



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



ROBOT MANİPÜLATÖRLERİN
PERFORMANSLARINA YÖNELİK
KONTROL UYGULAMALARI

Sinan İLGEN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Mayıs-2019
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Sinan İLGEN tarafından hazırlanan “Robot Manipulatörlerin Performanslarına Yönelik Kontrol Uygulamaları” adlı tez çalışması 17/05/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Doç. Dr. Ömer AYDOĞDU

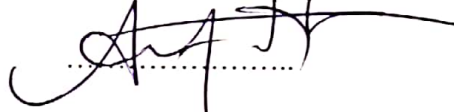
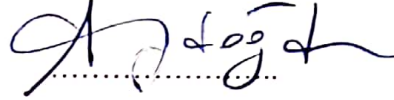
Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Akif DURDU

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Barış Samim NESİMİOĞLU

İmza



Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Yakup Kara
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.



Sinan İLGEN

Tarih: 30.05.2019

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ROBOT MANİPÜLATÖRLERİN PERFORMANSLARINA YÖNELİK KONTROL UYGULAMALARI

Sinan İLGEN

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Elektrik - Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Akif DURDU

2019, 63 Sayfa

Jüri

Dr. Öğr. Üyesi Akif DURDU

Doç. Dr. Ömer AYDOĞDU

Dr. Öğr. Üyesi Barış Samim NESİMİOĞLU

Robot manipülatörler, endüstriyel süreçlerdeki çeşitli temel görevlerin (malzeme taşıma, montaj, kaynak, makine besleme vb.) gerçekleştirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. İnsanlar tarafından gerçekleştirilen bu zorlu, zaman alıcı ve periyodik görevler, robot manipülatörler sayesinde hızlı ve verimli bir şekilde gerçekleştirilmektedir. Bu tip görevler genellikle yüksek hassasiyet kabiliyeti gerektirdiği için robot manipülatörlerin kontrolü çok önemli bir konu haline gelmektedir. Robot manipülatörlerin kontrolünde, bir noktadan bir noktaya en hızlı ve güvenilir bir şekilde robot manipülatörün ulaşması yani gerekli yörüngenin takibi amaçlanmaktadır.

Bu tez çalışmasında iki linke sahip düzlemsel bir robot manipülatörün yörünge izleme kontrolü kayan kipli kontrol ve PID kontrol metotları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Önerilen sistem için yeni bir modelleme tekniği ve kontrolcü tasarımı MSC Adams ve MATLAB yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. MSC Adams yazılımı üzerinde sanal bir prototip kurularak manipülatörün sayısal modeli elde edilmiştir. Ayrıca, oluşturulan sanal prototipin doğruluğunu kontrol etmek amacıyla manipülatöre ait ters kinematik denklemler Matlab/Simulink yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Manipülatörün kontrolü için gerekli kontrolcü tasarımları yine MATLAB/Simulink ortamında oluşturulmuştur. Daha sonra, belirtilen yazılımların eşzamanlı olarak çalıştırılmasıyla, sistem için önerilen kontrolcülerin etkisi sanal prototip üzerinde gözlenmiş ve kontrolcü performansları irdelenmiştir. Uluslararası hata kriterleri (ITAE, ISE ve IAE) hesaplamaları ve sonuç grafikleriyle önerilen kontrolcülerin performansları göreceli bir şekilde karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, kayan kipli kontrol yönteminin PID yöntemine alternatif olarak kontrol uygulamalarında kullanılabilir olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Kayan kipli kontrol, Konum kontrolü, Manipülatör, PID kontrol, Robot, Simülasyon

ABSTRACT

MS THESIS

**CONTROL APPLICATIONS FOR PERFORMANCE OF ROBOT
MANIPULATORS**

Sinan İLGEN

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Electrical And Electronics Engineering**

Advisor: Asst. Prof. Dr. Akif DURDU

2019, 63 Pages

Jury

Asst. Prof. Dr. Akif DURDU

Assoc. Prof. Dr. Ömer AYDOĞDU

Asst. Prof. Dr. Barış Samim NESİMİOĞLU

Robot manipulators are widely used in the realization of various basic tasks (material handling, assembly, welding, machine loading, etc.) in industrial processes. These challenging, time-consuming, and periodical tasks performed by people are carried out quickly and efficiently thanks to robotic manipulators. Because such tasks often require high precision capability, the control of the robotic manipulators becomes a very important issue. In the control of the robot manipulators, it is aimed to follow the trajectory needed to reach the robot manipulator in the fastest and most reliable way from one point to another.

In this thesis, trajectory tracking control of a two-link planar robot manipulator is performed by using sliding mode control and PID methods. A novel modelling technique and controller design for the proposed system is carried out by using MSC Adams and MATLAB software, respectively. A virtual prototype of the system has been built on MSC Adams software to obtain the numerical model. Also, the inverse kinematic equations of the manipulator to compare and verify the virtual prototype and designing of its controller are performed by using MATLAB/Simulink software. The system is simultaneously simulated in both MSC Adams and Matlab software which is called co-simulation in order to check the performances of the presented controllers. Additionally, the controller performances are relatively compared and shown with graphics and numerical results in terms of international error standards such as ITAE, IAE and ISE. According to the results, it is seen that the sliding mode control method can be used as an alternative to the PID method in control applications.

Keywords: Manipulator, PID control, Position control, Robot, Simulation, Sliding mode control

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmamda bana yol gösteren, bilgi ve becerilerini benimle paylaşmaktan hiçbir zaman kaçınmayan değerli hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Akif DURDU'ya, tez çalışmam boyunca yardımları ve desteğiyle her zaman yanımda olan Arş.Gör. Erdi GÜLBAHÇE ve Arş.Gör. Abdullah ÇAKAN'a yürekten teşekkür ederim. Lisanslı yazılım kullanmama imkan sağlayan KTO Karatay Üniversitesi Mühendislik Fakültesine ve MSC Software'e teşekkür ederim.

Ayrıca tez çalışmam sırasında, her zaman maddi ve manevi destekleriyle yanımda olan ve bugünlere gelmemi borç bildiğim çok değerli eşim Havva Nur'a ve aileme en içten teşekkürlerimi sunarım.

Sinan İLGEN
KONYA-2019

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Tez Organizasyonu.....	2
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
2.1. Robot Manipülatörler ile İlgili Genel Kontrol Çalışmaları	3
2.2. Manipülatörlerin Modellenmesinde Yazılım Kullanılan Çalışmalar.....	4
2.3. İki Link Robot Manipülatörlerin Kontrolü İçin Yapılan Çalışmalar	5
3. MATERYAL VE YÖNTEM	9
3.1. Robot Tanımı ve Robot Yapısı	9
3.2. Robotların Sınıflandırılması	11
3.2.1. Serbestlik Derecelerine Göre Robotlar	11
3.2.2. Kontrol Yöntemlerine Göre Robotlar	14
3.2.3. Robot Tahrik Elemanlarının Kullandığı Güç Kaynağına Göre Robotlar	15
3.2.4. Hassasiyet Derecelerine Göre Robotlar	16
3.3. Robotların Kullanıldığı Yerler	17
3.3.1. Tıp Alanında Kullanılan Robotlar	17
3.3.2. Savunma Sanayi Alanında Kullanılan Robotlar	17
3.3.3. Eğlence ve Sinema Endüstrisinde Kullanılan Robotlar	18
3.3.4. Uzay Endüstrisinde Kullanılan Robotlar	18
3.3.5. Ev Ortamında Kullanılan Robotlar	18
3.3.6. Sanayi Ortamında Kullanılan Robotlar.....	18
3.4. Kontrol Metotları	20
3.4.1. Açık Çevrim Kontrol Sistemi	21
3.4.2. Kapalı Çevrim Kontrol Sistemi	22
3.4.3. Oransal-İntegral-Türevsel (PID) Kontrol	22
3.4.4. Kayan Kipli Kontrol	24
3.4.5. Kontrolcü Performanslarının Değerlendirilmesi	26
3.5. İki Link Düzlemsel Robot Manipülatörün Modellenmesi.....	28
3.5.1 ADAMS Ortamında Sistemin Modellenmesi	29
3.5.2 Sistemin Transfer Fonksiyonlarının Elde Edilmesi	32
3.6. Robot Kinematığı.....	33
3.6.1 Robot Manipülatörün İleri Kinematik Denklemleri	34
3.6.2 Robot Manipülatörün Ters Kinematik Denklemleri	35

4. KONTROLÇÜ TASARIMI UYGULAMALARI.....	39
4.1. İki Konumlu Kontrol	39
4.1.1 PID Kontrol Tasarımı	40
4.1.2 Kayan Kipli Kontrol Tasarımı	41
4.2. Beş Konumlu Kontrol.....	43
5. BENZETİM SONUÇLARI.....	46
5.1. İki Konumlu Kontrol Sonuçları	46
5.2. Beş Konumlu Kontrol Sonuçları.....	50
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	54
6.1 Sonuçlar	54
6.2 Öneriler	54
KAYNAKLAR	56
EKLER	59
ÖZGEÇMİŞ	62

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

- I_{1zz} : Birinci Linkin Kütle Atalet Momenti
 I_{2zz} : İkinci Linkin Kütle Atalet Momenti
 K_1 : Birinci Eklem için Anahtarlama Fonksiyonu Katsayısı
 K_2 : İkinci Eklem için Anahtarlama Fonksiyonu Katsayısı
 L_1 : Birinci Linkin Uzunluğu
 L_2 : İkinci Linkin Uzunluğu
 M_1 : Birinci Linkin Kütlesi
 M_2 : İkinci Linkin Kütlesi
 T_1 : Birinci Linke Uygulanan Tork
 T_2 : İkinci Linke Uygulanan Tork
 λ_1 : Birinci Eklem için Kayan Kipli Kontrol Katsayısı
 λ_2 : İkinci Eklem için Kayan Kipli Kontrol Katsayısı
 θ_1 : Birinci Eklem Açısı
 θ_2 : İkinci Eklem Açısı

Kısaltmalar

- FL : Fuzzy Logic - Bulanık Mantık
GD : Gradient Descent – Eğim Düşümü
ISO : International Organization for Standardization – Uluslararası Standardizasyon Örgütü
KKK : Kayan Kipli Kontrol
LMI : Linear Matrix Inequality - Doğrusal Matris Eşitsizliği
MIMO : Multi Input Multi Output - Çok Giriş Çok Çıkışlı
MSC : MacNeal-Schwendler Corporation – MacNeal-Schwendler Şirketi
NTSMC : Nonsingular Terminal Sliding Mode Control - Tekil Olmayan Terminal Kayan Kipli Kontrol
PD : Proportional-Derivative - Oransal-Türevsel
PI : Proportional-İntegral - Oransal-İntegral
PID : Proportional-İntegral-Derivative – Oransal-İntegral-Türevsel
PS : Pattern Search – Örüntü Arama
PSO : Parçacık Sürü Optimizasyonu
SS : Simplex Search – Simpleks Arama
TSMC : Terminal Sliding Mode Control - Terminal Kayan Kipli Kontrol

1. GİRİŞ

Günümüzde robotlar uzay, tıp, otomotiv, tekstil, askeri v.b. birçok endüstriyel alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Endüstriyel alanda bakıldığı zaman bir uzay mekiği tarafından uydunun yörüngeye yerleştirilmesi, sağlık alanında ilaçların hijyenik ortamlar dahilinde üretilmesi, otomotiv sektöründe yapılan üretimlerdeki montaj ve boyama v.b. işlemlerin gerçekleştirilmesi, tekstilde kesme ve dokuma gibi işlemlerinin yapılması, askeri alanda bomba imha ve mayın tarama gibi faaliyetlerin yapılması gibi insanlar için riskli olan veya sıkıcı bulunan işler artık robotlar tarafından yapılabilmektedir.

Robot manipülatörler, genel olarak insana benzeyen özelliklere sahip olan ve programlanabilen makine olarak tanımlanabilir. ISO 8373 standardına göre yapılan tanım ise şu şekildedir: “Endüstriyel uygulamalarda kullanılan, sabit veya hareketli olabilen, üç veya daha fazla programlanabilir eksene sahip, otomatik kontrollü, yeniden programlanabilir çok amaçlı manipülatör.” (Craig, 2009). Özellikle insan yerine kullanılmak istenen robotlardan beklenen en önemli özellik, Robot Kol özelliğidir. Bir şeyleri tutma veya bir yere yerleştirme işlemlerinde çoğunlukla robot kollar (manipülatörler) kullanılır. Robot manipülatörler, bağımsız başka bir makineyle entegre edilerek malzeme yükleme ve takım değiştirme gibi işlemleri yapabilmektedir.

Robot manipülatörlerin geleneksel takım tezgahlarından çok daha fazla hareket kabiliyeti olması gerekmektedir. Aynı zamanda, çok geniş bir alanda çalışabilmeli, kalabalık yerlere erişebilmeli, çeşitli iş parçalarını idare edebilmeli ve esnek işler yapabilmelidirler. Robotların mekanik yapısı oluşturulurken yüksek hareketlilik ve beceri gereksinimleri için insan kolunun yapısı örnek model olarak kabul edilmektedir. Bununla birlikte, bu yapı geleneksel makine tasarımından önemli ölçüde uzaklaşmaktadır.

Endüstriyel ortamlarda robot manipülatörler tarafından gerçekleştirilen işler çoğunlukla yüksek hassasiyet gerektiren işlemler olduğu için “robot manipülatörlerin kontrolü” oldukça önemli bir problemdir. Robot manipülatörlerinin kontrolü için kullanılacak doğrusal ve doğrusal olmayan birçok kontrol metodolojisi vardır. Manipülatörler, doğrusal olmayan bir yapıya sahiptirler ve yapılarındaki birtakım parametreler belirsizdir. Bu yüzden düzgün bir manipülatör kontrolü için doğrusal olmayan kontrol biraz daha ön plana çıkmaktadır. Bu sebeplerden ötürü bu tez çalışmasında, dayanıklı, doğrusal olmayan, sistem belirsizliklerine ve parametrik

değişikliklere karşı duyarsız olan bir kontrolcü olan kayan kipli kontrol yöntemi araştırılmıştır.

Literatürde incelenen diğer çalışmalardan farklı olarak, bu tez çalışmasında, iki linke sahip düzlemsel bir robot manipülatörün MSC Adams ve MATLAB yazılımlarının aynı anda kullanılması (co-simulation) vasıtasıyla gerçekleştirilen simülasyonu ve kontrolü sunulmuştur.

1.1. Tez Organizasyonu

Bu tez çalışması toplamda beş ana bölümden oluşmaktadır.

Birinci bölümde, tezin amacı, önemi ve kapsamı ile alakalı ön bilgiler verilmiştir.

İkinci bölümde, robot manipülatörlerin kontrolü ile ilgili, uygulanan farklı kontrolcü yöntemleri, modelleme için kullanılan farklı yazılım çeşitleri de dahil olmak üzere günümüze kadar yapılmış olan akademik boyuttaki çalışmalar detaylı olarak sunulmuştur.

Üçüncü bölüm, tez ile ilgili materyal ve yöntem kısmını oluşturmaktadır. Bu bölümde öncelikli olarak robotların tanımı, tarihsel süreci, yapısı, sınıflandırılmaları, kullanım alanları gibi konularla alakalı genel bilgiler verilmektedir. Ayrıca, kontrol uygulamalarında sık kullanılan PID kontrol metodu ve uluslararası boyuttaki performans kriterleri üzerinde özet bilgiler verilmektedir. Daha sonra, bu tezde kullanılan bir diğer kontrol metodu olan kayan kipli kontrol yöntemi üzerinde durularak, yöntem ile ilgili genel ve teorik bilgiler verilmiştir. Ayrıca, tez süresince kullanılan iki linke sahip robot manipülatörün modelinin oluşturulması ve manipülatöre ait matematiksel modelin elde edilmesi için kullanılan yöntemler detaylıca sunulmaktadır. Daha sonra manipülatöre uygulanacak olan kontrolcülerin tasarım süreci açıklanmıştır. Son olarak ise, robot manipülatörler için kritik bir konu olan robotların kinematik yapısı denklemlerle ifade edilerek anlatılmaya çalışılmıştır.

Dördüncü bölümde, iki linke sahip robot manipülatörün kontrolü için yapılan simülasyon çalışmaları karşılaştırılmalı olarak sunulmaktadır.

Beşinci bölümde ise tezdeki gerçekleştirilen çalışmaların sonuçları yorumlanmakta ve ileride yapılması muhtemel çalışmalar için bazı önerilerde bulunmaktadır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bu bölümde robot manipülatörlerin kontrolleri ile ilgili yapılan çalışmalar sunulmaktadır. Robot manipülatörlerin kullanımlarında önde gelen konulardan biri, robotların matematiksel olarak modellenmesi ve ihtiyaca göre serbestlik derecelerinin tayin edilerek uygun kontrolcü tasarımının gerçekleştirilmesidir. Literatürde birçok farklı kinematik özellik ve yapıya sahip robot tiplerine rastlanabilmektedir. Çalışmalarda, en çok mafsalı robot kolu yapısının tercih edildiği görülmektedir. Bunun sebebi ise çalışma uzaylarının diğer robotlara göre daha geniş olmasının yanı sıra manipülasyon yeteneklerinin yüksek olması ve yüksek hassasiyet özelliğine sahip olmalarıdır (Craig, 2009).

Gerçekleştirilen sistemlerde amaç, çoğunlukla referans olarak seçilen bir yörünge için en iyi hassasiyette takip edilmesidir. Bu amaçla, robot manipülatörleri kontrol etmek için sunulan birçok kontrol yöntemi vardır. Bu yöntemlerde, genellikle manipülatörün sabit bir yük altında olduğu veya yalnızca kendi kütlesi olduğu varsayılmaktadır. İlerleyen kısımlarda, literatürde yapılan çalışmalar özetlenmiştir.

2.1. Robot Manipülatörler ile İlgili Genel Kontrol Çalışmaları

Mevcut literatür incelendiğinde, iki veya üç serbestlik dereceli robot manipülatör sistemlerinin yaygın olarak kullanıldığı görülmüştür (Arai ve ark., 1998; Duarte ve Bohn, 2016). Dört ya da daha fazla serbestlik derecesine sahip sistemler üzerinde de çeşitli çalışmalar bulunmaktadır (Chen ve ark., 2008). Fakat, karmaşık dinamik yapıları ve zor kinematik hesaplamaları nedeniyle kullanımları daha azdır.

Duran ve Ankaralı (2010) yaptıkları çalışmada, PID kontrol yöntemini uygulayarak üç serbestlik dereceli PUMA tipi bir robot kolun uç elemanının yörünge kontrolü üzerinde çalışmışlardır. Sistem girdisi olarak üç farklı başlama fonksiyonu seçilerek sistem yanıtlarının istenen yörüngeye ne kadar yakınsadıkları karşılaştırılmıştır.

Özçelikyıldız (2006), yaptığı tez çalışmasında, beş serbestlik dereceli endüstriyel robot manipülatör modelinin tasarımı ve hareket kontrolü üzerinde durmuştur. Ayrıca bu robot manipülatörün kinematik analizi ve Jacobian analizi gerçekleştirilerek, yörünge planlaması üzerine de çalışma yapılmıştır. Ek olarak, manipülatörü çalıştırmak

ve kontrol etmek amacıyla bir bilgisayar programı ve el kumandası (teach pendant) yapılmıştır.

Arslan ve Korkmaz (2000), çalışmalarında dört serbestlik dereceli bir robot kolu için, bulanık yapay sinir ağı ile birleştirilmiş hesaplanmış tork kontrolü önermişlerdir. Önerilen kontrol yöntemi ile klasik PID kontrol yöntemi arasında karşılaştırma yaparak, önerilen kontrol yönteminin performans olarak PID kontrol yönteminden daha başarılı ve dayanıklı olduğunu açıklamışlardır.

2.2. Manipülörlerin Modellenmesinde Yazılım Kullanılan Çalışmalar

Günümüzde fiziksel sistemlerin modellenmesinde simülasyon programları çok önemli hale gelmiştir. Bu programlar sayesinde araştırma sonuçları değerlendirilebilmekte ve hata miktarı azaltılmış yeni modeller, maliyetten ve zamandan tasarruf edilerek geliştirilebilmektedir. Ayrıca sistemlerin gerçeğe yakınlığını ve tüm karmaşıklığını anlamaya yardımcı olması bakımından simülasyonun robotikte kritik bir rolü vardır. Robotik sistemler için çeşitli simülasyon yazılımları kullanılmaktadır. Bu konu ile ilgili yapılan çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Bahuguna ve ark. (2013) çalışmada, RoboAnalyzer yazılımı kullanılarak üç serbestlik derecesine sahip düzlemsel robot ve altı serbestlik derecesine sahip bir robot kol modellenmiştir. Amaçları, bu tip sistemlerdeki Denavit-Hartenberg parametrelerini ve ters kinematik mantığını göstermektir.

Gouasmi ve ark. (2012) yaptıkları çalışmada, SolidWorks ve MATLAB/Simulink yazılımını eş zamanlı kullanarak iki serbestlik derecesine sahip robot sistemi tasarlayıp geliştirmişlerdir. Ayrıca, robotun hareketi sırasında yayılan enerjinin iki durum (dirsek aşağı ve dirsek yukarı) için analizi ve karşılaştırması yapılmıştır.

Kumar ve Narayan (2011) yaptıkları çalışmalarında manipülör, insansı robot ve mobil robot gibi robot tiplerine uygun Dymola & Modelica, 20-sim, Mathematica, Rossum's Playhouse gibi bazı simülasyon ortamlarını incelemişlerdir. Ayrıca, robotik uygulamalar için simülasyon programlarının (kinematik ve dinamiklerden endüstriyel uygulamalarına kadar) öneminden de bahsetmişlerdir.

Adam ve ark. (2017) yaptıkları çalışmalarında çay ağacı taçlarındaki çay filizlerini toplamak için CATIA ve MATLAB yazılımlarını kullanarak beş serbestlik derecesine sahip bir robot manipülör tasarladılar. Amaçları bu iş için gerçek bir

manipülâtör yapmaktı. Dolayısıyla, bu sistemin simülasyonunun, gerçek robot manipülâtörü oluşturmadan önce sanal bir prototip oluşturmak için kritik olduğunu düşündüklerini açıklamışlardır.

2.3. İki Link Robot Manipülâtörlerin Kontrolü İçin Yapılan Çalışmalar

İki linke sahip robot manipülâtörler, al-yerleştir (pick and place), malzeme taşıma vb. hassas uygulamalarda kullanımı sıkça görülmektedir. Bu nedenle, bu manipülâtörlerin yörünge takip kontrolü son derece önemli bir konu haline gelmiştir. Yıllar boyunca yörünge takip kontrol problemi araştırmacılar tarafından defalarca araştırılıp tartışılmıştır. Bu problemle başa çıkabilmek için araştırmacılar, bulanık mantık kontrolü, PID, kayan kipli kontrol, zaman gecikmeli kontrol gibi kontrolcülerin tasarlanması ile ilgili çalışmalara odaklanmışlardır. Ayrıca sistem performansını arttırabilmek adına ismi geçen kontrolcü tiplerinin birbirleriyle entegre edilerek de kullanıldığı literatürde sık görülen durumlardan biridir.

Lim ve Hiyama (1991), çalışmalarında iki linke sahip bir manipülâtöre uygulamak için oransal-integral kontrolcü ile bulanık mantık kontrolcüyü birleştirerek yeni bir kontrol yöntemi sunmuşlardır. Çalışmanın amacı istenen pozisyon için gerekli olan eklemlerin açılarını kontrol etmektir. Önerilen kontrolcünün performansının başarılı olduğu grafiksel sonuçlarla ortaya konulmuştur. Sistemde, oransal-integral kontrolcü, hızlı geçici cevap ve sıfır kalıcı durum hatası sağlamak için kullanılırken, bulanık mantık kontrolcü, genel olarak sistemin sönümleme özelliklerini geliştirmek için kullanılmıştır.

Perez ve ark. (2012) çalışmalarında ise sinir ağlarının robot kontrolüne uygulanmasını sunulmuştur. Önerilen kontrolcü yapısı, bir sinirsel tanımlayıcı ve PID yöntemi kullanılarak tanımlanan bir kontrol yasasından oluşmaktadır. Daha sonra önerilen kontrolcü, iki linke sahip bir robot manipülâtör modelini kontrol etmek için simülasyon yoluyla uygulanmıştır. Elde edilen grafiksel sonuçlar, önerilen kontrolcünün başarılı sonuçlar verdiğini göstermiştir.

Mustafa ve Al-Saif (2014) yaptıkları çalışmada, iki farklı tipte oluşturdukları iki link düzlemsel bir robot manipülâtöre PID kontrol tekniği uygulamışlardır. İlk olarak, manipülâtör için Denavit-Hartenberg parametrelerini sunmuşlar, daha sonra manipülâtörün dinamik denklemlerini ve hareketin doğrusal olmayan denklemlerini çıkartmışlardır. Daha sonra ise manipülâtörü doğrusal model olarak varsayarak ve

Autodesk Inventor yazılımını kullanarak oluşturarak kontrolcüyü uygulamışlardır. Elde edilen sonuçlara göre Autodesk Inventor modelinin daha başarılı ve makul cevaplar verdiği gösterilmiştir.

Soltanpour ve ark. (2014), iki linke sahip bir robot manipülatörden en iyi yörünge takip performansı elde etmek için kayan kipli kontrol yöntemi önermiştir. Kontrol sistemleri için istenmeyen bir durum olan çatırdama sinyalleri olmadan kontrol sinyallerini elde etmişlerdir. Matematiksel analiz sonucunda, önerilen kontrolcü sayesinde robot manipülatörün sistemdeki belirsizliklere rağmen asimptotik kararlılık seviyesine ulaştığını göstermişlerdir.

Baek ve ark. (2016) yaptığı çalışmada ise adaptif kayan kipli kontrol yöntemi zaman gecikmeli kontrol yöntemiyle birleştirilerek yeni bir kontrolcü geliştirilmiş ve iki link bir robot manipülatöre uygulanmıştır. Çalışmanın amacı, sistemin istenen çıkış cevabına hızlı şekilde ulaşması ve çatırtı probleminin giderilmesi olarak açıklanmıştır. Önerilen kontrolcünün etkinliği ve sistemin hızlı adaptasyonu simülasyon sonuçları ile gösterilmiştir. Ayrıca sistemin izleme hatasının etkin değerleri tablo şeklinde sunulmuştur.

Naik ve ark. (2015), yaptıkları çalışmalarında SimMechanics yazılımını kullanarak iki serbestlik derecesine sahip robot manipülatör tasarladılar bu manipülatöre bulanık oransal-türevsel kontrol yöntemi ve kayan kipli kontrol yöntemi uygulamışlardır. Yapılan simülasyon sonucunda robotun izleme performansını grafiksel olarak sunmuşlar ve önerilen kontrolcüler arasında karşılaştırma yapmışlardır. Yapılan karşılaştırma sonucunda kayan kipli kontrol yönteminin diğer kontrolcüyeye göre daha iyi sonuç verdiğini, performans endekslerini tablo şeklinde vererek ispatlamışlardır.

Qureshi ve ark. (2018) çalışmasında ise DC servo motor, tek esnek bağlantılı manipülatör ve iki link robot manipülatör gibi 3 farklı sistem için kayan kipli kontrol metodu tasarlanmış ve belirtilen sistemlere uygulanmıştır. Karşılaştırmalı analiz sonucunda, kayan kipli kontrol metodunun farklı tip sistemlerde uygulanmasının mümkün olduğu gösterilmiştir.

Lee ve ark. (2004), robot manipülatörler için bir hibrit oransal-türevsel-kayan kipli kontrol şeması önermişlerdir. Bu hibrit kontrolcü, oransal-türevsel kontrolcü ile yarı sürekli kayan kipli kontrol yöntemlerinden oluşmaktadır. Amaç, çatırtı probleminin ve ulaşma fazında gürbüz olmayan durumların üstesinden gelmektir. Önerilen denetleyicide, oransal-türevsel denetleyicisi ulaşma modunda kullanılmış ve yarı sürekli kayan kipli kontrol ise kayma modu aşamasında kullanılmıştır. Tasarlanan kontrolcü iki

link SCARA tip robot manipülatörde uygulanmıştır. Önerilen kontrolcünün model belirsizliklerinin varlığında iyi bir geçici yanıt ve yörünge izleme performansına sahip olduğu gösterilmiştir.

Marzuki ve Mardiyah (2017), kayan kipli kontrol yöntemi ile doğrusal matris eşitsizliği yöntemini kombine ederek daha gürbüz bir kontrol etkisi ile birlikte çatırdama probleminin indirgenmesini sağlamışlardır. Robotun transfer fonksiyonu, deneysel bir setten alınan giriş/çıkış verilerinin “sistem tanılama aracı”nda kullanılması ile elde edilmiştir. Kontrolcü tasarımı esnasında kayan kipli kontrolün aşamaları (izleme hataları, kayma yüzeyi, ulaşma kuralı, kontrol kuralı) ayrı ayrı açıklanmış ve kararlılık analizi Lyapunov Fonksiyonu kullanılarak ifade edilmiştir. KKK tasarlandıktan sonra doğrusal matris eşitsizliği sisteme eklenerek çatırtı problemi etkisi azaltılmaya çalışılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde ise kayan kipli kontrol ve doğrusal matris eşitsizliği tabanlı kontrolcü, çatırdama problemini minimize etmiş ve sistemin parametre değişiklikleri ve bozuklukları karşısında daha sağlam ve dengeli olmasını sağlamıştır.

Zhang ve ark. (2017), doğrusal olmayan manipülatör sistemleri için bir kayan kipli kontrol metodu geliştirmişlerdir. Doğrusal kayan kipli kontrolden farklı olarak terminal kayan kipli kontrol (TSMC) ve tekil olmayan kayan kipli kontrol (NTSMC) tiplerini irdelenmiş ve Üstel Ulaşma Yasasının gelişmiş bir versiyonu kullanılarak doğrusal olmayan kayan kipli kontrol yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntem, bir robot manipülatör sisteminin kontrolü için uygulanmış ve sonuçlar incelendiğinde önerilen yöntemin sistem belirsizliğine ve mevcut dışsal bozukluklara karşı daha hassas izleme, daha hızlı yakınsama ve daha güçlü sağlamlığa sahip olduğu görülmüştür.

Neila ve Tarak (2011), rijit robot manipülatörlerin yörünge takip problem için gürbüz ve adaptif yeni terminal kayan kipli kontrolcü sunmuşlardır. Bu tasarımın temel özelliği, terminal kayan kipli kontrolü bir sınırlayıcı bölgeyle ve adaptif yaklaşımla birleştirmesidir. Bu adaptif algoritma, belirsizliklerin ve harici bozucu etkilerin sınırlarını tahmin etmek için kullanılmıştır. Sunulan kontrolcünün performansı iki serbestlik dereceli bir robotun simülasyonu ile test edilmiş ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre, hatanın sonlu zaman içerisinde sifıra yakınsadığı ve önerilen kontrol yönteminin belirsizliklere ve bozukluklara karşı dayanıklı olduğu gözlenmiştir.

Fallaha ve ark. (2011), doğrusal olmayan çok giriş çok çıkışlı (MIMO) bir sisteme kayma kipli kontrolü deneysel olarak uygulamışlardır. Yeni yaklaşım olarak,

kontrolcünün kararlı durum rejimindeki yüksek yörünge izleme performansını muhafaza edebilen ve kontrol girişindeki çadırda problemi azaltmasına izin veren bir sistem oluşturulmuştur. Bu yaklaşım doğrusal olmayan bir ulaşma yasasının, kontrol edilen sistemin varyasyonlarına dinamik olarak uyan üstel bir fonksiyonu kullanarak tasarlanmasından oluşur. İki serbestlik dereceli bir robot kolunda gerçekleştirilen deney sonuçlarında, önerilen yaklaşımın konvansiyonel kontrol üzerindeki üstünlüğü ve kontrol girdisindeki çadırda seviyelerinin azaltılması gözlemlenmiştir.

Bu tez çalışmasında literatürde incelenen diğer çalışmalardan farklı olarak; iki link düzlemsel bir robot manipülatörün üç boyutlu katı modellemesi ADAMS yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Ayrıca, robot manipülatörün MSC Adams ve MATLAB yazılımlarının aynı anda kullanılması (co-simulation) vasıtasıyla gerçekleştirilen simülasyonu ve kontrolü sunulmuştur.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde öncelikle robot kelimesinin tanımı, robotların tarihi, ve robot manipülatörlerin yapısı incelenecektir. Daha sonra ise robot manipülatörlerin sınıflandırılması yapılarak, manipülatörlerin kullanıldığı yerler ile ilgili bilgiler verilecektir. Robot manipülatörlerin pozisyon kontrolünün yapılması amacıyla düz kinematik ve ters kinematik hesaplamalarının nasıl yapılacağı ile ilgili detaylı bilgiler verilecektir.

Çalışmanın uygulama aşamasında ise öncelikle iki serbestlik dereceli düzlemsel robot manipülatörün oluşturulması ve matematik modelinin elde edilmesi ile ilgili bilgilerin verilecektir. Ardından oluşturulan sisteme uygulanacak olan kontrolcülerin tasarımı sunulacaktır. Daha sonra ise manipülatöre ait ileri ve ters kinematik hesaplamaları detaylı olarak anlatılacaktır.

3.1. Robot Tanımı ve Robot Yapısı

Robot kelimesi ilk olarak Çek Cumhuriyetli yazarı Karel Capek'in "Rossum's Universal Robot" adlı oyunu içerisinde 1922 yılında kullanılmıştır. Çek Cumhuriyeti dilinde robot kelimesi "işçi" veya "esir" anlamlarına gelmektedir. Karel Capek, robotu, "insanlara benzeyen ama hiç yorulmadan çalışan makinelerdir" diyerek betimlemiştir (Capek, 2004).

1940'lı yıllara geldiği zaman, bir başka yazar Isaac Asimov ile robot kelimesinin anlamı daha da genişlemiştir. Bilim kurgu yazarı Asimov, robotların uymak zorunda olduklarını düşündüğü 3 kuralı şu şekilde tanımlamıştır.

- 1) Robotlar hiçbir şekilde insana zarar verebilecek türden hareketler yapamaz ve insana zarar vereceği durumlarda hareketsiz kalmalıdır.
- 2) Birinci kuralı göz ardı etmemek şartıyla, robotlar insana her zaman itaat etmek zorundadır.
- 3) Birinci ve ikinci kuralı çiğnememek şartıyla, robotlar, kendilerini de korumalıdır.

Günümüzdeki kullanım alanlarını düşündüğümüz takdirde genel manasıyla robot; fiziksel nesnelere hareket ettirebilmek maksadıyla sınırları belirli olan bir çalışma

alanı içerisinde, daha önceden programlanmış hareketler dahilinde bir veya birden fazla uç elemanını yönlendirebilmek için algılayıcı kullanılan, yazılımlar vasıtasıyla kontrol edilebilen bir cihaz olarak tanımlanabilir (Niemueller ve Widyadharna, 2003).

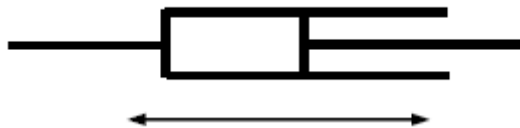
Amerikan Robot Enstitüsünün yaptığı tanıma göre robot; farklı türdeki işlerin yapılması, programlanmış hareketler sayesinde malzemeleri, parçaları, takım ve özel araçları taşıma kabiliyeti olan, tekrar tekrar programlanabilme özelliğine sahip çok fonksiyonlu bir manipülatördür (Kılıç ve ark., 2016).

İngiliz Robot Birliğine göre ise robot; belli başlı üretim işlemlerinin yapılabilmesi için gerekli olan parça, takım ve alet veyahut özel imalat cihazlarının programlanmış farklı hareketlerle taşınması, yerinin değiştirilmesi veya kullanılması amacıyla tasarlanmış olan, programlanabilir bir cihazdır (Demir, 1996).

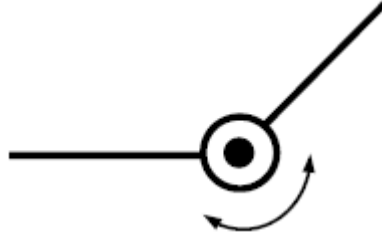
Robot en temel manasıyla aşağıda yazılan üç esasın bir araya gelmesiyle oluşur:

- 1) Bir takım fiziksel görevleri yerine getirebilen fiziksel ve mekanik bir cihaz,
- 2) Sisteme hareket kabiliyeti veren eyleyiciler ile robotun kendi durumunu ve etrafındaki durumları algılayabilen algılayıcılardan oluşan dayanıklı bir sistem,
- 3) Fazlasıyla karmaşık bir mantık yapısına sahip olan ve tekrar tekrar programlanabilen bir kontrolcü yapısı.

Bir robot birbirinden bağımsız olarak hareket etme özelliğine sahip olan prizmatik (kayar) veya döner tipte eklemlerden ve bu eklemleri birbirine bağlayan uzuvlardan oluşmaktadır. Döner eklem iki uzuv arasında dönme hareketine izin verir. Prizmatik (kayar) eklem ise iki uzuv arasında doğrusal harekete izin verir. Döner eklemden dolayı oluşan yer değiştirmeye “eklem açısı”, prizmatik (kayar) eklemden dolayı oluşan yer değiştirmeye ise “eklem kayması” adı verilir. Prizmatik (kayar) ve döner eklem yapıları sırasıyla Şekil 3.1 ve Şekil 3.2’de gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Prizmatik (kayar) eklem (Craig, 2009)



Şekil 3.2. Döner eklem (Craig, 2009)

Bu iki eklem türünü birleştirerek robot manipülasyonu ve hareketi için birçok yararlı mekanizma ortaya çıkarılabilir. Kurulumu son derece basit olan bu iki tip eklem yapısı mühendislik tasarımlarının temelinde yer almaktadırlar. Günümüzde oluşturulan robotların çoğu sadece bu iki tip eklem kombinasyonları şeklinde oluşturulmuştur.

3.2. Robotların Sınıflandırılması

Robotlar, temelde seri ve paralel robotlar olmak üzere iki grupta incelenirler. Seri robotlar bir dizi linklerden ve bu linkleri birbirine bağlayan eklemlerden oluşur. Seri robotlar geniş bir çalışma alanına ve az sayıda mekanik aksama sahiptir. Paralel robotlar ise ana çerçeve ile uç işlevcisi arasında birden fazla paralel linklerden bir araya gelmiştir. Paralel robotların seri robotlara göre daha sağlam mekanik yapıları vardır. Bu iki robot türü taşıyacakları nesnenin mekanik yapılarının kütlesine oranı bakımından kıyaslandıklarında bu oran seri robotlarda çok küçük, paralel robotlarda ise çok büyüktür. Kısacası seri robotlar daha küçük kütleli işlerde, paralel robotlar ise büyük kütleli işlerde kullanılmaktadır.

Robotlar, serbestlik derecelerine, kontrol yöntemlerine, eyleyicilerin kullandığı güç kaynağına ve kesinlik derecelerine göre dört farklı şekilde de sınıflandırılabilirler.

3.2.1. Serbestlik Derecelerine Göre Robotlar

Günümüz endüstrisinde ağırlıklı olarak altı serbestlik derecesine sahip olan robotların kullanıldığı görülmektedir. Robotlar serbestlik derecelerine göre sınıflandırılırken ilk üç eklem özelliği dikkate alınmaktadır. Eğer ilk üç eklem tamamı prizmatik (kayar) eklemlere sahipse, sonuçta oluşan kinematik yapı kartezyen (PPP), ilk eklem döner, ikinci ve üçüncü eklem prizmatik (kayar) eklemlere sahipse, bu tip sınıflandırma silindirik (RPP), ilk iki eklem döner, üçüncü eklem prizmatik (kayar)

eklemlere sahipse ve bütün eklemler bir birine paralelse, SCARA (RRP), ilk iki eklem döner, üçüncü eklem prizmatik (kayar) ekleme sahipse küresel (RRP), ilk üç eklemin tamamı döner eklemlere sahipse, sonuçta oluşan kinematik yapı ise dönel (RRR) sınıflandırma denir.

3.2.1.1. Kartezyen Robot

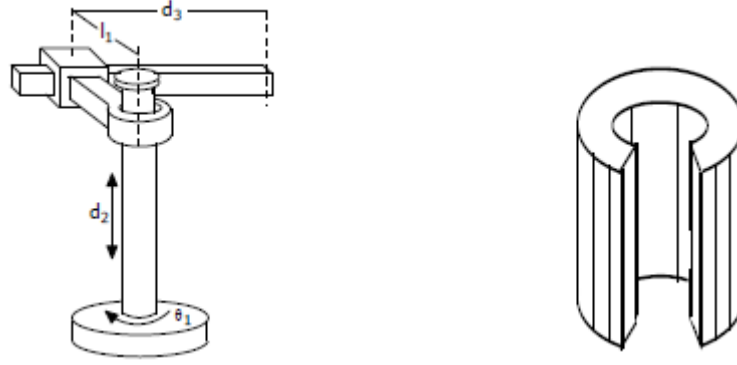
İlk üç eklemi prizmatik (kayar) eklem olacak şekilde tasarlanmış robota kartezyen manipülatör denir. Kinematik yapısı en basit olan robot tipidir. Mekanik yapıları sağlam olmasına rağmen çalışma uzayındaki hareket yetenekleri oldukça kısıtlıdır. Kartezyen tip manipülatörler daha çok büyük hacimli ve büyük ağırlıklı cisimlerin bir yerden bir yere taşınması için kullanılır. Şekil 3.3’de kartezyen robot ve bu robota ait çalışma uzayı gösterilmektedir.



Şekil 3.3. Kartezyen robot ve çalışma uzayı (Bingül ve Küçük, 2005)

3.2.1.2. Silindirik Robot

İlk eklemi döner, ikinci ve üçüncü eklemi prizmatik (kayar) tip eklemden oluşan manipülatörlere silindirik tip manipülatör denir. Mekanik yapıları sağlam olmasına rağmen bilek konum doğruluğu yatay harekete bağlı olarak değişmektedir (Bingül ve Küçük, 2005). Kartezyen robota benzer şekilde büyük hacimli ve büyük ağırlıklı nesnelerin taşınması işleminde kullanılır. Prizmatik (kayar) eklemlerde tahrik edici olarak genellikle hidrolik silindirler kullanılır. Şekil 3.4’de silindirik robot ve robota ait çalışma uzayı gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Silindirik robot ve çalışma uzayı (Bingül ve Küçük, 2005)

3.2.1.3. Küresel Robot

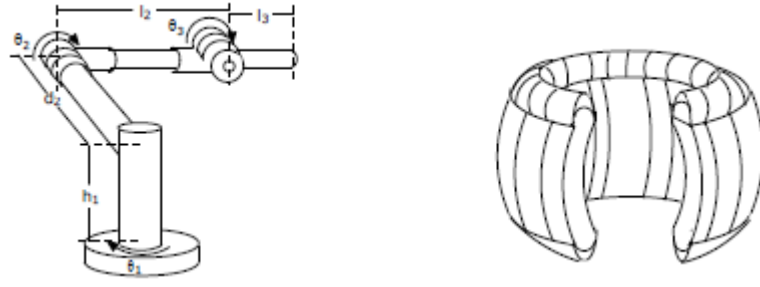
Küresel manipülatörde ilk iki eklem döner üçüncü eklem ise prizmatik (kayar) eklemden oluşmaktadır. Mekanik yapıları kartezyen robota göre sağlam olmadığı halde çalışma uzayındaki hareket yetenekleri daha yüksektir. Şekil 3.5’de küresel robot ve robota ait çalışma uzayı gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Küresel robot ve çalışma uzayı (Bingül ve Küçük, 2005)

3.2.1.4. Dönel Robot

İlk üç eklemi de döner ekleme sahip olan manipülatöre dönel manipülatör denir. Çalışma uzayındaki hareket yetenekleri en yüksek olan robot tipidir. Şekil 3.6’da dönel robot ve robota ait çalışma uzayı gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Dönel robot ve çalışma uzayı (Bingül ve Küçük, 2005)

Çizelge 3.1’de ise robot tiplerinin avantajlar ve dezavantajları verilmiştir.

Çizelge 3.1. Robot tiplerinin avantaj ve dezavantajları (Bingül ve Küçük, 2005)

Robot Tipi	Avantajları	Dezavantajları
Kartezyen	<ul style="list-style-type: none"> Kinematik denklemleri basittir. Mekanik yapıları çok sağlamdır. Çalışma uzayının her noktasında geniş çaplı hareket kabiliyeti aynıdır. Kinematik yapısı basit olduğundan yeni eleman eklenmesi kolaydır. 	<ul style="list-style-type: none"> Çalışma uzayının boyutu robotun boyundan küçüktür. Robot kendi ana gövdesine ulaşamaz. Prizmatik eklemlerin çalışma ortamındaki tozlardan korunması zordur.
Silindirik	<ul style="list-style-type: none"> Ana çerçevenin döner olmasından dolayı uç işlevisinin hızı yüksektir. Kinematik denklemleri basittir. Kartezyen robota göre daha geniş çalışma uzayına sahiptir. 	<ul style="list-style-type: none"> Küresel robotlara göre daha küçük bir çalışma uzayına sahiptir. Geniş çaplı hareket kabiliyeti kol uzunluğuna göre değişir.
Küresel	<ul style="list-style-type: none"> Çok büyük çalışma uzayına sahiptir. 	<ul style="list-style-type: none"> Kinematik denklemleri karmaşık olduğundan kontrolleri de zordur. Geniş çaplı hareket kabiliyeti her noktada farklıdır.
Dönel	<ul style="list-style-type: none"> Çok büyük çalışma uzayına sahiptir. Tamamı dönel olan eklemlerin hareket ettirilmesi kolaydır. Çok esnek ve hızlıdır. 	<ul style="list-style-type: none"> Geniş çaplı hareket yetenekleri her noktada farklıdır. Kinematik denklemleri karmaşık olduğundan kontrolleri de zordur.

3.2.2. Kontrol Yöntemlerine Göre Robotlar

Kontrol yöntemlerine göre robotlar iki sınıfta incelenmektedir.

3.2.2.1. Noktasal Kontrol Edilen Robotlar

Bu tür robotlar için spesifik olarak belirlenmiş bir çalışma alanı yoktur. Bu sınıftaki robotların serbestlik dereceleri altıdan küçüktür ve çoğunlukla bir nesneyi bir yerden alıp başka bir yere yerleştirme işlemlerinde kullanılır.

3.2.2.2. Sürekli Yörünge Kontrollü Robotlar

Bu tip robotlar kullanıcı tarafından önceden belirlenen bir yörüngeyi izleyecek şekilde kontrol edilirler. Günümüzde kaynak robotları bu tip robotlara örnek olarak verilebilir.

3.2.3. Robot Tahrik Elemanlarının Kullandığı Güç Kaynağına Göre Robotlar

Temel olarak elektrik motorları, pnömatik, hidrolik ve nükleer enerji olmak üzere dört gruba ayrılır.

3.2.3.1. Elektrik Motoruyla Tahrik Verilen Robotlar

Eklemlerin hareket ettirilmesi için elektrik motorlarının kullanıldığı robotlardır. Bu amaçla dönme açıları 1° 'nin altına kadar indirilebilen DC Servo ve adım (step) motorlar kullanılmaktadır. DC Servo motorlar bünyesinde barındırmış oldukları redüktör sayesinde düşük gerilimle yüksek tork sağlarlar. Kontrol edilmeleri basittir. Yüksek tork gerektirmeyen uygulamalarda (tut ve yerleştir) ise adım (step) motorlarının kullanıldığı görülmektedir.

3.2.3.2. Hidrolik Eyleyici ile Tahrik Verilen Robotlar

Bu tip robotlar, ağırlıklı olarak ağır sanayi endüstride kullanılırlar. Tükettikleri güç çok düşük olmasına rağmen ürettikleri tork miktarı oldukça fazladır. Bu avantajlarının yanında, doğrusal performansları olmadığı için elektrik motorlarına kıyasla kontrolleri daha zordur.

3.2.3.3. Pnömatik Eyleyici ile Tahrik Verilen Robotlar

Bu tip robotlar, çalışma tarzı olarak hidrolik silindirli robotlara benzerler ancak pnömatik silindirde yağ yerine hava kullanıldığı için silindirin de yeterli ataletini sağlayacak uygun hava basıncının sağlanamaması sebebiyle kontrol edilmeleri zordur ancak yapısı oldukça basittir.

3.2.3.4. Nükleer Enerjili Robotlar

Nükleer enerjiyle çalışan robotlar, nükleer santrallerde ya da alt sektörlerde bulunanlardan daha küçük olsalar da kendi nükleer reaktörlerini taşırlar. Bu robotlar, NASA ya da derin uzay araştırmaları için benzer kurumlar tarafından kullanılır. Bu sistemler yıllarca ve hatta onlarca yıldır insan etkileşimi olmadan çalışabilmektedirler. Böylece uzay görevleri için mükemmel bir uyum sağlamaktadırlar. Yeryüzünde kullanıldıkları takdirde, nükleer malzemenin harcadıktan sonra düzgün bir şekilde bertaraf edilmesi gerekmektedir.

3.2.4. Hassasiyet Derecelerine Göre Robotlar

Bu sınıf çözünürlük, doğruluk ve yinelenbilirlik olmak üzere üç alt başlığa ayrılmaktadır.

3.2.4.1. Çözünürlük

Çözünürlük, çıkış değerinde gözlenebilen bir değişikliği üreten girişteki en küçük değişim aralığı değeridir. Endüstriyel robotlardaki çözünürlük ise, eksenlerin hareket adım aralığı ile alakalıdır. Şöyle ki eksen hareket adım aralığı azaldıkça, robotun çözünürlüğü ters orantılı olarak artmaktadır.

3.2.4.2. Doğruluk

Doğruluk, yapılan ölçümlerin gerçek değere göre ne kadar yakın olduğu ile ifade edilmektedir. Bu açıdan doğruluğun ifade edilmesinde ölçme ve ölçme hatası önemli bir

rol oynamaktadır. Bir robotun doğruluğu ise, uç elemanının merkezini çalışma alanı içerisinde herhangi bir noktaya konumlandırma mesafesindeki yeteneğidir.

3.2.4.3. Yinelenebilirlik

Yinelenebilirlik, benzer koşullarda benzer giriş değerinin tekrarlanan uygulamalarında benzer çıkışı vermesi kabiliyeti şeklinde tanımlanmaktadır. Endüstriyel robotun yinelenebilirliği ise, çalışma alanı içerisinde robota daha önceden öğretilmiş olan bir noktaya robotun uç elemanının merkezini tekrar tekrar konumlandırma yeteneği olarak tanımlanmaktadır. Bu şekilde bir endüstriyel robotun yinelenebilirliği, robotun yinelenen hareketleri sonucunda, robot uç elemanının merkezi ile öğretilen nokta arasındaki maksimum hata miktarı ile belirlenmektedir.

3.3. Robotların Kullanıldığı Yerler

3.3.1. Tıp Alanında Kullanılan Robotlar

Günümüzde laboratuvar seviyesinde olsa bile robot cerrahlar ile yapılan, oldukça ileri cerrahi uygulamalar bulunmaktadır. Bir cerrahın kontrolündeki bir makinenin bir ameliyat gerçekleştirmesi, robotların yaptığı ameliyata örnek olarak gösterilebilir. Bir yanda görüntü sistemleri ve cerrahi el cihazlarındaki gelişim ve değişim; diğer yanda robotik sistemler ve mikro makinelerdeki değişim robotik cerrahinin temellerini oluşturmaktadır. Hastayı yatağından dikkatli şekilde kaldırarak ameliyathaneye veya röntgen odasına götürebilen hastabakıcı robotlar günümüzde aktif olarak kullanılmaktadır. Ayrıca tıp fakültesi öğrencilerini geliştirmek için vücut sıcaklığı, nabız ve kalp atışı olan ve verilen programa göre öğrencinin tespit etmesi gereken değişik hastalık numaralarını yapan robotlarında kullanıldığı görülmektedir.

3.3.2. Savunma Sanayi Alanında Kullanılan Robotlar

Savunma sanayi alanında geliştirilen insansız hava araçları, yerdeki mevzilenmiş askerlere her türlü olay hakkında kuşbakışı görüntülü bilgi verebilmektedir. Bu hava araçları, savaş esnasında düşmanların tahrip gücü yüksek olan silahlarını harekete geçirmek için gönderdikleri sinyalleri bozma ve etkisiz hale getirme özelliğine

sahiplerdir. Ayrıca başarılı gözcülükleri ile olayları anında savaşın kontrol merkezine iletmeleriyle, savaşların kazanılmasına büyük rol oynamaktadırlar. Savunma sanayi alanında çalışan bilim insanları tüm bu işlemleri gerçekleştirmek için uzaktan kumandalı insansız uçaklar geliştirmişler ve geliştirmeye devam etmektedirler.

3.3.3. Eğlence ve Sinema Endüstrisinde Kullanılan Robotlar

Eğlence sektöründeki robotlar genellikle hobi amaçlı veya oyuncak olarak kullanılmaktadır. Dünya çapında, hobi amaçlı üretilen robotların sergilendiği veya birbirleriyle yarışıldığı çeşitli etkinlikler yapılmaktadır. Ayrıca, sinema sektöründe film görüntü efektlerinin oluşturulması sırasında da robotların kullanıldığı bilinmektedir.

3.3.4. Uzay Endüstrisinde Kullanılan Robotlar

Uzay endüstrisinde kullanılan robotların önemli bir bölümü NASA tarafından geliştirmiştir. “Mars Curiosity” isimli robot NASA’nın Mars Bilim Laboratuvarı’nda gerçekleştirilen en iddialı robotlardandır. Robot, kızıl gezegen diye adlandırılan Mars’ta farklı canlıların yaşayıp yaşamadığını ve gezegenin insan yaşamına uygun olup olmadığını araştırmaktadır. Ayrıca Mars’ın iklimi ve yüzeyi ile ilgili sürekli bilgi yollamaktadır.

3.3.5. Ev Ortamında Kullanılan Robotlar

Çiçeklerin sulanması, yere dağılmış oyuncakların toplanması, gazetenin getirilmesi, temizlik yapılması ve içecek servisinin yapılması gibi rutin ev işlerinde kullanılmak üzere çeşitli robotlar günümüzde geliştirilmektedir. Ayrıca görme engelliler için düşünülen kılavuz robotlar da halen üretilmektedir.

3.3.6. Sanayi Ortamında Kullanılan Robotlar

Pres Döküm: Robotların pres döküm sanayinde kullanılmalarına sebep olan iki önemli etken bulunmaktadır. İlki, kalıplama işleminin sıcak metalin dikkatli ve düzenli bir şekilde pres altında kalıplanması ekinde yapılmasıdır. İkincisi ise robotların döküm

işleminde kullanılması sırasında materyali asgariye indirmedir. İnsan sağlığı açısından da uygun olmayan çalışma şartlarından dolayı dökümcülük sektöründe robotların kullanılması işlemlerin bir hayli kolaylaşmasını sağlayacaktır.

Nokta Kaynağı: 1960'lı yılların sonunda ilk elektrikli nokta kaynağı sanayi robotlarının başlıca uygulama alanı olarak otomotiv sanayinde kullanılmaya başlanmıştır. Bugün otomotiv sanayisinde nokta kaynaklarının hemen hemen tamamı robotlar aracılığı ile yapılmaktadır.

Dövmecilik: İnsan sağlığı açısından çok tehlikeli olacak biçimde elle yapılan yüksek sıcaklıktaki dövme işlemi robotlar sayesinde daha güvenilir bir şekilde yapılabilmektedir.

Yüzey İşleme ve Spreyeme: Robotlar, İnsan sağlığına birinci derecede zararlı olan püskürtme ile boyama işlemlerinde özellikle otomobil sanayinde yaygın olarak kullanılır. Diğer alanlarda, örneğin; beyaz eşya, mobilya ve marangozluk sanayinde boyama, cilalama ve porselen tarzı malzemelerin yüzeylerinin düzenlenmesi işlemlerinde de robotlar kullanılmaktadır.

İstifleme: Üretilmiş parçaların istiflenmesi için depolara tek tek taşınması yerine, önce bir palet üzerine yerleştirilmesi, sonra bu paletin taşınması daha uygun olmaktadır. Parçalar robot tarafından palet üzerine belli bir sıraya göre dizilebilir. Ayrıca üretimin çeşitli süreçlerinde parçaların taşınması için de paletlerin kullanılması kolaylık sağlamaktadır. Bazen de bir depoda bulunan farklı tip parçaların toplanıp aynı palet üzerine istiflenmesi gerekebilmektedir. Böyle durumlarda gelişmiş bir robot depoda gezinerek gerekli parçaları seçip palet üzerine istifleyerek insan gücünün kullanımını açısından büyük kolaylıklar sağlayabilmektedir.

Montaj: Ayrı parçalar halinde bulunan iş parçalarının sistematik biçimde bir araya getirilerek karmaşık bir ürün ortaya çıkarılması işlemine tanımlanmaktadır. Bu işlem çoğunlukla sabit istasyonlarda yapılmaktadır. Gerekli parçalar belirli yerlerden, belirli bir sıra dahilinde alınıp birleştirilmektedir. Günümüzde, robotların montajda kullanım alanları oldukça kısıtlıdır. Bunun nedeni, robotların bir yerde karışık olarak bulunan parçaları tanıyamaması ve dolayısıyla istediği parçayı alamamasıdır. Çeşitli algılayıcıların ve yazılımların da geliştirilmesi ve piyasaya sürülmesi vasıtasıyla robotların bu alanda da kullanımının daha da yaygınlaşması beklenmektedir.

3.4. Kontrol Metotları

Günümüzde kontrol teorisi incelendiğinde yaygın olarak üç isimle sınıflandırıldığı görülmektedir. Bunlar, klasik (geleneksel) kontrol teorisi, modern kontrol teorisi ve dayanıklı kontrol teorisi olarak isimlendirilmektedirler (Ogata, 1990).

Mühendislik dünyasının birçok alanında otomatik kontrol kullanılmakta ve uygulanmaktadır. Otomatik kontrol uygulamaları mühendislik alanları için bir gereklilik bir zorunluluk haline gelmiştir. Nem, sıcaklık, kuvvet, basınç, akış gibi etkenlerin kontrolü ile ilgilenen herhangi bir endüstriyel proseste, uzay-araç sistemlerinde, robotik uygulamalarda ve modern imalat sistemlerinde otomatik kontrol önemli rol oynamaktadır. Bu durum birçok mühendis ve bilim insanı için gerek pratik gerekse teorik olarak otomatik kontrol metotlarının çalışmasını çekici hale getirmektedir.

Otomatik kontrolün temelini oluşturan ilk önemli çalışma XVIII'inci yüzyılın ortalarında James Watt tarafından yapılan buhar makinesinin hız kontrolü için yapılan hız düzenleyici regülatördür. Bu aygıt buhar makinesine buhar akışını düzenleyerek, yük değişimine rağmen buhar makinesinin sabit bir hızla çalışmasına olanak sağlıyordu. Kontrol teorisinin geliştirilmesi yönündeki diğer önemli çalışmalar, Minorsky, Hazen ve Nyquist tarafından gerçekleştirilmiştir. 1922'de bir Rus bilim insanı olan Nicholas Minorsky, gemilerin kontrollü olarak yönlendirilmesi üzerine çalışmalarda bulunmuştur (Nise, 2011). 1932'de Nyquist, bir kontrol sisteminin kararlılığının değerlendirilmesinde kullanılabilecek olan bir grafiksel yöntemi ortaya koymuştur. 1934 yılında ise Hazen, pozisyon kontrol sistemleri için servo mekanizmalar terimini ortaya çıkarmıştır (Kuo ve Golnaraghi, 2002).

1940'lı yıllarda frekans cevap yöntemi, özellikle Bode diyagramı, performansı yüksek olan doğrusal kapalı çevrim kontrol sistemlerinin tasarlanması amacıyla kullanılmaya başlanmıştır. 1940'lı ve 1950'li yıllarda ise basınç, sıcaklık vb. etkenlerin kontrol edildiği endüstriyel sistemlerde genellikle PID kontrol metodu kullanılmaktaydı. 1940'larda Ziegler and Nichols, PID kontrol metodunun ayarlanması için yeni kurallar önerdiler. 1950'li yıllarda Evans'ın geliştirdiği, klasik kontrol teorisi alanında kararlılık kıstası olarak kök-yer eğrisi isminde yeni bir teknik duyurulmuştur. Frekans cevabı ve kök-yer eğrisi yöntemleri, uygulandığı sistemleri daha kararlı hale getirdiği için klasik kontrol teorisinin temel yapıtaşına haline gelmişlerdir (Nise, 2011).

Karmaşık yapılı çok girişli-çok çıkışlı modern sistemlerde, modern bir kontrolcü tasarlamak için çok sayıda denklemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Tek girişli-tek çıkışlı

sistemlere karşı başarılı performans gösteren, çok girişli-çok çıkışlı sistemlere karşı zayıf kalmaktadır. Dijital bilgisayarların ortaya çıkmasıyla birlikte, modern kontrol teorisinde, 1960'lardan bu yana, durum değişkenleri kullanılarak sentezleme ve zaman alanı (domain) analizleri yapılabilmektedir. Özellikle askeri, uzay ve endüstriyel uygulamalardaki doğruluk, kesinlik ve tutarlılık üzerine katı ihtiyaçlar ve ayrıca modern proseslerin artan kompleksliği ile başa çıkmak için modern kontrol teorisi geliştirilmiştir (Kuo ve Golnaraghi, 2002).

1960-1980 arasında kompleks sistemlerin adaptif kontrolünün yanı sıra optimal kontrol üzerine de araştırmaların yapıldığı görülmektedir. 1980-1990 yılları aralığında ise, modern kontrol teorisindeki gelişmeler dayanıklı (gürbüz) kontrol üzerine yoğunlaşmaktadır.

Modern kontrol teorisi, diferansiyel denklemlerle ifade edilen sistemlerin zaman alanı (domain) analizi üzerine oturtulmuştur ve gerçek bir sistemi temsil ettiğinden dolayı kontrol sistemlerinin dizaynını basitleştirir. Bu tip bir sistemin kararlılığı, model ile gerçek sistem arasında yer alan hata ilişkisine bağlıdır. Model referanslı tasarlanan kontrolcü, gerçek bir sisteme uyarlandığı takdirde kararlı bir performans göstermeyebilir. Bu durumdan kaçınmak için, olması muhtemel bir hata aralığı belirlenir ve ardından sistemin oluşturacağı hatayı bu aralıkta tutacak bir kontrol sistemi dizayn edilir. Tasarlanan kontrolcünün amacı sistemi kararlı halde tutmaktır. Bu tasarım yöntemi dayanıklı (gürbüz) kontrol teorisi olarak bilinir. Bu yöntem hem frekans cevabı hem de zaman alanı (domain) yaklaşımını içermektedir ve matematiksel olarak oldukça komplekstir (Ogata, 1990). Bu kontrol yöntemi 1980'lerden sonra ortaya çıkmıştır. Dayanıklı (gürbüz) doğrusal kontrol sistemleri terimi, özellikle son 10 yıl içerisinde önemli şekilde büyüme gösterdiği görülmektedir (Bartoszewicz, 2011).

3.4.1. Açık Çevrim Kontrol Sistemi

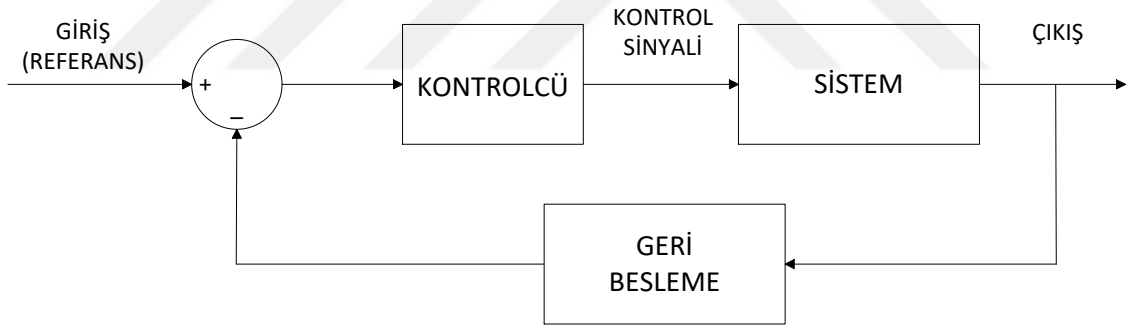
Açık çevrim kontrol sisteminde; çıkıştan veya sistem modelinden herhangi bir geri besleme bulunmadığı için kontrolcü herhangi bir bozucu dış etkiyi ve sistemdeki herhangi bir değişikliği gideremez. İstenilen bir referans değer varsa, bu değeri kararlı şekilde tutmak için hiçbir geri besleme sistemi bulunmamaktadır. Şekil 3.7 ile açık çevrim kontrol sisteminin yapısı gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Açık çevrim kontrol sisteminin blok şeması

3.4.2. Kapalı Çevrim Kontrol Sistemi

Kapalı çevrim kontrol sistemlerinde, çıkıştan bir geri besleme alındığı için veya sistem durumundan bir geri dönüş gerçekleştiği için açık çevrim kontrol sistemlerinde belirtilen negatif etkiler bu tasarım sayesinde giderilebilmektedir. Kapalı çevrim kontrol sistemleri geri beslemesi olduğundan ötürü çoğu zaman geri beslemeli kontrol olarak da isimlendirilmektedir. Kontrol metotlarının pek çok yapısı bu tip kontrol sınıfına dahil olmakla birlikte endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanıldığı saptanmıştır. Açık çevrim kontrol sistemlerine oranla doğruluk oranları yüksek olduğundan dolayı avantajlı bir metottur. Şekil 3.8 ile kapalı çevrim kontrol sisteminin yapısı gösterilmiştir.

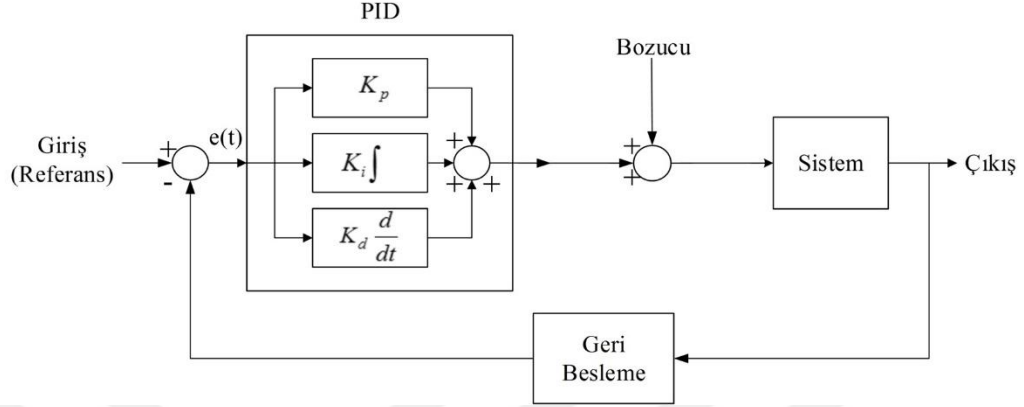


Şekil 3.8. Kapalı çevrim kontrol sisteminin blok şeması

3.4.3. Oransal-İntegral-Türevsel (PID) Kontrol

PID kontrol metodu 1940'dan beri kullanılan ve hala günümüzde de yaygın olarak kullanılan bir kontrol çeşididir. Robotikte, insansız hava araçlarında, motor kontrolünde, otomasyon sistemlerinde başta olmak üzere pek çok alanda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. PID kontrolcüler, oransal, integral ve türevsel kısımları olan basit bir yapıya sahiptir. Bu üç parametrenin etkin olarak ayarlanması vasıtasıyla kapalı çevrim sistemin davranışının belirlenmesi ve uyarlanması işlemi gerçekleştirilmektedir.

Birçok farklı proses içerisinde iyi sonuçlar vermesi ve tasarımlarının basit olması sebebiyle bu metod oldukça avantajlıdır. Şekil 3.9 ile klasik PID kontrolcü yapısı ve blok şeması gösterilmektedir.



Şekil 3.9. PID kontrolcünün blok şeması

PID kontrolcünün zaman uzayındaki gösterimi Denklem (3.1)'deki gibidir.

$$u(t) = K_p \left[e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt \right] \quad (3.1)$$

Burada $e(t)$ giriş ve çıkış arasındaki hata sinyalini, $u(t)$ sisteme uygulanacak olan kontrol sinyalini, K_p oransal kazancı, T_d türevsel zaman sabitini, T_i integral zaman sabitini ifade etmektedir. Bu denklem düzenlenerek Denklem (3.2)'de yer alan formda da gösterilebilir.

$$u(t) = K_p e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt} + K_i \int e(t) dt \quad (3.2)$$

Burada $K_d = K_p T_d$ ve $K_i = K_p / T_i$ olduğu anlaşılmaktadır. Bu katsayıların her biri ayrı ayrı sistemin vereceği cevabı değiştireceğinden dolayı, sistemden istenilen performansı elde etmek için bu katsayıların kesin ve doğru bir şekilde ayarlanmış olması gerekmektedir.

PID katsayılarından $K_d = 0$ olursa PI kontrol, $K_i = 0$ olursa ise PD gibi farklı kontrolcü tipleri türetilmektedir.

PID kontrol yöntemi, üç ana kontrol etmeninin (K_p, K_i, K_d) birleşiminden oluşmaktadır. İntegral etkinin sistemdeki kalıcı durum hatasının sıfırlanması üzerinde

etkisi bulunurken, türevsel etkinin ise sistemin kararlı hale ulaşma süresini azaltması konusunda etkisi bulunmaktadır.

Bir sisteme PID kontrolcü dizaynı yapılmak isteniyorsa, sistemden istenilen cevabı alabilmek için;

- Sistemin açık çevrim cevabının bulunması ve daha sonra sistem cevabının iyileştirilebilmesi için nelerin gerekli olduğunun belirlenmesi,
- Yükselme zamanının geliştirilebilmesi için sisteme oransal kontrol (K_p) etkinin eklenmesi,
- Maksimum aşma oranının azaltılması amacıyla sisteme türevsel kontrol (K_d) etkinin eklenmesi,
- Kalıcı durum hatasının yok edilmesi için sisteme integral kontrol (K_i) etkinin eklenmesi,
- İstenilen cevap bulununcaya kadar K_p , K_i ve K_d değerlerinin ayarlanması,

gerekmektedir. Eğer sistem için istenilen cevap PD kontrol ile sağlanabiliyorsa, sisteme integral kontrol (K_i) etkinin eklenmesine gerek yoktur.

PID katsayılarının ayarlanabilmesi için aşağıda belirtilen bazı yöntemler geliştirilmiştir (Nise, 2011). Bunlar;

- Katsayı Ayarlama Yöntemleri (Ziegler-Nichols, Cohen-Coon, Yuwana-Seborg),
- Frekans Cevabı Yöntemi,
- Köklerin Yer Eğrisi (Root-Locus) Yöntemi'dir.

3.4.4. Kayan Kipli Kontrol

Kayan Kipli Kontrol (KKK) yöntemi 1950 yılından itibaren kontrol uygulamalarında görülmektedir. Bu yöntem gürbüz (dayanıklı) bir kontrol yöntemidir. Gürbüz olmasına ek olarak, yöntemin doğal olarak doğrusal olmaması, diğer gürbüz kontrol yapılarına göre bir avantaj sağlamaktadır (Bhatti, 1998).

KKK yöntemi, ilk olarak değişken yapılı sistemler bünyesinde görülmeye başlanmıştır. Ardından kontrol uygulamalarında başlıca bir çalışma konusu haline gelmiştir (Guldner ve ark., 1999). Değişken yapılı sistemlerle ilgili yapılan çalışmalara

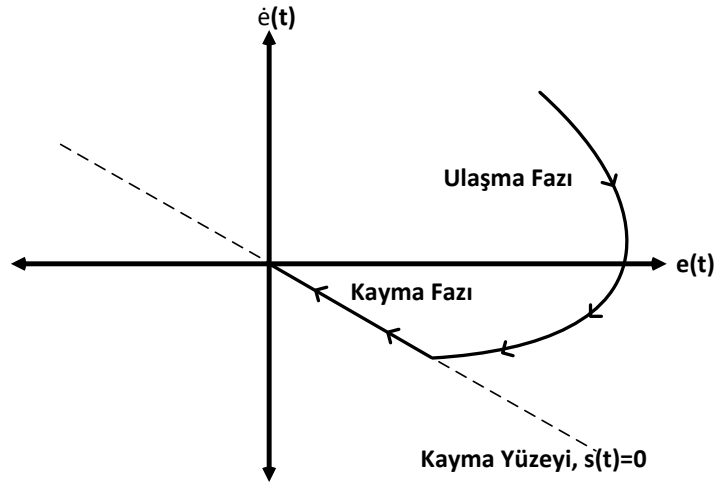
bakıldığında KKK yöntemi dikkat çekici şekilde ortaya çıkmış ve literatürdeki birçok çalışmanın oluşmasına aracılık ettiği görülmektedir.

KKK metodu, kontrol edilecek olan sistem modelinden kaynaklanan belirsizliklere, modellenemeyen sistem dinamiklerine, sistemdeki parametrelerin değişimlerine ve harici bozucu etkilere karşı düşük hassasiyet gösterecek şekilde davranış sergilemektedir. Modern teknolojinin gelişmesi ile birlikte belirsizlik ortamında çalışan karmaşık, yüksek dereceye sahip dinamik sistemlerin kontrolünde oldukça etkili ve yaygın olarak kullanılan bir doğrusal olmayan kontrol yöntemidir (Guldner ve ark., 1999). Sistemin kararlı olarak çalışmasını ve arzu edilen çıkış performansını sağlaması amacıyla uygun kontrol işaretinin üretilmesiyle, dinamik sistemlere yönelik hızlı reaksiyonlar gerçekleştirilebilmektedir.

KKK yönteminin geçmişine bakılacak olursa, bu yöntemle ilgili yapılan ilk çalışmalar 1960'lı yıllarda Rus literatüründe görülmüştür (Khan, 2003). Barbashin ve Emelyanov önderliğinde 1960'larda başlayan çalışmalar, 1976 yılında Uri Itkis'in yazdığı bir kitap ve 1977 yılında Vadim Utkin'in yapmış olduğu bir makale çalışmasına kadar Rusya dışında bu yöntem pek duyulmamıştır (Itkis, 1976; Utkin, 1977; Edwards ve Spurgeon, 1998; Emelyanov, 2006). Bu önemli öncü çalışmaların ardından, doğrusal ve doğrusal olmayan sistemlerde kullanılmaya başlanmıştır. Daha sonra, son 20 yıl içerisinde uluslararası kontrol topluluklarında daha fazla ilgi çekmeyi başarmıştır (Utkin, 2008).

Vadim Utkin ve arkadaşlarının KKK'nin elektromekanik sistemlere uygulanışı sunmalarından sonra (Guldner ve ark., 1999), bu yöntem robotik sistemlerde, motor sürücülerinde, AC/DC konverterlerde, DC/DC konverterlerde, havacılıkta kullanılan motorlu araçlarda, rüzgâr enerjisi sistemlerinde ve daha birçok elektrik/elektromekanik sistemlerde uygulanmış veya uygulanabilmesi amacıyla çeşitli çalışmalarda bulunulmuştur. Bunların dışında, otomatik uçuş kontrolü ile ilgili yapılan çalışmalarda, helikopterin denge ve kararlılığını artırma amaçlı sistemlerde, uyduların takip edilmesi konusunda, elektrik motorlarının kontrol edilmesinde, kimyasal süreçlerde, otomotiv endüstrisinde, güç konverterlerinde, asansör sistemlerinde, adaptif kontrol uygulamalarında ve daha birçok alanda başarıyla uygulandığı saptanmıştır (Edwards ve Spurgeon, 1998; Khan, 2003; Köse ve ark., 2011).

KKK yöntemi, ulaşma fazı ve kayma fazı olmak üzere iki temel aşamadan oluşmaktadır. Bu aşamalar, literatürde yaygın olarak "reaching phase" ve "sliding phase" olarak da bilinmektedir. Şekil 3.10'da KKK'nin temel aşamaları gösterilmiştir.

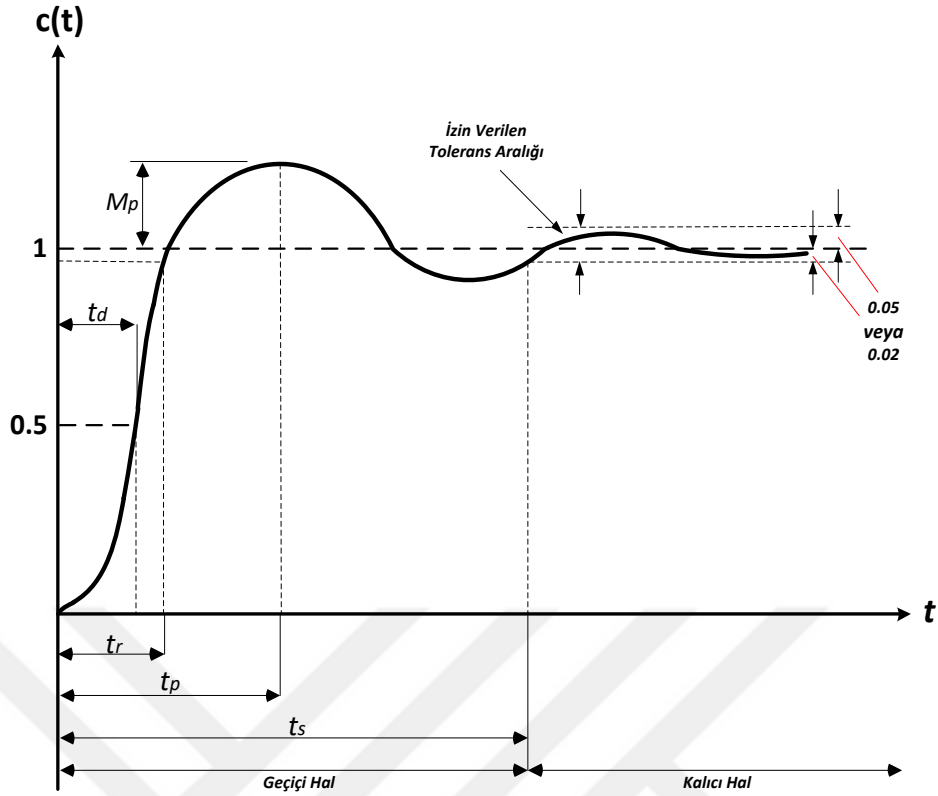


Şekil 3.10. Kayan kipli kontrolün faz yörüngesi (Utkin, 2008)

KKK metodu uygulanırken öncelikli olarak kayma yüzeyinin (sliding surface) tasarlanması gerekmektedir. KKK tasarlanmanın en önemli aşamalarından birisi, kayma yüzeyinin tasarlanması aşamasıdır. Yüksek frekanslarla anahtarlanan kontrol sinyali sistem durumlarının ulaşma fazı (reaching phase) boyunca hareketlerini sağlayarak kayma yüzeyine çekmeye çalışır. Kayma yüzeyi boyunca sistem durumlarının hareketi sistemin çıkış tepkisini gösterir. Kayma yüzeyi üzerinde, sistem durumları orijine doğru kaydırılmaya çalışılmasından ve sistem durumlarının kaydırılıyor gibi görünmesinden ötürü bu yüzeye kayma fazı (sliding phase) adı verilir. Sistem kayma yüzeyi üzerinde iken, parametrelerde meydana gelen değişikliklere ve harici bozucu etkilere karşı duyarsız hale gelmiş olur ve bu durumdan dolayı KKK yöntemi dayanıklı bir kontrol yöntemi olarak bilinir (Utkin, 1977).

3.4.5. Kontrolcü Performanslarının Değerlendirilmesi

Geri beslemeli kontrol sistemlerinde, performans değerlendirmesi yapılırken kontrolcü ve sistem yanıtı ile ilgili karşılaştırılmalar, bazı performans kriterleri kullanılarak gerçekleştirilir. Şekil 3.11'de geri beslemeli ikinci dereceden bir sistemin birim basamak girişine karşı vermiş olduğu cevap eğrisi verilmiştir.



Şekil 3.11. Geri beslemeli kontrol sistemi için birim basamak cevap eğrisi

Burada sistemin performansını etkileyen geçici ve sürekli (kalıcı) hal olmak üzere iki bölüm bulunmaktadır. Şekil 3.11'de t_d gecikme zamanını, t_r yükselme zamanını, t_p tepe zamanını, t_s yerleşme zamanını, M_p maksimum aşma miktarını (%) ifade eden performans parametreleridir. Gecikme zamanı, sistem cevabının son değerinin yarısına ulaşması için geçen zaman olarak ifade edilir. Yükselme zamanı ise sistem cevabının son değerinin %10'dan %90'ına, %5'ten %95'ine veya %0'dan %100'üne kadar ulaşması için geçen süredir. Kontrol çalışmalarında yaygın olarak %10-90 yükselme zamanı kullanılmaktadır. Maksimum noktaya erişme zamanı, sistem cevabının son değerini ilk defa aşıp bir tepe yaptığı noktaya ulaşması için gerekli olan zamandır. Maksimum aşma, basamak cevap eğrisinin son değerinde eriştiği noktadan maksimum tepe değerine kadar olan mesafe olarak ifade edilir. Maksimum aşma miktarı sistemin bağıl kararlılığını belirlemede direkt rol oynar. Oturma zamanı ise sistem cevap eğrisinde titreşim genliklerinin izin verilen tolerans aralıklarına erişmesi için geçen zaman olarak tanımlanır. Buradaki izin verilen tolerans aralıkları ise genellikle son değer %5 veya %2'lik aşma değeri olarak ifade edilmektedir.

Sistem performansını değerlendirmek ve kıyaslama yapmak için uluslararası hata kriterleri de yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tez çalışması dahilinde yapılan

simülasyon sonuçlarının değerlendirilmesinde üç farklı hata kriteri kullanılmıştır. Bunlar IAE (Toplam Mutlak Hata), ISE (Toplam Karesel Hata) ve ITAE (Toplam Zaman Mutlak Hata) kriterleridir. Kriterlere ait matematiksel denklemler sırasıyla Denklem (3.3)'den Denklem (3.5)'e kadar aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (3.3)$$

$$ISE = \int_0^{\infty} e^2(t) dt \quad (3.4)$$

$$ITAE = \int_0^{\infty} t \cdot |e(t)| dt \quad (3.5)$$

3.5. İki Link Düzlemsel Robot Manipülâtörün Modellenmesi

Endüstriyel robotlar genel olarak seri manipülâtörler olarak isimlendirilirler. Bu manipülâtörler, sabit bir tabandan bir uç elemana kadar uzanmakta olan motorlarla çalıştırılan eklemler vasıtasıyla birbirine bağlanan bir dizi link olarak dizayn edilmiştir. Bu yapı, omuz, dirsek ve bilek gibi uzuvları bünyesinde barındırdığı için klasik bir insan kolu yapısına benzetilmektedir. Bu seri tip manipülâtörlerin mevcut endüstrideki yaygın uygulaması seçme ve yerleştirme (pick and place) işlemidir.

Literatür incelendiğinde ise çeşitli endüstriyel uygulamalar için düzlemsel robot manipülâtörlerin modellenmesi ve kontrolüne yönelik çalışmalar görülmektedir. Bu çalışmalarda; çoklu link düzlemsel robot manipülâtörlerin kinematik ve dinamik denklemlerinin bulunması (De Luca ve Siciliano, 1991), düzlemsel robot manipülâtörlere ilişkin analiz, tasarım ve otomatik kontrol sistemlerinin tanımlanması (Wolovich, 1993), düzlemsel robot manipülâtörlerin uç noktasının adaptif kontrolü (You, 2009), düzlemsel robot manipülâtörler için geliştirilen çeşitli optimal yörünge planlama kontrol teknikleri (Ata, 2007), robot manipülâtörler için tasarlanan kayan kipli kontrol tekniği (Islam ve Liu, 2011), yapay sinir ağları kullanarak robot manipülâtörlerin yörünge takip kontrolünün sağlanması (Kumar ve ark., 2011), iki link robot manipülâtörün yörünge takip problemi için değişken yapıli kontrol tekniğinin geliştirilmesi (Moldoveanu ve ark., 2005), uç elemanda meydana gelen titreşimlerin iki link düzlemsel robot manipülâtörlerin yörüngesi üzerindeki etkisinin bilgisayar destekli tasarım prosedürleri kullanılarak incelenmesi (Karagülle ve Malgaca, 2004), takviyeli öğrenme kontrol algoritmasının ve klasik PID kontrol yönteminin iki serbestlik dereceli

bir robota uygulanması (Cervantes ve Alvarez-Ramirez, 2001; Nagesh Rao ve ark., 2014) gibi konular ele alınmıştır.

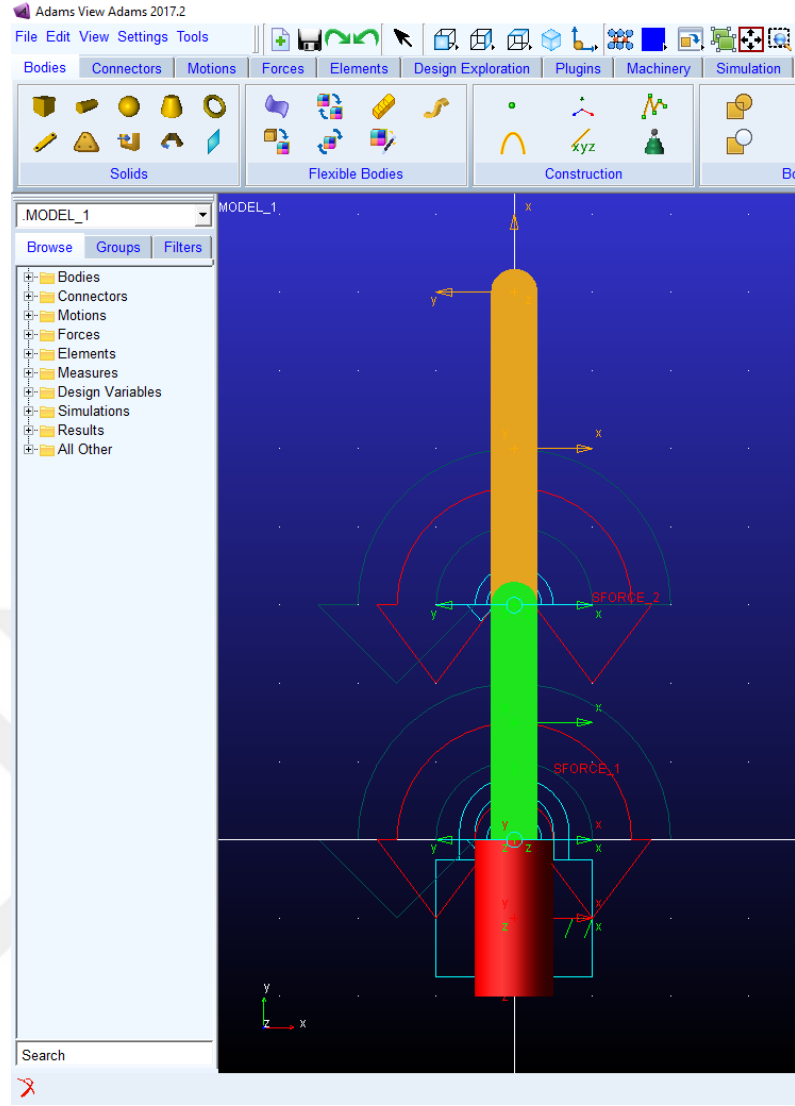
Bu tez çalışmasında kontrol edilmek istenen iki link düzlemsel robot manipülatör x-y ekseninde hareket edecek şekilde önce üç boyutlu olarak modellenmiştir. Daha sonra ise kontrolcü tasarımı için gerekli olan transfer fonksiyonları elde edilerek robota ait matematiksel modeli oluşturulmuştur. İlerleyen alt başlıklarda sistemin katı modelinin oluşturulması ve transfer fonksiyonunun bulunması ile ilgili detaylı bilgiler aktarılacaktır.

3.5.1 ADAMS Ortamında Sistemin Modellenmesi

ADAMS (Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems) genellikle mekanik sistem tasarımı ile uğraşanlar ve bu mekanik sistemlerin analizini yapmak isteyenler tarafından kullanılan bir mühendislik yazılımıdır. Sistemlerin kinematik ve dinamik olarak incelenmesi ve analizinin yapılması, sistemlerin titreşim davranışlarının incelenmesi ve titreşim kontrollerinin yapılması, sistemlerin çalışabilir olup olmadığının anlaşılması veya iyileştirilmesi, gibi işlemler ADAMS yazılımı aracılığıyla yapılabilmektedir (ADAMS, 2005).

Bu tez çalışması boyunca ADAMS yazılımının lisanslı olan öğrenci sürümü ile çalışılmış ve üzerinde çalışılan iki link düzlemsel robot manipülatörün modellenmesi ADAMS ortamında yapılmıştır.

ADAMS ortamında manipülatörün oturtulacağı temel ile manipülatörü oluşturan iki adet link, üç boyutlu katı cisimler şeklinde oluşturulmuş ve daha sonra bu cisimler uygun eklemlerle birbirlerine bağlanmışlardır. Sistemin ADAMS ortamında oluşturulan modeli Şekil 3.12’de gösterilmiştir.



Şekil 3.12. Sistemin ADAMS modeli

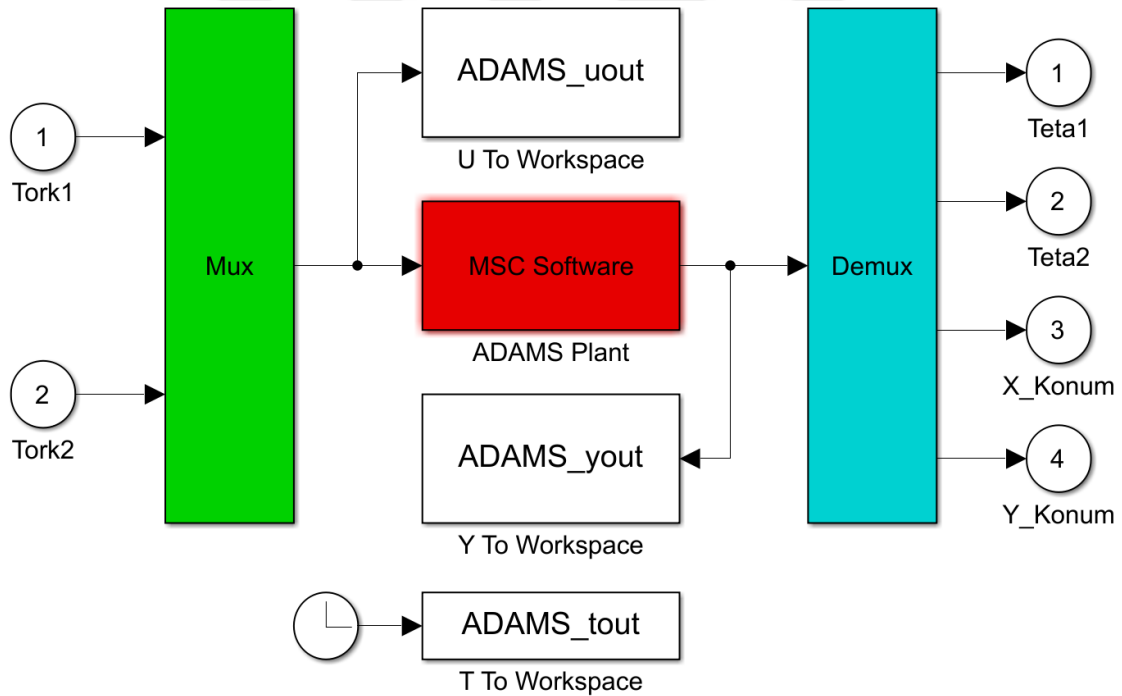
Üç boyutlu modellemesi yapılan iki link, düzlemsel robot manipülatör x-y düzleminde hareket etmektedir. Şekil 3.14'te görüldüğü gibi oluşturulan model, kontrolcü tasarımı için 2 giriş ve 2 çıkışa sahiptir. Girişler, robota hareket verecek olan eklemlere uygulanacak olan tork miktarları, çıkışlar ise birinci ve ikinci eklemin yaptıkları açılarıdır. Robot manipülatöre ait parametreler Çizelge 3.2'de verilmiştir. Verilen bu parametreler ADAMS ortamındaki modelde de tanımlanmıştır.

Çizelge 3.2. İki link robot manipülatörün parametreleri

Sembol	Açıklama	Birim
M_1	Birinci linkin kütlesi	1,2 kg
M_2	İkinci linkin kütlesi	1,5 kg
L_1	Birinci linkin uzunluğu	0,15 m
L_2	İkinci linkin uzunluğu	0,2 m

I_{1zz}	Birinci linkin kütle atalet momenti	1,8 kg.m ²
I_{2zz}	İkinci linkin kütle atalet momenti	2,3 kg.m ²
T_1	Birinci linke uygulanan tork	N.m
T_2	İkinci linke uygulanan tork	N.m
θ_1	Birinci eklem açısı	Derece
θ_2	İkinci eklem açısı	Derece

Şekil 3.13’de ise ADAMS kullanılarak oluşturulan MATLAB/Simulink modeli verilmiştir. Bu modelde çalışma sonuçları, ADAMS ve MATLAB/Simulink yazılımlarının eş zamanlı olarak çalıştırılmasıyla elde edilmiştir. Bu model sayesinde sistem ADAMS ortamında simüle edilebilmektedir. Sisteme verilen girişler ve bu girişler sonucunda oluşan cevaplar MATLAB/Simulink üzerinden gözlemlenebilmektedir. Model üzerinde sistemimize uygulanan tork girişleri görülmektedir ve bu girişler ile ADAMS Plant bloğu üzerinden ADAMS ortamında simülasyon gerçekleştirildikten sonra Teta1 ve Teta2 olarak sistemimizin çıkışları elde edilmektedir.

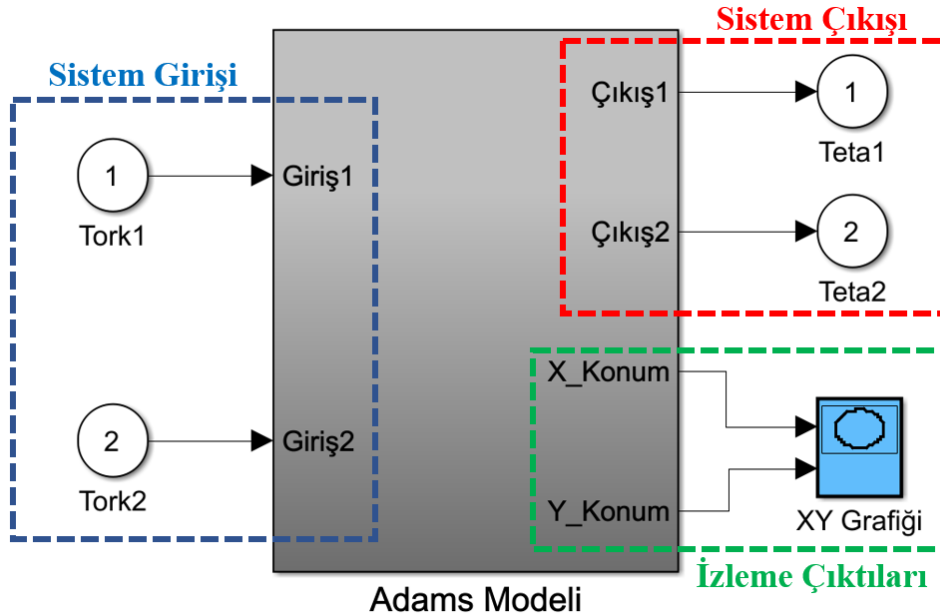


Şekil 3.13. ADAMS ve Matlab Eş Zamanlı Çalışma Blok Diyagramı

Simülasyon başladığı andan itibaren sonuçlar hesaplanırken eş zamanlı olarak ADAMS yazılımı otomatik olarak açılarak harekete ilişkin animasyonun gözlenmesine olanak sağlamaktadır.

3.5.2 Sistemin Transfer Fonksiyonlarının Elde Edilmesi

Robot manipülatör, ADAMS ortamında modellendikten sonra Matlab/Simulink ortamına Şekil 3.14'deki gibi bir blok şeklinde transfer edilmiştir. Bu blok, yani ADAMS, manipülatöre ilişkin hiçbir matematiksel ifade (transfer fonksiyonu, durum-uzay modeli vb.) sunmamaktadır. Şekildeki modelde de görüleceği üzere mavi renkle belirtilen kısımdaki iki link, robot manipülatörün her iki eklemine uygulanan torklar (Tork1 ve Tork2) sistemin girişlerini oluşturmaktadır. Bu girişlere karşılık robot manipülatörün istenilen hedef noktaya gitmesi için eklemlerinin yapması gereken açı değerleri (Teta1 ve Teta2) kırmızı renkle belirtilmiş olup sistemin çıkışlarını göstermektedir. Yeşil renkle belirtilen kısım ise ADAMS modelinden elde edilen robot manipülatörün uç noktasının x-y düzlemindeki koordinatlarını (X_Konum ve Y_Konum) ifade eden çıkışlardır. Bu çıkışlar sayesinde robot manipülatörün hareketi izlenerek arzu edilen konuma başarıyla ulaşıp ulaşımadığının kontrolü yapılabilmektedir.



Şekil 3.14. ADAMS modelinin MATLAB/Simulink ortamındaki görünümü

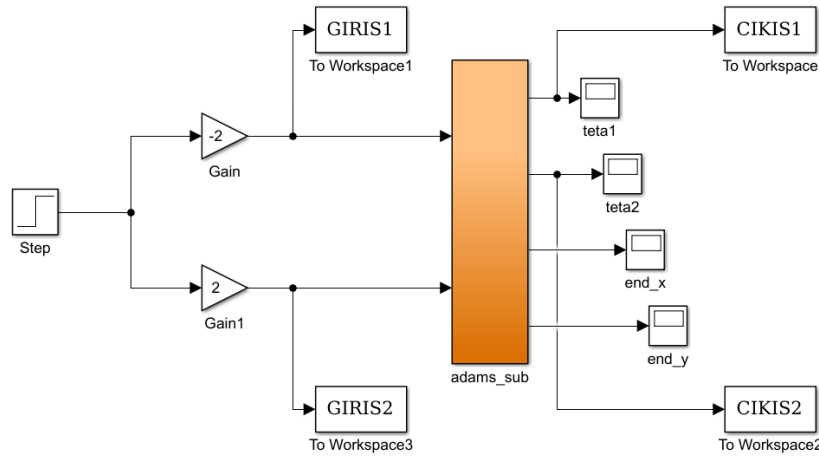
Bu tez çalışmasında, robot manipülatöre kontrolcü uygulamak için sisteme ait transfer fonksiyonuna ihtiyaç duyulmaktadır. Sistemin kontrolünde, birinci ekleme uygulanacak tork (T_1) kontrol edilerek birinci eklemin açısı (θ_1) ayarlanırken, ikinci ekleme uygulanacak tork (T_2) kontrol edilerek ise ikinci eklemin açısı (θ_2) ayarlanmaktadır. Bundan dolayı sisteme istenilen kontrolcüyü uygulayabilmek için (T_1)

ile (θ_1) arasındaki ilişkiyi ve (T_2) ile (θ_2) arasındaki ilişkiyi ifade eden 2 adet transfer fonksiyonuna ihtiyaç duyulmaktadır.

Sisteme ait transfer fonksiyonlarını bulmak amacıyla Şekil 3.15'te gösterilen yapı, MATLAB/Simulink'te oluşturulmuştur. Sisteme uygulanan birim basamak fonksiyon girişi ile bu giriş sonucundan elde edilen çıkışlar data seti şeklinde kaydedilmiştir. Kaydedilen bu veriler daha sonra Matlab/System Identification Toolbox yazılımı kullanılarak ilgili değişkenler arasındaki ikinci mertebeden transfer fonksiyonları yaklaşık olarak %98 oranında bir başarıyla elde edilmiştir. Transfer fonksiyonlarının ikinci mertebeden olmasının nedeni, kayan kipli kontrolcünün tasarımı için sistemin kütle-yay-damper sistemine benzetilerek işlemlerin yapılmasıdır. İkinci mertebeden elde edilen bu transfer fonksiyonları Denklem (3.6)'de ve (3.7)'de verilmiştir.

$$\frac{\theta_1}{T_1} = \frac{-0,0003143}{s^2 + 0,005466s + 2,937 \cdot 10^{-6}} \quad (3.6)$$

$$\frac{\theta_2}{T_2} = \frac{-0,0007293}{s^2 + 0,00523s + 3,914 \cdot 10^{-6}} \quad (3.7)$$

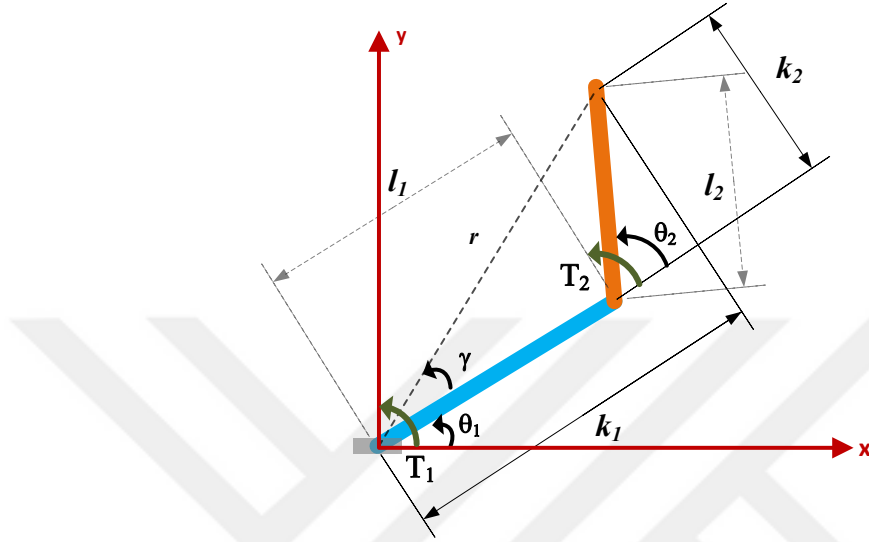


Şekil 3.15. Sisteme uygulanan giriş ve çıkış verilerinin kaydedildiği yapı

3.6. Robot Kinematiği

Bu kısımda, tez çalışması sırasında kullanılan ve Şekil 3.16'da da modeli gösterilmiş olan robot manipülatöre ait ileri ve ters kinematik denklemler

oluşturulacaktır. Daha sonra ise elde edilen bu denklemler MATLAB/Simulink ortamında uygun matematiksel bloklar kullanılarak oluşturulmuş ve bu sayede sisteme verilecek olan referans girişin her seferinde manuel olarak hesaplanması yerine otomatik olarak hesaplanması sağlanmıştır.



Şekil 3.16. İki link robot manipülatörün modeli

Kinematik, en genel ifadeyle bir robotun hareketini, matematiksel ifadelerle açıklayan bir dizi cebirsel denklemden oluşan işlemlere verilen addır. İleri ve ters kinematik olmak üzere iki bölümde incelenirler. İleri kinematik işleminde, verilen eklemler açılarının göre robotun uç elemanının pozisyonu ileri kinematik denklemler vasıtasıyla elde edilir. Ters kinematik işleminde ise, ileri kinematiğin tam tersi olarak, verilen uç elemanının pozisyonuna göre robotun o pozisyona gitmesi için gereken eklemler açılarının ters kinematik denklemler sayesinde elde edilmesidir. Bundan sonraki aşamalarda iki linke sahip düzlemsel robot manipülatörün ileri ve ters kinematik denklemlerinin bulunuşu detaylı olarak anlatılacaktır.

3.6.1 Robot Manipülatörün İleri Kinematik Denklemleri

Bu robot kolunu tanımlamak için birkaç geometrik parametreye ihtiyaç vardır. İlk olarak, her bağlantının uzunluğu bitişik eklemler eksenleri arasındaki mesafe olarak tanımlanır. Şekil 3.15'e göre birinci linkin uzunluğu l_1 , ikinci linkin uzunluğunun l_2 olduğu görülmektedir. Ayrıca robotun temeli ile birinci eklemin arasında yapılan açının

θ_1 ve birinci eklem ile ikinci eklem arasındaki açının θ_2 olduğu, yine aynı şekil üzerinde görülmektedir. Kullanıcı tarafından belirlenen açılara göre robotun uç elemanının x-y eksen sisteminde pozisyonunu (bir (x,y) noktası) belirlemek için kullanılan düz kinematik denklemleri (3.8) ve (3.9)'da verilmiştir.

$$x = l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (3.8)$$

$$y = l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (3.9)$$

3.6.2 Robot Manipülâtörün Ters Kinematik Denklemleri

İleri kinematiğin tam tersi olan ters kinematik denklemlerde ise kullanıcı tarafından verilen bir (x,y) noktasına robotun uç elemanını taşıyabilmesi için gerekli eklem açıları (θ_1 ve θ_2) hesaplanmaktadır.

Birinci eklem ile robotun sabitlendiği temel arasındaki (θ_1) açısının hesaplanması için öncelikle (3.8) ve (3.9) denklemleri aşağıdaki gibi yeniden yazılmalıdır.

$$x = k_1 \cos \theta_1 - k_2 \sin \theta_1 \quad (3.10)$$

$$y = k_1 \sin \theta_1 + k_2 \cos \theta_1 \quad (3.11)$$

Buradaki k_1 ve k_2 ifadeleri Denklem (3.12) ve (3.13)'de verilmiştir.

$$k_1 = l_1 + l_2 \cos \theta_2 \quad (3.12)$$

$$k_2 = l_2 \sin \theta_2 \quad (3.13)$$

Yukarıdaki denklemde belirtilen k_1 ve k_2 ifadeleri Şekil 3.15'deki geometrik bilgiler ışığında yeniden şu şekilde yazılabilir.

$$k_1 = r \cos \gamma \quad (3.14)$$

$$k_2 = r \sin \gamma \quad (3.15)$$

Yukarıdaki denklemde belirtilen r ve γ ifadeleri yine Şekil 3.15'deki geometrik bilgiler ışığında aşağıdaki gibi yeniden yazılabilir. Denklem (3.17)'de yer alan "atan2" fonksiyonu trigonometrideki "ark tanjant (arctangent)" işlemini yapmaktadır.

$$r = \sqrt{k_1^2 + k_2^2} \quad (3.16)$$

$$\gamma = \text{atan2}(k_2, k_1) \quad (3.17)$$

Daha sonra (3.14) ve (3.15) denklemleri sırasıyla (3.10) ve (3.11) denklemlerinde ilgili yerlere yazılırsa (3.10) ve (3.11) numaralı denklemler aşağıdaki gibi tekrar yazılabilirler.

$$x = r \cos \gamma \cos \theta_1 - r \sin \gamma \sin \theta_1 \quad (3.18)$$

$$y = r \cos \gamma \sin \theta_1 + r \sin \gamma \cos \theta_1 \quad (3.19)$$

Denklem (3.20) ve (3.21)'de belirtilen trigonometrik eşitlikler denklem (3.18) ve (3.19)'da ilgili yerlere sırasıyla yazıldığı takdirde (3.18) ve (3.19) numaralı denklemler (3.22) ve (3.23)'de olduğu gibi yeniden yazılır.

$$\sin(x \pm y) = \sin x \cos y \pm \cos x \sin y \quad (3.20)$$

$$\cos(x \pm y) = \cos x \cos y \mp \sin x \sin y \quad (3.21)$$

$$\frac{x}{r} = \cos \gamma \cos \theta_1 - \sin \gamma \sin \theta_1 = \cos(\gamma + \theta_1) \quad (3.22)$$

$$\frac{y}{r} = \cos \gamma \sin \theta_1 + \sin \gamma \cos \theta_1 = \sin(\gamma + \theta_1) \quad (3.23)$$

(3.22) ve (3.23) numaralı denklemler taraf tarafa bölünürse (3.24) numaralı denklem elde edilir. Daha sonra "atan2(y,x)" fonksiyonu kullanılırsa (3.25) elde edilir.

$$\frac{y}{x} = \frac{\sin(\gamma + \theta_1)}{\cos(\gamma + \theta_1)} \quad (3.24)$$

$$\text{atan2}(y, x) = \gamma + \theta_1 \quad (3.25)$$

Son olarak ise Denklem (3.17), (3.25) numaralı denklemde yerine yazılırsa θ_1 değerine Denklem (3.26)'deki gibi ulaşılmış olur.

$$\theta_1 = \text{atan2}(y, x) - \text{atan2}(k_2, k_1) \quad (3.26)$$

Birinci eklem ile ikinci eklem arasındaki (θ_2) açısının hesaplanması için ileri kinematik konusu altında yazılan (3.8) ve (3.9) numaralı denklemler taraf tarafa kareleri alınıp toplandığı takdirde (3.27) numaralı denklem elde edilmektedir.

$$x^2 + y^2 = l_1^2 + l_2^2 + 2l_1l_2[\cos \theta_1 \cos(\theta_1 + \theta_2) + \sin \theta_1 \sin(\theta_1 + \theta_2)] \quad (3.27)$$

Daha sonra (3.20) ve (3.21)'de belirtilen trigonometrik eşitlikler ile denklem yeniden düzenlenerek (3.28)'deki gibi tekrar yazılır.

$$x^2 + y^2 = l_1^2 + l_2^2 + 2l_1l_2 \cos \theta_2 \quad (3.28)$$

Normal şartlarda (3.28) numaralı denklemden θ_2 ifadesi “ark kosinüs (arccos)” fonksiyonuyla bulunabilir. Fakat “ark kosinüs” küçük açı değerlerinde sağlıklı sonuçlar vermemektedir. Bu yüzden (3.28) numaralı denklemin “atan2” fonksiyonunun uygulanabileceği bir formata dönüştürmemiz gerekmektedir. Bunun için ise (3.29) ve (3.30)'de yer alan trigonometrik eşitlikler kullanılarak Denklem (3.28), (3.31)'de olduğu gibi yeniden yazılabilir.

$$\cos^2 \theta_2 + \sin^2 \theta_2 = 1 \quad (3.29)$$

$$\sin \theta_2 = \pm \sqrt{1 - \cos^2 \theta_2} \quad (3.30)$$

$$\theta_2 = \text{atan2}(\sin \theta_2, \cos \theta_2) = \text{atan2}\left(\pm \sqrt{1 - \cos^2 \theta_2}, \cos \theta_2\right) \quad (3.31)$$

Son olarak ise $\cos \theta_2$ ifadesi denklem (3.28)'den çekilerek (3.31)'deki yerine yazıldığı takdirde θ_2 değerine denklem (3.32)'daki gibi ulaşılmış olur.

$$\theta_2 = \text{atan2}\left(\pm \sqrt{1 - \left(\frac{x^2 + y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1l_2}\right)^2}, \frac{x^2 + y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1l_2}\right) \quad (3.32)$$

Tezin bu bölümünde, ilk olarak robot kelimesinin tanımı yapılarak robotların tarihi ve robot manipülatörlerin yapısı, sınıflandırılmaları ve kullanım alanları hakkında bilgiler verilmiştir. Ardından ise robot manipülatörlerin kontrolünde kullanılan bazı

kontrol metotları teorik olarak açıklanmış ve performans değerlendirmesi için kullanılan kriterler ifade edilmiştir. Ayrıca, tez çalışmasında kullanılan iki link robot manipülatörün katı modeli ve matematiksel modelinin çıkartılması ile ilgili detaylar paylaşılmıştır. Son olarak ise robot manipülatörün pozisyonunun belirlenmesi amacıyla düz kinematik ve ters kinematik hesaplamalarına dair bilgiler verilmiştir. Bir sonraki bölümde, robot manipülatörün kontrolü için tasarlanacak olan kontrolcü yapıları ile ilgili bilgiler verilecektir.



4. KONTROLCÜ TASARIMI UYGULAMALARI

Bu tez kapsamında yapılacak olan kontrolün amacı, koordinat düzleminde orijine yerleştirilen iki link düzlemsel bir robot manipülatörün uç elemanının istenilen hedef noktalarına sırasıyla ve hızlı bir şekilde ulaşmasıdır. Robot manipülatörün kontrolü ile ilgili yapılan uygulamalarda iki farklı senaryo oluşturulmuştur. İlk senaryoda, robot manipülatörün daha önceden belirlenen iki konuma ulaşması beklenmektedir. Bu senaryonun gerçekleşmesi için PID ve kayan kipli kontrol tasarımı yapılarak her iki kontrolcüye ait sonuçlarla ilgili kıyaslamalar yapılmıştır. İkinci senaryoda ise, robot manipülatörün ulaşması için beş farklı konum belirlenmiştir. Bu senaryonun gerçekleşmesi için ise yalnızca kayan kipli kontrolcü tasarımı yapılmıştır. Kontrolcü tasarımı sırasında belirlenen bazı parametreler farklı optimizasyon yöntemleriyle geliştirilmeye çalışılmış ve elde edilen sonuçlara göre optimizasyon yöntemlerinin kıyaslamaları yapılmıştır. İlerleyen başlıklarda, belirtilen iki senaryo için yapılan çalışmalar detaylı olarak anlatılacaktır.

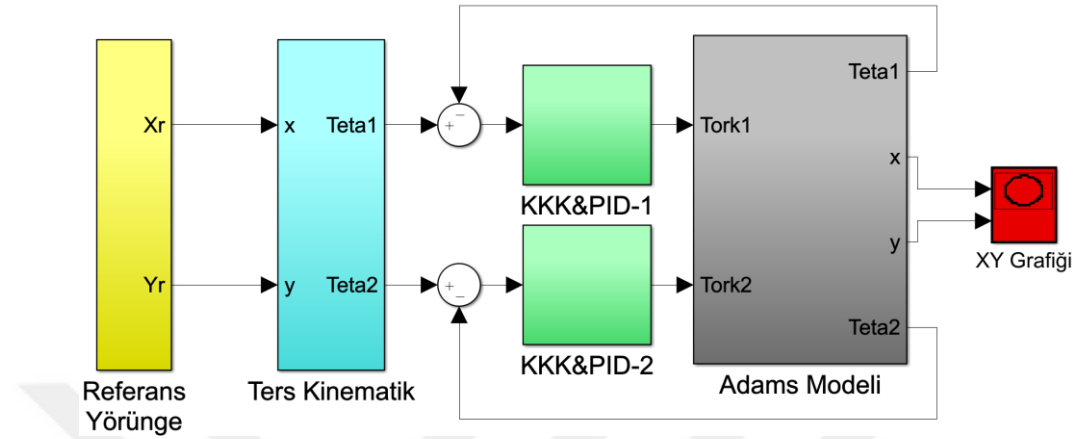
4.1. İki Konumlu Kontrol

Bu bölümde robot manipülatörün daha önceden belirlenen iki konuma ulaşmasını sağlamak için tasarlanan kontrolcülerin tasarımıyla ilgili detaylar verilmiştir.

Başlangıçta uç elemanın koordinatları, robot orijine yerleştirildiği için, (0,350) olarak tayin edilmiştir ve bu nokta başlangıç noktası olarak adlandırılmıştır. İlk olarak tasarlanan kontrolcüler vasıtasıyla robotun birinci konum olarak adlandırılan (200,50) noktasına, daha sonra ise ikinci konum olarak adlandırılan (50,200) noktasına gitmesi amaçlanmıştır. Ayrıca robotun hareketi boyunca ortaya çıkan yörüngenin her iki kontrolcü yapısı (PID ve Kayan Kipli Kontrol) özelinde kıyaslaması yapılarak hangi kontrolcü yörüngesinin daha efektif sonuç verdiği açıklanmaya çalışılmıştır.

Sistemin blok diyagramı Şekil 4.1'de gösterilmektedir. Şekilde de görüldüğü üzere manipülatörün gitmesi hedeflenen referans noktalar, data set şeklinde referans bloğuna tanımlanmıştır. Ardından bu noktalar sırasıyla ters kinematik bloğuna gelerek gerekli olan uygun eklem açılarının bulunmasının ardından elde edilen çıkış açı değerleri ile karşılaştırılarak kontrolcüye gönderilir ve ortaya çıkan hatanın giderilmesi beklenir. Yine şekilden de görüleceği üzere, sistemin kontrolü sağlanırken birinci ekleme uygulanacak olan tork ($Tork_1$) ile birinci eklem açısı ($Teta_1$) kendi arasında

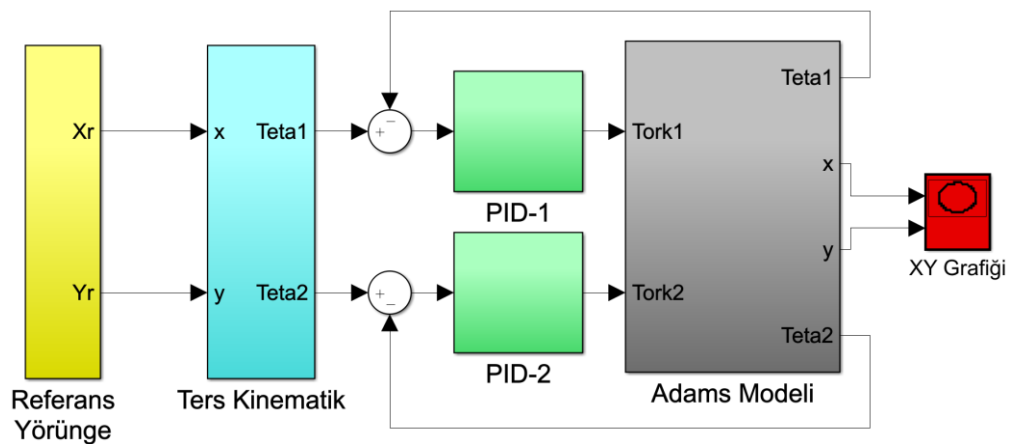
kontrol edilirken ikinci ekleme uygulanacak olan tork ($Tork2$) ile de ikinci eklem açısı ($Teta2$) kendi arasında kontrol edilmektedir. Bu sebepten ötürü her iki kontrolcü tasarımından da ikişer tane yapılmaktadır.



Şekil 4.1. Sistemin blok diyagramı

4.1.1 PID Kontrol Tasarımı

Robot manipülâtörün kontrolünde kullanılmak üzere tasarlanan her iki PID kontrolcü MATLAB/Simulink/Control Toolbox/PID Control yazılımı kullanılarak tasarlanmıştır. PID kontrolcü kullanılarak meydana getirilen sistemin kapalı çevrim blok diyagramı Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Buna göre eklemlere uygulanan torklar ($Tork1$ ve $Tork2$) sistemin girişi, eklemlerin açıları ise ($Teta1$ ve $Teta2$) sistemin çıkışı olarak ele alınmıştır.

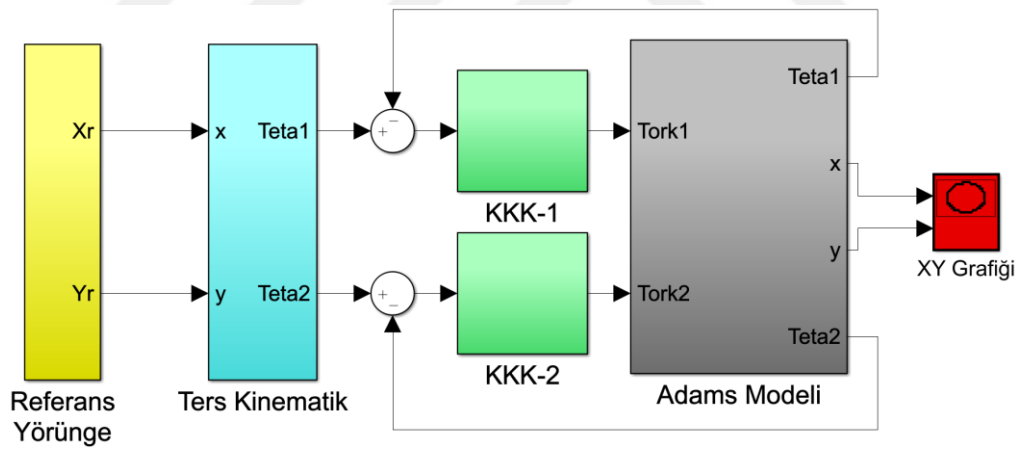


Şekil 4.2. PID kontrol uygulanan sistemin blok diyagramı

PID kontrolcünün parametreleri olan K_p , K_i ve K_d değerleri ilk başta deneme yanılma yoluyla belirlenerek sistemin mantıklı bir çıkış cevabı vermesi sağlanmıştır. Daha sonra ise bu çıkış performansının iyileştirilmesi için bu parametreler MATLAB/Response Optimization Toolbox yazılımı kullanılarak daha iyi bir hale getirilmiştir. Optimizasyon işleminden sonra Teta1 açısı için gerekli katsayılar $K_p = -8,2053$, $K_i = -2,3467$ ve $K_d = -3,8698$ olarak elde edilirken Teta2 açısı için ise $K_p = -20,4501$, $K_i = -3,6386$ ve $K_d = -5,0469$ olarak elde edilmiştir.

4.1.2 Kayan Kipli Kontrol Tasarımı

PID kontrolcüde olduğu gibi kayan kipli kontrol tasarımında da iki adet kontrolcü tasarımı yapılacaktır. Kayan kipli kontrol tasarımında, daha önce ifade edilen her iki ekleme ait tork-açı ilişkisini ifade eden transfer fonksiyonları kullanılacaktır. Kayan kipli kontrolcü kullanılarak meydana getirilen sistemin kapalı çevrim blok diyagramı Şekil 4.3'de gösterilmiştir.



Şekil 4.3. KKK uygulanan sistemin blok diyagramı

Birinci eklem için tasarlanacak olan kayan kipli kontrolcü için Denklem (3.6)'da yer alan transfer fonksiyonu kullanılacaktır. Bu fonksiyona ters Laplace dönüşümü yapılırsa zaman uzayında (4.1) ve (4.2)'deki gibi yazılır.

$$\ddot{\theta}_1(t) + 0,005466 \dot{\theta}_1(t) + 2,937 \cdot 10^{-6} \theta_1(t) = -0,0003143 T_1(t) \quad (4.1)$$

$$\ddot{\theta}_1(t) = -0,005466 \dot{\theta}_1(t) - 2,937 \cdot 10^{-6} \theta_1(t) - 0,0003143 T_1(t) \quad (4.2)$$

Kayan kipli kontrol için gerekli olan kayma yüzeyi Denklem (4.3)'deki gibi seçilmiştir. Burada $\theta_{1d}(t)$ birinci eklem açısının referans değerini belirtirken, λ_1 ise kayan kipli kontrolcünün kayma yüzeyi ile alakalı bir katsayıdır.

$$s = \dot{e}(t) + \lambda_1 \cdot e(t) = \dot{\theta}_{1d}(t) - \dot{\theta}_1(t) + \lambda_1(\theta_{1d}(t) - \theta_1(t)) \quad (4.3)$$

Kayma yüzeyinin türevi alındığında (4.4) elde edilir. Eğer $\theta_{1d}(t)$ 'nin sabit olduğu varsayılırsa $\theta_{1d}(t)$ 'nin birinci ve ikinci türevleri sıfır olmuş olur. Bunun sonucunda Denklem (4.5) elde edilir. Bu denklemdeki $K_1 \cdot \text{sign}(s)$ ifadesi kayan kipli kontrolcüye ait anahtarlama fonksiyonunun denklemdir.

$$\dot{s} = \ddot{\theta}_{1d}(t) - \ddot{\theta}_1(t) + \lambda_1(\dot{\theta}_{1d}(t) - \dot{\theta}_1(t)) \quad (4.4)$$

$$\dot{s} = -\ddot{\theta}_1(t) + \lambda_1(-\dot{\theta}_1(t)) = -K_1 \cdot \text{sign}(s) \quad (4.5)$$

(4.2) numaralı denklem (4.5) numaralı denklemde yerine yazılırsa Tork1'e ait olan kontrol sinyali (4.6) numaralı denklemdeki gibi elde edilmiş olur.

$$T_1(t) = \frac{1}{0,0003143} [(0,005466 - \lambda_1)\dot{\theta}_1(t) + 2,937 \cdot 10^{-6} \theta_1(t) + K_1 \text{sign}(s)] \quad (4.6)$$

İkinci eklem için tasarlanacak olan kayan kipli kontrolcü için (3.7) numaralı denklemde belirtilen transfer fonksiyonu kullanılacaktır. Bu fonksiyona ters Laplace dönüşümü yapılırsa zaman uzayında (3.36) ve (3.37)'deki gibi yazılır.

$$\ddot{\Theta}_2(t) + 0,00523 \dot{\Theta}_2(t) + 3,914 \cdot 10^{-6} \Theta_2(t) = -0,0007293 T_2(t) \quad (4.7)$$

$$\ddot{\Theta}_2(t) = -0,00523 \dot{\Theta}_2(t) - 3,914 \cdot 10^{-6} \Theta_2(t) - 0,0007293 T_2(t) \quad (4.8)$$

Kayan kipli kontrol için gerekli olan kayma yüzeyi Denklem (4.9)'deki gibi seçilmiştir. Burada $\theta_{2d}(t)$ ikinci eklem açısının referans değerini belirtirken, λ_2 ise kayan kipli kontrolcünün kayma yüzeyi ile alakalı bir katsayıdır.

$$s = \dot{e}(t) + \lambda_2 \cdot e(t) = \dot{\theta}_{2d}(t) - \dot{\theta}_2(t) + \lambda_2(\theta_{2d}(t) - \theta_2(t)) \quad (4.9)$$

Kayma yüzeyinin türevi alındığında Denklem (4.10) elde edilir. Eğer $\theta_{2d}(t)$ 'nin sabit olduğu varsayılırsa $\theta_{2d}(t)$ 'nin birinci ve ikinci türevleri sıfır olmuş olur. Bunun sonucunda Denklem (4.11)'deki gibi elde edilir. Bu denklemdeki $K_2 \cdot \text{sign}(s)$ ifadesi KKK'ye ait anahtarlama fonksiyonunun denklemidir.

$$\dot{s} = \ddot{\theta}_{2d}(t) - \ddot{\theta}_2(t) + \lambda_2(\dot{\theta}_{2d}(t) - \dot{\theta}_2(t)) \quad (4.10)$$

$$\dot{s} = -\ddot{\theta}_2(t) + \lambda_2(-\dot{\theta}_2(t)) = -K_2 \cdot \text{sign}(s) \quad (4.11)$$

(4.8) numaralı denklem, (4.11)'da yerine yazılırsa Tork2'ye ait olan kontrol sinyali (4.12) numaralı denklemdeki gibi elde edilmiş olur.

$$T_2(t) = \frac{1}{0,0007293} [(0,00523 - \lambda_2)\dot{\theta}_2(t) + 3,914 \cdot 10^{-6}\theta_2(t) + K_2 \text{sign}(s)] \quad (4.12)$$

Yukarıdaki gibi gerekli kontrolcü sinyalleri her iki eklem içinde sağlandıktan sonra (4.6) ve (4.12) numaralı denklemlerde bulunan K_1 , K_2 , λ_1 ve λ_2 değerleri MATLAB/Response Optimization Toolbox yazılımı kullanılarak belirlenmiş, $K_1 = 578,9351$, $K_2 = 797,5549$, $\lambda_1 = 5,8043$ ve $\lambda_2 = 7,8621$ olarak elde edilmiştir.

4.2. Beş Konumlu Kontrol

Bu kısımda, robot manipülatörün ulaşması için daha önceden belirlenen beş konum bulunmaktadır. Robot manipülatörün belirtilen bu konumlara ulaşmasını sağlamak için tasarlanan kayan kipli kontrolcüye ait parametrelerin (K_1 , K_2 , λ_1 ve λ_2) çeşitli optimizasyon yöntemleriyle geliştirilerek sonuçların iyileştirilmesi sağlanmıştır.

İlk olarak robot manipülatör için başlangıç noktası yine (0,350) noktası olarak ayarlanmıştır. Daha sonra, tasarlanan kayan kipli kontrolcü vasıtasıyla robotun, Çizelge 4.1'de yer alan hedef noktalara gitmesi amaçlanmıştır. Ayrıca robotun hareketi boyunca ortaya çıkan yörüngenin her bir optimizasyon yöntemi özelinde kıyaslaması yapılarak hangi optimizasyon yönteminin daha efektif sonuç verdiği açıklanmaya çalışılmıştır.

Çizelge 4.1. Robot Manipülâtör için Belirlenen Konumlar

Konumlar	X-Koordinat (mm)	Y-Koordinat (mm)
Birinci Konum	50	300
İkinci Konum	100	250
Üçüncü Konum	150	200
Dördüncü Konum	175	125
Beşinci Konum	200	50

Kayan kipli kontrolcüye ait parametrelerin optimizasyonu için, “Gradient Descent (GD)”, “Pattern Search (PS)” ve “Simplex Search (SS)” olmak üzere üç farklı optimizasyon algoritması kullanılmıştır.

GD algoritması, birinci mertebeden bir optimizasyon algoritmasıdır. Bu algoritma kısaca hatanın karelerinin toplamını minimum yapmaya çalışarak minimum hatayı elde edecek parametreleri bulmaya çalışır. Herhangi bir $a(x)$ giriş veri setine karşılık olarak üretilen çıkış $b(x)$, bu giriş verilerine karşılık gerçekte olması gereken çıkış $c(x)$ olmak üzere, GD algoritması Denklem (4.13) ile belirtilen hata sinyalinin enerjisini minimum yapmayı hedefler (Yazan ve Talu, 2017).

$$E = \frac{1}{2} \sum_{x=1}^y (c(x) - b(x))^2 \quad (4.13)$$

PS algoritması, bir tür “Direct Search” yani doğrudan arama algoritmasıdır. Geleneksel optimizasyon algoritmaları, problemlerin türevlenebilir olduğunu varsayar ve türev bilgisini çözümü bulmak için kullanırlar. Fakat çoğu zaman gerçek dünyada çözümü aranan problemlerin karmaşık olmalarından dolayı türev alarak işlem yapmak pratik ve uygulanabilir olmamaktadır. PS tarzı algoritmalar bu amaçla kullanılmaktadır. Bu tipteki arama algoritmaları problemin türevine gereksinim duymaksızın çözüm bulmaya çalışırlar (Altınöz ve Yılmaz, 2015).

SS algoritması, doğrusal olmayan modellerin optimizasyonunda etkili, hızlı sonuç verebilen ve karmaşık olmayan bir metottur. Stokastik aramaya dayalı bir optimizasyon algoritması olmakla beraber doğrusal olmayan problemlerin çözümü için türev bilgisine gereksinim duymayan bir algoritma tipidir. Ayrıca, kolay uygulanması sebebiyle en çok kullanılan optimizasyon yöntemlerinden biridir (Akgün, 2018).

Kayan kipli kontrolcüye ait parametreler (K_1 , K_2 , λ_1 ve λ_2) ilk başta, herhangi bir optimizasyon işlemi yapılmadan deneme yanılma yoluyla belirlenerek sistemin mantıklı

bir çıkış cevabı vermesi sağlanmıştır. Daha sonra ise bu çıkış performansının iyileştirilmesi için, belirtilen parametreler yukarıda detayları verilen optimizasyon yöntemleriyle geliştirilmeye çalışılmıştır. Buna göre, parametrelerin aldığı değerler Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Kayan Kipli Kontrolcüye ait Parametreler

Parametreler	Optimize Edilmemiş (Deneme Yanılma)	Optimizasyon-GD	Optimizasyon-PS	Optimizasyon-SS
K_1	400	211,3334	366,4932	242,9744
K_2	1000	389,9772	582,3103	465,016
λ_1	10	4,5621	9,2134	4,6245
λ_2	15	6,4591	2,4798	6,2532

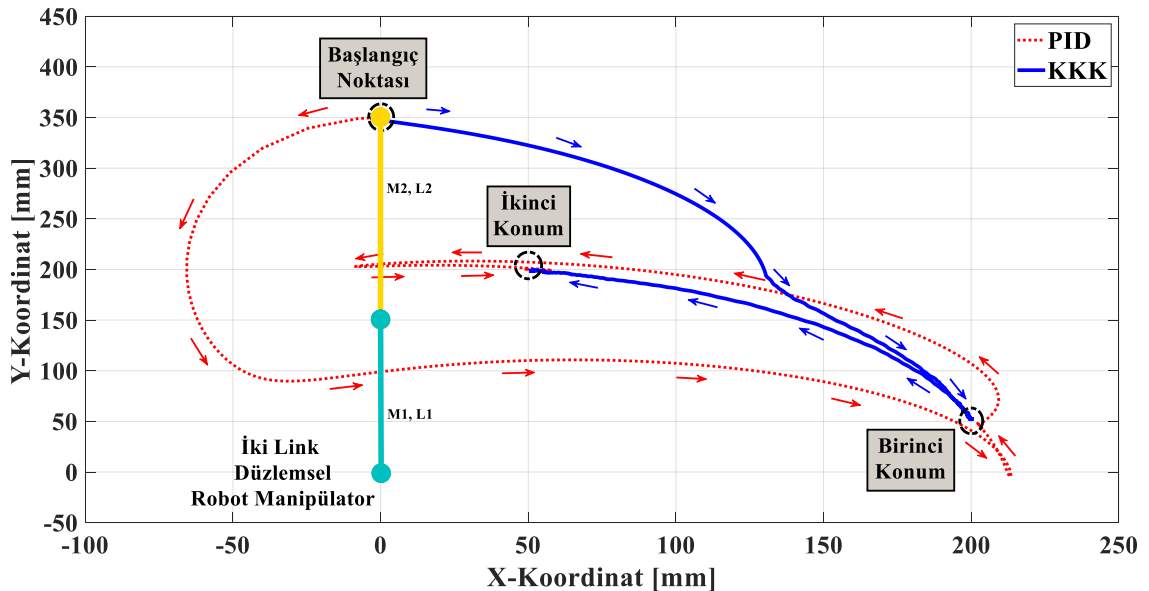
Bu bölümünde, robot manipülatörün kontrolü için gerekli olan kontrolcü tasarımları (PID ve KKK) gerçekleştirilmiştir. Kontrolcü tasarımına ilişkin matematiksel denklemler detaylıca anlatılmış ve kontrolçülere ait parametrelerin ayarlanması ile ilgili bilgiler verilmiştir. Bir sonraki başlıkta ise robot manipülatörün kontrolüne yönelik yapılan simülasyon sonuçları verilecektir.

5. BENZETİM SONUÇLARI

Tezin bu bölümünde, iki link robot manipülatörün kontrolü için önceki başlıklarda bahsedilen kontrolcü yapılarının bilgisayar ortamında benzetimi yapılmıştır. Kontrolcü çeşitlerine göre sonuçlar kıyaslamalı olarak grafiklerle verilmekte ve performans değerlendirmelerine ilişkin sonuçlar tablo olarak ifade edilmektedir.

5.1. İki Konumlu Kontrol Sonuçları

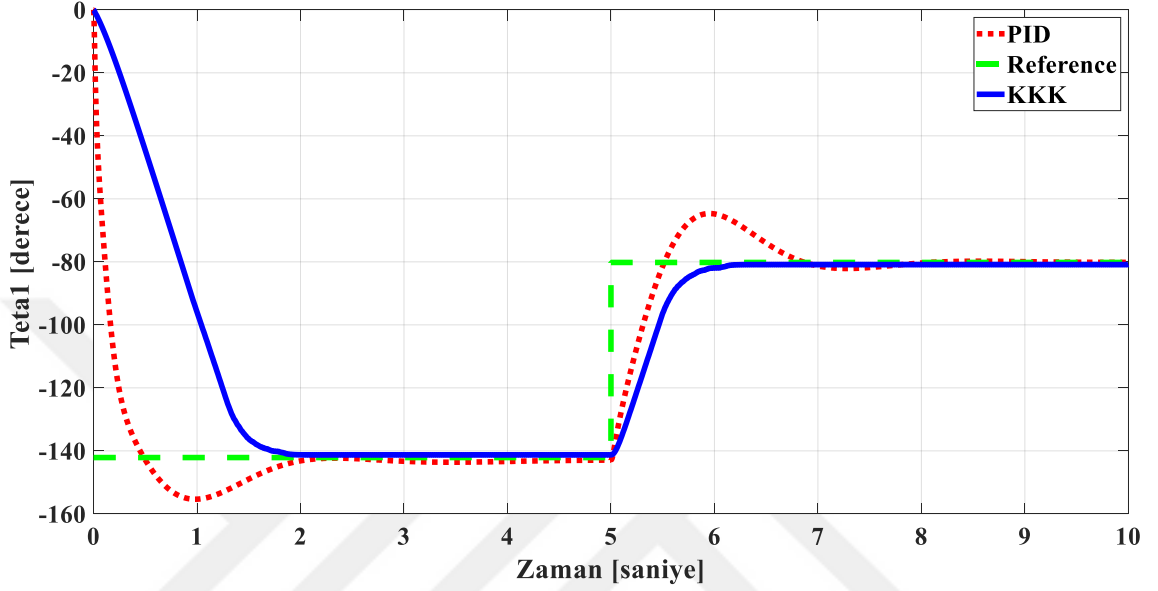
Bilgisayar ortamında yapılan benzetimlere göre, iki link robot manipülatörün yörünge takibine ilişkin PID ve KKK metotlarının arasındaki karşılaştırma grafiği Şekil 5.1'de gösterilmektedir. Şekilde de görüldüğü üzere iki link robot manipülatör koordinat sisteminde tabanı orijin noktasında olacak şekilde dik bir biçimde yerleştirilmiştir. Robot manipülatörün eklem uzunlarından ötürü (150mm ve 200mm) manipülatörün uç elemanı (0,350mm) noktasında yer almaktadır. Bu nokta “Başlangıç Noktası” olarak kabul edilmektedir. Sistemde, robot manipülatörün kontrollü bir şekilde ulaşması için istenen iki nokta ($X=200, Y=50$ mm ve $X=50, Y=200$ mm) belirlenmiştir. Bu konumlar sırasıyla “Birinci Konum” ve “İkinci Konum” olarak adlandırılmıştır.



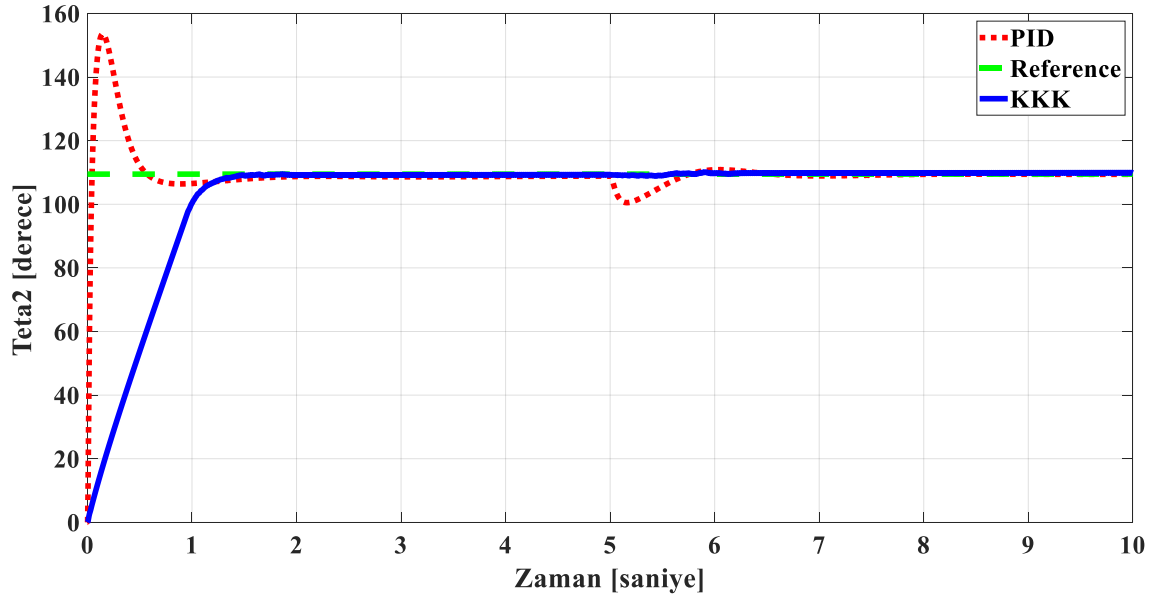
Şekil 5.1. Manipülatörün hareketine ilişkin yörünge kıyaslaması (2 Konum)

Sistemin çıkışına yani robot manipülatörün eklem açlarına (Teta1 ve Teta2) ait olan karşılaştırmalı grafikler sırasıyla Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'de görülmektedir. Burada

robot manipülâtörün yörüngesi iki bölümden oluşmaktadır. İlk 5 saniye boyunca robot manipülâtör başlangıç noktasından birinci konuma gelmeye çalışırken, 5. Saniyeden 10. saniyeye kadar olan zaman diliminde ise birinci konumdan ikinci konuma gelmeye çalışmaktadır.

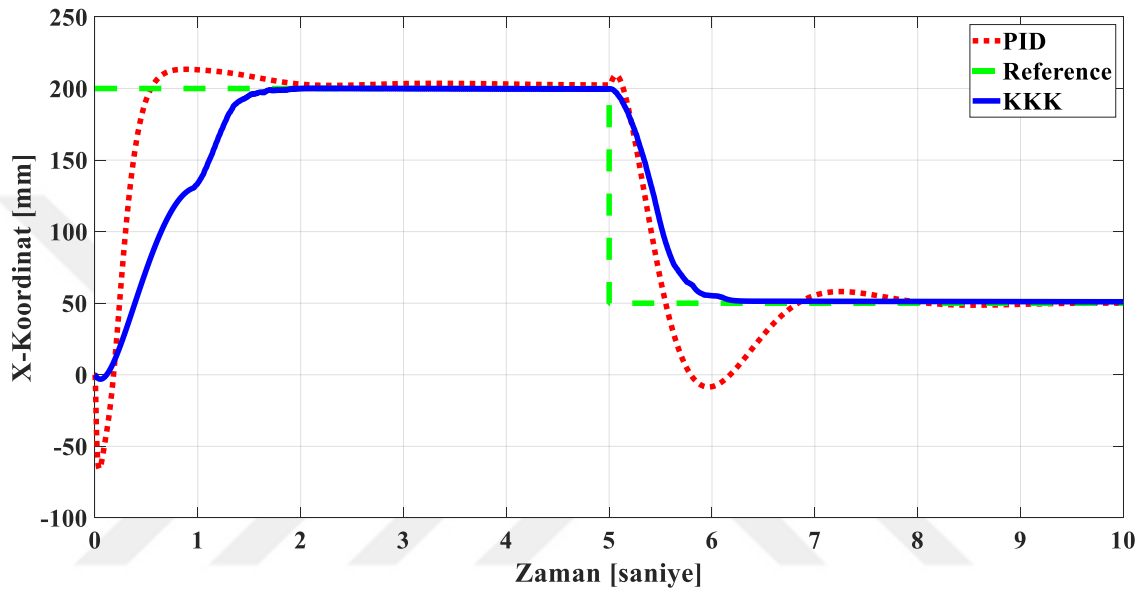


Şekil 5.2. Birinci eklem açısının zamana göre değişimi

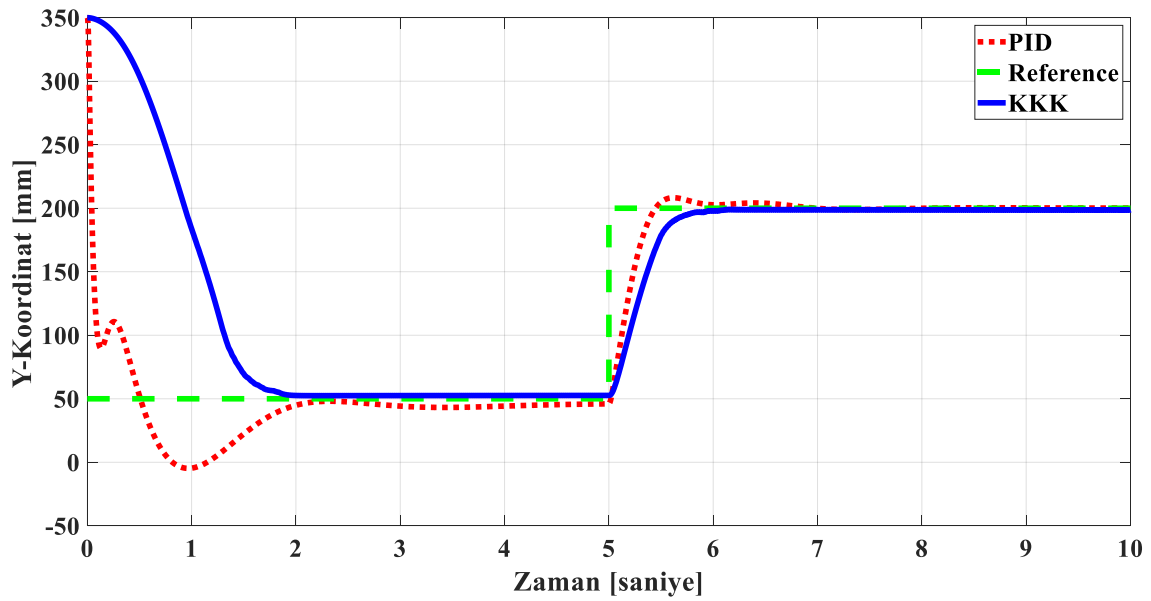


Şekil 5.3. İkinci eklem açısının zamana göre değişimi

Daha önce Şekil 3.12’de belirtilen manipülatörün uç noktasının x-y düzlemindeki koordinatlarını (X_Konum ve Y_Konum) ifade eden çıkışlara ilişkin grafikler ise Şekil 5.4 ve Şekil 5.5’de görülmektedir. Bu çıkışlar sayesinde robot manipülatörün hareketinin izlenerek arzu edilen konuma başarıyla ulaşip ulaşmadığının kontrolü yapılabilmektedir.

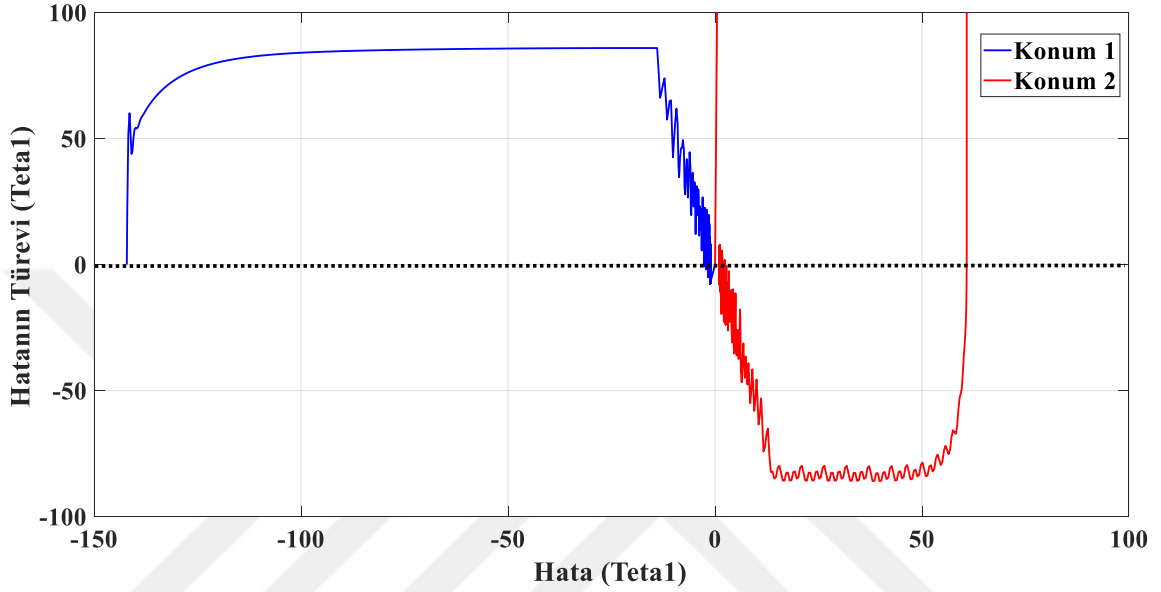


Şekil 5.4. Manipülatörün uç noktasının (x-düzlemindeki) konum zamana değişimi

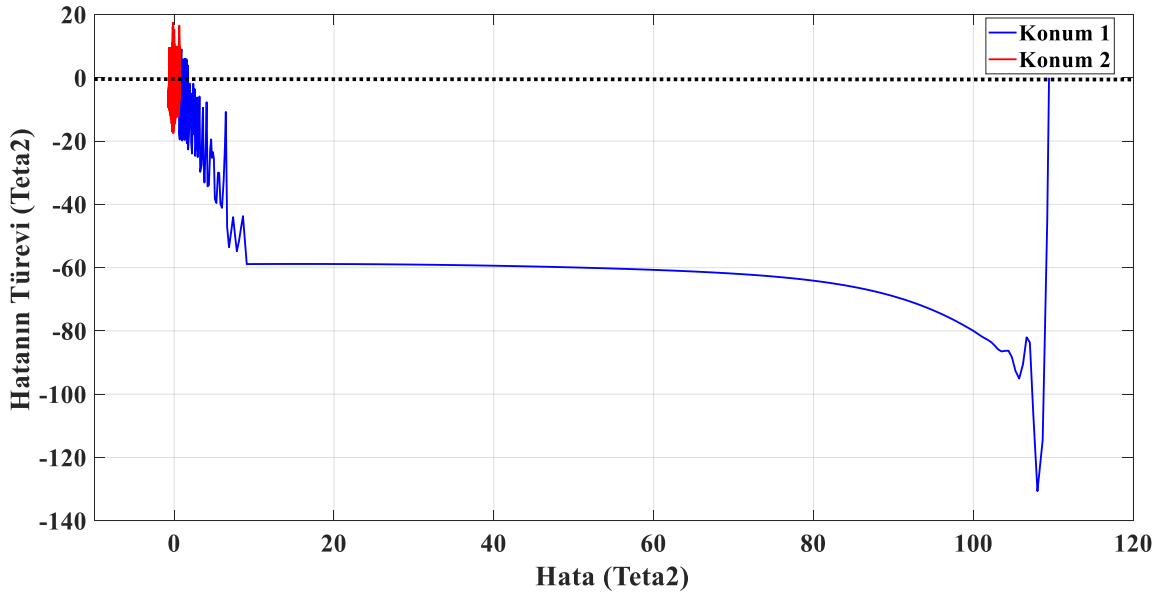


Şekil 5.5. Manipülatörün uç noktasının (y-düzlemindeki) konum zamana değişimi

Şekil 5.6 ve 5.7’de ise, sistemin çıkışını temsil eden eklem açılarına (Teta1 ve Teta2) ait hata ve hatanın türevine göre çizdirilmiş olan faz yörüngesi gösterilmektedir. Her iki grafikte de ilk 0-5. saniye arası hareket (mavi) ve 5-10. saniye arası hareket (kırmızı) için hatanın maksimum değerden sıfıra başarıyla çekildiği görülmektedir.



Şekil 5.6. Birinci eklem açısının faz portresi



Şekil 5.7. İkinci eklem açısının faz portresi

Tasarlanan kontrolcülere karşılık sistemin verdiği tepkilere göre hata hesaplamaları yapılmış veriler Çizelge 5.1’de verilmiştir. Hata hesaplamaları,

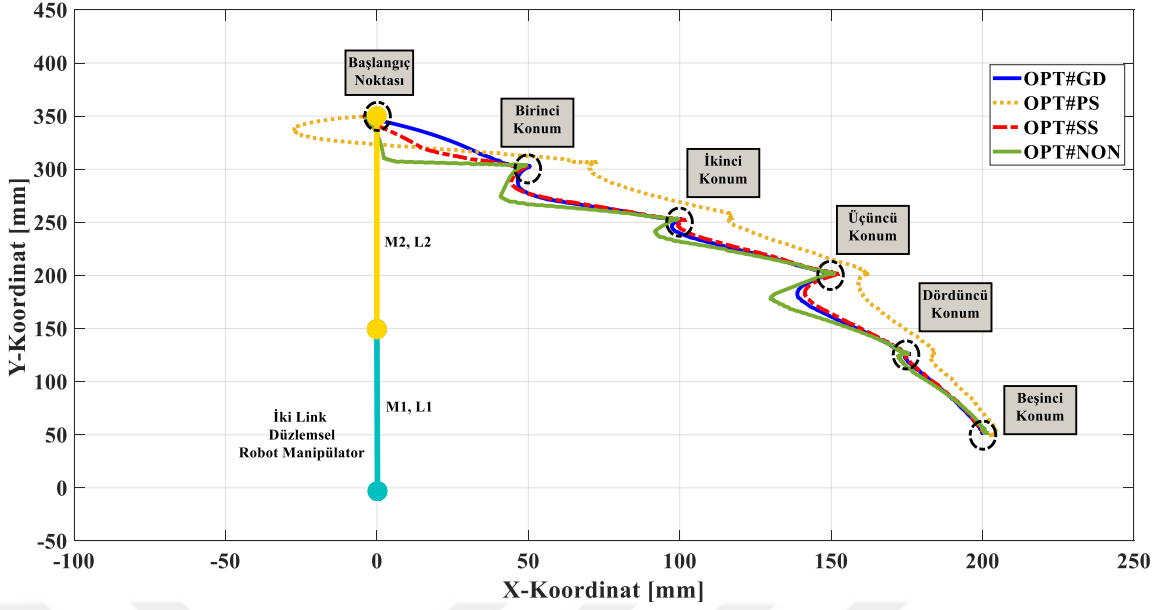
uluslararası hata kriterleri (ITAE, ISE ve IAE) esas alınarak yapılmıştır. Çizelgeden de görüleceği üzere sistemin çıkış yanıtlarının çoğunda KKK'nin PID ile kıyaslandığında sayısal olarak daha başarılı olduğu görülmektedir. Örneğin; robot manipülâtörün uç noktasının x-düzlemindeki konumu incelendiğinde KKK'nin performansında uluslararası hata standartlarına (ITAE, ISE ve IAE) göre sırasıyla %36, %15 ve %35 oranında iyileşme görülmektedir. Aynı hata standartlarında, birinci ve ikinci eklem açıları için bakıldığı takdirde yüzde olarak KKK'nin PID metoduna göre daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Diğer sonuçlardan farklı olarak, robot manipülâtörün uç noktasının y-düzlemindeki konumu incelendiğinde PID metodunun KKK'de yer alan kalıcı durum hatasından dolayı KKK'den üstün olduğu görülmektedir.

Çizelge 5.1. Kontrolcülerin Karşılaştırılması

	ISE		IAE		ITAE	
	KKK	PID	KKK	PID	KKK	PID
X	7316,46	8593,23	73,25	112,34	399,29	623,7
Y	4446	3030,05	58,53	50,96	306,7	246,36
θ_1	954,4	728,45	28,75	31,36	154,3	172,44
θ_2	0,8563	26,83	2,472	7,11	16,08	35,38

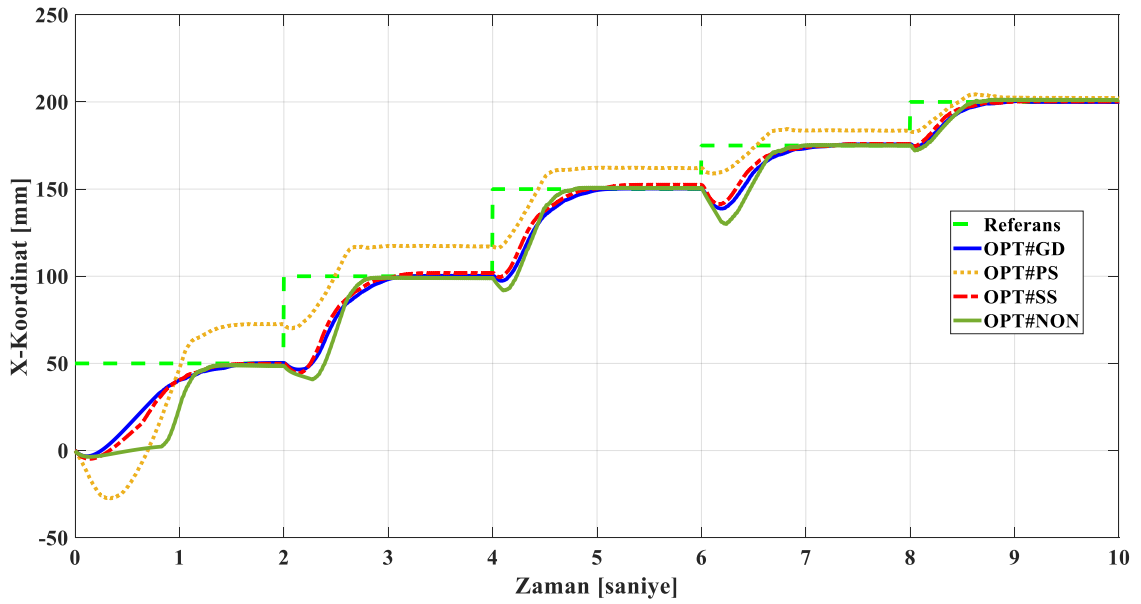
5.2. Beş Konumlu Kontrol Sonuçları

İki link robot manipülâtörün beş konumdan oluşan yörünge takibine ilişkin optimizasyon metotlarının karşılaştırıldığı grafik, Şekil 5.8'de verilmiştir. İki konumlu kontrolde olduğu gibi robot manipülâtör burada da orijine dik bir şekilde yerleştirilmiş ve “Başlangıç Noktası” olarak (0,350mm) koordinatları seçilmiştir. Sistemde, robot manipülâtörün kontrollü bir şekilde ulaşması için istenen beş nokta belirlenmiştir (Çizelge 4.1).

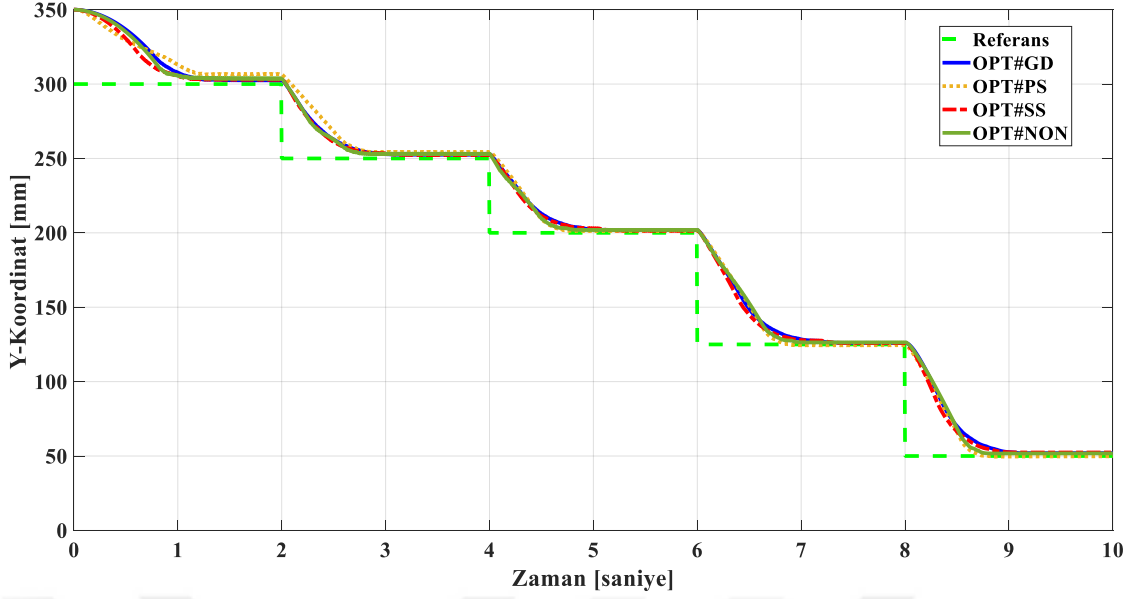


Şekil 5.8. Manipülatorün hareketine ilişkin yörünge kıyaslaması (5 Konum)

Daha önce Şekil 3.12’de belirtilen manipülatorün uç noktasının x-y düzlemindeki koordinatlarını (X_Konum ve Y_Konum) ifade eden çıkışlara ilişkin grafikler ise Şekil 5.9 ve Şekil 5.10’da görülmektedir. Bu çıkışlar sayesinde robot manipülatorün hareketinin izlenerek arzu edilen konuma başarıyla ulaşmış veya ulaşmadığının kontrolü yapılabilmektedir.

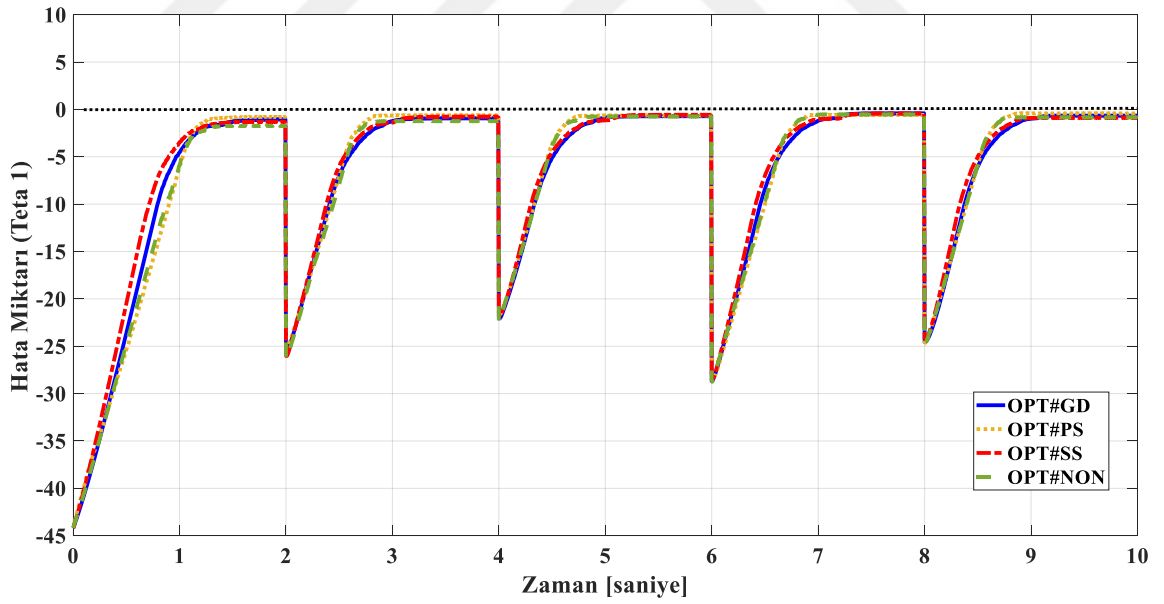


Şekil 5.9. Manipülatorün uç noktasının (x-düzlemindeki) konum zamana değişimi

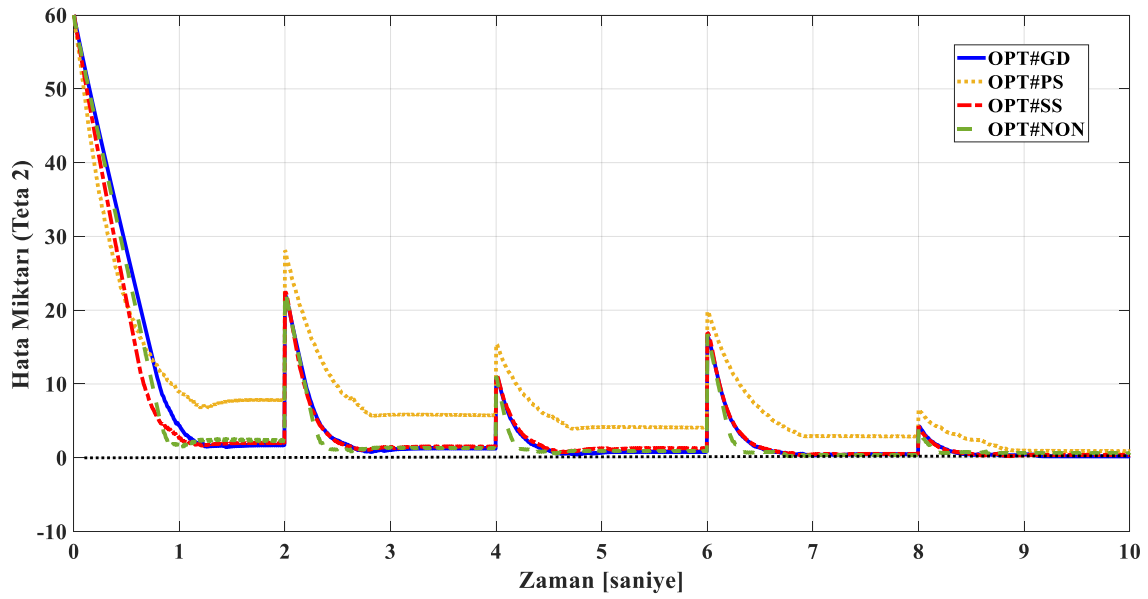


Şekil 5.10. Manipülörün uç noktasının (y-düzlemindeki) konum zamana değişimi

Şekil 5.11 ve Şekil 5.12’de ise, sistemin çıkışını temsil eden eklem açlarına (Teta1 ve Teta2) ait hata grafikleri verilmiştir.



Şekil 5.11. Birinci eklem açısındaki hata miktarının zamana göre değişimi



Şekil 5.12. İkinci eklem açısındaki hata miktarının zamana göre değişimi

Uygulanan optimizasyon metotlarına karşılık sistemin verdiği cevaplara göre hata hesaplamaları uluslararası hata kriterleri (ITAE, ISE ve IAE) esas alınarak yapılmış ve Çizelge 5.2’de verilmiştir. Çizelgeden de görüleceği üzere sistemin çıkış yanıtlarının çoğunda “Simplex Search (SS)” yönteminin tüm hata kriterlerinde daha başarılı olduğu görülmektedir. Diğer sonuçlardan farklı olarak, robot manipülatörün ikinci eklem açısı incelendiği zaman ITAE kriterinde hiçbir optimizasyon işlemi yapılmadan alınan sonucun daha üstün olduğu görülmektedir.

Çizelge 5.2. Optimizasyon Metotlarının Karşılaştırılması

	OPT#GD			OPT#PS			OPT#SS			OPT#NON		
	ITAE	IAE	ISE	ITAE	IAE	ISE	ITAE	IAE	ISE	ITAE	IAE	ISE
X	370,16	115,55	4068,69	485,16	162,18	5238,93	341,66	112,5	3958,21	415	137,64	5826,8
Y	628,8	142,5	5528	578,3	141,5	5558	528,4	131,3	4916	601,5	137,2	5405
θ_1	232,7	66,8	1347	221,3	65,76	1385	216	61,8	1209	230	67,93	1392
θ_2	78,21	45,91	1253	227,6	77,06	1335	82,77	42,57	1049	73,1	42,73	1165

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1 Sonuçlar

Bu çalışmada iki linke sahip düzlemsel bir robot manipülatörün yörünge izleme kontrolü için KKK ve PID kontrol yöntemleri üzerinde araştırmalarda bulunularak bir benzetim çalışması gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmayla, özellikle KKK metodunun uygulanabilirliği gösterilmiştir.

Tezde özellikle KKK yönteminin üzerinde inceleme ve araştırma yapılarak, bu yöntemin avantajları ve dezavantajları belirtilmiş, KKK'nın bir sisteme uygulanması konusunda çalışmalarda bulunmaktadır.

Tezin benzetim çalışmaları ile ilgili bölümünde, kullanılan kontrol yöntemlerinin matematiksel teorisi ve uygulanma şekilleri detaylı ve açık bir şekilde anlatılmaktadır. Ayrıca performans karşılaştırmasının gerçekçi bir biçimde yapılması amacı ile uluslararası hata kriterleri ile ilgili bilgiler paylaşılmıştır.

Önerilen sistem için yeni bir modelleme tekniği ve kontrolcü tasarımı MSC Adams ve Matlab yazılımları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. MSC Adams yazılımı üzerinde sanal bir prototip kurularak manipülatörün sayısal modeli elde edilmiştir. Ayrıca, oluşturulan sanal prototipin doğruluğunu kontrol etmek amacıyla manipülatöre ait ters kinematik denklemler Matlab/Simulink yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Manipülatörün kontrolü için gerekli kontrolcü tasarımları yine Matlab/Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, belirtilen yazılımların eşzamanlı olarak çalıştırılmasıyla, sistem için önerilen kontrolcülerin etkisi sanal prototip üzerinde gözlenmiş ve kontrolcü performansları irdelenmiştir.

Elde edilen sonuçlar neticesinde, KKK yönteminin PID yöntemine alternatif olarak kontrol uygulamalarında kullanılabilir olduğu görülmüştür.

6.2 Öneriler

KKK yöntemi hassasiyet gerektiren kontrol uygulamalarında başarıyla uygulanabilir. Ayrıca KKK, farklı kontrolcü tipleri (PID, Bulanık Mantık vb.) ile entegre edilerek çeşitli kontrol yapıları elde edilebilir.

KKK yönteminin tasarımında, kayma yüzeyi tasarımında ve kontrolcü katsayılarının belirlenmesinde Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) ve genetik

algoritma gibi yöntemler kullanılarak daha net ve doğru katsayıların belirlenmesi suretiyle daha başarılı sistemler kurulabilir.

İleriye yönelik olarak, MSC Adams ve MATLAB yazılımlarının aynı anda kullanılması ile gerçek hayatta oluşturulması planlanan dinamik sistemlerin önceden simüle edilmesi ve kontrolünün yapılması araştırmacılar için önemli çalışma konularından birisi olacaktır.



KAYNAKLAR

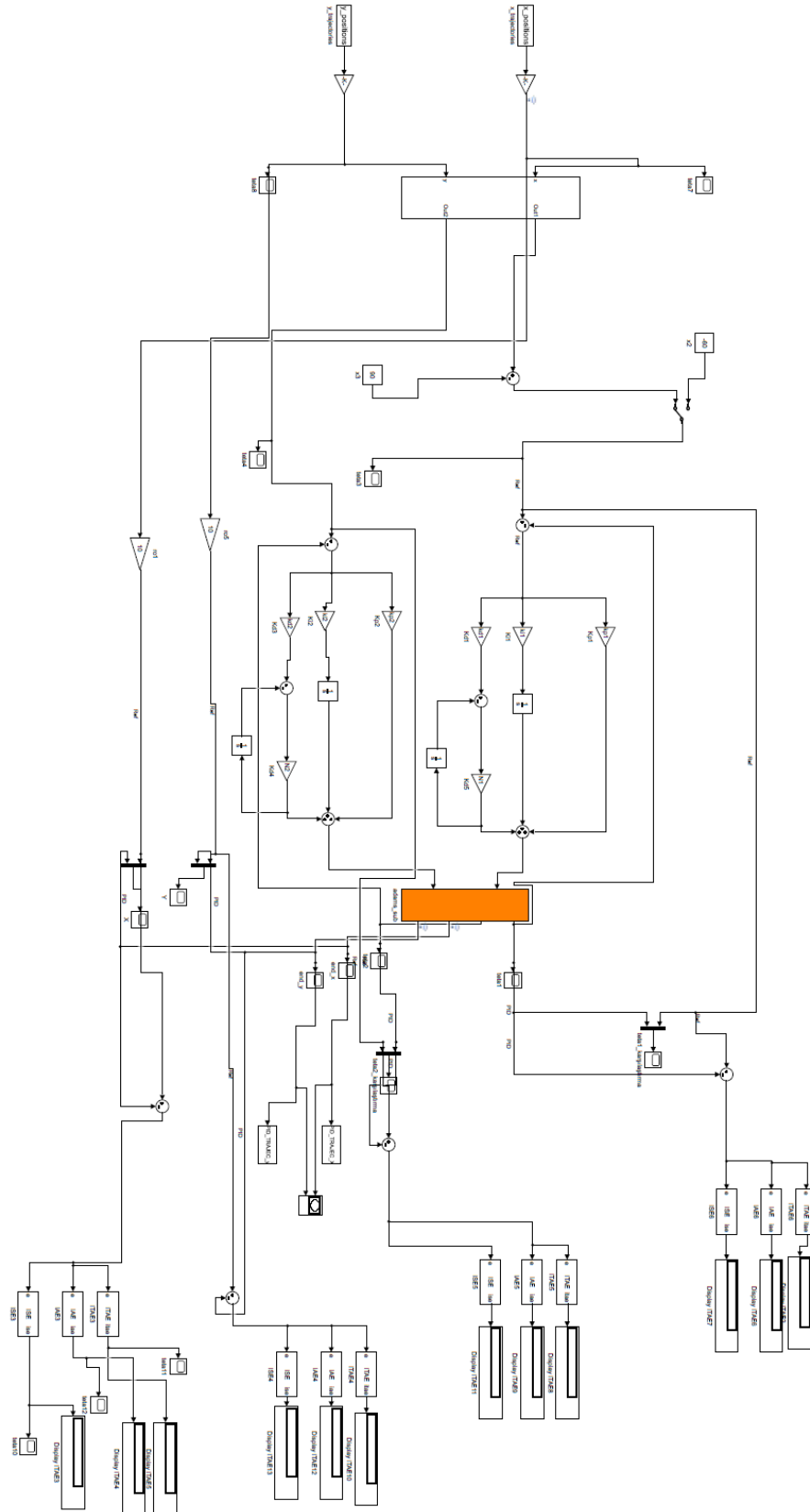
- Adam, S. A. A., Ji-Pin, Z. ve Yi-hua, Z., 2017, Modeling and simulation of 5DOF robot manipulator and trajectory using MATLAB and CATIA, *2017 3rd International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR)*, 36-40.
- ADAMS, M., 2005, Release Guide, *Published by MSC*.
- Altınöz, O. T. ve Yılmaz, A. E., 2015, Parallelization of Hooke-Jeeves pattern recognition algorithm by using CUDA for GPGPU, *2015 23rd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, 1793-1796.
- Arai, H., Tanie, K. ve Shiroma, N., 1998, Nonholonomic control of a three-DOF planar underactuated manipulator, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 14 (5), 681-695.
- Arslan, Ş. ve Korkmaz, M., 2000, Bulanık Yapay Sinir Ağıyla Dört Serbestlik Dereceli bir Robot Kolunun Kontrolü, *Sakarya University Journal of Science*, 17 (1), 131-138.
- Ata, A. A., 2007, Optimal trajectory planning of manipulators: a review, *Journal of Engineering Science and Technology*, 2 (1), 32-54.
- Baek, J., Jin, M. ve Han, S., 2016, A new adaptive sliding-mode control scheme for application to robot manipulators, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63 (6), 3628-3637.
- Bahuguna, J., Chittawadigi, R. G. ve Saha, S. K., 2013, Teaching and learning of robot kinematics using RoboAnalyzer software, *Proceedings of Conference on Advances In Robotics*, 1-6.
- Bartoszewicz, A., 2011, Robust control, theory and applications, p.
- Bhatti, A. I., 1998, Advanced sliding mode controllers for industrial applications, *Engineering*.
- Bingül, Z. ve Küçük, S., 2005, Robot tekniği I, Birsen yayınevi, p.
- Capek, K., 2004, RUR (Rossum's universal robots), Penguin, p.
- Cervantes, I. ve Alvarez-Ramirez, J., 2001, On the PID tracking control of robot manipulators, *Systems & control letters*, 42 (1), 37-46.
- Chen, K., Zhang, L. ve Zhang, Y., 2008, Cyclic motion generation of multi-link planar robot performing square end-effector trajectory analyzed via gradient-descent and Zhang et al's neural-dynamic methods, *2008 2nd International Symposium on Systems and Control in Aerospace and Astronautics*, 1-6.
- Craig, J. J., 2009, Introduction to robotics: mechanics and control, 3/E, Pearson Education India, p.
- De Luca, A. ve Siciliano, B., 1991, Closed-form dynamic model of planar multilink lightweight robots, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 21 (4), 826-839.
- Demir, M., 1996, Robot Sistem Elemanları Ve Hareket Analizleri", Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi.
- Duarte, F. ve Bohn, C., 2016, Modeling and centralized sliding mode control of a two-flexible-link robot, *2016 UKACC 11th International Conference on Control (CONTROL)*, 1-6.
- Duran, M. A. ve Ankaralı, A., 2010, Üç serbestlik dereceli Puma tipi bir manipülâtörün PID kontrolü.
- Edwards, C. ve Spurgeon, S., 1998, Sliding mode control: theory and applications, Crc Press, p.
- Emelyanov, S., 2006, Variable Structure Control Systems. 1967, Moscow: Nauka (in Russian).

- Fallaha, C. J., Saad, M., Kanaan, H. Y. ve Al-Haddad, K., 2011, Sliding-mode robot control with exponential reaching law, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58 (2), 600-610.
- Gouasmi, M., Ouali, M., Fernini, B. ve Meghatria, M. h., 2012, Kinematic modelling and simulation of a 2-R robot using solidworks and verification by MATLAB/Simulink, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 9 (6), 245.
- Guldner, J., Utkin, V. ve Shi, J., 1999, Sliding mode control in electromechanical systems, *Taylor & Francis, London*.
- Islam, S. ve Liu, X. P., 2011, Robust sliding mode control for robot manipulators, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58 (6), 2444-2453.
- Itkis, U., 1976, Control systems of variable structure, Halsted Press, p.
- Karagülle, H. ve Malgaca, L., 2004, Analysis of end point vibrations of a two-link manipulator by integrated CAD/CAE procedures, *Finite Elements in Analysis and Design*, 40 (15), 2049-2061.
- Khan, M. K., 2003, Design and application of second order sliding mode control algorithms, *Engineering*.
- Kılıç, E., Cengiz, K. ve Karuv, S. B., 2016, Internet access talented self rechargeable smart mobile robot design, *2016 Electric Electronics, Computer Science, Biomedical Engineerings' Meeting (EBBT)*, 1-4.
- Köse, E., Abacı, K. ve Aksoy, S., 2011, Kayma Kipli Kontrolde Farklı Erişim Alt Yaklaşımlarının Analizleri, *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS11)*.
- Kumar, N., Panwar, V., Sukavanam, N., Sharma, S. ve Borm, J.-H., 2011, Neural network-based nonlinear tracking control of kinematically redundant robot manipulators, *Mathematical and Computer Modelling*, 53 (9-10), 1889-1901.
- Kumar, P. N. ve Narayan, Y. S., 2011, Simulation in Robotics, *Proceedings of the National Conference on "RECENT ADVANCES IN MANUFACTURING ENGINEERING & TECHNOLOGY"*.
- Kuo, B. C. ve Golnaraghi, F., 2002, Automatic Control Systems, John Wiley & Sons, Inc., p.
- Lee, K., Choi, J. ve Kim, J., 2004, A proportional-derivative-sliding mode hybrid control scheme for a robot manipulator, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 218 (8), 667-674.
- Lim, C. M. ve Hiyama, T., 1991, Application of fuzzy logic control to a manipulator, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 7 (5), 688-691.
- Marzuki, M. ve Mardiyah, N. A., 2017, Two-Link Flexible Manipulator Control Using Sliding Mode Control Based Linear Matrix Inequality, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 012008.
- Moldoveanu, F., Comnac, V., Floroian, D. ve Boldisor, C., 2005, Trajectory tracking control of a two-link robot manipulator using variable structure system theory, *Journal of control engineering and applied informatics*, 7 (3), 56-62.
- Mustafa, A. M. ve Al-Saif, A., 2014, Modeling, simulation and control of 2-R robot, *Global Journal of Research In Engineering*.
- Nagesh Rao, S. P., Lopes, G. A., Jeltsema, D. ve Babuška, R., 2014, Passivity-based reinforcement learning control of a 2-DOF manipulator arm, *Mechatronics*, 24 (8), 1001-1007.
- Naik, P. R., Samantaray, J., Roy, B. ve Pattanayak, S., 2015, 2-DOF robot manipulator control using fuzzy PD control with SimMechanics and sliding mode control: A

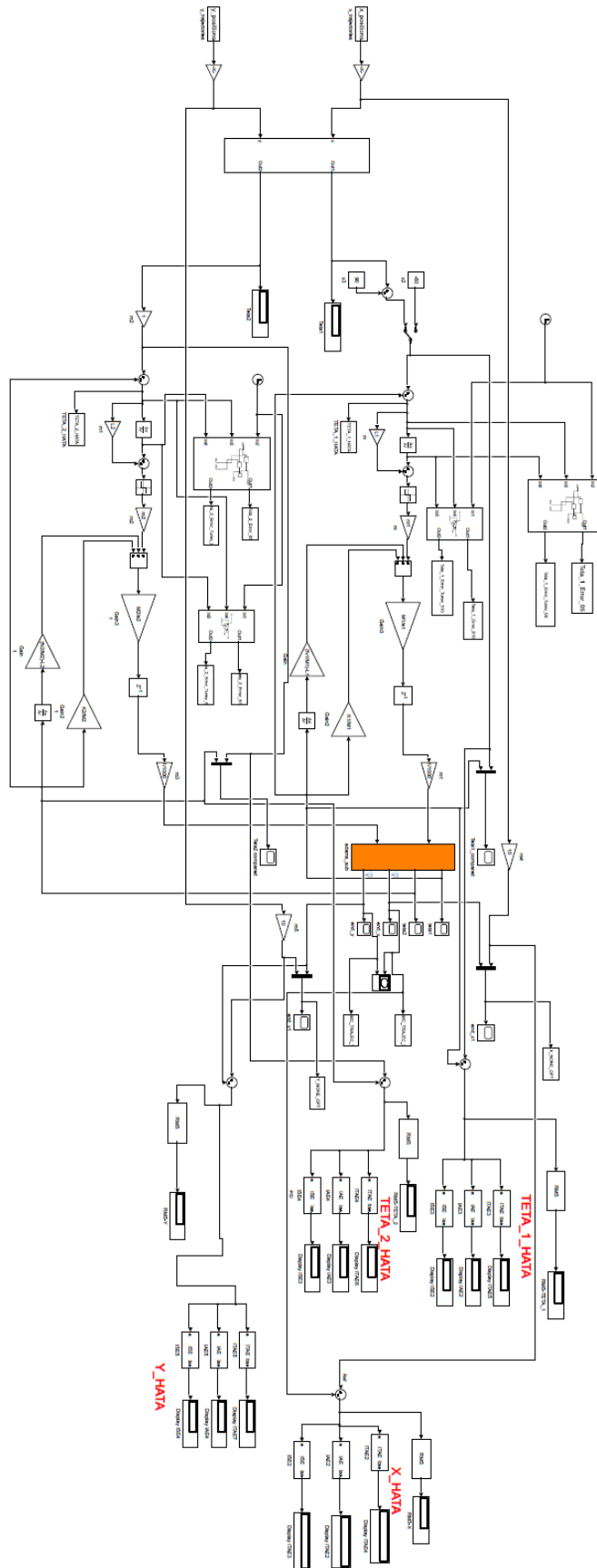
- comparative study, *2015 International Conference on Energy, Power and Environment: Towards Sustainable Growth (ICEPE)*, 1-6.
- Neila, M. B. R. ve Tarak, D., 2011, Adaptive terminal sliding mode control for rigid robotic manipulators, *International Journal of Automation and Computing*, 8 (2), 215-220.
- Niemueller, T. ve Widyadharma, S., 2003, Artificial intelligence—an introduction to robotics, *AI-Robotics*, July, 8.
- Nise, N. S., 2011, Control system engineering, John Wiley & Sons, Inc, New York.
- Ogata, K., 1990, Modern Control Engineering, Prectice-Hall, Inc.
- Özçelikyıldız, B., 2006, Design and Motion Control of An Industrial Robot, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi*.
- Perez, J., Perez, J. P., Soto, R., Flores, A., Rodriguez, F. ve Meza, J. L., 2012, Trajectory tracking error using PID control law for two-link robot manipulator via adaptive neural networks, *Procedia Technology*, 3, 139-146.
- Qureshi, M. S., Das, S., Swarnkar, P. ve Gupta, S., 2018, Design And Implementation Of Sliding Mode Control For Uncertain Systems, *Materials Today: Proceedings*, 5 (2), 4299-4308.
- Soltanpour, M. R., Khooban, M. H. ve Soltani, M., 2014, Robust fuzzy sliding mode control for tracking the robot manipulator in joint space and in presence of uncertainties, *Robotica*, 32 (3), 433-446.
- Utkin, V., 1977, Variable structure systems with sliding modes, *IEEE Transactions on Automatic control*, 22 (2), 212-222.
- Utkin, V. I., 2008, Sliding mode control: mathematical tools, design and applications, In: *Nonlinear and optimal control theory*, Eds: Springer, p. 289-347.
- Wolovich, W. A., 1993, Automatic control systems: basic analysis and design, Oxford University Press, Inc., p.
- Yazan, E. ve Talu, M. F., 2017, Comparison of the stochastic gradient descent based optimization techniques, *2017 International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP)*, 1-5.
- You, K., 2009, Adaptive Control, p.
- Zhang, B., Yang, X., Zhao, D., Spurgeon, S. K. ve Yan, X., 2017, Sliding Mode Control for Nonlinear Manipulator Systems, *IFAC-PapersOnLine*, 50 (1), 5127-5132.

EKLER

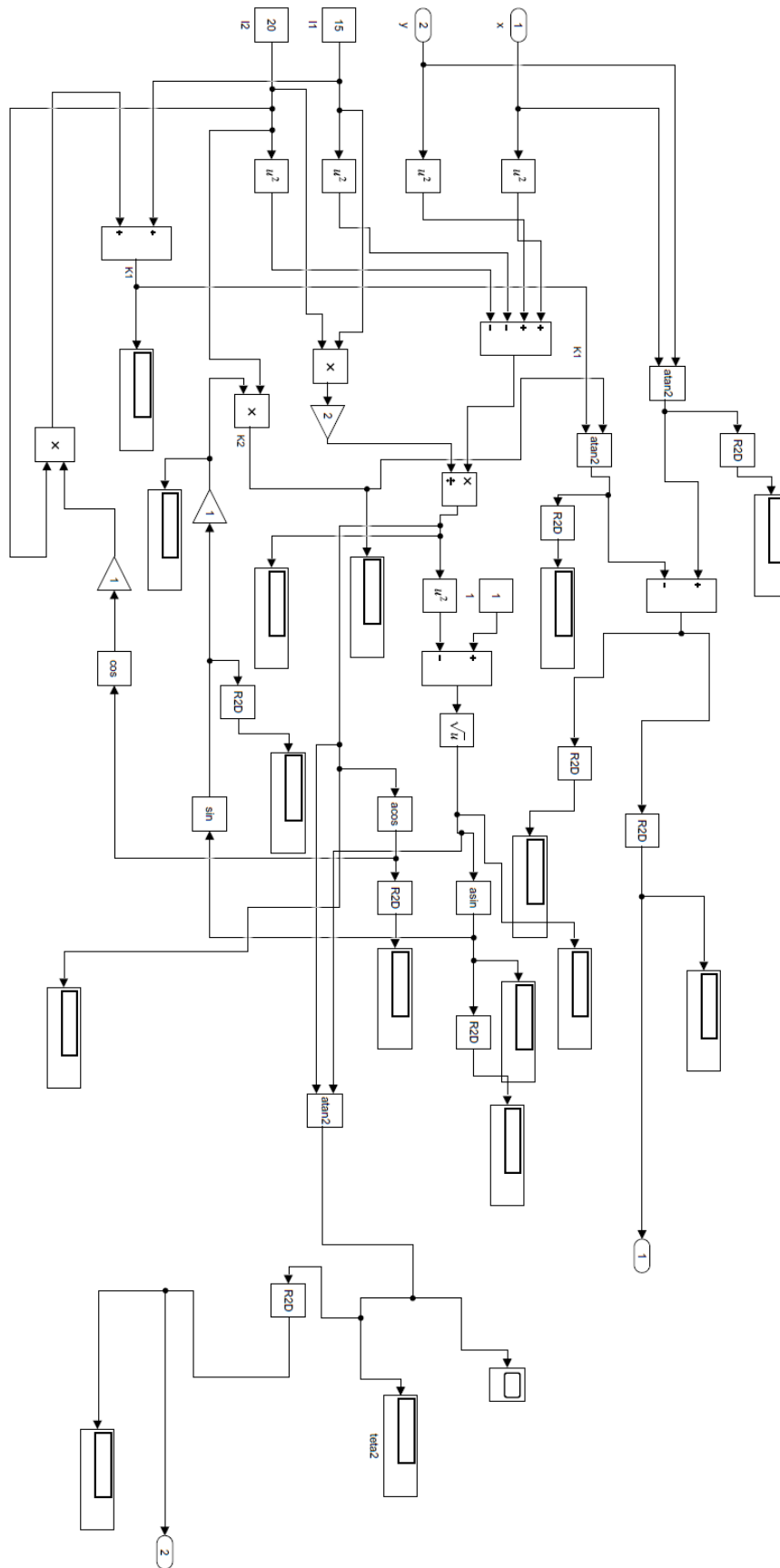
EK-1 PID Kontrolcü Yapısının Simulink Üzerinde Gösterimi



EK-2 KKK Yapısının Simulink Üzerinde Gösterimi



EK-3 Ters Kinematik Denklemlerin Simulink Üzerinde Gerçekleştirilmesi



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Sinan İLGEN
Uyruğu : Türk
Doğum Yeri ve Tarihi : 01.03.1992 – Konya
Telefon : +90 506 790 4840
Faks :
E-Posta : ilgensinan14@gmail.com

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Konya Lisesi(Anadolu), Meram, Konya	2009
Üniversite	: KTO Karatay Üniversitesi, Karatay, Konya	2015
Yüksek Lisans	: Konya Teknik Üniversitesi, Selçuklu, Konya	2019
Doktora	:	

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2015 -	KTO Karatay Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

UZMANLIK ALANI

YABANCI DİLLER

İNGİLİZCE

YÖKDİL: 2018 SONBAHAR – 86,25

YDS: 2015 SONBAHAR – 72,50

YAYINLAR

Uluslararası diğer hakemli dergilerde yayınlanan makaleler

İlgen, S., Oflaz, E., Gülbahçe, E., Çakan, A., “Modelling and Control of a Single-Wheel Inverted Pendulum by Using Adams and Matlab”, International Journal of Applied Mathematics, Electronics and Computers, 4(Special Issue-1), 326-328.

Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitabında (Proceedings) basılan bildiriler

İlgen, S., Oflaz, E., Gülbahçe, E., Çakan, A., “Modelling and Control of A Single-Wheel Inverted Pendulum by Using Adams and Matlab”, 3rd International Conference on Advanced Technology & Sciences (ICAT'16), 01-03 September 2016, Konya, Turkey

İlgen, S., Durdu, A., Gülbahçe, E., Çakan, A., “Sliding Mode Control of a Two-link Robot Manipulator Using Adams and Matlab Software” 6th International Conference on Control Engineering & Information Technology (CEIT), IEEE, 2018.

