı, gövde davranış açısal hızı, topun konumu, ve topun hızını içeren- değişik başlangıç değerleri için benzetim çalışmaları, aşağıda verilen dört boyutlu başlangıç durumları uzayında her nokta için en kötü dengelenme zamanını,  $t_s$ , elde etmek için yapılabilmektedir:

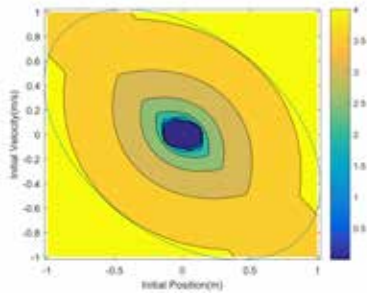
$$t_s(\phi_a, \dot{\phi}_a, x_a, \dot{x}_a) = \min\{t | \|e(t)^T M e(t)\| < \beta\} \quad (4)$$

Burada  $e(t)$  dört boyutlu durum uzayında dengelenme noktasına olan uzaklığı,  $M$  ise bu dört durumun ağırlıklarını temsil etmektedir. Eşik değeri,  $\beta$ , ile dengeleme zamanının genel toleransını değiştirmek mümkün olacaktır.

$t_s$ , daha basit bir yöre tanımı için topun yaklaşma konumu ve yaklaşma hızı düzlemine indirgenerek en kötü zaman haritası,  $t_w$ , indirgenmemiş yöre tanımının,  $\mathcal{D}$ , yardımı ile, aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$t_w(x_a, \dot{x}_a) = \max\{t_s(\phi_a, \dot{\phi}_a, x_a, \dot{x}_a), \forall \phi_a, \dot{\phi}_a \in \mathcal{D}\} \quad (5)$$

Şekil 2’de bahsedilen haritanın, maksimum gövde davranış açısı 15 derece ve maksimum gövde davranış açısı 45 derece/sn olarak sınırlanmış bir örneği verilmiştir. Burada verilen dengelenme zamanlarını kullanarak, doğru parçalarını yol planlama yapmak için birbirine bağlamak mümkün olabilir. Yol planlaması için kullanılabilir bu yöreler, yöre tanımlaması için numerik olarak, çift doğrusal (bilinear) aradeğerleme ile veya analitik olarak -şekilde tanımlanan elipse benzer basit bir üst limit tanımlaması ile- kullanılabilir. Dengeleme zamanlarını



Şekil 2: Yaklaşma eksenini için en kötü dengeleme zamanı, maksimum gövde davranış açısı 15 derece ve maksimum gövde davranış açısı 45 derece/sn için.

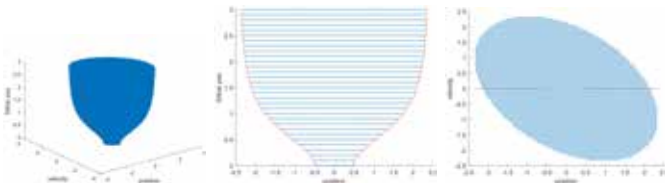
kullanarak yaklaşma eksenini takip eksenine bağlamak kolayca mümkün olur. Bu sebeple, yaklaşma ekseninin dengeleme zamanı, sisteme bir miktar çekiciliği ve değişmezliği garantilemesi için, topun takip eksenine hızına ilişkilendirilmiştir. Bunun için, topun takip eksenine istenen hızı aşağıdaki gibidir:

$$\dot{x}_{f,d} = \min(\dot{x}_f, x_f/t_w(x_a, \dot{x}_a)) \quad (6)$$

Tüm şartlar toplandığında, yerel denetleyicinin ilgilendiği alan;

$$\mathcal{D} = \left\{ z \in \mathbb{Z} \left| \begin{array}{l} x_s < x_f < x_G, \\ \begin{bmatrix} x_a \\ \dot{x}_a \end{bmatrix}^T \mathcal{C} \begin{bmatrix} x_a \\ \dot{x}_a \end{bmatrix} \leq \epsilon^2 + a \arctan \left( \frac{\delta x_f^2}{\pi/2} \right), \\ \exists t_w \leq T_w(x_a, \dot{x}_a), \\ \dot{x}_f = \min\{\dot{x}_f, x_f/t_w(x_a, \dot{x}_a)\} \end{array} \right. \right\}. \quad (7)$$

şeklinde ifade edilebilir. Ters tanjant fonksiyonunu kullanarak, Şekil 3’de yer alan huni formundaki yöre oluşturulmuştur. Lojistik fonksiyonu veya benzeri doymuş (saturated) fonksiyonları kullanarak farklı bölgeler için gerekli farklı formları elde etmek mümkün olur. Bunun yanında,  $\delta$ ’yı kullanarak alanın formunun doygunluk hızı ayarlanabilir. (7)’de sistemin gövde davranış açısı ve açısı makul bir aralıkta sınırlandırılmıştır. Bu değişkenler, yerel denetleyicimizin ilgilendiği bölgeyi değiştirmek için rahatlıkla ayarlanabilir.



Şekil 3: Yerel denetleyicinin ilgilendiği alan hunisinin 3B, takip-yaklaşma eksenleri, ve yaklaşma düzlemi pozisyon-hız eksenlerindeki görünümünün bir örneği. Huni formu (7)’deki değişkenler ve fonksiyonlar kullanılarak değiştirilebilirler.

## IV. BALLBOT İÇİN YEREL DENETLEYİCİ STRATEJİLERİ

### A. Doğru Takip Denetleyicisi

Takip edilecek olan yol doğrusal olduğunda, görev koordinat ekseninin yönü değişmemektedir ve iki boyutlu modellerin paralel kullanımlarının hassas performans vermesi beklenmektedir. Bu gözlem ışığında yatay düzlemde (1)’deki gibi tanımlanan bir çizgi parçası boyunca hareketi sağlayan bir kontrolcü üzerinde kontrol yöntemimizin temel yapısını gösterebiliriz. Bölüm. III-A’da, çizgi takibi için görev eksenlerinin tanımlamaları verilmiştir.

Yol takibi için önerdiğimiz kontrol yapısı iki boyutlu iki düzlemsel denetleyicinin görev eksenlerinde kullanılması ile elde edilmektedir. Üç boyutlu model durum değişkenleri görev eksenlerine aktararak, yaklaşım ekseninde iki boyutlu konum tutucu, takip ekseninde ise hız denetleyicisi kullanılmıştır [10]. Bu yapıda  $\tau_x$  ve  $\tau_y$ , IMD sürücü dinamiğinin girdi torklarını,  $\tau_v$  ve  $\tau_u$  ise görev eksenindeki denetleyicilerin çıktılarını ifade eder. Her iki görev denetleyicisi de kendi eksenlerine yansıyan, hem top ve hem gövde durumlarını içeren ölçümlere göre gövde davranışlarını kontrol ederler. Problemi yörünge değil yol takibi haline dönüştüren kilit nokta, takip ekseninde yalnızca hız kontrolü yapılıyor olması ve zamana göre belirli bir konum isterinin ortadan kalkmış olmasıdır. Yaklaşım ekseninde hedef nokta, yolda topun konumuna en yakın olan nokta,  $\mathbf{p}_r^d$ , olarak tanımlanmıştır. Yaklaşım ekseninde hedef noktada istenen hız sıfır olarak seçilmiştir ve bu eksenindeki konum koruyucu denetleyici aşağıdaki yapıdadır:

$$\tau_v = K_p(\phi_v - G_p(v_r - v_r^d) - G_d(\dot{v}_r)) + K_d\dot{\phi}_v. \quad (8)$$

Burada,  $\tau_v$  yaklaşım eksenindeki denetleyici çıktısı,  $\phi_v$  ve  $\dot{\phi}_v$  yaklaşım eksenine döndürülmüş gövde açısı ve dönme hızı,  $v_r$  ve  $\dot{v}_r$  ise yaklaşım eksenine aktarılmış top konum ve hızıdır.  $K_p, K_d$  iç döngünün PD parametreleri,  $G_p, G_d$  dış döngünün PD parametreleridir. Takip ekseninde bir hedef noktasına gitmek yerine hız denetleyicisi istenen  $\dot{u}_r^d$  hedef hızına ulaşmaya çalışmaktadır. Bunu gerçekleyen geribesleme yöntemi şöyledir:

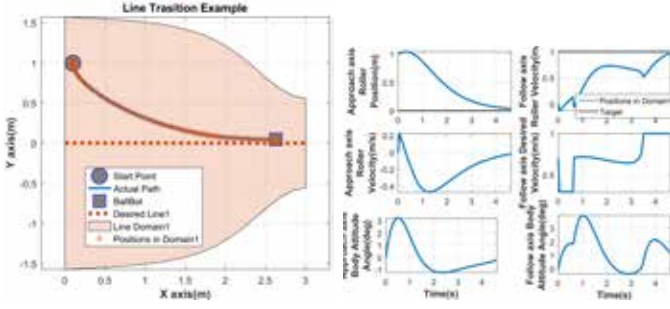
$$\tau_u = K_p(\phi_u - G_d(\dot{u}_r - \dot{u}_r^d)) + K_d\dot{\phi}_u. \quad (9)$$

Burada,  $\tau_u$  takip eksenindeki denetleyici çıktısı,  $\phi_u$  ve  $\dot{\phi}_u$  bu eksene döndürülmüş gövde davranış açısı ve dairesel hızı,  $\dot{u}_r$  ise takip eksenine döndürülmüş top hızıdır.

Bu iki denetleyici de birleştirildiğinde, sistem istenen doğruyu gövde dik ve top sabit bir hızda olacak şekilde takip edecektir. Bu birleştirme, aksel denetleyicilerin tork çıktılarının gövde koordinatlarına aktarımını gerektirmektedir ki, bu da gövde açıları bilindiği için kolaylıkla yapılabilir.

### B. Doğrusal Yol Takibi Benzetim Sonuçları

Bahsedilen yerel denetleyiciyi kullanarak, bir doğru parçasına yaklaşmak için benzetim çalışmaları yapılmıştır. Şekil 4’de görüldüğü gibi denetleyici başarıyla istenen yola yakınsamaktadır. İlgilenilen yöre içinde kaldığı süre başlangıç noktasından bağımsız olarak BallBot, takip görevini yerine getirirken, doğru parçasına yakınsayabilmektedir. Şekil 4’de, sağda, sistem durumlarının zaman yörüngeleri

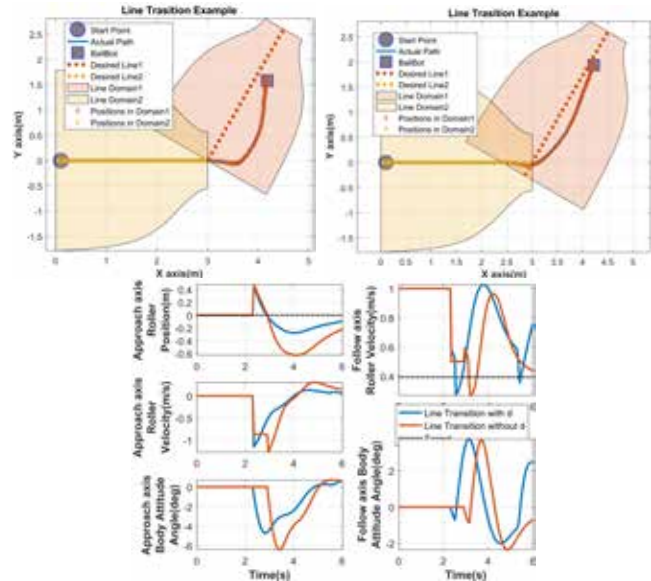


Şekil 4: (Sol) BallBot için doğru takibi benzetim çalışması. Sistemin hedefi yolu,  $1m/s$  takip eksen hızıyla izlemektir.

(Sağ) Benzetim performansı sonuçları. Solda yaklaşım eksen, sağda ise takip eksen performansı yer almaktadır. görülmektedir. Sistem başarıyla istenen yola yakınsayabilmektedir. Böylece daha karmaşık bileşimsel metodlar için kullanılabilir bir hareket öncülü elde edilmiştir.

### C. Doğru Geçiş Denetimi

Bir doğru parçasının takibinin ardından, yerel denetleyicilerin daha karmaşık bileşimsel metodlar tarafından verilen bir doğru parçası listesini takip edebilmesi gereklidir. Yeni doğru parçası bir önceki doğru parçasının hedef noktasından başlayarak herhangi bir noktaya gitmektedir. Doğru geçişinin sorunsuz çalışmasını kısmen garantilemek için, sistem test edildi. Geçiş sırasında doğruya ilk giriş hızını etkileyen önceki doğrunun takip hızını idare edebilmesi için, geçilen çizgi parçasının başına tampon geçiş parçası eklenmiştir. Böylece geçilen çizginin denetleyicisinin ilgilendiği yöre ile önceki çizginin hedef bölgesinin daha büyük bir alanda kesişmesi sağlanmıştır. Tampon parçanın uzunluğu, iki çizgi parçası arasındaki (kesiştikleri noktadaki) açı ile ilişkilidir. Şekil 5'de görüldüğü gibi, sağda tampon parça kullanılarak yakınsamanın daha başarılı bir biçimde yapılması sağlanmıştır. Şekil 5'de



Şekil 5: BallBot için 3B'de doğru geçişi benzetim çalışması. Sistem hedefi yolu,  $1m/s$  takip eksen hızıyla izlemektir.

Üst-sağda tampon parça kullanılan geçiş daha başarılıdır. Alt-solda yaklaşım ekseninin, alt-sağda takip ekseninin zaman yörüngeleri verilmektedir. Mavi çizgiler, tampon parça kullanılan geçişi temsil etmektedir.

altta sistem durumlarının zaman yörüngeleri, tampon parça kullanılan geçişin daha pürüzsüz olduğunu göstermektedir.

Verilen geçiş metodu ile birden fazla geçiş yapmak kolaylıkla sağlanabilir. Böylece daha karmaşık bileşimsel metodların yardımıyla hazırlanan yol listelerinin izlenmesiyle daha geniş alanlara sahip reaktif kontrol stratejilerinin elde edilmesi sağlanmaktadır. Her yeni denetleyicinin hedef bölgesini bir başka denetleyicinin yöresine ekleyerek bütün yöreyi kaplamamız mümkün olacaktır.

## V. SONUÇ

Bu çalışmada, BallBot için yerel denetleyicilerin yardımı ile daha geniş alanlarda yol takibi sağlayan metodlar için uygun denetleyiciler tanımlandı. Aralarındaki geçişler için gerekli alan tanımları yapıldı. BallBot için bileşimsel altyapıyı kullanabilecek genel denetleyici yöntemlerine uygun olan yerel denetleyici yöre tanımları verildi. Bu tanımları kullanan alanlarda, çizgi parçası takibi denetleyicilerinin çalışması sağlandı. Bu kapsamda çalışmamızda, doğrusal yolların bu denetim yöntemi ile nasıl kararlı olarak takip edilebileceğini gösteren ve bu yollar arasında başarılı geçişler yapabildiğini gösteren başarılı benzetimler sunuldu. Gelecek çalışmalarda, önerdiğimiz denetim ve geçiş yönteminin, BallBot için ardışık bileşim çerçevesinde kullanarak, reaktif bir denetim stratejisi oluşturmaya çalışacağız. Bu tür planlama algoritmalarının sisteme uygulanmasıyla dinamik davranışlar varlığında kıvrak hareket performansı bu platform için mümkün olacaktır.

## KAYNAKÇA

- [1] U. Nagarajan, G. Kantor, and R. Hollis, "The BallBot: An omnidirectional balancing mobile robot," *The Int. Journal of Robotics Research*, vol. 33, no. 6, pp. 917–930, 2014.
- [2] T. Lauwers, G. Kantor, and R. Hollis, "One is enough!" in *Robotics Research*, ser. Springer Tracts in Advanced Robotics, S. Thrun, R. Brooks, and H. Durrant-Whyte, Eds. Springer Berlin / Heidelberg, 2007, vol. 28, pp. 327–336.
- [3] C.-C. Tsai, M.-H. Juang, C.-K. Chan, C.-W. Liao, and S.-J. Chan, "Self-balancing and position control using multi-loop approach for ball robots," in *Proc. of Int. Conf. on System Science and Engineering*, 2010, pp. 251–256.
- [4] U. Nagarajan, G. Kantor, and R. Hollis, "Trajectory planning and control of an underactuated dynamically stable single spherical wheeled mobile robot," in *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, May 2009, pp. 3743–3748.
- [5] U. Nagarajan, "Dynamic constraint-based optimal shape trajectory planner for shape-accelerated underactuated balancing systems," in *Robotics: Science and Systems*, Zaragoza, Spain, June 2010.
- [6] R. R. Burrige, A. A. Rizzi, and D. E. Koditschek, "Sequential composition of dynamically dexterous robot behaviors," *The Int. Journal of Robotics Research*, vol. 18, no. 6, pp. 534–555, 1999.
- [7] U. Nagarajan, G. Kantor, and R. Hollis, "Integrated motion planning and control for graceful balancing mobile robots," *The Int. Journal of Robotics Research*, vol. 32, no. 9–10, pp. 1005–1029, 2013.
- [8] R. Seifried, "Trajectory tracking of multibody systems," in *Dynamics of Underactuated Multibody Systems*. Springer, 2014, pp. 113–166.
- [9] A. P. Aguiar, J. P. Hespanha, and P. V. Kokotovic, "Performance limitations in reference tracking and path following for nonlinear systems," *Automatica*, vol. 44, no. 3, pp. 598 – 610, 2008.
- [10] A. Inal, O. Morgul, and U. Saranlı, "Path following with an underactuated self-balancing spherical-wheel mobile robot," in *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Advanced Robotics*, July 2015, pp. 194–199.
- [11] —, "A 3d dynamic model of a spherical wheeled self-balancing robot," in *Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, 2012, pp. 5381–5386.

# Bir Mars Gezgininin Mekanik Tasarımı

Gürkan Sercan Aydođdu, Ali Yaşar, Emre Kağan Cicek, Can Evyapan,  
Batıkan Özgür, Alp Yıldırım, Sena Şevval İnan, Mehmet Can Yıldırım ve Özkan Bebek  
Makina Mühendisliği Bölümü  
Özyeğin Üniversitesi  
İstanbul, Türkiye

Email: {sercan.aydogdu, ali.yasar, emre.cicek, can.evyapan, batikan.ozgur,  
alp.yildirim, seval.inan, mehmet.yildirim}@ozu.edu.tr, ozkan.bebek@ozyegin.edu.tr

**Özetçe** —Merih-2, Özyeğin Üniversitesi Rover Takımı tarafından University Rover Challenge 2016 ve European Rover Challenge 2016'ya katılmak ve Mars koşullarında görev yapmak için tasarlanan gezgindir. Sürüş için Merih-2'nin 6 adet özel tasarım tekeri bulunmaktadır. Yüksek çekiş için bütün tekerler elektrik motorlarıyla tahrik edilmiştir. Gezginin ilerlerken yön değiştirmesi, ön ve arka tekerlerin beraber yönlerinin değiştirilmesiyle sağlanmıştır. Tekerlerden en az dördünün yere basmasını sağlayan bir Külbütör-Boji mekanizması (Rocker-Bogie Mechanism) ve bu mekanizmanın denge sağlayıcısı görevini üstlenen bir diferansiyel bulunmaktadır. Merih-2 ayrıca, çevredeki objelerin manipülasyonu için 5 çubuk mekanizması ile çalışan 4 serbestlik dereceli bir kola sahiptir. Bu robotik kola çok fonksiyonlu bir tutucu takılmış ve tornavida alma, şalter açma/kapama gibi astronotlara yardım görevlerini yapması planlanmıştır. Bu makalede Merih-2'nin tasarım ayrıntıları ve üretilen prototipten elde edilen kazanımlar anlatılmaktadır.

**Anahtar Kelimeler**—Gezegen gezginleri, Kara Robotları, Robot Mekanik tasarımı

## I. GİRİŞ

Özerk sistemler uzay araştırmalarının bel kemiğini oluşturmaktadır. İnsanlı görevlerin beraberinde getirdiği maddi yükler ve insan hayatı üzerinde oluşturduğu riskler, uzay cisimlerine yönelik gerçekleştirilen görev ve araştırmaların insansız cihazlar ile sürdürülmesine neden olmuştur. Araştırılan gök cisimlerinin (gezegen, kuyruklu yıldız, uydusu vb.) Dünya'ya olan uzaklıklarından ötürü gerçek zamanlı kontrolün mümkün olmaması, sistemde oluşabilecek her türlü aksaklığın yine sistemin kendi tarafından giderilme ihtiyacından ötürü, uzay robotiği çeşitlilik ve tasarım zorluklarını içerisinde bulundurmayı sürdüren bir araştırma alanıdır. Yakın uzayda araştırılması gerekli gezegen ve uyduların büyüklüğü, mobil robotların uzay robotiğinde kullanım ihtiyacını doğurmuştur.

Gezegen gezginleri (Planetary Rovers) Ay ve Mars üzerinde araştırma amacıyla 1970'li yıllardan itibaren farklı görevlerde kullanılmıştır. Bu bağlamda ilk başarılı görev olarak 1970 yılında SSBC'nin Lunokhod 1 adlı aracının Ay'ın yüzeyine ulaşması ile sağlanmıştır. Gezginler gönderildikleri gök cisminin yapısı ve gönderilme gerekçeleri olan bilimsel görevin gerektirdiği koşullara göre sistemsel değişiklikler göstermektedirler.

Üniversiteler arası gezgin yarışmaları 2007 senesinde ABD'de University Rover Challenge (URC) ile başlamış olup Mars yüzey koşullarına benzer özelliklere sahip yüzeylerde

Türkiye Robotbilim Konferansı, 2016

gerekli görev simülasyonlarının gerçekleştirilmesinin amaçlandığı organizasyonlardır. URC'yi takiben European Rover Challenge (ERC) 2012 ve United Kingdom University Rover Challenge (UKURC) yarışması da 2016 senesinden itibaren benzer amaçla ancak farklı görev yapılanmaları ile düzenlenmektedirler. Yarışmalar sırasında olası insanlı bir Mars görevine yönelik senaryolar özgün platformlarla denenmektedir.



Şekil 1. Merih-2 Mars yüzeyi simülasyon sahasında

Merih gezegen gezgini prototipleri Özyeğin Üniversitesi Rover Takımı (OzU Rover) tarafından yarışmaların yıllık beklentilere odaklı olarak geliştirilmektedir (Şekil 1'de Merih-2 görülmektedir). Makalenin devamında; Merih-2 robotunun geliştirilmesi sırasında tabi olunan kısıtlama ve şartlar Sistem Gereksinimleri bölümünde, Merih-2'nin mekanik yapılanması da devam eden bölümler içerisinde hiyerarşik olarak önem taşıyan temel bölümler olan Tekerlek, Süspan-siyon, Diferansiyel ve Robot Kol altında açıklanmıştır.

## II. SİSTEM GEREKSİNİMLERİ

Merih-2, yarışmalarda yarışabilmek ve aynı zamanda gezgin sınıfına üye olabilmesi için bazı sistem gereksinimleriyle donatıldı ve bu doğrultuda tasarlandı. En temel gereksinimi kendi başına ayakta durabilmesi ve bir yere fiziksel olarak bağlılığı olmadan hareket edebilmesidir. Çalışma alanında hiçbir şekilde bir yere bağlı olmaması veya bir yerden destek almaması gerekmektedir. Bu bağlamda, bir başka gereksinim ise ağırlık sınırlamasıdır. Merih-2'nin içinde bulunmuş olduğu gezgin sınıfı belli bir ağırlık sınırına gereksinim duymaktadır.

Yarışmaya katılan gezginler 50 kilo ağırlık sınırını geçmeyecek şekilde tasarlanmalıdır [1]. Aynı zamanda bir başka sistem gereksinimi ise hız ile alakalıdır. Hız limiti 3 km/h olarak belirlenmiş ve bu gereksinime göre donanım kullanılmıştır. Gezginlerin asıl kullanım amacı astronotlara kolaylık sağlamak ve gerekli görevleri yerine getirebilmektir. Bu görevlerden en fazla önem arz edeni bulunduğu ortamdan örnek toplayıp, onları muhafaza edilmiş bir şekilde istenilen yere ulaştırılmasıdır. Bu yüzden örnek toplama kutusuna gereksinim vardır. Bu kutu en az 3 bölmeden oluşturulmalı ve her koşula dayanıklı olmalıdır. Kullanacak örnek kutusu en az 100 gram taş örneği veya 200 gram toprak örneği taşıyabilmelidir.

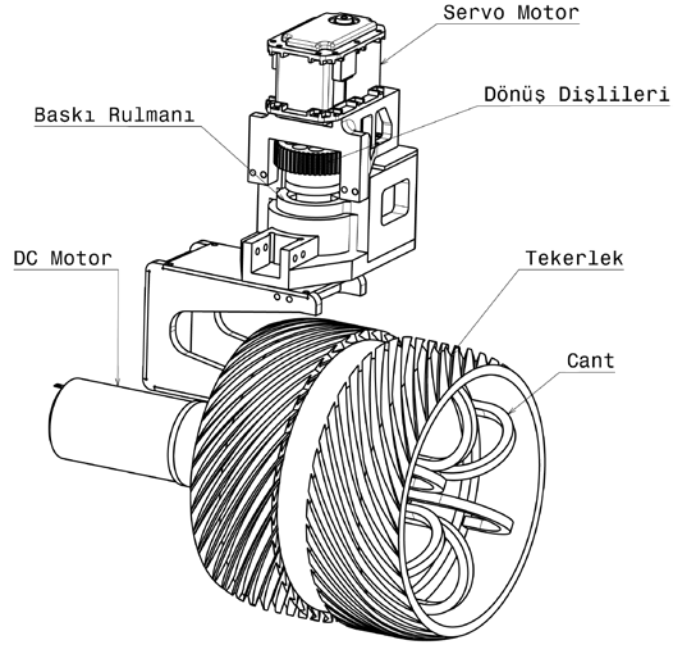
### III. TEKERLEK

Merih-2'nin sürüş sisteminde 6 adet özel üretim olan tekerlek bulunmaktadır. Bunların ön ve arkadaki toplam dört adeti sapma ekseninde de dönebilme kabiliyetine sahiptir. Bu ek özellik gezginin yönlendirilmesi için kullanılmaktadır. Mars yüzey koşulları kumdan keskin taşlara kadar farklı yüzey özellikleri göstermektedir. Aracın yüzeye buluşmasını sağlayan bölümü olan tekerlekler, bu çeşitliliğe uyum gösterecek yapıda olmak zorundadır. Merih-1 prototipinde havalı tekerlekler kullanılarak yüzey koşullarının harekete en az düzeyde etki etmesi planlanmıştır. Ancak yarışma ve genel olarak gezginlerin çalışma prensipleri göz önünde bulundurulduğunda özel tasarım tekerleklere ihtiyaç duyulmuştur. Faal gezgin sistemleri incelendiğinde, karşılaşılan tasarımlarda katı yapıya sahip ve yüzeye temas alanı büyük tekerleklerin genel bir baskınlığı görülmektedir. Merih-2 için de katı yapı bir tekerlek sistemi geliştirilmiştir. Katı tekerler seçilirken sıkça kullanılan havalı tekerleklerin aksine bölgesel hasarların bütün tekerlek yapısını etkilemiyor oluşudur. Tekerleğin tasarım süreci dış teker, jant ve sapma sistemi olarak üç aşamada incelenebilir. Şekil 2'de Merih-2'nin tekeri gösterilmektedir.

İlerleyen bölümlerde görüleceği üzere, Merih-2 gezgininde bir sönümlendirici sistemi bulunmamaktadır. Yüzeydeki çukur, tümsek ve benzeri yapıların hareket sırasında aracı etkilememesi için gerekli sönümlendirici ve yay özellikleri tamamen tekerler tarafından sağlanmaktadır. Çeşitlilik gösterebilen yüzey koşulları bir araya geldiğinde bu şartlar tekerleğin tasarımını zorlu bir süreç haline getirmiştir. Gezginin temel ölçüleri görev ve sınırlamalar üzerinden çıkarıldıktan sonra tekerlek başına 3kg ağırlık sınırlaması getirilmiştir. Karşılaşılabilecek en kötü senaryonun 1 metrelik serbest düşüş olacağına karar verilmiş ve durumun sistemde oluşturacağı etkilere göre CAD modellerine Sonlu Elemanlar Analizi (SEA) yapılmıştır. En kritik parçalar olarak görülen jantların, sürüşü sağlayan şaftın ve sapmaya yardımcı C şeklindeki parçanın maruz kalacağı maksimum stresler sırasıyla 44MPa-5.2MPa-23.8MPa olarak bulunmuştur. Tekerleklerin sürekli hareket halinde olması nedeniyle aynı parçaların dayanıklılık kısıtlamaları hesaplanmış ve güvenlik katsayıları sırasıyla 3.36 - 27.8 - 6.2 olarak bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda tekerleğin ana şekli ortaya çıkmıştır. Devamında yine aynı test sonuçları üzerinden Nylon 6/6'dan tekerleklerin üretimine karar kılınmıştır. Ancak gerekli orijinal malzemeden üretim yapılmadan önce, uygun çekişi sağlayabilecek bir teker yüzeyi elde edilip edilmediğini görmek adına tasarım farklı teker kanalları denenerek 3 boyutlu yazıcı ile üretilmiştir. Test sonucunda edinilen bilgiler değerlendirilerek tekerleğin dış yüzeyi azdırma dişlisinde et kalınlığına uygun en büyük

modül ile çekilerek yüzeye tutunması arttırılacak şekilde orijinal materyal olan Nylon 6/6'dan üretilmiştir. Tekerleklerin kenarlarına eğim verilerek kenarlarda oluşabilecek stres yoğunluğu azaltılmış ve tekerlerin yüzey teması arttırılmıştır.

Dış tekerin üretimine paralel olarak yay görevi görecektir olan jantların tasarım ve imalatı gerçekleştirilmiştir. SEA sonucunda elde edilen tasarım üzerinden jantlar CNC Lazer Tezgahında üretilmiştir. İmalat sonrasında sapma sistemi için gerekli motor seçiminin yapılması için bir deney düzeneği kurulmuştur.

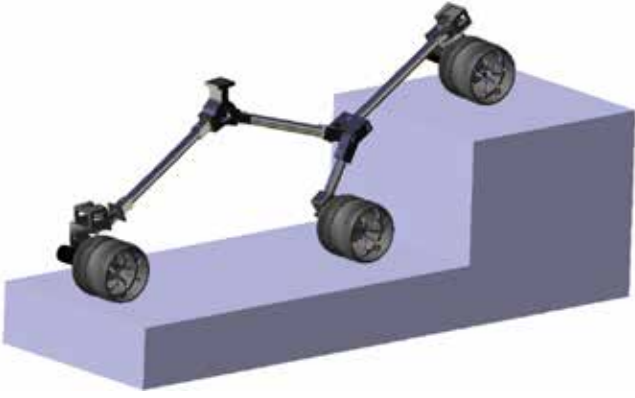


Şekil 2. Merih-2 Tekerinin Montaj Resmi

Şekil 2'de görünen alt bölüm OptoForce 6 Eksen Kuvvet-Tork sensörüne bağlanarak sistem için fazlasıyla güvenli seçilmiş bir motor kullanılmıştır. Bununla beraber farklı açısız hızlar besleyerek kum, toprak, çim ve çakıllı yüzeylerde tekerlekler test edilmiştir. Test sonuçları üzerinden sapma motorunun maruz kalacağı sürtünme modellenirken beraberinde de sistem üzerinden oluşabilecek en yüksek tork ihtiyaçları ortaya çıkarılmıştır. Deney verilerinin sonucunda Dynamixel MX-64 servo motorların kullanılmasına karar verilmiştir. Ancak saha testleri sırasında yaşanan aksaklıkları aza indirerek sistemin güvenliğini arttırmak adına, tasarım 3:1 dişli sistemi ile modifiye edilmiştir. Böylece dış etkenlerden gelebilecek ek torkların oluşturacağı sorunlara karşı sistem güvenceye alınmıştır.

### IV. SÜSPANSİYON

Merih-2 tasarımında Külbütör-Boji Mekanizması kullanılmıştır (Şekil 3). Bu mekanizma özetle gezginin yürüyen aksamıdır. Merih-2'nin Külbütör-Boji tasarımında tekerlekler, diferansiyel bar ve ana gövde arasındaki bağlantıyı en iyi şekilde yapmak hedeflenmiştir. Külbütör ve boji birbirine serbest dönüş yapan bir şaft ile bağlanmıştır. Zorlu ve eğimli yüzeylerde gezginin yer ile bağlantısının kesilmemesi hedeflenip ve gezginin denge mekanizmasını sağlamak amacı ile, sağ ve sol Külbütör-Boji birbirine diferansiyel bar ile bağlanmıştır.



Şekil 3. Merih-2 Külbütör-Boji mekanizması

Merih-2'nin tasarımında kullanılan Külbütör-Boji mekanizmasının çok önemli 2 avantajı vardır. Bunlardan ilki, Merih-2 opere edildiği yüzeylerde herhangi bir engeli aşar iken sağ ve sol külbütör bojiiler orantısız şekilde dönüş yaparak Merih-2 nin tekerleklerinin her zaman yüzey ile bağlantı kurmasını sağlar [2]. Külbütör-Boji tasarımının diğer önemli avantajı ise, Merih-2'nin yük dağılımını 6 tekerleğe eşit şekilde paylaşırmasıdır [3]. Bu sebeple tasarımın en önemli noktaları; külbütörün ana gövdeye monte edileceği nokta, diferansiyel barın kuvvet dağılımı yapabildiği ve üzerine binen strese dayanabilmesi için gerekli uzunluklarda üretilmesidir.

Merih-2'nin yana devrilmesini engellemek amacıyla, bilinen külbütör-boji sistemlerinden farklı bir tasarım yapılmıştır. Normalde bütün tekerlekler aynı hizaya olmaktadır. Merih-2'de külbütörün ön tekerlek ve bojiye uzanan bağlantıları belli açı ile gövdeye bağlanmaktadır, böylelikle gövdenin ağırlığını taşıyan tekerleklerin açıklığı artırılabilmiştir (Şekil 1'de bu açıklık görülmektedir). Bu tasarım Merih-2'yi yarışan diğer gezginlerden ayıran belirgin özelliklerdendir.

Bunun haricinde Merih-2'nin Külbütör-Boji sistemini diğer bütün Külbütör-Boji sistemlerinden ayıran en önemli özelliği, Külbütör-Boji'nin dışa doğru açı ile tasarlanmış olmasıdır. Buradaki asıl hedef, daha önce Merih-1'in tasarımında deneyimlenen, düz olarak üretilen Külbütör-Boji'nin gezgini düz olarak tutamamasından kaynaklı sağa veya sola devrilme problemini aşmaktır. Problem, zamanla gezginin hareketinden kaynaklı vida, somun ve civataların gevşemesidir ve Merih-2'nin tasarımında bu problemin üstesinden gelinmiştir.

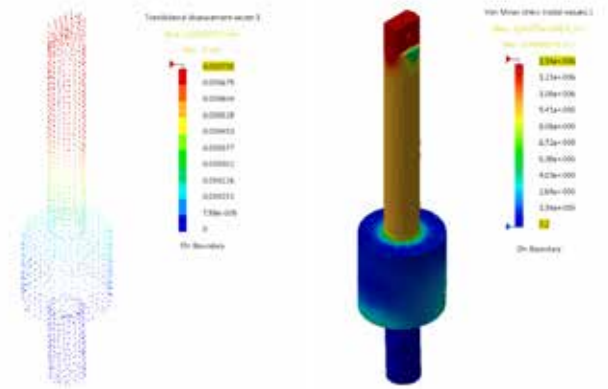
Merih-2 Külbütör-Boji tasarımı bilgisayar destekli tasarım programları ile yapılmıştır(CAD). Stres ve dayanıklılık analizlerinde Von Mises değerlerine bakılmış olup, istenilen koşullar için en iyilenmiş ve malzeme seçimi bu doğrultuda yapılmıştır. Aynı zamanda üretim maliyeti de göz önünde bulundurulmuştur. Külbütör-Boji'nin her parçası 7000 serisi alüminyumdan üretilmiş olup, her parçanın stres analizleri en kötü durum göz önüne alınarak yapılmış ve ayrıca 1 metre yükseklikten serbest düşmesinde oluşacak strese dayanıklı bir biçimde üretilmiştir.

## V. DİFERANSİYEL

Merih-1'de olduğu gibi Merih-2'de de Külbütör-Boji mekanizmasının yanında yine bar diferansiyel sisteme yer

verilmiştir. Arabalarda kullanılan diferansiyel sistemler, her iki aks aynı zamanda çalışırken tekerlere devir dengesi sağlamak için üretilmiştir. Mars gezgini "Merih-2" için bu sistemin görevi iki Külbütör-Boji arasındaki moment farkını eşitleyerek gezginin dengede kalmasını sağlamaktır[4]. Dişli diferansiyel sisteminin gezginin içinde yer kaplaması, mekanik boşlukları olması ve gerekli serbestlik derecesini sağlayamamasından dolayı tercih edilmemiştir. Bu nedenle, bu tür boşluklardan kaçınan, basit bir yapısı olmakla beraber 5 serbestlik derecesi sağlayabilen bar diferansiyel sistemi kullanılmıştır. Mars koşullarına uygun ve tamamen mekanik olan diferansiyel bar sistemi, Külbütör-Boji mekanizmasını destekler ve hareketleriyle uyumlu olarak çalışır. Gezgin için aynı zamanda süspansiyon görevi gören sistem, gezgini her türlü arazide dengeli bir şekilde tutmaktadır.

Sistemin ana kısmı olan orta kısım, hareketi sağlaması için y-düzleminde bir şaftla gövdeye bağlanmıştır. İçi boşaltılmış 7000 serisi alüminyum kollar ile Külbütör-Boji sistemine hareket z-düzlemi kullanılarak aktarılmıştır [5]. İçi boşaltılmış kolların içerisinde şaft ve destekleyici rulmanlar bulunmakta ve kritik bölgelerde malzeme olarak çelik seçilmiştir. Kolların 15 derecelik hareket özgürlüğüne ulaşabilmesi için z-düzleminde dönen Külbütör ve diferansiyel kollarını birbirlerine bağlayan bir ara parça tasarlanmıştır. Külbütör-Boji'ye bağlanılan alt parça uzun bir şaftla istenilen yüksekliğe getirilmiş ve rulmanlarla desteklenmiştir.



Şekil 4. Merih-2 Diferansiyeli Alt Uzun Şaft Yer Değiştirme ve Von Mises Stres Analizleri

Merih-2 diferansiyel sisteminin mekanik tasarımı CAD/CAE programları bazlıdır. CAD destekli bu programlardan CATIA V5 kullanılmış ve Sonlu Elemanlar Analizi (SEA) bu program üzerinden yapılmıştır. Külbütör-Boji'nin moment farkını dengelemek amacıyla yükü ilk maruz kalan elemanın (Şekil 4) CAD modeline SEA yapılarak yer değiştirme ve Von Mises Stres analizleri yapılmıştır (Şekil 5). Bunun sonucunda maksimum yer değiştirme 0,0016 mm ve maksimum stres 2.34 MPa olarak bulunmuştur. Tasarım gezginin 1 metre serbest düşüşe dayanıklı olabilmesi için tasarlanmış ve analizler buna göre yapılmıştır. Yorgunluk güvenlik kat sayısı minimum 2 olarak hedeflenmiş ve bütün elemanlar testten başarıyla çıkmıştır.

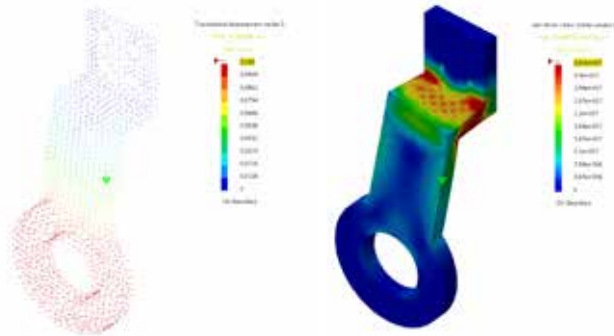
## VI. ROBOT KOL

Çevredeki objelerin manipülasyonu, şalter açma/kapama gibi astronotlara yardım görevlerinin yapılabilmesi için bir manipülatöre ihtiyaç duyan Merih-2, 5 çubuk mekanizması ile çalışan 4 serbestlik dereceli bir kola sahiptir. 4 serbestlik derecesi sırası ile yunuslama(uçağın burun aşağı yukarı hareketi), yunuslama, roll(uçağın sağa sola yatış hareketi), yunuslama şeklindedir. Üçüncü ve dördüncü serbestlikler çok fonksiyonlu tutucunun takılması sonucu kazanılmıştır. Tutucu iki parmaklı olmak üzere bir çok görevde kullanılmaktadır.

5 çubuk mekanizması, 4 çubuk ve 4 bağlantı ile sağlanır. 5 çubuk mekanizması denilmesinin sebebi 5. çubuk olarak yeryüzünün referans alınmasıdır. Bu mekanizmanın çalışma prensibi 4 çubuğu paralelkenar düzenine getirip yere dik olan 1. çubuğun hareketi ve yere paralel 2. çubuğun bu hareketi iletimi ile 2. serbestliğin hareketi sağlanır. Bu mekanizma, 1. ve 2. serbestlikleri tahrik eden motorları aynı eksende çalıştırarak kolun kaidesine yakın tutmak amacı ile PHANToM projesinden esinlenilmiştir [6].

Kol, Merih-2'nin şasesine 45 derece eğim sağlanarak takılmıştır. Böylece uzayda daha fazla noktaya, daha kısa bağlantılarla erişim sağlanabilmektedir. İkinci serbestliği harekete geçirmek için kullanılan 5 çubuk mekanizması, bu eksen tahrik eden motorun gövdeye daha yakın olmasını sağlamaktadır. Böylece kasknak/kayış gibi sistemler kullanılmasıyla güç kaybı yaşanmamıştır ve de elektrik motorunun bu eksen yerine merkeze yakın pozisyonlanmasıyla birinci eksen tahrik eden motor için gerekli olan dönme momenti ihtiyacı da azalmaktadır.

Robot kolun en kritik elemanlarından biri olan 5 çubuk mekanizması bağlantı parçası CAD modeline SEA yapılarak yer değiştirme ve Von Misses Stres analizleri yapılmıştır (Şekil 6). Bunun sonucunda maksimum yer değiştirme 0,187 mm ve maksimum stres 50.7 MPa olarak bulunmuştur.



Şekil 5. Merih-2 Robot Kolu 5 Çubuk Mekanizması Bağlantı Parçası Yer Değiştirme ve Von Misses Stres Analizleri

## VII. KAZANIMLAR

Kendi başına ayakta durabilen ve fiziksel bağımsızlık ile hareket edebilen Mars Gezgini Merih-2, Ağustos 2016'da zorlu süreçlerden geçerek tamamlanmıştır. Nylon 6/6'dan üretilmiş dış tekerlere sahip olan gezgin dış darbelere karşı yay görevi görecektir olan jantlara sahiptir. Ancak, söz konusu jantlarda vida gevşeme problemi yaşanmıştır. Probleme etki eden nedenlerden biri, zorlu yüzey koşullarında elektrik motorunun

uyguladığı yüksek dönme momentidir. Bu sebeple bir dahaki tasarımlarda yekpare jantlar kullanılmasına karar kılınmıştır. Merih-2 Tekerinin tasarımında sürüş için kullanılan elektrik motorlarının pozisyonlanmalarının hatalı olduğu saha testlerinde fark edilmiştir. Söz konusu motorlar sürüş arazisine çok yakın olduğundan dolayı çeşitli taş ve kaya gibi engellerde problem teşkil etmektedir. Gezginin tekerleklerinin daimi olarak yüzey ile bağlantı kurmasını sağlayan Külbütör-Boji dışa doğru açı ile tasarlanıp, gezginin zorlu arazi koşullarında devrilmesini engellemiştir. 5 serbestlik derecesi sağlayan ve iki Külbütör-Boji arasındaki moment farkını eşitleyen diferansiyel sistemi, gezgini çeşitli arazi tiplerinde dengede tutmaktadır. Gezginin şasesine 45 derece eğim ile montajı yapılan robot kol, 5 çubuk mekanizması ile çalışır 4 serbestlik derecesine sahiptir. Böylece kısa bağlantılar kullanılarak uzayda daha fazla noktaya erişilebilmektedir.

## VIII. GÖNDERİM

Merih-2 robotu Özyeğin Üniversitesi, Karaca Makina Hır. San. ve Tic. Ltd. Şti., Topçam Makine Müh. San. Tic. Ltd. Şti., Cloud4Succes, ÖzdePCB, Elsim Elektronik A.Ş. firmaları tarafından kısmi olarak desteklenmiştir.

## KAYNAKÇA

- [1] European Rover Challenge 2016 Rules [Çevrimiçi] Erişim: <http://roverchallenge.eu/en/rules-2/> (10 Ekim 2016).
- [2] Suojun Li, Haibo Gao, Zongquan Deng, Mobility Performance Evaluation of Lunar Rover and Optimization of Rocker-bogie Suspension Parameters, School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin ,150080, China.
- [3] Franziska Ullrich, Ali Haydar Goktogan, Salah Sukkarieh, Design Optimization of a Mars Rover's Rocker-Bogie Mechanism using Genetic Algorithms, Australian Centre for Field Robotics (ACFR), J04, University of Sydney, Sydney NSW 2006, Australia.
- [4] Fırat Barlas, Design of a Mars Rover Suspension Mechanism, Izmir Institute of Technology Izmir, Turkey, June, 2004
- [5] Elizabeth Jordan, Mars Science Laboratory Differential Restraint: The Devil is in the Details, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology , Pasadena CA, May 16-18, 2012
- [6] Murat Cenk Cavusoglu, D. F. (2002). A Critical Study of the Mechanical and Electrical Properties of the PHANToMTM Haptic Interface and Improvements for High Performance Control

# Bir Mars Gezgininin Denetimi için Elektronik Tasarım

Bariş Balcı, Oğuzhan Dalgıç,  
Deniz Kurt

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü  
Özyeğin Üniversitesi  
İstanbul, Türkiye

Email: {baris.balci, oguzhan.dalgic,  
deniz.kurt.9104} @ozu.edu.tr

Begüm Sunal, Arjen Kılıç,  
Yağız Atasoy

Bilgisayar Mühendisliği Bölümü  
Özyeğin Üniversitesi  
İstanbul, Türkiye

Email: {arjen.kilic, begum.sunal,  
yagiz.atasoy} @ozu.edu.tr

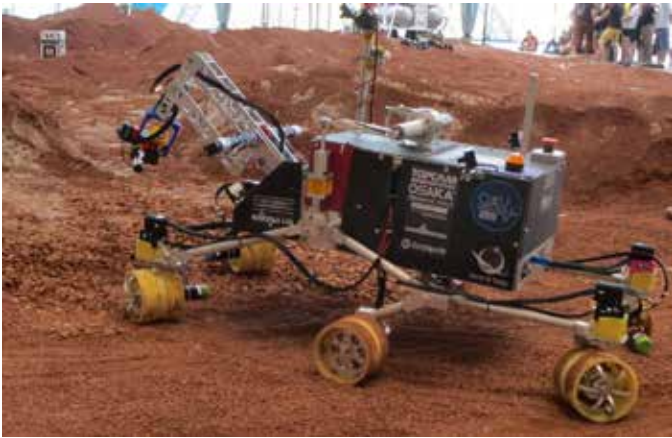
Mehmet Can Yıldırım,  
Özkan Bebek

Makina Mühendisliği Bölümü  
Özyeğin Üniversitesi  
İstanbul, Türkiye

Email: mehmet.yildirim@ozu.edu.tr,  
ozkan.bebek@ozyegin.edu.tr

**Özetçe** —Merih-2, Özyeğin Üniversitesi Rover Takımı tarafından University Rover Challenge 2016 ve European Rover Challenge 2016'ya katılmak ve Mars koşullarında görev yapmak için tasarlanan gezgindir. Merih-2'nin elektronik sistemi haberleşme ve denetim olarak ikiye ayrılır. Merih-2'nin denetim sistemi Robot İşletim Sistemine (ROS – Robot Operating System) dayanmaktadır. Robotun çalışmasını sağlayan kodlar Python ve C ile yazılmıştır. Merih-2 robotunun denetimi, üzerindeki Raspberry Pi 3 ve komuta merkezindeki Linux tabanlı bilgisayar ile yapılmaktadır. Haberleşme biriminin görevi gezgin ve yer istasyonu arasında veri alışverişini sağlamaktır. Robot ve istasyon birbirleri ile 2.4 GHz frekansta 20dBmW gücünde iletim yapan modemlerle bağlantı kurmaktadır. Merih-2'de merkezi işlem birimi (CPU) olarak Raspberry Pi 3 kullanılmıştır. Alınan denetim sinyalleri, Merih-2'nin üzerinde bulunan diğer mikro denetleyicilere (MCU) bu CPU üzerinden gönderilir. Kurulan haberleşme bağlantısı üzerinden çevrenin görüntülenmesi için kullanılan dört adet IP kamera da yayın yapabilmektedir. Bu makalede Merih-2'nin tasarım ayrıntıları ve üretilen prototipten elde edilen kazanımlar anlatılmaktadır.

**Anahtar Kelimeler**—Kara Robotları, Robot Yazılımı, İnsansız Araçlar



Şekil 1. Merih-2'nin European Rover Challenge yarışmasında oluşturulan Mars yüzeyinde çekilmiş fotoğrafı

Türkiye Robotbilim Konferansı, 2016

## I. GİRİŞ

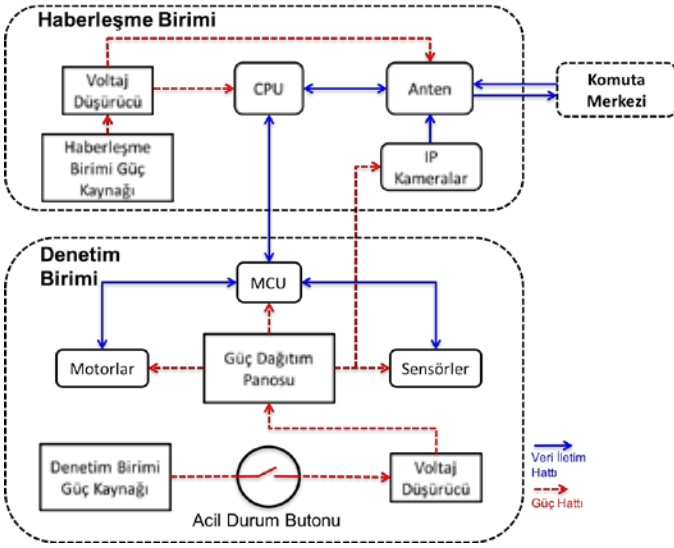
Mars'a olan ilgi arttıkça, NASA ve ESA gibi uzay ajanslarının Mars koşullarında çalışacak araçları geliştirmesi kaçınılmaz olmuştur. Bu araçların geliştirilmesi büyük bütçeli projelerdir. İlki doksanlı yıllarda olmak üzere şimdiye kadar Mars yüzeyinde dört gezgin keşif yapmaktadır. [1]–[4] Gönderilen robotlara olan ilgiyi arttırmak ve uzay mühendisliğine öğrencilerin ilgisini çekmek için Mars gezgini temalı yarışmalar da düzenlenmektedir. [5]–[9].

Merih-2, Özyeğin Üniversitesi Rover Takımı tarafından University Rover Challenge (URC) ve European Rover Challenge (ERC)'ya katılmak ve Mars koşullarında görev yapmak için tasarlanan gezgindir. Bu yarışmalarda, keşif yapmak ve astronotlara yardım etmek amacıyla kurgulanmış görevler bulunmaktadır. Görevlerin çoğu yarı-otonom veya otonom olarak, uzaktan, kısmi olarak kumanda ile yapılabilen görevlerdir. Merih-2 bu yarışmalar için görev odaklı olarak tasarlanmış ve ERC 2016'ya katılmıştır. Merih-2'nin ERC 2016'da oluşturulan yapay Mars yüzeyi üzerindeki fotoğrafı Şekil 1'de görülebilir. Bu makalede, Merih-2'nin elektronik altyapısı ve denetim sistemi anlatılmaktadır.

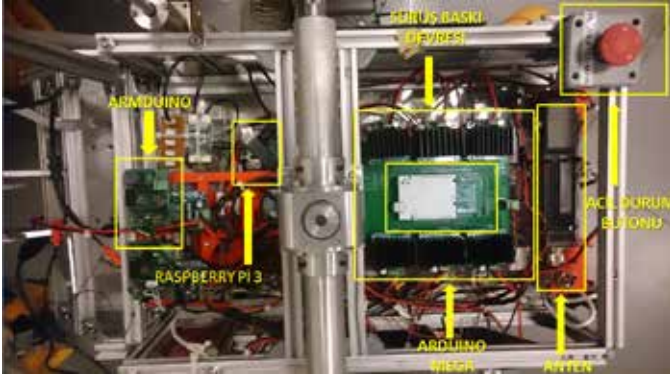
Merih-2'nin elektronik sistemi temel olarak iki ana bölümden oluşur; haberleşme ve denetim. Haberleşme biriminin temel görevi gezgin ve yer istasyonu arasında veri transferinin gerçekleşmesini sağlamaktır. Denetim birimi ise motor sürüşünün sağlanması ve sensör verilerinin toplanmasından sorumludur. Elektronik sisteminin veri-güç akış şeması Şekil 2'de görülebilir.

## II. HABERLEŞME

Merih-2 haberleşme birimi, merkezi işlem birimi (CPU), güç kaynağı, 4 kamera ve antenden oluşmaktadır. İşlemci olarak Raspberry Pi 3 kullanılmıştır. Kullanıcıdan gelen veriler CPU aracılığıyla Merih-2 denetim ünitesinde bulunan mikro denetleyicilere (MCUs) gönderilir. Merih-2, Wi-Fi ağı üzerinden bağlı olduğu 4 adet ELP-IP1881 IP kamera ile etrafını gözetlemekte, gerektiği takdirde yüksek çözünürlüklü video ve fotoğraf çekebilmektedir. IP kameranın seçilme nedeni, CPU üzerinde bir işlem olmaksızın, görüntünün ağ üzerinden iletilmesine olanak sağlamasıdır. Robotun üzerinde 2.4 GHz frekansla çalışan bir MikroTik Metal 2SHPn L4 Wi-Fi modemi bulunmaktadır. Bu modemde, 6 dBi'lık kazancı olan çok yönlü



Şekil 2. Merih-2 veri-güç akış şeması



Şekil 3. Merih-2'nin elektronik ekipmanı

bir harici anten yer almaktadır ve bu sayede kötü şartlarda bile gezgin ile yer istasyonu arasında düzgün veri iletimi sağlanmaktadır.

Haberleşme biriminin gücü 18.5 V, 8 Ah, 30C kapasiteli bir Li-Po pilden sağlanmaktadır. Pil kesintisiz olarak işlemciyi ve WiFi modemini 2 saat çalıştırabilmektedir. Çıkış voltajı bir aç-kapa butonu ile denetlenir ve özel olarak tasarlanmış bir regülatör baskı devresi aracılığıyla 5 V seviyesine indirilerek gezgin üzerinde bulunan CPU'nun beslenmesi sağlanır. Wi-Fi modem ise doğrudan pil üzerinden beslenmektedir.

### III. DENETİM

Denetim birimi 3 mikro denetleyici (MCU), güç kaynağı, toplamda 18 DC ve servo motor, güç dağıtım panosu ve sensörlerden oluşur. Kablo karışıklığını önlemek ve elektronik ekipmanların kapladığı alanı azaltmak amacıyla sistem özel tasarlanmış baskı devrelerden oluşmaktadır. Şekil 3 Merih-2'nin elektronik sistemini göstermektedir. Merih-2 üzerindeki mikro denetleyiciler robotun denetiminden sorumludur. Tüm mikro denetleyiciler USB kablo aracılığıyla Raspberry Pi 3'e bağlıdır ve bu şekilde veri iletimi sağlanmaktadır. Mikro denetleyicilerden biri Arduino Mega'dır ve Merih-2'nin motor sürüşünü gerçekleştirir. Arduino Mega özel tasarlanmış bir

baskı devreye (Sürüş Baskı Devresi) monte edilmiştir ve bu devre sayesinde motor sürücüler ile bağlantı kurabilmektedir. Baskılı devre 5V ile çalışıp motor sürücülere gerekli enerjiyi sağlar. Baskılı devre buna ek olarak üzerindeki işlemsel yükselteçler (op-amp) ile pil voltajının gösterilmesini sağlamaktadır. Ayrıca Merih-2 üzerinde görevlerde kullanılmak üzere pil voltajını gösteren 2 tane 7 bölmeli gösterge de bulunmaktadır. Bunun yanı sıra yine görevlerde kullanılan ısı ve toprak nem sensörleri de Sürüş Baskı Devresi'ne bağlıdır. Geri kalan 2 mikro denetleyici, -Atmel Atmega 328p- gezginin kolunu kontrol etmekte kullanılan ve ArmDuino olarak adlandırılan baskılı devreye entegre edilmiştir. ArmDuino (bkz. Şekil 3) bir Atmel mikrodenetleyici, kolda kullanılan motorların frenlerini açıp kapama işlemini gerçekleştiren bir röle ve kodlayıcı verilerini okumak için bir hat sürücüsünden (line driver) oluşur. Böyle bir devre tasarlanmasının nedeni hem yerden tasarruf etmek hem de kullanım kolaylığı sağlamaktır.

Merih-2 denetim biriminin güç kaynağı 14.8 V, 8 Ah, 30C kapasiteli 4 Li-Po pilden oluşur. Elektronik ekipmanın çalışması için gerekli enerji, güç dağıtım panosu aracılığıyla ilgili birimlere iletilir. Güç kaynağı robotun denetim birimini 2 saate yakın bir süre çalıştırmaya yetmektedir. Robotta Li-Po pil kullanılmasının sebebi, Li-Po pillerin yüksek deşarj kabiliyetine sahip olmalarıdır. Bu durum, özellikle sürüş sisteminde kullanılan motorların anlık yüksek akım çekme ihtiyaçlarının rahatlıkla karşılanabilmesine olanak vermektedir. Pillerde belirtilen "C" değeri pilin deşarj oranını temsil eder. Diğer bir deyişle, pilin anlık olarak sağlayabileceği azami akım miktarının bir ölçütüdür. Örneğin "1C - 1 Ah" değerindeki bir Li-Po, anlık olarak 1A verebilmektedir. Bu hesap Merih-2'nin "30C - 8 Ah" lik pillerine uygulandığında, 240A'lık bir değer ortaya çıkmaktadır. Sonuç olarak, motorların zorlanması durumunda ihtiyaç duyabilecekleri akım değerleri rahatlıkla sağlanabilmektedir. [10]

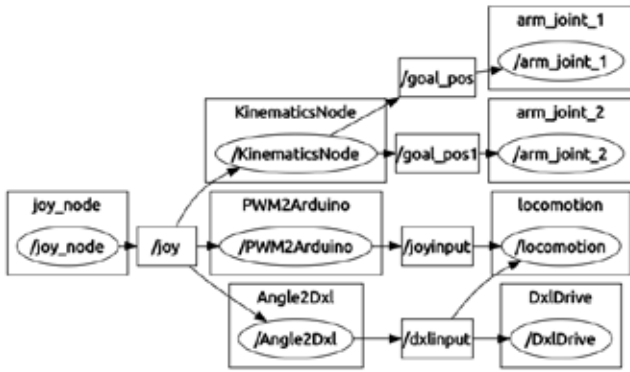
Merih-2, 8'i fırçalı DC motor, 10'u servo motor olmak üzere toplam 18 motor ile çalışmaktadır. 3 servo ve 2 DC motor kolda konumlandırılmıştır ve kolun çalışmasını sağlamaktadır. Geriye kalan 6 DC motor sürüş, 4 servo motor ise dönüş için kullanılmaktadır. 2 servo motor kameraların açılarının ayarlanmasında, 1 servo motor ise toprak ve taş örneklerinin saklanması için kullanılan kutunun hareketinde kullanılmaktadır. Görüldüğü üzere Merih-2'de iki farklı motor çeşidi eşit sayılarda kullanılmıştır. Yüksek hassasiyet gereken yerlerde (sağ-sol dönüşler, tutucunun takıldığı bilek eksenlerinde) dahili kodlayıcılı servo motorlar, geri kalan yerlerde ise DC motorlar tercih edilmiştir.

### IV. YAZILIM

Merih-2'nin denetim sistemi Robot İşletim Sistemi'ne (ROS-Robot Operating System) dayanmaktadır. Robotun çalışmasını sağlayan kodlar Python ve C dilinde yazılmıştır. Merih-2 robotun üzerindeki Raspberry Pi 3 ve denetim masasındaki Linux bilgisayar ile denetim edilmektedir. Raspberry Pi 3'ün içinde kurulmuş olan işletim sistemi Ubuntu Mate 16.04 LTS'dir ve ROS'un son versiyonu Kinetic Kame kullanılmaktadır. Linux bilgisayarın işletim sistemi ise Ubuntu 14.04 LTS'tir ve sistem ROS Indigo Igloo kullanır. Bu iki sistem birbirlerine 2.4 GHz frekansla, 20 dBmW gücünde iletim yapan modemlerle Wi-Fi üzerinden bağlantı kurmaktadır.

Merih-2 denetleme sistemi master-slave (efendi-köle) ilişkisi üzerine kuruludur. Bütün kullanıcı komutları kullanıcı bilgisayarı vasıtasıyla toplanır ve robota aktarılır. Bu durumda kullanıcı bilgisayarı master, gezgin üzerindeki Raspberry Pi 3 slave rölündedir. ROS bu ilişkinin tam ters yönde olmasına da olanak vermektedir. Kontrol bilgisayarının master olarak seçilmesinin nedeni ise fazla işlem gücü gerektiren operasyonların tamamının Raspberry Pi 3'ü etkilemeyecek şekilde gerçekleştirilmek istenmesidir. Başka bir neden ise gezginin operasyonu esnasında kodların değiştirilmesi gerekirse bunun kontrol bilgisayarı üzerinden daha kolay bir şekilde gerçekleştirilebilmesidir. Komutlar master kontrol bilgisayarından ağa aktarıldıktan sonra, Raspberry Pi 3 gelen komutları değerlendirir ve gerekli motor hareketleri için MCU'larla haberleşir. Bu durumda ise Raspberry Pi 3 master olurken, MCU'lar slave görevindedir. MCU'lar Raspberry Pi 3 ile USB kablolar aracılığı ile bağlıdır. Veri alışverişi seri haberleşme protokolü üzerinden sağlanır.

Şekil 4 Merih-2'nin kullandığı ROS haberleşme haritasını göstermektedir. Şekilde Merih-2 üzerinde çalışan düğümler ile bu düğümlerin yayın yaptığı ve abone olduğu başlıklar görülebilir.



Şekil 4. Merih-2 ROS Düğüm Şeması

Merih-2'yi kontrol etmekte kullanılan oyun kumandası için oluşturulmuş ROS başlığı ile, sürüş, kol ve servo düğümleri arasında bağlantı kurulmuştur. Bu düğümler gerekli manipülasyonları tamamladıktan sonra, yeni ROS başlıkları aracılığıyla Raspberry Pi 3 üzerinden mikrodenetleyicilere gönderilmiştir.

ROS'un Merih-2 üzerinde kullanılmasının nedeni bir çok aytığı kolayca başlıklar üzerinden birbirine bağlayabilmesi ve her programın ağ üzerindeki veriye kolayca ulaşabilmesidir. Bununla beraber ROS bünyesinde bulunan kütüphane ve programlar geliştirmenin daha hızlı olmasını sağlamaktadır.

## V. HAREKET SİSTEMİ

Sürüş sistemi iki ana fiziksel operasyonu gerçekleştirir: ileri-geri hareket ve dönüş hareketi. İleri-geri hareket motor sürücülere bağlanmış olan 6 DC motor tarafından gerçekleştirilir. ROS ağından gelen kumanda kolu verilerini Raspberry Pi 3'ten toplayan Arduino Mega, motor sürücülere doğru rotasyona getirerek ve darbe genişlik modasyonu (PWM) sinyalleri sağlayarak motorların denetimini sağlar. Arduino 8 bitlik darbe genişlik modasyonu sinyalleri almaktadır. Bu

değer denetim kolu değerlerine göre hesaplanır. Ayrıca ileri – geri gidişlerde yüzey şekillerine göre 4 farklı çekiş modu (normal, ön çekiş, arka çekiş, dört çeker) oluşturulmuştur ve her modda tekerlere beslenen sinyal değerleri farklıdır. Yine robotun dönüş hareketi sırasında bütün tekerleri aynı hızda döndürmek külbütör-boji (İng: rocker-bogie) sistemine kaldıramayacağı bir güç yükleyeceği için, ROS'tan gelen dönüş açısına oranla sanal bir diferansiyel kutusu oluşturulmuştur. Böylelikle içeride kalan tekerler dışarıda kalan tekerlere göre daha yavaş dönmektedir. Dönüş hareketi ise ön ve arka iki tekerdeki 4 Dynamixel MX-64 servo motorları ile sağlanır. Bu servo motorlar yazılım geliştirme ortamı olarak Python'ı destekleyen ROBOTIS USB2Dynamixel ile denetim edilir. Servo denetimi için yazılan kodlar Dynamixel adlı kütüphanede yazılmıştır. Tekerlerin dönüşü için 3 farklı açı seçeneği belirlenmiştir: 15°, 30°, 45°. Bu açılar kumanda kolu üzerindeki 3 buton sayesinde ayarlanabilir. Bu butonlardan biri artı yönde, biri eksi yönde dönüşü sağlarken diğer buton da tekerlerin sıfır dereceye gelmesini sağlar. Kullanıcı ROS üzerinden servo motorların açısına karar verebilir ve gerektiği durumda tek tek manipüle de edebilir.

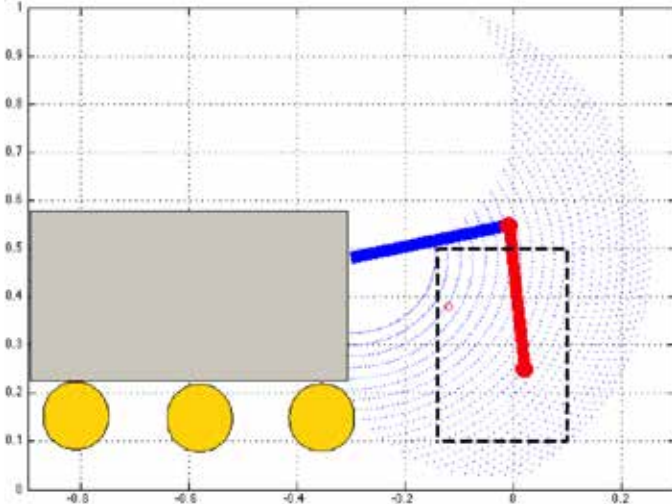
## VI. ROBOT KOL

Merih-2'nin robotik kolu, geri besleme denetleyicisi (PID) yöntemi ile denetlenir. 2 DC motor sayesinde kolun motor eksenleri yunuslama ekseninde hareket edebilir, bu da kolun ucunun yukarı-aşağı ve ileri-geri hareketini sağlar. Robotun ağırlık problemi düşünülerek üçüncü sapma eksen eklenmemiştir. Yapılan testlerde de robotun dönüş kapasitesi sayesinde üçüncü eksenin eksikliği de hissedilmemiştir. Kolun ucunda örnek almak ve gerekli destek görevlerinde kullanılmak üzere tutucu ve keçe takılmıştır. Bu tutucunun hareketleri robot işletim sisteminden gelen açı değerleri ile eksenleri çakışık 3 servo motor tarafından gerçekleştirilir. Bu servoların dönüşleri kumanda kolundan veya gerekli olursa kullanıcı ara yüzü üzerinden sağlanabilir.

Ters kinematik (TK) operasyonu ve PID robot kolun kontrolünün temelini oluşturur. Robot kolun kontrol döngüsü başlatılmadan önce robot kol frenleri açılmak suretiyle daha önceden belirlenen başlangıç pozisyonuna getirilir. Kolun çalışma alanında en çok kullanılan noktalar göz önüne alınarak başlangıç pozisyonuna karar verilmiştir. Kolun çalışma alanı ise kolun iki ana ekseninde hareketini sağlayan DC motorlara takılı çözümlenecilerden toplanan verilerle hesaplanmıştır. İki eksenin iki ayrı yönde limit açıları tespit edildikten sonra ters kinematik kullanılarak kolun en uç noktasının ulaşabileceği nokta bulutu oluşturulmuştur. Hesaplanan çalışma alanı gerekli olandan daha geniş olduğundan, robotun çalışma alanı sınırlayıcı bir kutu ile ihtiyaca göre belirlenmiştir. Sınırlayıcı kutu aynı zamanda kolun sınırlarının zorlanması ve istenmeyen hareketlerin gerçekleşmesi ihtimallerini azaltmıştır. Kolun çalışma alanı ve sınırlayıcı kutu Şekil 5'te görülebilir.

Merih-2 genel kullanımın aksine seri yapıda olan bir kol yerine paralel yapıda olan bir kol yapısına sahiptir. Ters kinematik için denklemler [11]'den alınmıştır, ve denklemler Python'da uyarlanarak ROS üzerinde kullanılabilir hale getirilmiştir.

Robotik kol bir oyun kumandası ile kontrol edilmektedir. Oyun kumandasından gönderilen referans verileri kolun en uç



Şekil 5. Merih-2'nin kolunun çalışma alanı noktalar ile, sınırlanmış çalışma alanı da kesik çizgiyle gösterilmiştir.

noktasının iki boyutlu uzaydaki koordinatlarını değiştirmektedir. Bu referans değişikliği gerçekleştiğinde ters kinematik işlemi devreye girer. İşlemler sonucunda hedef nokta sınırlayıcı kutu içerisinde ve hesaplanan açılar limitler arasında ise hedef açılar ROS üzerinden yayınlanır. Hedef açılar bahsedilen gerekliliklere uygun değilse kol sınırlarda hesaplanan noktalar için hedef açı yayınlar. Daha sonra bu referans bilgisi motorlara iletilir. Bu işlem Merih-2 için özel tasarlanan ArmDuinolar ile gerçekleştirilir. Hedef açılar ROS üzerinden yayınlanır ve Arduinolar bu yayından aldıkları veriye göre motorları hareket ettirir. Arduino içerisindeki PID kontrol döngüsü için Arduino PID kütüphanesi kullanılmıştır. Döngü ROS üzerinden gelen hedef açı, kendi bünyesinde tuttuğu anlık açı ve çözümleyici üzerinden gelen açı değişimi verilerini kullanarak motorlara beslemek üzere bir PWM sinyali belirler. Hedef açı ile anlık açı arasındaki fark 0.5 derece oluncaya kadar bu döngü devam eder. Her motor için ayrı bir ArmDuino olması DC motorların servo motor gibi kullanılabilmesini sağlamıştır. Bu özellik aynı zamanda iki kontrol döngüsünün eş zamanlı olarak çalışabilmesine de olanak sağlamıştır. PID için denetim sabitleri deneme yanılma yolu ile tayin edilmiştir.

Sistemdeki karmaşıklığı düşürmek ve kullanıcıya daha fazla kontrol alanı sunmak adına tutucu üzerindeki üç servo motor ters kinematik işlemlerine eklenmemiştir. Ana eksendeki hareketli tamamlandıktan sonra kullanıcı kamera görüntülerini kullanarak gerekli manipülasyonları oyun kolu ve kullanıcı ara yüzü yoluyla yapabilmektedir.

## VII. KULLANICI ARA YÜZÜ

Robot işletim sisteminin rahat denetimi için özel olarak tasarlanmış kullanıcı ara yüzü kullanılmaktadır. Servo denetimi kumanda kolunun yanı sıra, kullanıcı ara yüzü üzerinden servo numarası ve açısı girilerek manuel olarak da sağlanabilir. Ayrıca kullanıcı ara yüzü üzerindeki 4 yön butonu ile hareketli kameranın yönü ayarlanır. Fotoğraf çekmek için de bir buton bulunmaktadır. Böylece belirli bölgeler ve toplanan numuneler fotoğraflanabilir. Dönüş hareketi öncesi bütün servoların döndüğünden emin olmak için ara yüz üzerinde servo pozisyonları görüntülenir, böylece mekanik veya elektronik

hata olduğunda robota zarar verilmesi engellenir. Yüzey şekline göre motor güçlerini değiştiren 4 farklı çekiş modu da bu ara yüzden seçilebilir. Böylece yüzey şekli değiştiğinde robotun tekrar hareketi için farklı bir kod çalıştırmak gerekmez. Aynı zamanda ara yüz üzerinden istenildiği zaman kolun o anki pozisyonu ve o an istenilen pozisyonu görüntülenebilir. Bu işlem genel sisteme aşırı yüklenmemesi için gerçek zamanlı yapılmaz.

## VIII. KAZANIMLAR

Mars Gezginimiz Merih-2, Ağustos 2016'da tamamlanmış ve Euproean Rover Challenge'da yarışmıştır. Elektronik olarak, kablo karışıklığını önlemek amacıyla kolun denetimini sağlayan bir devre tasarlanmıştır. Kolun hareketini sağlayacak yüksek torklu servo motorlar bulunmadığı için, DC motorlar geliştirilen sürücü devresi ve yazılımı ile servo motor gibi kullanılmıştır. Robotun uzaktan ve hızlı kumandası için yeni bir kullanıcı ara yüzü oluşturulmuştur. Böylece yalnızca robotun kullanışı kolaylaşmakla kalmayıp, denetim sırasında zamandan da tasarruf edilmiştir.

## IX. GÖNDERİM

Merih-2 robotu Özyeğin Üniversitesi, Karaca Makina Hır. San. ve Tic. Ltd. Şti., Topçam Makine Müh. San. Tic. Ltd. Şti., Cloud4Succes, ÖzdePCB, Elsim Elektronik A.Ş. firmaları tarafından kısmi olarak desteklenmiştir.

## KAYNAKÇA

- [1] JPL, NASA. "Mars Pathfinder/Sojourner Rover". [Çevrimiçi] Erişim: <http://www.jpl.nasa.gov/missions/mars-pathfinder-sojourner-rover/> (9 Ekim 2016).
- [2] JPL, NASA. "Mars Exploration Rover-Spirit". [Çevrimiçi] Erişim: <http://www.jpl.nasa.gov/missions/mars-exploration-rover-spirit-mer/> (9 Ekim 2016).
- [3] JPL, NASA. "Mars Exploration Rover-Opportunity". [Çevrimiçi] Erişim: <http://www.jpl.nasa.gov/missions/details.php?id=5909> (9 Ekim 2016).
- [4] JPL, NASA. "Curiosity Rover". [Çevrimiçi] Erişim: [http://www.nasa.gov/mission\\_pages/msl/index.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/msl/index.html) (9 Ekim 2016).
- [5] Human Exploration Rover Challenge: Extraterrestrial Terrain Course, NASA, [Çevrimiçi] Erişim: <https://www.nasa.gov/roverchallenge/course/index.html> (9 Ekim 2016).
- [6] UK University Rover Challenge. UK Mars Society [Çevrimiçi] Erişim: <https://marssoc.uk/ukurc> (9 Ekim 2016).
- [7] The University Rover Challenge (URC), Mars Society, [Çevrimiçi] Erişim: <http://urc.marssociety.org> (9 Ekim 2016).
- [8] European Rover Challenge (ERC), European Space Foundation [Çevrimiçi] Erişim: <http://roverchallenge.eu/en/> (9 Ekim 2016).
- [9] Revolutionary Aerospace Systems Concepts Academic Linkage, NASA [Çevrimiçi] Erişim: <http://robo-ops.nianet.org/> (9 Ekim 2016).
- [10] MIT Electric Vehicle Team, "A Guide to Understanding Battery Specifications" [Çevrimiçi] Erişim: [http://web.mit.edu/evt/summary\\_battery\\_specifications.pdf](http://web.mit.edu/evt/summary_battery_specifications.pdf) (2016)
- [11] M. C. Çavuşoğlu, D. Feygin and F. Tendick, "A Critical Study of the Mechanical and Electrical Properties of the PHANTOM Haptic Interface and Improvements for Highperformance Control," in Presence, vol. 11, no. 6, pp. 555-568, Dec. 2002.

# Mikroakışkan Çip İçerisinde Yüzeye Temas Etmeden Hareket Edebilecek Mikro Robot Üretimi ve Simülasyon Doğrulaması

Yusuf Kahraman<sup>1</sup>, Ayşe İlginoğlu<sup>2</sup>, Rahmetullah Varol<sup>2</sup>,  
Kadir Erkan<sup>2</sup>, Hüseyin Üvet<sup>2</sup>, Hüseyin Kurt<sup>3</sup>  
Merkez Laboratuvar<sup>1</sup>,  
Mekatronik Mühendisliği Bölümü<sup>2</sup>,  
Fizik Mühendisliği Bölümü<sup>3</sup>,  
Yıldız Teknik Üniversitesi<sup>1,2</sup>,  
Medeniyet Üniversitesi<sup>3</sup>  
İstanbul, Türkiye

E mail: yusuf.kahraman@merklab.yildiz.edu.tr<sup>1</sup>, ayseilginoglu@gmail.com<sup>2</sup>, rahmet@gmail.com<sup>2</sup>,  
kerkan@yildiz.edu.tr<sup>2</sup>, huvet@yildiz.edu.tr<sup>2</sup>, huseyin.kurt@medeniyet.edu.tr<sup>3</sup>

**Özetçe** — *Bu çalışmada polimer, ferromanyetik tozları ve de mikro cam küreleri bünyesinde barındıran yoğunluğu suyunkinden düşük hibrit bir mikro robot yapısı sunulmaktadır. Üretilen mikro robota yapısında yer alan birleşenler manyetik etki altında kontrol imkanı, hafifliği ve rijitliği sağlamaktadır. Elde edilen deneysel sonuçlar ve simülasyon doğrulamaları üretimi gerçekleştirilen mikro robotun ileriki uygulamalarda levite edilerek kullanılabileceğini göstermiştir.*

**Anahtar Kelimeler**— *Mikro robotik, Manyetik Levitasyon, Mikro Akışkanlar, Lab on a Chip.*

## I. GİRİŞ

Biyomedikal uygulamalar için mikroakışkan çiplerin kullanımı önem arz etmektedir. Bunun sebebi mikroakışkan çiplerin geleneksel metotlara göre daha temiz bir çalışma alanı, yüksek performans ve deneylerde tekrarlanabilirlik sağlamasıdır. Mikroakışkan içerisine yerleştirilen hücrelerin manipüle edilebilmesi için elektrik alan, ısı transferi ve de ışık enerjisi gibi kaynaklar kullanılarak mikro robotların hareketi sağlanmaktadır [1]. Manyetik alan etkisiyle mikro robot hareketi bir çok açıdan diğer yöntemlere göre daha avantajlıdır. Manyetik kuvvet etkisi ile mikro robotun hücre üzerinde uygulayabileceği kuvvet diğer yöntemlere göre belirgin bir biçimde artar [2]. Mikro robotun akışkan kanal içerisinde uygulayacağı kuvveti ve hareket hassasiyetini sınırlayan birtakım faktörler vardır. Bu faktörlerden belki de en önemlisi mikro robot ve akışkan çip yüzeyi arasındaki sürtünme kuvvetidir. Arai ve arkadaşları mikro robot ile mikro akışkan yüzeyi arasındaki sürtünmeyi düşürmeye yönelik ultrasonik titreşimleri ve de robot geometrisinde değişimler yaparak bir takım çalışmalar yapmıştır [3,4]. Ancak yüzey ile temas sürtünme kuvvetindeki azalmaya rağmen yine de hareket kabiliyetini kısıtlamıştır. Bunlardan farklı olarak Feng ve

arkadaşları akustik levitasyon ile mikro robotun levitasyonunu sağlamışlardır ancak yine de ultrasonik titreşimler hassas bir manipülasyon işleminin önüne geçen bir faktör olarak karşımıza çıkmaktadır [5].

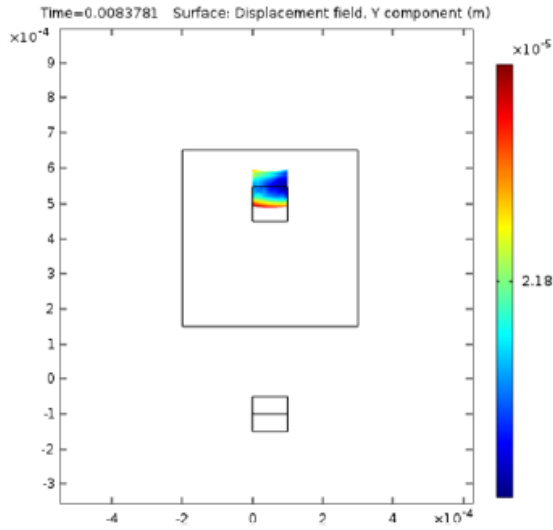
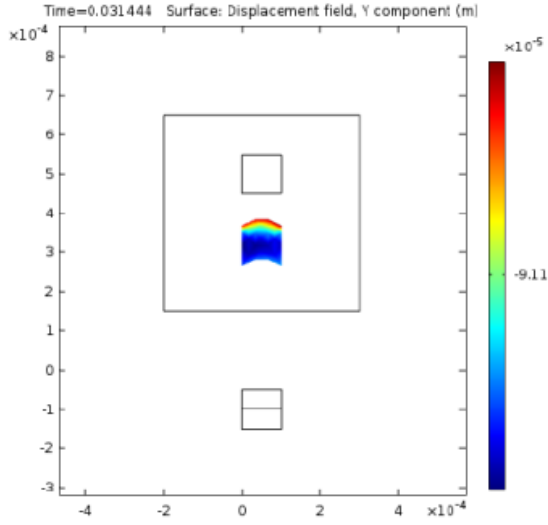
Literatürde yapısında polimer ve ferromanyetik tozlar içeren mikro robotlar mevcuttur. Bilindiği kadarıyla yoğunluğu suyun yoğunluğundan düşük bir mikro robot literatürde bulunmamaktadır.

Çalışmamızda PDMS yapısına katılan mikro cam kürelerle mikro robotun yoğunluğu düşürülmüş bununla beraber yapıya katılan bir diğer bileşen olan demir tozları ile de mikro robota ferromanyetik özellik katılmıştır. Mikro robotun üretim basamakları ve de karakterizasyonu detaylı bir şekilde yapılmıştır. Simülasyonlar doğrultusunda ise üretilen mikro robotun elde edilen konum bilgisine bağlı olarak uygulanacak alternatif akım ile tek bir miknatısla sıvı içerisinde yüzeye temas etmeden dengede tutulabileceği doğrulanmıştır.

## II. SİMÜLASYON AŞAMASI

Simülasyon çalışmaları esnasında COMSOL Multiphysics programının sıvı ile mikro robot arasındaki etkileşimini değerlendirmek adına fsi (katı-sıvı etkileşimi) modülü, manyetik alan etkisi altında mikro robotun hareketlenmesini değerlendirmek adına mf (magnetic field) modülü ve de hareketli geometriden dolayı moving mesh (ale) modülü kullanılmıştır. Ön değerlendirme açısından kolaylık sağlaması için simülasyon 2 boyutlu geometride tasarlanmıştır. Mikro robotu temsil etmek adına 0,9 g/cm<sup>3</sup> yoğunluğunda 500 x 500 mikron boyutlarında 4000 mur rölatif geçirgenliğe sahip geometri tasarlanmıştır. Sıvı kabın alt yüzeyine ise 1,5 T akım yoğunluğunda mikro robot ile aynı hizada ve de aynı boyutlardaki miknatıs yer alacak şekilde Şekil 1’de görüldüğü gibi hesaplamalar yapılmıştır.

Hesaplamalar sonucunda  $10^{-4}$  saniye içerisinde mikro robotun konum bilgisi alınarak elektromıknatısın akı yoğunluğundaki yapılacak değişimin mikro robotun dengede



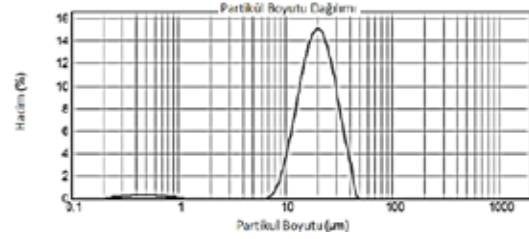
Şekil 1: Akı yoğunluğundaki değişimin kısa sürelik değişimi mikro robotun yukarı veya aşağı yönde hareket etmesine yol açmaktadır.

kalmasını sağlayacağı ortaya konmuştur. Bu vesile ile bu doğrultuda çalışmalar yapmak üzere mikro robot üretim yoluna gidilmiştir.

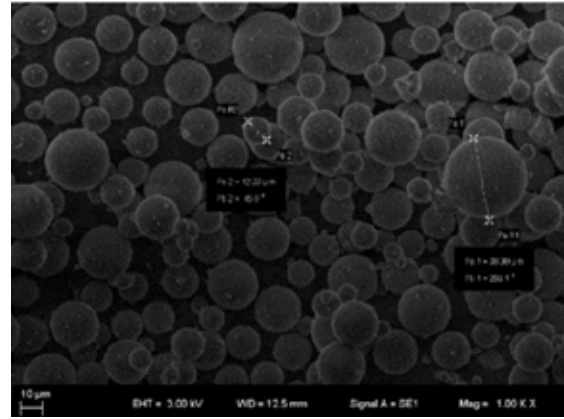
### III. MİKRO ROBOT ÜRETİM BASAMAKLARI

Mikro robotun yoğunluğunun düşürülmesi amaçlandığından yapıda mikro cam küreler kullanılmıştır. Mikro cam kürelerin boyutsal dağılımı ve morfolojisi mikro robot üretiminden önce karakterize edilmiştir. Mikro cam kürelerin karakterizasyonu Mastersizer (Malvern Hydro 2000 MU) ve Taramalı Elektron Mikroskobu ile gerçekleştirilmiştir (Zeiss EVO® LS 10). Şekil 2 ve Şekil 3'den de görülebileceği gibi mikro cam kürelerin boyut aralığı 10-40 mikron arasındadır. Mikro cam kürelerin ve manyetik tozların yoğunlukları ise helyum piknometresi ile

ölçülmüştür. (Ultracyc 1200e) Mikro cam kürelerin ve manyetik tozların yoğunlukları sırasıyla 0,4858 g/cm<sup>3</sup> ve 7,3226 g/cm<sup>3</sup> olarak ölçülmüştür. Yoğunluk ölçümleri sonrası gerekli stokiyometrik ayarlamalar yapılarak PDMS-Fe tozu ve mikro cam küre karışımı hazırlanmıştır.

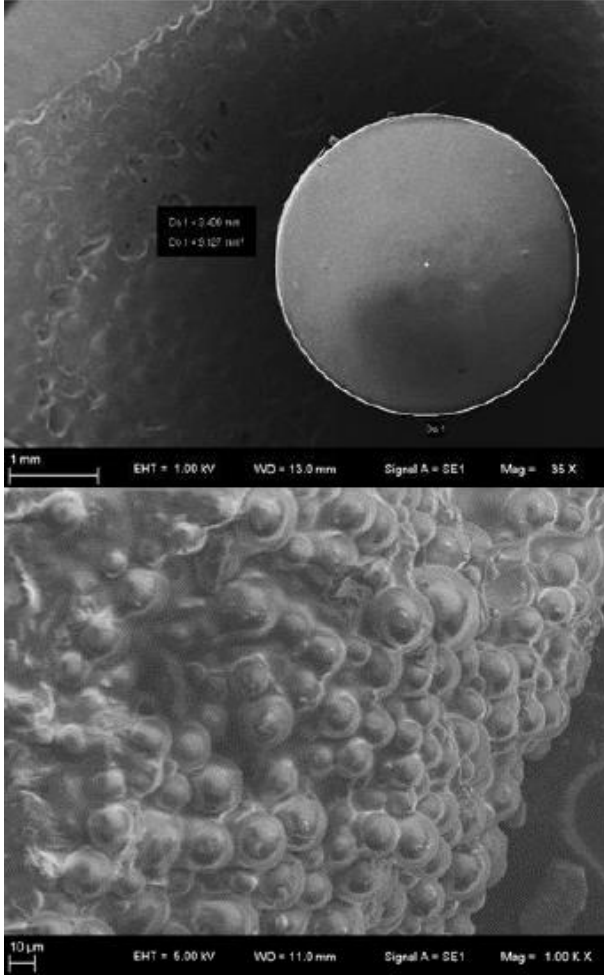


Şekil 2: Mikro cam kürelere ait boyut dağılımının 10-40 mikron arasında olması MEMS uygulamalarında kullanım için uygunluk sağlamaktadır.



Şekil 3: Mikro cam kürelere ait Taramalı Elektron Mikroskobu görüntülerinden de anlaşılacağı üzere Mastersizer cihazından elde edilen boyut dağılımı sonuçları doğrulanmıştır.

Hazırlanan karışım CNC ile mikro hassasiyette işlenen 250 mikron yüksekliğindeki ve 3 mm çapındaki silindirik kalıp boşluğuna dökülmüştür. Silindirik tasarım üretim ve deneysel çalışmalarda kolaylık sağlamak açısından Ardından 70° C derece sıcaklıkta 1 saat boyunca fırın içerisinde kürlenmiş mikro robot rijit bir yapıya kavuşmuştur. Üretilen mikro robot cımbız yardımıyla kalıptan çıkarılmıştır. Elde edilen mikro robotlara ait üstten ve kesitten alınan görüntüler Şekil 4'te görüldüğü gibidir.



Şekil 4: Mikro robot ait üstten ve kesitten alan Taramalı Elektron Mikroskobu Görüntüleri. Alttaki kesit görüntüsünden mikro cam kürelerin yapıda homojen olarak dağıldığı görülmektedir.

#### IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar doğrultusunda elektromıknatis kullanılarak mikro robotun su içerisinde levite edilebileceği ve sudan düşük yoğunlukta ferromanyetik bir mikro robotun üretiminin mümkün olduğu gösterilmiştir. Bir sonraki adım gerekli elektromıknatis düzeneğinin kurularak su içerisinde mikro robotun levite edilmesi olacaktır. Bu doğrultuda yüksek frekansta çalışabilen lazer sensör ile mikro robota ait pozisyon datasının toplanması ve elde edilen geri bildirim ile uygun aralıkta elektromıknatis akı kontrolünün sağlanarak levitasyon işleminin gerçekleştirilmesi üzerine çalışmalar yapılacaktır.

#### TEŞEKKÜR

Bu çalışma, TÜBİTAK 1001 Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programı'nın 113E584 numaralı projesi ile desteklenmiştir. Yazarlar desteklerinden dolayı Yıldız Teknik

Üniversitesi Merkez Laboratuvar'a teşekkür etmektedir.

#### KAYNAKÇA

- [1] M. Hagiwara, T. Kawahara, Y. Yamanishi and F. Arai, "Driving Method of Microtool by Horizontally Arranged Permanent Magnets for Single Cell Manipulation" *Applied Physics Letters* , 013701, 2010.
- [2] S. Sakuma, K. Onda, Y. Yamanishi and F. Arai, "On-chip Detection and Separation of Micro-particles Using Magnetized Microtools Driven by Focused Magnetic Field," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2009
- [3] F. Arai, N. Inomata, S. Kudo, Y. Yamanishi and T. Mizunuma, "Omni- Directional Actuation of Magnetically Driven Microtool for Enucleation of Oocyte," *Journal of Microelectromechanical Systems* , 2011.
- [4] M. Hagiwara, T. Kawahara, T. Iijima and F. Arai "High- Speed Magnetic Microrobot Actuation in a Microfluidic Chip by a Fine V-Groove Surface ," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 29, no. 2, April 2013.
- [5] M. Hagiwara, T. Kawahara, T. Iijima and F. Arai "Ultrahigh Speed Cell Manipulation by Robot on a Chip : A Levitated Structure with Three-Dimensionally Patterned Surface," *15th International Conference*.

# Üç Serbestlik Dereceli Paralel Rehabilitasyon Eyleyicinin Ateş Böceği Algoritması Kullanılarak Boyutsal Olarak Eniyilemesi

Özgün Selvi, Samet Yavuz  
Makine Mühendisliği  
Çankaya Üniversitesi  
Ankara, Türkiye

Email: ozgonselvi@cankaya.edu.tr, syavuz@cankaya.edu.tr

**Özetçe** —Bu çalışma, insan bilek eklemi rehabilitasyonunda kullanılacak üç serbestlik derecesine sahip üç bacaklı küresel bir paralel eyleyicinin belirli bir çalışma uzayında çalışmasını sağlayacak boyutsal parametrelerin tespitini amaçlamaktadır. Bahsi geçen eyleyicinin son-elemanı insan bilek eklemine üç serbestlik derecesini kapsamaktadır. Eyleyicinin her bacağı iki küresel uzva sahiptir ve tüm eklem eksenleri ortak bir noktada kesişmektedir. Eniyileme algoritmasında kullanılmak üzere eyleyicinin ters kinematik denklemleri çözülmüş Jacobi matrisi elde edilmiştir. Daha sonra ters kinematik denklemlerinden ve Jacobi matrisinden elde edilen kısıtlar ateş böceği algoritmasında kullanılarak belirli çalışma alanı için boyutsal eniyileme gerçekleştirilmiştir. Son olarak bu boyutsal parametrelerle bilek hareketleri benzetimlenerek çalışma alanı testi gerçekleştirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler**—Rehabilitasyon robotiği, paralel rehabilitasyon eyleyicileri, Ateş böceği Algoritması.

## I. GİRİŞ

Paralel eyleyiciler, son uzuvları çeşitli bağımsız kinematik zincirlerle yere bağlanan kapalı çevrim kinematik zincirlerdir [1]. Bu bildiride üç serbestlik dereceli küresel bir paralel eyleyici incelenmiştir. Bu eyleyici ilk olarak Gosselin C. ve Angeles J. [2] – [3] tarafından sunulup, eyleyicinin eniyilemesi üzerinde çalışılmıştır. Gosselin C. ve Hamel J. [4] kamera-hizalama cihazı önürünün boyutsal parametrelerini belirlemek için kinematik eniyileme üzerinde çalışmışlardır. Liu vd. [5] şartlama ve direngelik indekslerini kullanarak bu eyleyicinin tasarimsal eniyilemesi ile uğraşarak uzuvsal eniyileme ve çalışma performansının analizini sunmuşlardır. Belirli koşullu indeks, GCI ve GDCI gibi çeşitli indeksler ve çok kriterli rastgele arama, doğrusal eyletim yöntemi, Monte Carlo yöntemi, kapsamlı arama minimizasyon algoritması, ateş böceği algoritması, genetik algoritma vb. eniyileme algoritmaları ve yöntemleri kullanılarak paralel eyleyicilerde eniyileme yolunda çalışmalarda bulunulmuştur. Huang T. vd. [6] belirli koşullu indeks kullanarak iki serbestlik dereceli paralel eyleyicinin çalışma alanını dikdörtgensel bir alanla sınırlamıştır. Olds K.C. [7] paralel robotlarda eniyileme problemini çözebilmek için genel indeksler için yeni bir yaklaşım geliştirmiştir Lou, Y. J. vd. [8] maharet indeksini kullanarak çalışma alanı etkinliğini karakterize etmişlerdir.

Türkiye Robotbilim Konferansı, 2016

Maharetililiği ölçmek için Jacobian Matrisinin ters koşul sayısını kullanmışlardır. Stan, S. [9] paralel robotlar için tek açılı eniyilenmiş tasarım yöntemini eniyilik ölçütü ve nümerik bakış açıları kullanarak sunmuştur. Mini boyutlu paralel robotların çalışma alanını maksimize etmek için genetik algoritma kullanarak kinematik performans eniyilemesi yapmıştır. Ayrıca yine genetik algoritma kullanılarak, Stan, S. vd. [10] tarafından düzlemsel paralel medikal robotların geometrik parametreleri eniyilenmeye çalışılmıştır. Gao, Z. ve Zhang, D. [11] üç serbestlikli paralel mekanizmaların en iyi çalışma alanını elde edebilmek için parçacık yığını algoritmasını uygulamışlardır. Doğa ilhamlı üstsezgisel [13] bir algoritma olan Ateş böceği algoritması Yang [12] tarafından geliştirilmiştir. Literatürde sadece birkaç araştırmacının robotik eniyileme için bu algoritmayı tercih ettiği görülmektedir. Bu araştırmacılar arasında yer alan Nedec N. vd. [14] bir paralel robot platformun kademeli yük-kuvvet kontrolünün parametre tayininde ateş böceği algoritmasına başvurmuşlardır. Ayrıca bahsi geçen araştırmacılar ateş böceği algoritmasının doğrusal olmayan eniyileme problemlerinde diğer üstsezgisel algoritmalarından daha etkili olduğunu belirtmişlerdir.

Bu bildiride insan bilek eklemine rehabilitasyonunda kullanılacak üç serbestlikli ve üç bacaklı paralel bir eyleyicinin tanımlı bir çalışma alanı için boyutsal eniyilenmesi ele alınmıştır. Bunu sağlayabilmek için bildiri beş parçaya incelenecektir. İlk bölüm eyleyicinin geometrisini ortaya koyup çalışma alanının sınırlarını çizmektedir. Onu takip eden bölüm eyleyiciyi kinematik olarak analiz edip Jacobi matrisini önermektedir. Sonraki bölümde, önceki bölümden elde edilen kısıtlarla Ateş böceği algoritmasının uygulanışı verilmiştir. Son olarak elde edilen boyutsal parametreler deneyerek sonuca gidilmiştir.

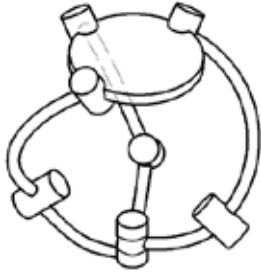
## II. EYLEYİCİ GEOMETRİSİ ve ÇALIŞMA ALANI SINIRLARI

Eniyileme yoluna gidilen eyleyici Şekil 1'de verilmiştir. Rehabilitasyon esnasında insan eli eyleyicinin son uzvuyla bir tutamaç yardımıyla etkileşime geçecektir. Daha sonra eyleyici, kullanıcıya aktif ve pasif direnç içeren çeşitli bilek hareketlerini gerçekleştirmesinde yardım edecektir. İnsan bilek eklemlerinin kesişim noktasıyla, eyleyicinin etrafında

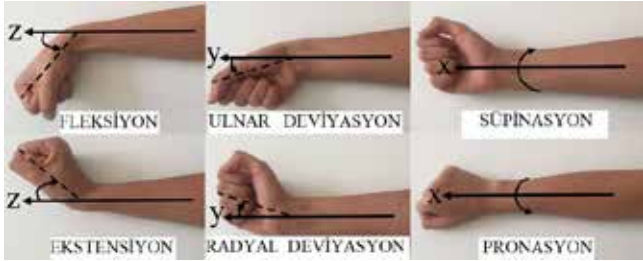
döndüğü P noktası örtüşmektedir (Şekil 3.). İnsan bilek eklemiminin sahip olduğu sınırlar kullanılarak eyleyicinin yönelimi ( $\delta_1$ ,  $\delta_2$ ,  $\delta_3$ ) tespit edilmiştir. Bilek eklemiminin, x eksenini etrafında pronasyon-süpinasyon hareketini, y eksenini etrafında radyal-ulnar deviyasyonu ve z eksenini etrafında fleksiyon-ekstansiyon hareketini yaptığı kabul edilmiştir (Şekil 3). Bu hareketlerin sınırları literatürden seçilerek belirlenmiştir (Tablo 1.)[16].

## II. TERS KİNEMATİK ÇÖZÜMLER ve JACOBI ANALİZİ

Ateş böceği algoritmasında kullanılmak üzere elde edilecek olan amaç fonksiyonunun kısıtları ters kinematik çözümlerden ve Jacobi matrisinden alınmıştır. Öncelikle, platformun dönüşüm matrisleri aşağıdaki şekilde tanımlanabilir. Birim vektör  $u$ ,  $[0,0,1]^T$  olarak tanımlansın.



Şekil 1. Rehabilitasyon amaçlı üç serbestlikli paralel küresel eyleyici



Şekil 2. İnsan bileğinin hareketleri,

Tablo 1. Belirlenen çalışma alanı ve sınırları

Hareket	Eksen	Sınırlar	Sağlanan
$\delta_1$	x	(-10°, 50°)	Pronasyon ve Süpinasyon
$\delta_2$	y	(-30°, 40°)	Radyal-Ulnar Deviyasyon
$\delta_3$	z	(-40°, 40°)	Ekstansiyon ve Fleksiyon

$$\delta = \delta_z \cdot \delta_y \cdot \delta_x \quad (1)$$

$w_i$ 'in platforma göre yönelimi,

$$w_i^* = R_{\gamma}^z \cdot R_{\beta_i}^x \cdot [0,0,1]^T \quad (2)$$

$\beta$  tüm eklem eksenlerinin x eksenini etrafındaki yönelimini z eksenine göre temsil etsin. Bu değer tüm eklemler için eşit kabul edilip Ateş böceği algoritması ile bulunacaktır.  $\gamma_i$  tüm eklem eksenlerinin z eksenini etrafındaki yönelimi olsun. Bu değer bu çalışmada sırasıyla 0°, 90°, 180° olarak seçilmiştir (Şekil 3.) Platform üstündeki eklem eksenlerinin yere göre yönelimi ise,

$$w_i = R_{\delta_3}^z \cdot R_{\delta_2}^y \cdot R_{\delta_1}^x \cdot w_i^* \quad (3)$$

olsun.  $w_i$ 'in eyleyici bacaklarına göre yönelimi şöyle yazılabilir.

$$w_i = R_{\theta_{1,i}}^z \cdot R_{\alpha_{1,i}}^x \cdot R_{\theta_{2,i}}^z \cdot R_{\alpha_{2,i}}^x \cdot [0,0,1]^T \quad (4)$$

Eşitlik 4'ü matris formunda yazıp, x ve y bileşenlerinden  $S(\theta_{2,i})$  elimine edildiğinde aşağıdaki eşitliklere ulaşırız.

$$w_x S(\theta_{1,i}) = w_y C(\theta_{1,i}) + C(\alpha_{2,i})S(\alpha_{1,i}) + C(\alpha_{1,i})C(\theta_{2,i})S(\alpha_{2,i}) \quad (5)$$

$$C(\theta_{2,i}) = -\left(w_y - C(\alpha_{1,i})C(\alpha_{2,i})\right) \text{Csc}(\alpha_{1,i})\text{Csc}(\alpha_{2,i}) \quad (6)$$

Eşitlik 6'yı eşitlik 5'in içine yerleştirip  $\theta_{1,i}$  için çözdüğümüzde aşağıdaki eşitliği elde ederiz.

$$\theta_{1,i} = \text{ArcTan} \left[ \frac{-\frac{e_2 e_3 \pm \sqrt{e_1^2 (e_1^2 + e_2^2 - e_3^2)}}{e_1^2 + e_2^2}}{-\frac{e_1^2 e_3 \pm e_2 \sqrt{e_1^2 (e_1^2 + e_2^2 - e_3^2)}}{e_1^3 + e_1 e_2^2}} \right] \quad (7)$$

Burada,  $e_1 = -w_x$ ,  $e_2 = w_y$ ,  $e_3 = (-w_z + C(\alpha_{1,i})C(\alpha_{2,i})) \text{Cot}(\alpha_{1,i}) + C(\alpha_{2,i})S(\alpha_{1,i})$  eşitlikleri geçerlidir. Eşitlik 4'ün matris formundan, x bileşenini kullanarak  $S(\theta_{2,i})$  ve z bileşenini kullanarak  $C(\theta_{2,i})$  'i bulalım.

$$S(\theta_{2,i}) = \text{Csc}(\alpha_{2,i}) \left( w_x C(\theta_{1,i}) + w_y S(\theta_{1,i}) \right) \quad (8)$$

$$C(\theta_{2,i}) = -\left(w_z - C(\alpha_{1,i})C(\alpha_{2,i})\right) \text{Csc}(\alpha_{1,i})\text{Csc}(\alpha_{2,i}) \quad (9)$$

Son olarak  $\theta_{2,i}$ ,

$$\theta_{2,i} = \text{ArcTan}[C(\theta_{2,i}), S(\theta_{2,i})] \quad (10)$$

olur. Paralel eyleyiciler bir ya da daha fazla serbestlik kazandıklarında tekillik durumuna girerler ve rijitliklerini tamamen kaybederler. Jacobian matris analizi bize bu tekillikleri tanımlamamızda yardımcı olmaktadır. Ayrıca Jacobi matrisinden elde edilen kısıtlarla eniyileme algoritmasının amaç fonksiyonu oluşturulacaktır. Son uzvun açısal hızını  $\omega = [\omega_x \ \omega_y \ \omega_z]^T$  ve giriş  $\dot{\theta} = [\dot{\theta}_{1,i} \ \dot{\theta}_{2,i} \ \dot{\theta}_{3,i}]^T$  olarak tanımlayalım. Birbirleri arasındaki Jacobian ilişkisi,

$$J_x \omega = J_q \dot{\theta} \quad (11)$$

şeklinde olur. Son uzvun açısal hız denklemi,

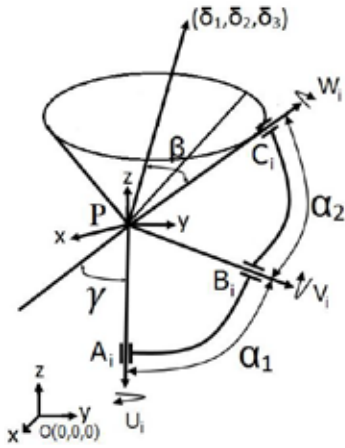
$$\omega = u_i \cdot \dot{\theta}_{1,i} + v_i \cdot \dot{\theta}_{2,i} + w_i \cdot \dot{\theta}_{3,i} \quad (12)$$

şeklinde olur. Eşitlik 12'de her iki tarafı  $v \times w$  ile noktasal olarak çarpalım.

$$\omega \cdot (v_i \times w_i) = u_i \cdot (v_i \times w_i) \cdot \dot{\theta}_{1,i} \quad (13)$$

$R_B^A = R_{\delta_3^z} \cdot R_{\delta_2^y} \cdot R_{\delta_1^x}$  ilişkisinden yararlanarak rijit bir cisim için eğik-simetrik matrisi aşağıdaki gibi yazabiliriz.

$$\Omega \equiv \dot{R}_B^A R_B^{A^{-1}} = \begin{pmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{pmatrix} \quad (14)$$



Şekil 3. Eyletici eklem eksenlerinin belirlenmesi

Açısal hız bileşenleri aşağıdaki hali alırlar.

$$\omega_{x,i} = C(\delta_2) C(\delta_3) \delta_1 - S(\delta_3) \delta_2 \quad (15)$$

$$\omega_{y,i} = C(\delta_2) S(\delta_3) \delta_1 + C(\delta_3) \delta_2 \quad (16)$$

$$\omega_{z,i} = -S(\delta_2) \delta_1 + \delta_3 \quad (17)$$

Ayrıca eyleyicinin geometrisinden takip eden eşitlikleri  $u = [0,0,1]^T$ ,  $v = R_{\theta_{1,i}^z} \cdot R_{\alpha_{1,i}^x} \cdot [0,0,1]^T$ ,  $w_i = R_{\theta_{1,i}^z} \cdot R_{\alpha_{1,i}^x} \cdot R_{\theta_{2,i}^y} \cdot R_{\alpha_{2,i}^x} \cdot [0,0,1]^T$  olarak biliyoruz. Bu eşitlikleri eşitlik 13'ün içine yazdığımızda  $J_x$  ve  $J_q$  vektörlerini elde ederiz.

$$J_q = \begin{pmatrix} J_{q_{1,1}} & 0 & 0 \\ 0 & J_{q_{2,2}} & 0 \\ 0 & 0 & J_{q_{3,3}} \end{pmatrix}, J_x = \begin{pmatrix} J_{x_{1,1}} & J_{x_{2,1}} & J_{x_{3,1}} \\ J_{x_{1,2}} & J_{x_{2,2}} & J_{x_{3,2}} \\ J_{x_{1,3}} & J_{x_{2,3}} & J_{x_{3,3}} \end{pmatrix} \quad (18)$$

$$J_{q_{1,1}} = S(\alpha_{1,1})S(\alpha_{2,1})S(\theta_{2,1}), J_{q_{2,2}} = S(\alpha_{1,2})S(\alpha_{2,2})S(\theta_{2,2}),$$

$$J_{q_{3,3}} = S(\alpha_{1,3})S(\alpha_{2,3})S(\theta_{2,3}),$$

$$J_{x_{1,i}} = S(\alpha_{2,i})(S(\alpha_{1,i})S(\delta_2)S(\theta_{2,i}) - C(\delta_2)(C(\delta_3 - \theta_{1,i})))$$

$$C(\theta_{2,i}) + C(\alpha_{1,i})S(\delta_3 - \theta_{1,i})S(\theta_{2,i}))$$

$$J_{x_{2,i}} = S(\alpha_{2,i})(C(\theta_{2,i})S(\delta_3 - \theta_{1,i})$$

$$-C(\alpha_{1,i})C(\delta_3 - \theta_{1,i})S(\theta_{2,i}))$$

$$J_{x_{3,i}} = -S(\alpha_{1,i})S(\alpha_{2,i})S(\theta_{2,i})$$

## II. ENİYİLEME YÖNTEMİ ve ATEŞ BÖCEĞİ ALGORİTMASIN UYGULANMASI

Bu çalışmada önceki bölümlerde belirtilen küresel eyleyicinin boyutsal parametrelerinin belirlenmesinde Ateş böceği algoritması kullanılmıştır. Ateş böceği algoritması, ateş böceklerinin davranışlarından esinlenerek geliştirilen, doğa kaynaklı üstsezgisel bir algoritmadır [13]. Ateş böceği algoritmasında her etken (ateş böcekleri) ışık üretmekte ve parlak ışığa sahip olanlar diğerlerini kendine doğru çekmektedir [15]. Bu çalışmada belirli çalışma alanına sağlama amacıyla eniyilemesi yapılacak boyutsal parametreler; küresel eyleyicinin link boyları olan  $\alpha_{1,i}$  ve  $\alpha_{2,i}$  (her bacak için eşit kabul edileceklerdir) ve tüm eklem eksenlerinin x eksenine etrafındaki yönelimini z eksenine göre temsil eden  $\beta$  parametreleridir. Yang X. S. [13] tarafından taslaklanan algoritmanın bu çalışmaya uyarlanması aşağıdaki gibidir.

Amaç fonksiyonu  $f(x_i) =$

$$1/\sqrt{1 + \alpha_{1,i}^2 + \alpha_{2,i}^2 + \beta_i^2} \cdot \text{Mean}(kq\text{list}) \cdot \text{Mean}(kx\text{list})$$

$$x_i = (\alpha_{1,i}, \alpha_{2,i}, \beta_i)^T,$$

Ateş böceklerinin ilk popülasyonu  $x_i (i = 1, 2, \dots, n_f)$ .

$x_i$  'deki ışık yoğunluğu  $I$ ,  $f(x_i)$  tarafından belirlenir.

Işık emisyon katsayısı  $\gamma$ 'ı tanımla

**for** ( $m_i; 1, \text{MaxGen}$ )

**for**  $i = 1:n_f$

**for**  $j = 1:n_f$

**if** ( $I_i < I_j$ ),  $r_{i,j} = \sqrt{\text{Sum}[(x_{k,i} - x_{k,j})^2, (k, 1, n_c)]}$ ;

**While**  $k \leq n_c$   $x_{k,i} = x_{k,i} + \frac{\beta_0 S_k}{1 + \gamma r_{i,j}^2} (x_{k,j} - x_{k,i}) +$

$\alpha S(\text{Random}[] - 0.5)$ ,

**end** (ateş böceği i'yi j'ye yaklaştır)

**else**

**While**  $k \leq n_c$   $x_{k,i} = x_{k,i} + \alpha S(\text{Random}[] - 0.5)$

**end** (ateş böceğini rastgele hareket ettir)

**end if**

$f(x_i)$ 'in yeni sonuçlarını değerlendir ve ışık yoğunluğunu güncelle

**end for j**

**end for i**

Ateş böceklerini sıralandır ve en iyi anlık sonuç  $g^*$ 'i bul.

**end for**

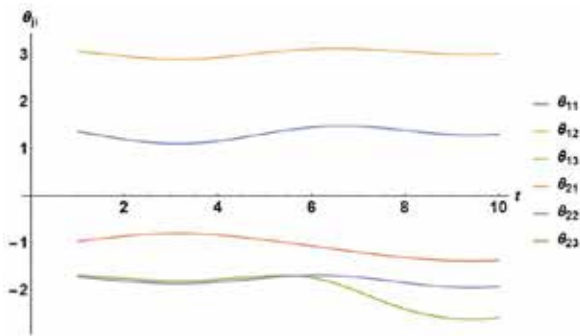
Algoritmada geçen parameter değerleri, Lukasiak S. ve Zak S.'in [15] ateş böceği algoritması üzerine yaptıkları çalışmaya uygun belirlenmiştir. Algoritmada,  $n_f$  ateş böceği popülasyonunu belirtmektedir ve 50 seçilmiştir. Koordinat sayısı olan  $n_c$ , eniyilenmesi beklenen parameter sayısını belirtmektedir. Yaklaşım hızı ya da emiş katsayısı olan  $\gamma$  (0.8), etkileşim halindeki ateş böceklerinin [15] birbirine yaklaşım oranını vermektedir. Çekicilik katsayısı  $\beta_0$  (0.8), bir ateş böceğinin diğer ateş böceklerini kendisine çekebilme kapasitesidir. Rastgelelik  $\alpha$ , ateş böceklerinin hangi ölçüde rastgele hareket ettiğini belirler ve her adımda bir ölçek (S) ile çarpılır. Burada  $f(x_i)$  amaç fonksiyonu ve  $x_i$  eniyilenmesi beklenen parametrelerdir. Son olarak  $r_{i,j}$  ateş böcekleri arasındaki mesafenin monoton azalan fonksiyonu olarak tanımlanmıştır. Algoritmada geçen  $kq$ list ve  $kx$ list takip eden eşitliklerde tanımlanmıştır. Eşitlik (19) ve (20)'in ortalamaları kullanılarak verilen sınır şartları içerisinde tekillik durumu control edilmiştir.

$$kq\text{list} = 1/(\text{Norm}[\text{Inverse}[J_q]] \text{Norm}[J_q]) \quad (19)$$

$$kx\text{list} = 1/(\text{Norm}[\text{Inverse}[J_x]] \text{Norm}[J_x]) \quad (20)$$

## II. ENİYİLENMİŞ DEĞERLERİN SONUÇLARI

Eniyilenen veriler 30 adımlık bir koşturma sonrasında  $\alpha_1 = 0.95$ ,  $\alpha_2 = 0.94$  ve  $\beta = 0.82$  olarak bulunmuştur. Elde edilen bu boyutsal parametreler, belirlenen çalışma alanı içerisinde eyleyicinin tekilselliğe uğratmadan çalışmasını sağlamalıdır. Son uzvun yönelimini veren ve t, (1,10) aralığında Tablo 1'de verilen çalışma aralıklarını sağlayan  $\delta_1$ ,  $\delta_2$  ve  $\delta_3$ 'ü aşağıdaki fonksiyonlar şeklinde tanımlayalım.  $\delta_1 = 10 S(t/2) + 40$ ,  $\delta_2 = 5 C(t) + 20$ ,  $\delta_3 = 7 (S(t/2) + C(t)) + 30$ . Bu aralıkta eyleyicinin döner eklemlerinin hareketlerini incelediğimizde herhangi bir tekilselliğe uğramadan bilek eklemleri sınırlarına göre belirlenen çalışma alanında düzgün bir hareket gerçekleştirdiği görülmektedir (Şekil 4.).



Şekil 4. Eniyilenen parametrelerle benzetim sonucu

Bu çalışmada üç serbestlikli rehabilitasyon amacıyla kullanılacak paralel bir küresel eyleyicinin boyutsal parametreleri, insan bileğinin çalışma sınırları baz alınarak belirlenen çalışma alanına sağlayacak ve dönel eklemlerde herhangi bir tekilselliğe sebep olmayacak şekilde ateş böceği algoritması kullanılarak eniyilenmeye çalışılmıştır. İlerleyen çalışmalarda bu çalışmadan elde edilen sonuçlar temel alınarak daha fazla serbestlik derecesine sahip, aşırı-kapalı sistemlerin incelenmesi hedeflenmektedir.

## KAYNAKÇA

- [1] J.P. Merlet, *Parallel robots* (Vol. 74). Springer Science & Business Media, 2012
- [2] C.M. Gosselin and J. Angeles, The optimum kinematic design of a spherical 3 DOFs parallel manipulator, *Journal of mechanisms, transmissions, and automation in design*, 1989
- [3] C.M. Gosselin and E. Laovie, On the kinematic design of spherical three-degree-of-freedom parallel manipulators. *The International Journal of Robotics Research*, 1993
- [4] C.M. Gosselin and J.F. Hamel, The agile eye: a high-performance three-degree-of-freedom camera-orienting device, *Robotics and Automation, IEEE International Conference on*, 1994
- [5] L. Xin-Jun L, J. Zhen-Lin, G. Feng, Optimum design of 3 DOF spherical parallel manipulators with respect to the conditioning and stiffness indices, *Mechanism and Machine Theory*, 2000
- [6] T.L. Huang, D. G. Chetwynd and D.J. Whitehouse, Optimal Kinematic Design of 2-DOF Parallel Manipulators with Well-Shaped Workspace Bounded by a Specified Conditioning Index, *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, Vol.20, No.3, 2004
- [7] C. Olds, Global Indices for Kinematic and Force Transmission Performance in Parallel Robots, *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, Vol.31, No.2, 2015
- [8] Y.J. Lou, G.F. Liu and Z.X. Li, A General Approach for Optimal Design of Parallel Manipulators, *IEEE Transactions on Automation science and engineering*, 2005
- [9] S. Stan, Workspace optimization of a two degree of freedom mini parallel robot, *Automation, Quality and Testing, Robotics, 2006 IEEE International Conference on* Vol. 2, 2006
- [10] S. Stan, M. Manic, R. Balan and V. Maties, Genetic algorithms for workspace optimization of planar medical parallel robot, *IEEE International Conference on Emerging Trends in Computing*, 2009
- [11] Z. Gao and D. Zhang, Workspace representation and optimization of a novel parallel mechanism with three-degrees-of-freedom. In: *Sustainability*, pp. 2011
- [12] H. Zang, S. Zhang and K. Hapeshi, A review of nature-inspired algorithms. *Journal of Bionic Engineering*, 2010
- [13] X. Yang, *Nature-inspired metaheuristic algorithms*. Luniver press, 2010.
- [14] N. Nedic et al., Optimal cascade hydraulic control for a parallel robot platform by PSO, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014
- [15] S. Łukasik, Ż. Szymon and S. Ak, Firefly algorithm for continuous constrained optimization tasks, *International Conference on Computational Collective Intelligence*, 2009
- [16] D.H. Gates et al, Range of motion requirements for upper-limb activities of daily living. *American J. of Occ. Therapy*, 2016

# Seri Elastik Tahrikli Dikey Zıplayan Robotun Karakterizasyonu ve Kontrolü

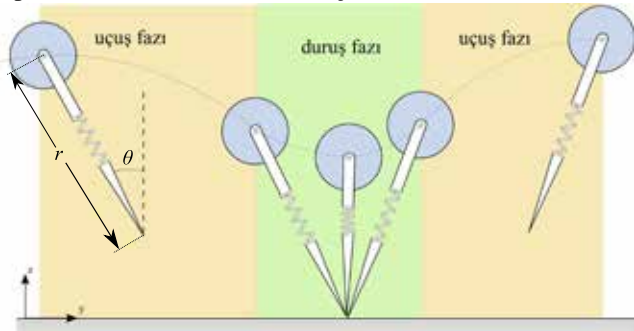
Görkem Seçer, Uluç Saranlı  
Bilgisayar Mühendisliği Bölümü  
Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye  
Email: gorkem.secer, saranli@ceng.metu.edu.tr

**Özetçe** —Bu çalışma, Dikey Yaylı Ters Sarkaç (DYTS) modelini gerçeklemek üzere tasarlanmış seri elastik tahrikli zıplayan bir robotun sistem tanımlama ve kontrolünü kapsamaktadır. Bu dikey platform üzerinde yaptığımız çalışmalar ile koşan canlılar için genel geçer taslak bir model olarak kabul edilen iki serbestlik dereceli YTS'nin enerji verimli ve hassas kontrolüne yönelik olarak deneysel bulgular/sonuçlar elde etmeyi amaçlıyoruz. Bu bağlamda, robotun açık çevrim kontrolünü gerçekleştirerek robot parametrelerinin tahmini için bir dizi deney yapılmıştır. Deney sonuçlarından elde edilen verilerle robotun kapalı çevrim yükseklik kontrolü yapılacaktır.

**Anahtar Kelimeler**—Yaylı Ters Sarkaç modeli, seri elastik eyleyici, dinamik koşma modelleri, sistem tanımlama, koşma kontrolü.

## I. GİRİŞ

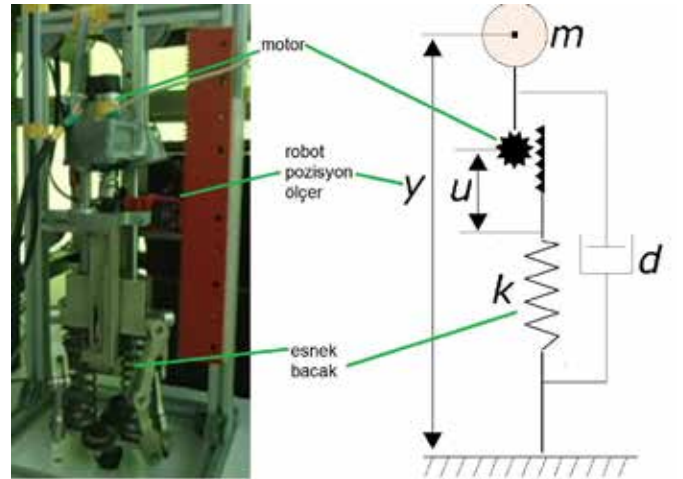
Şekil 1'de gösterilen iki serbestlik dereceli basit bir yapıya sahip Yaylı Ters Sarkaç (YTS) modeli ile bacak sayısı ve yapısından bağımsız olarak birçok canlının koşu hareketlerini modellemek mümkündür. Fakat basit yapısına rağmen bu modelin kontrolü oldukça zor bir problemdir. Mevcut yöntemler sıklıkla yay ile seri bağlı doğrusal bir eyleyici ve kalçada dönel bir eyleyici bulundurulur. Bu çalışmada dikey eksene kısıtlanmış (kalçası sabit) seri elastik tahrikli dikey yaylı ters sarkaç modelini (DYTS) gerçekleyen deneysel bir platform ve bu platformun kontrolü anlatılmıştır.



Şekil 1: İdeal YTS modelinin temel yapısı ve fazları.

DYTS basit yapısına rağmen kontrolü zor bir modeldir. Bu kapsamda modele fiziksel eyleyicilerin güç limitleri dahilinde etkin şekilde enerji aktarılması önemli bir problemdir. Mevcut çalışmaların bir kısmı bacağın yay sabitinin duruş sırasında aniden değiştirilmesi prensibinden faydalanmaktadır. Fakat bu yöntem, anlık olarak yüksek enerji girişi gerektirdiği için

gerçekçilikten uzak ve verimsizdir. Yaptığımız benzetim ve analiz çalışmaları neticesinde [1]'de sunulan bacağın sönümleme katsayısının değiştirilmesi yöntemi ile verimli bir şekilde koşma kontrolünün gerçekleştirilebileceğini tespit ettik. Bu bildiriye, bu gözlemin test edilerek mevcut bilgi birikiminin zenginleştirilmesi adına geliştirdiğimiz DYTS platformunun (bkz. Şekil 2) mimarisi ve bu platform ile yapılan çalışmalar anlatılmıştır.



Şekil 2: DYTS platformu.

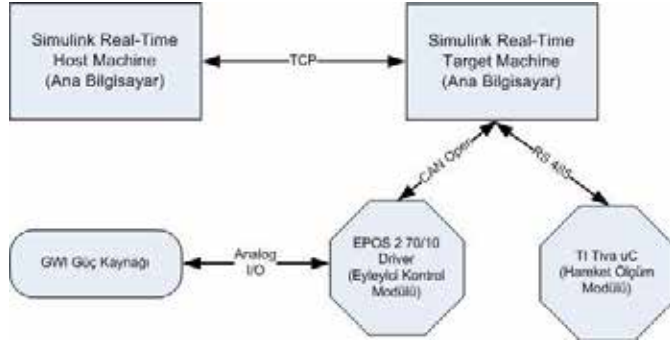
## II. PLATFORM MİMARİSİ

Şekil 2'de gösterilen DYTS platformu üzerinde fırçasız motor ile sürülen bir lineer seri elastik eyleyici, eyleyicinin pozisyonu aracılığıyla esnek bacağın sıkışmasını ölçebilen manyetik bir artımsal kodlayıcı ve robotun pozisyonunu ölçen optik bir artımsal kodlayıcı bulunmaktadır. DYTS platformu sabit bir güç kaynağı ile beslenmektedir. Bu düzenekte, DYTS kontrol sisteminin ana görevleri şu şekildedir:

- Fırçasız motoru sürerek seri elastik eyleyicinin pozisyonu kontrol edilmelidir.
- Robotun açık/kapalı çevrim yükseklik kontrolünü sağlamalıdır.
- Robotun güç tüketimi ve hareketine ilişkin tüm durum uzayı verilerini kayıt altına almalıdır.

Bu temel görevler tek bir merkezden gerçekleştirilmek yerine, bir adet ana kontrol bilgisayarı ve bu bilgisayar ile sorgu/cevap

şeklinde haberleşen iki köle kontrol modülünden oluşan dağıtık bir mimari tasarımı ile gerçekleştirilmektedir. Kontrol modülleri donanım seviyesinde işlemleri gerçekleştirerek ana kontrol bilgisayarındaki algoritmaların ve akışın donanımdan bağımsız şekilde soyutlanmasına olanak tanımaktadırlar. Kontrol sisteminin fiziksel mimarisi ve bu mimari içindeki bileşenlerin etkileşimleri Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3: DYTS Kontrol Sisteminin fiziksel mimarisi ve iç arayüzleri.

Ana kontrol bilgisayarı MATLAB Simulink Real-Time işletim sisteminde koşan bir yazılıma sahiptir. Bu yazılım, MATLAB Simulink'e sahip kullanıcı arayüzü sunan başka bir bilgisayar (host) ile TCP üzerinden konuşarak kullanıcı isteklerine cevap verebilmektedir. Ana kontrol bilgisayarı, kullanıcı isteklerine ve içindeki akışa göre farklı protokollerle bağlı olduğu EPOS 2 motor sürücüsünü kumanda eder. Motor sürücüyü homing ve pozisyon/hız/akım kontrolü gibi modlarda çalıştırır ve motora ait pozisyon/hız/akım/sıcaklık/güç vb. bilgileri periyodik olarak toplar. Ana kontrol bilgisayarı, robotun anlık yerden yüksekliğini ölçen optik kodlayıcıyı okuyan Tiva mikrokontrolörüne periyodik olarak sorgularak yaparak, robotun pozisyonu bilgisini toplar.

### III. DYTS KONTROLÜ

DYTS'nin hibrit dinamikleri basitleştirilerek Denklem 1'deki gibi yazılabilir.

$$\ddot{y} = \begin{cases} -\frac{k}{m}(y - u - l_0) - \frac{d}{m}\dot{y} - g & \text{eğer } y - u - l_0 < 0 \\ -g & \text{aksi takdirde} \end{cases} \quad (1)$$

Burada  $g$  yerçekimini,  $l_0$  ise yayın serbest uzunluğunu temsil eder.

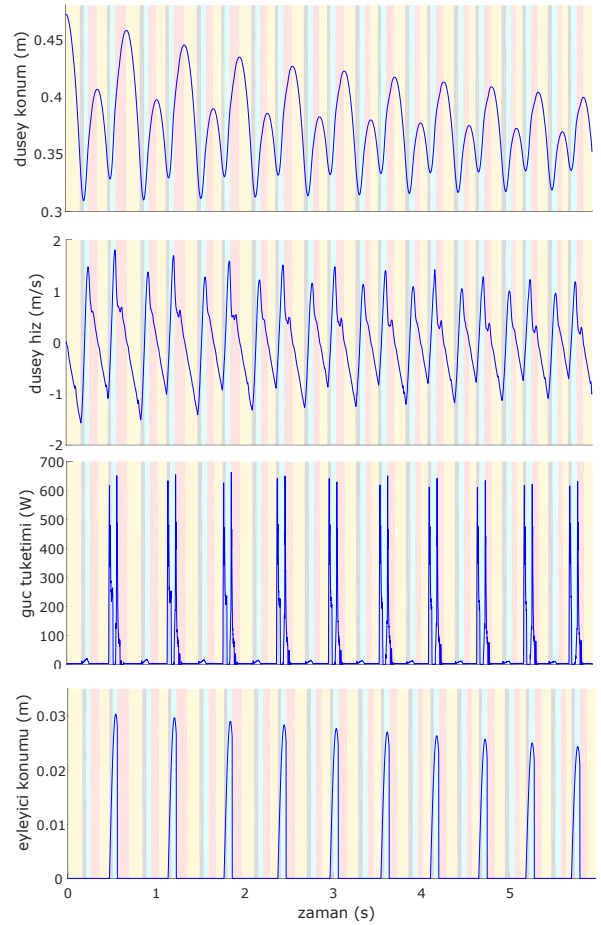
DYTS'nin hareket boyunca ulaştığı tepe noktasının kontrolü seri elastik eyleyici ile yayın sıkıştırılması/gevşetilmesi vasıtası ile gerçekleştirilebilir. Bu durum matematiksel olarak  $u$ 'nun hareket boyunca değişimi/seçimine tekabül eder. Bu bağlamda  $u$ 'nun bacağın yerle teması boyunca sinusoidal bir şekilde değiştirilmesi sıklıkla kullanılan bir açık çevrim kontrol yöntemidir. Bu yönetime göre eyleyicinin pozisyonu şu şekilde tanımlanır:

$$u(t) = \begin{cases} A \sin(\omega t) & \text{eğer } y - u - l_0 < 0 \\ 0 & \text{aksi takdirde} \end{cases} \quad (2)$$

Burada,  $A$  eyleyicinin ulaşacağı maksimum pozisyonu belirlerken,  $\omega$  bacağın doğal frekansına ( $\sqrt{k/m}$ ) göre seçilen eyleyici hızını belirleyen parametredir. Bu parametrelerin seçimi sistemin ihtiyacı olan enerji miktarına göre yapılır. Bu yöntem ile sistemin etkin şekilde kontrolünün sağlanmasının yanında bozucu etkilere karşı gürbüzlük elde edildiği için literatürde sıklıkla kullanılmaktadır [2].

### IV. DENEYLER VE SİSTEM TANILAMA

Deneyel platforma ait bacak yay sabiti  $k$  ve sönümleme katsayısı  $d$  parametrelerinin bulunması için DYTS ile farklı  $A$  ve  $\omega$  seçimleriyle bir dizi deney yapılmıştır.  $A$  ve  $\omega$  değerlerinin farklı seçilmesindeki amaç robotun tüm çalışma uzayını kapsayacak şekilde veri toplayarak sistem tanılamanın geçerliliğini artırmaktır. Şekil 4'de yapılan deneylerden birine ilişkin örnek veri seti gösterilmektedir. Bu veri seti incelendiğinde, her adımda farklı  $A$  ve  $\omega$  seçilerek robotun her adımda farklı bir yüksekliğe sıçradığı ve 0.48 m-0.36 m arasında 0.01 m çözünürlükle farklı tepe noktaları için veritabanı oluşturulduğu görülmektedir.



Şekil 4: DYTS Kontrol Sisteminin fiziksel mimarisi ve iç arayüzleri.

Yapılan deneyler neticesinde robota ilişkin parametreler şu şekilde bulunmuştur.

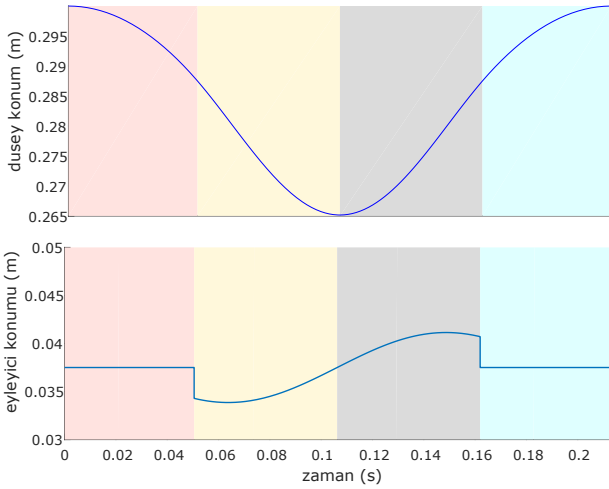
parametre	tahmini değer
m	5 (kg)
k	6500 (N/m)
d	40 (Ns/m)

## V. DYTS'İNİN KAPALI ÇEVİRİM KONTROLÜ

Daha önce yaptığımız çalışmalar kapsamında, eyleyici konumunun

$$u(t) = \begin{cases} \frac{k - k'}{k}(y - l_0) + \frac{d - d'}{k}\dot{y} & \text{eğer } y - u - l_0 < 0 \\ 0 & \text{aksi takdirde} \end{cases} \quad (3)$$

şeklinde seçilmesi durumunda sistemin yay sabiti ve sönümlenme katsayısının sanal olarak  $k'$  ve  $d'$  şeklinde değiştirilmesinin mümkün olduğunu göstermiştik. Bu bağlamda, DYTS'yi istenilen yüksekliğe çıkaracak  $k'$  ve  $d'$  değerleri bulunursa seri eyleyici ile bu gerçekleştirilebilir. Şekil 5'de 0.3 m'den atılan ve 0.3 m'ye zıplaması istenen robota ait simulasyon sonuçları görülmektedir. Önerilen yöntemle robotu düşük hatayla kontrol etmek mümkün olacaktır. Denklem 3 incelendiğinde sanal olarak bacak parametrelerinin değiştirilmesi için bacağın fiziksel yay sabiti ve sönümlenme katsayısı  $k$  ve  $d$  değerlerinin kullanıldığı görülebilir. Yaptığımız karakterizasyon ve sistem tanılama çalışmaları ile kapalı çevrim kontrole yönelik olarak  $k$  ve  $d$  değerlerini bulduk.



Şekil 5: DYTS Kontrol Sisteminin fiziksel mimarisi ve iç arayüzleri.

## VI. SONUÇ

Bu bildiriye seri elastik eyleyiciye sahip dikey zıplayan bir robotik platformun kontrolü ve parametre tanınması anlatılmıştır. Açık döngü kontrol yapılarak toplanan veriler ile sistemin kapalı çevrim kontrolü için bilinmesi gereken kritik sistem parametrelerinin kestirimi yapılmıştır. Kısa vadede kapalı çevrim kontrol implementasyonu tamamlanarak sistematik deneyler yapılması ve farklı kontrol yöntemlerinin doğruluk ve güç tüketimi gibi kriterler bazında karşılaştırılması planlanmaktadır.

## KAYNAKÇA

- [1] Secer, G., & Saranlı, U., "Control of Hopping Through Active Virtual Tuning of Leg Damping for Serially Actuated Legged Robots," *Proc. of the International Conference on Robotics*, pp. 4556-4561, 2014.
- [2] Andrews, B., & Miller, B. & Schmitt, J. & Clark, J. E., "Running Over Unknown Rough Terrain with a One-Legged Planar Robot," *Bioinspiration and Biomimetics*, No.2, Vol.6, 2011.

# Mobil Robotlar için RF Tabanlı Hassas Konumlandırma Birimi Geliştirilmesi

Mehmet Akçakoca, Uğur Yayan  
İnovasyon Mühendislik Ltd. Sti.  
AR-GE Departmanı  
Eskişehir, Türkiye

mehmet.akcakoca,ugur.yayan@inovasyonmuhendislik.com

Hikmet Yücel, Uğur Bolat  
İnovasyon Mühendislik Ltd. Sti.  
AR-GE Departmanı  
Eskişehir, Türkiye

hikmet.yucel,ugur.bolat@inovasyonmuhendislik.com

**Özetçe** — Konumlandırma, robotik, sinyal işleme ve algılayıcı ağları gibi uygulamalarda önemli bir role sahiptir. İç ortamlarda uygulama tipine bağlı olarak farklı konumlandırma sistemleri önerilmektedir. Birçok uygulamada iç ortamlarda konumlandırma ihtiyacı olmasına karşın dış ortamdaki GPS gibi genel kabul görmüş bir çözüm bulunmamaktadır. Bu çalışmada, gezgin robotlar için UWB ve lazer kullanılarak hassas konumlandırma (HASKON) birimi geliştirilmiştir. HASKON içerisinde ilk olarak robottaki pasif algılayıcı verileri ile kalman ve genişletilmiş kalman filtreleri kullanılarak bağıl konum hesaplanmakta, hesaplanan bu bağıl konum lazer tarayıcı verisi ile Adaptive Monte Carlo Localization (AMCL) algoritmasında tümleştirilerek global konum elde edilmektedir. Bu işlemlerin ardından global konum ile UWB ile hesaplanan konum EKF ile tümleştirilerek hassas konum elde edilmektedir. HASKON Osmangazi Teknoparkı içerisinde test edilmiş ve sonuçları gözlemlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler**—gezgin robot, uwb, lazer, amcl, kalman filtre, veri tümleştirme.

## I. GİRİŞ

İç ortamlarda konumlandırma, fabrika otomasyonunda AGV, forklift vb. araçların yönetimi, insansız gezgin robotlar [1], algılayıcı tabanlı kapsama [2], sağlık sektöründe pahalı mobil cihaz ve personel takibi, temizlik robotları [3] gibi sayısız uygulama alanına sahiptir. Dış ortamlar için uydu temelli GPS, GLONASS, GALILEO gibi genel kabul görmüş ve yaygın olarak kullanılan sistemler olmasına karşın, iç ortamlarda her uygulamada kullanılabilecek genel kabul görmüş bir sistem bulunmamaktadır. İç ortamlar için uygulama şartlarına bağlı olarak farklı konumlandırma sistemleri önerilmiştir. İç ortamlarda, radyo dalgalarının farklı özelliklerinden faydalanarak konumlandırma yapan sistemler geliştirmiştir [4], [5]. Gezgin nesne veya insanlarda bulunan alıcılar aldıkları sinyal yardımı ile konumlarını hesaplamakta ya da gezgin nesne veya insanlara takılan vericilerin konumları merkezi sistem tarafından hesaplanarak kullanılmaktadır. Bu konudaki başka bir çalışmada da, bina içerisinde var olan IEEE 802.11 standardındaki Wi-Fi ağları ile konumlandırma yapan bir sistem geliştirilmiştir [6]. Bu çalışmada, gezgin robotlar için UWB ve lazer kullanılarak hassas konumlandırma (HASKON) birimi geliştirilmiştir. HASKON içerisinde ilk olarak robottaki pasif algılayıcı verileri ile kalman ve genişletilmiş kalman filtreleri kullanılarak bağıl konum hesaplanmakta, hesaplanan bu bağıl konum lazer tarayıcı verisi ile AMCL

algoritmasında tümleştirilerek global konum elde edilmektedir. Bu işlemlerin ardından global konum ile UWB ile hesaplanan konum tümleştirilerek hassas konum elde edilmektedir. HASKON Osmangazi Teknoparkı içerisinde test edilmiş ve sonuçları gözlemlenmiştir. Takip eden bölüm sistemde kullanılan donanımlardan bahsedilmektedir. 3. bölümde ise HASKON birimi için önerilen konumlandırma yönteminin detayları verilmektedir. Sistemin izlenen rota boyunca konumlandırmada yaptığı iyileştirmeler karşılaştırılarak incelenmesi 4. Bölümde bulunmaktadır. Sonuç ve gelecekteki çalışmalar ise son bölümdedir.

## II. SİSTEM TANITIMI

Hassas konumlandırma birimi (HASKON) gezgin robot, AGV ve TGV gibi mobil ekipmanların konumlarını belirleyen donanım ve yazılımdan oluşan bir birimdir. HASKON içerisinde eğitim ve araştırma amaçlı açık kaynak kodlu olarak geliştirilmiş olan evarobot [7], 360 derece algılamaya sahip lazer [8] ve UWB kullanarak mutlak konum üretebilen pozyx [9] kullanılmaktadır. Evarobot mekanik, elektronik ve yazılım olmak üzere üç ana bileşenden oluşmaktadır. EvARobot mekaniği ise modüler olarak gövde ve üst platform olmak üzere 2 parçadan oluşmaktadır. Gövde platformunda EvARobot'a ait motor, enkoder, imu, tekerlek, akü vb. bileşenler ve kızılötesi, sonar vb. temel seviye algılayıcılar bulunmaktadır. EvARobot üst platformda ise ileri seviye algılayıcılar olan kinect, lidar, baş açısı referans sistemi vb. algılayıcılar bulunmaktadır.



Şekil 1 Evarobot Platformu

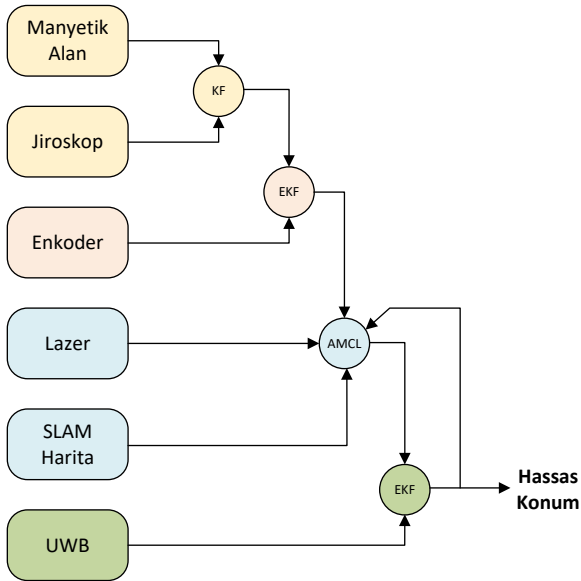
Decawave firmasının geliştirdiği DW1000, Ultra Geniş Band sinyallerinin uçuş zamanı ya da varış zaman farkı

ölçümlerini yapabilen bir entegredir. Pozxy geliştirme kiti ise, bina içerisine yerleştirilen dört verici ve bir hareketli alıcıdan oluşmaktadır. Bu kiten elde edilen konum bilgisi HASKON'da AMCL (Adaptive Monte Carlo Localization) çıktısı ile birleştirilmektedir. Bu alıcıdan konum bilgisinin okunması için Arduino kart kullanılmıştır ve HASKON ile haberleşmesi için yazılım protokolü tasarlanmıştır.

Konumlandırma yapılacak ortamın haritasının çıkartılması ve bu harita üzerinden konumun anlık hesaplanması için Lazer sensör kullanılmıştır. Lazer sensör 360 derece tarama yapabilmektedir ve görüş mesafesi 6m'dir. AMCL kullanılarak lazer, harita ve odometri bilgileri tümleştirilerek mutlak konum hesaplanmaktadır.

### III. Önerilen Yöntem

Önerilen yöntem 4 alt işleminden oluşmaktadır. Bu işlemler içerisinde manyetik alan, jiroskop ve enkoder verileri kalman filtreler aracılığı ile tümleştirilerek bağıl konum elde edilmekte, elde edilen bağıl konum lazer ve SLAM ile oluşturulmuş harita yardımıyla AMCL algoritmasına gönderilerek mutlak konum oluşturulmakta ve son olarak sistemin hassasiyetinin artırılması için UWB geliştirme kiti ile EKF yardımıyla hassas konum elde edilmektedir. Şekil 2'de Önerilen yönteme ait basamaklar görülebilmektedir.



Şekil 2 Önerilen tümleştirme yöntemi diyagramı

Haskon konumlandırma algoritmasının adımları özet olarak aşağıda verilmiştir:

- DW1000 geliştirme kiti yardımı ile başlangıç konumunun tespiti
- Manyetik alan verilerinin kalibrasyonu

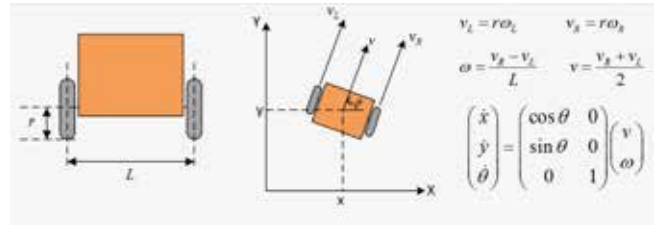
- Enkoder verileri ve kinematik model ile baş açısı değişimi hesaplanması
- Manyetik alan ve jiroskop ile Kalman Filtre kullanarak mutlak baş açısı hesaplanması
- Mutlak baş açısı ve baş açısı değişimi ile EKF kullanarak baş açısının düzeltilmesi
- Enkoderler ile gidilen mesafenin hesaplanması
- Mesafe ve düzeltilmiş baş açısı ile bağıl konumlandırma yapılması
- Bağıl konum, lazer verisi ve harita bilgisi Partikül Filtre ile tümleştirilerek mutlak konum hesaplanması
- DW1000 geliştirme kiti verileri ve Partikül Filtre çıktısı ile EKF kullanılarak hassas konumun hesaplanması

Takip eden alt başlıklarda Ana basamaklar detaylandırılmaktadır.

#### A. Enkoder ve Baş Açısı Referans Sensörü Verilerinin Tümleştirilmesi

Bu basamakta amaç robot için bağıl konumlandırma (odometri) verisi üretmektir. Bağıl konumlandırma için gidilen mesafe ve baş açısı bilgisine ihtiyaç vardır. Baş açısının hesaplanması için manyetik alan, jiroskop, enkoder verileri ve robota ait kinematik model kullanılmıştır. Gidilen mesafe ise enkoder bilgilerinden elde edilmiştir. Bu kapsamda geliştirilen algoritmanın adımları aşağıda verilmiştir:

- İlk olarak enkoder verileri ve kinematik model kullanılarak baş açısı değişimleri hesaplanmıştır.
- Manyetik alan sensörünün içinde bulunduğu robotun gövdesi metal olduğundan, sensör için kalibrasyon katsayıları hesaplanmış ve ölçülen değerlerin düzeltilmesi yapılmıştır.
- Düzeltilen manyetik alan verileri ve jiroskop verileri ile Kalman Filtre kullanılarak mutlak baş açısı hesaplanmıştır.
- Mutlak baş açısı ve baş açısı değişimleri ile EKF kullanılarak baş açısı düzeltilmiştir.
- Robotun ilerlediği mesafe ise enkoder verilerinden hesaplanmıştır.
- Mesafe ve düzeltilen baş açısı kullanılarak bağıl konumlandırma yapılmıştır.



Şekil 3 Robotun kinematik modeli

## B. Lazer Verisinin Tümleştirilmesi

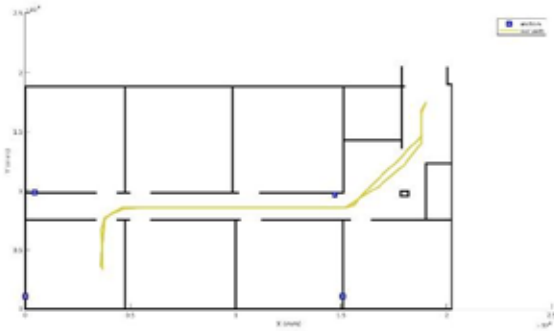
İç ortam konumlandırma yaygın kullanılan sensörlerden birisi de lazer tarayıcıdır. Lazer tarayıcı olarak robot üzerinde bulunan RPlidar kullanılmıştır. RPlidar, 360 derece tarama yapabilen, saniyede 5 tur dönebilen ve derece başına mesafe bilgisi veren bir lazer tarayıcıdır. Point Cloud formatında gelen verinin işlenmesi için gerekli yazılımlar geliştirilmiş ve HASKON yazılımına entegre edilmiştir. Çalışmada ilk olarak ortamın lazer ile haritası çıkarılmıştır. Ardından AMCL (Adaptive Monte Carlo Localization) kullanılarak lazer, harita ve bağıl konum tümleştirilerek mutlak konum elde edilmiştir.

## C. UWB Verisinin Tümleştirilmesi

AMCL sonunda elde edilen mutlak konumu iyileştirerek daha hassas bir konum elde etmek için Genişletilmiş Kalman Filtre (EKF) kullanılarak UWB sinyalleri ile elde edilen konum ile tümleştirilmiştir.

## 4. TEST SONUÇLARI

Testler kapsamında HASKON'da kullanılan sensörlerin birim bazındaki konumlandırmaları ve tümleştirilmenin bunlara etkileri incelenmiştir. Testler ESOĞÜ Meşelik Kampüsünde bulunan Osmangazi Teknopark binasında gerçekleştirilmiştir [10]. Test prosedürü olarak robot bir yol üzerinde hareket ettirilmiş ve sensörlerden alınan bilgiler ve her bir tümleştirme sonucunda elde edilen konum bilgisi toplanarak karşılaştırılmıştır. Robotun gerçek ortamda izlediği yol ve UWB beaconlarının yerleşimi Şekil-4'te verilmiştir.



Şekil 4 Test aşamasında izlenecek yol

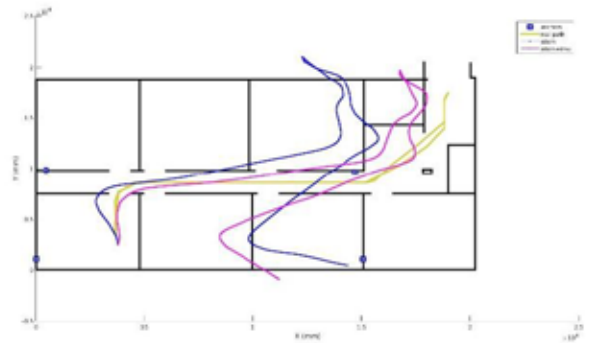
### A. Enkoder ve IMU Tümleştirilmesi Testleri

Enkoder'den elde edilen dönüş bilgilerinin kinematik model kullanılarak yapılan konumlandırmanın çıktısı Şekil-5'te verilmiştir. Enkoder ile yapılan konumlandırma ile gerçek ortam kıyaslandığında dönüşlerde oluşan hatalar zaman ile artmakta ve büyük konumlandırma hatalarına sebebiyet vermektedir.



Şekil 5 Odometri Sonucu Konumlandırma

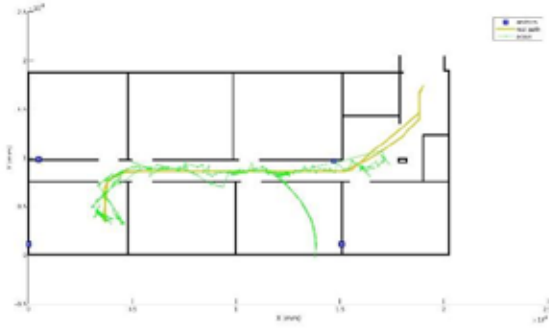
Yukarıdaki bölümlerde de bahsedildiği üzere enkoderde oluşan baş açısı hatasını düzeltmek için IMU sensör kullanılmıştır. Enkoder ve IMU sensörlerinden elde edilen bilgilerin EKF ile birleştirilmesi sonucu oluşan konum bilgisinin karşılaştırılması aşağıdaki şekilde görülmektedir. IMU kullanılarak bir düzeltme yapıldığı test sonucunda gözlemlenmiştir. Fakat yeterince iyi bir düzeltmenin olmamasına sebep olarak ilgili sensörün robotun içerisinde bulunmasıdır. Ayrıca test ortamında bulunan manyetik gürültüde de kümülatif olarak manyetik alan sensörü içerisinde bozulmalara neden olmaktadır.



Şekil 6 Odometri ve IMU Sonucu Konumlandırma

### B. UWB ile Konumlandırma Testleri

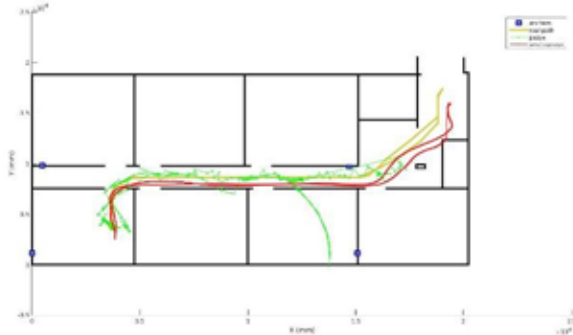
Sadece UWB sinyalleri kullanılarak yapılan konumlandırmanın gerçek ortam ile karşılaştırılmasının yapılması için robot aynı rota üzerinde test edilmiştir. Test ortamında UWB sinyalleri yayan vericiler izlenen yolun tamamını kapsamamaktadır. Ayrıca bu düğümler arasındaki uzaklık ve engeller konumlandırmada hatalara sebebiyet vermektedir. Şekil 7'de de görüleceği üzere 4 vericinin taradığı alan dışına çıkdıkça hatalar büyümektedir.



Şekil 7 UWB konumlandırması ile izlenen rota

### C. AMCL ve UWB Tümlleştirilmesi Testi

AMCL çıktısından elde edilen konum bilgisi ile UWB geliştirme kiti kullanılarak elde edilen konum bilgileri EKF ile birleştirildiğinde Şekil 8'deki grafikte de görüldüğü gibi hassas bir konum elde edilmektedir.



Şekil 8 AMCL ve UWB Tümlleştirilmesi Sonucu Elde edilen Konumlandırma

## 5. SONUÇ

Sonuç olarak HASKON için konumlandırma algoritması geliştirilmiş, kodlanmış ve testleri yapılmıştır. Bu algoritma

ile enkoder, manyetik alan, jiroskop, UWB, lazer verileri tümlleştirilmekte ve metre altı hassasiyette konumlandırma yapılabilmektedir. Yapılan çalışmalara ait gerçek ortam test videosu kaynak [10]'da bulunmaktadır. Gelecek çalışmalarda RF sinyali olarak Wifi ile testler yapılması hedeflenmektedir.

## 6. KAYNAKÇA

- [1] E. Prassler, A. Ritter, C. Schaeffer ve P. Fioriniemph A short history of cleaning robots, Autonomous Robots, vol. 9, pp. 211-226, Dec 2000.
- [2] A. Yazıcı, G. Kirlik, O. Parlaktuna, A. Sipahioglu , A Dynamic Path Planning Approach for Multi-Robot Sensor-Based Coverage Considering Energy Constraints, IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS09), St.Louis, USA, October 10-15, pp.5930-5935, 2009.
- [3] A. Yazıcı, A. Sipahioglu, O. Parlaktuna A Heuristic-Based Dynamic Route Planning Method for a Homogeneous Multi-robot Team, Advanced Robotics, v.23, pp.269-287, 2009.
- [4] LOCATA, <http://www.locatacorp.com/>
- [5] Q-Track, <http://www.q-track.com/>
- [6] Ekahau, Inc. Ekahau Positioning Engine 2.0 , <http://www.ekahau.com/>
- [7] Eğitim ve Araştırma Amaçlı Gezgin Robot Platformu, [www.evarobot.com](http://www.evarobot.com)
- [8] RPLidar, <http://www.slamtec.com/en/Lidar>
- [9] Pozyx UWB Geliştirme Kiti, <https://www.pozyx.io/store/detail/2>
- [10] HASKON Birimi Demo videosu, <https://www.youtube.com/watch?v=9IDmZnCcEaA>

# Planör Tipi Katlanabilir İnsansız Hava Aracı

Ali Anıl DEMİRÇALI, Cemre ESEMEN, Ömer Faruk YAHŞI, Hüseyin ÜVET

Mekatronik Mühendisliği

Yıldız Teknik Üniversitesi

İstanbul, Türkiye

anildemircali1@gmail.com, cemre.esemen@gmail.com, faruukomer@gmail.com, huvet@yildiz.edu.tr

**Özetçe** —Bu çalışmada, gezegenimizin atmosfer bilgileri hakkında veriler toplayabilecek mini İnsansız Hava Aracı (İHA) sınıfına ait katlanabilir bir planör tasarımı ve üretimi yapılmıştır. Minyatür katlanabilir İHA sisteminde amaç, taktik İHA'larca çoklu olarak taşınabilir ve istenilen bölgelere bırakılabilir bir platformu geliştirmek ve uygulamaktır. Belirli bir yüksekliğe geldiğinde otonom olarak konteynerden ayrılmak için nano servo motor mekanizması kullanılmış olup; havadaki operasyonlarını gerçekleştirmek için herhangi bir motor bulundurmeyen planör, sadece kaldırma kuvvetinden yararlanacağı için tasarımı hafif ve kompakt bir yapıya gidilmiştir. Bu kapsamda, tasarlanan planör tip İHA'nın kanat açıklığı 440 mm ve boylamsal uzunluğu 304 mm, kanatları katlandığı zaman 123 mm çapında ve 309 mm uzunlukta konteynera sığabilecek olup; ağırlığı 144 gram ve konteyner ile birlikte 500 gram olarak ölçülmüştür. Aynı zamanda bir uydu sisteminin sahip olduğu; telemetri, haberleşme ve sensörleri aracılığıyla otonom operasyonlar gerçekleştirebilmektedir.

**Anahtar Kelimeler**—İnsansız Hava Aracı, Otonom Sistem, Katlanabilir Kanat, Keşiş

## I. GİRİŞ

Uzay araştırması yapacak sistemlerin üretiminde hem daha ekonomik olmak hem de zaman açısından istenilen hedefe daha kısa sürede ulaşabilmek için minyatür boyutlarda ve çok sayıda üretilmesi yönünde bir eğilim vardır [1]. Ağırlık ve enerji ihtiyacı göz önünde bulundurulduğunda daha verimli bir uzay aracı için pasif iniş sistemlerinden yararlanmak ve güneş, rüzgar gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı dikkat çekmektedir [2]. Atmosferik bir ortamda minyatür boyutlu bir uydu sisteminin gezegen yüzeyine iniş yapmasını sağlayacak olan bu sistemde, stabil bir uçuş özelliğine sahip olması ve oldukça düşük enerji tüketimine sahip olması sebebiyle planör benzeri kanatlı bir yapı tercih edilmiştir. Kanat yapısının katlanabilir olması, az hacim kaplamasına ve böylelikle koruyucu bir konteyner içerisinde bulunmasına imkan vermektedir [3]. Model uydunun koruyucu bir kap içerisinde bulunması ise atmosferik ortam içerisindeki bozucu faktörlere karşı sistemin elektronik ve mekanik yapısını korumaktadır.

Giderek artan güvenilirlik, güç tasarrufu ve düşük maliyet ihtiyaçları karşısında istenilen işlevselliği elde etmek için minyatür boyutlu, çok sayıda, birbirleriyle haberleşen ve ağırlığı 1 kg'yi geçmeyen piko-uydu sistemlerine talep artmaktadır [4-5]. Artan talep doğrultusunda piko-uydu sistemlerinin bir çok farklı alanda kullanılması mümkün olmuş olup, başarılı çalışmalar sayesinde uygulanması mümkün bir alan haline gelmiştir. [4,6-7]. Piko-uydu teknolojisinin gelişimini amaçlayan bu çalışmada yapılan sistem, uzay ve havacılık

araştırmalarına büyük katkı sağlayacak ve yerli imkanlar dahilinde üretilecektir. Bu çalışmada, tasarımı yapılan model uydu, bir gezegen atmosferi içerisindeki ortam hakkında bilgi toplaması planlanan küçük ölçekli bir uzay-hava aracıdır. Atmosfer hakkında bilgi toplamak amacıyla, katlanabilir kanatlı sistemler yerine sabit kanatlı, daha büyük boyutlu ve daha ağır sistemler kullanılmıştır [8]. Sistem, bir planör yapısına sahip olup; üzerinde herhangi bir motor bulundurmaz. Bu sayede gerekli olan enerji ihtiyacı miktarı minimum seviyede tutularak hafif ve kompakt bir yapı elde edilecektir. Uydu sistemi, telemetri, haberleşme ve otonom operasyonlar gerçekleştirebilme kabiliyetine sahip olup, hava-uzay sistemlerinin tasarım ve üretim aşamalarına uygun olacak bir şekilde hayata geçirilecektir.

Model uydu sisteminin gerek planör uçak benzeri mekanik yapısı ve gerek haberleşme sistemleri bakımından İHA'lar ile benzerlik gösterdiği görülmektedir [9]. Katlanılabilir kanat mekanizmalı model uydu, belirtilen uzay ve havacılık araştırmalarının gerekli olduğu:

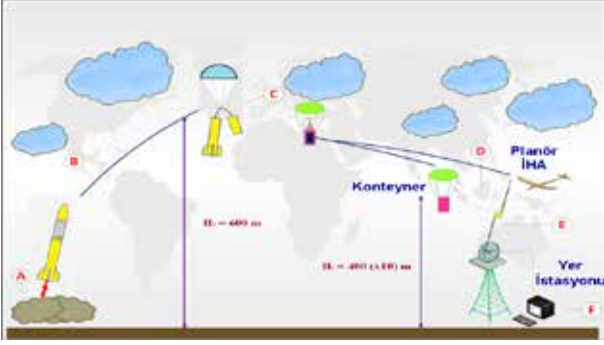
- Piko-uydu tasarımı ve üretiminde
- Uzay ve havacılıkta kullanılan modern uydu sistemlerinde
- Uydular için güvenli iniş sistemleri tasarımında
- Çeşitli askeri operasyonlar ve haberleşme sistemlerinde
- İnsansız Hava Araçları tasarımı ve üretimi gibi alanlarda kullanılabilir.

Sistemin öncelikle 6 serbestlik dereceli hareket sistemleri oluşturulmuş ve MATLAB/Simulink programı ile benzetim çalışmaları yapılmıştır. Planörün mekanik tasarımı ve analizi 3D Solidworks programında, elektronik kart tasarımı Proteus programı aracılığıyla, haberleşme yapısı için gerekli yer istasyonu yazılımı Labview ve C# programı aracılığıyla, planörün mikroişlemci yapısı için ise gerekli yazılım Arduino IDE ile yapılmaktadır. Çalışmanın ikinci kısmında uydu kinematik ve dinamik denklemleri ile kullanılan ölçüm modelleri sunulmuştur. Üçüncü kısımda sistem analizleri ve yapılan benzetim çalışmalarının ardından dördüncü ve son olarak sonuç bölümünde tartışma ve değerlendirme yapılmıştır.

## II. MATEMATİKSEL MODEL

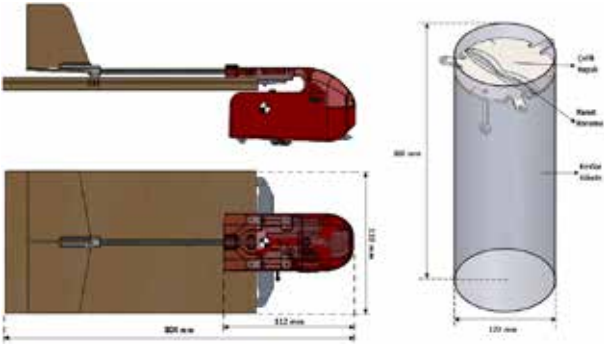
Bu bölüm, minyatür katlanabilir planör İHA'nın dinamik davranışlarını belirlemek ve konteynerden ayrıldıktan sonra süzülme esnasındaki benzetim çalışmalarını yapabilmek için kullanılacak olan temel hesaplamaları içermektedir [10-11]. Tasarımı yapılan mini İHA, toplamda faydalı yükü ile birlikte 500 gram olan sistemin fırlatan bir roket içerisinde 400 metre yükseklikte otonom olarak ayrılacak; 1 km'lik helisel yörünge içinde kalacak ve inişini 2 dakika içerisinde gerçekleştireceği

hedef alınmıştır. A noktasından fırlatılan bir roket içerisindeki sistem B yörüngesinden C noktasına geldiğinde kapsülden ayrılıp, 400 metre yükseklikteki D noktasında otonom olarak konteynerden ayrılarak süzölmeye başlayacak model, F noktasındaki yer istasyonu aracılığıyla planördeki sensörlerden gelen veriler gözlemlenebilecek olup, sistem şekil-1 ile ifade edilmiştir.



Şekil 1. Roket ile fırlatılan planör İHA'nın sırasıyla gerçekleştireceği işlemler

Planör İHA'nın gövde uzunluğu, katlandığındaki kanat genişliği ve kanat uzunluğu; katlanmış halde içerisine yerleştirileceği konteyner şekil-2' de gösterilmiştir.



Şekil 2. Katlanabilir planör İHA'nın sağ yan, üst görünüşü ve konteyner ölçüleri

Mini İHA için alçalma hızı, fırlatılan roketten ayrılma hızı ve maksimum hız belirlenerek; birimsiz Re (Reynolds) sayısına geçilmiştir. Kanatların modele hangi hücum açısıyla takıldığında maksimum itkiyi üreteceğini; itki  $C_L$ , sürtünme  $C_D$  gibi katsayıların hesaplanması ve aerodinamik analiz sonucu bulunan  $C_{D,0} = 0.07$  ve K en boy oranı(AR) 9.466 olup,  $\rho$  hava yoğunluğu ( $kg/m^3$ ),  $C_D$  sürtünme katsayısı,  $V$  havadaki hız ( $m/s$ ),  $R$  paraşütün dış çapı ( $m$ ),  $r$  paraşütün iç çapı ( $m$ ),  $W$  sistem ağırlığı ( $N$ ),  $D$  sürtünme kuvveti ( $N$ ) olarak ifade edilmiştir [12].

$$V = \sqrt{\frac{2W}{\rho\pi C_D R^2 \cos^2\left(\frac{r\pi}{2R}\right)}} \quad (1)$$

$$V_{max} = \sqrt{\frac{2W}{\rho S} \sqrt{\frac{K}{C_{D,0}}}} \quad (2)$$

$$C_L = \frac{2L}{\rho S V^2} \quad (3)$$

$$K = \frac{1}{\pi A R e_0} \quad (4)$$

$$Re = \frac{\rho V \bar{c}}{\mu} \quad (5)$$

(1-5) formüllerine belirlenen değerler ve model parametreleri uygulandığında Eppler 793 kanat profili için tablo-1 ile verilen değerlere ulaşılmıştır.

Tablo I. BENZETİMDE KULLANILACAK DEĞERLERİN BELİRLENMESİ

Parametre Adı	Değer	Birim
Alçalma hızı	8.2	( $m/s$ )
Ayrılmadan sonraki hız	6.1	( $m/s$ )
$V_{max}$	12.5	( $m/s$ )
Hücum Açısı	5.5	(derece)
$C_L$	0.4855	-

Planör üzerine etkiyen kuvvetler; yerçekimi ve aerodinamik kuvvetler olarak tablo-1 değerleri elde edildikten sonra hesaplanabilir. Newton kanununa göre 6 serbestlik derecesine sahip doğrusal olmayan denklemler elde edilebilir [13]. Minyatür planöre ait kuvvetler (6-9) denklemleri ile verilebilir:

$$X - mg \sin(\theta) = m(\dot{U} + QW - RV) \quad (6)$$

$$Y + mg \cos(\theta) \sin(\phi) = m(\dot{V} + RU - PW) \quad (7)$$

$$Z + mg \cos(\theta) \cos(\phi) = m(\dot{W} + PV - QU) \quad (8)$$

Vücut eksen takımında tanımlı, X, Y, Z eksenleri doğrultularındaki kuvvetlerin denklemleri elde edilirken planörün ağırlık vektörü  $m$ , eksenel ivmeleri  $\dot{U}$ ,  $\dot{V}$ ,  $\dot{W}$  ve açısal hızlarından  $P$ ,  $Q$ ,  $R$  doğan kuvvetler dikkate alınır. Ağırlık vektörü, planörün yunuslama ve yuvarlanma açısından kaynaklı olarak değişiklik gösterir. Yönelimsel ivmeler (9-11), açısal hızlar (12-14) denklemleri ile ifade edilebilir [14].

$$\dot{U} = RV - QW - g \sin(\theta) + X/m \quad (9)$$

$$\dot{V} = PW - RU + g \cos(\theta) \sin(\phi) + Y/m \quad (10)$$

$$\dot{W} = QU - PV + g \cos(\theta) \cos(\phi) + Z/m \quad (11)$$

$$\dot{P} = (c_1 R + c_2 P)Q + c_3 L + c_4 N \quad (12)$$

$$\dot{Q} = c_5 P R - c_6 (P^2 - R^2) + c_7 M \quad (13)$$

$$\dot{R} = (c_8 P - c_2 R)Q + c_4 L + c_9 N \quad (14)$$

Euler açılarının türevleri (15-17) denklemleri ile hesaplanabilir.

$$\dot{\phi} = P + \tan(\theta)(Q \sin(\phi) + R \cos(\phi)) \quad (15)$$

$$\dot{\theta} = Q \cos(\phi) - R \sin(\phi) \quad (16)$$

$$\dot{\psi} = \frac{Q \sin(\phi) + R \cos(\phi)}{\cos(\theta)} \quad (17)$$

Model planörün konum bilgilerinin belirlenmesi için eksenel hızların ve euler açılarının yer aldığı (18-20) denklemleri kullanılabilir.

$$\dot{x} = U \cos(\theta) \cos(\phi) + V (\sin(\phi) \sin(\theta) \cos(\psi) - \cos(\phi) \sin(\psi)) + W (\cos(\phi) \sin(\theta) \cos(\psi) + \sin(\phi) \sin(\psi)) \quad (18)$$

$$\dot{y} = U \cos(\theta) \sin(\phi) + V (\sin(\phi) \sin(\theta) \sin(\psi) + \cos(\phi) \cos(\psi)) + W (\cos(\phi) \sin(\theta) \sin(\psi) - \sin(\phi) \cos(\psi)) \quad (19)$$

$$\dot{z} = -U \sin(\theta) + V(\sin(\phi)\cos(\psi)) + W(\cos(\phi)\cos(\theta)) \quad (20)$$

(9-14) denklemlerin, her bir eksenindeki aerodinamik kuvvete ve momente bağlı olduğu görülmektedir. Bu sebeple, vücut eksen takımında tanımlı bu kuvvet ve momentlerin belirlenmesi için XFLR5 programında yapılan stabilite analizlerinden elde edilecek kararlılık ve kontrol katsayılarına ihtiyaç duyulacaktır. (21-28) numaralı formüller kullanılarak her bir eksen için aerodinamik kuvvetler ve momentler elde edilebilir [15].

$$c_L = c_{L,0} + c_{L,\alpha} \alpha \quad (21)$$

$$c_D = c_{D,0} + k c_L^2 \quad (22)$$

$$c_x = -c_D \cos(\alpha) + c_L \sin(\alpha) \quad (23)$$

$$c_y = -c_{y,\beta} \beta + c_{y,p} P \left( \frac{b}{2V} \right) + c_{y,r} R \left( \frac{b}{2V} \right) + c_{y,\delta_a} \delta_a + c_{y,\delta_r} \delta_r \quad (24)$$

$$c_z = -c_L \cos(\alpha) - c_D \sin(\alpha) - c_{L,q} Q \left( \frac{c}{2V} \right) - c_{L,\delta_e} \delta_e \quad (25)$$

$$c_l = c_{l,\beta} \beta + c_{l,p} P \left( \frac{b}{2V} \right) + c_{l,r} R \left( \frac{b}{2V} \right) + c_{l,\delta_a} \delta_a + c_{l,\delta_r} \delta_r \quad (26)$$

$$c_m = c_{m,0} + c_{m,\alpha} \alpha + c_{m,q} Q \left( \frac{c}{2V} \right) + c_{m,\delta_e} \delta_e \quad (27)$$

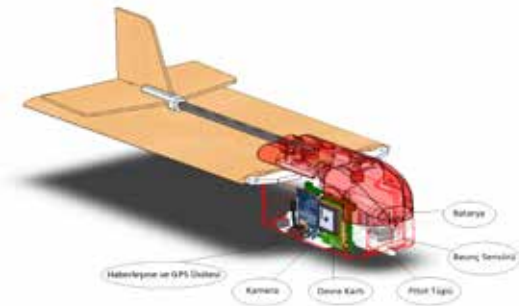
$$c_n = c_{n,\beta} \beta + c_{n,p} P \left( \frac{b}{2V} \right) + c_{n,r} R \left( \frac{b}{2V} \right) + c_{n,\delta_a} \delta_a + c_{n,\delta_r} \delta_r \quad (28)$$

XFLR5 analiz programından planörün aerodinamik kuvvet ve momentlerinin belirlenmesinde kullanılacak olan parametre formüllerinin uygulanması sonucunda elde edilen değerler tablo-2' de gösterildiği gibidir.

Tablo II. AERODİNAMİK KUVVET KATSAYILARI

Boylamsal	Yanal	Yanal
$c_{L,\alpha} = 4.8878$	$c_{y,\beta} = -0.36561$	$c_{y,p} = -0.30632$
$c_{L,q} = 8.6232$	$c_{n,\beta} = 0.09735$	$c_{n,p} = -0.10115$
$c_{m,\alpha} = -3.0688$	$c_{l,\beta} = -0.17966$	$c_{l,p} = -0.58491$
$c_{m,q} = -20.781$	$c_{y,r} = 0.3857$	$c_{l,r} = -0.22072$
		$c_{n,r} = -0.12476$

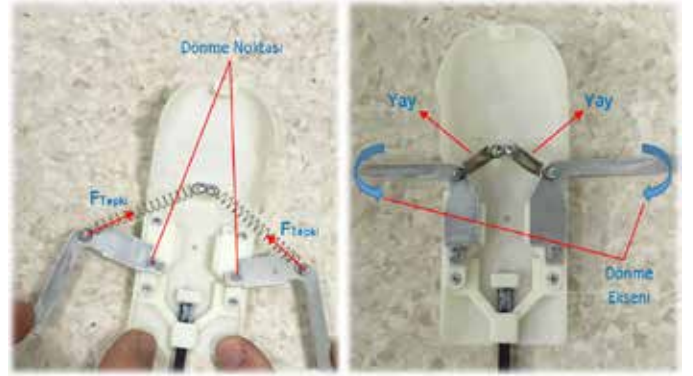
Model hesaplamalarından, XFLR5 aerodinamik ve eylemsizlik hesaplamaları sonucunda, planör kütle merkezinin hücum kenarından kanat boyunun (1/3) hizasına gelecek şekilde tasarımı yapılmış ve iç ekipmanları şekil-3' te gösterilmiştir.



Şekil 3. 3D modellemesi yapılan planördeki iç ekipmanların gösterimi

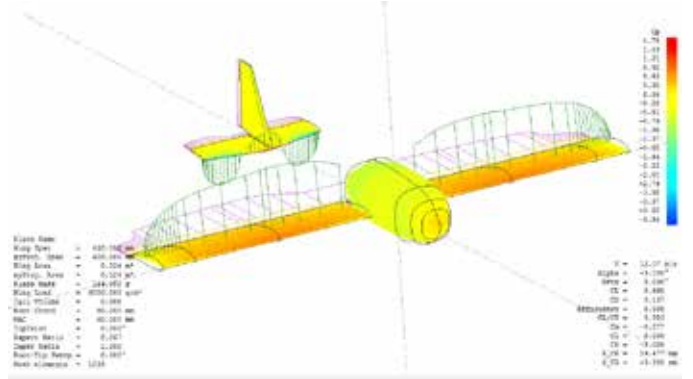
### III. BENZETİM ÇALIŞMALARI

Bu bölümde, yapılan modelleme ve hesaplamalar sonucunda elde edilen parametreler doğrultusunda planör için gerekli ön tasarım değerleri belirlenmiş ve iyileştirme çalışmaları yapılmıştır. Ağırlık merkezinin yeri, yatay ve dikey stabilizer boyut tayini, maksimum itkinin elde edildiği hücum açısı gibi değerler belirlenmiştir. Yerden fırlatılan konteyner içerisindeki planörün, kanat mekanizması olarak kullanılan yay sistemi basıncın etkisiyle konteyner içerisinde eş kuvvetlere maruz kalacağı ve tam 90° açıyla konteynerden ayrılacağı için aynı anda kanatların serbest kalması statik hesaplamalar ile belirlenmiş ve bu şartlar altında yapılmış olan mekanizma şekil-4 ile gösterilmiştir.



Şekil 4. Kanat mekanizması için kullanılan yaylar ve çalışması

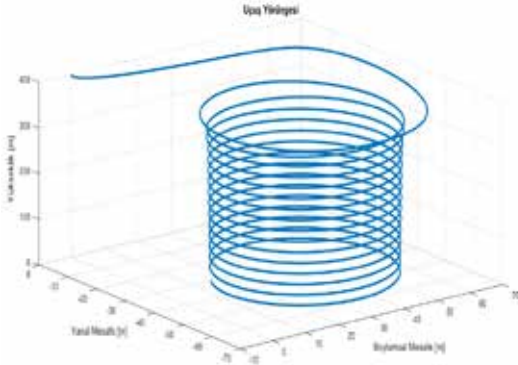
II. bölüm şekil-2 ile gösterilen 3D planör, XFLR5' te birebir modellenmiş olup; kullanılan tüm ekipmanlar hassas teraziye ölçülen ağırlıklarına göre aynen atanmış ve yapılan aerodinamik analiz şekil-5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. XFLR5 programında 3 boyutlu olarak modellenen sistem davranışının ve parametrelerin belirlenmesi

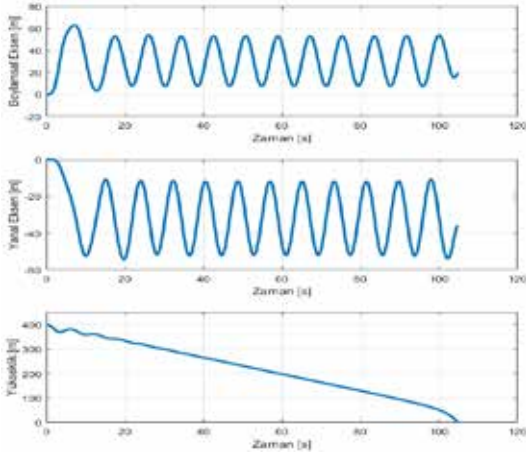
Minyatür planörün stabilitesi ve kuvvet moment dengesinin olduğu durum gözlemlenmiştir. Bu durumun oluşması için 13 (m/s) uçuş hızı ve -3° hücum açısına sahip olması gerektiği belirlenmiştir. Planör modelinin; X, Y, Z eksenlerindeki pozisyonunu ve 400 metre yükseklikten yere iniş süresini 2 farklı kontrol değişkeni belirlemektedir. Bunlar elavator ve rudder olarak adlandırılmakta ve arka stabilizörlerin aerodinamiğini değiştirerek planörün ağırlık merkezine etkiyen kuvvet ve momentlere müdahale edilmesini sağlamaktadırlar. 1° verilen rudder komutu ile minyatür planörün, 60 metre

çapta spiraller izleyip helisel olan bir yörüngeyi 105 saniyede indiği ve pozisyon bilgilerinin değişimi de Şekil-6' da açıkça görülmektedir.



Şekil 6. Minyatür planörün elde edilen tüm parametre girdileri sonucu takip ettiği uçuş yörüngesi

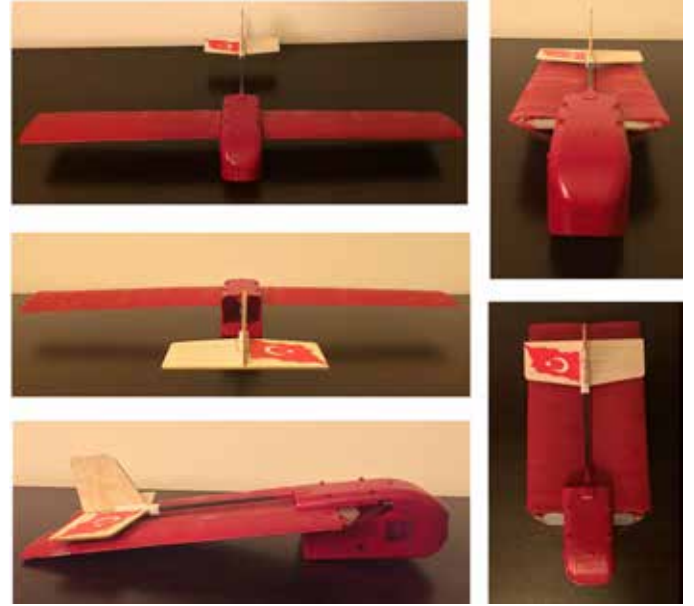
II. bölüm girişinde verilen hedefler doğrultusunda model planör, 400 metrede konteynerdan ayrıldıktan sonra süzülerek 60 metre çapında helisel yörünge içinde kalmış ve 105 saniyede görevini başarıyla tamamlamıştır. Ayrıntılı olarak şekil-7' de verilen grafiklerde, takip edilen yörünge zamana bağlı olarak açıkça gözlemlenebilir.



Şekil 7. Minyatür planörün her bir eksenindeki pozisyonun zamana bağlı değişimi. 400 metre yükseklikten 90° ile bırakılma durumu.

#### IV. SONUÇ

Hedeflenen kriterler ve belirlenen iterasyon aşamaları doğrultusunda kanat tasarımı başarılı bir şekilde yapılmıştır. Boyutlandırma çalışmaları XFLR5 programı aracılığıyla optimize edilmiş, seçilen kanat profili ve planörün polar grafiklerine bağlı olarak kanat açıları, ağırlık merkezinin konumu ve statik marjın değerleri belirlenmiştir. Solidworks 3D tasarım programında bire bir modellenen sistem ve ekipmanları, test sonucunda olduğu gibi konteynerdan ayrıldığı zaman da kanatları başarılı bir şekilde açmıştır. Prototipi 3 boyutlu yazıcı teknolojisi kullanılarak yapılmış olan model, hedefleri başarıyla tamamlamış olup şekil-8' de prototip gösterilmiştir.



Şekil 8. Hedefleri başarıyla tamamlayan model prototipin kanatları açık ve katlanmış durumları

#### KAYNAKÇA

- [1] Jodeh, Nidal M. Development of autonomous unmanned aerial vehicle research platform: modeling, simulating, and flight testing. 2006.
- [2] Melin, Tomas. "A vortex lattice MATLAB implementation for linear aerodynamic wing applications." Master's Thesis, Department of Aeronautics, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden (2000).
- [3] Landon, Steven D. "Development of deployable wings for small unmanned aerial vehicles using compliant mechanisms." (2007).
- [4] W. Truskowski, M. Hinchey, J. Rash, and C. Rouff, "NASA's swarm missions: the challenge of building autonomous software", IT Professional, 2004, vol. 6, no. 5, pp. 47-52.
- [5] Y.S. Dai and G. Levitin, "Reliability and Performance of Tree-structured Grid Services", IEEE Transactions on Reliability, 2006, vol. 55, no. 2, pp. 337-349.
- [6] K. Fukuda, D. Funato, K. Sekiyama, F. Arai, "Evaluation on flexibility of swarm intelligence system", Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics & Automation, vol. 4, 1998, pp 3210-3215.
- [7] C R. Kube, C R. Bonabeau, "Cooperative transport by ants and robots, Robotics and Autonomous Systems", 2000, vol. 30, pp. 85-101.
- [8] U. S. Navy, "Sonobuoy Tube-launched UAV," STTR, Ed., 2004.
- [9] Yüksek, Burak. Sabit Kanatlı Bir İnsansız Hava Aracının Modellenmesi Ve Kontrolü. Diss. Fen Bilimleri Enstitüsü, 2013.
- [10] Beeler, Scott C., Daniel D. Moerder, and David E. Cox. "A flight dynamics model for a small glider in ambient winds." (2003).
- [11] Bachuta, M. J., et al. "UAV glider control system based on dynamic contraction method." Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), 2012 17th International Conference on. IEEE, 2012.
- [12] Yechout, Thomas R. Introduction to aircraft flight mechanics. Aiaa, 2003.
- [13] Garza, Frederico R., and Eugene A. Morelli. "A collection of nonlinear aircraft simulations in matlab." (2003).
- [14] Etkin, Bernard, and Lloyd Duff Reid. Dynamics of flight: stability and control. Vol. 3. New York: Wiley, 1996.
- [15] Dilão, Rui, and João Fonseca. "Dynamic trajectory control of gliders." Advances in Aerospace Guidance, Navigation and Control. Springer Berlin Heidelberg, 2013. 373-386.

# Dört Bacaklı Robotlar için Önizleme Kontrolü ve Sıfır Moment Noktası Esaslı Yürüyüş Yörüngesi Üretimi

Tunc Akbas, S. Emre Eskimez, Selim Ozel, Kaan C. Fidan, Beste Bahçeci, O. Kemal Adak, M. Mert Gülhan, Koray Erkekli ve Kemalettin Erbatur

Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Sabancı Üniversitesi, İstanbul, 34956 Türkiye (telefon: +90-216-483-9585; fax: +90-216-483-9550; e-mail: tuncakbas@sabanciuniv.edu, eskimez@sabanciuniv.edu, selimozel@sabanciuniv.edu, kaanfidan@sabanciuniv.edu, bestebahceci@sabanciuniv.edu, omerkemal@sabanciuniv.edu, mertgulhan@sabanciuniv.edu, korayerkekli@sabanciuniv.edu, erbatur@sabanciuniv.edu).

**Özetçe** —*Robota verilen görevde engel aşımı gerektiğinde bacaklı robotların geri kalan mobil robotlara göre önemli avantajları bulunmaktadır. Bu makalede dört bacaklı robotların düz bir yüzeyde yürüyüşü için bir ölçüleme üretimi yöntemi sunuldu. Bu yaklaşım sıfır moment noktası (SMN) temelli kararlılık ve doğrusal ters sarkaç modeli (DTSM) üzerinedir. Yürüyüş için SMN referans gezinteleri ileri sürülüp oradan önizleme kontrolü vasıtasıyla robotun ağırlık merkezi (RAM) referansı için referans gezinteleri elde edildi. Bacak eklemlerinin pozisyonları RAM referans gezinteleri üzerine ters kinematik uygulanarak hesaplandı. Öne sürülen referans gezintesi üretimi sentezi, tamamen dinamik 3 boyutlu benzetimle test edildi. Benzetimde 16 serbestlik derecesine (SD) sahip dört bacaklı robot modeli kullanıldı. Benzetim sonuçları, yürüyüş için yapılan referans üretim tekniğinin başarıya ulaştığını gösteriyor.*

**Anahtar Kelimeler**—*Sıfır moment noktası, dört bacaklı robot, mobil robot, referans üretimi, önizleme kontrolü.*

## I. GİRİŞ

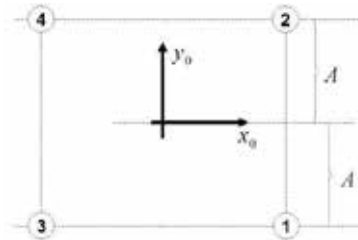
SMN temelli referans gezintesi üretimi, iki bacaklı robotlar için geniş bir alanda kullanılmaktadır [6-13]. Dört bacaklı robotlar için de bu yöntemin kullanıldığı örnekler görülmüştür [1-5,14-18]. SMN kararlılık kısıtı belirtir ki; robotun kararlılığını korumak için SMN ayakların yere değmesiyle tanımlanan destek poligonu içinde tutulmalıdır. SMN denklemlerinin serbestlik derecesi yüksek olan robotlarda elde edilmesi kolaydır fakat bu denklemler pozisyon, hız ve ivme değişkenlerini de kapsadığından ötürü bu denklemleri referans gezinteleriyle sentezleyip kullanmak zordur. Bu sebeple birçok araştırmacı serbestlik derecesi yüksek olanlar yerine daha sadeleştirilmiş modelleri kullanır. DTSM de bu şekilde sadeleştirilmiş modellerden biridir. Referans sentezindeki ilk adım istenilen yürüyüş biçimini için ayağın iniş pozisyonunun atanmasıdır. Ayağın iniş pozisyonuyla tutarlı SMN referansı daha sonra üretilir. Sonrasında ZAM için referans gezintesi, SMN referans gezintesi ve DTSM kullanılarak hesaplanır. Ayakların iniş pozisyonları ve RAM arasında ters kinematik problemi çözülerek robotun eklem pozisyonu referansları hesaplanır. Bu referanslar birbirleriyle bağımsız PID eklem kontrolörleri kullanılarak takip edilir. PID eklem kontrolörlerine ek olarak eylemsizlik sensörlerinden ve dize yerleştirilmiş güç ve tork sensörlerinden alınan geri beslemeyle çevrimiçi referans modifikasyonları birçok çalışmada yapılmıştır.

ZAM referanslarını SMN referanslarını kullanarak hesaplayabilmek için çeşitli metodlar vardır. Önizleme kontrolü [10, 19] bu metodlar arasındadır. İki bacaklı robotlar

üstünde kullanılan SMN'nın önizleme kontrolü [5] de açıklanmıştır. SMN referanslarına çevrimiçi müdahaleye izin verdiği için referans üretimi temelli önizleme kontrolü yaygın olarak kabul edilmiş bir metottur. Fakat önizleme kontrolü, iki bacaklı robotlardan fazla bacaklı robotların gezintesi için yaygın kullanılan bir yöntem değildir. Nadir görülen örneklerden biri altı bacaklı bir robot olan ve önizleme kontrolünü RAM referansı gezintesi hesaplamak için kullanan Asterisk'tir [17].

Bu makalede [18] SMN kısıtı ve önizleme kontrolü, dört bacaklı bir robotun çapraz bacak desteği esnasında kullanılmıştır fakat hareket üretimi işlemi açıkça tanımlanmamıştır. Bu makale [18] den, SMN gezintesinin önizleme kontrolü ve yürüyüş şekli üretim tekniği arasında bağlantı kurmak için özgün bir yöntem önermesi sebebiyle farklılık gösterir. Bu yöntem farklı hareket biçimlerine de uygulanabilir [20].

Bu makaledeki yazarların bu konu üzerindeki daha önceki çalışmalarından birinde SMN kararlılık kısıtı ve dört bacaklı robotlar için DTSM ile birlikte önizleme kontrolünden bahsedilmiştir [20]. Bu makale [20]de elde edilen sonuçları yürüyüş referansı üretimiyle iletmiştir. Bu yüzden [20] de sunulan önizleme kontrolü tekniği, bu makalede çeşitli hareket türleri için genellendi. Önerilen referans sentezi ve kontrol yapısı tamamen dinamik 3 boyutlu benzetim kullanılarak 16 serbestlik dereceli dört bacaklı robot üzerine uygulandı.



Şekil 1. Hareket başlamadan önce robotun ayak pozisyonları. Daireler ayakların numaralarını temsil eder: (1) sağ ön, (2) sol ön, (3) sağ arka, (4) sol arka.  $x_0$ ,  $y_0$  dünya koordinat düzlemini tanımlayan değişkenlerdir

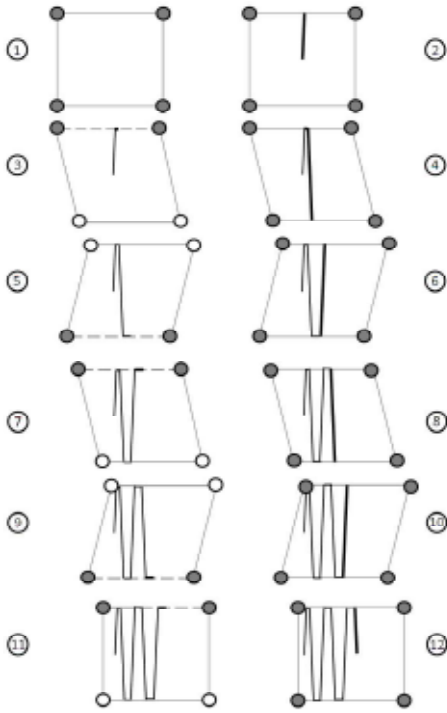
## II. YÜRÜYÜŞ İÇİN SMN GEZİNTE REFERANSI

Bu makale boyunca dünya koordinat düzleminin x eksenini, dört bacaklı robotun yürüyüş yönü, y eksenini yürüyüş yönüne dik ve z eksenini zemine dik olarak tanımlanmıştır. Başka bir koordinat sistemi robotun üstünde tanımlandı ve bu koordinat sistemi z eksenini hariç dünya koordinat sistemiyle aynı eksen

hizalmasına sahip ve z eksenini ötelenmiş durumda. Dünya koordinat düzleminin x ve y eksenleri şekil 1'de gösterilmiştir.

Hareket esnasında robotun bacak çiftleri aynı anda salınmıyor. Bu çiftler şekil 1'de görüldüğü şekilde 1-3 ve 2-4'tür. Her bacak çifti salınırken yerdeki bacak çifti arasında destek doğru parçası oluşur. SMN gezece referansı bu doğru parçası üzerinde oluşturulmalıdır ki kararlı harekete ulaşılabilir. Ayrıca literatürde görüldüğü üzere SMN kriterinde genelde destek doğru parçasından değil destek poligonundan bahsedilir. Fakat gerçek hayattaki uygulamalarda iyi ayak arasındaki mükemmel doğru parçası yerine, ince bir şerit robotu destekler.

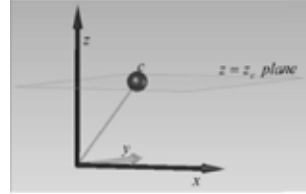
SMN gezece referansını elde edebilmek için ayakların yerleşim konumları ve zamanları saptanmak zorundadır. Şekil 2'de SMN gezece referansının 5 aşaması için ayak yerleşim konumlarının yapısı gösterilmiştir. Yürüyüş gerekliliklerinin tam destek süresince sıfır olmadığı söylenmelidir. Bu ayak çiftleri arasında oluşan destek doğru parçalarının birbirlerini kesmemelerinden ötürü ortaya çıkar. SMN bu destek doğru parçaları üzerinde hareket etmelidir ve bu hareket için dörtlü destek safhası tahsis edilmelidir ki SMN gezinmesi kesintisiz olsun.



Şekil 2. SMN referanslarının 5 adımlık yürüyüş için yapısı. Daire içindeki numaralar hareket evrelerini temsil eder. Koyu renkli daireler destek bacağına gösterir. Kalın çizgiler içinde bulunulan destek periyodunda SMN referansını gösterir. Kesik çizgiler destek bacakları arasındaki doğru parçasıdır. Dikdörtgen ve elmas şekilli şekiller 4lü destek durumunda destek poligonunu gösterir.

Şekil 1'deki 1. fazda dört bacaklı robot dikdörtgen bir desten poligonu üzerinde ayakta durmaktadır. 2. Fazın başında SMN gezinmesi 4 ve 2 numaralı ayakta geçen doğruya doğru hareket eder. SMN'nin hareketi bu doğruya ulaştığı zaman sonlanır. Bu konumlama bir sonraki salınım fazı (faz 3) için hazırlıktır. Aynı zamanda 2. Fazda SMN gezinmesi ileri doğru (x eksenini yönünde) de hareket eder. 3. Fazda robot 2 ve 4 numaralı ayaklar tarafından desteklenir. SMN x eksenini doğrultusunda ileri doğru 2 ve 4 numaralı ayakları birleştiren doğru üzerinde hareket eder. 3 numaralı faz salınan bacakların verile temasıyla tamamlanır. 4 numaralı evre de SMN 3 ve 1

numaralı ayakların arasındaki doğruya doğru ileri doğru hareket etmeye başlar. Bu faz da SMN doğruya ulaştığında sona erer. 4. Fazdan sonra dört bacaklı robotun geri kalan SMN gezinmesi 11. Fazda (son çift destek fazına) kadar periyodik olarak devam eder. Şekildeki çift numaralı fazlar dörtlü destek fazlarıdır. Aynı şekilde tek numaralı evreler de çift destek evreleridir. 11. Fazda salınan bacaklar adım mesafesinin yarısını katederek x eksenini doğrultusundaki destek bacaklarıyla aynı hzaya gelirler. Bu son fazla SMN gezinmesi destek poligonunun ortasına gelir ve hareket sonlanır.



Şekil 3. Doğrusal Ters Sarkaç Modeli

### III. ÖNİZLEME KONTROLÜ KULLANILARAK RAM HESAPLANMASI

DTSM, ayaklı robotların referans üretimi için kolayca kullanılabilen sade bir modeldir. Robotun gövdesi, RAM da bulunan bir nokta kütle olarak yaklaşılanr. Bu nokta yerdeki kaymayan bir noktaya ağırlıksız bir kol ile bağlıdır. Nokta ağırlık ve RAM çakıştığı için bu ağırlıksız kol, destek bacağı için ideal bir modeldir. DTSM şekil 3'de resimlendirilmiştir. Şekildeki  $c = (c_x \ c_y \ c_z)^T$  nokta ağırlığın koordinatları olup,  $c_z$  sabit bir sayıdır. Bu varsayıma dayanarak, x ve y yönlerindeki RAM ve SMN arasındaki ilişki ayrılmış hale geliyor [10].

$$p_x = c_x - (z_c/g)\ddot{c}_x \quad (1)$$

$$p_y = c_y - (z_c/g)\ddot{c}_y \quad (2)$$

(1) ve (2) numaralı denklemlerde, g yerçekimi katsayısı,  $z_c$  nokta ağırlığın hareketli olduğu düzlemin yüksekliği,  $p_x$  ve  $p_y$  de SMN koordinatlarıdır.

SMN gezece referansından RAM hesaplanması önemli bir problemdir. [10] bu problem önizleme kontrolü kullanarak bir çözüm önermiştir. Bu öneri aşağıdaki sistem tanımını kullanır.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} c_x \\ \dot{c}_x \\ \ddot{c}_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_x \\ \dot{c}_x \\ \ddot{c}_x \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u_x \quad (3)$$

$$p_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -z_c/g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_x \\ \dot{c}_x \\ \ddot{c}_x \end{bmatrix} \quad (4)$$

Sistemin kontrol girdisi  $u_x$  RAM ivmesinin zamana göre birinci dereceden türevidir. Sistemin çıktısı ise x eksenindeki SMN referans pozisyonudur. 2. Bölümde hesaplandığı gibi SMN gezece referansları, kontrol girdisi tarafından takip edilir. Sonuç olarak sistem RAM gezece referanslarını durum değişkenleri olarak hesaplar bunlar da sistemi SMN gezece referansını takip etmek zorunda bırakır. (3) ve (4) numaralı denklemlerin sisteme önizleme kontrolü uygulanabilmesi için ayrı zamanlıya çevrilmesi gerekir:

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k \quad p_k = Cx_k \quad (5)$$

$$x_k = \begin{bmatrix} c_x(kT) & \dot{c}_x(kT) & \ddot{c}_x(kT) \end{bmatrix}^T \quad u_k = u_x(kT) \quad (6)$$

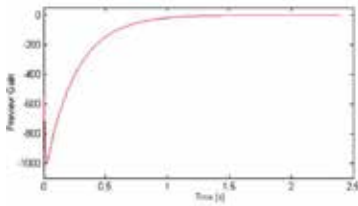
$$p_k = p_x(kT)$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & T & T^2/2 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} B = [T^3/6 \quad T^2/2 \quad T]^T \quad C = [1 \quad 0 \quad -z_c/g] \quad (7)$$

$k$  ayrıık zaman dizini ve  $T$  örnekleme periyodudur. Denklem (5) ve (7)'deki sistem tanımı,  $y$  eksenindeki hareket için de tanımlanmıştır. Bu yüzden durum değışkeni ve sistem çıktısı sırasıyla  $x_k = [c_y(kT) \quad \dot{c}_y(kT) \quad \ddot{c}_y(kT)]^T$  ve  $p_k = p_y(kT)$  olarak değıştirilebilir.  $x$  ve  $y$  kordinatları için hesaplamalar ayrı ayrı yapılır. Önizleme kontrolü,  $N_L$  döngülerindeki referans değerlerine zaman içinde direk bakması ve performans dizinini o period üzerinde minimize edecek optimal bir kontrol girdisi hesaplamasıyla klasik kontrol yöntemlerinden farklılık gösterir. Rosenthal ve Tomizuka ayrıık zamanlı sistemlerde optimal kontrol girdisi hesaplamak için bit yöntem geliştirdiler [29]. Bu metod Katayama tarafından tamamlandı [30]. Sistemi kontrol eden  $u_k$  fonksiyonunun optimizasyonunu hesaplayan performans dizini aşağıdadır:

$$J = \sum_{i=k}^{\infty} \{Q_e e(i)^2 + \Delta x^T(i) Q_x \Delta x(i) + R \Delta u^2(i)\} \quad (8)$$

Kontrol girdisinin hesaplanması ve performans dizininin (8) deayları ayrııntılı bir şekilde [30] da açıklanmıştır. Denklem (8) in içindeki  $e(i) = p_i - p_i^{ref}$  sistem çıktısı ve referans arasındaki takip hatasıdır.  $\Delta x_k = x_k - x_{k-1}$  durum değışkenlerindeki değışimleri gösteren bir vektördür,  $\Delta u_k = u_k - u_{k-1}$  ise girdideki değışimleri gösteren bir vektördür.



Şekil 4. Önizleme kontrolü kazancı  $G_p(j)$  (2.5 saniye için) ( $T = 0.01$  s,  $z_c = 0.614$  m,  $Q_e = 1$ ,  $Q_x = 0$ ,  $R = 10^{-6}$ )

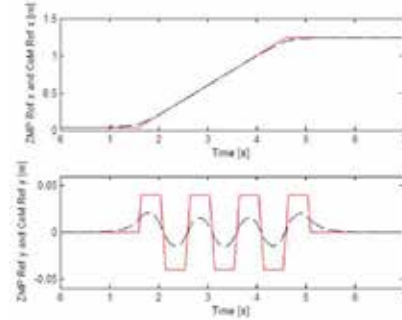
$Q_e$  ve  $R$  sıfırdan büyük skaler değışkenlerdir (çoklu girdi çıktılı sistemlerde bu değışkenler matrisler haline gelirler).  $Q_x$  ise 3x3 simetrik sıfırdan büyük tamınlı bir matrisdir.  $N_L$  döngülerine her örnekleme zamanında bakan önizleme kontrolü için (8) deki performans dizinini minimize eden optimal girdi [10, 22] da verilmiştir.

$$u_k = -G_i \sum_{i=0}^k e(i) - G_x x(k) - \sum_{j=1}^{N_L} G_p(j) p^{ref}(k+j). \quad (9)$$

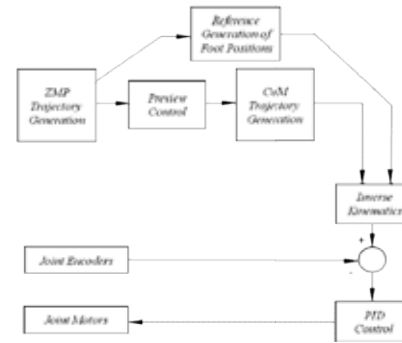
Bu eşitlikteki (9) ilk terim takip hatasının integre edilmiş halidir, ikinci terim ise durum geribeslemesidir. Üçüncü terim önizleme kontrolü terimidir ve daha fazla açıklama yapmak gerekir. Bu girdi, güncel kontrol döngüsünün önündeki  $j$  döngüleri olan referans değerlerini kullanarak bu değerleri zamanla değışen kazanım fonksiyonuyla birlikte integre eder ve sonuçları genel kontrolöre ekler.  $j$  değerlerinin güncel döngüye yakın olmasının daha fazla önemli olduğu şekil 4'de görülebilir. Bu gözlem gösterir ki gelecekteki döngülerdeki olaylar güncel döngüye yeterince yakın oldukça hesaba katılmış olur.

Denklem (9)da görüldüğü üzere,  $G_i$ ,  $G_x$  ve  $G_p(j)$ ;  $Q_e$ ,  $Q_x$ ,  $R$  ve denklem (5)deki sistem parametreleri kullanılarak hesaplanmış kazanımlardır. şekil 4'deki şekilde kontrol kazanımı  $G_p(j)$  1.6 saniye sonra sıfıra yakınsar. Bu yüzden  $N_L$  parametresini  $1.6/T$  olarak seçmek mantıklıdır [10]. Bu işlem sırasında RAM gezinmesi, sistem durum vektöründeki değerler kullanılarak elde edilir.

Yürüyüş için SMN gezinme referansı ve buna bağlı RAM referansı şekil 5'de gösterildiği şekilde önizleme kontrolü kullanılarak hesaplanır



Şekil 5. 7 adımlık yürüyüş için SMN ve RAM gezinmelerinin referansları.



Şekil 6. Kontrol blok diyagramı.



Şekil 7. Kinematik düzenleme ve animasyon ortamı.

#### IV. BENZETİM SONUÇLARI

Bu makalede kullanılan dört bacaklı robot modeli her bacağında 4 serbestlik derecesine sahiptir. İki serbestlik derecesi kalça ekleminde bulunur. Diz ve bilek eklemleri birer serbestlik derecesine sahiptir. Robotun kinematik düzenlemesi şekil 7'de gösterilmiştir. Aynı şekil üzerinde animasyon ortamı da gösterilmiştir. Bağlantı uzunlukları ve eklem boyutları tablo 1 de gösterilmiştir. Benzetimler 3. Ve 3. Kısımda bahsedilen yöntemler kullanılarak hesaplanmış referans gezinmeleri kullanılarak yapılmıştır. Eklem pozisyonlarının referansları, RAM ve kartezyen ayak pozisyon referansları arasındaki ters kinematik problemi çözülerek bulunmuştur. Bu pozisyon referansları bağlantısız PID eklem kontrolörleri kullanılarak takip edilmiştir. Şekil 6'da benzetimde kullanılan kontrolörlerin blok diyagramı verilmiştir. Benzetimde zeminle kontak tanımlamak için

adaptif penaltı temelli algoritma kullanılmıştır. [23]de bu algoritmanın detayları açıklanmıştır.

TABLO 1. BENZETİM MODEL DEĞİŞKENLERİ

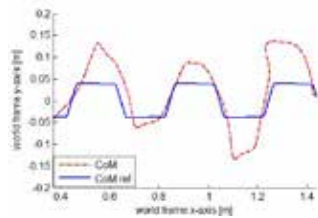
Eklemler	Boyutlar(LxWxH) [m]	Kütle[kg]
Gövde	1.2x0.6x0.15	50
Üst bacak	0.28x0.05x0.1	4.8
Alt bacak	0.27x0.05x0.1	3.85
Bilek	0.22x0.05x0.5	3.85

TABLO 2. HAREKET DEĞİŞKENLERİ

Sembol	Tanım	Değer
$T_s$	Adım süresi	0.5 s
$A$	Ayağın $y$ koordinatı	0.20 m
$2B$	Adım uzunluğu	0.20 m
$h_c$	Adım yüksekliği	0.05m

Ayak gezintileri, hareket referanslarını tamamlamak için dünya koordinat düzleminde tanımlanır. Temel olarak yumuşak bir hareket sağlamak için ayağın  $x$  ve  $z$  eksenindeki referansları için sinüs biçimli fonksiyonlar kullanılır.  $y$  eksenindeki ayak referansları ise sabit sayılardır (sağ taraf için  $A'$ 'da).

Referansı üretimi için kullanılan değişkenler Tablo 2 de verilmiştir. Benzetim sonuçlarına bir örnek olarak şekil 8'de yürüyüş periyodunun bir kısmı görülebilir, bu kısımda dört bacaklı robotun dünya koordinat sistemine göre RAM gezingereferansı ve gerçek RAM gezintisi görülür. DTSM sadeleştirilmiş bir model olduğu için kesin bir referans takibi beklenen bir sonuç değildir. RAM gezingereferansı ve gerçek RAM gezintisi arasındaki farklılık sürekli bir yürüyüşü sağlaması açısından, kararlı bir yürüyüş için kabul edilebilecek düzeyde görmektedir. Aynı zamanda şekil 9 gösterir ki robot gövdesinin ton ve yunuslama açıları, başarılı ve kararlı bir yürüyüşün başarılı olduğunu gösterir. Yürüyüşün sürekliliği bir performans göstergesi olarak görülmektedir. Performansın niceliğini belirlemek için düz bir doğrultudan birim ilerlemede ne kadar sapıldığı, robotun yuvarlanma eksenin çevresinde ne kadar döndüğü gibi faktörler kullanılabilir. Ancak literatürde bu gibi verilerin kullanımı yaygın değildir. Alternatif referans sentezi yöntemleri ağırlık merkezinin destek poligonu ile ilişkisine ya da merkezi örüntü üretici sistemlerine dayanmaktadır. Ağırlık merkezi yaklaşımları daha yavaş yürümleri beraberinde getirmektedir. Merkezi örüntü sistemi uygun bir alternatiftir, ancak doğrudan bir denge ölçütünü içermemektedir. Bir denge ölçütüne dayanan yöntemimizin başarı vadettiği görüşündeyiz

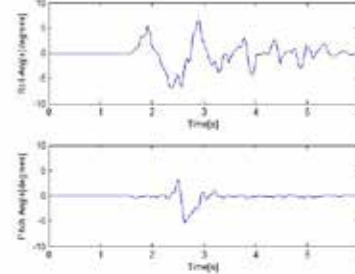


Şekil 8. RAM gezingereferansı ve gerçek RAM gezintisi (dünya koordinat sistemine göre).

## V. SONUÇ

Bu makalede dört ayaklı bir robotun yürüyüşü için kararlı SMN gezingereferansı üretilmiştir. SMN ve RAM arasındaki ilişki DTSM kullanılarak modellenmiştir. Önizleme kontrolü RAM gezingereferansını yaratmak için kullanılmıştır. RAM ve ayak pozisyonları arasındaki ters kinematik problemi çözümlenerek, eklem referansları bulunmuştur. Robotun hareket

benzetimleri önerilen SMN temelli gezingereferansı üretimi tekniği kullanılarak yapılmıştır. Benzetimde kullanılan robotun adım uzunluğu 16 cmdir ve yürüyüş ve tırıs gitme hareket şekillerinde başarıyla hareket etmiştir. Benzetim sonuçları bu deneyde önerilen referans üretimi yaklaşımını motive edecek şekildedir. İlerki çalışmalar için önizleme kontrolü temelli referans üretimi yöntemi hareket geçişleri için kullanılacaktır.



Şekil 9. 7 adım için ton ve yunuslama açıları. Bu şekil, şekil 5deki gezingereferanslarının karşılığıdır.

## VI. TEŞEKKÜRLER

Bu araştırma Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu TÜBİTAK tarafından desteklenmektedir. (Araştırma proje numarası: 114E618).

## KAYNAKÇA

- [1] K. Yoneda, H. Iiyama ve S. Hirose, "Intermittent Trot Gait of a Quadruped Walking Machine Dynamic Stability Control of an Omnidirectional Walk." In Proc. Int. Conf. on Robotics and Automation, pp: 3002-3007, 1996.
- [2] K. Yoneda and S. Hirose, "Dynamic and static fusion gait of a quadruped walking vehicle on a winding path," Advanced Robotics, pp: 125-136, 1994.
- [3] R. Kurazume, K. Yoneda and S. Hirose "Feedforward and feedback dynamic trot gait control for quadruped walking vehicle." Autonomous Robots, Vol: 12, No: 2, pp: 157-172, 2002.
- [4] H. Takeuchi, "Real Time Optimization for Robot Control using Receding Horizon Control with Equal Constraint," Journal of Robotics Systems, Vol: 20, pp: 3-13, 2003.
- [5] H. Osumi, S. Kamiya, H. Kato, K. Umeda, R. Ueda and T. Arai, "Time optimal control for quadruped walking robots," IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp:1102-1108, 2006.
- [6] K. Erbatır and O. Kurt, "Natural ZMP trajectories for Biped Robot Reference Generation," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol: 56, No: 3, 2009.
- [7] K. Soroa, T. Murakami and K. Ohnishi, "A Unified Approach to ZMP and Gravity Center Control in Biped Dynamic Stable Walking," Proceedings of IEEE ASME Int. Conf. Adv. Intelligent Mechatronics, CD-Rom, 1987.
- [8] J.H.Park, and Y.K. Rhee, "ZMP Trajectory Generation for Reduced Trunk Motions of Biped Robots," Proc. IEEE IRIS Int. Conf. Intelligent Robots and Systems, IROS '98 pp:90-95, 1998.
- [9] M. Vukobratovic, B. Borovac, D. Surla, and D. Stokic, Biped Locomotion: Dynamics, Stability and Application. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1990.
- [10] S. Kajita, F. Kahehiro, K. Kaneko, K. Fujiwara, K. Harada, K. Yokoi and H. Hirukawa, "Biped Walking Pattern Generation using Preview Control of the Zero-Moment-Point," Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol:2, pp:1620-1626, 2003.
- [11] E. Taskiran, M. Yilmaz, O. Koca, U. Seven and K.Erbatur, "Trajectory Generation with Natural ZMP References for the Biped Walking Robot SURALP," IEEE International Conference on Robotics and Aut. pp: 4237-4242, 2010.
- [12] J. Y. Kim, I. W. Park, J. H. Oh, "Walking Control Algorithm of Biped Humanoid Robot on Uneven and Inclined Floor," J Intell Robot Syst (2007) 48:457-484, January 2007
- [13] K. Erbatır, U. Seven, E. Taskiran, Ö. Koca, M. Yilmaz, G. Kızıltas, M. Ünel, A. Sabanovic, A. Onat, "SURALP: A New Full-Body Humanoid Robot Platform," IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 2009, St. Louis, MO, USA, Ekim 2009.
- [14] H. Takeuchi, "Development of MEL HORSE," IEEE International Conference on Robotics and Automation pp: 3165-3170, 2001.
- [15] W. Pengfei, H. Bo and S. Lining, "Walking research on multi-motion mode quadruped bionic robot based on moving ZMP," IEEE International Conference on Mechatronics & Automation, Vol:4, pp:1935-1940, 2005.
- [16] M. Kalakrishnan, J. Buchli, P. Pastor, M. Mistry and S. Schaal, "Fast, robust quadruped locomotion over challenging terrain," IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp:2665-2670, 2010.
- [17] C. Theeravithayangkura, T. Takubo, K. Ohara, Y. Mae and T. Arai, "Dynamic Rolling-walk Motion by Limb Mechanism Robot ASTERISK," IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, pp:2659-2664, 2009.
- [18] K. Byl, A. Shkolnik, S. Prentice, N. Roy and R. Tedrak, "Reliable Dynamic Motions for a Stiff Quadruped," Springer Tracks in Advanced Robotics, Vol:54, pp:319-328, 2009
- [19] B. Verrelst, O. Stasse, K. Yokoi, B. Vanderborght, "Dynamically Stepping Over Obstacles by the Humanoid Robot HRP-2," Proc. IEEE/RAS International Conference on Humanoid Robots, Cenova-Italya, Aralık 2006
- [20] K. C. Fidan, T. Akbaş, Ş. E. Eskimez, S. Özel, Ö. K. Adak, Ö. Drama, M. Konukoğlu, G. Yılmaz, K. Erbatır, "Dört Bacaklı Robotlar için Önizlemeli Kontrol ile Sıfır Moment Noktası Tabanlı Yürüme Yörüngesi Sentezi-ZMP Based Locomotion Trajectory Synthesis for Quadruped Robots with Preview Control," Turkish Automatic Control Conference, September 2011, Izmir, Turkey, (In Turkish)
- [21] M. Tomizuka, Rosenthal, D.E., "On the Optimal Digital State Vector Feedback Controller with Integral and Preview Actions," Trans. of the ASME, J. of Dyn. Sys. Meas. Contr., 101, pp:172-178, 1979.
- [22] T. Katayama, Ohki, T., Inoue, T. and Kato, T., "Design of an Optimal Controller for a Discrete Time System Subject to Previewable Demand," Int. J. Control, Vol:41, No:3, pp:677-699, 1985.
- [23] K. Erbatır, A. Kawamura, "A New Penalty Based Contact Modeling and Dynamics Simulation Method as Applied to Biped Walking Robots," CD Proc. FIRA World Congress 2003, Vienna, Austria

# Dört Bacaklı Robotlarda Merkezi Örüntü Üretici ve Genetik Algoritmalar ile Referans Sentezi

Ö. Kemal Adak, M. Mert Gülhan, Koray Erkekli, Beste Bahçeci ve Kemalettin Erbatur  
Mekatronik Mühendisliği  
Sabancı Üniversitesi  
İstanbul, Türkiye  
E-mail: omerkemal, mertgulhan, korayerkekli, bestebahceci, erbatur@sabanciuniv.edu

**Özetçe** —Bu çalışmada Merkezi Örüntü Üretimi (MÖÜ) ile referansları sentezlenen dört bacaklı robotun dengeli yürüyüşü önerilmiştir. MÖÜ biyolojiden ilham alınarak oluşturulan uygun referans sentezi yöntemidir. Bu yöntemde kullanılan uygun parametreleri belirlemek, robotun düşmesini engellemek için önemlidir. Çalışmamızda bu parametreleri belirlemek için yine biyolojiden ilham alınarak oluşturulan Genetik Algoritma (GA) optimizasyon yöntemi kullanılmıştır. Genetik Algoritma'nın amaç fonksiyonu denge ve enerji tüketimi olarak seçilmiştir. MÖÜ yöntemi ile üretilen referanslar, 16 serbestlik dereceli dört bacaklı robotumuza üç boyutlu (3D) tam dinamikli benzetim ortamında uygulanmıştır. Benzetim sonuçları önerilen metodun geçerliliğini kanıtlamıştır.

**Anahtar Kelimeler**—Dört Bacaklı Robot, Referans Sentezi, Merkezi Örüntü Üretimi, Genetik Algoritma.

## I. GİRİŞ

Bacaklı robotların, arama kurtarma çalışmalarından, uzay operasyonlarına, askeri araştırmalardan, eğlence sektörüne kadar geniş bir çalışma yelpazesi vardır. Son 25 yılda bacaklı robotların araştırma alanları ciddi şekilde gelişmiştir. Bacaklı robotların, özellikle dört bacaklı olanların, engebeli arazide diğer karada hareket eden robot türlerine nazaran ciddi bir avantajı vardır. Fakat bu avantaj, dört bacaklı robotların engebeli arazide düşmeden hareket edebilmesi için yeterli değildir. Dört bacaklı robotların yüksek serbestlik dereceleri ve doğrusal olmayan dinamik yapısı bu görevi zorlaştırmaktadır.

Referans sentezi, dört bacaklı robotlarda dengeli hareketin sağlanması açısından hayati önem taşır. Kararlı bir referans sentezi yönteminin kullanılmadığı bir durumda robotun düşme ihtimali çok düşüktür. Literatürde sıkça kullanılan çeşitli kararlı referans sentezi yöntemleri vardır. Biyolojiden ilham alınarak oluşturulan oluşturulan Merkezi Örüntü Üretimi (MÖÜ) bunlardan bir tanesidir.

1987 yılında, Matsuoka sinir hücrelerinin çalışma prensibini, matematiksel olarak modellemiştir [1]. 1991 yılında Taga ve çalışma arkadaşları bu nöron osilatör modelini, bacaklı robotlarda referans sentezi yöntemi olarak kullanmışlardır [2]. Kimura ve çalışma arkadaşları Taga'nın

çalışmasını devam ettirerek, önerilen yöntemi “Patrush” ve “Tekken” isimli dört bacaklı robotlarına uygulamışlardır [3]. Ijspeert, MÖÜ yönteminin gelişmesine ciddi şekilde katkı vermiştir. Ijspeert MÖÜ yöntemini insansı robotların ve yüzen semender robotların referans sentezinde kullanmıştır [4]. Tsujita ve çalışma arkadaşları, doğrusal olmayan osilatörler kullanarak dört bacaklı robotlarının referanslarını sentezlemişlerdir [5]. Liu, Van Der Pol ve Faz osilatörlerini ayrı ayrı kullanarak dört bacaklı robotlar için referans sentezi gerçekleştirmiştir [6, 7]. Adak ve çalışma arkadaşları MÖÜ yöntemini GA ile birleştirerek dört bacaklı robotlarda kararlı referans sentezleri gerçekleştirmiştir [8, 9]. Bu çalışmalarda GA için üç farklı amaç fonksiyonu kullanılmıştır. Seçilen amaç fonksiyonları denge, enerji tüketimi, eşit oranda denge ve enerji tüketimi esas alınarak belirlenmiştir.

Bu çalışmada MÖÜ yöntemi, dört bacaklı robot için kararlı tırıs yürüyüşü referansları üretmek için kullanılmıştır. MÖÜ yönteminde kullanılan faz osilatörünün uygun parametre seçimi için GA uygulanmıştır. GA yönteminin amaç fonksiyonu denge ve enerji tüketimi olarak seçilmiştir. Akbaş ve çalışma arkadaşlarının araştırmalarından esinlenilerek [10], benzetim ortamında robotun gövdesine üç ekseninde yapay burulumsal yaylar eklenmiştir. Bu yaylar benzetim sırasında GA tarafından belirlenen kararsız parametreler sonucunda robotun düşüp benzetimi durdurmasını engellemesinin yanında, amaç fonksiyon için dengenin tanımlanabilmesine de olanak sağlamıştır. GA sonucunda bulunan en iyi parametreler, robotun gövdesindeki burulumsal yaylar çıkarılarak tekrar benzetim ortamında test edilmiştir ve robotun düşmeden yürüdüğü gözlemlenmiştir. Bu benzetimler sonucunda üretilen referansların kararlılığı ve geçerliliği kanıtlanmıştır.

## II. MÖÜ İLE REFERANS SENTEZİ

Merkezi Örüntü Üretimi ile sentezlenen referansların üretimi için literatürde kullanılan osilatörleri iki ana başlıkta toplayabiliriz. Bunlar sinirsel osilatörler ve doğrusal olmayan osilatörlerdir: Sinirsel osilatörler, gerçek

sinir hücrelerinin çalışma prensiblerinin matematiksel olarak modellenmesiyle ortaya çıkmıştır. Doğrusal olmayan osilatörler ise sinirsel osilatörlerin çıktılarını iyi bir şekilde taklit eden osilatörlerdir.

Bu çalışmada, doğrusal olmayan osilatörler sınıfına giren Kuramoto'nun faz osilatörü kullanılmıştır [11]. Bu osilatörün matematiksel modeli aşağıdaki gibidir;

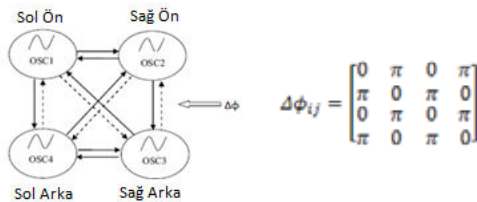
$$\dot{\theta}_i = \omega_i + \sum_{j=1}^n \lambda_{ij} \sin(\theta_j - \theta_i - \Delta\phi_{ij}), \quad (1)$$

$$\dot{r}_i = \mu_i(R_i - r_i) - \frac{3}{2}\mu_i\dot{r}_i, \quad (2)$$

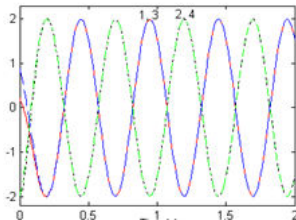
$$x_i = r_i(1 + \sin\theta_i), \quad (3)$$

Bu modelde  $\theta_i$  i numaralı osilatörün fazını,  $\omega_i$  ise frekansını temsil etmektedir. Her osilatör kendi frekansında çalışırken,  $\lambda_{ij}$  terimi bütün osilatörleri birbirine senkronize etmektedir.  $\Delta\phi_{ij}$  i ve j numaralı osilatörler arasındaki faz farkını temsil etmektedir. i numaralı osilatörün genliği olan  $r_i$  ise pozitif sabit sayı olan  $R_i$  terimine asimptotik olarak yakınsamaktadır.  $\mu_i$  pozitif bir sabiti temsil ederken,  $x_i$  ise i numaralı osilatörün çıktısıdır. Faz osilatörü kararlı limit çevrimi özelliğine sahip olduğu için, çıktıları kararlıdır.

MÖÜ ile dört bacaklı robot yürüyüş referansı sentezlerken, osilatörler arasındaki faz farkını doğru ayarlamak çok önemlidir. Osilatörler arasındaki faz farkı, robot bacaklarının hareketleri arasındaki faz farkını temsil etmektedir. Bu faz farkı da robotun yürüyüş tipini belirlemektedir. Bu çalışmada kullanılan tırıs, köşegen bacakların aynı anda hareket ettiği yürüyüş tipidir. Tırıs için osilatörleri birbirine bağlayan matrisimiz şekil 1'deki gibi belirlenmiştir. Osilatörlerin çıktıları ise şekil 2 de gösterilmiştir.



Şekil 1 - MÖÜ ağı ve osilatörleri bağlayan matris.



Şekil 2 - Osilatör çıktıları.

Bu çalışmada MÖÜ ağının çıktıları, dört bacaklı robotun ayak referansları olarak atanmıştır. Kararlı yürümeye uygun ayak referansları ise osilatör çıktılarına GA uygulandıktan sonra bulunmuştur. Her bir bacakta klem referansları ise belirlenen ayak referansları kullanılarak, ters kinematik yöntemiyle bulunmuştur.

### III. GENETİK ALGORİTMA

Bu çalışmada ana değişken olarak robotun yürüyüş hızı seçilmiştir ve diğer parametreler yürüyüş hızına bağlı olarak optimize edilmiştir. Robotun yürüyüş hızı aşağıdaki denklem ile temsil edilmiştir;

$$v_{ort} = B\omega \quad (4)$$

Bu denklemde B adım uzunluğunu,  $\omega$  ise adım frekansını temsil etmektedir. GA adım yüksekliği ve adım frekansı değişkenlerini istenilen robot hızında optimize etmek için kullanılmıştır. Adım uzunluğu ise, adım frekansı optimize edildikten sonra (4) numaralı denklem kullanılarak belirlenmiştir.

GA'da kullanılacak olan değişkenler yonteme uygun şekilde ikili (0 ve 1) sisteme çevrilerek genler oluşturulmuştur. GA'ya girecek olan ilk genlerin fiziksel olarak mantıklı aralıklarda oluşturulması optimizasyonun yakınsama süresini hızlandırmaktadır. Bu sebepten adım uzunluğu, adım yüksekliği ve adım frekansı değerleri aşağıdaki aralıklarda belirlenmiştir;

$$\begin{aligned} 0.03 \text{ m} < h_s < 0.1 \text{ m} \\ 0.8 \text{ s}^{-1} < \omega_s < 2.5 \text{ s}^{-1} \\ 0.01 \text{ m} < B_s < 0.25 \text{ m} \end{aligned} \quad (5)$$

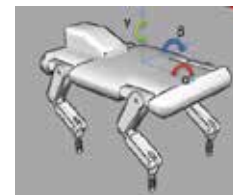
Robot gövdesinin benzetim ortamının sabit koordinat eksenine göre oryantasyonu, robotun dengesinin ölçülmesi için kullanılan niceliklerden biridir. Bu robot oryantasyonu robot gövdesinin yalpa açısı, yunuslama açısı ve sapma açısı olarak temsil edilebilir. Bu açılar Şekil 9'da  $\alpha$ ,  $\beta$  ve  $\gamma$  olarak temsil edilmişlerdir. Bu açılar kullanılarak robotun dengesinin ölçülebilmesi için, robotun gövdesine üç eksende yapay burumsal yaylar eklenmiştir. Bu yaylar amaç fonksiyon için dengenin tanımlanabilmesinin yanında belirlenen kararsız parametreler sonucundan robotun düşüp benzetimi durdurmasını engellemesine de olanak sağlamıştır. Eklenen yapay burumsal yayların robot gövdesine etkisi aşağıdaki denklemler ile belirtilmiştir;

$$u_{yalpa} = K_{yay}\alpha + K_{damper}\dot{\alpha} \quad (6)$$

$$u_{yunuslama} = K_{yay}\beta + K_{damper}\dot{\beta} \quad (7)$$

$$u_{sapma} = K_{yay}\gamma + K_{damper}\dot{\gamma} \quad (8)$$

Denklemde  $u$  ile temsil edilen değişkenler  $x$ ,  $y$  ve  $z$  eksenleri etrafındaki destek momentlerini,  $K_{yay}$  yay katsayısını ve  $K_{damper}$  damper katsayısını temsil etmektedir. Yay katsayısı ve damper katsayısı değerleri sırasıyla 250 N/m ve 1500 Ns/m olarak seçilmiştir. Bu değerler robot gövdesinin makul oranlarda hareket etmesine olanak sağlamaktadır.



Şekil 3 - Robot gövdesine yerleştirilen yapay burumsal yay-damper sistemi ve robotun dönme açıları

Yapay burumsal yay-damper sisteminde ölçülen momentler, robot gövdesinin dengesinin ölçümünde kullanılmaya elverişlidirler. Yapay burumsal yay-damper sisteminden gelen tepki momentleri, GA için performans ölçümünde kullanılabilir. Bu hedefle belirlenen amaç fonksiyonu aşağıdaki gibidir.

$$f_B = \frac{\sum(u_{yalpa} + u_{yunuslama} + u_{sapma})}{t_s} \quad (9)$$

Bu denklemde  $t_s$  robotun belirlenen sabit adım sayısına ulaşana kadar benzetim ortamında geçen süreyi temsil etmektedir.

Robot hareketinde önemli olan bir başka nitelikte enerji tüketimidir. Robotun enerji tüketiminin azalması, robotun kullanım süresini arttırmakta ve enerji maliyetini düşürmektedir. Bu sebeple enerji tüketimi içinde bir amaç fonksiyon belirlenmiştir;

$$f_E = \frac{\bar{P}}{\bar{V}} \quad (10)$$

Bu denklemde  $\bar{P}$  eklem eyleyicilerinin benzetim süresince harcadıkları gücün ortalamasını,  $\bar{V}$  ise robot gövdesinin ortalama hızını temsil etmektedir.

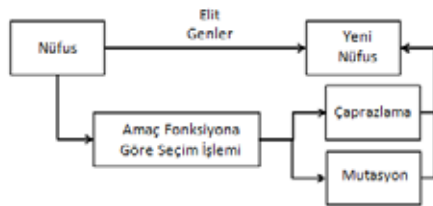
Robot yürüyüşünde hem dengenin hem de enerji tüketiminin önemli rol oynaması yeni bir amaç fonksiyonun gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Bu nedenle GA'da kullanılması amacıyla yeni bir amaç fonksiyon belirlenmiştir;

$$f_e = w_1 f_B + w_2 f_E \quad (11)$$

$w_1$  ve  $w_2$  ağırlıklı değerleri denge veya enerji tüketiminin önemine göre birbirlerinden farklı olarak belirlenebilir. Bu çalışmada ikisinede eşit derece önem verildiği için bu iki değer 1 olarak belirlenmiştir. GA'nın amacı belirlenen bu son amaç fonksiyonu minimize etmektir. GA'da kullanılan parametreler aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Table 1: GA parametreleri

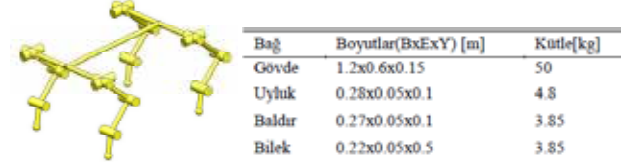
Çaprazlama Oranı	%45
Mutasyon Oranı	%10
Hayatta Kalan Elit Gen Oranı	%10
Toplam Nüfus	20
Tekrarlama Sayısı	20



Şekil 4 – Yeni nüfus üretim şeması.

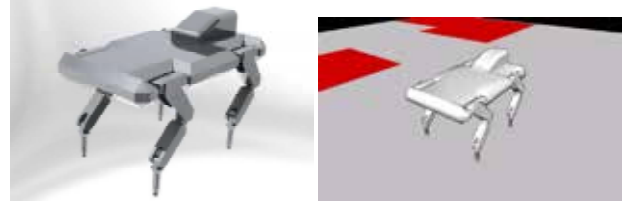
#### IV. BENZETİM ORTAMI

Bu çalışmada kullanılan dört bacaklı robotun her bacağına iki tanesi kalçada, bir tanesi dizde ve bir tanesi bilekte olmak üzere toplam dört serbestlik derecesi bulunmaktadır. Dört bacaklı robotun kinematik düzeni ve ölçüleri Şekil 5'de gösterilmiştir.



Şekil 5 – Robotun kinematik düzeni ve ölçüleri.

Gerçekleştirilen benzetimler için Newton-Euler yöntemi tabanlı tam dinamikli üç boyutlu benzetim ve animasyon ortamı kullanılmıştır. Bu benzetim ortamında temas modeli olarak uyarlamalı ceza tabanlı yer modeli kullanılmıştır. Benzetim ortamının işleyişi ve temas yüzeyi modellenmesi hakkındaki ayrıntılı bilgi [12] numaralı referans da bulunabilir.



Şekil 6 – Robotun katı modellemesi ve benzetim ortamı.

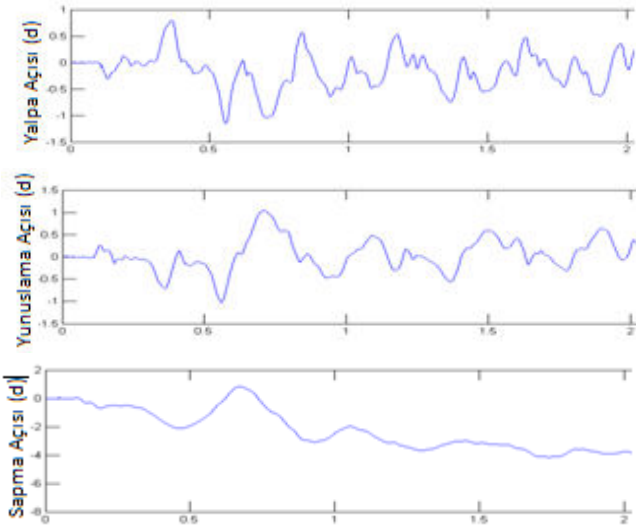
#### V. BENZETİM SONUÇLARI

GA ile optimize edilmiş MÖÜ tabanlı referans sentezleme işlemi 16 serbestlik dereceli dört bacaklı robot üzerinde tırs yürüyüşü için uygulanmıştır. GA sonucunda elde edilen yürüyüş parametreleri iki farklı robot hızı için Tablo 2'de belirtilmiştir.

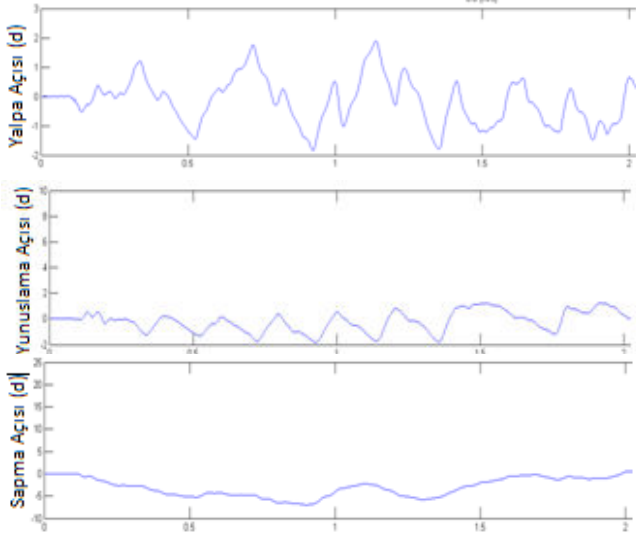
Tablo 2: Benzetim Sonuçları

Hız (m/s)	Adım Frekansı ( $s^{-1}$ )	Adım Yüksekliği (m)	Adım Uzunluğu (m)
0.1	0.8772	0.03	0.114
0.6	2.5	0.04	0.24

Belirlenen yürüyüş parametreleri, robotun gövdesindeki yapay burumsal yay-damper sistemi çıkarılarak, yeniden benzetim ortamında uygulanmıştır. Yapılan son benzetimlerde robot başarılı bir şekilde yürüyüş işlemini tamamlamıştır. Robotun belirlenen parametrelerle düşmemesi, sentezlenen referansların kararlılığını ve kullanılan yöntemin geçerliliğini ispatlamıştır. Elde edilen bu sonuç robot gövdesinin yalpa açısı, yunuslama açısı ve sapma açısı incelenerek net bir şekilde görülebilir. Şekil 7'de 0.1 ve 0.6 m/s robot hızları için robot gövdesi açılarının benzetim süresince değişimi gösterilmiştir.



Şekil 5 – 0.1 m/s için benzetim sonuçları.



Şekil 6 – 0.6 m/s için benzetim sonuçları.

## VI. SONUÇLAR

Yapılan benzetim sonuçları incelenecek olursa, 0.1 m/s robot hızı için yalpa ve yunuslama açıları en fazla 1 derece, 0.6 m/s robot hızı için ise en fazla 2 derece değişmiştir. Bu sonuçlar sentezlenen referanslar ile çok dengeli bir yürüyüş elde edildiğini göstermektedir. Benzetim sonuçları sentezlenen referansların deneylerde kullanımını motive etmektedir.

## VII TEŞEKKÜR

Bu araştırma Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu TÜBİTAK tarafından desteklenmektedir. (Araştırma proje numarası: 114E618).

## KAYNAKÇA

[1] K. Matsuoka, "Mechanism of Frequency and Pattern Control in the Neural Rhythm Generators," Biological Cybernetics, vol: 56 pp: 345-353, 1987

[2] G. Taga, Y. Yamaguchi, H. Shimizu "Self-organized control of bipedal locomotion by neural oscillators in unpredictable environment," Biological Cybernetics, vol.65, pp.147-159, 1991

[3] Y. Fukuoka, H. Kimura, and A. Cohen "Adaptive Dynamic Walking of a Quadruped Robot on Irregular Terrain Based on Biological Concepts," International Journal of Robotic Research, vol.22, no:3-4 pp.187-202, 2003

[4] J. Ijspeert, A. Crespi, D. Ryczko and J. Cabelguez "From Swimming to Walking with a Salamander Robot Driven by a Spinal Cord Model," Science, vol.315, no:5817 pp.1416-1420, 2007

[5] S. Aoi, T. Yamashita, A. Ichikawa and K. Tsujita, "Hysteresis in Gait Transition Induced by Changing Waist Joint Stiffness of a Quadruped Robot Driven by Nonlinear Oscillators with Phase Resetting," Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent. Robots System, pp. 1915–1920, 2010.

[6] Liu, Q. Chen and J. Zhang "Coupled Van Der Pol Oscillators Utilised a Central Pattern Generators for Quadruped Locomotion," Proc. IEEE Int. Conf. on Control and Decision, pp. 3677–3682, 2009.

[7] Liu, Y. Chen, J. Zhang and Q. Chen, "CPG Driven Locomotion Control of Quadruped Robot," Proc. IEEE Int. Conf. on Systems, Man, and Cybernetics, pp. 2368–2373, 2009.

[8] Adak, Ömer Kemal. "Quadruped locomotion reference synthesis with central pattern generators tuned by evolutionary algorithms." Master Thesis 2013.

[9] Ö. K. Adak, O. Ayit, M. M. Gülhan, and K. Erbatır. "Genetic tuning of a central pattern generator for quadruped locomotion." 3rd International Electrical and Electronic Engineering and Technologies Conference (ELECTROTECH 2015) 2015.

[10] Akbas, T. "Bipedal Humanoid Robot Walking Reference Tuning by the Use of Evolutionary Algorithms" Master Thesis, İstanbul, Sabancı University, 2012

[11] Acebron J A, Bonilla L L, Vicente C J P, et al. "The Kuramoto model: A simple paradigm for synchronization phenomena," Rev Mod Phys, vol:77 pp: 137–185, 2005

[12] Erbatır, K. and Kawamura, A., "A New Penalty based Contact Modeling and Dynamics Simulation Method as Applied to Biped Walking Robots," Proceedings of the 2003 FIRA World Congress, Vienna, Austria, October 2003

# Katmanlı İmalat Tekniği Kullanılarak Endüstriyel Robot Gripper Üretimi ve Operatör Eklem Hareketleri ile Manipülasyonu

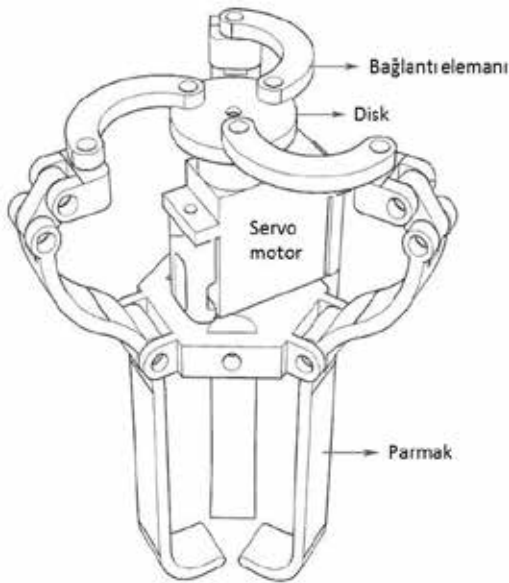
Serdar TEPEYURT, Savaş DİLİBAL, Haydar ŞAHİN  
Mekatronik Mühendisliği Bölümü  
İstanbul Gedik Üniversitesi  
İstanbul, Türkiye  
savas.dilibal@gedik.edu.tr, haydar.sahin@gedik.edu.tr

**Özetçe** —Endüstriyel robotlarda gripper mekanizmasının fonksiyonelliği manipülatörün işlevselliğini artıran ana parametrelerden biridir. Bu çalışmada, silindirik cisimlerin tutulması amacıyla tasarlanan endüstriyel robot gripper sistemi eriyik yığıma modelleme (FDM) katmanlı imalat tekniği kullanılarak polilaktik asit (PLA) malzeme ile üretilmiştir. Üretimi yapılan gripper sisteminde eyleyiciden gripper mekanizmasına aktarılan kuvvet ve moment değerleri hesaplanmıştır. Silindirik cisimleri aktif kavrama ile kavrayabilme mekanizması için gerekli kuvvet ve moment denklemleri çıkarılmıştır. Gripper sisteminin hareket sensörü vasıtasıyla operatör eklem hareketleri ile manipülasyonu sağlanmıştır.

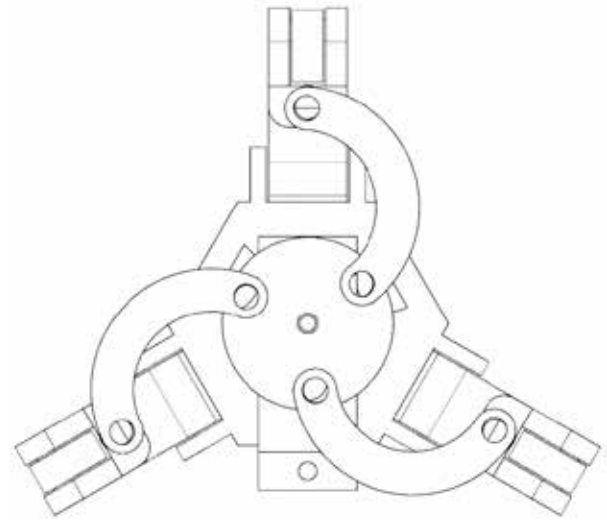
**Anahtar Kelimeler** — Katmanlı imalat, Robot gripper, Aktif kavrama, Hareket sensörü

## I. GİRİŞ

Endüstriyel robot gripper sistemlerinde bugüne kadar birçok farklı tasarım [1-2], eyleyici [3], sensör [4] ve kontrol algoritması [5] kullanılmıştır. Eyleyici tarafından cisme iletilen kuvvetin sağlayacağı hassas kavrama işlemi için gripper mekanizmaları üzerine yerleştirilen dokunma ve kuvvet algılayan sensör sistemleri, üzerinde araştırma yapılan konulardandır.



Şekil 1. Üretilen üç parmaklı gripper sisteminin tasarımı



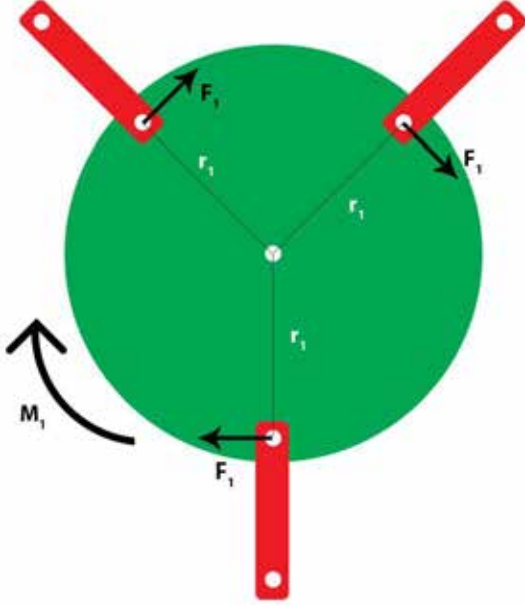
Şekil 2. Üretilen gripper sisteminin tasarımının üstten görünümü

Bu çalışmada, silindirik cisimlerin tutulması amacıyla tasarlanan endüstriyel robot gripper sistemi eriyik yığıma modelleme (FDM) katmanlı imalat tekniği kullanılarak 50 µm katman kalınlığında PLA malzeme ile üretilmiştir. Üretilen üç parmaklı gripper sisteminin tasarımı Şekil 1'de üstten görünümü Şekil 2'de gösterilmiştir. Üretimi yapılan gripper sisteminde servo motordan gripper mekanizmasına aktarılan kuvvet ve moment değerleri hesaplanmıştır. Gripper sisteminin operatör el parmak hareketleri ile kontrolü için infrared (IR) ve kamera sisteminden oluşan hareket sensörü kullanılmıştır.

## II. GRIPPER TAHRİK MEKANİZMASI

Katmanlı imalat yöntemi kullanılarak üretimi yapılan gripper sisteminde eyleyici olarak servo motor kullanılmıştır. Servo motor tahriki, servo motorun rotorundan bir disk vasıtası ile bağlantı elemanlarına kuvvet iletimiyle gerçekleşmektedir. Servo motor 180° dönüşünü tamamladığı anda bağlantı elemanları birbirinden uzaklaşmakta ve parmaklar kapanmaktadır. Tam tersi hareket olduğu esnada ise bağlantı elemanları kapanarak eklemleri çekmekte ve parmakları açmaktadırlar.

Gripper mekanizması üzerinde kuvvet iletimini gösteren diyagram Şekil 3'de gösterilmiştir. Bu diyagrama göre motorun ilettiği moment silindir üzerinde bulunan üç bağlantı elemanı vasıtasıyla iletilen kuvvete dönüşür. Şekil 4'deki gripper katı modelinde kuvvet iletiminin mekanizması görülmektedir.



Şekil 3. Tahrir mekanizmasından kuvvet iletimi

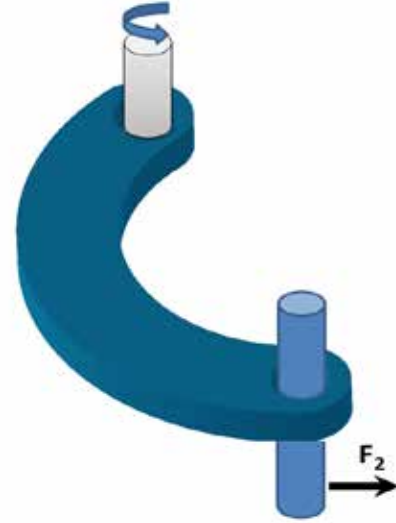
Diskin dönmesi ile oluşan moment üç bağlantı elemanına iletilen kuvvet ile kuvvet kollarının çarpımına eşit olmaktadır.

$$M_1 = 3(F_1 r_1)$$



Şekil 4. Gripper sisteminin katı modeli

Bağlantı elemanları ile iletilen kuvvetler gripper mekanizmasında üç parmakta aktif kavrama kuvvetine dönüştürüldüğü Şekil 5'de görülmektedir.

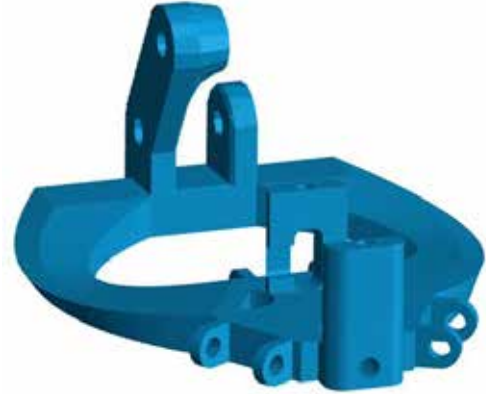


Şekil 5. Parmak uçlarına uygulanan kuvvet iletimi

Gripper mekanizmasında parmak uçlarına uygulanan kuvvet aşağıdaki kuvvet dengesini oluşturan denklemle bulunur.

$$F_1 l_1 = F_2 l_2$$

Gripper sisteminin manipülatöre bağlantısı için sisteme uygun bir flanşın tasarlanması gerekir. Bu maksatla, Şekil 6'da gösterilen flanş üretilen gripper için tasarlanmıştır. Flanşın gripper sistemine bağlanmış hali Şekil 7.de gösterilmiştir.



Şekil 6. Tasarlanan gripper flanşının katı modeli

Katmanlı imalat tekniği ile üretimi yapılan gripper sisteminin silindirik bir parçayı kavraması Şekil 7'de görülebilir. Yapılan testlerde maksimum 50 mm çapındaki silindirik cisimlerin üretilen gripper ile kavranabildiği tespit edilmiştir.



Şekil 7. Üretimi yapılan gripper sisteminin silindirik bir parçayı kavraması

### III. KONTROL SİSTEMİ

Gripper mekanizmalarında mevcut olan sürtünme ve boşluklar kontrolde lineer olmayan etkiler oluşturmasından dolayı kontrolcü algoritması bunları dikkate alarak geliştirilmelidir. Kavranan cismin esnekliğine bağlı olarak lineer olmayan bu tip etkiler (boşluk, sürtünme, histerisiz ve şekil değişimi) artabilir. Kullanılan kontrolcü algoritması bu etkileri azaltma maksatlı rol oynamalıdır. Aynı zamanda, gripper mekanizmasında eklem sayısı arttıkça boşluk ve sürtünme arttığından dolayı, eklemlerde kuvvet iletimi gerçekleştirilirken gripper kontrolü ve bakımı güçleşir. Bu nedenle gripper sistemlerinde kontrolcü algoritması seçimi dikkat edilmesi gereken parametrelerden biridir.

Bu çalışmada cisimlerin uzaktan hassas olarak kavranabilmesi için üretilen gripper mekanizması tahrik sistemi, hareket sensöründen alınan sinyaller ile kontrol edilmiştir. Gripper sisteminin kontrolcü algoritması için üzerinde iki kamera ve 850 nm dalga boyunda IR ışık yayan üç IR LED bulunan hareket sensörü vasıtasıyla operatör elinin parmaklarının ve tüm eklemlerinin uzay boşluğundaki konum, rotasyon ve hız/ivmeleri tespit edilebilmektedir.

Üretilen robot gripper sistemi için uygun parmak eklem konfigürasyonu ve eşzamanlı elde edilen gripper parmak hareketleri Şekil 8'de gösterilmiştir. Kontrol algoritması, hareket sensöründen gelen sinyaller ile elin parmaklarının birbirlerine yakınlıkları vektörel olarak hesaplanarak, servo motor kontrolcüsüne uygulanması gereken kuvvet akım kontrolü ile iletilir.



Şekil 8. Operatör el hareketleri ve gripper mekanizmasının çalışması

### IV. SONUÇ

Sonuç olarak, bu çalışmada katmanlı imalat yöntemi kullanılarak gripper tasarımı ve imalatı gerçekleştirilmiştir. Endüstride operatör parmak hassasiyeti ile uzaktan yapılabilecek uygulamaların IR hareket sensörü ile hassas bir şekilde gerçekleştirilebildiği gözlemlenmiştir. Bu sistem kullanılarak, endüstride farklı işlemlerde prosese uygun gripper tasarımları geliştirilebilir. Gelecekte geliştirilecek gripper sistemlerinde, rijit ve esnek parçaların katmanlı imalatla üretimi yapılarak operatör tarafından uzaktan yapılacak işlemlerin gripper kavrama dinamiğine uygun tasarım, eyleyici, sensör ve kontrolcü algoritmaları ile sağlanması, endüstriyel robotun verimliliği ve işlevselliğini artıracaktır.

### KAYNAKÇA

- [1] Monkman Gareth J, Hesse S Steinmann R, Schunk, H. *Robot Grippers*, Germany, Wiley, 2007.
- [2] Nagel M, Giese F, Becker R. "Flexible Gripper Design Through Additive Manufacturing", *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2016*.
- [3] Dilibal S., Engeberg E.D. "Finger-like manipulator driven by antagonistic NiTi shape memory alloy actuators", *IEEE Int. Conference on Advanced Robotics, 2015*.
- [4] Koyama K., Suzuki Y., Ming A., Shimojo M. "Integrated control of a multi-fingered hand and arm using proximity sensors on the fingertips", *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2016*.
- [5] Wang X., Xiao Y., Fan X., Zhao Y. "Design and grip force control of dual-motor drive electric gripper with parallel fingers", *Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference, IEEE, 2016*.

# Investigating the Effect of Force Feedback on a Virtual Task

M. Aziziaghdam, K. Kuyucu, R. Artar  
System Design and Control Engineering Group  
Figes A.Ş.  
Istanbul, Turkey  
Email: mohammad.aziziaghdam,  
Koray.kuyucu, remzi.artar@figes.com.tr

E. Samur  
Department of Mechanical Engineering  
Bogazici University  
Istanbul, Turkey  
Email: evren.samur@boun.edu.tr

**Abstract**—Force feedback plays an important role in any telerobotic manipulation. In this research, the effect of force feedback on task completion of a virtual task has been studied. An omega.3 haptic device was used to control a model of UR3 robot in a virtual environment developed in Matlab Simulink. We performed a user study in which subjects were asked to complete a peg-in-hole task with and without force feedback. Task completion time and the reaction forces were used to compare these two conditions. Results showed that providing force feedback decreases both task completion time and reaction forces.

**Keywords**—teleoperation, force feedback, Simulink, virtual environment.

## I. INTRODUCTION

Teleoperation systems have been used in variety of engineering fields. Some of the popular areas are space engineering [1], military [2] and medicine [3]. Using such systems, one would be able to complete dangerous, remote or delicate tasks [4]. To increase the accuracy, controllability and fidelity of teleoperation tasks, operators should have a sufficient conception of the remote environment [5], [6].

Semere et al. [7] showed that realism of teleoperation was improved in presence of partial force feedback. In another study by Verner and Okamura [8] the effect of force feedback on performance of a peg-in-hole task was investigated. In their study, force feedback helped subjects to apply the minimum force in holding the peg. In a study about screw insertion in a teleoperated spinal-fusion surgery, it has been shown that force and torque feedback were necessary to complete the surgical task [9]. It also has been showed that in a virtual environment, force feedback could improve the task performance of users [10]. In a study by Santos-Carreras et al. [11] it has been shown that not only accuracy of suturing task has been significantly improved with force feedback but also subjects felt less tired after completing the task.

In this study we intended to study the effect of force feedback on a virtual reality (VR) peg-in-hole task. This task has already been used as an evaluation technique in teleoperation tasks. Hannaford et al. [12] implemented peg-in-hole task to assess the performance of a telemanipulator. It

Türkiye Robotbilim Konferansı, 2016

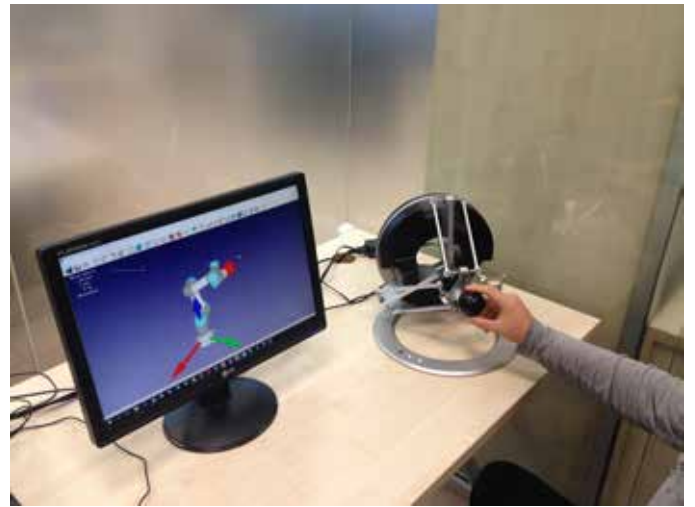


Figure 1. Experimental setup. User interacts with the virtual environment using an omega.3 haptic device.

has been also used by Samur [13] to evaluate the manipulation capabilities of different haptic devices. In order to evaluate the effect of force feedback on the VR-based experimental task, first, a virtual environment controller has been developed in Matlab Simulink interacting with an omega.3 haptic device (Force Dimension). Then, a user study was carried out. In the following chapters, the details of the setup and the experiments are provided.

## II. METHODOLOGY

The experimental setup shown in Fig. 1 consists of a haptic interface (omega.3) as a master device, and a virtual environment (VE) in which a slave robot is modelled. In addition, the setup includes a controller for haptic rendering (see Fig. 2). The controller receives position input, and outputs force commands to the haptic interface. It also sends the position data to the VE to move the slave robot.

### A. Haptic Modeling

A CAD model of UR3 (Universal Robots) has been used as the slave manipulator in VE. The virtual experimental setup

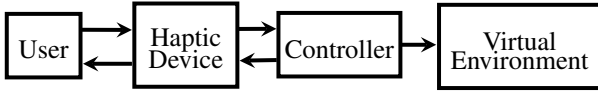


Figure 2. Haptic modeling block diagram. User is in contact with haptic device sending position data to the controller and receiving force commands from it. The virtual environment is used for visual feedback.

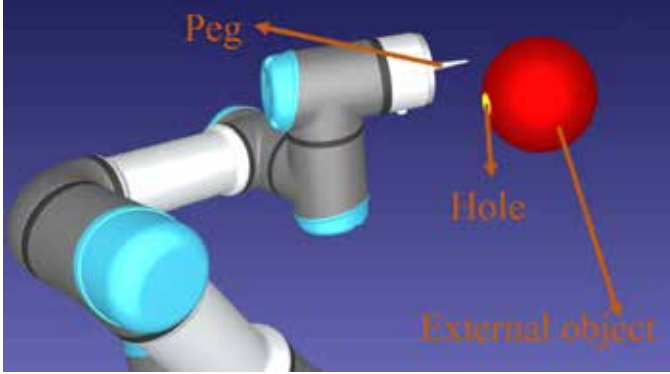


Figure 3. Virtual experimental setup implemented for the peg-in-hole test. Peg is attach to the tip of the VR model of the UR3 robot. A cylindrical hole is made inside a sphere. User is able to feel outside of the sphere and inside of the cylindrical hole when the peg touches these objects.

also involves a peg and a hole as shown in Fig. 3. The CAD models have been implemented in RoboDk software. This software was used only to visualize the movements, and all the other calculations (filtering, haptic rendering, and robot kinematics) have been implemented in Matlab Simulink.

Fig. 4 shows the top layer of the Simulink model is comprised of device communications, workspace mapping, collision detection, and inverse kinematics. This Simulink model represents the controller block shown in Fig. 1. omega.3 haptic device is connected to the controller through a USB port. A state flow block is used as the communication hub for omega.3. In this block, first the libraries of omega.3 are called, and then the position data is read using the required functions. It is possible to call the libraries once and then use the functions for the rest of the program using the state flow block.

After reading the position of the omega.3 ( $X_o$ ,  $Y_o$  and  $Z_o$  in Fig. 4), it is mapped to UR3 robot's workspace. Since the view point of the virtual environment is fixed, the whole workspace of the omega.3 is mapped to half of the UR3 robot's workspace to limit the movements of the robot. After calculating the UR3 positions ( $X_u$ ,  $Y_u$  and  $Z_u$ ), these positions were used both for visualization in the virtual setup and to obtain force feedback. Since the omega.3 is a 3 degrees-of-freedom haptic device, only translational movements of the UR3 robot were considered. Therefore, no rotational movements were observed or applied on the virtual experimental setup. In order to avoid any mismatch between the required orientation of the robot in the experiment, UR3 orientation was set to be fixed in all kinematic calculations during the experiment.

In this study collision is identified when the tip of the peg (attached to the UR3 end effector in the virtual setup) passes the outer layer of the external object including the cylindrical hole (see Fig. 3). Force generated from this collision is

calculated using a linear spring model. The stiffness of the virtual spring is selected as 500 N/m [4]. The force data is sent back to the omega.3 communication hub to provide force feedback to the user. Position of the external object, regardless of any calculated (applied) force, is fixed in space. After calculation of force, position of the UR3 robots' end effector is used to find joint positions using inverse kinematics (Fig. 4). In order to decrease the calculation time of inverse kinematics, joint movements of the UR3 model was constrained to a certain range. With this approach, we were able to increase the frame update rate, and also select the nearest orientation of joints to the current orientation when the inverse kinematics had multiple solutions.

After acquiring joint positions, these data are sent to RoboDk software to visualise the robot's movements. RoboDk software is able to receive data through TCP/IP communication. By calling the same address from Simulink and writing the appropriate data to this address, it is possible to communicate between Simulink and RoboDk in real-time.

### B. Experiment Procedure

A VR based peg-in-hole experiment was conducted to evaluate the effect of force feedback. In this experiment peg was a cylinder with a diameter of 5 mm. Similar to Fitts' tapping task [14], index of difficulty (ID) was calculated by Eq. 1 where  $A$  is the movement amplitude (distance between start and target positions) and  $W$  is the target size. In order to obtain information range from 4.0 to 8.0 bits, four combination of movement amplitude and target were used.  $W$  calculates using Eq. 2 [15] where  $H$  is the diameter of hole and  $P$  is the diameter of the peg. Three levels of  $W$  ( $W = 2, 4$  and  $8$ ) and two levels of  $A$  ( $A = 64, 128$ ) were used. First and last combinations were not used during experiment ( $W = 2, A = 64$  and  $W = 8, A = 128$ ).

$$ID = \log_2\left(\frac{A}{W} + 1\right) \quad (1)$$

$$W = H - P \quad (2)$$

The virtual experimental setup for the peg-in-hole tasks shown in Fig. 3. The peg is attached to the tip of the VR model of the UR3 robot. As it was mentioned in II, omega.3 is used to control the position of UR3 robot. The cylindrical shaped hole is inside a sphere. The diameter of the cylinder was 100 mm for all ID levels. During the experiments with force feedback, users could feel both outside of the sphere and inside of the hole when the peg touched the object.

Task completion time and applied force on the object criteria measured during the experiment. These two criteria were used to evaluate whether force feedback helps task completion in a VR based teleoperation. Task completion time is the required time for completing the task by the user. The time was measured between picking the peg and putting it into the hole. Applied force, was used to investigate whether force feedback makes any difference in the task completion. This force is the generated force during collision of the peg and the object.

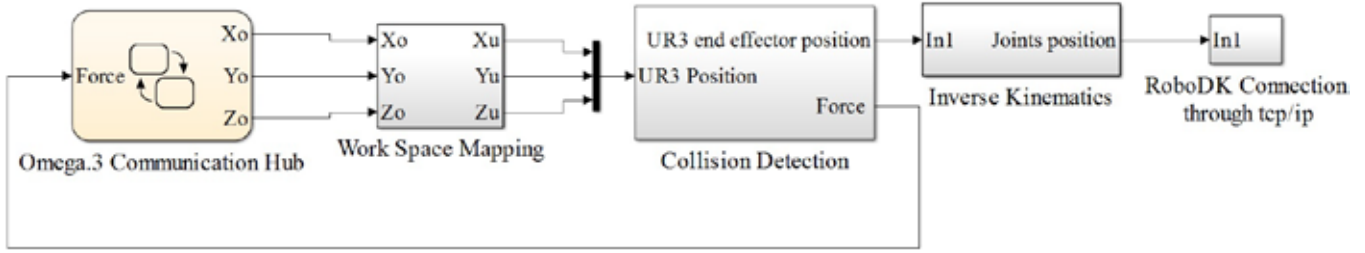


Figure 4. Simulink model used in the experimental setup. Communication with the omega.3 was achieved using a state flow block. After mapping the workspace of the omega.3 to the workspace of the UR3 robots, a collision detection algorithm was used to calculate forces which were sent back to the omega.3. Joint positions were sent to RoboDK software through TCP/IP port to provide visual feedback in the virtual environment.

The peg-in-hole experiment was performed in two conditions: no force feedback (NF), and (FF). Users had to rely only on visual feedback in NF condition, while force feedback due to collision was present in the FF condition.

As it is shown in Fig. 1, a user sits in front of the the screen during the experiment. Displacements of the haptic device and the UR3 tip in the VE were matched to each other. As the user starts to operate, recorded position and velocity data of the omega.3 were transmitted to the virtual reality to control the position and velocity of the UR3 tip. A low pass filter with the cutoff frequency of 500 Hz was applied on the recorded position and velocity signals of the omega.3. In case of collision, force data was calculated in the controller and sent back to the haptic device by mapping the norms of the recorded force array for each direction.

The experiment starts as the user presses the push button on the omega.3. Timer also starts counting as the button is pressed. As the user completes the task, the push button on omega.3 is again pressed. The second pressing of the push button indicates the task completion and the duration between the first and the second pressing is considered as the task completion time. Force also is measured for both NF and FF conditions during this time. The experiment was conducted with four subjects (three men and one woman, whose ages were between 28 and 42). None of them had prior experience with haptic devices. Three of them were right handed and one was left handed. The experiment setup was rearranged for the left handed subject.

### III. RESULTS

As described in section II-B, task completion time and applied force were the two criteria measured in the experiment. Task completion time and force results were measured and stored automatically using Matlab Simulink.

The task completion times (mean and standard deviations across subjects) are shown in Fig. 5 for both feedback conditions and ID factor. As it is shown in both conditions task completion time increases as ID increases. Considering four ID levels of 3.17, 4.08, 5.04 and 6.22 bits, the average of task completion times for NF condition are 11.25, 12.62, 13.55 and 14.72 respectively. Also for FF condition the averages for all ID levels are 6.87, 7.3, 7.95 and 8.57. From these results it is shown that task completion time for FF condition at each ID level is lower than the same ID level for NF condition. Also

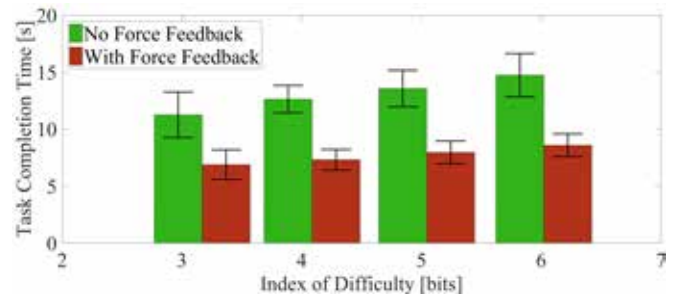


Figure 5. Task completion time for NF and FF conditions . It is shown that task completion time in presence of force feedback is less than the condition where no force feedback is presented to the users. The blocks show mean values, and the bars represent standard deviations.

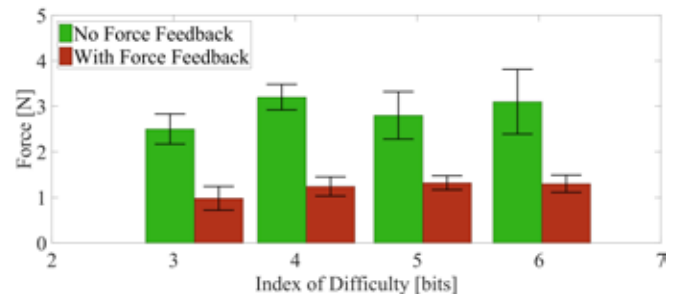


Figure 6. Recorded forces for NF and FF conditions. It is shown that applied force in presence of force feedback is less than the condition where no force feedback is presented to the users. The blocks show mean values, and the bars represent standard deviations.

standard deviations for all ID levels in NF condition are 0.89, 0.55, 0.67 and 0.85 respectively and for the FF condition are 0.53, 0.42, 0.44, 0.47. This also reveals the higher dispersion of task completion time for different subjects in NF condition.

A two way Analysis of Variance (ANOVA) [11] was applied on the the results of task completion time test with factors of force condition and ID level. Considering  $P < 0.005$ , the results of ANOVA showed that both force condition and ID level were significant factors in task completion time.

For both conditions of NF and FF, measured force data for each ID level is shown in Fig. 6. Force data signals were measured and recorded during the subjects were doing the experiment (Task completion time). Average of the results were used in this study.

It is shown from the Fig. 6 that there is no increase or decrease order for none of the conditions. For NF condition the average recorded forces are 2.5, 3.2, 2.8 and 3.1 N and for FF condition average recorded forces are 0.98, 1.24, 1.32 and 1.3 N respective to ID levels (3.17, 4.08, 5.04 and 6.22 bits). It could be concluded from these results that for each ID level less force is applied. Considering the experimental setup used in this study, this means that users were more precise in placing the peg in the hole and therefore more efficient.

Standard deviations in NF condition are 0.31, 0.24, 0.48 and 0.72 and for FF condition are 0.24, 0.19, 0.14 and 0.16 respective to ID levels. Similar for task completion time task, a two way Anova test also has been applied on the results of force measurement test. The results showed that only significant factor here is the force condition ( $P < 0.005$ ) and ID level has no significance in measured force during the experiment.

#### IV. DISCUSSION

In this study, we modelled a six degree-of-freedom robot (UR3 Robot, Universal Robots Co.) in RoboDk software. An omega.3 haptic device was used to control the virtual environment. All the communications, calculations and control properties of the virtual environment was done using Matlab Simulink. The designed model in Matlab Simulink reads the positions of the omega.3, calculates the workspace mapping and inverse kinematics of UR3 robot. It also calculates the collision forces in the virtual environment and sends force data to omega.3 as force feedback cues. Also, the required joint position data for simulation of the UR3 model are sent to RoboDk software through TCP/IP port using the Simulink Model.

Using the designed virtual environment, a peg-in-hole test was conducted to test the effect of the force feedback in controlling the designed virtual environment. Results of task completion time and exerted forces test showed that force feedback increases both precision and efficiency in controlling a virtual environment robot. Results of this experiment are analogous to the results of the previous studies in this field and therefore approves the capability of the designed control model and virtual environment for further experiments.

#### REFERENCES

- [1] J. Artigas, R. Balachandran, C. Riecke, M. Stelzer, B. Weber, J. H. Ryu, and A. Albu-Schaeffer, "Kontur-2: Force-feedback teleoperation from the international space station," in *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 1166–1173, May 2016.
- [2] C. Beltran-Gonzalez, A. Gasteratos, A. Amanatiadis, D. Chrysostomou, R. Guzman, A. Toth, L. Szollosi, A. Juhasz, and P. Galambos, "Methods and techniques for intelligent navigation and manipulation for bomb disposal and rescue operations," in *2007 IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics*, pp. 1–6, Sept 2007.
- [3] K. E. Kaplan, K. A. Nichols, and A. M. Okamura, "Toward human-robot collaboration in surgery: Performance assessment of human and robotic agents in an inclusion segmentation task," in *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 723–729, May 2016.
- [4] K. Hashtrudi-Zaad and S. Salcudean, "Analysis of control architectures for teleoperation systems with impedance/admittance master and slave manipulators," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 20, no. 6, pp. 419–445, 2001.
- [5] L. Huang, Y. Li, and T. Ni, "An improved force feedback method of object type recognition in a tele-manipulation system," in *2016 35th Chinese Control Conference (CCC)*, pp. 6278–6283, July 2016.
- [6] A. M. Ousaid, D. S. Haliyo, S. Regnier, and V. Hayward, "A Stable and Transparent Microscale Force Feedback Teleoperation System," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 20, no. 5, pp. 2593–2603, 2015.
- [7] W. Semere, M. Kitagawa, and A. M. Okamura, "Teleoperation with sensor/actuator asymmetry: task performance with partial force feedback," in *Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 2004. HAPTICS '04. Proceedings. 12th International Symposium on*, pp. 121–127, March 2004.
- [8] L. N. Verner and A. M. Okamura, "Effects of translational and gripping force feedback are decoupled in a 4-degree-of-freedom telemanipulator," in *Second Joint EuroHaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (WHC'07)*, pp. 286–291, March 2007.
- [9] J. Lee, I. Hwang, K. Kim, S. Choi, W. K. Chung, and Y. S. Kim, "Cooperative robotic assistant with drill-by-wire end-effector for spinal fusion surgery," *Industrial Robot*, vol. 36, no. 1, pp. 60–72, 2009.
- [10] S. A. Wall and W. S. Harwin, "Quantification of the effects of haptic feedback during a motor skills task in a simulated environment," in *In Proceedings at Phantom User Research Symposium'00*, pp. 61–69, 2000.
- [11] L. Santos-Carreras, R. Beira, A. Sengül, R. Gassert, and H. Bleuler, "Influence of force and torque feedback on operator performance in a vr-based suturing task," *Appl. Bionics Biomechanics*, vol. 7, pp. 217–230, July 2010.
- [12] B. Hannaford, L. Wood, D. A. McAfee, and H. Zak, "Performance evaluation of a six-axis generalized force-reflecting teleoperator," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 21, pp. 620–633, May 1991.
- [13] E. Samur, *Performance Metrics for Haptic Interfaces*. Springer Series on Touch and Haptic Systems, Springer, 2012.
- [14] P. M. Fitts and J. R. Peterson, "Information Capacity of Discrete Motor Responses," *J Exp Psychol*, vol. 67, pp. 103–112, Feb. 1964.
- [15] E. Samur, F. Wang, U. Spaelter, and H. Bleuler, "Generic and systematic evaluation of haptic interfaces based on testbeds," in *2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2113–2119, Oct 2007.

# EMG Tabanlı El Hareketlerinin Sınıflandırılması ile Mobil Robot Kontrolü

Engin Kaya<sup>[1]</sup>, Hasan Şahin<sup>[2]</sup>, Erkan Kaplanoğlu<sup>[2]</sup>

<sup>[1]</sup> Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

<sup>[2]</sup> Teknoloji Fakültesi, Marmara Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

Email: kayaen@itu.edu.tr, sahin.hasan@hotmail.com, ekaplanoglu@marmara.edu.tr

**Özetçe** — Bu çalışmada, askeri amaçlı bir mobil robotun kontrolü için elektromiyografi (EMG) sinyalleri sınıflandırılmıştır. Sınıflandırma işlemi mobil robotun düz ilerleme, sağa ilerleme, sola ilerleme, kendi etrafında dönme ve durma hareketleri için elin sırasıyla parmaklar açık, bilek dışı, bilek içi, yumruk ve serbest halindeki sinyalleri alınarak gerçekleştirilmiştir. Alınan bu sinyallerin özneliği dalgacık dönüşümü ile, sınıflandırılması yapay sinir ağı algoritması ile gerçekleştirilmiştir. Yapılan sınıflandırma neticesinde kullanıcı el-bilek hareketleri ile mobil robotu kontrol edebildiği gözlemlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler**—Mobil robot, EMG, yapay sinir ağıları.

## I. GİRİŞ

Mobil robotlar karada, su altında ya da havada hareket ederek istenilen işlemleri yerine getirebilen fiziksel olarak herhangi bir noktaya sabitlenmemiş robotlardır. Mobil robotlar otonom ya da bilgisayar kontrollü olabileceği gibi bu iki kontrol mekanizmasında da sahip olacağı algılayıcılar ile gerekli çevresel bilgileri edinmelidir. Günümüzde özellikle savunma sanayinde mobil robotların kullanımı artmıştır. Robotların görevleri arasında, ortam temizleme, mayın tarama ve arama-kurtarma etkinlikleri sayılabilir [1]. Bu mobil robotların kullanıcı ile interaktif iletişim halinde olması olaya müdahale yeterliliğini artırmaktadır. Ayrıca kullanıcının mobil robotu ekstra bir kontrol cihazı kullanması dikkat dağınıklığına sebebiyet verebilir. Bu çalışmada kullanıcının ön koluna bağlanan EMG sensörü ile mobil robotun kontrolü sağlanarak hem interaktif iletişim hem de konsantrasyon kaybının olmaması hedeflenmiştir. Burada kullanılacak EMG sinyallerinin, yükseltilme, filtreleme ve özneliklerinin çıkarılması gibi çeşitli işlemlerden geçirilmesi gerekmektedir. Öznelik vektörleri çıkarılan EMG sinyallerinin hangi harekete karşılık geldiğinin tespit edilmesi için sınıflandırma işlemi yapılır. Literatürde sınıflandırma ile ilgili Yapay Sinir Ağları [2], Bulanık Mantık [3], DVM (Destek Vektör Makinesi) sınıflayıcı [4], K-ortalama [5], K en yakın komşu, Parzen sınıflandırma [6], Doğrusal Ayrım Analizi [7], Sonlu Durum Makinesi (Finite State Machine) [8], gibi yöntemler başta olmak üzere birçok yöntem kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan Yapay Sinir Ağı (YSA), ileri beslemeli çok katmanlı ağ yapısındadır. Çok katmanlı ağ yapısına göre sırasıyla her biri bir sonrakine bağlı bir giriş,

bir veya daha fazla gizli ve bir çıkış katmanlarından oluşur. Bu katmanlarda bilgi iletimi ileri yönde olup, geri besleme bulunmamaktadır ve ayrıca giriş katmanında da herhangi bir işlem yapılmaz. Her bir katmanda yapılacak işleme göre belirli sayıda nöron bulunur. YSA sınıflayıcının giriş katında 192 adet nöron, bir adet gizli katman ve gizli katmanda 10 adet nöron ve çıkış katında 5 adet nöron kullanılmıştır. Eğitim için ise scaled conjugate gradient metodu kullanılmıştır.

## II. SİSTEM

Bu bölümde çalışmada kullanılan sistem ekipmanları hakkında bilgi sunulacaktır.

### A. EMG Sensörü

EMG sinyallerinin elde edilmesinde bilinen 2 tür yöntem vardır, bunlar: enjeksiyon (Intramuscular EMG) ve yüzey elektrot (Surface EMG) yöntemleridir. Yüzey elektrotlarının kullanılması geniş yüzey alanı ve kolay kullanım sağlamaktadır.

Bu çalışmada, Thalmic Labs şirketinin MYO Armband (Şekil-1) adı verilen 8 adet yüzey elektrotlarına sahip cihazı EMG sinyallerini almak için kullanılmıştır [9]. Alınan sinyalleri bluetooth üzerinden kablosuz olarak gönderebilmektedir. MYO Armband'ın bu verilerine kolay ulaşılmasının yanında kullanımı kolay bir giyilebilir cihaz olması da EMG cihazı olarak seçilmesi için önemli bir kriter olmuştur.



Şekil-1 EMG Sensörü (MYO Armband)

## B. Mobil Robot

Çalışmada kullanılan mobil robot şekil-2’de görülmektedir. Mobil Robot üzerinde 3 adet 58mm çapındaki Omni Wheel tekerlekler kullanılmıştır. Tekerlekler 120° aralıklarla yerleştirilmiştir. Bu tekerleklerin avantajları 360°lik manevra sağlaması, kolay dönüş ve doğrudan yana doğru hareket kabiliyeti olmasıdır. Tekerlek çift sıra olup 8 dönebilir aksam barındırmaktadır.

Araç üzerinde her bir tekerleğe 1 adet olacak şekilde 3 adet SG-5010 Servo motor kullanılmıştır. Motorların içinde yapılan ufak bir değişiklikle bu motorların dc motor gibi tam tur atması sağlanmıştır. Bu sayede tam kontrollü ve daha çok yük taşıyabilecek bir motor elde edilmiştir. Motorların beslemesi harici olarak üzerinde bulunan pillerle yapılmıştır.



Şekil-2 Mobil Robot

Bir numaralı tekerlek aracın arkası kabul edilip diğer yönler ona göre tayin edilmiştir. Servo motorların sinyal uçlarına gönderilen sinyaller değiştirilerek aracın yönlendirilmesi sağlanmıştır. Mikro denetleyici olarak Arduino Mega 2560 kullanılmıştır. Arduino beslemesi için 5V-1A’lık powerbank kullanılmıştır.

Robotun ileri gitmesi için 2 ve 3 numaralı motorlar ileri yönde çalışır, 1 numaralı motor durur. Sağa gitmesi için 3 ve 1 numaralı motorlar ileri yönde çalışır, 2 numaralı motor durur. Sola gitmesi için 2 numaralı motor ileri, 1 numaralı motor geri yönde çalışır, 3 numaralı motor durur. Kendi etrafında dönmesi için 1 ve 3 numaralı motorlar ileri, 2 numaralı motor geri yönde çalışır.

## III. UYGULAMA

Çalışma, mobil kontrolü için ön kola yerleştirilen EMG sensöründen gelen verilerin işlenmesi, robotun iletişim ve kontrole hazır hale getirilmesi ve kontrolörün oluşturulması gibi adımlardan oluşmaktadır.

## A. EMG Sinyalinin Elde Edilmesi ve Sınıflandırılması

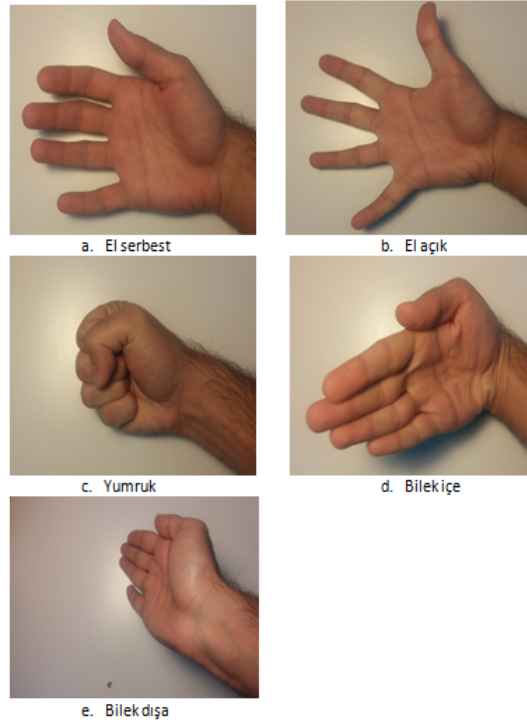
Kullanıcıdan EMG sinyallerinin alınıp sınıflandırmanın gerçekleştirilmesi işlemi verilerin toplanması, sinyal özelliklerinin çıkartılması, sınıflandırma ve hareket tahmini aşamalarından oluşmaktadır(Şekil-3).



Şekil-3 EMG Sinyali İşleme Aşamaları

İlk aşama olan verilerin alınması işlemi için MYO Armband sağ ön kola istenildiği şekilde giyilmiştir. Fakat daha sonra sınıflandırma işleminin doğru sonuç vermesi için sınıflandırma sırasında da veri alınırken giyildiği şekilde giyilmelidir. Bu çalışmada Armband 4 numaralı kanal extensor digitorum kasına denk gelecek şekilde giyilmiştir.

Myo Armband üzerinden python ile yazılan bir kod sayesinde 5 el hareketi için de 50 Hz ile 10 saniye veri alınmıştır. Önce istenilen hareket yapılıp daha sonra veri alma işlemi başlatıldığı için ilgili hareketin verisi geçiş hareketinin verisinden ayrı şekilde elde edilmiştir. Kayıt süresinde oluşturulan el hareketleri şekil-4’te görülmektedir.



Şekil-4 Kontrol İçin Kullanılacak El Hareketleri

Elde edilen verileri sınıflandırabilmek için öncelikle sinyalin anlamsız ve gürültü içeren kısımlarının elenmesi ve özneliğinin elde edilmesi gerekmektedir.

Bu projede, EMG sinyalinin işlenmesinde en iyi sonuç veren yöntemlerden biri olduğu için Dalgacık Paket Ayırıştırması (Wavelet Packet Decomposition) yöntemi kullanılmıştır [10,11]. Bu iş için toplanan 8 kanal için ayrı ayrı pencere kaydırma yöntemi ile öznelikler Matlab ile elde edilmiştir. Pencere kaydırma yönteminde sinyal, pencere boyutu ve kaydırma miktarına göre bölümlere ayrılmıştır. Elde edilen her bir bölüme Dalgacık Paket Dönüşümü istenilen derinlikte uygulanmıştır. Çıkan sinyalin karekök ortalamasının logaritması (log root mean square-LRMS) alınarak ilgili bölümün özneliği elde edilmiştir ve bu işlem diğer bölümlere de uygulanmıştır. Her bir hareket için 500 verimiz olduğu için pencere boyutumuz 40, kaydırma miktarımız 10 veri ve dalgacık derinliği de 4. seviye olacak şekilde parametreler seçilmiştir. Bu işlem her bir kanal için gerçekleştirilerek öznelik çıkarma işlemi tamamlanmıştır.

Elde edilen EMG öznelik vektörlerinin sınıflandırılma işlemi Yapay Sinir Ağları (YSA) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Projede öznelik vektörü, öncelikle MATLAB yardımıyla elde edilmiş ve MATLAB üzerindeki Neural Network Toolbox kullanılarak oluşturulan yapay sinir ağına girdi olarak verilmiştir. Çıktı ise yapılmak istenilen 5 hareketin kendisidir ve 5 nörondan oluşan 5 bitlik bir seri halinde her bir bit bir hareketi temsil edecek şekilde oluşturulmuştur. Bu sayede Matlab ortamındaki YSA ilgili girdi ve çıktılar arasında bir ağırlık vektörü oluşturarak öğrenmeyi gerçekleştirmektedir. Neural Network Toolbox üzerinde HiddenLayerSize 10 olarak seçilip, elde edilen öznelik vektörlerinin %70'i öğrenme, %15'i test ve %15'i de doğrulama için kullanılmıştır. Öğrenme sonucu elde edilen ağırlık katsayı vektörleri bir text dosyasına kaydedilmiştir.

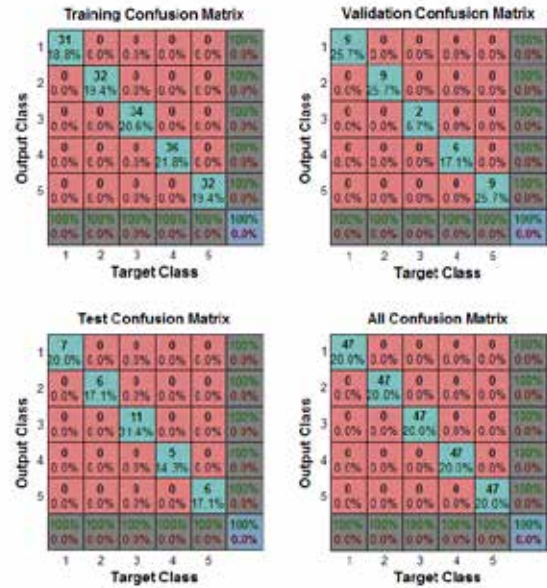
Son olarak elde ettiğimiz ağırlık vektörlerini gerçek zamanlı olarak test edip sınıflandırma işleminde hareket tahmininin doğru olarak yapıp yapılmadığı değerlendirilmiştir. Bunun için Myo Armband'dan alınan verinin özneliği Matlab tarafındakiyle aynı şekilde python üzerinden anlık olarak çıkarılmıştır. Daha sonra çıkarılan bu öznelik, Matlab'daki öğrenme sonucu elde edilen katsayılar ile çarpılıp çıktı olarak hareket tahmini elde edilmiştir.

## B. KONTROL

EMG sinyalinin elde edilmesi ve sınıflandırılması işlemi Raspberry Pi üzerinde python ile yapılmıştır. Öte yandan mobil robotun kontrolü Arduino ile gerçekleştirilmiştir. Bu iki platformun birbiriyle iletişimi seri haberleşme kanalları üzerinden gerçekleştirilmiştir. EMG verisinin Raspberry Pi üzerinde çalıştırılan kod ile elde edilen sınıflandırma sonucu Arduino mikrodenetleyicisine seri haberleşme ile gönderilmiş ve bu denetleyici aldığı veriyi hareketini sağlamak için kullanmıştır. Bu durumda Raspberry Pi ve Arduino mobil robot üzerinde konumlanmıştır ve Myo Armband ile Raspberry Pi bluetooth üzerinden kablosuz haberleştiği için mobil robot kablosuz bir şekilde kontrol edilebilmektedir.

EMG kontrollü mobil robot düzeneği, MYO Armband EMG cihazı kas sinyallerini almak için kullanılmıştır. Örnek EMG sinyal değerleri Şekil-5'te sunulmuştur.

Alınan bu sinyallerin sınıflandırılması işlemi Bölüm III.A'de anlatıldığı gibi YSA ile sağlanmıştır. Bu sınıflandırma işlemine ait tek bir kişinin farklı el hareketlerindeki sinyalleri alınıp işlenerek oluşturulan eğitim veri setinin sonuçları Şekil 6'da görüldüğü gibi başarılıdır. Burada şekilde satır ve sütunlardaki 1, 2, 3, 4 ve 5 numaraları sırasıyla el serbest, el açık, yumruk, bilek içe ve bilek dışa hareketlerini temsil etmektedir.



Şekil-6 YSA Başarım

Elde edilen bu başarılı sonucu sisteme uygulamak için yazılan python kodu ile Myo Armband'dan 0.8 saniye

boyunca EMG sinyali alınır. Alınan bu sinyalin tıpkı eğitim verisi alınırken olduğu gibi pencere kaydırma yöntemiyle dalgacık analizi yapılarak özneteliği çıkartılır. Öznetelikler öğrenme sonucu elde edilip kaydedilmiş olan ağırlık vektörleri ile çarpılarak kestirim yapılmış olur. Eğitim setinde görülen başarılı sonuçlar uygulama sırasında da beklenildiği gibi doğru sonuçlar vermektedir. Bu da mobil robot kontrolü için EMG verilerinin kullanılabilceğini göstermektedir. Robotun kontrolüne ait görüntüler <https://www.youtube.com/watch?v=DJ6VHSVuzMU> adresinden izlenebilir.

#### IV. SONUÇ

Bu çalışmada, kullanıcı ile interaktif çalışabilen bir mobil robotun miyoelektrik kontrolü için MYO Armband ile elde edilen EMG sinyal verileri YSA ile sınıflandırılmıştır. Bu sınıflandırma ile mobil robotun kontrolü, kişinin önceden belirlenmiş hareketleri başarı ile sağlanmıştır. İnsan-Robot etkileşimi sağlanarak kullanıcının mobilitesi de artırılmıştır. İleriki çalışmalarda sisteme ivmeölçer eklenerek hız ve ivme kontrolleri de sağlanması hedeflenmektedir.

#### KAYNAKÇA

- [1] Murphy R., J Casper, M Micire, “Potential Tasks and Research Issues for Mobile Robots in RoboCup Rescue”, RoboCup 2000, 339-344, 2000
- [2] Au A.T.C., Kirsch R.F., “EMG-based prediction of shoulder and elbow kinematics in able-bodied and spinal cord injured individuals”, IEEE Trans. Rehabil. Eng. 8 (4) 471-480, 2000.
- [3] Kocyigit Y., Korurek M., “EMG İşaretlerini Dalgacık Dönüşümü ve Bulanık Mantık Sınıflayıcı Kullanarak Sınıflama.” Itüdergisi/d Mühendislik, 4(3):25-31, 2005
- [4] Günay M., Alkan A., “ Spektral yöntemler ve DVM sınıflandırıcı ile EMG sinyallerinin tasnifi” KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi, 13(2), 63-70, 2010
- [5] Taşan D. “Protez Denetimi İçin EMG’de örüntü tanıma” Yüksek Lisans Tezi Ege Üni. Fen Bilimleri Enstitüsü, 2008

- [6] Günay M., Alkan A., “EMG İşaretlerinin K- Ortalama Algoritması Kullanılarak Öbekleştirilmesi”, KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi, 12 (2),25-30, 2009
- [7] Ünal M., “Ayırma analizi ve bir uygulama” Yüksek Lisans Tezi Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006
- [8] Kaplanoglu E., Çakır O., Fil C., “EMG Kontrollü Robotik Kol ve Simülasyonu.” Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı (TOK) TOK2015, Denizli, Eylül 2015.
- [9] <https://www.myo.com/> Erişim:Eylül 2016
- [10] Khushaba, R. N., Al-Jumaily, A., and Al-Ani, A., “Novel Feature Extraction Method based on Fuzzy Entropy and Wavelet Packet Transform for Myoelectric Control”, 7th International Symposium on Communications and Information Technologies ISCIT2007, Sydney, Australia, pp. 352 – 357, 2007.
- [11] Khushaba, R.N., Kodagoa, S., Lal, S., and Dissanayake, G., “Driver Drowsiness Classification Using Fuzzy Wavelet Packet Based Feature Extraction Algorithm”, IEEE Transaction on Biomedical Engineering, vol. 58, no. 1, pp. 121-131, 2011.

# Akıllı Tekerlekli Sandalye Uygulaması için Üçlü Etkileşimde Yardımın Gösterimden Öğrenilmesi

Ayşe Kucukyılmaz  
Bilgisayar Mühendisliği Bölümü  
Yeditepe Üniversitesi  
İstanbul Türkiye  
Email: akucukyilmaz@cse.yeditepe.edu.tr

Yiannis Demiris  
Electrical and Electronics Department  
Imperial College  
London, UK  
Email: demiris@imperial.ac.uk

**Özetçe** —Bu bildiri robotik bir tekerlekli sandalye için tasarlanmış ve kişiye özel yardım sağlamayı amaçlayan bir makine öğrenmesi yaklaşımından bahsedilecektir. Önerilen yöntem ile, robotik yardım, direkt olarak bir insanın davranışının modellenmesini ile programlanmaktadır. Bu yöntem, kullanıcı tekerlekli sandalye ile etkileşim halindeyken, bir yardımcı tarafından sunulan yardım stratejilerinin gösterimden öğrenme teknikleri kullanılarak öğrenilmesini sağlamaktadır. Yardımcı devreden çıktığı zaman, akıllı tekerlekli sandalye, uygun yardım stratejisini seçerek yardımcının hareketlerini taklit etmek suretiyle kullanıcıya yardım edebilmektedir. Kullanıcının yardımcı ile etkileşimini kolaylaştırmak amacıyla tekerlekli sandalye dokunsal (haptik) kumandalar aracılığı ile kontrol edilmektedir. Önerilen yardım mekanizması, kullanıcıya sabit ve durağan bir yardım sağlamak yerine, kullanıcının yeteneklerini ve amaçlarını göz önünde bulundurarak *doğru miktarda yardım doğru şekilde ve doğru zamanda* kullanıcıya sunulmasını sağlamaktadır.

**Anahtar Kelimeler**—Rehabilitasyon, akıllı robotik sistemler, akıllı tekerlekli sandalyeler, insan-robot işbirliği, gösterimden öğrenme, uyarlanabilir yardım, makine öğrenimi, dokunsal etkileşim.

## I. GİRİŞ

Hareket özgürlüğü, kişinin hem fiziksel hem de psikolojik sağlığı için büyük önem teşkil etmektedir. Hareket kısıtları nedeniyle çevreleriyle doğru iletişim kuramayan bireyler, dış dünyayla etkileşimden vazgeçerek içlerine kapanmaya başlarlar. Bu da, onların, dışarıdan gelecek yardıma fazlasıyla bel bağlayarak öğrenilmiş çaresizlik olarak adlandırılan sendrom ile yüzleşmelerine neden olur [1], [2]. Bu tip sorunlar, kişilerin işlevsel bireyler olmaktan uzaklaşarak toplumdan izole olmalarına ya da başkalarına bağımlı hale gelmelerine neden olabilmektedir. Bu sebeple, kullanıcıya sürüş esnasında yardım edecek robotik bir tekerlekli sandalyenin, kullanıcının anlık olarak hareketlerine tepki göstererek doğru zamanda ve doğru miktarda yardımda bulunması önemlidir. Tekerlekli sandalyenin, kullanıcının hareketlerini takip etmesi, ve böylece akıcı ve sezgisel bir iletişim sağlaması, kişinin rahatlığı ve gelişimi için büyük önem teşkil etmektedir. Bu bildiri özetlenen çalışmanın amacı, uzun süreli kullanımda kişisel fayda sağlayabilecek akıllı bir robotik tekerlekli sandalye sistemi geliştirmektir. Bu sistem sayesinde, hareket özgürlüğü kısıtlı olan bireylere hem fiziksel hem de psikolojik açıdan yardımcı olunması amaçlanmaktadır.

Bu çalışmada, kullanıcıyı izleyen bir yardımcıdan (örneğin kullanıcıya eğitim veren bir sağlık görevlisinden) gelen sinyalleri, kullanıcının hareketlerine bağlı olarak modelleyerek kullanıcısına yardım etmeyi öğrenecek bir tekerlekli sandalye programlanmıştır. Tekerlekli sandalyeye dokunsal (haptik) bir kumanda bağlanarak kullanıcı ile yardımcının karşılıklı olarak birbirlerinin hareketlerini kuvvet kanalından hissetmeleri sağlanmıştır. Bu tasarım sadece insanların birbirlerinin hareketlerini hissetmelerini sağlamakla kalmayıp; kullanıcı ve yardımcının robotu kontrol etmek için kuvvetleri ne şekilde kullandıklarıyla ilgili de bilgi sağlamaktadır.

Önerilen tekerlekli sandalye sistemi, varolan gösterimden öğrenme yöntemlerini durağan olmayan üçlü etkileşime uyarlayarak kişiye yönelik ve tutarlı bir çözüm sunmayı amaçlamaktadır. Şu ana kadar yapılan akıllı tekerlekli sandalye çalışmalarının çok azı kişiye özgü yardım sunmaya çalışmıştır. Varolan rehabilitasyon sistemlerinin çoğu kişinin hareketlerini kısıtlayarak hareketi düzeltmek ya da belli bir rotayı takip etmek üzerine kurulmuştur [3], [4], [5], [6], [7], [8]. Önerilen yöntem durağan ve sabit bir yardım sunmaktansa, ne zaman ve ne kadar yardım edilmesi gerektiğine, kullanıcının hareketini izleyerek karar vermektedir. Böylece, anlık olarak kullanıcıların robotu ne derecede iyi yönlendirdiği ve ne kadar yardıma ihtiyacı olduğu dinamik olarak algılanarak, kullanıcının içinde bulunduğu duruma ve yeteneğine uygun biçimde kendisine yardım sunulmuştur. Sunulan yardımın şekli, zamanı ve büyüklüğü daha önceden yardımcı tarafından sağlanan yardım baz alınarak hesaplanmıştır. Bu şekilde, robotun, daha önceden karşılaşılmayan ortamlarda genelleme yapma kapasitesine de sahip olması sağlanmıştır.

Literatürdeki çalışmaların göz önünde bulundurmadığı önemli bir konu, tekerlekli sandalyeyi kullanan kişiye ek olarak, ona yardım eden bir kişinin de varlığının gerekliliğidir. Bu çalışmalarda, robot sadece kullanıcıdan gelen ve çoğu hareketi bozan sinyaller aldığı için, örnek alacağı tutarlı bir model oluşturamamaktadır. Bu bildiri sunulan yöntem, bir uzmandan gelen sinyalin doğruluğunu var sayarak, robotun, kullanıcıyla ne şekilde iletişim kuracağını öğrenebileceğidir. Önerdiğimiz teknikler çevredeki engellerin yerini tayin etmek için sensör bilgisi kullanacak olsa da, bilinen bir rota olduğunu varsaymamaktadır. Bunun yerine tekerlekli sandalyede yardım, üçlü bir gösterimden öğrenme problemi olarak ele alınmaktadır[9].

Gösterimden öğrenme son yıllarda robot öğrenmesinde

çığır açan bir yaklaşımdır [10], [11], [12]. Bu yaklaşım, kullanıcıların, herhangi bir programlama bilgisine ihtiyaç olmaksızın, robotlara belirli hareket ve görevleri öğretebilmelerini sağlamaktadır. Bu sebeple, gösterimden öğrenme günlük hayatta robotları programlamak için olağanüstü bir kolaylık sağlamaktadır. Ancak varolan gösterimden öğrenme teknikleri hep ikili etkileşime yoğunlaşmış, kullanıcının robota eğitim verdikten sonra robot ile iletişimi keserek bir gözlemci olarak davranacağını varsaymıştır.

Tekerlekli sandalye uygulamasında ise problem oldukça farklıdır. Öncelikle, gösterimi yapan kişi tekerlekli sandalyenin kullanıcısı değil, kullanıcının sürüşünü gözlemleyebilecek konumdaki bir yardımcı olacaktır. Ancak, kullanıcı, gösterim sırasında ve sonrasında kesintisiz olarak robot ile iletişimde olacağı için, bu problemi klasik bir gösterimden öğrenme problemi olarak modellemek mümkün değildir. Gösterim süresinde, ortamın, kullanıcının ve yardımcının durumları gözlemlenerek, farklı yardım stratejileri öğrenilecektir. Türetme aşamasında ise, varolan gösterimden öğrenme tekniklerinden farklı olarak, kullanıcı sabit kalırken yardımcı yerini robota devredecektir. Bu, robotun, kullanıcıdan ve ortamdaki gelen bilgiye uygun olarak doğru stratejiyi seçerek yardımcının yapacağı hareketleri taklit etmesini gerektirmektedir. Problemin temelinde yatan üçlü etkileşim, öğrenilen sistemin çok daha dinamik olmasını ve kullanıcıdan gelen farklı sinyallere karşılık özinyeli biçimde güncellenerek doğru genellemeler yapılabilmesini gerektirmektedir.

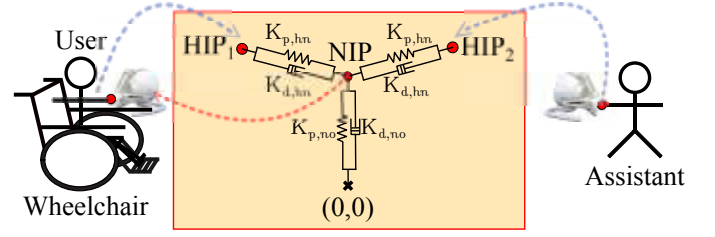
## II. METODOLOJİ

Bu proje kapsamında, Imperial College Personal Robotics Laboratory'de geliştirilmiş olan akıllı tekerlekli sandalye ARTY<sup>1</sup> kullanılmıştır. ARTY, Skippi model pediatrik bir elektrikli tekerlekli sandalye [13], modifiye edilerek geliştirilmiştir. ARTY'nin üzerinde ikisi arkada biri önde olmak üzere üç adet Hokuyo lazer mesafe bulucu, beş çarpışma sensörü, bir Phidgets atalet ölçüm ünitesi ve bir adet de Intel Atom işlemcili bilgisayar bulunmaktadır. Bu haliyle ARTY üzerinde çarpışma engelleme ve rota tayini gibi prosedürleri işletilebilmektedir.

Aynı zamanda, ARTY üzerine Novint Technologies Falcon dokunsal cihaz yerleştirilmiştir. Tekerlekli sandalyeye bağlanan Falcon cihaz, kumanda kolu olarak işlev görecektir. Yardımcının da harekete müdahale edebilmesini sağlamak amacıyla, ikinci bir Falcon cihaz da uzaktaki bir bilgisayara bağlanarak tekerlekli sandalyenin hareketini kullanıcıyla ortaklaşa etkileyecek şekilde programlanmıştır. Şekil 1, kullanıcı, yardımcı ve tekerlekli sandalye arasındaki iletişimi görsel olarak özetlemektedir. Paylaşımlı kontrol mekanizmasının ayrıntıları [14]'te sunulmuştur.

Tekerlekli sandalyenin uygulaması gereken komutların belirlenmesi için kullanıcının komutları ve çevresel durumu girdi, yardımcının komutlarını ise çıktı kabul eden bir bağlantım (regresyon) modeli öğrenilmiştir. Bu bağlantım modeli için Gaussçu süreçler (Gaussian processes, GP) kullanılmıştır [15]. GP parametrik olmayan Bayesçi bir teknik olup veri dağılımlarının fonksiyon olarak tanımlanmasını temel alır. Bu yöntem, girdiler arasındaki zamansal bağıntıları da çözümlendiğinden zaman serilerinde başarılı biçimde çalışmaktadır.

<sup>1</sup>Assistive Robotic Transport for Youngsters: Gençler için Akıllı Robotik Taşıyıcı



Şekil 1: ARTY'nin hareketinden sorumlu paylaşımlı kontrol modeli [9]

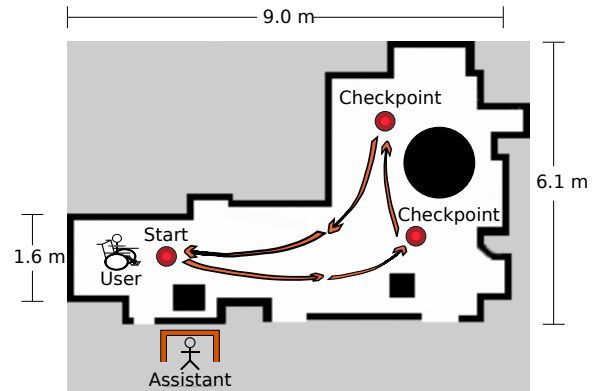
## III. DENEY

Üçlü etkileşimde gösterimden öğrenme tekniğinin doğrulanması için bir kullanıcı ile çalışma yapılmıştır. Tekerlekli sandalye kullanımında uzman olan bir yardımcı, deneyimsiz bir kullanıcıya yardım sunmuştur. Deney, laboratuvar ortamında hazırlanan bir parkur üzerinde gerçekleştirilmiştir. Yardımcı, kullanıcının hareketlerini, ROS üzerinden rviz 3B görselleme aracı ile ve tekerlekli sandalye üzerindeki bir kameradan izleyerek yardım sunmuştur. Kullanıcıdan, Şekil 2'de gösterildiği üzere 3 hedef nokta arasında mekik dokuyarak 12 tur atması istenmiştir. Her bir tur yaklaşık 20 metre olup tamamlanması yaklaşık 45 saniye sürmüştür.

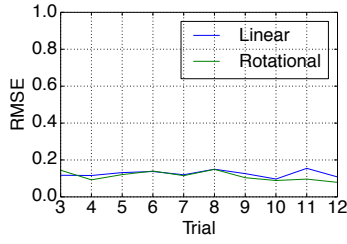
Önerilen yöntem, çevrimdışı öğrenilen modelin insan tarafından sunulan yardıma ne derecede benzerlik gösterdiği analiz edilerek değerlendirilmiştir. Kullanıcı tarafından tamamlanan 12 turdan ilki pratik amaçlı olarak kullanılıp analize katılmamıştır. İkinci tur, bağlantım modelinin eğitilmesinde kullanılmış ve öğrenilen model ile, diğer 10 tur boyunca yardımcının hareketlerinin tahmin edilmiştir.

Deney boyunca 20 Hz'de toplanan veri şu şekildedir:

- ARTY'yi hareket ettiren ortak kumanda komutu,
- Lazer tarayıcı verisi,
- En yakın engelleme mesafesi,



Şekil 2: Deneysel görev: Deneysel görevin mekanizmasını gösteren bir harita. Harita, 9.0 m genişliğinde ve 6.1 m yüksekliğindedir. Haritanın sol tarafında 'User' (kullanıcı) ve 'Assistant' (yardımcı) yerleri belirtilmiştir. Haritanın ortasında 'Start' noktası ve sağ tarafında üç 'Checkpoint' (hedef nokta) yerleri belirtilmiştir. Haritanın alt kısmında 'Assistant' (yardımcı) yerleri belirtilmiştir. Haritanın alt kısmında 'Assistant' (yardımcı) yerleri belirtilmiştir. Haritanın alt kısmında 'Assistant' (yardımcı) yerleri belirtilmiştir.



Şekil 4: Türetme turları genelinde, tahmin edilen ve yardımcı tarafından fiziksel olarak sunulan yardım komutları arasındaki kök ortalama kare hata.

- Kullanıcı tarafından ARTY'ye gönderilen kumanda komutu.

Bağlanım modeli tüm bu verileri kullanarak yardımcı tarafından ARTY'ye gönderilen kumanda komutunu tahmin etmeyi sağlamaktadır.

#### IV. DEĞERLENDİRME

Gösterimden öğrenilen GP bağlanım modeli, deney sonundaki 10 tur boyunca yardım komutlarını türetmek için kullanılmıştır. Türetilen komutlar, yardımcının fiziksel olarak uyguladığı komutlar ile karşılaştırılarak modelin değerlendirilmesi yapılmıştır.

Şekil 3 türetilen yardım komutlarının 10 tur boyunca nasıl değiştiğini göstermektedir. Şekildeki ısı haritaları yardımın yoğunluğunu göstermektedir. Isı haritasındaki kırmızı renkler yardımın daha yoğun olduğunu ifade etmektedir. Şekilde görüldüğü üzere model tarafından öğrenilen yardım, insan tarafından sunulan yardıma büyük oranda benzerlik içermektedir.

Şekil 4 yardımcı tarafından sunulan fiziksel yardım ve türetme esnasında tahmin edilen yardım arasındaki kök ortalama kare hatayı göstermektedir. Hata 10 türetme turu boyunca yardımın hem doğrusal hem açısal boyutu ele alınarak sunulmuştur. Görüldüğü üzere, hata oranları düşük profilde seyretmekte olup tutarlı ve başarılı bir türetme performansına işaret etmektedir.

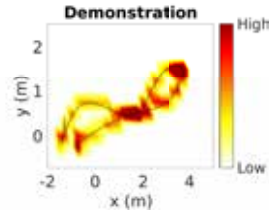
#### V. SONUÇ

Bu çalışma ile tek bir gösterimden hareketle, kullanıcıya insansı yardım sağlayan bir tekerlekli sandalye sistemi sunulmuştur. Gausçu süreçler yardımıyla öğrenilen yardım fonksiyonu insan tarafından kolaylıkla ve hızlı biçimde programlanabildiğinden, önerilen yöntem günlük hayatta hasta yakınları ve sağlık personeli tarafından uygulanmaya uygundur.

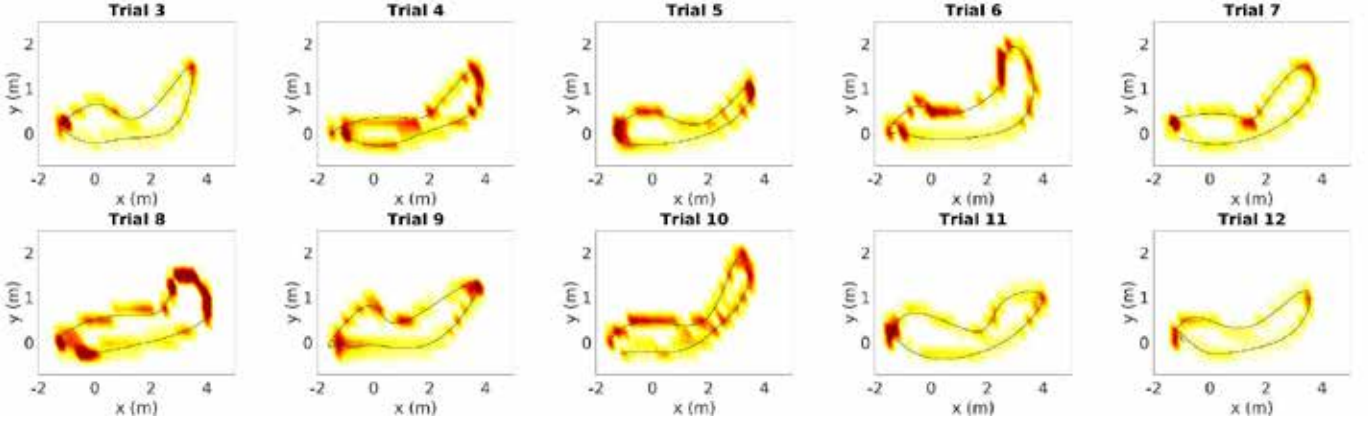
#### KAYNAKÇA

- [1] M. E. P. Seligman, "Learned Helplessness," *Annual Review of Medicine*, vol. 23, pp. 407–412, Feb. 1972.
- [2] L. Y. Abramson, M. E. P. Seligman, and J. D. Teasdale, "Learned helplessness in humans: Critique and reformulation," *Journal of Abnormal Psychology*, vol. 87, no. 1, pp. 49–74, 1978.
- [3] G. Colombo, M. Joerg, R. Schreier, V. Dietz *et al.*, "Treadmill training of paraplegic patients using a robotic orthosis," *Journal of rehabilitation research and development*, vol. 37, no. 6, pp. 693–700, 2000.

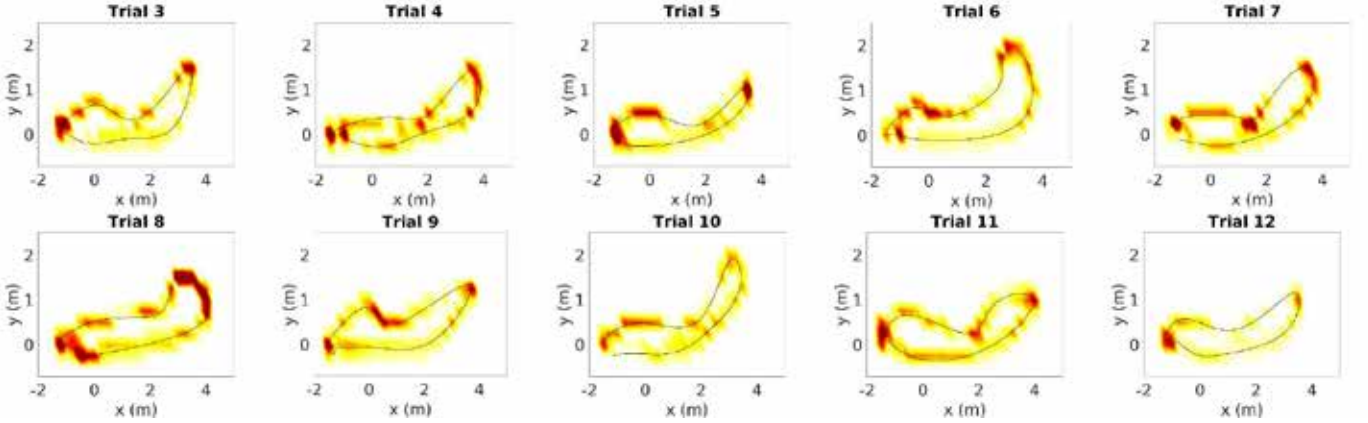
- [4] L. L. Cai, A. J. Fong, C. K. Otsoshi, Y. Liang, J. W. Burdick, R. R. Roy, and V. R. Edgerton, "Implications of assist-as-needed robotic step training after a complete spinal cord injury on intrinsic strategies of motor learning," *The Journal of neuroscience*, vol. 26, no. 41, pp. 10 564–10 568, 2006.
- [5] R. Riener, L. Lunenburger, S. Jezernik, M. Anderschitz, G. Colombo, and V. Dietz, "Patient-cooperative strategies for robot-aided treadmill training: first experimental results," *Neural Systems and Rehabilitation Engineering, IEEE Transactions on*, vol. 13, no. 3, pp. 380–394, 2005.
- [6] L. Kahn, W. Rymer, and D. Reinkensmeyer, "Adaptive assistance for guided force training in chronic stroke," in *Engineering in Medicine and Biology Society, 2004. IEMBS'04. 26th Annual International Conference of the IEEE*, vol. 1. IEEE, 2004, pp. 2722–2725.
- [7] J. Hidler, D. Nichols, M. Pelliccio, K. Brady, D. D. Campbell, J. H. Kahn, and T. G. Hornby, "Multicenter randomized clinical trial evaluating the effectiveness of the lokomat in subacute stroke," *Neurorehabilitation and Neural Repair*, vol. 23, no. 1, pp. 5–13, 2009.
- [8] E. C. Field-Fote and K. E. Roach, "Influence of a locomotor training approach on walking speed and distance in people with chronic spinal cord injury: a randomized clinical trial," *Physical therapy*, vol. 91, no. 1, pp. 48–60, 2011.
- [9] A. Kucukyilmaz and Y. Demiris, "One-shot assistance estimation from expert demonstrations for a shared control wheelchair system," in *Proceedings of the 24th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication 2015 (RO-MAN'15)*, September 2015.
- [10] S. Calinon, F. Guenter, and A. Billard, "On learning, representing and generalizing a task in a humanoid robot," *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part B. Special issue on robot learning by observation, demonstration and imitation*, vol. 37, no. 2, pp. 286–298, 2007.
- [11] A. Billard, S. Calinon, R. Dillmann, and S. Schaal, "Robot programming by demonstration," in *Springer Handbook of Robotics*, B. Siciliano and O. Khatib, Eds. Springer, 2008, pp. 1371–1394.
- [12] B. D. Argall, S. Chernova, M. Veloso, and B. Browning, "A survey of robot learning from demonstration," *Robot. Auton. Syst.*, vol. 57, no. 5, pp. 469–483, May 2009.
- [13] Ottobock, "Skippi pediatric wheelchair, accessed on 10 June 2014." [http://www.ottobock.com/cps/rde/xchg/ob\\_en/hs.xml/3908.html](http://www.ottobock.com/cps/rde/xchg/ob_en/hs.xml/3908.html).
- [14] A. Kucukyilmaz, T. M. Sezgin, and C. Basdogan, "Intention recognition for dynamic role exchange in haptic collaboration," *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 6, no. 1, pp. 58–68, First 2013.
- [15] C. E. Rasmussen and C. K. I. Williams, *Gaussian Processes for Machine Learning*, ser. Adaptive computation and machine learning series. The MIT Press, 2006.



(a) Gösterim turunda, yardımcı tarafından fiziksel olarak sunulan yardım komutlarının yoğunluğu



(b) Türetme turlarında, yardımcı tarafından fiziksel olarak sunulan yardım komutlarının yoğunluğu



(c) Türetme turlarında, modelin tahmin ettiği yardım komutlarının yoğunluğu

Şekil 3: Tekerlekli sandalyenin izlediği rota ve sunulan yardımın yoğunluğu. Isı haritasında kırmızı renkler yardımın yoğun olduğu bölgeleri işaret etmektedir. a) GP bağlanım modelinin oluşturulduğu gösterim turu süresince uygulanan yardım yoğunluğu. b) Yardımcı tarafından fiziksel olarak uygulanan yardımın yoğunluğu. c) Model tarafından tahmin edilen yardımın yoğunluğu.







İstanbul  
**GEDİK**  
Üniversitesi

# GELECEK AR-GE

**Elektrik-Elektronik  
Mühendisliği**

**Makine  
Mühendisliği**

**Endüstri  
Mühendisliği**

**Mekatronik  
Mühendisliği**

**Metalurji ve Malzeme  
Mühendisliği**

Gedik Holding'in sektöre yön veren Ar-Ge gücü, eğitiminize değer katmak için yanınızda. Üstün teknolojik ekipmanlar, modern laboratuvarlar ve deneyimli eğitim kadrosunun sunduğu uygulama ağırlıklı eğitimle İstanbul Gedik Üniversitesi'nde geleceğe hazırsınız.

ISBN: 978-6058557215



9 786058 557215



Cumhuriyet Mahallesi, İlkbahar Sokak, No: 1  
34876 Yakacık-Kartal / İstanbul  
(Kartal Metrosu son durağına yürüme mesafesinde)

[f GedikUniversitesi](#) [t Gedik\\_Uni](#) [i gedik\\_universitesi](#)

**444 5 438**

[www.gedik.edu.tr](http://www.gedik.edu.tr)