



## Humanoid robot arm design, simulation, kinesthetic learning, impedance control and suggestions

Şeniz Ertuğrul<sup>1\*</sup>, Ozan Kaya<sup>2</sup>, Dila Türkmen<sup>3</sup>, Hülya Eraslan<sup>2</sup>, Gökçe Burak Tağlıoğlu<sup>3</sup>, Musa Özgün Güleç<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Izmir University of Economics, Department of Mechatronics Engineering, Balcova 35330, Izmir, Turkey

<sup>2</sup>Istanbul Technical University, Department of Mechatronics Engineering, Beyoğlu, 34437, Istanbul, Turkey

<sup>3</sup>Istanbul Technical University, Department of Mechanical Engineering, Maslak Campus, Sariyer 34467, Istanbul, Turkey

### Highlights:

- Humanoid robot arm design, dynamic and kinematic analyses
- 2 stages kinesthetic learning algorithm, impedance control and simulation
- Suggestions for improvements

### Keywords:

- Humanoid robot arm design
- Kinesthetic learning
- Impedance control

### Article Info:

Research Article

Received: 21.03.2021

Accepted: 12.09.2021

### DOI:

10.17341/gazimmfd.900459

### Correspondence:

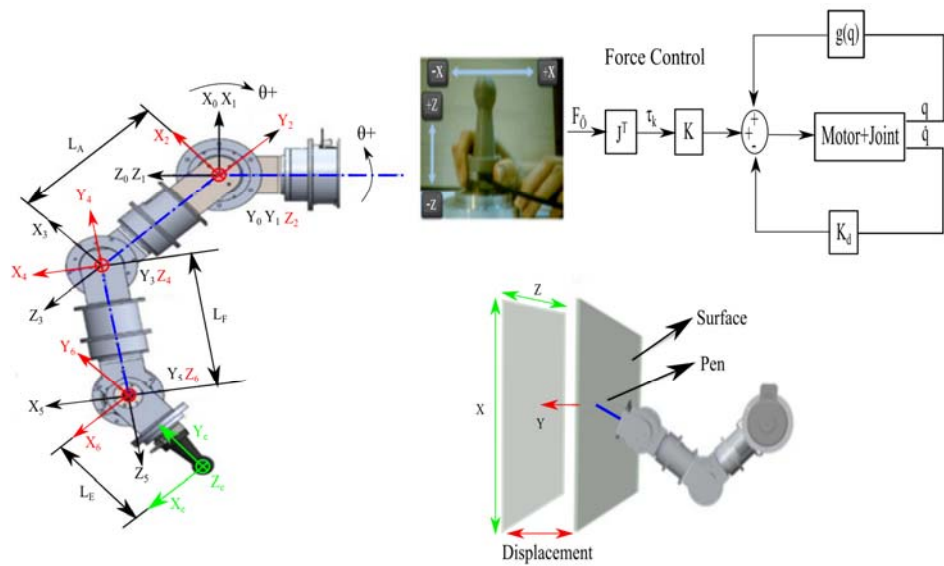
Author: Şeniz Ertuğrul

e-mail:

seniz.ertugrul@ieu.edu.tr

phone: +90 532 333 9836

### Graphical/Tabular Abstract



**Figure A.** Mechanical design, kinematic and dynamic analysis, electronic design, simulation and control stages for a humanoid robot arm

**Purpose:** The purpose of this research is to develop a humanoid robot arm capable of kinesthetic learning and performing tasks which requires contact with environment.

### Theory and Methods:

A humanoid robot arm design and control require meticulous work. Selection of kinematic structure and drivetrain are explained and also verified with dynamic analyses. The inverse kinematic solution is provided. Electronic and software design are realized by keeping the desired control methods in perspective. Simulations are carried out for two-stages kinesthetic learning and position / force / impedance control methods.

### Results:

Although kept relatively simple, the mechanical design has been achieved and verified with kinematic and dynamic analyses. The kinesthetic learning is very suitable to teach complicated jobs such as writing on a moving surface. In this project, kinesthetic learning is made possible in two-stages since a single force/torque sensor is available at the end of the robot arm. Harmonic drives' back-drivability becomes an issue during kinesthetic learning.

### Conclusion:

Mechanical design, kinematic and dynamic analyses, kinesthetic learning, impedance control, electronic and software studies were carried out within the scope of the project. The stages from the initial mechanical design of the humanoid robot arm to the control, encountered problems, experiences and suggestions for advanced designs are shared in a comprehensive way in order to be useful for national robot projects in this article.



## İnsansı robot kolu tasarımı, benzetimi, kinestetik öğrenme, empedans kontrolü ve öneriler

Şeniz Ertuğrul<sup>1\*</sup>, Ozan Kaya<sup>2</sup>, Dila Türkmen<sup>3</sup>, Hülya Eraslan<sup>2</sup>, Gökçe Burak Tağlıoğlu<sup>3</sup>, Musa Özgün Güleç<sup>3</sup>

<sup>1</sup>İzmir Ekonomi Üniversitesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Balçova 35330, İzmir, Türkiye

<sup>2</sup>İstanbul Teknik Üniversitesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Beyoğlu 34437, İstanbul, Türkiye

<sup>3</sup>İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Maslak Kampüsü, Sarıyer, 34467, İstanbul, Türkiye

### ÖNEÇİKANLAR

- İnsansı robot kolu tasarımı, dinamik ve kinematik analizleri
- 2 aşamalı kinestetik öğrenme algoritması, empedans kontrolü ve benzetimi
- Geliştirme önerileri

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 21.03.2021

Kabul: 12.09.2021

### DOI:

10.17341/gazimmfd.900459

### Anahtar Kelimeler:

İnsansı robot kolu tasarımı,  
kinestetik öğrenme,  
empedans kontrolü

### ÖZ

Robot teknolojisi sürekli olarak gelişmekte ve ülkemizde de bu alanda yapılan çalışmalar hızla artmaktadır. Üniversiteler, makine- imalat ve savunma sanayii firmaları sadece kullanıcı olmayıp, robotik alanında halihazırda projeler yapmakta veya yapmayı planlamaktadır. Bu çalışma, çift kol olarak veya insan operatör ile birlikte çalışabilmesi için işbirlikçi olması istenen bir insansı robot kolu tasarımını ve kontrolünü kapsamaktadır. Proje kapsamında mekanik tasarım, dinamik analizler, ters kinematik çözüm, kinestetik öğrenme, empedans kontrolü, yazılım ve donanım çalışmaları yapılmıştır. İnsansı robot kolunun üretilmesinden kontrolüne kadar olan aşamalar, karşılaşılan problemler, elde edilen tecrübeler ve gelişmiş tasarımlar için yapılan öneriler bu makalede kapsamlı bir şekilde sunulmuştur. Özellikle ticari amaçla geliştirilmekte olan yerli robot projelerine yararlı olması amacı ile kolay anlaşılır bir şekilde anlatılmıştır. Mekanik tasarım, dinamik analizler, benzetim, ve diğer dosyalar, ilgilenen araştırmacılarla açık kaynaklı olarak paylaşılacaktır.

## Humanoid robot arm design, simulation, kinesthetic learning, impedance control and suggestions

### HIGHLIGHTS

- Humanoid robot arm design, dynamic and kinematic analyses
- 2 stage kinesthetic learning algorithm, impedance control and simulation
- Suggestions for improvements

### Article Info

Research Article

Received: 21.03.2021

Accepted: 12.09.2021

### DOI:

10.17341/gazimmfd.900459

### Keywords:

Humanoid robot arm design,  
kinesthetic learning,  
impedance control

### ABSTRACT

Robot technology is constantly developing and the studies in this field are also increasing in our country. Universities, machine-manufacturing and defense industry have been either doing or planning robot projects. This study presents designing of a humanoid robot arm desired to be cooperative so that it can work as dual arm or with human operator. Mechanical design, kinematic and dynamic analysis, kinesthetic learning, impedance control, software and hardware studies were carried out within the scope of the study. The stages from the initial design of the humanoid robot arm to the control, the problems encountered, the experiences gained and the suggestions for advanced designs are shared in a very comprehensive way in this article. It has been explained in an easy-to-understand manner in order to be useful for national robot projects which are being developed especially for commercial purposes. Mechanical design, dynamic analyses, simulation and other files will be shared as open source with interested researchers.

\*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : \*sertugrul@ieu.edu.tr, kayaozan@itu.edu.tr, turkmen@itu.edu.tr, eraslanhu@itu.edu.tr, taglioglu@itu.edu.tr, ozgungulec@yahoo.com / Tel: +90 532 333 9836

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Tasarlanan robotların bazılarının insansı görünüme sahip olmaları istenmekte ve bu insansı görünüme sahip olan makineler insansı robot (HR) denilmektedir. İnsansı robotlar, sosyal robotik alanının yanı sıra, imalat sanayii veya askeri amaçlı olarak tek kol, çift kol, çift kol ve gövde, yürüyen veya tekerlekli gibi çeşitli kombinasyonlarla tasarlanabilmektedir. İnsansı robot kollar, tut/bırak gibi basit işlemlerin yanı sıra el aletleri kullanma, polisaj, montaj gibi hem kuvvet hem kontrol gerektiren işler için de aktif olarak kullanılmaktadır. Literatürde bulunan gelişmiş insansı robot kol tasarımları serbestlik derecelerine göre şöyle gruplandırılabilir; 7 SD (MH-2, Nancy, Ping Pong, Romeo, KHR-1HV, Justin, Armair-III, Robonaut, Armair-IV, Frida, PR2, YuMI, Kuka LWR4) 6 SD (Motoman), 5 SD (NAO-H25, AH1N1, E-Robot), 4 SD (CoMAN) ve 3 SD (Robonova-I).

HR tasarımında amacın belirlenmesi, amaca uygun tasarım, tasarım parametrelerinin iyileştirilmesinin yanı sıra eş zamanlı olarak yapısal analizlerinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda, eşkenar dörtgen tahrik mekanizmalı stirling motorunun farklı çalışma koşullarında maksimum gücün elde edildiği ısı taşınım katsayısının düğüm noktası analiz yöntemiyle doğrulanması üzerine çalışılmışlardır [1]. Asansörlerde kullanılan senkron motorun performansını iyileştirmek için yeni bir tasarım önermişlerdir [2]. Bunların yanı sıra, dişli sistemlerinde meydana gelen diş eğilme gerilimini iyileştirmek için statik analizlerin hedef fonksiyon seçildiği tasarım çalışmaları mevcuttur [3]. Yüksek ataletle sahip sistemlerde statik analizler için yetersiz olduğundan dinamik analizler de gerekmektedir. Bunun için, önden yüklemeli çamaşır makinesinin tasarımının dinamik olarak modellenmesi üzerine çalışılmıştır [4]. Kontrol edilebilirlik ve basitlik gibi parametreler dikkate alınarak gerçekleştirilmesi beklenen görevler için farklı eklem dizilimleri avantajlı olabilmektedir. Bu kapsamda, farklı konfigürasyonları oluşturabilmesi için OMNIMO modüler robot tasarımı mevcuttur [5]. Ayrıca, 5 eksenli mobil robot kolu tasarımı ve prototipinin gerçekleştirilmesi üzerine çalışmalar yapılmıştır [6]. Robot kollarının eklem dizilimlerinden meydana gelen tekil noktalar çalışma performansını etkilediği için, tekil noktalardan geçen hareket planlaması üzerine çalışmalar yapılmıştır [7]. Bunların yanında, tasarlanan sistemlerin kontrolü istenilen görevlerin gerçekleştirilmesi açısından önemlidir. Bu kapsamda, döner kanat arıza toleranslı uçuş kontrol sistemi tasarımı önerilmiştir [8].

İnsansı robot kol tasarımında ağırlık/faydalı yük ve hız özelliklerini iyileştirmek için mekanik tasarım, dinamik ve kinematik analizler ve kontrol aşamasında birçok parametrenin optimizasyonu gerekmektedir. Ayrıca programlama kolaylığı açısından öğrenme yeteneğinin de olması istenmektedir. Bu hedefler doğrultusunda bir insansı robot kolu projesi yapılmıştır. Proje kapsamında mekanik tasarım, parçaların üretimi, montaj işleri yapılmış, kinematik, dinamik analizler, elektronik donanım, yazılım,

konum/kuvvet/empedans kontrol konularında benzetim ve gerçek zamanlı çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar sırasında karşılaşılan problemler, elde edilen tecrübeler ve gelişmiş tasarımlar için yapılan öneriler bu makalede paylaşılmıştır. Ayrıca insansı robot kolu projesinin gerçekleştirilmesinde kullanılan yöntemlere ilişkin literatürde bulunan çalışmalar ilgili bölümün altında detaylandırılmıştır.

Bu çalışmada, öncelikle üretilmek istenen insansı robot kolunun tasarım çalışmaları kapsamında gerekli olan bileşenlerin (aktuatörler, dişli sistemleri, yataklar vb.) belirlenmesi için dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerde uygun eklem dizilimi, faydalı yük ve eklem hızların yüksek olması, toplam ağırlığın az olması, motor ve redüktörlerin aynı eksen üzerinde olması hedeflenmiş ve büyük ölçüde gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda belirlenen parametreler doğrultusunda üretilen insansı robot kolu elektronik sürücüler, haberleşme protokolleri ve yazılımları gerçekleştirilmiştir. Gerekli olan fırçasız motor sürücüler, boyutları ve basitliği göz önüne alınarak özgün bir şekilde tasarlanmıştır. Robot kolunun kontrolünün uygulanabilmesi için sürücüler ve bilgisayarlar arasında haberleşme protokollerine uygun yazılımlar Python derleyicisi üzerinden Linux işletim sisteminde gerçekleştirilmiştir. Kontrol çalışmaları için ileri kinematik eşitlikler, ters kinematik çözüm, eklem düzeyinde yörünge planlamasına ait denklemler elde edilmiştir. Son aşamada, bir robot kolu için öncelikle ihtiyaç duyulacak konum, kuvvet ve empedans kontrolü gibi yöntemler belirli senaryolar için mevcut kol tasarımı üzerine benzetim çalışmalarıyla irdelenmiştir. Sonuç olarak insansı robot kolu projesi kapsamında elde edilen veriler incelenmiş, karşılaşılan zorluklar ve elde edilen bilgiler sonraki çalışmalara ışık tutması için bu makalede paylaşılmıştır.

## 2. İNSANSI ROBOT KOLU MEKANİK TASARIMI (HUMANOID ROBOT ARM MECHANICAL DESIGN)

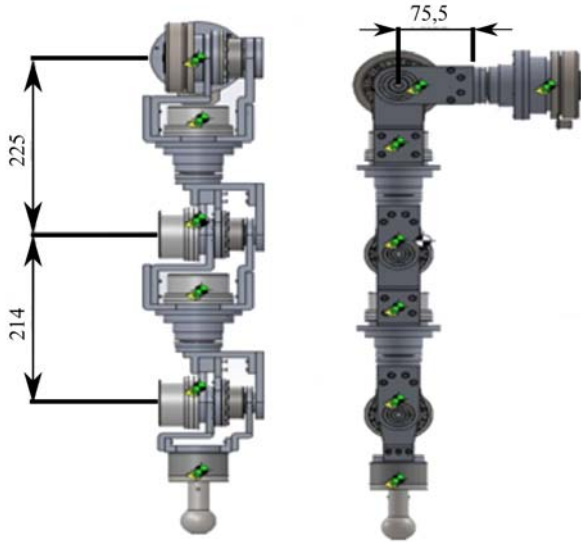
### 2.1. Ön Tasarım, Bileşen Seçimi ve Boyutlandırma (Initial Design, Component Selection and Sizing)

İnsansı robot kolu tasarımı yapılırken, insan kolunun sahip olduğu Antropometrik (vücut ölçüleri) özellikler de dikkate alınmalıdır. 2012 yılında Huo'nun [9] yaptığı çalışmada farklı eklem ve eksen takımlarına sahip robot kollarının sağladığı avantaj ve dezavantajları üzerine çalışılmıştır. Bu tasarımlara ait dirsek yapısı, bilek özellikleri, kontrol edilebilirliği, rijitliği, bilek kavraması, kol görüntüsü ve dirsek hareketi özellikleri karşılaştırılmıştır [9].

İnsansı robot kolu ön tasarımı için serbestlik derecesi, taşıyabileceği yük, istenen hız, ivme, toplam ağırlık vb. verilmesi gereken ilk kararlardan bazılarıdır. Serbestlik derecesinin artması kolun toplam ağırlığını arttırmasının yanı sıra mekanik tasarımı, yörünge planlamayı ve ters kinematik çözümü de zorlaştırmaktadır. İnsan koluna en yakın tasarımın en az 6 SD olması gerekmektedir. Her eklem için gereken fırçasız DC motor, boşluksuz ve yüksek çevrim oranlı dişli kutusu, boşluksuz ve hafif rulman, mutlak

kodlayıcı gibi maliyetler nedeni ile ilk insansı robot kolu prototipinin 6 SD olarak tasarlanmasına karar verilmiştir. İnsansı robot kolu tasarımındaki en önemli kriter robotun kendi ağırlığı ile beraber öngörülen bir ağırlığı kaldırabilmesi ve bu işlemi istenen bir ivmede yapabilmesidir. Bu sebeple, motorların uygulayabilecekleri momentler ile kol ağırlığı oranını (moment / kg) maksimum yapmak, tasarımdaki en önemli hedeflerden biridir. Bu doğrultuda, 6 serbestlik derecesi olması istenen robot kolunun tasarımı yapılırken yüksek çevrim oranlarını hem çok küçük ağırlıklarda hem de boşluksuz olarak temin edebilen Harmonic Drive® dişli mekanizmaları tercih edilmiştir. Bunun yanı sıra mümkün mertebe boyutları küçük olan ve ağırlığına göre yüksek tork üretebilen motorlar araştırılmıştır [10]. Aynı zamanda dişli mekanizmasının zarar görmemesi için motorların maksimum tork değerlerinin dişli mekanizmalarının dayanabileceği maksimum tork değerlerinden küçük olması istenmiştir [11]. Tasarımlar için SolidWorks programı kullanılmıştır. İnsansı robot kolun sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve tasarımın istenen mukavemete sahip olduğu görülmüştür.

İnsansı robot kolunun toplam boyu 605.31 mm, bileğe kadar olan toplam uzunluk 439 mm ve omuz çıkıntısı 75,5 mm olmuştur. Bu ölçüler de insansı olması açısından uygun olan ölçüler aralığındadır. Mekanik tasarımda her bir uzvun ağırlık merkezinin o uzvun orta eksenine üzerinde olmasına dikkat edilmiştir. Bu sayede merkezkaç ivmelerin oluşması ve motorların uygulaması gereken tork miktarlarının düşmesi hedeflenmiştir. Ayrıca dişli mekanizmalarının çıkışlarına ikişer adet rulman yerleştirilmiş, böylece Harmonic Drive® dişli mekanizmalarına gelebilecek aksel yük engellenmiştir. Toplam ağırlığı uç eyleyici kısmı hariç yaklaşık 7,2 kg olan robot kolunun ilk prototipine ait görünümü Şekil 1'deki gibidir.



**Şekil 1.** 6 serbestlik derecesine sahip insansı robot kolunun eklemler dizilimi ve ön tasarımı  
(Configuration and prototype of the humanoid robot arm with 6 degrees of freedom)

Bileşen seçimleri esnasında tasarlanan kolun eklem yapıları ve seçilen bileşenler birlikte optimize edilmiştir. Bileşenleri taşıyan kol iskeletinin yapısal boyutları sahip olduğu ağırlığın mümkün olduğunca az olması istenirken, dayanımının fazla, kol ucundaki titreşimlerin ve kalıcı şekil değişiminin en az olması amaçlanmıştır. Seçilen bileşenlerin ve tasarlanan robot kolunun yapılması istenen belirli görevleri yerine getirebildiği, ANSYS ortamında oluşturulan dinamik analizler yardımıyla üretim aşamasından önce doğrulanmıştır. Bu doğrultuda, ilk iki eklemden (omuz 1 ve omuz 2) EC90 Maxon fırçasız DC motor ve CPL-20 harmonik dişli kullanılırken diğer eklemlerde EC60 Maxon fırçasız DC motor ve CPL-17 harmonik dişli kullanılmıştır. Parametre optimizasyonu sonucunda Omuz 1 eklemi 1,45 kg, omuz 2 eklemi 1,78 kg, omuz 3 eklemi 1,15 kg, dirsek 1 eklemi 1,45 kg, dirsek 2 eklemi 1,15 kg ve bilek eklemi 1,45 kg olarak tasarlanmıştır. Robot kolu üzerinde kullanılan eklemler benzer tasarıma sahiptir. İnsansı robot kolu eklemlerinde kullanılan fırçasız DC motor ve harmonik dişli mekanizması sahip olduğu özellikler sırasıyla [10] ve [11]'de gösterilmektedir. İnsansı robot kolu tasarımının hafif bir yapıya sahip olması istendiğinden Alüminyum 7075-T6 alaşımı malzeme kullanılmıştır. Harmonik dişli montajında diş yapılarının zarar görmemesi için montaj yapılırken dişlilerin steril ortamda temizlenerek, herhangi bir zorlamaya maruz kalmadan montajlanması önem arz etmektedir. Üretilen 6 eklem daha önce belirlenen eklem dizilimine göre birleştirilerek Şekil 2'de görülen insansı robot kolu prototipi üretilmiştir.



**Şekil 2.** İnsansı robot kolu prototipi  
(Humanoid robot arm prototype)

Dinamik analiz ortamı; yer çekimi, kullanılan parçaların malzeme özellikleri ve çalışma ortamı detaylandırılarak oluşturulmuş ve kübik, s eğrisi ve daha yüksek dereceli hareket profilleri kullanılmıştır. Bu analizler sayesinde yük taşıma kapasitesi açısından en kritik görünen eklemler farklı koşullar ve ön yükleme altında gözlenmiştir.

Sadece bir eklemin hareket ettiği durumda omuz 2 eklemi için, kolun 2 kg faydalı yük ile en açık konumda tutmak için gerekli tork değeri yaklaşık 20 Nm'dir. Tek bir eklem hareket ettirildiğinde, harmonik dişli ve motorun maksimum tork değeri olan 71 Nm'ye ulaşan değer ile maksimum 6 kg taşıma kapasitesine ulaşabilmektedir. Tüm eklemlerin aynı anda hareket ettirildiği durumda omuz 1 eklemi için gerekli tork yaklaşık 50 Nm olmakta ve faydalı yük 3,5 kg'a düşmektedir. Üretim gerçekleştirildikten sonra insansı robot kolunun kontrolünde bazı zorluklarla karşılaşmıştır. Karşılaşılan zorluklar ve bunları çözebilmek için gerekli olan öneriler sonraki kısımlarda detaylı bir şekilde anlatılacaktır.

## 2.2. Mekanik Tasarımda Geliştirme Önerileri (Suggestions for Improvements in Mechanical Design)

Mekanik tasarım aşamasında düşünülmesi gereken ağırlık, uzunluk, faydalı yük, hız, bileşenler, vb. başlıklar bulunmaktadır. Seçilen elektrik motorlarının şekli tasarlanacak olan eklem yapısı için önemli olduğu kadar ekleme sağlayacağı hareket kabiliyeti (hız, tork değeri) açısından da önemlidir. Bir diğer önemli bileşen ise dişli kutusudur. İnsansı robot kolu eklemlerinde harmonik dişli kullanılmıştır. Bu dişli mekanizmasının montajı steril ortamlarda yapılması ve özel üretilen harmonik dişli yağının kullanılması önem teşkil etmektedir. Kullanılan harmonik dişlilerin geri sürülmesi için yüksek tork gerektirmesi farklı kontrol metodlarının denenmesi açısından engel teşkil etmektedir. Rijit kol mekanizmalarında karşılaşılan bir diğer problem ise çalışma ortamında meydana gelen çarpışmaların algılanmasıdır. Kolun çevresi ile olan teması algılayabilmesi amacıyla kuvvet/tork algılayıcıları kullanılmaktadır. Robot kolun bilek kısmında kullanılacak 6 serbestlik derecesine sahip kuvvet/tork algılayıcı çalışma ortamında meydana gelen etkileşimi algılamak, kuvvet kontrolü ve öğrenme için gereklidir ancak yeterli olmayabilir. Bu konu kinestetik öğrenme kısmında irdelenmiştir.

Bu aşamada dayanımını artırmak, kol ucunda meydana gelen şekil değişimini ve hareket aşamasında meydana gelen titreşimleri engellemek için robot kolunun topoloji optimizasyonu yapılabilir. Tasarım aşamasında kablolar eklemlerin merkezinden geçecek şekilde (hollow shaft) tasarım yapılması kablo uzunluğunun değişmesini ve kabloların ekleme sarılmasını engelleyecektir. Ancak bu oldukça zor bir tasarım olup, motorlarda ısınma problemlerine de yol açabilmektedir.

## 3. ELEKTRONİK DONANIM VE YAZILIM (ELECTRONIC HARDWARE AND SOFTWARE)

Robot kolunda kullanılan ve "Keler" kod adı verilen motor sürücülerin hem elektronik donanımı hem de gömülü yazılımı proje ekibi tarafından tasarlanmış ve imal edilmiştir. Bu tercihin yapılmasında temel olarak 3 sebep etkili olmuştur:

*Yer ve ağırlık kısıtları:* Robotta kullanılan fırçasız DC motorların sürülebilmesi için pek çok kablo gerekmektedir.

Bunlar 3 adet motor bobin kablosu, 5 adet hall-effect algılayıcı kablosu ve 6 adet optik kodlayıcı kablosu olmak üzere toplam 14 adet kablodur. Bu sebeple, sürücü kartı yerleşimi için en mantıklı yaklaşım sürücü kartlarını motorların mümkün olduğunca yakınına monte etmektir. Böylece kartlara uzak mesafeden erişmesi gereken kablolar 2 adet güç beslemesi ve 2 adet iletişim kablosu olmak üzere toplam 4 kablo ile sınırlandırılabilir. Ancak bunun için sürücülerin hafif ve küçük olması gerekmektedir. Piyasadaki hazır sürücülerin boyut ve ağırlıkları robot kolun üzerine monte edilmelerini engellemektedir.

*Gömülü yazılım üzerinde tam kontrol ihtiyacı:* Motor sürücülerin gömülü yazılımlarının proje ekibi tarafından yapılması, sürücülere istenilen kontrol algoritmalarının gömülebilmesine ve istenilen veri iletişim yöntemi ile bilgisayara bağlanabilmesine olanak sağlamıştır. Proje ihtiyaçlarına göre sürücülerin içindeki yazılımlar istenildiği zaman değiştirilebilir. Ayrıca, tüm kod proje ekibi tarafından yazıldığı için, yazılımın çalışma şekli ile ilgili bilinmezler ve belirsizlikler yoktur.

*Maliyet ve temin kolaylığı:* Piyasada bulunan endüstriyel motor sürücüler genelde yüksek gerilim ve güç değerlerine sahip olan ve servo motor olarak bilinen fırçasız AC motorlara yönelik olarak tasarlanmışlardır. 24 volt ve 100 watt değerleri civarında hazır motor sürücü seçenekleri azalmakta, fiyatları yüksek ve temin edilmeleri zorlaşmaktadır.

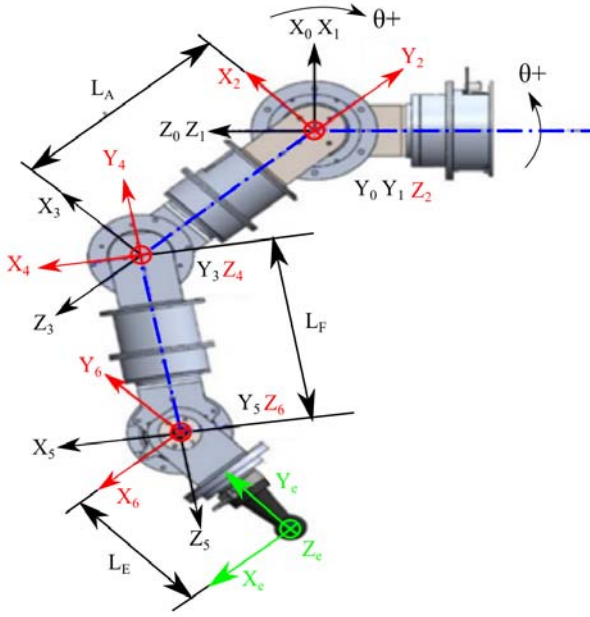
Sürücü kartların tasarımı birkaç prototip aşamasından geçerek son halini almıştır. Tasarlanan sürücüde, tüm elektronik elemanlar tek bir 50 x 50 mm karta toplanmış ve kartın ağırlığı 20.4 gram olmuştur. Fırçasız DC motor sürücüsü, 24 V ile çalışacak ve azami 5 A akım sağlayabilecek şekilde tasarlanmıştır. Üzerinde motora giden bobin kablosu konnektörü haricinde, motor içine gömülü hall-effect algılayıcılar, artırımlı quadrature optik kodlayıcı ve iletişimde kullanılan RS485 hattı için de ayrı konnektörler bulunmaktadır. Sürücü, fırçasız DC motorları sürmek için 6 adımlı komütasyon yöntemini kullanmaktadır. Bilgisayarla olan iletişimi ise, RS485 üzerinden giden Modbus protokolü ile sağlamıştır. Sürücü, açık çevrim hız kontrolü, kapalı çevrim hız kontrolü ve kapalı çevrim konum kontrolü ile çalışma modlarını desteklemektedir. Kontrolcülerle ilgili tüm katsayılar, konum ve hız referansları Modbus aracılığı ile bilgisayar üzerinden ayarlanabilmektedir.

Bilgisayar tarafında, RS485 hattına erişmek için bir USB-RS485 dönüştürücüsü kullanılmaktadır. Bilgisayar yazılımları tarafından bir seri port algılanan bu donanıma birden fazla programın aynı anda erişmesi arzulanmış, bunu sağlamak için ise bir bekçi yazılım hazırlanmıştır. "mdport" adı verilen ve C++ dili ile yazılan bu yazılım, diğer programlardan gelen Modbus erişim taleplerini sırayla işleme koyarak verileri hatta basmak ve motor sürücülerden gelen cevapları talepte bulunan programa iletmekle sorumludur. Bunu yapmak için ise libmodbus isimli kütüphane kullanılmıştır. Bu sayede örneğin bir program

motor sürücülere konum referansları gönderirken, bir başka program anlık olarak eklem açılarını okuyarak işleyebilmektedir. M4port ile diğer programların iletişimi için ZeroMQ adındaki mesajlaşma kütüphanesi kullanılmıştır. Robot ile iletişim kuracak programlar Python dili ile yazılmış, bu sayede motor sürücülerin tüm özelliklerine bir Python komut satırından kolaylıkla erişim mümkün olmuştur.

#### 4. İLERİ KİNEMATİK EŞİTLİKLER VE TERS KİNEMATİK ÇÖZÜM ÖNERİLERİ (SUGGESTIONS FOR FORWARD AND INVERSE KINEMATIC MODELS)

Robot kolunun ileri kinematik eşitliklerini elde etmek için Craig tarafından kullanılan modifiye edilmiş Denavit-Hartenberg (D-H) parametreleri kullanılmıştır [12]. Robotun eklem diziliminden dolayı 1-2, 3-4 ve 5-6 numaralı eklemlere ait eksen takımları Şekil 3'de görüldüğü gibi atanmıştır.



Şekil 3. İnsansı robot kolu ve eksen takımlarının  
(Humanoid robot arm and coordinate frames of the joints)

Bu eksen takımları kullanılarak D-H tablosu oluşturulmuştur. D-H tablosu, yerleştirilen eksen takımları ile D-H kuralları kullanılarak oluşturulmuştur. Tablo 1'de tasarıma ait DH parametreleri gösterilmiştir.

D-H tablosu ve dönüşüm matrisi kullanılarak her uzvun bir öncekine göre konumu ve yönelimi elde edilmiştir. Kullanılan dönüşüm matrisi Eş. 1'de verilmiştir.

$$T_i^{i-1} = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} d_i \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Tablo 1. Modifiye edilmiş D-H tablosu (Modified D-H table)

$i$	$\alpha_{i-1}$	$a_{i-1}$	$d_i$	$\theta_i$
1	0	0	0	$\theta_1$
2	$-\frac{\pi}{2}$	0	0	$\theta_2$
3	$\frac{\pi}{2}$	0	$L_A$	$\theta_3$
4	$-\frac{\pi}{2}$	0	0	$\theta_4$
5	$\frac{\pi}{2}$	0	$L_F$	$\theta_5$
6	$-\frac{\pi}{2}$	0	0	$\theta_6$

Her bir uzva ait dönüşüm matrisleri sırasıyla çarpılarak uç kısmın robot kolunun sabit uzvuna göre konumu ve yönelimi Eş. 2'de elde edilmiştir.

$$T_6^0 = T_1^0 T_2^1 T_3^2 T_4^3 T_5^4 T_6^5 \quad (2)$$

Uç eyleyicinin robotun 6. uzvuna göre konumu ve yönelimini veren dönüşüm matrisi Eş. 3'te verilmiştir.

$$T_E^6 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -L_E \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Uç eyleyicinin robotun sabit uzvuna göre çalışma uzayındaki konumu ve yönelimi Eş. 4'te hesaplanmıştır.

$$T_E^0 = T_6^0 T_E^6 \quad (4)$$

#### 4.1. Ters Kinematik Çözüm (Inverse Kinematic Solution)

Altı serbestlik derecesine sahip insansı robot koluna ait benzer eklem dizilimi için geometrik ters kinematik çözümü üzerine çalışmalar yapılmıştır [13, 14]. Literatürde robot kolunun ters kinematik çözümünü elde edebilmek için sayısal ve iteratif metotlar mevcuttur. Bu çalışmada hızlı sonuç vermesinden ve kolaylığından dolayı geometrik ters kinematik çözüm tercih edilmiştir. Bu yaklaşımda seçili eklem dizinin hareket sınırlarında trigonometrik eşitlikler kullanılarak sadeleştirilmiş denklemler ile eklem açılarının sıralı bir şekilde elde edilmesi prensibine dayanmaktadır. Öncelikle uç eyleyicinin yönelimini hesaplayabilmek için 4, 5 ve 6 numaralı eklemlerin açı değerleri kullanılarak hesaplanırken, uç eyleyicinin konumu ise 1, 2 ve 3 numaralı eklemlerin açı değerleri kullanılarak hesaplanmaktadır.  $T_E^0$  matrisinin tersi Eş. 5'deki gibi elde edilmektedir.

$$[T_E^0]^{-1} = T_0^E = \begin{bmatrix} R_{3x3}^T & -R_{3x1}^T P_{3x1} \\ 0_{1x3} & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Literatürde bulunan çalışmalarda önerilen denklem çözümlerinden yararlanılarak eşitlikler elde edilmiştir. Bunun için ilk dört ekleme ait dönüşüm Eş. 6'da verilmiştir.

$$T_4^5 T_3^4 T_2^3 T_1^2 T_0^1 = T_6^5 T_E^6 T_0^E \quad (6)$$

Eş. 6 kullanılarak Eş. 7, Eş. 8 ve Eş. 9 numaralı eşitlikler elde edilmiştir.

$$-S_6(p_y + L_e) + C_6 p_x = -L_3 S_4 \quad (7)$$

$$p_z = L_3 S_4 S_5 \quad (8)$$

$$-C_6(p_y + L_e) - S_6 p_x = L_3 C_4 + L_5 \quad (9)$$

Bu denklemler kullanılarak sırasıyla 4, 5 ve 6 numaralı eklemler için açı değerleri hesaplanmıştır. Öncelikle 4 numaralı ekleme ait açı değeri Eş.10'daki gibi elde edilmiştir.

$$C_4 = \frac{(p_y + L_e)^2 + (p_x)^2 + p_z^2 - L_3^2 - L_5^2}{2L_3 L_5} \quad (10)$$

$$\theta_4 = atan2\left(\pm\left(\sqrt{1 - C_4^2}\right), C_4\right) \quad (11)$$

5 numaralı eklemin açı değeri;

$$S_5 = \frac{p_z}{S_4 L_3} \quad (12)$$

$$\theta_5 = atan2\left(S_5, \pm\left(\sqrt{1 - S_5^2}\right)\right) \quad (13)$$

6 numaralı ekleme ait açı eşitliği;

$$\frac{S_{6+\gamma}}{C_{6+\gamma}} = \frac{L_3 C_4 + L_5}{-L_3 S_4 C_5} \quad (14)$$

$$\theta_6 = wtopi(atan2(L_3 C_4 + L_5, -L_3 S_4 C_5) - \gamma) \quad (15)$$

$$\gamma = \left(atan2(p_y + L_e, p_x)\right) \quad (16)$$

6. eklemin açı değeri elde edebilmek için kullanılan 'wtopi (Wavelet Transform on Propagation and Imaging)' fonksiyonu eklemin 0 ile 360<sup>o</sup> arasında değer alabilmesi için kullanılmaktadır. İlk üç eklemin açı bilgilerini elde edebilmek için ilk üç ekleme ait dönüşüm eşitliği kullanılmıştır. Elde edilen 2 numaralı ekleme ait açı Eş. 17 ve Eş. 18'deki gibidir.

$$C_2 = a_y(C_4 C_6 - C_5 S_4 S_6) + a_x(C_4 S_6 + C_5 C_6 S_4) - a_z S_4 S_5 \quad (17)$$

$$\theta_2 = atan2\left(\pm\left(\sqrt{1 - C_2^2}\right), C_2\right) \quad (18)$$

3 ekleme ait açı eşitlikleri;

$$C_3 = a_y(C_6 S_4 + C_4 C_5 S_6) + a_x(S_4 S_6 - C_4 C_5 C_6) + a_z C_4 S_5 \quad (19)$$

$$S_3 = -a_y S_5 S_6 + a_x C_6 S_5 + a_z C_5 \quad (20)$$

$$\theta_3 = atan2(S_3, C_3) \quad (21)$$

1 ekleme ait açı eşitlikleri;

$$C_1 = n_y(C_4 C_6 - C_5 S_4 S_6) + n_x(C_4 S_6 + C_5 C_6 S_4) - n_z S_4 S_5 \quad (22)$$

$$S_1 = o_y(C_4 C_6 - C_5 S_4 S_6) + o_x(C_4 S_6 + C_5 C_6 S_4) - o_z S_4 S_5 \quad (23)$$

$$\theta_1 = atan2(S_1, C_1) \quad (24)$$

Özet olarak Eş. 6 kullanılarak eşitliğin sağındaki ve solundaki matrislerin konumlarının birbirine eşitlenmesi ile denklemler elde edilmektedir. Bu eşitlikler kullanılarak bir nokta için 8 farklı ters kinematik çözümü hesaplanmaktadır. Bu olasılıklardan birini seçerken öncelikle eklem sınırları göz önüne alınmaktadır. Daha sonra bir önceki eklemin konum değerlerine bakılmaktadır ve eklem hareketi en küçük olacak şekilde yeni hareket konumları seçilmektedir.

Bu makalede yer verilememiş olmakla beraber insansı robot kolunun Jacobian matrisi elde edilmiş ve sağlaması yapılmıştır [15]. Bu çalışmada, tekil noktalar Eş. 25'te verilen Jacobian matrisin determinantının 0'a eşitlenmesi ile elde edilmiştir.

$$|J| = L_A^2 \times L_F \cos\theta_5 \times \sin\theta_2 \times ((\cos\theta_4)^2 - 1) = 0 \quad (25)$$

Buradan  $\theta_2, \theta_4 = 0, \pi$  olduğu,  $\theta_5 = \pm\pi/2$  olduğu konfigürasyonlar tekil noktalar olarak elde edilmiştir. Mekanik olarak  $\theta_2$  ve  $\theta_4$  açılarının  $\pi$  değerini alması mümkün değildir, sıfır olması da yazılım ile engellenmiştir.

#### 4.2. Yörünge Planlanması (trajectory planning)

Yörünge planlanması, ilk konumdan son konuma giderken robot eklem açılarının, açısal hızlarının ve açısal ivmelerinin zamana göre değişiminin belirlenmesi için kullanılmaktadır. Bu çalışmada noktadan noktaya hareket için trapez ve kübik olmak üzere 2 farklı hız profili kullanılmıştır. Yörünge planlanırken verilen maksimum hız ve ivme değerleri kullanılmıştır [16, 17]. Eklemlerin birlikte hareket etmesi için eklem uzayında yörünge planlaması yapılmış ve konum değerlerinin kübik hız profilini izlemesi için aşağıdaki konum denklemi eklem kontrolcülerine tanımlanmıştır.

$$\theta(t) = \theta_0 + \left(\frac{3}{t_f^2}\right)(\theta_r - \theta_0)(t^2) - \left(\frac{2}{t_f^3}\right)(\theta_r - \theta_0)(t^3) \quad (26)$$

Uç eyleyicinin hareketi tamamlama süresi  $t_f$ , eklemin başlangıç konum değeri  $\theta_0$  ve eklemin gitmesi gereken referans konum değeri  $\theta_r$  ile gösterilmiştir. Mikroişlemcide programlama kolaylığı açısından daha az işlem gerektirdiği için üçüncü dereceden polinom olan kübik eğri tercih

edilmiştir. Deneyler aşamasında kendi sürücü tasarımı ile akım değerleri sınırlandırılmıştır.

## 5. İNSANSI ROBOT KOLU KONTROLÜ (HUMANOID ROBOT ARM CONTROL)

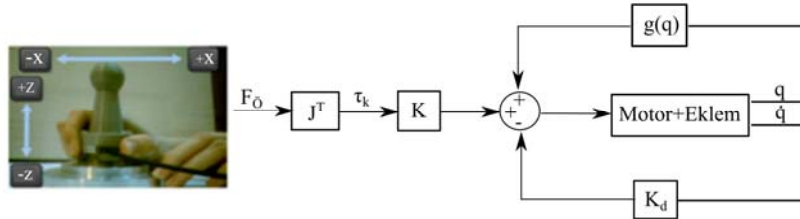
Bu çalışma kapsamında insansı robot kolu için birkaç farklı görevde benzetim çalışmaları yapılan üç çeşit kontrol yöntemi gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, temel kontrol yöntemlerinden biri olan yaklaşık olarak hesaplanmış tork ile PD kontrolü uygulanmıştır. Hareket süresince eklemeler uygulanması gereken tork değerlerini tespit etmek için kinetik enerji ile potansiyel enerji farkını ifade eden Euler - Lagrange denklemleri kullanılmıştır. Öteleme ve dönme hareketleriyle oluşan kinetik enerji eşitliğinin yazılması için eklem doğrusal hızları ile eklem açısal hızları arasındaki ilişkiyi ifade eden Jacobian matrisi yazılmıştır. Bu enerji eşitliğinden kısmi türevler aracılığı ile tork değerlerine ulaşılmıştır (Eş. 27).

$$\tau = D(\theta)_{6 \times 6} * \theta''_{6 \times 1} + C(\theta, \theta')_{6 \times 6} * \theta'_{6 \times 1} + g(\theta)_{6 \times 1} \quad (27)$$

Bu denklemde,  $D$  eylemsizlik/atalet matrisini,  $C$  coriolis matrisini ve  $g$  yerçekimi moment matrisini göstermektedir. Kapalı çevrim kontrol sistemini oluşturmak üzere Simmechanics™ eklentisi kullanılarak, sistemin Simulink® modeli elde edilmiştir. İlk aşamada robotun yörünge takibinde tork değerlerini aşp aşmadığını kontrol etmek amacıyla hesaplanmış tork kontrolü ile dinamik benzetim yapılmıştır. Öncelikle, istenilen ilk ve son konum ve yönelim bilgisine göre ters kinematik çözüm yapılmıştır. Tercihe göre kübik veya trapez hız profilleri kullanılarak yörünge planlanıp, referans konum, hız ve ivme değerleri elde edilmiştir. Yerçekimi kompanzasyonlu yaklaşık hesaplanmış PD tork kontrolü, Eş. 28 kullanılarak oluşturulmuştur.

$$\tau = D(\theta) * (\theta'_{ref} + Kp * e + Kd * e') + g(\theta) \quad (28)$$

Benzetim programı çeşitli yükler altında, farklı hız/ivme profilleri ve kontrol katsayıları için çalıştırılmıştır. Bu çalışmalar detaylı olarak [18] numaralı kaynakta yer almaktadır. Konum kontrolü dışında, bu çalışma kapsamında kuvvet kontrolünün hassas olarak yapılması gerektiği görevlerde etkili olarak kullanılacak kuvvet kontrolü ve empedans kontrol çalışmaları yapılmış ve izleyen bölümlerde sunulmuştur.



Şekil 4. Robot kolu kinestetik kuvvet kontrolü blok diyagramı (Öğretme aşaması 1)  
(Robot arm kinesthetic force control block diagram (Teaching part 1))

### 5.1. Kuvvet Kontrolü (Force Control)

İnsansı robot kolunun robot-insan etkileşimi kapsamında, insanlardan fiziksel olarak bazı görevleri öğrenebilmesi ve daha sonra bu görevleri tekrarlayabilmesi hedeflenmiştir. Bu doğrultuda robotun konum ve hız kontrollerinin dışında kuvvet kontrolüne de gerek duyulmaktadır. Çevresel etkileşim içeren bir senaryo olarak, robot koluna bir düzlem üzerine yazı yazmasının öğretilmesi seçilmiştir. Öğretme yöntemi olarak, insan tarafından robot kolunun tutulup yönlendirilerek hedeflenen görevin yaptırılmasını sağlayan fiziksel (kinestetik) yöntem seçilmiştir.

Robot kollarını fiziksel olarak aktif ya da pasif hareket ettirmek mümkündür. Pasif manipülasyonda motorların geri sürülebilir olması ve dişlilerin geri sürülme momentlerinin operatör tarafından karşılanması gerekir. İnsansı robot kolunda pasif sürüş için gerekli kuvvet değerleri hassas manipülasyon için yüksek olduğundan (yaklaşık 10-15 N yani 1-1,5 kg-f), aktif kontrol tercih edilmiştir.

#### 5.1.1. Öğretme aşaması (Teaching step)

Öğretme işlemi iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Aktif yöntem olan ilk öğretim aşamasında, operatör robotu uç eyleyiciden tutarak hareket ettirir. Böylece, bilekte bulunan kuvvet/moment algılayıcı tarafından operatörün robota uyguladığı fiziksel kuvvetler ölçülür. Robotu pasif olarak hareket ettirmek için yetersiz olan bu kuvvetler Jacobian matrisi yardımıyla eklem motorlarına kuvvet kontrolcüsü tarafından paylaşılır.

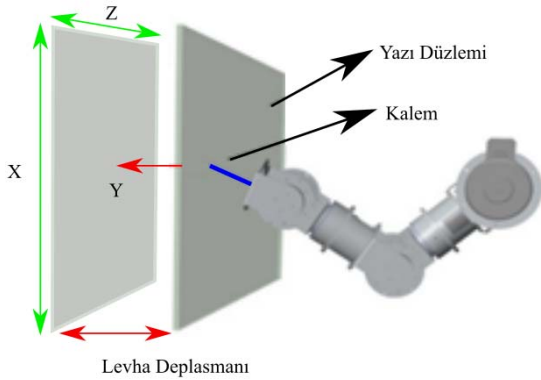
$$\tau_k = J^T \cdot F_0 \quad (29)$$

Eş. 29'da;  $\tau_k$  eklemlere gelen kinestetik momenti,  $J^T$  kuvvet kollarını anlık hesaplayan Jacobian matris devriğini ve  $F_0$  ölçülen kuvveti yani operatör tarafından robota uygulanan kinestetik kuvveti ifade etmektedir. Hesaplanan momentler, eklemlere referans olarak verilmeden önce robotta elde edilmek istenen kuvvet duyarlılığına (direngenliğine) göre bir  $K$  katsayısı ile çarpılırlar (Şekil 4). Bu katsayılar maksimum kinestetik öğretim verimine göre optimize edilebilirler. Dikkat edilmesi gereken nokta, pasif durumda motor ve eklem sürtünmelerinin harekete direnç gösterirken aynı zamanda sistemin geçici rejim kararlılığına katkıda bulunmalarıdır. Bu etkiyi aktif yöntemde de sağlamak amacı ile eklem uzayı kontrolüne sanal sönüm ( $K_d \cdot \dot{q}$ ) eklenmiştir.

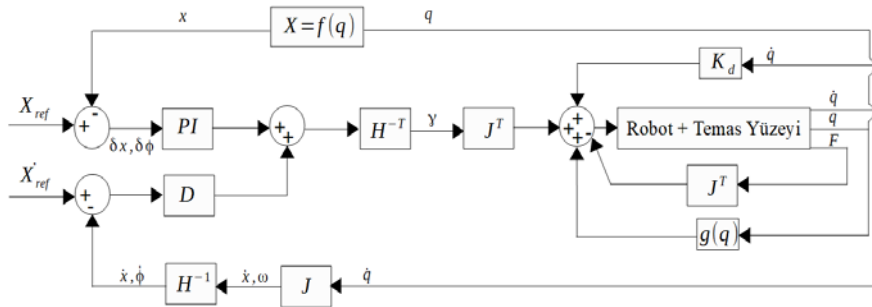


Sistem bir insansı robot kolu olduğundan kütlesi ve maruz kalacağı ivmeler görece düşüktür. Robot üzerindeki yerçekimi kuvvetleri  $g(q)$  vektörü ile kompanse edilmiş ancak atalet ve coriolis gibi etkilerin kompanzasyonu ayrıca yapılmamış, kontrolcüye bırakılmıştır. Anlatılan kontrol yapısı, öğretim işleminin birinci aşamasını oluşturmaktadır. Robotun bu aşamada geçtiği yörünge konum ve hız bilgisi motor kodlayıcıları yardımıyla okunur ve hafızaya alınır. Bu aşamanın test edilmesi için, MATLAB Simulink Simscape modülü ile kurulmuş olan mekanik modele, yukarıda tarif edilen kontrol blokları eklenmiştir. Şekil 4’de verilen blok diyagramındaki aktif eklem momentlerine ek olarak, benzetim için eklem üzerindeki pasif fiziksel kuvvet etkisinin de modele eklendiği not edilmelidir. Kuvvet algılayıcısı ATI Mini 45, ilgili eklenti (Instrument Control Toolbox) kullanılarak, UDP (User Datagram Protocol – Kullanıcı Veri Bloğu İletişim Kuralları) aracılığıyla Simulink benzetim modeline bağlanmıştır.

Benzetim çalışması için modele robot uç eyleyicisi olarak bir kalem eklenmiş, robot kinematik eşitlikleri buna göre güncellenmiştir. Temas yüzeyi ve temas kuvveti de modellenerek benzetime dahil edilmiştir (Şekil 5). Temas modeli olarak matematiksel yay modeli kullanılmıştır. Algılayıcı yardımı ile benzetim modeline uygulanan birinci öğretim aşamasına ait bir video ilgili kaynakta görülebilir [19].



Şekil 5. İnsansı robot kolu hareketli levha üzerine yazma benzetim görseli (I-TECH robot arm writing on a moving plate simulation image)



Şekil 6. Öğretim Aşama 2 blok diyagramı (Teaching step 2 block diagram)

İlk aşamada istenen göreve ait konum ve hız referanslarını öğrenen robotun, ikinci aşamada ise bu göreve ait temas kuvveti referansını öğrenmesi tasarlanmıştır. Bu işlemin iki aşamada gerçekleştirilmesinin sebebi, robot kolu üzerinde bir adet kuvvet algılayıcı bulunması ve robotun pasif olarak hareket ettirilememesidir. Birinci aşamada algılayıcı kullanıcı kuvvetlerini ölçtüğünden aynı anda temas kuvvetlerini de yalnız olarak ölçememektedir. Üzerinde iki ya da daha fazla kuvvet algılayıcı bulunan robotlarda ya da temas yüzeylerinden birinde kuvvet algılayıcı bulunan durumlarda, hem konum hem de kuvvet referanslarının bir defada öğretilmesi mümkündür [20]. Ancak burada olduğu gibi tek algılayıcı robotlarda, iki aşamalı öğrenme yöntemlerinin uygulandığı görülmektedir [21-23].

Bu çalışmada ikinci aşama olarak, robotun ilk aşamada öğrendiği yörüngeyi, aynı çevre şartları altında yüksek katıllıklı bir konum kontrolcüsü ile tekrar etmesi ve bu defa boşta olan kuvvet algılayıcı ile temas kuvvetini ölçerek kaydetmesi tasarlanmıştır. Bu adıma ait blok diyagramı Şekil 6’da gösterilmektedir. Kinematik bölümünde belirtildiği üzere  $x$  konum vektörü  $6 \times 1$  boyutunda bir vektör olarak Euler açıları yaklaşımı kullanılarak elde edilmiştir.

Bu yaklaşımda kullanılan Euler parametrelerinin değiştirimli olmamaları sebebiyle,  $X = f(q)$  vektörünün açıl konum belirten son üç elemanı ile yapılacak açıl konum hatası hesabı ve yine bu elemanların türevini kullanarak açıl hız ( $\omega$ ) geçişinde kullanılması gereken özel bir transformasyon matrisi ( $H$ ) vardır. ZYX uyuşması için bu matris,

$$H = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & 0 \\ 0 & T \end{bmatrix} \quad (30)$$

$$T^{-T} = \begin{bmatrix} -s\beta & syc\beta & cyc\beta \\ 0 & c\gamma & -s\beta \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (31)$$

eşitlikleriyle tanımlanır.  $\beta$  ve  $\gamma$  Euler açıları,  $s$  ve  $c$  ise sinüs ve kosinüs fonksiyonlarını ifade etmektedir. Bu transformasyon matrisinin algoritma üzerindeki etkileri ise aşağıdaki eşitliklerde ifade edildiği gibidir.

$$\gamma_o = T^{-T}(\varphi). K_c. \delta\varphi \quad (32)$$

$$\dot{\varphi} = T^{-1}. \omega \quad (33)$$

Kontrol diyagramında, konum ve hız hatalarından PID kontrolcü yardımıyla bir eşdeğer kuvvet vektörünün ( $\gamma$ ) hesaplandığı görülmektedir. Bu vektörün son üç elemanı momentleri ifade etmekte ve  $\gamma_0$  ile gösterilmektedir.  $\varphi$  Euler açılarını ve  $\delta\varphi$  de Euler açıları hatasını ifade etmektedir.  $K_c$  eşdeğer kontrolcü katsayısıdır. Euler açılarının türevi direkt olarak açısal hızları vermediği için Eş. 33'deki dönüşüm kullanılmıştır. Hesaplanan eşdeğer kuvvet Jacobian matrisin devriği ile çarpılarak eklem momentleri bulunup motorlara beslenmiştir. Daha önceki diyagrama ek olarak burada motor seviyesinde, ölçülen temas kuvvetinden hesaplanan eklem momentlerinin motorlara geri beslendiği görülmektedir. Bu, hareket kontrolüne bozucu olarak etki eden fiziksel temas kuvvetinin kuvvet algılayıcısı kullanılarak aktif kompanzasyondur. Böylece hareket kontrolünün daha yüksek doğrulukla gerçekleşmesi ve orijinaline en yakın temas kuvvetlerinin öğrenilmesi hedeflenmiştir.

### 5.1.2. Uygulama aşaması - uyarlanabilir hibrit kuvvet/konum kontrolü

(Application step - adaptive hybrid force/position control)

Bu aşama için tasarlanan kontrol algoritması ile robotun insan tarafından öğretilmiş olan görevi, insan kolunun geçtiği konumlardan aynı hızlar ile geçerek ve insanın uyguladığı temas kuvvetini uygulayarak tekrarlaması hedeflenmiştir. Burada, temas kuvvetinin sadece temas yüzeyine dik doğrultuda olduğu gözletirse (yüzey sürtünmesi ihmal edilmiştir), kuvvet kontrolünün yalnızca yüzeye dik doğrultuda olması gerektiği, diğer doğrultularda robotun konum ve hız referanslarını takip etmesi gerektiği anlaşılabilir. Bu şekilde farklı serbestlik dereceleri için farklı kontrol kanunlarının kullanıldığı yapılar "hibrit kontrol" yapıları olarak adlandırılırlar. Bu çalışma için geçerli olan hibrit kuvvet-konum kontrolü blok diyagramı Şekil 7'de gösterilmiştir. Burada önceki diyagramlardan farklı olarak "seçim matrisleri" adı verilen  $S$  ve  $S'$  matrisleri yer almaktadır. Bu matrisler diagonal matrislerdir.  $S$  matrisinde 0 olan elemanlar  $S'$  matrisinde 1, 1 olanlar ise 0 olur (yalnızca diagonal üzerinde), böylece

serbestlik derecelerindeki kontrol kanunları tamamen ayrıştırılmış olur.

### 5.1.3. Uyarlanabilir kontrol (Adaptive control)

Eş. 34 ve Eş. 35'te görüldüğü gibi  $S$  matrisi konum kontrolüne,  $S'$  matrisi ise kuvvet kontrolüne maruz kalacak koordinatları seçmektedir. Buna göre, tüm açısal koordinatların ve  $x$ ,  $z$  koordinatlarının her zaman konum kontrolüne belirleneceği görülebilir.

$$S = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & S_{22}(f_r, f_0) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (34)$$

$$S' = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & S'_{22}(f_r, f_0) & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (35)$$

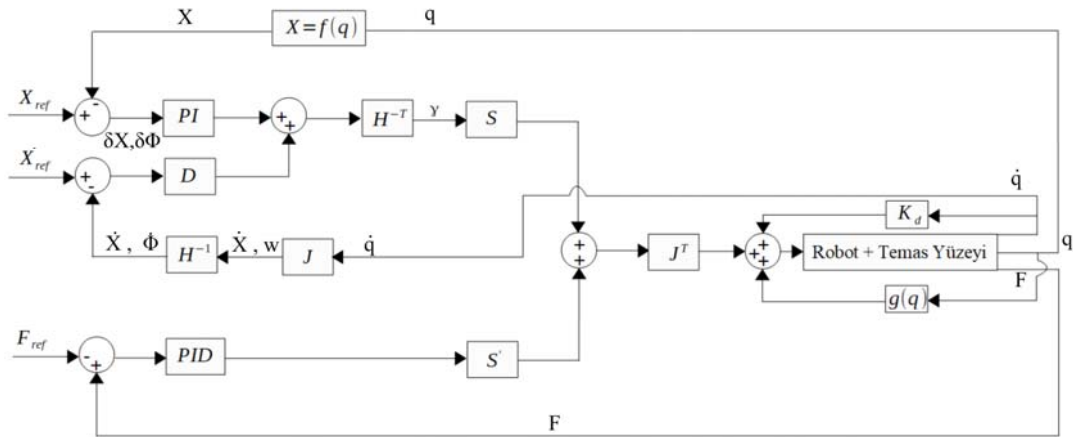
Öte yandan,  $y$  koordinatının kontrol kanununu belirleyecek olan çarpan, referans temas kuvveti  $f_r$  ve ölçülen temas kuvveti  $f_0$ 'nün fonksiyonu olarak  $S_{22}(f_r, f_0)$  şeklinde tanımlanmıştır. Bu fonksiyon,  $u(f)$  birim basamak fonksiyonu,  $||$  (or) ve  $\sim||$  (nor) mantık operatörleri olacak şekilde,

$$S_{22}(f_r, f_0) = u(f_0) \sim ||u(f_r) \quad (36)$$

$$S'_{22}(f_r, f_0) = u(f_0) ||u(f_r) \quad (37)$$

eşitlikleriyle tanımlanmıştır. Bunun amacı, kontrolcü seçimini levha ya da uç eyleyicinin olası hareketleri ve bu hareketlerin gerçekleşme zamanına göre güncelleyebilmek, kontrolü "uyarlanabilir" hale getirmektir.

Yazı yazmak temas içeren bir görev olmakla beraber, yazının ayrık harflerle yazılması görevin tamamının temassız ve temassız ardışık parçalardan oluşmasına yol açmaktadır. Bu



Şekil 7. Hibrit kuvvet-konum kontrolü blok diyagramı (Hybrid force-position control block diagram)

nedenle, örneğin birinci harften ikinci harfe geçişte oluşan temassız yörüngede, y doğrultusunda kuvvet kontrolü değil konum kontrolünün etkin olması gerektiği görülmektedir. Buradan, temas beklendiği sürece yani  $f_r > 0$  olduğu sürece  $S'_{22} = 1$  yani y ekseninde kuvvet kontrolünün etkin olması gerektiği görülmektedir. Temas esnasında levhanın uzaklaşması durumunda temasın kesilmemesi veya levhanın yaklaşması durumunda ise referans temas kuvvetinin aşılması için kuvvet kontrolü uygulanmalıdır. Temas yokken levhanın uzaklaşması durumunda sıradaki harf yazımında levhanın yeni konumuna erişmek için, levhanın yaklaşması sonucu çarpma durumunda temasın kesilmesi için yine kuvvet kontrolü uygulanmalıdır. Temas kuvvet referansı sıfır olduğunda dahi, temas yokken levha yaklaşması durumunda çarpma olmaması için, kuvvet kontrolü uygulanması gerekmektedir. Buna göre, tüm durumları kapsayan kuralın Eş. 36 ve Eş. 37'deki gibi olması gerektiği görülür.

Dikkat edilmesi gereken bir başka nokta ise, görevin temassız parçaları (harf geçişleri) esnasındaki konum referanslarının, levhanın hareketine göre güncellenmesi gerektiğidir. Örneğin birinci harfin yazımı esnasında levha robota yaklaştıysa, ikinci harf geçişinde temasın kesilebilmesi için robotun uç eyleyiciyi öğrendiği konumdan daha geriye çekmesi gerekir. Bu amaçla robotun levha ile teması sırasında y eksenindeki konum hatasının mutlak değeri ( $|e|$ ), bir  $\varepsilon$  değerinin üzerine olduğunda, referans konum Eş. 38'de verildiği gibi güncellenmektedir.  $\varepsilon$  değeri, levha hareketi olmadığı durumda da oluşabilecek kontrolcü hatalarını hariç tutmak amacıyla kullanılmıştır.

$$X_r = X_r - \int e_x \cdot u(f_0) \cdot u(|e| - \varepsilon) \cdot dt \quad (38)$$

#### 5.1.4. Görev uzayının farklı alanlarındaki uygulamaları (Applications in different areas of the task space)

Algoritmada kullanılan kontrolcü katsayıları deneme yanılma yöntemi ile belirlenmiştir. Temas kuvvetini

öğrenme performansı, ikinci aşamada kullanılan konum kontrolcüsü katılığının farklı değerleri için ( $K=0.1-1$ ) incelenmiştir. Beklenileceği üzere, kontrolcü kazancı arttıkça, öğrenilen temas kuvveti gerçeğe yaklaşmaktadır. Şekil 8'de, ikinci aşamada öğrenilen temas kuvveti öğrenme performansı levha üzerine ayrı harflerle yazılan bir kelime için; birinci aşamada uygulanan gerçek temas kuvveti, ikinci aşamada yüksek katılıklı konum kontrolü ile tekrarlanan görevde oluşturulan (öğrenilen) temas kuvveti ve aradaki fark grafik üzerinde gösterilmiştir ( $K=0.1$  için). 1 N'un üzerindeki temas kuvvetleri için ortalama bağıl hata %4 olarak hesaplanmıştır.

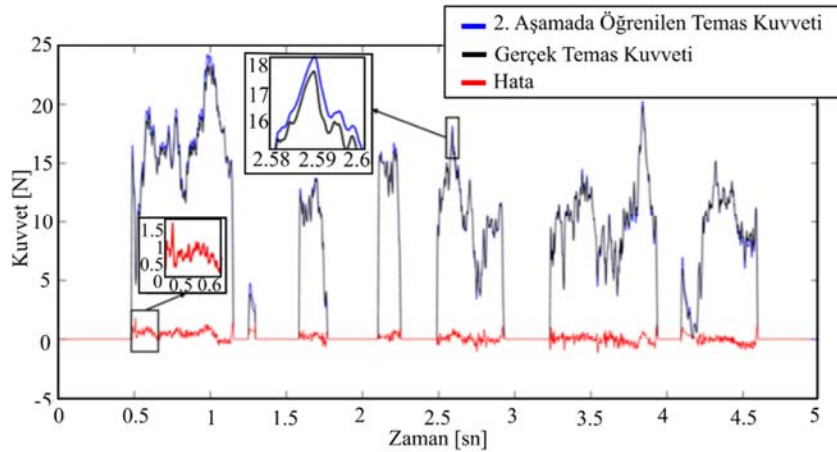
Robotun sabit levha üzerinde öğrendiği kelimeyi, bu kez sürekli sinüzoidal hareket yapmakta olan (genlik:30 mm, frekans: 2 rad/s) levha üzerine, hibrit kuvvet-konum kontrolü altında uygulaması sırasında, uzaklaşmış olan levhaya kuvvet kontrolü altında yaklaşarak çarpması sonucunda ani kuvvet artışları gözlemlenmiştir. Yalnız oransal kontrol altında oluşan bu problem, kuvvet kontrolcüsü olarak PD kontrole geçilerek önlenmiştir.

Son olarak, levha üzerine çizilen farklı büyüklüklerdeki şekiller ile kontrolcünün görev uzayının farklı bölgelerindeki performansı test edilmiş ve hem öğrenme hem de uygulama performanslarının aynı seviyede seyrettiği görülmüştür. Şekil 9'da öğretilecek şekillerden birinin hareketli levha üzerine çizilmesi esnasındaki konum takip performansı görülmektedir.

Tasarlanan bu uyarlanabilir algoritma, yazı yazılan yüzeyin normal doğrultusunun bilindiği durumlar için geçerlidir. İleriki çalışmalarda, kuvvet-moment algılayıcı yardımıyla yüzey normalinin algılanarak, seçim matrislerinin bu bilgiye göre uyarlanabilir hale getirilmesi, algoritmanın geliştirilmesi adına faydalı olacaktır.

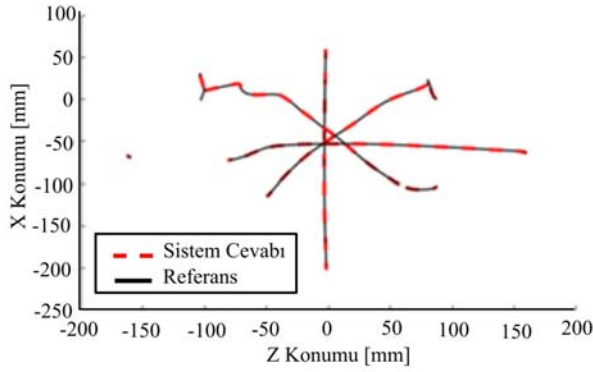
#### 5.2. Empedans Kontrolü (Impedance Control)

Robotikte, robot manipülatörünün insan veya çevre ile etkileşiminde olduğu görevlerde temel olarak konum ve



Şekil 8. Öğretme aşaması 2'de temas kuvveti öğrenme performansı (Contact force learning performance at teaching step 2)

kuvvet kontrolünün sağlanması gerekmektedir. Literatürde konum ve kuvvet kontrolü alanında çeşitli yöntemler vardır. Temel olarak, uygulanan kuvvet-konum veya kuvvet-hız ilişkisine göre ya da doğrudan kuvvet geri beslemeli kontrol ve türevleri olarak sınıflandırılabilir. Manipülatörün çevre ile temasının zayıf olduğu spray boyama, kaynak, paletleme gibi görevlerde, konum kontrol yöntemleri yeterli olabilmektedir [24-26]. Ancak manipülatörün çevre ile etkileşiminin daha güçlü olması gerektiği görevlerde; montaj, boyama, taşlama, çapak alma, medikal operasyonlar gibi, kuvvet kontrolü de gerektirmektedir [24, 28].



**Şekil 9.** Kinestetik olarak öğretilen yıldız şeklinin, sinüs hareketli levha üzerine hibrit kontrol ile çizdirilmesi (Reenactment of the star shape, taught kinesthetically, under hybrid control)

Kuvvet kontrolünde temel değişkenler konum, hız, ivme ve kuvvettir. Mevcut kuvvet kontrol algoritmalarındaki farklılıklar bu değişkenleri ve aralarındaki ilişkilerin farklı şekillerde yapılmasından kaynaklanmaktadır. Konum ve uygulanan kuvvet arasındaki ilişkiyi içeren yöntemlerin başında katılık kontrolü gelmektedir. Katılık kontrolü sadece konum geri beslemesiyle yapılabildiği gibi kuvvet geri beslemesiyle de yapılabilmektedir [29]. Diğer konum/kuvvet kontrol yöntemleri Empedans Kontrol, Admitans Kontrol, Hibrit Konum/Kuvvet Kontrolü ve Hibrit Empedans Kontrol olarak sıralanabilir.

Admitans kontrolde, belli bir değerde olması istenen kuvvet ve bu değeri izleyecek kuvvet kompanzatorünün olması gerekir. Konum kontrolünden farklı, bozucu kuvvetleri gidererek referans hareket yörüngesini takip edip, kuvvet kompanzatorünün çevresel etkileşime uymaya çalışması ve referans hareket yörüngesini hızlı bir şekilde değiştirerek temas kuvvetlerine hızlı cevap vermesidir [30-32]. Raibert ve Craig (1981) tarafından ortaya atılan Hibrit konum/kuvvet kontrolünde eklem için konum ve kuvvet kontrolü ayrı ayrı yapılabilir. Kuvvet ve tork bilgisini, yer değiştirme ve kuvvetin belirlediği konum verisi ile birleştirir [33]. Bu kontrolün avantajı, konum ve kuvvet bilgisini her biri için ayrı ayrı iyi bilinen kontrol tekniklerine göre bağımsız olarak çalıştırıp, son aşamada eklem torklarına dönüştürürken birleştirilmesidir [34, 35]. Hibrit kontrol ile empedans kontrol yaklaşımının birleştirildiği hibrit empedans kontrol

Anderson ve Spong tarafından ortaya atılmıştır [36]. Bu yöntemde, istenilen empedans değeri seçilirken daha fazla esneklik sağlanması robot için avantaj olacaktır. Ayrıca kuvvet kontrollü ve konum kontrollü alt uzaylarda empedans ayrımı yapılabilir. Böylelikle, hız veya konum gerekliliklerini sürdürürken, kontrol edilen bir kuvvet yörüngesi de izlenebilir [36, 37].

Empedans kontrolde temel amaç uç eyleyicinin konumu ve çevrenin uyguladığı kuvvet ile manipülatörün istenilen empedansta hareketini sağlamaktır. İnsan-robot etkileşiminin olduğu görevlerde özellikle empedans kontrol yöntemi aktif olarak kullanılmaktadır [38, 39]. Hogan, manipülatör kontrol sisteminin, manipülatör mekanik empedansının da dikkate alınarak düzenlenmesi gerektiğini söylemiştir [24, 40]. Robot kolu uç noktası mekanik empedansının ayarlanmasıyla kuvvet ve konum kontrolü yapılarak Empedans Kontrol gerçekleştirilir [41]. Mekanik empedansa hız ve uygulanan kuvvet arasındaki ilişkiden ulaşılabılır ve  $Z_m$  aşağıdaki gibi ifade edilir (Eş. 39, Eş. 40).

$$Z_m(s) = \frac{F(s)}{\dot{X}(s)} \quad (39)$$

Doğrusal durumlarda, istenen empedans ifadesi aşağıdaki gibidir.

$$sZ_m(s) = Ms^2 + Ds + K \quad (40)$$

Eş. 40'ta M, D ve K sırasıyla arzu edilen eylemsizlik, sönümlenme ve katılık matrisleridir. Empedans kontrol ölçülen sinyali türlerine (hız-konum ya da kuvvet) bağlı olarak farklı formlarda karşımıza çıkabilir [42-44]. Empedans kontrol, katılık kontrolüne hız ve temas kuvveti ilişkisi dahil edilerek oluşturulmaktadır. Konum ve hız modifikasyonları,  $K_{F1}$  ve  $K_{F2}$  matrisleriyle gerçekleştirilir. Böylece eklem uzayında hata düzeltme denklemi Eş. 41'deki gibidir.

$$\tau_{pv} = J^T(K_p\Delta X + K_v\Delta\dot{X}) \quad (41)$$

### 5.2.2. Temel empedans kontrol benzetimi (Basic impedance control simulation)

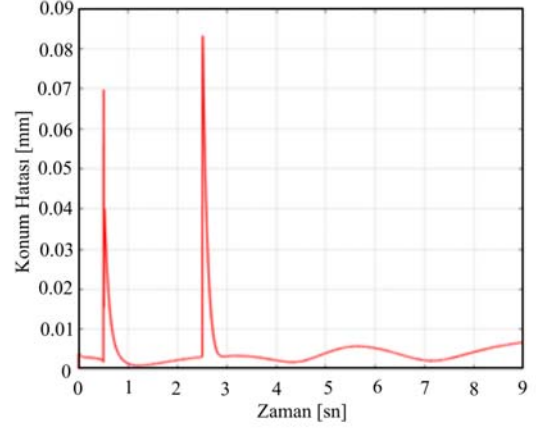
Bu çalışmada, Şekil 10'da verilen modeldeki empedans kontrol algoritması uygulanarak, robot uç eyleyiciye çember çizdirme görevi verilip sonuçlar analiz edilmiştir.

Bu modelde konum modifikasyonu uç eyleyiciye etki eden kuvvetlerin  $K_{F1}$  matrisiyle; hız modifikasyonu ise  $K_{F2}$  matrisiyle çarpılıp geri beslemesiyle oluşturulur. Şekil 10'daki kontrol döngüsü, manipülatör çevreyle temas halindeyken sönümlenme sabitini değiştirme etkisine sahiptir. Bu tür empedansa birinci dereceden empedans denir. Birinci derece empedans kontrolde, manipülatörün sönümlenmesi ve sertliği (esnekliği) dikkate alınır.  $K_p$  ve  $K_v$  kontrol kazançları değiştirilerek katılık ve sönümlenme değerleri ayarlanır.

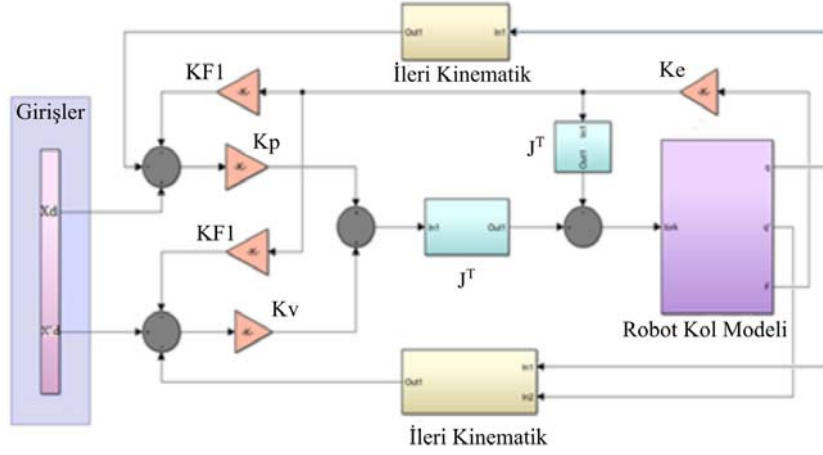
### 5.2.2. Benzetim sonuçları (Simulation results)

Robot kol modeline hesaplanan ve seçilen kazanç değerleriyle temel empedans kontrol yöntemi uygulanarak, sonuçları aşağıda gösterilmiştir. Kontrol katsayıları seçim ve hesabıyla ilgili detaylı bilgiye kaynaklardan ulaşılabilir [45]. Şekil 11'de referans giriş olarak çember çizdirme görevi verilen robot koluna empedans kontrol uygulanarak, hareket eden bir levha üzerine uç eyleyicinin yaptığı çizim üç boyutlu olarak gösterilmiştir.

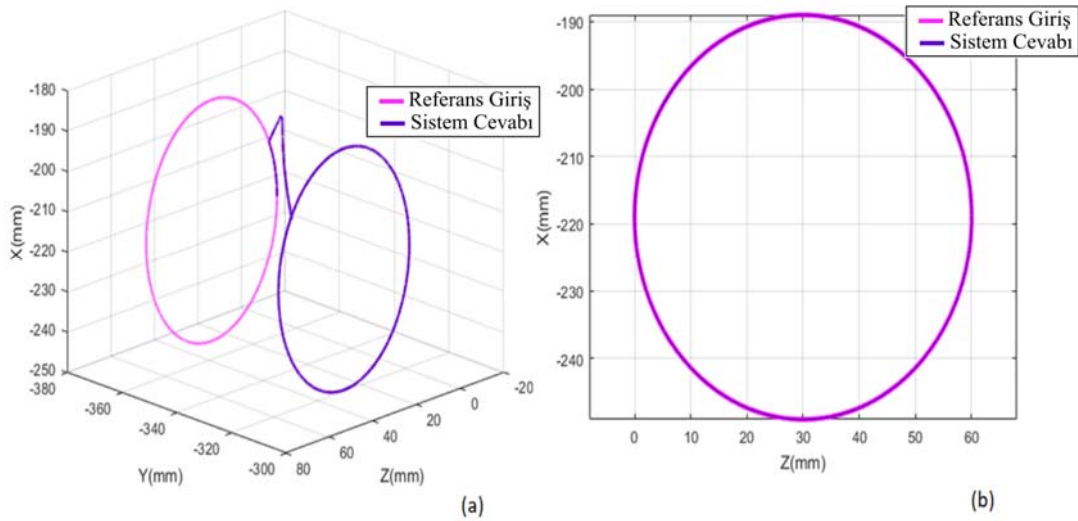
Çember çizimi referans girişine karşılık uç eyleyici konumu arasındaki hata grafiği Şekil 12'de verilmiştir. Bu grafik, referans alınan girişten sapma miktarını (mm) olarak göstermektedir. Grafikte görüldüğü gibi levha hareketinin başladığı ve bittiği zamanlarda kontrol gerçekleşene kadar hata oranı yükselmiş, sonrasında küçük bir hata ile yörünge takip edilmiştir.



**Şekil 12.** Referans giriş ve uç eyleyici RMS konum hata grafiği  
(Reference input and end actuator RMS position error graph)



**Şekil 10.** Empedans kontrol bloğu (Impedance control block)



**Şekil 11.** Empedans kontrol yöntemi ile hareket eden levha üzerine çember çizimi (a) üç boyutlu gösterimi, (b) iki boyutlu gösterimi. ((a) Three-dimensional, (b) two dimensional representation of circle drawing on moving plate by impedance control method)

## 6. SİMGELER (SYMBOLS)

$R_i$	: i bileşenine ait referans eksen takımı
$X_i$	: i bileşenine ait eksen takımı X eksen
$LA$	: Üst kol uzunluğu
$LF$	: Alt kol uzunluğu
$LE$	: Uç eyleyici uzunluğu
$p_x$	: Robotun x ekseninde istenen konumu
$p_y$	: Robotun y ekseninde istenen konumu
$p_z$	: Robotun z ekseninde istenen konumu
$\tau_k$	: Eklemlere gelen kinestetik moment
$F_0$	: Ölçülen (operatör tarafından robota uygulanan) kinestetik kuvvet
$J^T$	: Jacobian matris devriği
$K$	: Kinestetik kuvvet duyarlılığı katsayısı
$K_d$	: Sanal sönüm katsayısı
$\dot{q}$	: Eklem açısal hız değişkeni
$X$	: Uç eyleyici konum vektörü
$H$	: Euler açıları uyuşma transformasyon matrisi
$\phi$	: Euler açıları, genel gösterim
$\alpha$	: Euler açıları, Z eksen etrafındaki dönme açısı
$\beta$	: Euler açıları, Y eksen etrafındaki dönme açısı
$\gamma$	: Euler açıları, X eksen etrafındaki dönme açısı
$K_c$	: Eşdeğer kontrolcü katsayısı
$\delta\phi$	: Euler açıları hatası.
$\omega$	: Robot uç eyleyicisi açısal hızı.
$\gamma$	: Kontrolcü eşdeğer kuvvet/moment vektörü
$f_r$	: Referans temas kuvveti
$u(f)$	: Birim basamak fonksiyonu
$e_x$	: Konum hataları vektörü
$ e $	: y eksenindeki konum hatasının mutlak değeri

## 7. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, bir insansı robot kolunun mekanik tasarımı, dinamik analizi, ileri kinematik eşitlikleri, ters kinematik çözümleri, fırçasız motor sürücü tasarımı, yörünge planlanması, kinestetik öğrenme, kuvvet ve empedans kontrol çalışmaları, uygulamada karşılaşılan problemler ve geliştirme önerileri verilmiştir. Bu çalışmadaki ilk aşama, insansı robot kolu mekanik tasarımı ve tasarım sonucunda elde edilen insansı robot kolunun, dinamik analizler ile bileşen seçimlerinin ve hedeflenen faydalı yük – toplam ağırlık hedeflerinin doğrulamasıdır. Yapılan benzetim ve dinamik analiz çalışmaları, seçilen motorların ve Harmonic Drive® dişli gruplarının uygun olduğunu göstermektedir. Ayrıca, eğer 6 serbestlik dereceli robot kolunda oluşabilecek tekil çözümlerden kurtulmak istenirse, kol 7 SD olarak tasarlanabilir. Bu fazlalık problemini ortaya çıkaracaktır fakat çalışma alanı içerisinde hareket kabiliyetini arttıracaktır.

Kuvvet kontrolü gerektiren işlerin kinestetik yöntemle robota öğretilmesi programlama açısından büyük kolaylık sağlamaktadır. Kinestetik öğrenme için robotun bileğinde en az bir adet üç eksende kuvvet/moment ölçebilen bir algılayıcı gerekmektedir. Bu durumda istenilen konum ve kuvvet referansının robota öğretilmesi için iki aşamalı kinestetik öğrenme algoritmasının uygulanması

gerekmektedir. Bu işlemin iki aşamada gerçekleştirilmesinin sebebi, robot kolu üzerinde bir adet kuvvet algılayıcı bulunması ve robotun pasif olarak hareket ettirilememesidir. Tek aşamalı kinestetik öğrenme için robotun tüm eklemlerinde moment algılayıcıları bulunması tercih edilebilir. Robotun tanımlanmış dinamik modeli var ise ölçülen motor akımlarından kol ucundaki kuvvet ve moment bileşenlerinin hesaplanması bir diğer çözüm önerisi olabilir. Bu çözümde motor akımlarındaki gürültü ve dinamik modelin yüksek doğrulukla elde edilememesi sorun teşkil etmektedir.

Gelişmiş özelliklere sahip yeni bir insansı robot kolu prototipi istenirse ilk tasarım sırasında kinematik dizilim, motor ve çevrim oranı seçimi, istenilen faydalı yük ve hız için dinamik analiz ve benzetimler, yapısal tasarımın esnek yapı kabulü ile optimizasyonun beraber yapılması en doğru tasarımın elde edilmesini sağlayacaktır. Yine bu aşamada çalışma hacmi, tekil noktalar ve kol ucunda elde edilebilecek çözünürlüğün de hesaplanması gerekmektedir.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Karabulut H., Çınar C., Aksoy F., Solmaz H., Özgören Y. Ö., Arslan M., Design and performance tests of a beta type rhombic driven stirling engine, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 31 (4), 879-888, 2016.
2. Ergene L.T., Polat A., Bakhtiarzadeh H., Design of a permanent magnet synchronous motor used in elevators, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 33 (2), 757-770, 2018.
3. Akpolat A., Reduction of tooth root bending stresses in gears generated by symmetric cutter with asymmetric tip radii, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 33 (2), 713-727, 2018.
4. Özer M., Altınkaynak A., Temiz V., Mutlu T., Dışpınar T., Özgen A., Yücel M., Dynamic analysis of front-loading washing machine using finite element method, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 31 (3), 773-780, 2016.
5. Kılıç A., Kapucu S., Design and construction of a modular reconfigurable robot module OMNIMO, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 31 (3), 521-530, 2016.
6. Karcı H., Tangel A., Design and Prototype Implementation of a 5-DOF Mobile; Robot Arm Based on FPGA, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 31 (2), 295-302, 2016.
7. Özdemir M., Optimization in motion planning for parallel robots passing through singular positions, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 32 (4), 1089-1096, 2017.
8. Kıyak E., Ermeydan A., Fault tolerant flight control system design to a rotary wing aircraft, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 32 (1), 21-34, 2017.
9. Huo, X., Liu, Y., Jiang, L., Liu, H., Design and Development of a 7-DOF Humanoid Arm, 2012 IEEE

- International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), Guangzhou, China, 277-282, 2012.
10. Maxon Motor Company. Brushless DC motors. <http://www.maxonmotor.com/maxon/view/catalog>. Erişim Tarihi Kasım, 2017.
  11. Harmonic Drive SE. <https://www.harmonicdrive.net/downloads/catalogs>. Erişim Tarihi Kasım, 2017.
  12. Craig, J. J., Introduction to Robotics: Mechanics and Control, Addison-Wesley Publishing Company Inc., 2nd Ed., A.B.D., 1989.
  13. Ali, M., Liu, H., Stoll, N., Thurow, K., Kinematic analysis of 6-DOF arms for H2O mobile robots and labware manipulation for transportation in Life Science Labs, Journal of Automation, Mobile Robotics & Intelligent Systems, 10, 40-52, 2016.
  14. Ali, M. A., Andy Park, H., Lee, C. S. G., Closed-form Inverse Kinematic Joint Solution for Humanoid Robots, 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Taipei, 704-709, 2010.
  15. Türkmen, D., Çevre ile temas içeren görevlerin insansı robot koluna kinestetik yöntem ile öğretilmesi ve hibrit hareket/kuvvet kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2016.
  16. Khalil, W., Dombre, E., Modeling, Identification and Control of Robots, Taylor and Francis Books, Inc., A.B.D., 2002.
  17. Spong, M. W., Hutchinson, S., Vidyasagar, M., Robot Modeling and Control, John Wiley & Sons, Inc., A.B.D., 2006.
  18. Güleç, M.Ö, Ertuğrul, Ş., İnsansı Robot Kolu Tasarımı ve Yörünge Kontrolü, Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, TOK2014, Kocaeli -Türkiye, 11-13 Eylül 2014.
  19. <https://youtu.be/IwmRw49ik08>, Yayın Tarihi Şubat 10, 2017. Erişim Tarihi Kasım 29, 2021.
  20. Steinmetz, F., Montebelli, A., Kyrki, V, Simultaneous Kinesthetic Teaching of Positional and Force Requirements for Sequential In-Contact Tasks, 2015 IEEE-RAS 15th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids), 2015.
  21. Kramberger, A., Piltaver, R., Nemec, B., Gams, M., Ude, A., Learning of assembly constraints by demonstration and active exploration, Industrial Robot: An International Journal, 43 (5), 524-534, 2016.
  22. Abu-Dakka, F. J., Nemec, B., Jørgensen, J. A., Savarimuthu, T. R., Krüger, N., Ude, A., Adaptation of manipulation skills in physical contact with the environment to reference force profiles, Autonomous Robots, 39 (2), 199-217, 2015.
  23. Kormushev, P., Calinon, S., Caldwell, D.G., Imitation learning of positional and force skills demonstrated via kinesthetic teaching and haptic input, Advanced Robotics, 25 (5), 581-603, 2011.
  24. Hogan N., Impedance control, an approach to manipulation: Part I, II, Int. Journal of Robotics Res. 107, 1-24, 1985.
  25. Hogan N., Stable Execution of Contact Tasks Using Impedance Control, Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1047-1050, 1987.
  26. Mills, J. K., Goldenberg, A.A., Force and position control of manipulators during constrained motion tasks, IEEE Transactions on Robotics and Automation, 5 (1), 30-46, 1989.
  27. Kazerooni, H., Sheridan, T. B., Houpt, P. K., Robust compliant motion for manipulators, Part I-II. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2 (2) 83-95, 1986.
  28. De Shutter, J., Van Brussel, H., Compliant robot motion, Part I-II. IEEE International Journal of Robotics Research, 7 (4), 3-33, 1988.
  29. Zeng, G. and Hemami, A., An Overview of robot force control, Robotica, 15, 473-482, 1997.
  30. Raibert M. H., Craig J. J., Hybrid position/force control of manipulators, ASME Journal of Dyn. Sys. Meas. Contr. 102, 126-133, 1981.
  31. Seraji H., Adaptive Admittance Control: An Approach to Explicit Force Control in Compliant Motion, IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 2705-2712, 1994.
  32. Zheng, L., Rao, P., Li, Y., & Zhao, M., Admittance Control Based Humanoid Robot Standing Balance Control, IEEE International Conference on Advanced Robotics and its Social Impacts (ARSO), 167-173, 2019.
  33. Mason, M., Compliance and force control for computer controlled manipulators, IEEE Trans. on Sys. Man. Cyber SMC-11 (6), 418-432, 1981.
  34. Fisher, W. D. and Mutjaba, M. S., Hybrid Position/force Control: A Correct Formulation, Hewlett-Packard Company, 1991.
  35. Abe, K., Jiralerspong, T., Ishikawa, J., Hybrid Position/Force Control of Manipulator Using Series Elastic Actuator with Position Controller, IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 4415-4422, 2020.
  36. Anderson R., Spong R.W., Hybrid impedance control of robotic manipulators, IEEE J. of Robotics and Automat. 4 (5), 549-556, 1988.
  37. Akdoğan, E., Aktan, M. E., Koru, A. T., Arslan, M. S., Atlıhan, M., Kuran, B., Hybrid impedance control of a robot manipulator for wrist and forearm rehabilitation: Performance analysis and clinical results, Mechatronics, 49, 77-91, 2018.
  38. Martín-Martín, R., Lee, M. A., Gardner, R., Savarese, S., Bohg, J., Garg, A., Variable impedance control in end-effector space: An action space for reinforcement learning in contact-rich tasks, arXiv preprint arXiv:1906.08880, 2019.
  39. Takano, W., Kanayama, H., Takahashi, T., Moridaira, T., Nakamura, Y., A data-driven approach to probabilistic impedance control for humanoid robots, Robotics and Autonomous Systems, 124, 103353, 2020.
  40. Al-Shuka, H. F., Leonhardt, S., Zhu, W. H., Song, R., Ding, C., Li, Y., Active impedance control of bioinspired motion robotic manipulators: An overview, Applied Bionics and Biomechanics, 2018.

41. Kazerooni, H., On the Robot Compliant Motion Control, ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 111 (2), 416-425,1989.
42. De'goulange E., Dauchez P., External force control of an industrial PUMA 560 Robot, J. of Robotics Sys. 11 (6), 523-540, 1994.
43. Roberts, R. K., Paul, R. P., Hillberg, B. M., The Effect of Wrist Force Sensor Stiffness on the Control of Robot Manipulators, IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Louis, pp. 269-274, 1985.
44. Whitney, D. E., Force feedback control of manipulator fine motions, ASME, Journal of Dync. Sys. Meas. Contr. 99, 91-97, 1977.
45. Eraslan, H., Ertuğrul, Ş., 6 Serbestlik Dereceli İnsansı Robot Kolu Empedans Kontrolü, Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, TOK2018, 343-348, Kayseri, 2018.