

**T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**ROBOT KOL TASARIMI VE BULANIK MANTIK
DENETLEYİCİ İLE DENETİMİNİN ARAŞTIRILMASI**

Hicran EBİOĞLU

Yüksek Lisans Tezi

MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Mekatronik Mühendisliği Bilim Dalı

KASIM 2021

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

**ROBOT KOL TASARIMI VE BULANIK MANTIK DENETLEYİCİ İLE
DENETİMİNİN ARAŞTIRILMASI**

Tez Yazarı
Hicran EBİOĞLU

Danışman
Doç. Dr. Cafer BAL

KASIM 2021
ELAZIĞ

**T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Başlığı: Robot Kol Tasarımı ve Bulanık Mantık Denetleyici ile Denetiminin
Araştırılması

Yazarı: Hicran EBİÖĞLU

İlk Teslim Tarihi: 12.07.2021

Savunma Tarihi: 28.11.2021

TEZ ONAYI

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına göre hazırlanan bu tez aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından değerlendirilmiş ve akademik dinleyicilere açık yapılan savunma sonucunda OYBİRLİĞİ ile kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Cafer BAL
Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi

Başkan: Dr. Öğr. Üyesi Deniz KORKMAZ
Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Mühendislik ve

Üye: Prof. Dr. Mehmet ÇAVAŞ
Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunun/...../20..... tarihli toplantısında tescillenmiştir.

Prof. Dr. Kürşat Esat ALYAMAÇ
Enstitü Müdürü

BEYAN

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım “Robot Kol Tasarımı ve Bulanık Mantık Denetleyici ile Denetiminin Araştırılması” Başlıklı Yüksek Lisans Tezimin içindeki bütün bilgilerin doğru olduğunu, bilgilerin üretilmesi ve sunulmasında bilimsel etik kurallarına uygun davrandığımı, kullandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi, maddi ve manevi desteği olan tüm kurum/kuruluş ve kişileri belirttiğimi, burada sunduğum veri ve bilgileri unvan almak amacıyla daha önce hiçbir şekilde kullanmadığımı beyan ederim.

28.11.2021

Hicran EBİOĞLU



ÖNSÖZ

Bu çalışmam süresince, yardımlarını esirgemeyen, bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşan değerli danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Cafer Bal’a desteklerinden dolayı çok teşekkür ederim.

Bu süreçte maddi ve manevi desteği benden esirgemeyen aileme ve bu sürece başlamamda büyük emeği geçen, varlığını her zaman yanımda hissettiğim babam Halis Ebioğlu’na teşekkürlerimi sunarım

Hicran EBİOĞLU
ELAZIĞ, 2021



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖNSÖZ.....	iv
İÇİNDEKİLER	v
ÖZET	vii
ABSTRACT	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiii
1. GİRİŞ	1
2. ROBOT KOLLAR	5
2.1. Robot	5
2.2. Robot Kolun Sınıflandırılması.....	5
2.2.1. Hareket Çeşitlerine Göre Robot Kollar	6
3. ROBOT KOL KİNEMATİĞİ.....	10
3.1. Kinematik Analiz.....	10
3.2. İleri Kinematik.....	10
3.2.1. Geometrik Yaklaşım	10
3.2.2. Analitik Yaklaşım	11
3.3. Ters Kinematik	13
3.3.1. Geometrik Yaklaşım	14
3.3.2. Analitik Yaklaşım	14
4. ROBOT KOL KONTROLÜ.....	16
4.1. PID Kontrol Yöntemi	16
4.1.1. PID Kontrolün Blok Şeması.....	16
4.2. Bulanık Mantık Kontrol Yöntemi.....	17
4.2.1. Bulanık Mantık.....	17
4.2.2. Bulanık Küme	18
4.2.3. Üyelik Fonksiyonu	20
4.2.4. Bulanık Mantık Denetleyici	21
4.2.5. Bulanık Çıkarım Sistemleri	23
5. TASARIM VE KİNEMATİK DENKLEMLER	25
5.1. Robot Kol Tasarımı	25
5.1.1. Birinci Eksen Sabitleme Parçası.....	26
5.1.2. Birinci Eksen Hareket Parçası.....	26
5.1.3. Birleştirme Parçası	27
5.1.4. Alt Kol.....	27
5.1.5. Üst Kol	28
5.1.6. Gripper Bağlantı Elamanı.....	29
5.1.7. Gripper	29
5.2. Kinematik Denklem Çözümleri.....	30
5.2.1. İleri Kinematik	30
5.2.2. Ters Kinematik.....	30

5.3. Yörünge Planlaması.....	36
5.3.1. Kartezyen Uzayında Yörünge Planlaması.....	36
5.3.2. Eklem Uzayında Yörünge Planlaması.....	37
6. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	42
7. SONUÇLAR.....	77
KAYNAKLAR.....	79
ÖZGEÇMİŞ	



ÖZET

Robot Kol Tasarımı ve Bulanık Mantık Denetleyici ile Denetiminin Araştırılması

Hicran EBİOĞLU

Yüksek Lisans Tezi

FIRAT ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Kasım 2021, Sayfa: xiii + 82

Bu tez çalışmasında, altı eksenli bir dönel tip robot kol tasarımının bulanık mantık kontrolörler konum denetimi araştırılmıştır. Endüstride yaygın olarak kullanım alanı bulan robotların özellikle otomatik üretim bantlarında tercih edilen bir versiyonu olan robot kolların hassas kontrolü son derece önemlidir. Birçok sistemin etkin denetiminde geleneksel kontrolörlerden PID kontrolör kullanılmaktadır. Ancak PID kontrolörün robot kol gibi aşırı doğrusalsızlığının yanında bozucu girişlerin etkisinin denetim performansını aşırı şekilde olumsuz etkilemesi daha dayanıklı kontrolörlere olan ihtiyacı artırmaktadır.

Bulanık mantık kontrolör ise doğrusal olmayan sistemlerin denetimindeki başarısı ve kolayca uygulanabilmesi nedeniyle hassas ve etkin denetimde tercih nedeni olmaktadır. Bu çalışmada altı eksenli robot kolun malzeme tutma kısmı haricindeki konumlandırmayı gerçekleştiren kolların hassas denetiminin bulanık mantık kontrolörle gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Bulanık mantık kontrolörde Mamdani ve Sugeno olarak adlandırılan iki tür yapı kullanılmaktadır. Robot kolun eksenel konumlandırmayı sağlayan üç eksendeki denetimi her iki tip bulanık mantık kontrolör ile gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar aynı zamanda geleneksel PID kontrolörle karşılaştırılmıştır.

Robot kolun farklı başlangıç konumlarından başka bir konuma taşınmasının incelendiği adım referans girişi izleme performansı ve bir den fazla konum ihtiva eden dinamik referans girişi izleme performansı araştırılmıştır. Ayrıca bu denetimlerde robot kolun her uzvunun birlikte hareketini koordine etmek ve uygun şekilde taşınmayı sağlamak için yörünge planlaması gerçekleştirilmiştir. Altı eksenli robot kolun denetimi Matlab/SimMechanics ortamında yapılan benzetimde bulanık mantık kontrolörün denetim performansı ve yörünge planlamasındaki başarımı gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Robot Kol, Kinematik Analiz, PID Denetleyici, Bulanık Mantık Denetleyici, Yörünge Planlama

ABSTRACT

Robot Arm Design and Investigation of Control with an Fuzzy Logic Controller

Hicran EBİOĞLU

Master's Thesis

FIRAT UNIVERSITY
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechatronics Engineering

November 2021, Pages: xiii + 82

In this thesis, fuzzy logic controllers position control of a six-axis rotary type robot arm design has been investigated. A Precise control of robot arms, which is a preferred version of robots that are widely used in the industry, especially in automatic production lines, is extremely important. PID controller, one of the traditional controllers, is used in the effective control of many systems. However, in the control of the systems, which both have excessive nonlinearity and are under the influence of disruptive inputs, negatively affecting the performance of the PID controller, the need for more durable controllers has been increased.

The fuzzy logic controller, on the other hand, is preferred in sensitive and effective control due to its success in the control of nonlinear systems and its easy application. This study aims the precise control, three main arms making the positioning of a six-axis robot arm with a fuzzy logic controller except for the part of the wrist and gripper. Two types of structures called Mamdani and Sugeno are used in the fuzzy logic controller. Control of the robot arm in three axes providing axial positioning was carried out with both types of fuzzy logic controllers and the results obtained were also compared with the traditional PID controller.

The step reference input tracking performance, in which the robot arm is moved from different starting positions to another position, and the dynamic reference input tracking performance, which includes more than one position, were investigated. In addition, in these inspections, trajectory planning was carried out to coordinate the movement of each limb of the robot arm together and to ensure proper transport. The control performance of the fuzzy logic controller and the trajectory planning performance of the fuzzy logic controller are shown in the simulation made in the Matlab/SimMechanics environment to control the six-axis robot arm.

Keywords: Robot Arm, Kinematic Analysis, PID Controller, Fuzzy Logic Controller, Trajectory Planning

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Eklem çeşitleri	6
Şekil 2.2. Kartezyen koordinatlı robot kollar	6
Şekil 2.3. Silindirik koordinatlı robot kollar	7
Şekil 2.4. Küresel koordinatlı robot kollar	8
Şekil 2.5. Mafsallı tip robot kollar	8
Şekil 2.6. Scara tip robot kollar	9
Şekil 3.1. İleri ters kinematik gösterim	10
Şekil 3.2. 2 serbestlik dereceli robot kolun geometrik yaklaşım metodu ile gösterimi	11
Şekil 4.1. PID kontrol blok diyagramı	16
Şekil 4.2. Kesin küme ve bulanık küme	19
Şekil 4.3. Kesin küme üyelik fonksiyonu	19
Şekil 4.4. Bulanık küme üyelik fonksiyonu	19
Şekil 4.5. Bulanık Mantık Denetleyici temel yapısı	21
Şekil 4.6. Sugeno bulanık çıkarım methodu	24
Şekil 5.1. Robot kol temel bileşenleri	25
Şekil 5.2. Birinci eksen sabitleme parçası	26
Şekil 5.3. Birinci eksen	26
Şekil 5.4. Birleştirme parçası	27
Şekil 5.5. Alt kol	28
Şekil 5.6. Üst kol	28
Şekil 5.7. Gripper bağlantı elemanı	29
Şekil 5.8. Gripper	30
Şekil 5.9. Robot kol gösterim	31
Şekil 5.10. Robot kol eklem açıları	31
Şekil 5.11. Birinci eksen açısı	32
Şekil 5.12. İkinci ve üçüncü eksen açıları	33
Şekil 5.13. Eksenlerin koordinat gösterimi	33
Şekil 5.14. Eksenler arasındaki açı hesabı	34
Şekil 5.15. Açıların trigonometrik hesabı	35
Şekil 5.16. Yörünge planlaması	36
Şekil 5.17. Doğrusal yörünge	37

Şekil 5.18.	Parabolik eklenti ile yörünge	37
Şekil 5.19.	Üçüncü dereceden polinoma sahip robot kolun a)konum-zaman, b)hız-zaman ve c)ivme-zaman grafikleri	40
Şekil 6.1.	Robot kol Matlab/Simmechanics blok diyagramı.....	42
Şekil 6.2.	Eksenlerin PID kontrol bağlantısı	42
Şekil 6.3.	Eksenlerin Bulanık Mantık Denetleyici bağlantısı	43
Şekil 6.4.	Hareket için belirlenen referans noktaları	44
Şekil 6.5.	Eksenlere girilen açı değerlerinin blok diyagramı	45
Şekil 6.6.	Bulanık Mantık Denetleyici bağlantı diyagramı	45
Şekil 6.7.	Sugeno tipi Bulanık Mantık Denetleyici.....	46
Şekil 6.8.	Sugeno tipi çıkarımda hata girişi	46
Şekil 6.9.	Sugeno tipi çıkarımda hatanın türevi girişi.....	47
Şekil 6.10.	Sugeno tipi çıkarımda fonksiyonel çıkış	47
Şekil 6.11.	Mamdani tipi Bulanık Mantık Denetleyici	48
Şekil 6.12.	Mamdani tipi çıkarımda hata girişi	48
Şekil 6.13.	Mamdani tipi çıkarımda hatanın türevi girişi.....	49
Şekil 6.14.	Mamdani tipi çıkarımda çıkış üyelik fonksiyonu.....	49
Şekil 6.15.	PID kontrol sonuç grafiği	50
Şekil 6.16.	Sugeno tipi Bulanık Mantık Denetleyici sonuç grafiği.....	51
Şekil 6.17.	Mamdani tipi Bulanık Mantık Denetleyici sonuç grafiği.....	52
Şekil 6.18.	Kontrol öncesi robot kol	53
Şekil 6.19.	Kontrol sonrası robot kol	53
Şekil 6.20.	Açı değerleri verilen robot kolun PID kontrol sonuçları.....	54
Şekil 6.21.	Açı değerleri verilen robot kolun Sugeno tipi Bulanık Mantık Denetleyici sonuçları	55
Şekil 6.22.	Açı değerleri verilen robot kolun Mamdani tipi Bulanık Mantık Denetleyici sonuçları.....	56
Şekil 6.23.	Eklemlere uygulanan yörünge planlaması	57
Şekil 6.24.	Matlab Function ile açı girişleri	57
Şekil 6.25.	Yörünge planlaması uygulanan PID kontrol hareket grafiği	59
Şekil 6.26.	Yörünge planlaması uygulanan Sugeno tipi Bulanık Mantık Denetleyici hareket grafiği.....	60
Şekil 6.27.	Yörünge planlaması uygulanan Mamdani tipi Bulanık Mantık Denetleyici hareket grafiği ...	61
Şekil 6.28.	Birinci eklemin a)konum-zaman, b)hız-zaman ve c)ivme-zaman grafikleri.....	62
Şekil 6.29.	İkinci eklemin a)konum-zaman, b)hız-zaman ve c)ivme-zaman grafikleri	63
Şekil 6.30.	Üçüncü eklemin a)konum-zaman, b)hız-zaman ve c)ivme-zaman grafikleri	64
Şekil 6.31.	X-Y noktaları bilinen robot kolun geometrik çözümü	65

Şekil 6.32.	İkinci eklemin yörünge planlaması girişleri.....	66
Şekil 6.33.	Üçüncü eklemin yörünge planlaması girişleri	66
Şekil 6.34.	Ters kinematik hesaplaması yapılan ikinci eklemin grafikleri.....	68
Şekil 6.35.	Ters kinematik hesaplaması yapılan üçüncü eklemin grafikleri	68
Şekil 6.36.	Hedef noktası bilinen robot kolun PID kontrol hareket grafiği.....	70
Şekil 6.37.	Hedef noktası bilinen robot kolun Sugeno tipi Bulanık Mantık Denetleyici hareket grafiği ...	71
Şekil 6.38.	Hedef noktası bilinen robot kolun Mamdani tipi Bulanık Mantık Denetleyici hareket grafiği	72
Şekil 6.39.	Koordinat noktaları verilen robot kolun birinci ekseninin a)konum-zaman, b)hız-zaman ve c)ivme-zaman grafiği.....	73
Şekil 6.40.	Koordinat noktaları verilen robot kolun ikinci ekseninin a)konum-zaman, b)hız-zaman ve c)ivme-zaman grafiği.....	74
Şekil 6.41.	Koordinat noktaları verilen robot kolun üçüncü eksenin a)konum-zaman, b)hız-zaman ve c)ivme-zaman grafiği.....	75

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 3.1.	D-H parametreleri genel gösterim	12
Tablo 6.1.	Mamdani tipi Bulanık Mantık Denetleyici kural tablosu.....	48



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

μ_A	: Bulanık küme için üyelik fonksiyonu
${}^{i-1}_iT: i = 1, 2, \dots, n$	: Homojen 4x4 Transformasyon matrisi
nR_0	: 3x3 boyutunda oryantasyon matrisi
nP_0	: 3x1 boyutunda konum vektörü
$\theta_i: i = 1, 2, \dots, n$	: Robot kol eklem açıları
L_1, L_2, L_3	: Robot kol, kol uzunlukları
t	: Zaman değişkeni
t_f	: Çalışmada hedeflenen zaman değişkeni
s_0, s_1, s_2, s_3	: 3. dereceden polinom katsayıları
$\theta(t)$	: Yörünge planlaması konum denklemi
$\dot{\theta}(t)$	: Yörünge planlaması hız denklemi
$\ddot{\theta}(t)$	: Yörünge planlaması ivme denklemi

Kısaltmalar

D-H	: Denavit Hartenberg
PID	: Proportional-Integral-Derivative (Oransal-İntegral-Türevsel)
Ç	: Çözüm Kümesi
IEEE	: The Institute of Electrical and Electronics Engineers
P	: Prizmatik Eklem
R	: Dönel Eklem
P_x	: Robot kolun x eksenindeki konumu
P_y	: Robot kolun y eksenindeki konumu
P_z	: Robot kolun z eksenindeki konumu
BMD	: Bulanık Mantık Denetleyici
tREF	: Birinci eksen referans açı değeri
tAngle	: Birinci eksenin gerçekleştirdiği açı değeri
bREF	: İkinci eksen referans açı değeri
bAngle	: İkinci eksenin gerçekleştirdiği açı değeri
fREF	: Üçüncü eksen referans değeri
fAngle	: Üçüncü eksenin gerçekleştirdiği açı değeri
wREF	: Uç efektör bilek referans açı değeri
wAngle	: Uç efektör bileğin gerçekleştirdiği açı değeri
hREF	: Uç efektör el referans açı değeri
hAngle	: Uç efektör elin gerçekleştirdiği açı değeri
gREF	: Gripper referans açı değeri
gAngle	: Gripper'in gerçekleştirdiği açı değeri

1. GİRİŞ

Dünyada teknolojinin hızla ilerlemesiyle yeni alanlara yönelik yapılan araştırmalar neticesinde, eskiden beri insan hayatında yerini alan robotlar artık daha fazla üretilmiştir. Her ne kadar sektörel olarak kullanım farklılıkları gösterse de robotların üretilmesinin temelinde insan hayatını kolaylaştırmak yatmaktadır. Bu temel neticesinde insanlar için büyük iş güçlerine sebebiyet veren endüstriyel taşıma ve paketlenme gibi işlemler için robot kollar üretilmeye başlanmıştır. Robot kolların kullanım alanlarının farklılaşması, kontrol yöntemlerinin de çeşitlenmesine neden olmuştur.

Robot kol kullanımının endüstride yaygınlaşması ile birlikte bu alanda yapılan çalışmalarda literatürde geniş yer tutmaktadır. Mehmet Ali Yarım çalışmasında, internet üzerinden erişilebilen mikrodenetleyici tabanlı bir elektronik kart tasarımı ve gerçekleştirilmesi yapılmıştır. Dananım ve yazılım olarak iki temel başlık altında ele alınan çalışmada amaçlanan hedefleri sağlayacak bir tasarım ve yazılım altyapısına ulaşılmıştır. Geliştirilen elektronik kart ile internet üzerinden robot kol kontrolü gerçekleştirilmiştir [1].

2017 yılında Zülfü ALANOĞLU tarafından yapılan çalışmada mikrodenetleyici olarak raspberry pi kullanılmıştır. Çalışmada 6 eksenli robot kol tasarımı ve kontrolü ele alınmıştır. Çalışma içeriğinde kontrol sistemi için web kamerası kullanılmış ve görmeye dayalı bir kontrol sağlanmıştır. Yazılım için python dili kullanılmış ve OpenCV kütüphanesi ile gömülü sistem bütünleşmesi gerçekleştirildiği için sistem kabiliyeti arttırılmıştır. Bu çalışma için iki farklı görüntü işleme yöntemi kullanılmış, yöntemler arasında karşılaştırma yapılmıştır. Çalışmanın temel amacı olarak belirlenen taşıma sistemi için belirlenen şekillerin ağırlık merkezleri raspberry pi ile işlenmiş ve taşımının bu noktalardan yapılması hedeflenmiştir. Ancak çalışma sonucunda taşıma işlemi gerçekleştirilirken uç efektördeki sensör eksikliği nedeniyle titreme gerçekleştiği ve efektörün nesneyi tam kavrayamadığı için düştüğü görülmüştür. Çalışmanın geliştirme bölümü için bu sorunlar üzerinde durulacağı kaydedilmiştir [2].

Bir başka çalışmada ise kablosuz eldiven sistemi ile robot kol kontrolü ele alınmıştır. Bu çalışmada uzaktan kontrol yöntemini kablosuz eldiven ile sağlamak amaçlanmıştır. Proje için iki farklı robot kol oluşturulmuş ve kontrol için özel bir eldiven tasarımı yapılmıştır. Eldiven üzerine eğim sensörleri yerleştirilmiş bu sayede yapılan hareketin algılanması gerçekleştirilmiştir. Hareketler için ise servo motorlar kullanılmıştır. Kullanılan Xbee haberleşme modülü ile çalışmada amaçlanan hareketler gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın ilerideki aşamalarında ise eldiven yerine EMG sensörü kullanılarak, hareket eldiven yardımı ile değil, kas ve sinir hareketlerinin sensör yardımıyla algılanıp gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir [3].

2016 yılında gerçekleştirilen, endüstriyel robotların görme tabanlı teknoloji altında ele alındığı çalışmalardan biri olan bu çalışmada ise robot kolun otomatik al-bırak işlemini gerçekleştirmesi

amaçlanmıştır. Yapılan çalışmada 6 serbestlik dereceli bir robot kolun farklı geometrik şekilleri taşıması için görme tabanlı yazılım geliştirilmiş ve bu sistem ile robot kamera ilişkisi kurulmuştur. Yapılan çalışmada deneysel sonuçlar robot kolun al-bırak işlemini hatasız olarak gerçekleştirdiğini göstermiştir [4].

2010 yılında yapılan çalışmada, 2 serbestlik dereceli robot kolun lineer olmayan kontrol yöntemleri ile kontrolü incelenmiştir. Kullanılan kontrol yöntemleri, adaptive, learning, robust olarak belirlenmiştir. Lyapunov kararlılık teorisi ile kontrol yöntemlerinin analizi incelenmiştir. Simülasyon çalışması matlab programı üzerinde gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada, parametrik belirsizlikler neticesinde olumlu sonuçlar elde edilmiştir [5].

Bir başka çalışmada üç serbestlik dereceli robot kol tasarımı yapılmıştır. Kullanım yeri olarak taşıma, montaj, kaynak gibi endüstriyel alanlar düşünülmüştür ve çalışma sistemi bu alanlara uygun olacak şekilde planlanmıştır. Çalışmanın amacı belirlenen iş tanımlarını en hızlı ve en az hata oranı ile gerçekleştirmektir. Kullanılan 8051 mikrodenetleyici ile eklem hassasiyeti ve hareket kontrolü sağlanmıştır [6].

Tek bir kontrol yönteminin uygulandığı çalışmaların yanı sıra birden fazla kontrol parametresini kullanıp bunlar arasında karşılaştırma yapan çalışmalara da literatürde yer verilmiştir. Bu çalışmalardan birini gerçekleştiren Yüksel HACIOĞLU, bulanık mantık kontrol yöntemi ile kayan kipli kontrol yöntemi gibi iki farklı kontrol yönteminin avantajlarını birleştirecek kontrol mekanizması oluşturmayı amaçlamıştır. İki serbestlik dereceli robot kolun kinematik analizleri yapılmış daha sonra hareket için gerekli denklemler çıkarılmıştır. Kontrol aşamalarına geçildiğinde farklı bir kontrol yöntemi olan PD kontrol yöntemi de ele alınarak çalışmada amaçlanan kontrol yöntemi ile PD kontrol yönteminin çalışma sonuçları karşılaştırılmıştır [7].

2008 yılında Merdin DANIŞMAZ tarafından, matematiksel analizleri, matlab simülasyonu ve ansys ile analizi gerçekleştirilen iki serbestlik dereceli planar robot kol çalışması yapılmıştır. Çalışmada kinematik analizler Denavit-Hartenberg yöntemi ile, dinamik analizler ise Lagrange, Newton_Euler denklemleri ile elde edilmiştir. Matlab programı ile matematiksel çözümlemeleri yapılan robot kolun ölçüleri ve teknik özellikleri belirlenerek çözümlenmesi yapılmıştır. Kontrol sistemi matlab üzerinden gerçekleştirilen robot kol için, Ansys program ile mafsallı kuvvetleri analizi yapılmıştır [8].

Robot kolun sinirsel bulanık mantık kontrolü üzerine 2007 yılında yapılan bir çalışmada, birden fazla serbestlik derecesine sahip robot kolların belirlenen yörüngeler çerçevesinde başarı değerlendirilmesi yapılmıştır. Çalışmada genelinde kontrol yöntemlerinden bulanık mantık, yapay sinir ağları ve model referans adaptif kontrol yöntemleri incelenmiştir. İncelenen kontrol yöntemlerinden çalışma için uygun olan model referans adaptif kontrol yöntemi temelini de alarak yapay sinir ağları ile bulanık mantık kontrol yönteminin avantajlı tarafları birleştirilmiştir. Elde edilen kontrol yöntemi dinamik sinirsel bulanık mantık kontrolör olarak belirlenmiş ve çalışmada

kullanılmıştır. Oluşan yeni kontrol yönteminin fonksiyon parametreleri ve bulanık mantık kural yapısını ayarlayabilmesi için öğrenme özelliğini bulundurduğu belirtilmiştir [9].

Bu çalışmada da farklı bir kontrol yöntemi olan kayan kipli kontrol yöntemi kullanılmıştır. Bu kontrol yöntemi ile projede kullanılan DC motorun hız, akım kontrolleri yapılmış, bunun yanı sıra sensor kullanmadan kestirim işlemini gerçekleştirebilmesi için gözlemci tasarlanmıştır. Çalışma sonucunda DC motorun gerçek hız ve akım işaretleri ile gözlemci tarafından kaydedilen hız ve akım işaretleri kıyaslanmış, sonuçların büyük oranda doğru olduğu gözlemlenmiştir [10].

2007 yılında Emre AYTAN tarafından gerçekleştirilen çalışmada iki eklemlili robot kol için bulanık mantık kontrol yöntemi ile genetik algoritma PID kontrol yöntemi için en iyileme edilmiş, oluşan kontrol yöntemi robot kolda uygulanmıştır. Çalışma tasarım ve simülasyon kontrolü ile gerçekleştirilmiştir. Simülasyon, üç farklı kontrolör için denenmiş sonuçlar karşılaştırılmıştır [11].

Ele Alınan başka bir çalışmada ise beş serbestlik dereceli ve uç efektör kısaç olarak tasarlanan robot kol, kullanılan görüntü işleme alt yapısı ile belirlenen 24 nesne kullanılarak test çalışması yapılmıştır. Bu çalışmanın amacı tanımlanan nesneleri önceden belirlenmiş yörünge ile istenilen konumlara ulaştırmaktır. Çalışma sonucunda nesnelerin %95 oranında istenilen yörüngelere ulaştırıldığı gözlemlenmiştir [12].

2004 yılında Adem ÇALIŞKAN'ın yapmış olduğu çalışmada, Sakarya Üniversitesi bünyesinde yalnızca kampüs alanından değil IP adresi bilindiği sürece her noktadan kontrolün sağlandığı scara ve kartezyen robot tasarlanmıştır. Bu tasarımın amacı hem tek noktadan çalışması hem de kontrolün internet üzerinden yapılabilmesidir. IP PLC kullanılarak bağlantı sağlanmıştır. Aynı anda birden fazla robotun bağlantısı gerçekleştirilmiştir. Kontrol yöntemi sağlandıktan sonra kartezyen robot için yeni bir program yazılmıştır. Laboratuvar alanında bir sehpa konumlandırılmış ve sehpa üzerinde 9 adet delik yapılmıştır. Bu deliklere uygun boyutta üç farklı renkte toplar hazırlanmıştır. Programın amacı hazırlanan web sayfasını kullanarak kartezyen robotu uzaktan kontrol yöntemi ile topları uygun deliklere yönlendirecek şekilde hareket ettirmektir. Çalışma başarıyla gerçekleştirilmiştir [13].

Yine 2004 yılında yapılan bir başka çalışmada, 6 serbestlik derecesine sahip robot kolun dinamik ve kontrol analizleri için gerekli kinematik denklemler elde edilmiştir. Bu denklemlere eklem hareketleri, ivme ve hız değerleri de eklenerek dinamik denklemler çıkarılmıştır. Endüstride sıklıkla kullanılan puma 560 robot için PD kontrol algoritması kullanılarak, hesaplanmış moment yöntemi ile simülasyonu ve kontrolü gerçekleştirilmiştir [14].

Aysun EĞRİSÖĞÜT ve Recep KAZAN'ın ele aldığı çalışmada endüstriyel robot türlerinden scara robot kullanılmıştır. 3 eklemlili olan robot kol çalışmasında robot dinamiği ve yapay sinir ağları (YSA) hakkında genel bir açıklama yapılmıştır. Daha sonra eğitim performansı ve yapılan test sonuçları karşılaştırması yapılmıştır. Böylece çalışma başında hedeflenen YSA 316 çevrim sonucunda hedeflenen MSE (Mean Squared Error) değerine oldukça yaklaşan sonuçlar elde

edildiği gözlemlenmiştir. Çalışmada çıkışlar arası farklarda çok küçük saptamalar göz ardı edilmiştir [15].

Gazi Üniversitesi Dergisinde yayımlanan bir makalede, bir edubot robot kolun ters kinematik hesaplamaları ve yörünge planlanması ele alınmıştır. Bu çalışma ile yörünge planlamasına 5. dereceden zaman polinomları ile çözümlendirmek amaçlanmıştır. Çalışma detayına bakıldığında daha önce de çalışmalar yapılan yörünge planlaması konusuna edubot'un kendi yazılımına aktararak daha spesifik bir çalışma yapılmıştır. 6 serbestlik derecesine sahip edubotun 2 eklemi uç efektör kontrolü için kullanılmaktadır. Dolayısı ile çalışmada 4 eklem kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır. Matlab programı kullanılarak, ters kinematik problemde uç noktanın gideceği yerin koordinatları ve elin başlangıç pozisyonuna göre belirlenen açısı girdi olarak yazılmış ve hesaplamalar yapılmıştır. Çalışma sonucunda endüstriyel robotların en önemli sorunlarından olan yörünge planlaması için istenilen amaca ulaşılmıştır [16]

Bu tez çalışmasının ilk bölümde tezin amacı ve literatürdeki yeri yer almaktadır. Sonraki bölümde robot kol yapılarını ve sınıflandırılması incelenmiştir. Üçüncü bölümde robot kol analizinde faydalanan ileri ve ters kinematik analiz yaklaşımları ele alınmıştır. Dördüncü bölümde robot kolun kontrolünde kullanılan yöntemler PID kontrol yöntemi ve bulanık mantık kontrol yöntemi hakkında etraflı bilgi yer almaktadır. Beşinci bölümde tez çalışmasında kullanılan ve hareket türlerine göre sınıflandırılmasında RRR tipi olarak adlandırılan mafsallı robot kol tasarımı incelenmiştir. Ele alınan altı serbestlik derecesine sahip robot kol tasarımı Solidworks programı ile hazırlanmıştır. Eksenlere ve parametrelere göre kinematik denklem analizleri bu bölümde yapılmıştır. Ayrıca iki koordinat arasındaki hareketi tanımlayan yörünge planlamasına ilişkin denklemlerin türetilmesi de bu bölümde açıklanmıştır. Altıncı bölümde tasarlanan robot kolun PID ve bulanık mantık kontrolörlerle kontrolü gerçekleştirilerek farklı durumlar için başarımları verilmiştir. Son bölümde elde edilen sonuçlar tartışılmıştır.

2. ROBOT KOLLAR

Bu bölümde çalışmanın temelini oluşturan robotlar ile ilgili bilgilere yer verilmiştir. Bu alanda yapılmış çalışmalar incelenmiş, literatür taraması yapılmıştır.

2.1. Robot

Robot, gelişen teknoloji ile adını sıkça duyduğumuz, günümüzde birçok alanda kullanımı olan ve kelime anlamı olarak köle, zorunlu işçi anlamlarını barındıran teknolojik bir üründür. Bugüne kadar robot nedir sorusuna cevap olarak birçok tanım sunulmuştur. Bunlar arasında en yaygın olan tanımlardan birkaçı şöyledir:

- Robot, mekanik sistemleri ve bunlarla ilişkili kontrol ve algılama sistemleri ile bilgisayar algoritmalarına bağlı olarak akıllı davranan makinelerdir [17].
- Elektronik ve mekanik birimlerden oluşumunun yanı sıra algılama ve programlanabilme yeteneğine de sahip olan cihazlardır [18].

Amerikan Robot Enstitüsü'nün robot için yaptığı tanım şöyledir;

- Malzemeleri, parçaları, takımları hareket ettirmek ve taşımak için tasarlanmış, programlanabilir çok fonksiyonlu bir manipülatördür.
- Çeşitli özel işleri icra etmek için programlanmış hareketleri yapan özel cihazlara robot denir [19].

İngiliz Robot Birliğine göre;

- Robot belirli imalat işlemlerinin yapılması için parça, takım ve alet ya da özel imalat aygıtlarının programlanmış değişik hareketlerle taşınması, yerinin değiştirilmesi veya kullanılması için tasarlanmış, programlanabilir bir aygıttır [20].

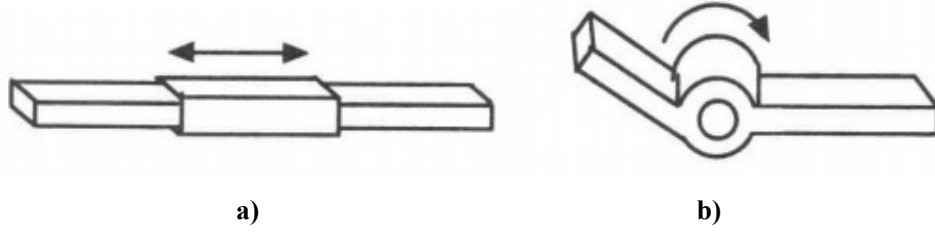
Robot alanında yaptığı çalışmalarla bilinen Maja Mataric'in yaptığı tanıma göre robot;

- Ortamdan topladığı verileri dünyası hakkında sahip olduğu bilgiyle sentezleyerek, anlamlı ve amaçlarına yönelik bir şekilde hareket edebilen ve bunu güvenli bir biçimde yapabilen bir makinedir [21].

2.2. Robot Kolun Sınıflandırılması

Robot kollar oldukça geniş bir kullanım alanına sahiptirler. Bu çalışmada, araştırması yapılan robot kolların hareket çeşitlerine göre sınıflandırılması ele alınmıştır.

Robot kollarda temel olarak bilinmesi gereken iki eklem çeşidi vardır. Bunlardan ilki Prizmatik Eklem ikincisi ise Dönel Eklemdir. Prizmatik eklem “P”, dönel eklem “R” harfleriyle gösterilir. Sınıflandırmada kullanılan isimler Şekil 2.1’de gösterilen eklem çeşidine göre verilir [20].



Şekil 2.1. Eklem çeşitleri a) Prizmatik eklem b) Dönel eklem [22].

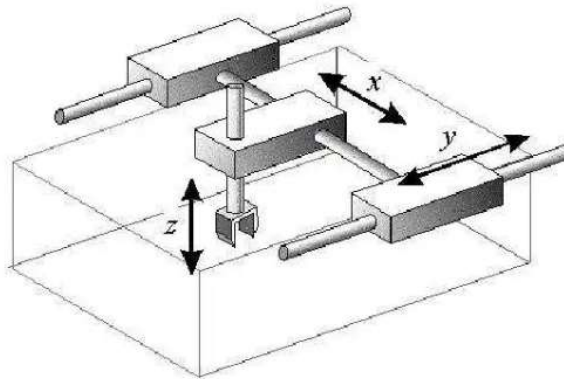
2.2.1. Hareket Çeşitlerine Göre Robot Kollar

Robot kollar için birçok sınıflandırma yapılabilir. Hareket çeşidi, kontrol yöntemi ve güç kaynağı gibi temel sınıflandırma çeşitleri vardır. Bu çalışmada robot kolların hareketi türleri önemli olduğu için yalnızca bu alandaki sınıflandırma detaylıca incelenmiştir

Kartezyen Koordinatlı Robot Kollar

Kartezyen robotların hareket sistemleri, x , y , z koordinat düzleminde 90 derecelik açılar oluşturarak yani her bir kol bir önceki kola göre dik açı elde ederek, aşağı-yukarı ve sağa-sola hareket edecek şekilde oluşturulmuş sistemlerdir [2]. Genellikle taşıma, basit montaj ve paketlenme işlerinde kullanılır. Mekanik yönden oldukça güçlü olan kartezyen koordinatlı robotlar, çalışma alanındaki hareket yeteneklerinin kısıtlı olması nedeniyle dezavantajlıdır. Yapısı ve hesaplamaları basittir bu yüzden kolların hareket ettirmek ve bir yere ulaşması için gerekli olan yol hesaplamaları kolayca yapılabilir. Özellikle büyük boyutlu ve ağırlığı fazla olan taşıma işlemlerinde kullanılır [23].

Şekil 2.2’de kartezyen koordinatlı robot kol örneği verilmiştir. Kullanılan üç bağı tamamı prizmatik eklemden oluştuğu için ‘PPP’ harfi ile gösterilir [20].

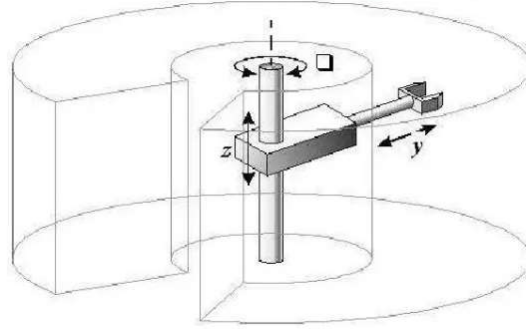


Şekil 2.2. Kartezyen koordinatlı robot kollar [24].

Silindirik Koordinatlı Robot Kollar

Bu robot kollar adından da anlaşıldığı üzere silindirik koordinatlarda hareket etmektedir. Bir temel yatağın etrafında dönebilen ve diğer iki kolu taşıyan ana bir desteğe sahiptirler. Desteğe bağlı olan kollar y ve z koordinat düzleminde hareket etmektedirler. Silindirik robotlar genellikle bulunduğu alanda 300 derece dönüp kalan 60 dereceyi güvenli alan oluşturmak için kullanılır [24]. Dönüş kabiliyetlerinin yüksek olması nedeni ile kartezyen koordinatlı robot kollara göre hareket etme kapasiteleri daha yüksektir. Aynı doğrultu üzerinde olmayan işlerde, yani iş ile hedefin farklı doğrultuda olduğu alanlarda çoğunlukla silindirik koordinatlı robot kollar kullanılır. Çalışma bölgesinde engellerin olmadığı alanlarda, taşıma, basit montaj, makina araçlarını kontrol etme, nokta kaynaklama ve paketlemede kullanılır [2].

Silindirik koordinatlı robotların, ilk eklemi dönel eklem ikinci ve üçüncü eklemi prizmatik eklemden oluştuğu için 'RPP' harfi ile gösterilir [20]. Şekil 2.3'te silindirik koordinatlı robot kol gösterilmiştir.

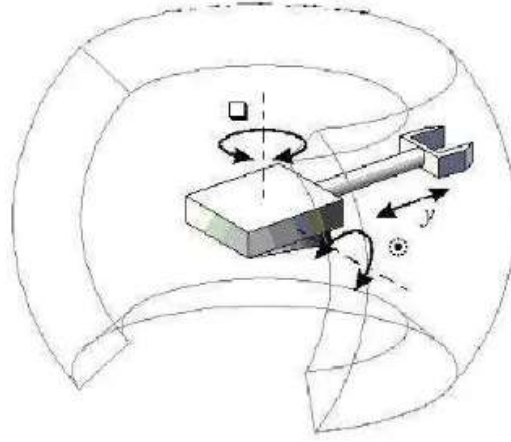


Şekil 2.3. Silindirik koordinatlı robot kollar [24]

Küresel Koordinatlı Robot Kollar

Küresel koordinatlı robot kolların üç eksen yapısı bulunmaktadır. Bunlardan birincisi kendi etrafında döner, ikinci eksen dirsek görevini görür ve döner hareket yapar, üçüncü eksen ise doğrusal hareket eder. Kartezyen ve silindirik robotlara göre mekanik açıdan daha zayıf ve daha karmaşıktırlar [2].

Şekil 2.4'te gösterilen küresel koordinatlı robot kollarda birinci ve ikinci eklemler dönel eklem, üçüncü eklem ise prizmatik eklemdir. 'RRP' harfi ile gösterilir. Eklemlerin birbirine paralel olma şartı yoktur [25].

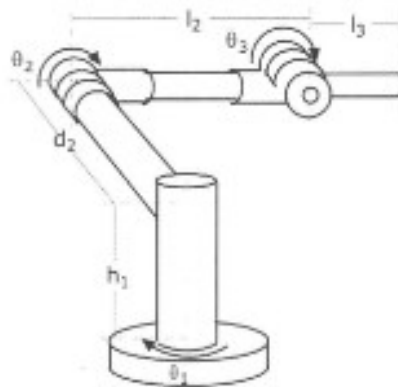


Şekil 2.4. Küresel koordinatlı robot kollar [25]

Mafsallı Tip Robot Kollar

Mafsallı robotların yapımında robotiğin temelini oluşturan insandan örnek alınmıştır. Bu yüzden “Anthropomorphic” kol olarak da adlandırılır. Gövdesi mafsallı, üst kol ve ön koldan oluşmaktadır. İnsan hareketlerinden omuz, dirsek ve bilek hareketlerini yapabilmesi için hareketli parçalar mafsallarla birleştirilmiştir. Üç eklemi de dönel eklemden oluştuğu için kullanım alanı en fazla olan robot kollardandır [23]. Boyama, kaynak yapma, yüzey temizleme, montaj gibi endüstriyel uygulamalarda kullanılır. Hareket alanı geniş olduğu için kabiliyetleri oldukça iyidir ancak kontrolünün zor olması nedeni ile robot tekniğinde geç uygulanmıştır [26].

Şekil 2.5’te gösterildiği üzere birinci, ikinci ve üçüncü eklemler dönel eklemler olduğu için ‘RRR’ harfi ile gösterilir [25].

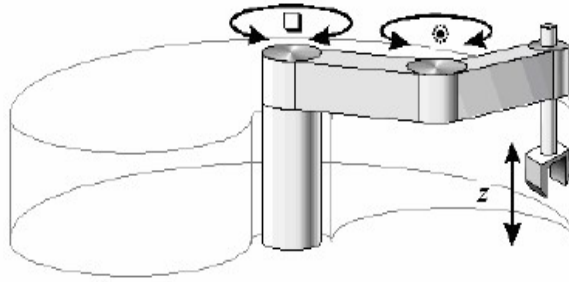


Şekil 2.5. Mafsallı tip robot kollar [22]

Scara Tip Robot Kollar

Bu robot kollar, silindirik robotlar ile mafsallı robotların birleşiminden oluşturulmuştur. Silindirik robotların eklemlerinde döner hareket yapma özelliği, mafsallı tip robotların ise yatay düzlemde eksen birleşme özelliğinin birleştirilmesi ile elde edilmiştir [25]. Kullanım alanları için, hafif ve orta elektronik mekanik montajı, taşıma, makine yükleme ve boşaltma, parçaların test edilmesi gibi alanlar olarak yazılabilir. Taşıma kapasitesi çok fazla olmamasına rağmen hızlı hareket etme ve istediği alana çabuk ulaşabilme gibi özelliklerinden dolayı montaj işlerinde en çok tercih edilen robotlardandır [27].

Birinci ve ikinci eklem dönel eklem, üçüncü eklem ise prizmatik eklem olduğu için 'RRP' harfi ile gösterilir. Şekil 2.6'da gösterildiği gibi eklemler birbirine paralel yapıdadır [25].



Şekil 2.6. Scara tip robot kollar [22]

3. ROBOT KOL KİNEMATİĞİ

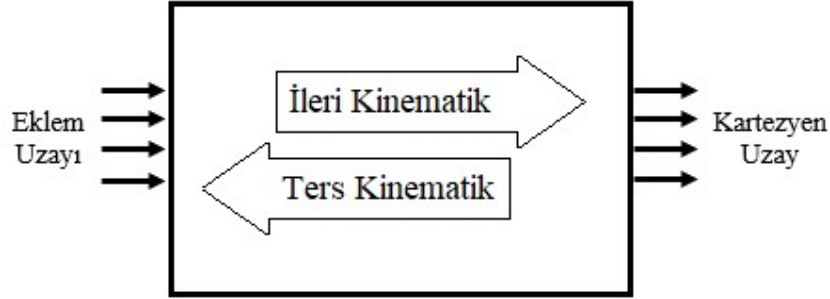
Bu bölümde Robot kollarda uygulanan kinematik analiz ile ilgili detaylı bilgilendirme yapılmıştır

3.1. Kinematik Analiz

Kinematik, kelime anlamı olarak literatürde robotik sistemlerin yapılarını ve hareketlerini inceleyen bilim dalı olarak yer almaktadır. Kavram olarak robot biliminin en temel elemanlarından biridir. Robotik sistemlerde ele alınan kinematik, robot kinematığı adı ile bu kavramın alt dalı olarak kabul edilmektedir.

Robot kinematığı, robot kollarda yer alan uç işlevcinin, üç boyutlu olarak ele alınan kartezyen uzay konumu ile prizmatik ya da dönel eklemlerin açısal veya doğrusal konumları arasındaki sistemi incelemektedir.

Literatürde, Şekil 3.1’de belirtildiği gibi robot kinematığı, ileri kinematik ve ters kinematik olarak ele alınmıştır.



Şekil 3.1: İleri ters kinematik gösterim [28]

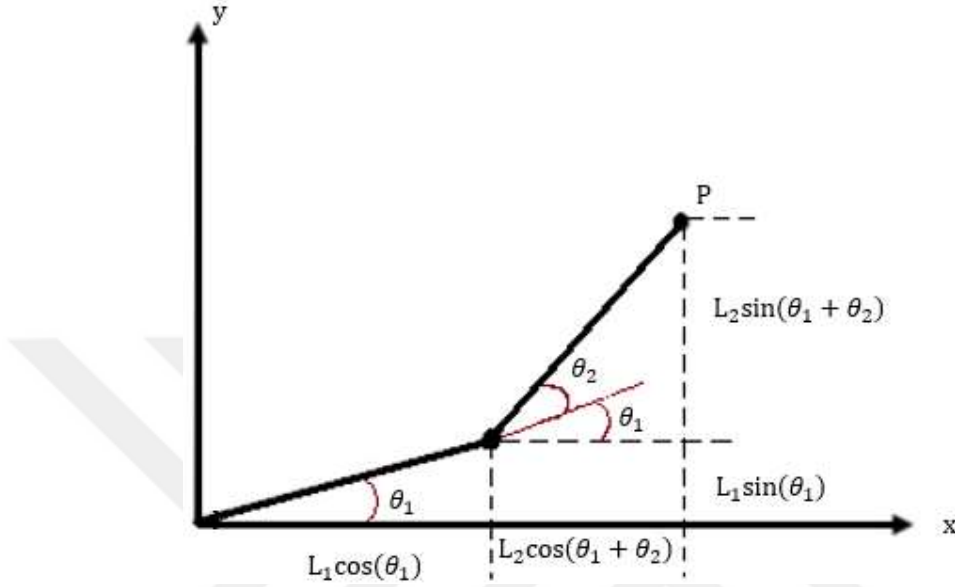
3.2. İleri Kinematik

Kinematik analizin birinci adımı olan ileri kinematik ile robot kollarda bulunan eklemlerin açısı değerleri kullanılarak uç işlevcinin konumunu elde edilmektedir. Konumun bulunması için iki farklı çözüm yöntemi [28].

3.2.1. Geometrik Yaklaşım

Geometrik yaklaşım ile analizi yapılan robot kolun, x-y-z kartezyen koordinat sistemi kullanılarak çizilip, robot kol uzuv uzunluklarının da eklenmesi ile uç işlevcinin konumu bulunmaktadır.

Şekil 3.2’de geometrik yaklaşım metodu ile iki serbestlik dereceli robot kolun x-y kartezyen koordinat sistemi gösterilmiştir.



Şekil 3.2. İki serbestlik dereceli robot kolun geometrik yaklaşım metod gösterimi [29]

- $L_1 = 1$. Kol uzunluğu
- $L_2 = 2$. Kol uzunluğu
- $\theta_1 = 1$. Kol eklem açısı
- $\theta_2 = 2$. Kol eklem açısı

$$P_x = L_1 \cdot \cos(\theta_1) + L_2 \cdot \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (1.1)$$

$$P_y = L_1 \cdot \sin(\theta_1) + L_2 \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (1.2)$$

Denklem 1.1 ve 1.2’de verilen eşitlikler ile uç işlevcinin konumu bulunabilir. X-Y ekseninde ele alınan örneğin yanı sıra Z eksen eklenerek de uç işlevcinin zemine olan uzaklığı aynı metod ile hesaplanabilir.

3.2.2. Analitik Yaklaşım

Analitik yaklaşım metodu ile uç işlevcinin konumunu bulmak için birden faza işlem adımını uygulamak gerekmektedir. Öncelikle robot kolda yer alan tüm eklemlerin x-y-z kartezyen koordinat sistemine yerleştirilmesi gerekir. Bu adım oldukça önemlidir, koordinatların hatalı

yerleştirilmesi eklem değişkenlerinde değişikliğe sebep olmaktadır. Bu metodda ilk tespit edilmesi gereken olay, robot kolda yer alan eklemlerin hangilerinin dönme veya öteleme hareketi yaptığı, yapılan hareketlerin hangi yönde olduğunun belirlenmesidir. Tüm bu kontroller sonucunda belirlenen ilk eksen Z eksen olarak kabul edilir. X eksen ile Z eksen birbirine dik olacak şekilde koordinat sistemine yerleştirilir. Yalnızca X ekseninin doğrultusunu belirlemek gerekir, bunun için de robot kolun tüm eksenleri ilk başlangıç noktasından uç işlevciye kadar takip edilmelidir. Z ekseninin eklemler arasında değişen doğrultusuna dikkat edildiğinde X eksen için gereken doğrultu bulunabilir. Tüm eklemler için X ve Z eksenlerinin belirlenmesinden sonra Y eksen için sağ el kuralı uygulanır. Belirlenen X ve Z eksenlerine dik olacak şekilde Y eksen de koordinat düzlemine yerleştirilir.

Analitik yaklaşımın ikinci adımı olan eklem değişkenlerinin belirlenmesi en çok tercih edilen yöntem Denavit-Hartenberg yöntemidir. Bu yöntem ile sıralı iki eklem arasında yer alan açı ve uzunluk değerleri kullanılarak X eksen etrafında gerçekleşen dönme açısı, X eksen boyunca belirlenen uzunluk, Z eksen etrafında gerçekleşen dönme açısı ve Z eksen boyunca belirlenen uzunluk gibi 4 farklı referans değişkeni belirlenir. Elde Edilen değişkenlerin kullanıldığı ve D-H yöntemi için temel adım sayılan bir tablo oluşturulur.

Üç eksenli RRR tipi robot kol için eklemler arasındaki açı ve uzunluk değerleri kullanılarak Tablo 3.1’de D-H tablosu oluşturulmuştur.

Tablo 3.1. D-H Parametreleri Genel Gösterim

i	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i	Değişken
1	$-\pi/2$	0	d_1	θ_1	θ_1
2	0	a_2	0	θ_2	θ_2
3	0	a_3	0	θ_3	θ_3

- Ardışık iki eksen arasındaki açı α_{i-1} ,
- Sıralı iki eksen arasındaki uzuv uzunluğu a_{i-1} ,
- Üst üste çıkan bağlar arasındaki eklem açıklığı d_i ,
- Sıralı iki uzuv arasındaki eklem açısı θ_i [30].

Hazırlanan D-H tablosu yardımı ile robot kolda yer alan her eklem için yapılması gereken dönüşüm matrislerinin belirlenmesi daha kolay olacaktır. Dönüşüm matrisi her eklem için belirlenen D-H değişkenlerinin oluşturduğu homojen matrislerin çarpılması sonucu elde edilir. Matris çarpımı için sıralamanın önemi bilinmektedir.

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i) \cdot \cos(\alpha_i) & \sin(\theta_i) \cdot \sin(\alpha_i) & a \cdot \cos(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\theta_i) \cdot \cos(\alpha_i) & -\cos(\theta_i) \cdot \sin(\alpha_i) & a \cdot \sin(\theta_i) \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

Homojen matrislerin çarpımından elde edilen genel matris gösterimi denklem 1.3'te gösterildiği gibidir.

Analitik yöntemin son adımı olan dönüşüm matrisleri, hazırlanan D-H tablosunda yer alan parametreler kullanılarak her eklem için oluşturulan homojen matris çarpımlarının sonucunda elde edilir.

$${}^0NT = {}^0T_1 \cdot {}^1T_2 \cdot {}^2T_3 \dots {}^{N-1}T_N \quad (1.4)$$

$${}^0NT = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & P_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{32} & P_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.5)$$

Denklem 1.4'te gösterildiği gibi matrislerin çarpımı sonucunda dönüşüm ve pozisyon matrisi elde edilir. Denklem 1.5'te yer alan r_{11} ve r_{33} matrisi arasındaki elemanlar dönme matrisini P_x , P_y ve P_z elemanları ise pozisyon matrisini ifade etmektedir. Dönme matrisi nR_0 , Pozisyon matrisi ise nP_0 olarak da gösterilmektedir.

3.3. Ters Kinematik

Kinematik analizin ikinci adımı olan ters kinematik analiz ile robot kolun uç efektörünün hedeflenen son konuma ulaşması için gereken eklem açıları bulunur. Hedef konumuna ulaşmak için birden fazla yol seçilebilir. İzlenecek yol sayısı eklem sayısının ikinin kuvveti olarak yazılması ile elde edilir.

$$\zeta = 2^n \quad (1.6)$$

Denklem 1.6'da yer alan n , robot kolda bulunan serbestlik derecesini ifade etmektedir. Bulunan her çözüm yolu doğru noktaya ulaştırmayabilir. Dolayısı ile tüm çözüm yollarının doğruluğundan emin olmak için kontrol edilmesi gerekir.

Ters kinematik analiz de iki geometrik ve analitik olarak iki farklı yöntem ile hesaplanabilir

3.3.1. Geometrik Yaklaşım

İleri kinematik analizin geometrik yaklaşım metodunda gösterildiği gibi uç işlevcinin konum noktalarının hesaplanması gerekli ise aynı işlem basamakları tekrarlanır. Px ve Py noktaları elde edilir.

$$P_x = L_1 \cdot \cos(\theta_1) + L_2 \cdot \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (1.7)$$

$$P_y = L_1 \cdot \sin(\theta_1) + L_2 \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (1.8)$$

Eklem açılarının bulunması için bilinen konum noktaları kullanmak gerekir. Denklem 1.7 ve 1.8’de verilen Px ve Py eşitliklerinde yer alan eklem açıları trigonometrik dönüşümler uygulanması sonucunda bulunur. Yapılan işlemler sonucunda önce θ_2 daha sonra θ_1 bulunur.

$$\theta_2 = \text{Atan2}\left(\begin{matrix} + \\ - \end{matrix} \sqrt{1 - \left(\frac{P_x^2 + P_y^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1L_2}\right)^2}, \frac{P_x^2 + P_y^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1L_2}\right) \quad (1.9)$$

$$\theta_1 = \text{Atan2}(P_y(L_2 \cos \theta_2 + L_1) - P_x L_2 \sin \theta_2, P_x(L_2 \cos \theta_2 + L_1) + P_y L_2 \sin \theta_2) \quad (1.10)$$

Denklem 1.9’da verilen θ_2 açıl değeri karekökten dolayı + ve – olarak iki farklı değer alması denklem 1.10’daki θ_1 değeri için de iki farklı sonucun bulunmasına neden olur. Dolayısı ile 4 farklı çözüm kümesi bulunur. Bu da çözüm kümesi bulma formülünün doğrulunu ıspatlamış olur.

3.3.2. Analitik Yaklaşım

Ters kinematik yöntem de analitik yaklaşım metodu ile ileri kinematik yöntemde hesaplanmış olan ${}^0_N T$ matrisi kullanılarak işlemler yapılır. Bu nedenle ileri kinematik analizde gösterilen analitik metodun ilk aşamaları tekrar hesaplanır.

$${}^0_N T = {}^0_1 T \cdot {}^1_2 T \cdot {}^2_3 T \dots {}^{N-1}_N T \quad (1.11)$$

Denklem 1.11’de yer alan işlem adımlarına devam edilir. Öncelikle eşitliğin her iki tarafı da 1. Homojen matrisin tersi ile çarpılır.

$$[{}^0_1 T]^{-1} {}^0_N T = {}^1_2 T \cdot {}^2_3 T \dots {}^{N-1}_N T \quad (1.12)$$

$${}^0_N T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{32} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.13)$$

Tersi ile çarpılan matris birim matris olacağı için eşitliğin sağ tarafına denklem 1.12'deki ${}^0_1 T$ matrisinin yazılmasına gerek yoktur. Eklem açısı değerlerinin elde edilmesi için dikkat edilmesi gereken nokta ${}^0_N T$ matrisi değer olarak değil denklem 1.12'de gösterildiği gibi standart formda yazılmalıdır. Matrislerin çarpma işleminden sonra eşitliğin her iki tarafı birbirine eşitlenerek denklemler elde edilir ve eklem açıları bulunur.

4. ROBOT KOL KONTROLÜ

Kontrol yöntemleri, gerçekleştirilen sistemlerin istenilen özellikleri yerine getirmesi için gerekli olan temel alanlardandır. Yapılan farklı sistemler sonucunda farklı kontrol yöntemleri de geliştirilmiştir. Bu bölümde robot kollar için kullanılan kontrol yöntemlerinden PID ve Bulanık Mantık Denetleyici yöntemleri anlatılmıştır.

4.1. PID Kontrol Yöntemi

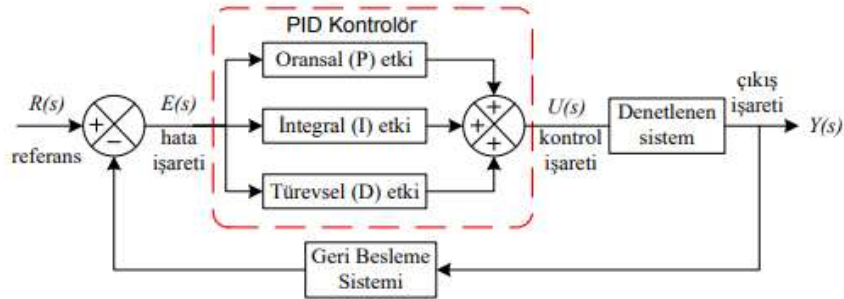
PID (Proportional Integral Derivative) kontrol yöntemi, giriş parametrelerini oluşturan oran-integral-türev değerlerinin farklı birleşimlerinin oluşturduğu P, PI, PD ve PID gibi çeşitli kontrol parametreleri olarak da kullanılabilir. Bu kontrol yönteminde kullanılan parametreler analitik ve deneysel olarak iki farklı yöntem ile elde edilebilir [31]. Uygulama alanlarında tasarımını oluşturmak için fazla matematiksel işlemler kullanılmadığı göz önüne alındığından sektörde kullanımı yaygındır. Ancak modellemenin matematiksel olması ve doğrusal olmayan sistemlerde oluşan kontrol hataları PID kontrol yönteminin en bilinen dezavantajlarıdır. Bunun yanı sıra teknoloji ile eş değerli gelişim göstererek bilgisayar üzerinden de tasarım ve analiz eşleşmeleri yapılarak da kullanılmaktadır.

Uygulamalardaki kolaylığı öne çıktığı için dinamik sistemlerde %85 oranında bir kullanımı olduğu istatistiksel olarak belirlenmiştir [32].

PID kontrol yönteminin literatürdeki ilk kullanıldığı sistemler, pnömatik sistemler, katı kurum analog elektroniği, micro proseslerin digital uygulanması ve vakumlama aletleri olarak incelenmiştir [33].

4.1.1. PID Kontrolün Blok Şeması

Endüstrideki kullanım yerleri ve oranı belirtilen PID kontrol yönteminin blok şeması Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. PID kontrol blok diyagramı [34]

Diyagram şekil 4.1’de verilen PID kontrol sisteminde; R(s): giriş sinyalini, U(s): kontrol sinyalini, E(s): hata sinyalini, Y(s): sistemin çıkışını göstermektedir. Verilen katsayılar da K_p : oransal, K_d : türevsel, K_i : integral katsayılarıdır.

Verilen katsayı ve sinyallere göre sistemin çıkış denklemi 4.1 ve 4.2’de verilen denklem adımlarına göre hesaplanır.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (4.1)$$

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (4.2)$$

Verilen denklemlerde de görüldüğü gibi hata sinyalini elde etmek için sistemin giriş sinyali ile çıkış sinyali arasındaki farkın hesaplanması gerekmektedir. Uygulamalarda giriş sinyali verilir ancak deneme yanılma yolu ile katsayılar kullanılarak denklem 4.1’de görüldüğü gibi çıkış sinyalinin hesaplanması gerekir. Bunun için de katsayılar, denklemde gösterilen oransal, integral ve türev işlemlerinin sonuçları ile çarpılarak çıkış sinyali hesaplanır.

PID kontrol yönteminde katsayıların elde edilmesi ya da tasarımın gerçekleştirilmesi için farklı yöntemler kullanılır. Bu yöntemlerden en fazla bilinenleri, Ziegler-Nicholas, Wang-Juang-Chan, Chien-Hrones-Reswick ve Cohen-Coon yöntemleridir. Bu yöntemler ile sistemin frekans ve zaman sonuçlarını kullanarak deneme yöntemi ile hesaplanan katsayılar için uygun değerler hesaplanmaktadır [31].

4.2. Bulanık Mantık Kontrol Yöntemi

Literatür taramasına bakıldığında bulanık mantık ile ilgili yapılmış çalışmaların temeli 1960’lı yıllara dayandığı görülmüştür. İlk öne çıkan kavram olan bulanık, literatüre fuzzy olarak eklenmiş ve olasılık teorisi, multivalued (çoklu değer) mantığı, YSA, yapay zeka gibi farklı alanlar ile birleştirilmiş, gerçekleştirilecek olguların olma ihtimalleri, olasılıklarının yanı sıra gerçekleşme dereceleri ile çalışan yeni bir terim olarak çalışmalarda kullanılmıştır [35].

4.2.1. Bulanık Mantık

Bulanık Mantık, çalışma sistemi olarak insandaki düşünme fonksiyonlarına benzerlik gösterir. PID kontrol sistemi gibi matematiksel modellemeye ihtiyaç duymazlar. Çalışma mantığını ve işleme sistemini kavramak kolaydır [36].

Bulanık Mantık, kavramsal olarak kesin bilgi olmayan ve yaklaşık yargılamanın oluşturulması istenen sistemlerde kullanılır [37]. Bir başka bakış açısı ile Bulanık Mantık, PID

kontrol yönteminde olduğu gibi kesinlik ve net sonuçlar istenmeyen, yaklaşık yargılama ile ilgili tekniklerin geliştirilmesinde önemli bir yardımcı olarak kullanılmaktadır [38].

Çalışma sistemi ve elde ettiği sonuçlara bakıldığında bulanık mantık insan beyni gibi fonksiyonel sonuçlar üretebilen bir sistemdir. Bu nedenle mühendislik alanları uygulamalarında Bulanık Mantık temelinin işlendiği Bulanık Kontrol yöntemini kullanılmıştır [39].

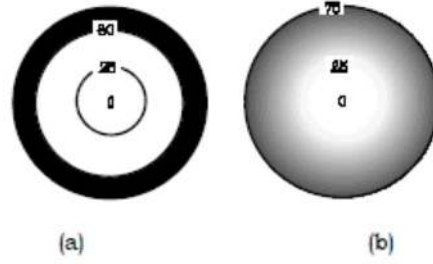
Teorik olarak bu alanda yapılan çalışmaların elde ettiği olumlu sonuçlar göz önüne alındığında 1970'li yıllarda artık bulanık mantık gerçek sistemlerde de kullanılmaya başlanmıştır. İlk olarak 1975 yılında yapılan buhar makinesinin denetimi için geliştirmelere başlanmıştır. Yapılan çalışma sonucunda daha önce kullanılan klasik kontrol yönteminin uygulamaya geçiş süresi ve aşamaları ile karşılaştırılma yapılmış, bulanık mantık kontrol yönteminin daha kolay ve daha kullanışlı olduğu görülmüştür. Bunun yanı sıra elde edilen sonuçlarda da olumlu çıktılar alınmıştır. İlerleyen yıllarda bu alanda 1978 yılında yapılan çimento fırınının gerçekleşen tüm endüstriyel sürecinin kontrolü için tasarlanan bulanık mantık kontrolörü ve 1980 yılında yapılan Fuji Electric, bir su arıtma tesisinin kontrolünde kullanılarak Japonların literatüre ilk bulanık mantık uygulaması olarak geçmiştir [40].

Bulanık Mantık'ın uygulanan çalışmalarda oldukça iyi sonuçlar elde ettiği görülmüş ve bu alanda yapılan çalışmalar arttırılmıştır. Örneğin Japonya'da 1989 yılında bir laboratuvar kurulmuş ve ünlü japon firmalarından Omron, Tahsiba, Hitachi gibi firmalar LIFE (Laboratory for International Fuzzy Engineering) adı verilen bu laboratuvarında çalışmalar yapmışlardır. Yalnızca Japonyadaki firmalar değil NCR ve Thoomson gibi farklı ülkeleri ait 51 firma da bu kontrol yöntemi ile çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. 3 farklı bulanık mantık alanı adı altına ayrılan bu laboratuvarın yanı sıra 1992 yılında San Diego'da yapılan uluslararası IEEE konferansında da bulanık sistemler üzerine çalışmalar anlatılmıştır. Tüm bu önemli adımlar dünyanın öne çıkan firmalarının ve araştırmacılarının bulanık mantığı kabul ettiğini göstermektedir [41].

4.2.2. Bulanık Küme

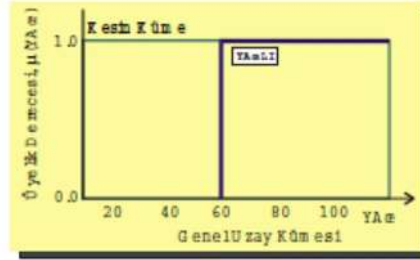
Bilinen küme mantığında elemanlar kesin ifadelerle kategorileştirilir. Yani bir nesnenin kümenin elemanı olma durumu 1 ya da 0 olarak gösterilir. Doğal olarak kesinlik bildirmeyen problemlerin çözümleri oldukça zorlayıcıdır [42].

Bulanık küme mantığında ise kümenin elemanları 0 ile 1 arasında değişen değerler alabilirler ve alınan bu değerler üyelik dereceleri olarak adlandırılır [43]. Örneğin yaş gruplarının yer aldığı bir araştırmada genç ve yaşlı diye adlandırılan 2 küme oluşturulursa 0-25 yaş genç, 60 yaş üstündekiler yaşlı olarak belirtildiğinde 20 yaş, genç kümesinde yer alırken 21 yaş, yaşlı kümesinde yer alacaktır. Bulanık kümenin genel amacı örnekte verildiği gibi net ayrımları ortadan kaldırıp kümelenilmeyi net ayrımların olmadığı bir sınıflandırma ile oluşturmaktır.



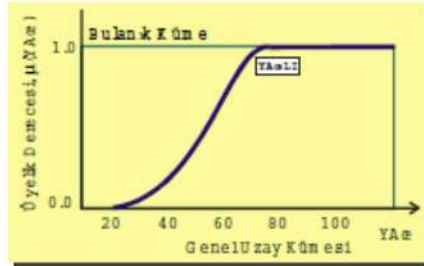
Şekil 4.2. Kesin küme ve bulanık küme

Şekil 4.2’de verildiği gibi 60 yaş üstü yaşlı, 60 yaş altı yaşlı değildir diye kesin bir sınıflandırma yapılmıştır. Ancak bulanık kümeye bakıldığında 25 ile 75 yaş arasına olan kişilerinde yaşlılar kümesine dahil olabileceği gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Kesin küme üyelik fonksiyonu

Şekil 4.2’de küme görüntüleri verilen örneğin Şekil 4.3’te kesin küme için üyelik fonksiyon gösterimi verilmiştir. Üyelik fonksiyonuna bakıldığında 60 yaş sınır olarak belirlenmiş 59 yaş kesinlikle yaşlı değil 61 yaş kesin yaşlı olarak ayrılmıştır. Bu da 0-1 değerler ile çalışan kümelerin aslında doğru kararlar veremediğini yakın değerleri bile iki farklı kategoriye eklediğini göstermektedir.



Şekil 4.4. Bulanık küme üyelik fonksiyonu

Şekil 4.4'te verilen bulanık küme üyelik fonksiyonuna bakıldığında kesin geçişlerin olmadığı görünmektedir. Örneğin 20 yaş altında olanların bulanık küme değeri 0, 21 yaşında olanların bulanık küme değeri sıfırın biraz üzerinde yer almaktadır [44].

4.2.3. Üyelik Fonksiyonu

Üyelik fonksiyonu ile ilgili yapılmış tanımlamaların genelinde, belirlenen küme üyelerinin değerleri ile değişiklik sergileyen eğri olarak adlandırılmaktadır. Farklı bir tanımlamaya göre de üyelik fonksiyonu, değerlerin 0 ile 1 arasındaki değerler olacak şekilde bulanık küme tarafından tanımlandığı karakteristik fonksiyon olarak kabul edilmiştir [45].

Yapılan tanımlamalara göre, üyelik fonksiyonu için küçük değerlerin bile önemli olduğu 0 ile 1 arasındaki değişimlerin üyelik derecesi olarak adlandırıldığı, bu sistemin grafiksel gösteriminde x ekseninin üyeleri, y ekseninin de üyelik dereceleri gösterilmektedir.

Denklem 4.3'te x evrensel kümesinin tanımladığı, A bulanık kümesi için μ_A üyelik fonksiyonunun yazımı vermiştir.

$$\mu_A: X \rightarrow [0,1] \quad (4.3)$$

Denklem 4.3'te verilen μ_A üyelik fonksiyonu, [0.1] kapalı aralığındaki gerçekte bir sayıyı ifade etmektedir. Daha detaylı bir anlatım ile, küme için 0 sayısının verildiği elemanın bu kümenin üyesi olmadığını, 1 sayısının verildiği elemanın ise tam üyesi olduğunu göstermektedir. Ancak klasik kümede olduğu gibi 0 ile 1 değerleri arasında herhangi bir değerin verildiği elemanın kümenin üyesi olmamasını değil, bu kümeye derecesini veya kısmi üyeliğini belirtmektedir. Örneğin; $\mu_A(x)$ değerinin 1 sayısına olan yakınlığı x'in A kümesine olan aitliğinin miktarını belirtir[46].

Üyelik fonksiyonların tanımlanması için belirlenmiş iki farklı çalışma sistemi vardır. Bu sistemler sayısal ve işlevsel olarak adlandırılmışlardır. Sayısal tanımlamaya göre üyelik fonksiyonu, uygulamada kullanılan bulanık kümenin üyelik derecesini ve üyelik işlevini belirten sayıların oluşturduğu vektördür. Oluşan vektörün boyutu, uzaydaki süresiz elemanların sayısına yani ayrıklaştırma seviyesine bağlı olmaktadır. Diğer bir tanımlama olan işlevsel tanımlamaya göre üyelik fonksiyonu, tanım uzayındaki her bir bulanık küme elemanı için üyelik derecesini hesaplayan analitik deyimlerle anlatılmaktadır [47].

Üyelik fonksiyonları grafiksel olarak ve 3, 5 ya da 7 etiket olacak şekilde sınıflandırılmışlardır.

- 3 etiketli olanlar; küçük, orta ve büyük,
- 5 etiketli olanlar küçük, orta küçük, orta, orta büyük ve büyük,
- 7 etiketli olanlar da çok küçük, küçük, az küçük, sıfır, az büyük, büyük, çok büyük olarak gösterilmektedir [48].

Etiketlerinin çeşitliliği gibi üyelik fonksiyonlarının grafiksel gösterimlerinin de birden fazla çeşidi vardır. Grafiksel gösterimler için kullanılacak şeklin seçimi parametrelere bağlıdır.

- 2 parametre ile gösterilen uygulamalarda sigmodial,
- 3 parametre ile gösterilen uygulamalarda üçgen,
- 4 parametre ile gösterilen uygulamalarda yamuk,
- m ve σ parametreleri ile gösterilen uygulamalarda gaussian adı verilen geometrik şekillerdeki grafikler oluşturulur.

4.2.4. Bulanık Mantık Denetleyici

Kontrol yöntemleri ile ilgili yapılan çalışmalara bakıldığında zaman nesnelerin sürekli olarak kesinlikler içermesi, yapılan kümelerin kesin ayrımlarının olması ya da bu aşamaları elde etmek için derin matematiksel formüllerin kullanılması gibi birçok olumsuzlukların olduğu görülmüştür. Bulanık mantık kontrol yöntemini öne çıkaran özellikleri, kesin ayrımlar yapmaması, zorlu matematiksel denklemler kullanmadan gerekli parametrelerin tamamen gözlemle oluşturulması, kararsızlık ve belirsizliklerin giderilmesi gibi etkili alanlarının olmasıdır.

Belirtilen özellikleri nedeni ile, Bulanık Mantık Denetleyiciler (BMD) parametre ve matematiksel denklemler oluşturmaya gerek olmadan, belirsizlik içeren veya karmaşık görünen sistemlerde çalışmada hedeflenen kontrolü gerçekleştirip olası bir parametre değişikliğinden de etkilenmeyen bir oluşum göstermektedir [49].

Bulanık Mantık Denetleyici sisteminin oluşumunu sağlayan dört temel aşama bulunur. Bulanıklaştırma, karar mekanizması, bilgi tabanı ve durulaştırma diye adlandırılan bu dört aşama sonucunda istenilen sonuçlar elde edilir. Bulanık mantık denetleyicinin aşamaları Şekil 4.5'te gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Bulanık Mantık Denetleyici temel yapısı [50]

Bulanıklaştırma

Temel yapısı görseldeki gibi olan BMD'nin genel çalışma mekanizması kısaca sistem girişinden verilen net girdinin içerideki işlemlerden geçtikten sonra yine net çıktı olarak sonuçlandırılmasıdır. Bu işlem için giriş bölümünde yer alan bulanıklaştırmanın da işlevi, net girdiyi bulanık kümelerle dönüştürmektir [51].

Farklı tanımlamalara göre bulanıklaştırma;

- Kesin değerin üyelik derecesi yardımı ile bulanık değere dönüştürülmesi için kullanılan BMD'nin ilk aşamasıdır.
- Sistem girişinden verilen sayısal girdi değerinin sistem için uygun olarak belirlenen üyelik fonksiyonunu kullanarak üyelik derecesi yardımı ile sözel bir değişkene dönüştürme işlemini gerçekleştiren kontrol aşamasıdır. Uygun olarak görülen üyelik fonksiyonunu elde etmek için kullanılan fonksiyonların grafik üzerindeki x eksenine göre konumu ve alt küme sayısı kullanılır [52].

Bilgi Tabanı

BMD'nin ikinci bölümü olan bilgi tabanı kendi içerisinde kural tabanı ve veri tabanı olarak iki ana bölümden oluşur. Oluşturulacak sistem için etki edebilecek giriş verilerini ve bu veriler ile ilgili bilgilerin tamamını içerir.

➤ Veri Tabanı

BMD sisteminde kullanılacak olan değişkenlerin tanımlarını içeren kısımdır. BMD sisteminin giriş anından çıkış anına kadar olan aşamalarda kullanılan üyelik fonksiyonları, giriş ve çıkış değişkenlerini, BMD'de kullanılan bulanık işlemlerini, sistemde normalize edilmiş değişkenler var ise bu işlemler ile ilgili bilgileri gibi sistem içerisinde olan tüm tanımlamaları kapsayan bölümdür

Başka bir tanımlama ile veri tabanı, bulanık mantık kontrol yönteminin ikinci adımı olan üyelik fonksiyonunun tespit edilme çalışması ile tamamlanmış halinin bilgilerini bulunduran bölüm olarak adlandırılır [53].

➤ Kural Tabanı

BMD sisteminde yer alan girişleri çıkışlara bağlayan, koşullar içeren IF-THEN diye yer alan kuralları içeren bölümdür. Bu kuralların yazılabilmesi için giriş ve çıkış verileri arasında olabilecek bütün ihtimaller kural tabanında yazılır. Hazırlanan sistemde kural tabanı olabilecek her ihtimaldeki çıktıyı içermez ise sistem de hata olduğu çıktısı alınır [54].

Karar Mekanizması

Önceki iki birimin oluşturmuş olduğu veriyi kullanarak bulanık çıkarımın elde edildiği bölümdür. Yani bulanıklaştırma bölümünden gelen bilgiler, kural tabanında gerçekleştirilen

kurallar doğrultusunda işlenir ve bulanık sonuçlar elde edilir. BMD’de karar mekanizmasında istenilen sonuçları elde etmenin birçok çözümü vardır ve hangi çözümün kullanılacağı sezgisel olarak belirlenir. Çözüm yollarına, Mamdani’nin geliştirmiş olduğu min (minimum kuralı), Boolean kuralı, Zadeh’in aritmetik kuralı gibi kurallar örnek olarak verilebilir.

Daha sonraki aşamada bu kurallar sonucunda elde edilen değerler kural tablosundan uygun dilsel ifadeye dönüştürülür ve son birim olan durulaştırmaya gönderilir [55].

Durulaştırma

BMD’nin giriş bölümünde de belirtildiği gibi bu kontrol yönteminin temeli net girdilerle sistemi başlatıp net çıktı değerleri ile sonlandırmaktır. Bu nedenle son aşama olan durulaştırma birimi, karar mekanizmasından çıkan bulanık değerlerin net değerlere dönüştürüldüğü birimdir. İstenilen sonuç tek bir çıktı olduğu için sistemin birden fazla çıktı vermesi durumunda, bu çıktılar ağırlık merkezi, maksimumların ortalaması, minimumların ortalaması gibi yöntem kullanılarak bulanık olmayan değerlere dönüştürülür [56].

4.2.5. Bulanık Çıkarım Sistemleri

Bulanık Mantık yönteminde kullanılan çıkarım mekanizmaları, sistem için gerekli olan tüm kuralların belirlenmesi ve uygun kural tabanının yazılmasından sonra uygulanır. Çıkarım mekanizması ile amaç sistemde kullanılan girişler ve kurallar işleyerek bulanık çıkış üretmektir. Bulanık mantık sisteminde kullanılan iki farklı çıkarım mekanizması vardır. Mekanizmaların isimleri, bu sistemleri bulan çalışmacıların isimleri ile anılmaktadır [57].

Mamdani Tipi Çıkarım Yöntemi

Bulanık Mantık yönteminde en fazla tercih edilen çıkarım mekanizmalarından olan mamdani tipi çıkarım sistemi, yapılan çalışmaya ait sözel değişkenler kullanılarak oluşturulan kurallar ve bu kuralların modellediği sistemler olarak ifade edilebilir [58]. Mamdani çıkarım yönteminde, üyelik fonksiyon bölümünde oluşturulan çıkış üyelik fonksiyonu bulanık setler halinde hazırlanır ve her çıktı değişkeni için bir bulanık küme oluşur [59].

Mamdani yönteminin Bulanık Mantık kuralı aşağıda gösterilmiştir. İki girişli tek çıkışlı kural tabanı ile oluşturulan modelde x ve y giriş, z çıkış fonksiyonlarını ifade etmektedir [60].

Kural 1: Eğer $x = A1$ VE $y = B1$ ise $z = C1$

Kural 2: Eğer $x = A2$ VE $y = B2$ ise $z = C2$

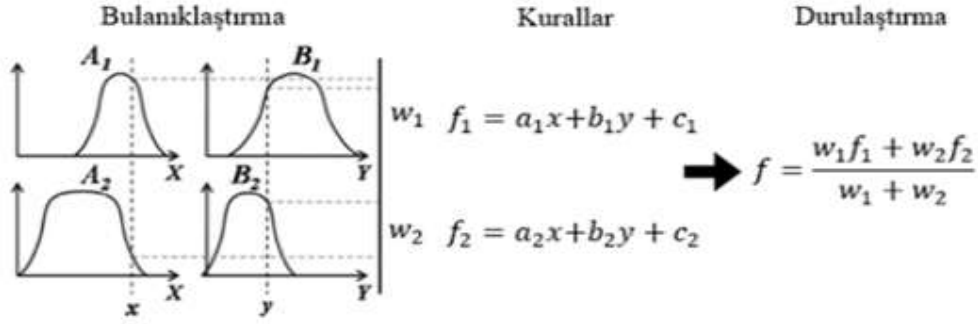
Takagi-Sugeno Tipi Çıkarım Yöntemi

Bulanık Mantık çıkarım yöntemlerinden ikincisi olan Sugeno tipi çıkarım yönteminde, çıkış üyelik fonksiyonları kesin fonksiyonlardan oluşur. Mamdani tipi çıkarım yöntemi ile temel farklardan biri, çıkış üyelik fonksiyonunun fonksiyonel(doğrusal) olmasıdır [61]. Sugeno çıkarım yönteminde yalnızca sayısal veriler kullanılır. Dolayısı ile uygun sayısal giriş-çıkış değerleri sağlanırsa mamdani çıkarım yöntemine oranla daha iyi sonuçlar elde edilir [62].

Sugeno çıkarım yöntemine göre oluşturulan bulanık kural sistemi aşağıda gösterilmiştir:

Kural 1: Eğer x , A_1 VE y , B_1 ise z , $f_1(x,y) = a_1x + b_1y + c_1$

Kural 2: Eğer x , A_2 VE y , B_2 ise z , $f_2(x,y) = a_2x + b_2y + c_2$



Şekil 4.6. Sugeno bulanık çıkarım methodu

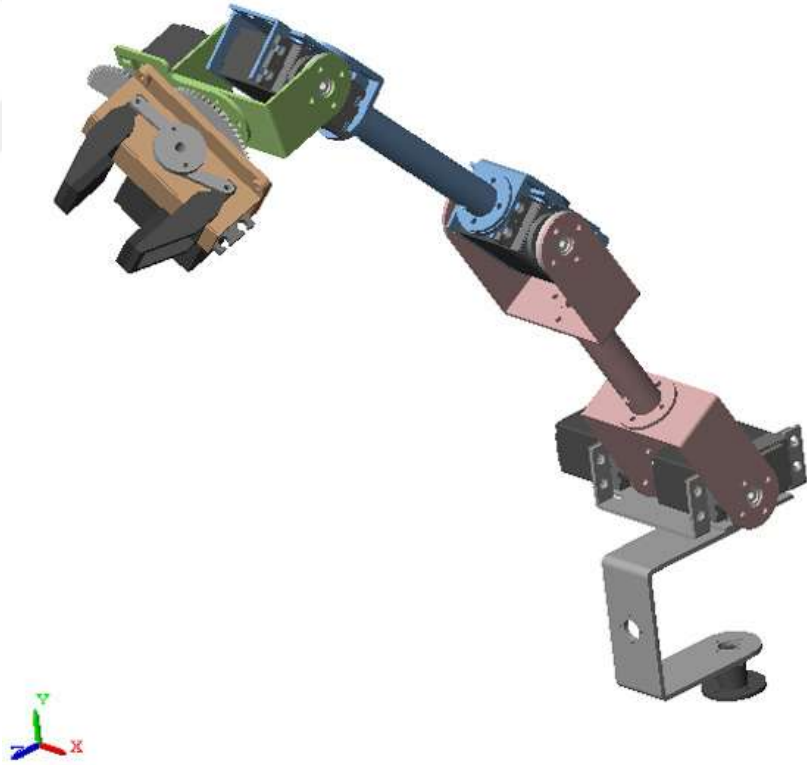
Şekil 4.6'da gösterilen, Kural 1 ve Kural 2'de belirtilen x ve y giriş değerlerini, A ve B ise giriş değerleri için bulanık kümeleri oluşturmaktadır. Kurallarda yer alan a, b, c polinom katsayılarını ifade etmektedir. Şekil 4.6'da yer alan w ise üyelik derecesini belirtmektedir [63].

5. TASARIM VE KİNEMATİK DENKLEMLER

Bu bölümde tasarımı yapılan robot kol materyallerinin detaylı anlatımı ve hazırlanan robot kola uygun kinematik denklem çıkarımları yapılmıştır.

5.1. Robot Kol Tasarımı

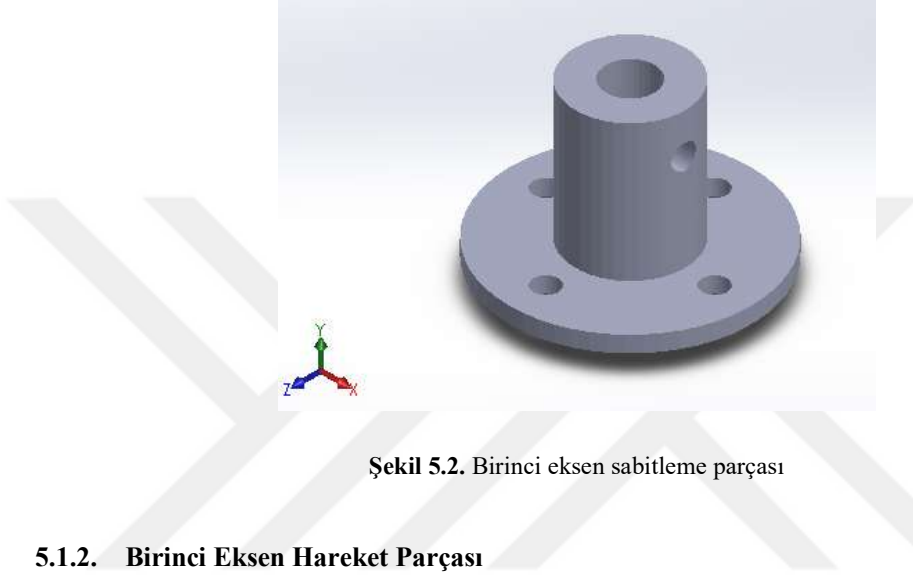
Yapılan çalışmada kullanılacak olan Şekil 5.1’de gösterilen robot kol tasarımı mathworks örnek dosyasından alınmıştır [64]. Bu bölümde 6 eksen olarak tasarlanan robot kol için tasarım detaylarına yer verilmiştir. Üretilabilir bir tasarım ile gerçekleştirilen çalışmada, çalışma planına uygun tasarım ve motor bağlantı elemanlarına yer verilmiştir. Yapılan çalışmada robot kol kontrolü Matlab programı üzerinden gerçekleştirilecektir.



Şekil 5.1. Robot kol temel bileşenleri

5.1.1. Birinci Eksen Sabitleme Parçası

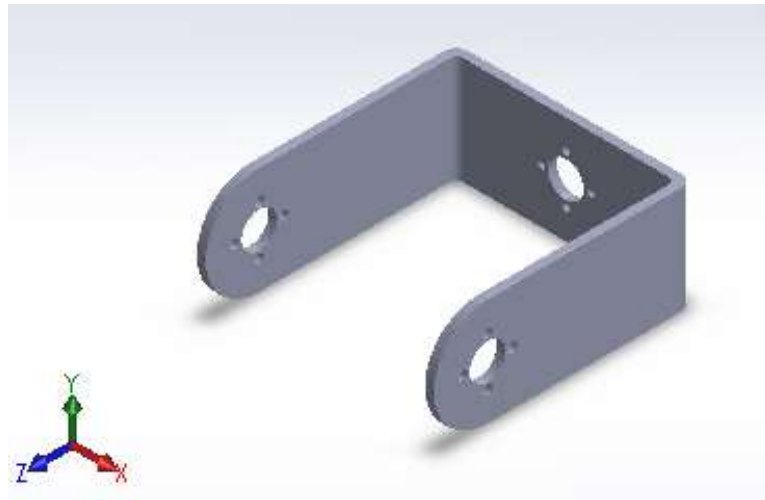
6 eksenli robot kolun, Şekil 5.2’de birinci eksenini sabitlemek için kullanılan parçaya yer verilmiştir. Birinci eksenin hareket alanını kısıtlamayacak şekilde tasarlanan bu parça ile istenilen yörünge planlamasına uygun dönme hareketi gerçekleştirilecektir.



Şekil 5.2. Birinci eksen sabitleme parçası

5.1.2. Birinci Eksen Hareket Parçası

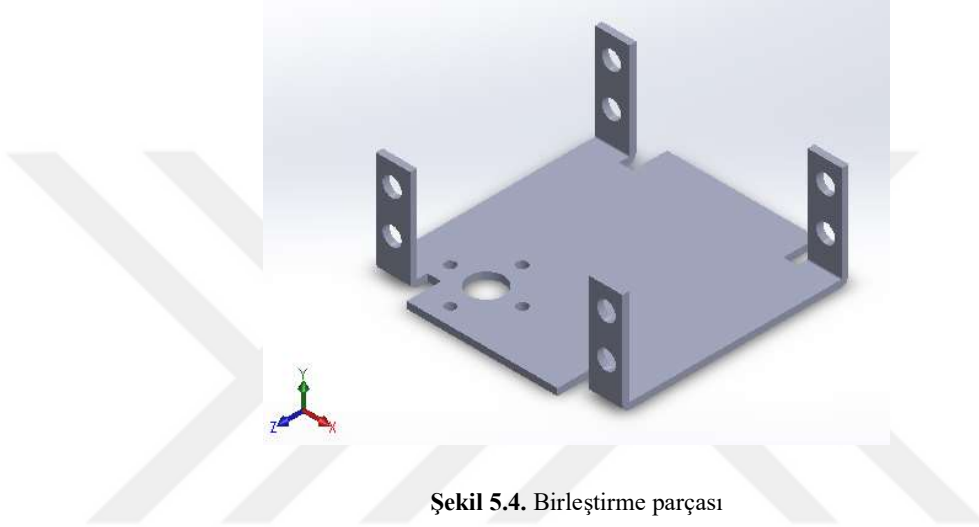
Robot kolun ilk eksen hareketini yapan parçadır. Robot kolun kullanılacağı alana uygun olacak şekilde yerleştirilen birinci eksen sabitleme parçası aracılığı ile Şekil 5.3’te görülen birinci eksen kullanıma hazır hale gelecektir. Yörünge kontrolü için ilk eksen hareketinin önemli olduğu bilinmektedir. Doğru hareket planlaması için çalışma alanına uygun olarak tasarlanmıştır.



Şekil 5.3. Birinci eksen

5.1.3. Birleştirme Parçası

Birinci eksen ile alt kolun birleşim elemanı olarak tasarlanmıştır. Alt kolun istenilen hareketi yapabilmesi için iki motor bağlantısı yapılacaktır. şekil 5.4'te verilen birleştirme parçası motorların uygun konumlandırılacağı bir tasarım ile yapılmıştır. Bu eleman ile ikinci eksen hareketi gerçekleştirilecektir.



şekil 5.4. Birleştirme parçası

5.1.4. Alt Kol

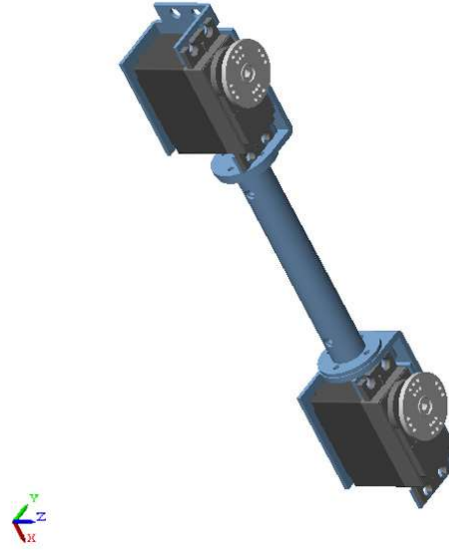
Robot kolun ikinci eksen hareketini gerçekleştirecek olan alt kol iki uç noktasında motor bağlantılarının olacağı bir tasarım ile hazırlanmıştır. Alt tarafta bulunan bağlantı elemanına yerleştirilen motor bağlantısı ile şekil 5.5'te yer alan alt kolun hareketlenmesi sağlanmıştır. Alt kol ile birleşim halinde olan st kolun hareketlenmesi için gereken motor yerleşim yerine dikkat edilerek tasarım oluşturulmuştur.



Şekil 5.5. Alt kol

5.1.5. Üst Kol

Alt kol ile gripper arasında yer alan bağlantı elemanıdır. Robot kolun üçüncü eksen hareketini gerçekleştirdiği bölümdür. Alt kol bağlantı noktasına yerleştirilen motor ile Şekil 5.6’da görülen üst kolun eksen hareketi gerçekleştirilmiştir. Gripper bağlantı elemanı ile birleşim noktasına yerleştirilen bir diğer motor ile gripper hareketinin gerçekleştirilmesi sağlanmıştır.

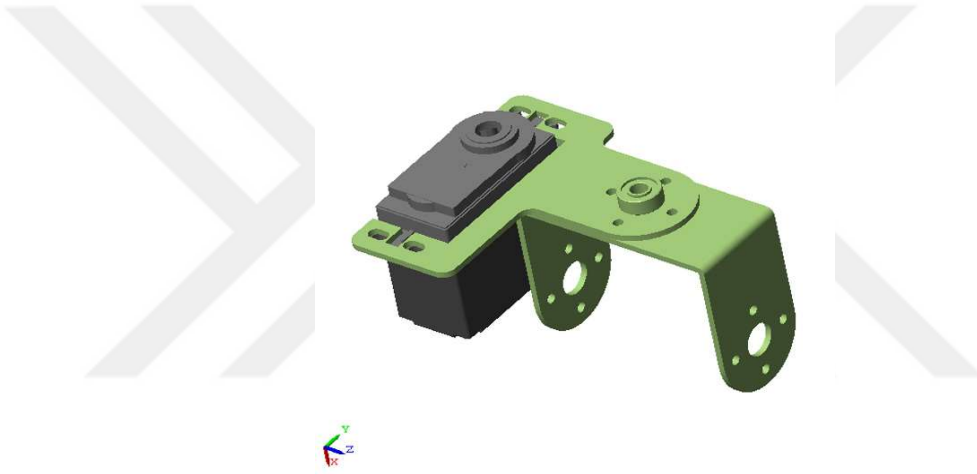


Şekil 5.6. Üst kol

5.1.6. Gripper Bağlantı Elemanı

Robot kolların kullanıldığı alana göre yapılması istenilen işlemleri gerçekleştiren bağlantı elemanıdır. Endüstride yaygın olarak taşıma alanında kullanılan robot kollarındaki uç eleman tutucu (gripper) olarak adlandırılır. Alt kol tasarımında yer verilen motor yerleşim yeri ile bağlantı elemanına hareket aktarımı gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.7’deki gripper bağlantı elemanı ile hem tutucunun yukarı aşağı hareketine hem de kısıkaç olarak tasarlanan uç elemanların açılıp kapanma hareketlerine olanak sağlanmıştır.

Bu tasarımda yapılan gripperdaki kısıkaçların çalışma prensibi dişli çarklar ile gerçekleştirilmiştir.

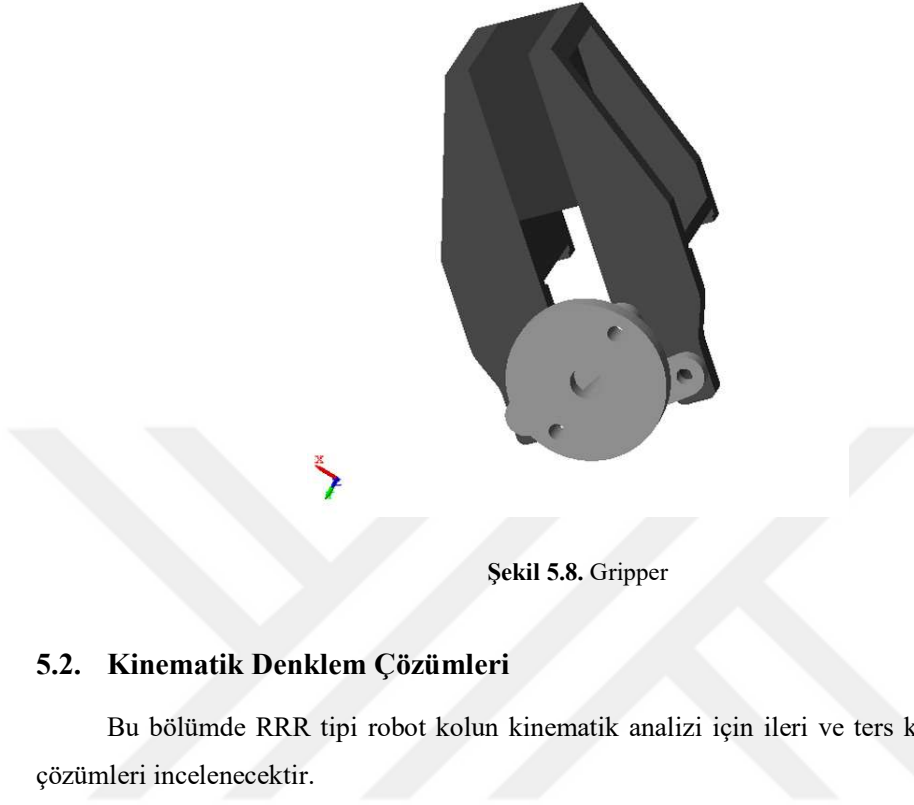


Şekil 5.7. Gripper bağlantı elemanı

5.1.7. Gripper

Endüstriyel anlamda en fazla taşıma alanında kullanılan robot kollara dikkat edilerek bu çalışmada da gripper bölümünün taşıma yapacak şekilde tasarlandığı görülmüştür. Taşıma işlemini gerçekleştirmesi için iki adet kısıkaç tasarlanmıştır. Gripper bağlantı elemanı ile üst kol arasında bulunan motor ile Şekil 5.8’de verilen gripper’in x-y ekseninde hareketi gerçekleştirilmiştir.

—Tasarımda öne çıkan kısıkaçların hareketi için bağlantı elemanının yan tarafına yerleştirilen bir diğer motor ile ek parça olarak tasarlanan dişli çark birleşimi yapılmış ve motordan alınan hareketin çarklara iletilmesi ile kısıkaçların açılıp kapanması sağlanmıştır.



Şekil 5.8. Gripper

5.2. Kinematik Denklem Çözümleri

Bu bölümde RRR tipi robot kolun kinematik analizi için ileri ve ters kinematik denklem çözümleri incelenecektir.

5.2.1. İleri Kinematik

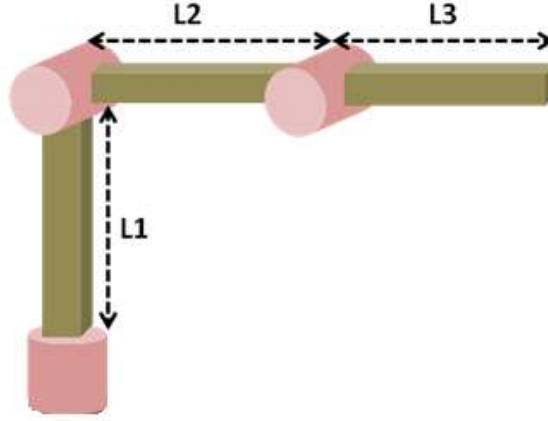
İleri kinematik analiz ile robot kolun uç işlevcisinin hedef noktadaki konumu bulunur. İstenilen konuma ulaşmak için eklemlerin gerçekleştireceği dönme açıları kullanılır. Bölüm 3'te anlatıldığı gibi iki farklı metod ile ileri kinematik analiz uygulanabilir. Analitik ve Geometrik olarak iki temel başlıkta ele alınan kinematik denklem çözümlerinden bu çalışma için Geometrik yaklaşım methodu kullanılmıştır. Ancak ileri kinematik hesaplamaların yapılması için eksenler için gerekli olan açı değerleri bilinmediği için ters kinematik hesaplama methodu uygulanarak açı değerleri elde edilmiştir. İleri kinematik hesaplama yapılmamıştır.

5.2.2. Ters Kinematik

Robot kollarda uç efektörün ilk ve son konumunun bilinmesi ile, son konuma ulaşmak için gereken açı değerlerinin hesaplanması işlemi ters kinematik yöntem ile gerçekleştirilir. Bu çalışmada belirlenen hedef noktasına ulaşmak için robot kolun ihtiyaç duyduğu açı değerleri hesaplanmıştır.

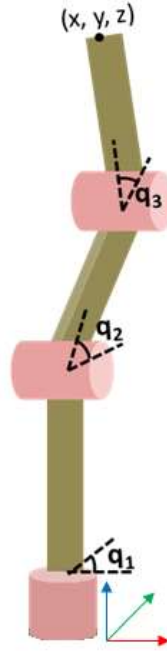
Koordinat Gösterimi

Robot kolun kol uzunlukları ve genel görünümü Şekil 5.9'da gösterilmiştir [65]



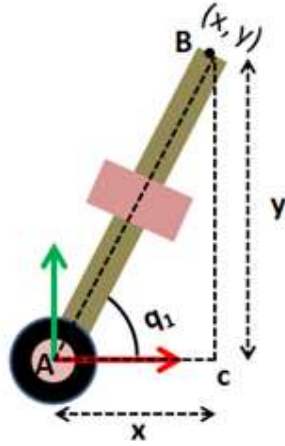
Şekil 5.9. Robot kol gösterimi

Şekil 5.9’da görüldüğü gibi tüm eksen açı değerleri için ilk üç eksen ele alınmıştır. İlk konum olarak açı değerleri sıfır alınmış şekilde açı değeri sıfır iken eksenlerin genel görüntüsü verilmiştir.



Şekil 5.10. Robot kolun eksen açıları

Şekil 5.10’da eksenlere açı değerlerini girilmesi sonucu robot koldaki hareket görüntüsü gösterilmiştir. Geometrik yöntem ile q_1 , q_2 ve q_3 açıları tek tek hesaplanacaktır.

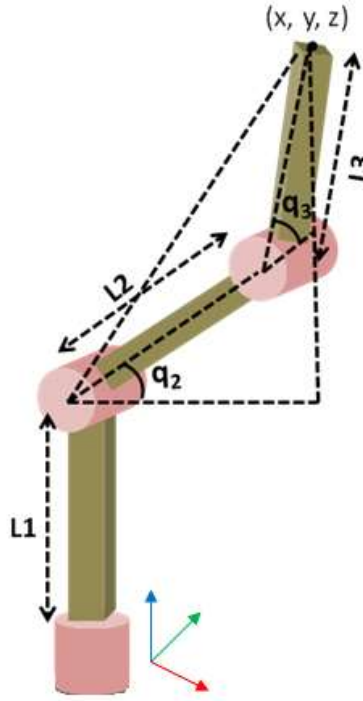


Şekil 5.11. Birinci eksen açıları

x-y koordinat düzleminde hareket gerçekleştiren birinci eksenin q_1 açısı değeri ile oluşturduğu görüntü Şekil 5.11’de gösterilmiştir. Birinci eksenin oluşturmuş olduğu görüntü ile uç nokta olarak belirlenen B noktasının x-y değerleri trigonometrik olarak hesaplanmaktadır. Bu sonuca dayanarak q_1 açısı değeri Denklem 5.1’de verilmiştir.

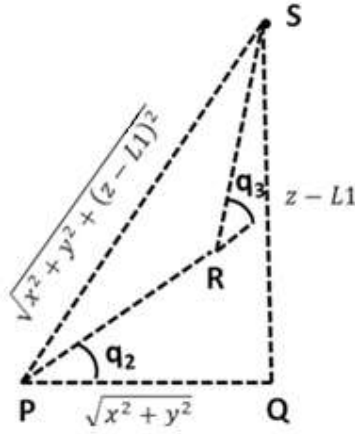
$$q_1 = \text{atan2}\left(\frac{y}{x}\right) \quad (5.1)$$

İkinci ve üçüncü eksenlerin hareketleri incelenmiş ve hareketi oluşturan q_2 ve q_3 açısı değerler hesaplanmıştır.



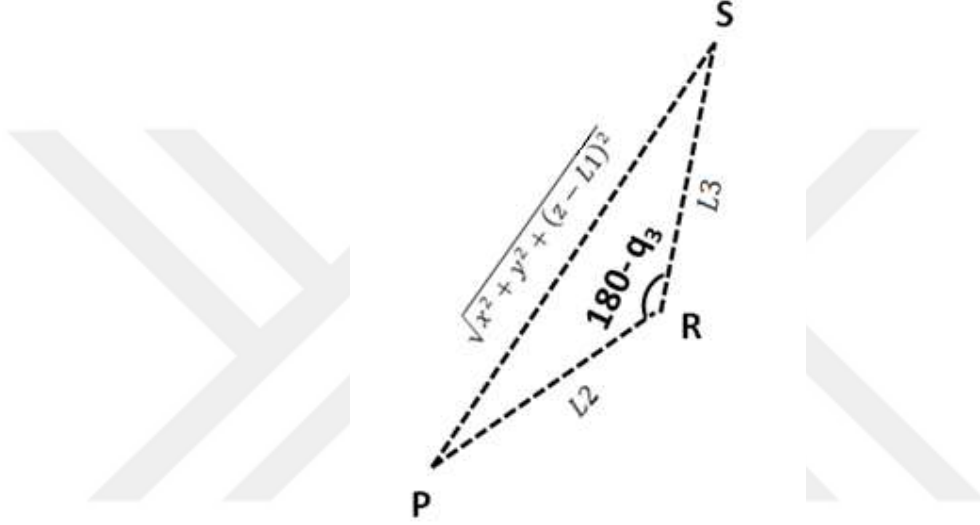
Şekil 5.12. İkinci ve üçüncü eksen açıları

Şekil 5.12’de gösterilen açı değerleri geometrik yaklaşım methodu ile hesaplanmıştır.



Şekil 5.13. Eksenlerin koordinat gösterimi

İkinci eksenin başlangıç noktası olarak belirlenen, Şekil 5.13'te verilen koordinat gösteriminde P noktası ile bitiş noktası olan R noktası arasında yer alan q_2 açı değeri ikinci eksenin hareketi için gerekli olan değeri ifade etmektedir. Şekil 5.14'te çizimi verilen R ve S noktaları arasında yer alan bölüm ise üçüncü eksen göstermektedir. x,y,z eksenlerin hareketleri sonucunda oluşan uç noktayı göstermektedir



Şekil 5.14. Eksenler arasındaki açı hesabı

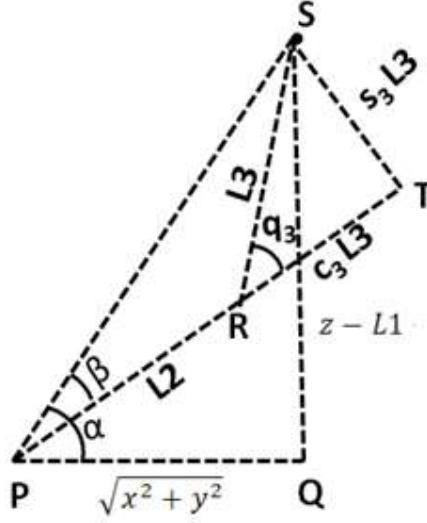
Şekil 5.14'te alt kol ve üst kol uzunlukları L_2 ve L_3 olarak yazılmıştır. İki kol arasındaki açı değeri trigonometrik olarak kosinüs kuralı kullanılarak hesaplanmıştır.

$$x^2 + y^2 + (z - L_1)^2 = L_2^2 + L_3^2 - 2.L_2.L_3.\cos(180 - q_3) \quad (5.2)$$

$$\cos q_3 = \frac{x^2 + y^2 + (z - L_1)^2 - L_2^2 - L_3^2}{2.L_2.L_3} \quad (5.3)$$

$$q_3 = \pm \cos^{-1} \left(\frac{x^2 + y^2 + (z - L_1)^2 - L_2^2 - L_3^2}{2.L_2.L_3} \right) \quad (5.4)$$

Denklem 5.2’de verilen kosinüs kuralına göre, denklemde yer alan q_3 açısının yalnız bırakılması ile denklem 5.3 elde edilmiştir. Oluşan yeni denkleme göre kosinüs açısının tersi alınarak denklem 5.4’te görüldüğü gibi q_3 açısı bulunmuştur.



Şekil 5.15. Açıların trigonometrik hesabı

Alt kolun oluşturduğu ikinci eksen hareketinde gerekli olan q_2 açısı Şekil 5.15’te α ve β değişkenleri ile gösterilmiştir. q_2 açısı $\alpha - \beta$ olarak hesaplanmıştır. Sırası ile α ve β açıları denklem 5.5 ve 5.6’da verilmiştir.

$$\alpha = \text{atan2}\left(\frac{z-L1}{\sqrt{x^2+y^2}}\right) \quad (5.5)$$

$$\beta = \text{atan2}\left(\frac{s_3.L3}{L2+c_3.L3}\right) \quad (5.6)$$

$$q_2 = \text{atan2}\left(\frac{z-L1}{\sqrt{x^2+y^2}}\right) - \text{atan2}\left(\frac{s_3.L3}{L2+c_3.L3}\right) \quad (5.7)$$

Tüm açı değerleri geometrik yaklaşım yöntemine göre hesaplanmıştır. Denklem 5.8 , 5.9 ve 5.10’da q_1 , q_2 ve q_3 açılarının hesaplamaları verilmiştir.

$$q_1 = \text{atan2}\left(\frac{y}{x}\right) \quad (5.8)$$

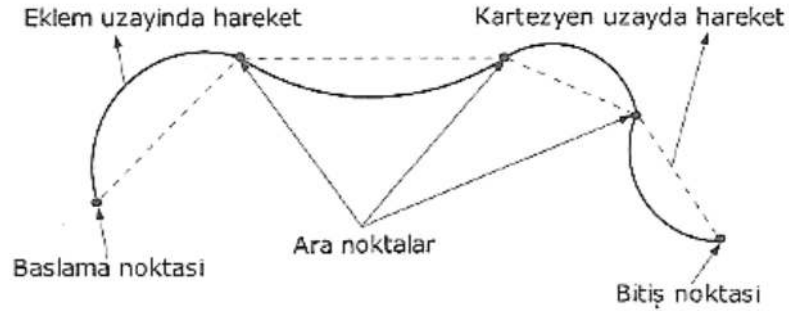
$$q_2 = \text{atan2}\left(\frac{y}{x}\right) - \text{atan2}\left(\frac{s_3.L3}{L2+c_3.L3}\right) \quad (5.9)$$

$$q_3 = \pm \cos^{-1}\left(\frac{x^2+y^2+(z-L1)^2-L2^2-L3^2}{2.L2.L3}\right) \quad (5.10)$$

5.3. Yörünge Planlaması

Yörünge planlaması robot kollar için önemli bir alanı oluşturmaktadır. Çünkü tasarlanan ve kontrolü sağlanan bir robot kolun istenilen noktaya ulaşması temel bir problemi oluşturmaktadır. Hedeflenen noktaya ulaşma aşamasında robot kolun titreme ya da çalışma uzayında yer alan bir cisme çarpması gibi durumlar istenmeyen olaylardır. Bu sorunları yaşamadan tüm eklemlerin aynı anda hareket etmesi ile hedeflenen noktaya ulaşması gerekmektedir. Yörünge planlaması sistem olarak bu çalışma amacına yönelik yapılan bir işlemdir. Yörünge planlaması yapılmayan bir sistemde robot kolun istenilen noktaya ulaşmak için kullanacağı hareket planlaması bilinemez [29,66].

Yörünge planlaması için literatürde iki farklı yöntem kullanılmıştır. Eklemler uzayında ve Kartezyen uzayında yörünge planlaması olarak adlandırılan yörünge planlaması çeşitlerinin gösterimi Şekil 5.16'da gösterilmiştir [29].



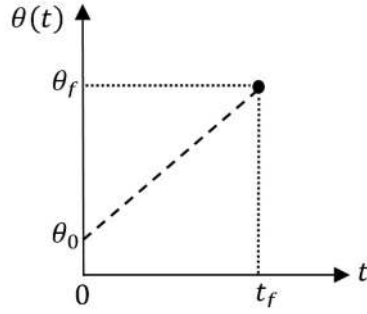
Şekil 5.16. Yörünge planlaması [29]

5.3.1. Kartezyen Uzayında Yörünge Planlaması

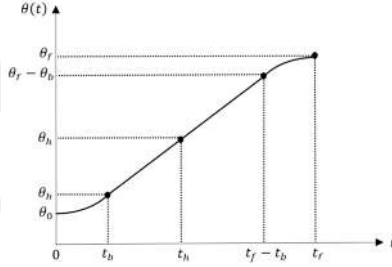
Kartezyen uzayında yörünge planlaması ile robot kol çalışma alanının başlangıç ve uç noktasına parabolik eklemlerin yapıldığı, doğrusal yörünge kullanılarak oluşturulan yörünge planlaması çeşididir.

Robot kol hareket grafiği doğrusal bir yörünge olarak yapıldığı zaman, hareketin başlangıç ve son noktalarında hız problemleri açığa çıkma ihtimali yüksektir. Bu sorunun çözümü olarak doğrusal yörüngenin uç noktalarına parabolik eğri eklentileri yapılarak yörüngede düzenleme yapılır. Şekil

5.17’de grafik ile doğrusal yörünge, Şekil 5.18’de de parabolik eklentiler yapılmış hali ile grafik görünümleri verilmiştir [28].



Şekil 5.17. Doğrusal yörünge [29]



Şekil 5.18. Parabolik eklenti ile yörünge [29]

5.3.2. Eklem Uzayında Yörünge Planlaması

Yörünge planlamasının ikinci çeşidi olan eklem uzayında yörünge planlaması ile üçüncü dereceden polinomlar ve daha yüksek dereceye sahip polinomlar kullanılarak çalışma gerçekleştirilir. Bu çalışma sisteminde öncelikli olarak gripper için belirlenen başlangıç ve hedeflenen son konum kullanılır ve kullanılan başlangıç ve bitiş konumları bu çözüm için 0 olarak alınmıştır. Ters kinematik analiz ile hesaplanan açı değerleri kullanılarak hedeflenen nokta hesaplaması yapılır.

$$\theta(0) = \theta_0 \quad (5.11)$$

$$\theta(t_f) = \theta_f \quad (5.12)$$

Denklem 5.11 ve 5.12’de gösterilen θ_0 , başlangıç anında gerçekleşen konumu, θ_f hedeflenen konum noktasını ifade etmektedir. Üçüncü dereceden bir polinom oluşturularak başlangıç ve son konum arasında yer alan yörünge planlaması yazılabilir.

$$\theta(t) = s_0 + s_1 \cdot t + s_2 \cdot t^2 + s_3 \cdot t^3 \quad (5.13)$$

Denklem 5.13'te yörünge planlaması için gereken üçüncü dereceden polinom verilmiştir. Denklemde yer alan s_i katsayıları, polinom katsayılarını ifade etmektedir. Katsayıların hesaplaması yapılmalıdır bunun için başlangıç ve hedeflenen konum noktalarının hızlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu değişkenlerin bulunması için başlangıç ve hedef konumlarının türevi alınmalıdır. Denklem 5.14'te başlangıç konumunun türevi, denklem 5.15'te ise hedef konumunun türevi verilmiştir.

$$\dot{\theta}(0) = 0 \quad (5.14)$$

$$\dot{\theta}(t_f) = 0 \quad (5.15)$$

Yörünge planlamasında ihtiyaç duyulan eklemelerin denklem 5.16'teki hız ve denklem 5.17'teki ivmesi, denklem 5.13'te yer alan üçüncü dereceden polinomun birinci ve ikinci dereceden türevinin alınması ile bulunur.

$$\dot{\theta}(t) = s_1 + 2s_2 \cdot t + 3s_3 \cdot t^2 \quad (5.16)$$

$$\ddot{\theta}(t) = 2s_2 + 6s_3 \cdot t \quad (5.17)$$

Denklem 5.11'te yer alan başlangıç pozisyonu denklem 5.13'te yerleştirilmesi ile denklem 5.18 elde edilmiştir. Oluşan yeni denkleme göre polinom denkleminin denklem 5.19'da gösterildiği gibi birinci katsayısı bulunmuştur.

$$\theta(0) = s_0 + s_1 \cdot 0 + s_2 \cdot 0^2 + s_3 \cdot 0^3 \quad (5.18)$$

$$s_0 = \theta(0) \text{ veya } s_0 = \theta_0 \quad (5.19)$$

Denklem 5.12'te yer alan hedef pozisyonu denklem 5.13'te yerleştirilmiştir. Böylelikle denklem 5.20 elde edilmiştir

$$\theta_f = s_0 + s_1 \cdot t_f + s_2 \cdot t_f^2 + s_3 \cdot t_f^3 \quad (5.20)$$

Denklem 5.14 ve denklem 5.15'te yer alan eşitlikler birinci türev sonucu oluşan denklem 5.16'ya yerleştirilir ve denklem 5.20'deki sonuç elde edilir.

$$\dot{\theta}(0) = s_1 + 2s_2 \cdot 0 + 3s_3 \cdot 0^2 = 0 \quad (5.21)$$

$s_1 = 0$ olarak bulunur.

$$\dot{\theta}(t_f) = s_1 + 2s_2 \cdot t_f + 3s_3 \cdot t_f^2 = 0 \quad (5.22)$$

Denklem 5.13'e yer alan polinom katsayılarından $s_0 = \theta_0$ ve $s_1 = 0$ olarak bulunmuştur. Denklem 5.22'de yer alan $\dot{\theta}(t_f)$ değeri için $\dot{\theta}(t_f) = 0$ eşitliği kullanılarak, elde edilen $s_1 = 0$ katsayısının yazılması ile s_2 katsayısı bulunur.

$$0 = 0 + 2s_2 \cdot t_f + 3s_3 \cdot t_f^2 \quad (5.23)$$

$$2s_2 \cdot t_f = -3s_3 \cdot t_f^2$$

$$s_3 = -\frac{2s_2}{3t_f} \quad \text{veya} \quad s_2 = -\frac{3s_3 t_f}{2} \quad \text{olarak bulunur.}$$

Denklem 5.23'te bulunan s_3 değeri denklem 5.20'de yazılırsa s_2 katsayısı hesaplanabilir.

$$\theta_f = \theta_0 + 0 \cdot t_f + s_2 \cdot t_f^2 - \frac{2s_2}{3t_f} \cdot t_f^3 \quad (5.24)$$

$$s_2 = \frac{3}{t_f^2} (\theta_f - \theta_0) \quad \text{olarak bulunmuştur.}$$

Denklem 5.23'te yer alan çözümlene ile elde edilen s_2 katsayısının s_3 katsayısı cinsinden ifadesi denklem 5.20'de yazılırsa denklem 5.25 oluşur ve s_3 katsayısı elde edilebilir.

$$\theta_f = \theta_0 + 0 \cdot t_f + -\frac{3s_3 t_f}{2} \cdot t_f^2 + s_3 \cdot t_f^3 \quad (5.25)$$

$$\theta_f = \theta_0 - \frac{3}{2} s_3 t_f^3 + s_3 \cdot t_f^3$$

$$s_3 = -\frac{2}{t_f^3} (\theta_f - \theta_0)$$

Üçüncü dereceden polinom olarak yazılan denkleme ait katsayı hesaplamaları yapılmıştır. Tüm katsayı değerleri bulunmuştur. Denklem 5.26'da elde edilen katsayı değerleri verilmiştir.

$$s_0 = \theta_0 \quad (5.26)$$

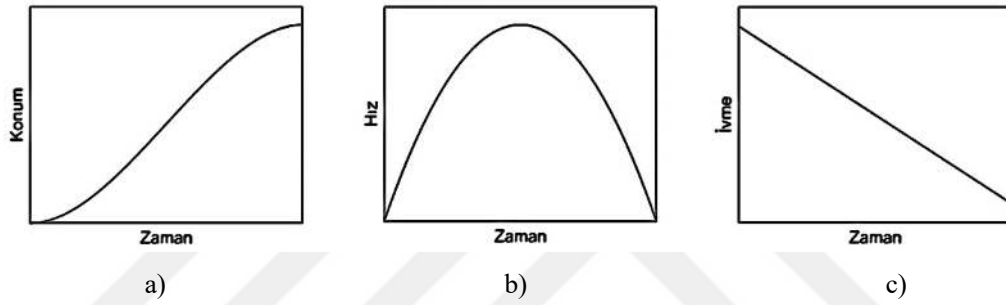
$$s_1 = 0$$

$$s_2 = \frac{3}{t_f^2}(\theta_f - \theta_0)$$

$$s_3 = -\frac{2}{t_f^3}(\theta_f - \theta_0)$$

$$\theta(t) = \theta_0 + 0.t + \frac{3}{t_f^2}(\theta_f - \theta_0).t^2 - \frac{2}{t_f^3}(\theta_f - \theta_0).t^3 \quad (5.27)$$

Elde edilen katsayılardan faydalanarak, başlangıç ve son konum anında hızları sıfır alınan üçüncü dereceden polinoma ait yörüngenin konum, hız ve ivme grafiği Şekil 5.19'da gösterilmiştir.



Şekil 5.19. Üçüncü dereceden polinoma sahip robot kolun a)konum-zaman, b)hız-zaman ve c)ivme-zaman grafikleri

Başlangıç ve son hızı sıfır olarak alınan polinomun katsayı değerleri denklem 5.27'de verilmiştir. Ancak robot kol kontrolünde başlangıç ve bitiş hızları her zaman sıfır olarak alınmamaktadır. Başlangıç ve bitiş hızları sıfırdan farklı alınan yörünge planlaması için gereken polinom katsayıları hesaplanmıştır.

$$\theta(t) = \theta_0 \quad (5.28)$$

$$\theta(t_f) = \theta_f \quad (5.29)$$

$$\dot{\theta}(0) = \dot{\theta}_0 \quad (5.30)$$

$$\dot{\theta}(t_f) = \dot{\theta}_f \quad (5.31)$$

Denklem 5.28, 5.29, 5.30 ve 5.31, üçüncü dereceden polinom olarak verilen, denklem 5.13 ve onun çözümü sonucu bulunan denklem 5.16, 5.17 ve 5.20'de yerine yazılarak aşağıdaki eşitlikler bulunmuştur.

$$\theta(t) = s_0 + s_1.t + s_2.t^2 + s_3.t^3 \quad (5.32)$$

$$\theta(0) = \theta_0 = s_0 + s_1 \cdot 0 + s_2 \cdot 0^2 + s_3 \cdot 0^3 \quad (5.33)$$

$$\theta(0) = \theta_0 = s_0 \quad (5.34)$$

$$\theta(t_f) = \theta_f = s_0 + s_1 \cdot t_f + s_2 \cdot t_f^2 + s_3 \cdot t_f^3 \quad (5.35)$$

$$\dot{\theta}(t) = s_1 + 2s_2 \cdot \dot{t} + 3s_3 \cdot t^2 \quad (5.36)$$

$$\dot{\theta}(0) = \dot{\theta}_0 = s_1 + 2s_2 \cdot 0 + 3s_3 \cdot 0^2 \quad (5.37)$$

$$\dot{\theta}_0 = s_1 \quad (5.38)$$

$$\dot{\theta}(t_f) = \dot{\theta}_f = s_1 + 2s_2 \cdot t_f + 3s_3 \cdot t_f^2 \quad (5.39)$$

Denklem 5.34 ve 5.38 polinom katsayılarından s_0 ve s_1 sonuçlarını vermektedir. Bulunan katsayılar denklem 5.39'da yazılarak diğer katsayıların sonuçları denklem 5.40 ve 5.41'de gösterilmiştir.

$$s_2 = \frac{3}{t_f^2}(\theta_f - \theta_0) - \frac{2}{t_f} \dot{\theta}_0 - \frac{1}{t_f} \dot{\theta}_f \quad (5.40)$$

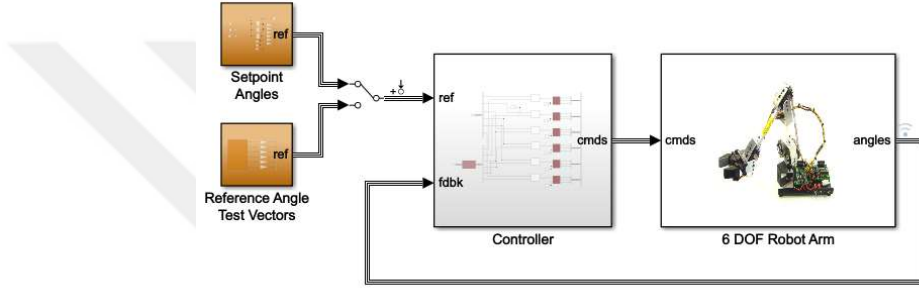
$$s_3 = -\frac{2}{t_f^3}(\theta_f - \theta_0) + \frac{1}{t_f^2}(\dot{\theta}_f - \dot{\theta}_0) \quad (5.41)$$

Tüm katsayıların bulunması ile polinom denkleminde yerinde yazılıp denklem gösterimi 5.42'de yapılmıştır.

$$\theta(t) = \theta_0 + \dot{\theta}_0 \cdot t + \left(\frac{3}{t_f^2}(\theta_f - \theta_0) - \frac{2}{t_f} \dot{\theta}_0 - \frac{1}{t_f} \dot{\theta}_f \right) \cdot t^2 + \left(-\frac{2}{t_f^3}(\theta_f - \theta_0) + \frac{1}{t_f^2}(\dot{\theta}_f - \dot{\theta}_0) \right) \cdot t^3 \quad (5.42)$$

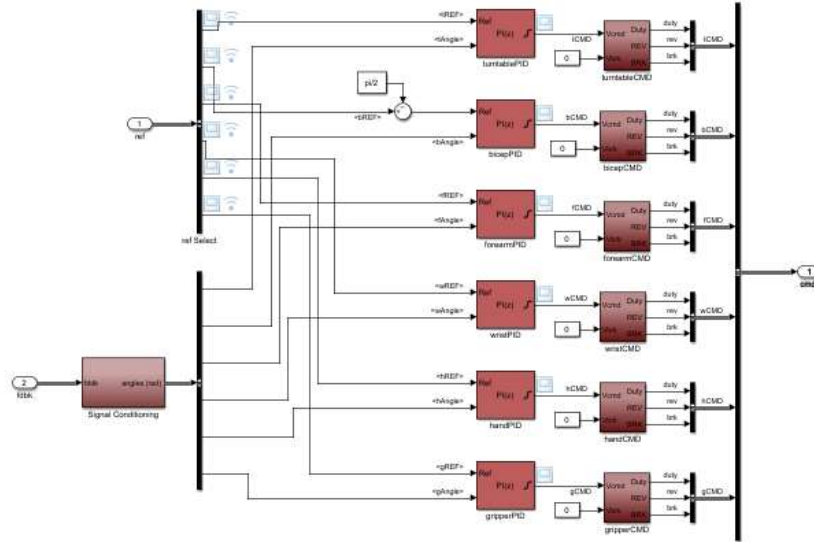
6. BULGULAR VE TARTIŞMA

Tasarımı tamamlanan robot kol Matlab/SimMechanic ortamına yüklenmiştir. Şekil 6.1’de robot kolun Matlab/Simulink ortamındaki görünümü verilmiştir [64]. Dört temel blok olarak ele alınan robot kol kontrolü sistem girişinde yer alan anahtar ile iki aşamalı girişe uygun halde hazırlanmıştır. Birinci giriş, iki farklı konum referansı girişine imkân sağlarken, ikinci giriş ise birden fazla konum referansının hazırlanarak oluşturulan girişlerin uygulanmasına olanak sağlamaktadır.

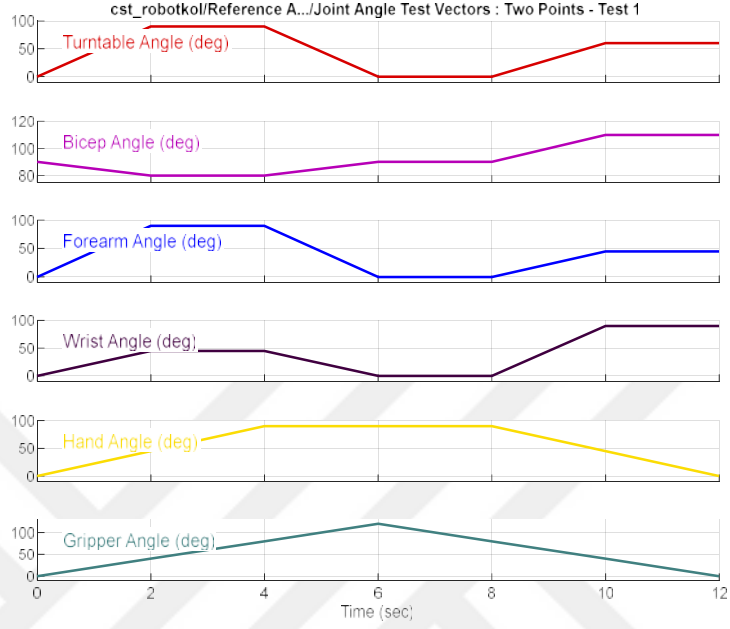


Şekil 6.1. Robot kol Matlab/Simmechanics blok diyagramı

Robot kolun kontrolü için hem Bulanık Mantık Denetleyici hem de PID kontrol yöntemleri uygulanmıştır. Bu bölümde iki kontrol yöntemine ait sonuçlara yer verilmiştir. Şekil 6.2’de robot kol eklemlerine bağlantısı yapılan PID kontrolün blok görünümü Şekil 6.3’te ise Bulanık Mantık Denetleyici bağlantısının blok görünümü verilmiştir. Her iki kontrol yönteminde her eklemin için ayrı bir kontrolörün kullanıldığı şekillerden görülmektedir.

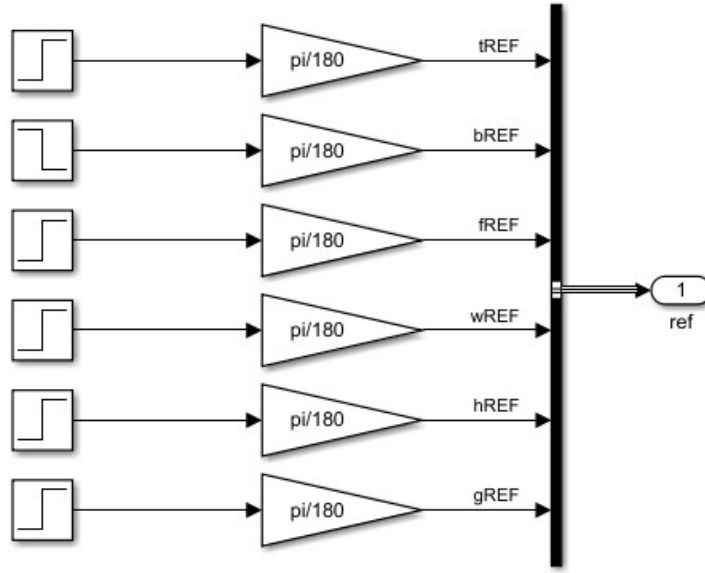


Şekil 6.2. Eksenlerin PID kontrol bağlantısı



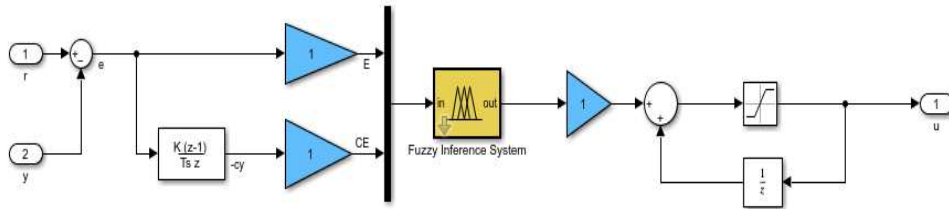
Şekil 6.4. Hareket için belirlenen referans noktaları

Bu çalışmada referans noktaları belirlenen robot kolun istenilen hareketi oluşturması için eklemlere açı girişleri yapılmıştır. Her iki kontrol yöntemi için yapılan açı girişlerinin blok görünümü Şekil 6.5'te verilmiştir. Burda eklemlere bir başlangıç noktasından bir hedef noktaya hareketini gerçekleştirecek şekilde step bloğuyla iki referans değer uygulanmaktadır. Derece olarak girilen açı değerlerinin radyan'a dönüşümü için bir gain bloğu eklenmiş böylelikle açı biriminin dönüşümü sağlanmıştır.



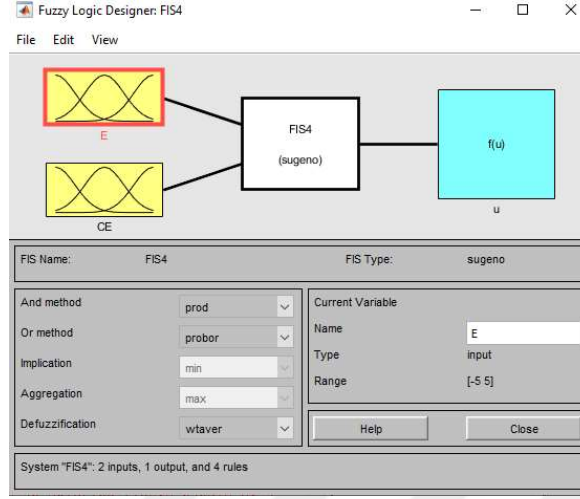
Şekil 6.5. Eksenlere girilen açıl değerlerinin blok diyagramı

Eklemlerin girişlerine uygulanan Bulanık Mantık Denetleyici blok bağlantı görünümü Şekil 6.6’da gösterilmiştir. Bulanık mantık denetleyicilere referans konum ile eklem konumu arasındaki hata ile bu hatanın türevi giriş olarak uygulanırken denetleyici çıkışında anti-winup integratör kullanılmıştır.



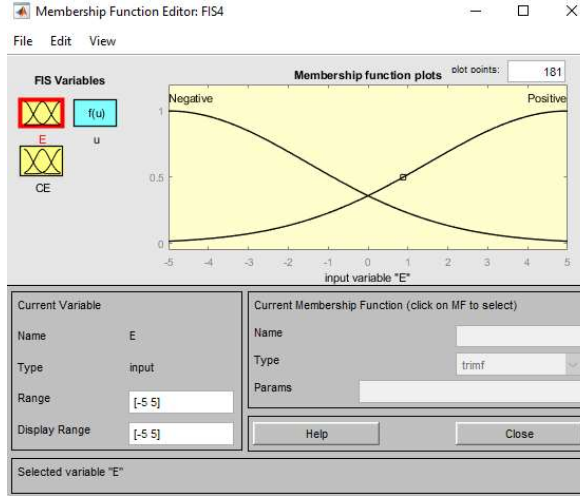
Şekil 6.6. Bulanık Mantık Denetleyici bağlantı diyagramı

Bölüm 4.2’de anlatılan Bulanık Mantık Denetleyici yönteminin çıkarım sistemlerinden Sugeno tipi çıkarım methodu ile Mamdani tipi çıkarım methodu anlatılmıştır. İki çıkarım methodu da Bulanık Mantık Denetleyici’de kullanılmıştır. Kullanılan Bulanık Mantık Denetleyici’ye ait detaylara aşağıda yer verilmiştir

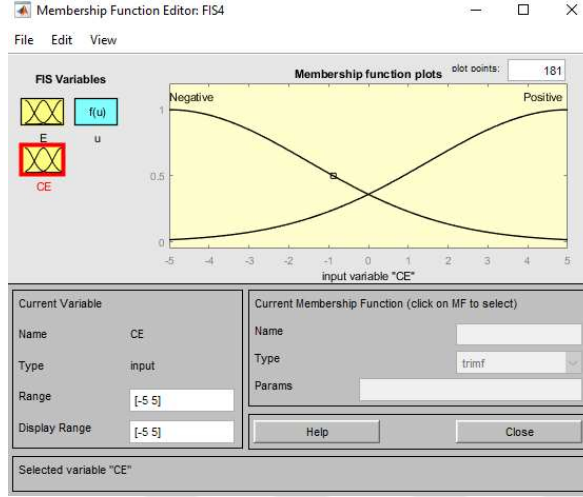


Şekil 6.7. Sugeno tipi Bulanık Mantık Denetleyici

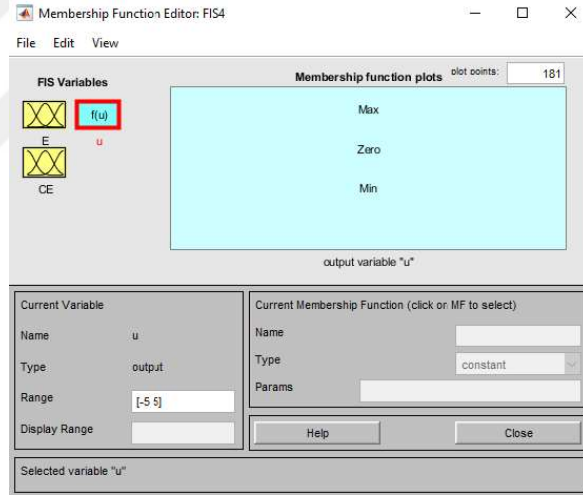
İki girişli olarak tasarlanan Bulanık Mantık Denetleyici’de Şekil 6.7’de görünen E hatayı, CE hatanın türevi ifade etmektedir. Şekil 6.8’de hata girişine, Şekil 6.9’da hatanın türevi girişine, Şekil 6.10’da ise Bulanık Mantık Denetleyici’nin çıkış üyelik fonksiyonları verilmiştir. Üyelik fonksiyonları sıfır noktasına göre simetrik ve giriş aralığı -5 ile 5 olarak seçilmiştir.



Şekil 6.8. Sugeno tipi çıkarımda hata girişi için üyelik fonksiyonu



Şekil 6.9. Sugeno tipi çıkarımda hatanın türevi girişi girişi için üyelik fonksiyonu

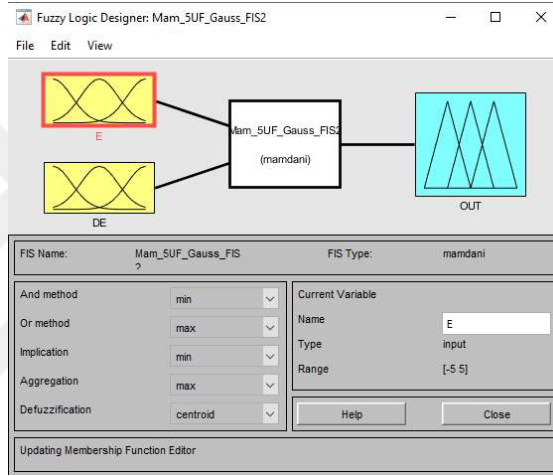


Şekil 6.10. Sugeno tipi çıkarımda fonksiyonel çıkış

Bulanık Mantık Denetleyici yönteminin bir diğer çıkarım methodu olan Mamdani tipi çıkarım için, iki girişli bir çıkışlı bir kontrolcü tasarlanmıştır. Mamdani tipi bulanık kontrolör, hata ve hatanın türevi olarak belirlenen giriş üyelik fonksiyonları ve bir tane olarak belirlenen çıkış üyelik fonksiyonu ile oluşturulmuştur. Ayrıca Mamdani tipi çıkarım yönteminde girişlerde, beşer adet üyelik fonksiyonu kullanılarak 25 kurallık bir kural tablosu hazırlanmıştır. Tablo 6.1’de verilen kural tablosuna göre Mamdani tipi bulanık kontrolcü robot kol eksenlerine bağlanmıştır.

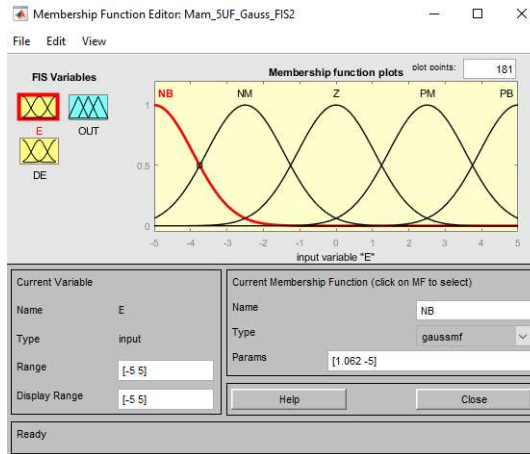
Tablo 6.1. Mamdani tipi Bulanık Mantık Denetleyici Kural Tablosu

E \ DE	NB	NM	Z	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	Z
NM	NB	NB	NM	Z	PM
Z	NM	NM	Z	PM	PM
PM	NM	Z	PM	PB	PB
PB	Z	PM	PM	PB	PB

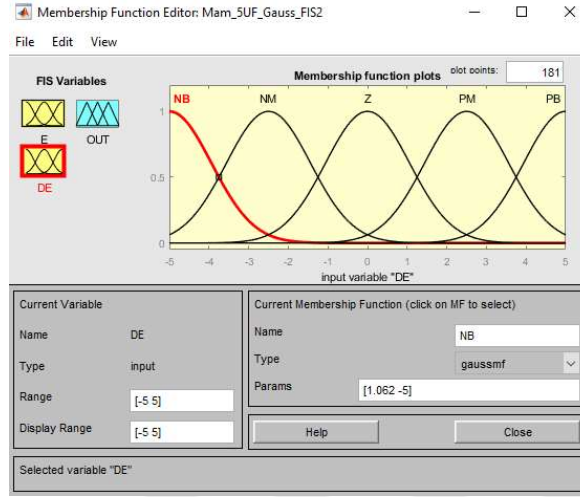


Şekil 6.11. Mamdani tipi Bulanık Mantık Denetleyici

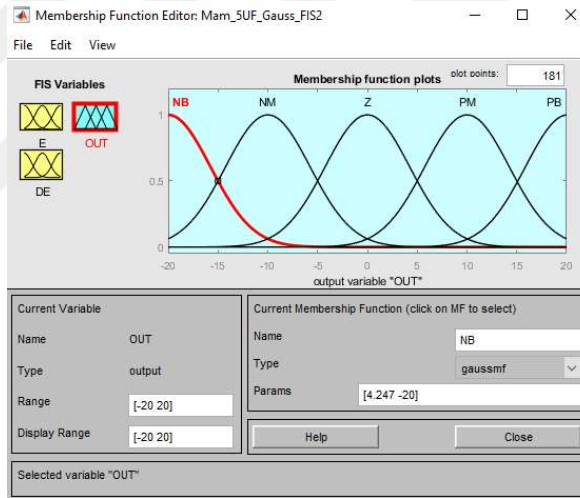
Şekil 6.11’de yer alan Mamdani tipi bulanık kontrolcü için Şekil 6.12’de hata girişine, Şekil 6.13’te hatanın türevi girişine ve Şekil 6.14’te çıkış üyelik fonksiyonu verilmiştir.



Şekil 6.12. Mamdani tipi çıkarımda hata girişi



Şekil 6.13. Mamdani tipi çıkarımda hatanın türevi girişi



Şekil 6.14. Mamdani tipi çıkarımda çıkış üyelik fonksiyonu

Robot kol kontrolü için PID kontrol yöntemi ile ilk kontrol gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.5'te verilen açı girişlerinde her eklem için başlangıç ve son açı değerleri girilmiştir.

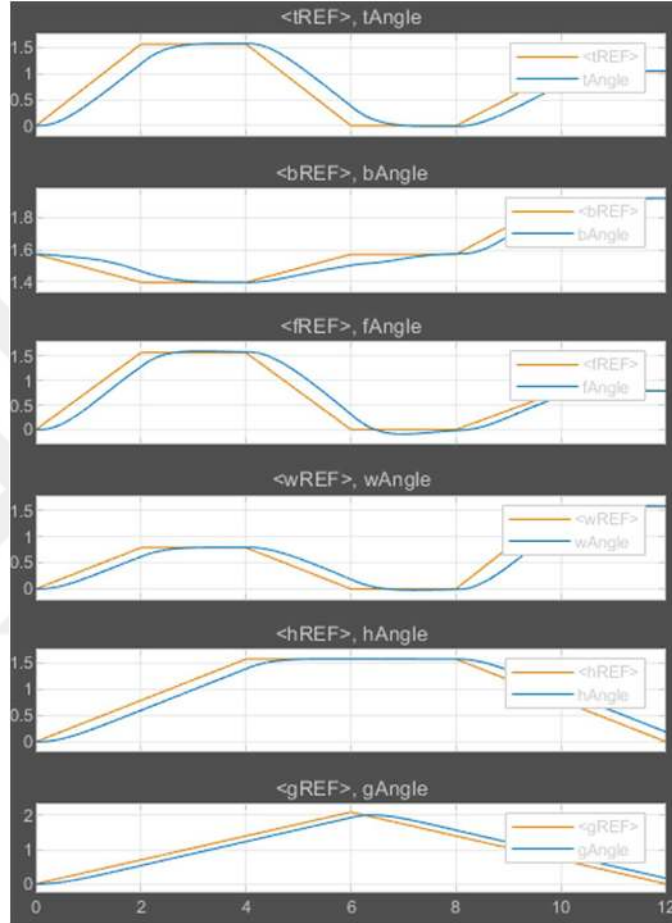
θ_1 için başlangıç açısı 0° , son açı 60°

θ_2 için başlangıç açısı 90° , son açı 0°

θ_3 için başlangıç açısı 0° , son açı 60°

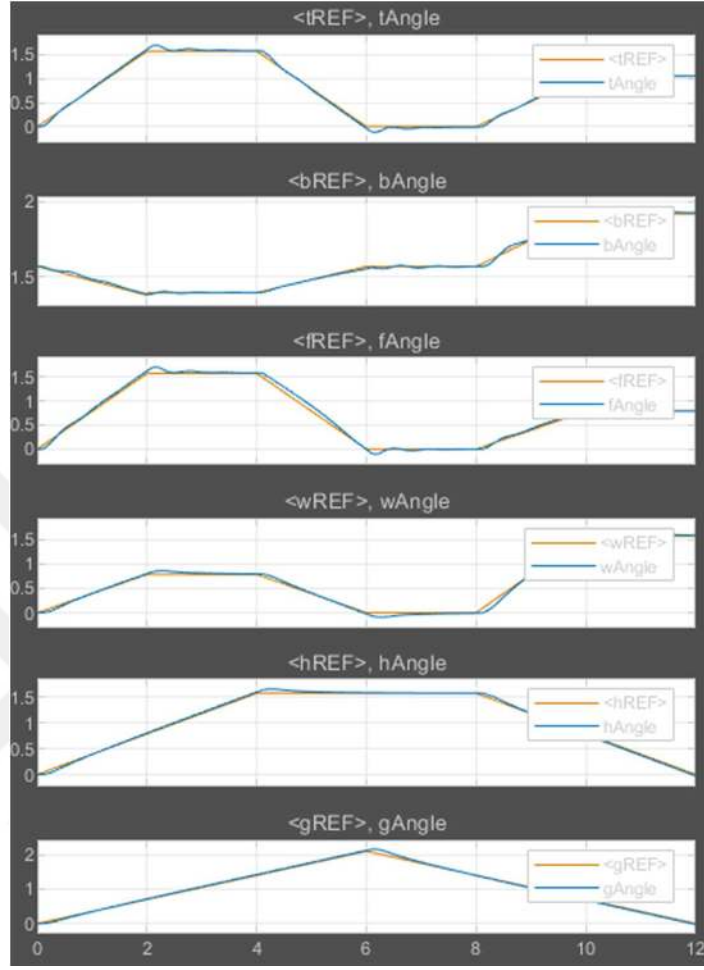
olarak verilen eklem açılarında, ilk yazılan açı değeri başlangıç konumunu, ikinci yazılı olan ise referansa göre belirlenen hedef açı değerini ifade etmektedir.

Şekil 6.1’de verilen Matlab blok diyagramında yer alan kontrolcü girişlerinden referans açı değeri girişi bölümü kullanılarak, belirlenen açı değerlerine göre istenilen referans noktaları ile gerçekleştirilen hareket grafiği karşılaştırması yapılmıştır.



Şekil 6.15. PID kontrol sonuç grafiği

PID kontrolörün uygulanması ile hedeflenen referans noktaları ile gerçekleşen hareketin sonuç grafiği Şekil 6.15’te verilmiştir. Robot kol eksenlerine uygulanan PID kontrolör ile başlangıç ve hedef açı değerleri girilen sistemde istenilen hareket noktalarına tam olarak ulaşamadığı, belirli noktalarda referans hareketini yakaladığı ancak süreklilik sağlayamadığı görülmüştür.



Şekil 6.16. Sugeno tipi Bulanık Mantık Denetleyici sonuç grafiği

Robot kol eksenlerinin kontrolü için ikinci kontrolör olarak sugeno tipi Bulanık Mantık Denetleyici kullanılmıştır. Bu kontrolcü ile elde edilen sonuçlar Şekil 6.16’da verilmiştir. Grafik incelendiğinde robot kol hareketi için istenilen referans noktalarına bu kontrol yöntemi ile uygun sonuçlar elde edilmiştir.

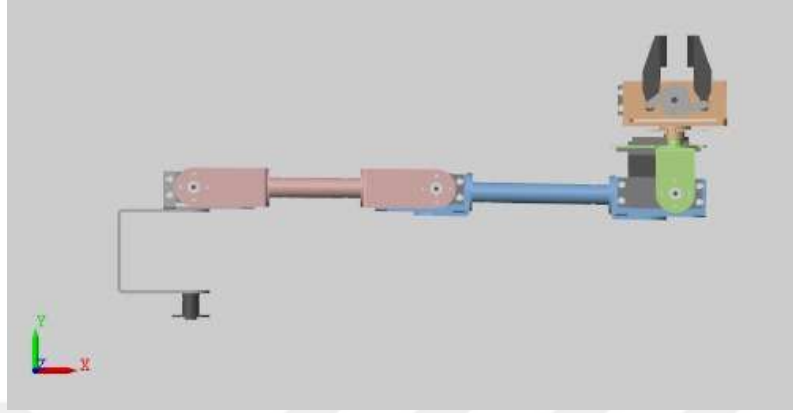


Şekil 6.17. Mamdani tipi Bulanık Mantık Denetleyici sonuç grafiği

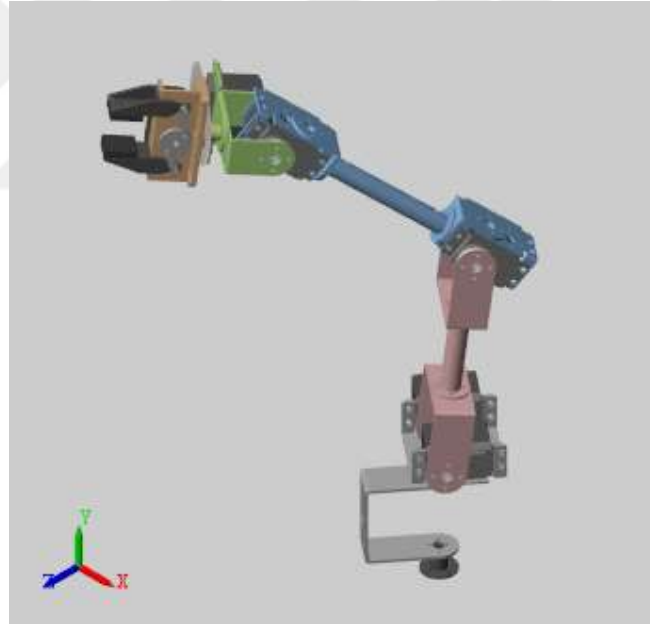
Eksenlerin istenilen açı değerlerine göre hareket kontrolünün gerçekleştirilmesinde son olarak Mamdani tipi Bulanık Mantık Denetleyici kullanılmıştır. Bu kontrolör ile referans noktalarını yakalayan bir hareket grafiği Şekil 6.17’de verildiği gibi elde edilmiştir.

Robot kol kontrolü için uygulanan kontrol yöntemlerine ait sonuçlar incelenmiştir. Öncelikle Bulanık Mantık Denetleyici ve PID kontrol sonuçlar ele alındığında Bulanık Mantık Denetleyici’nin PID kontrole göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Bulanık Mantık Denetleyici yöntemi için iki farklı çıkarım sistemi kullanılmıştır. Şekil 6.16’da Sugeno ve Şekil 6.17’de Mamdani tipi çıkarım methodlarının sonuç grafikleri verilmiştir. Şekillerde verilen robot kol eksen grafiklerinin sonuçları incelendiğinde, iki çıkarım yönteminin oldukça yakın sonuçlar elde ettiği gözlemlenmiştir.

Robot kolun, kontrolden önce tüm eklem açıları sıfır olarak belirlendiğinde görülen kol görünümü Şekil 6.18’te, kontrol sağlandıktan sonra eksenlerin verilen açı değerlerine göre görünümü ise Şekil 6.19’da verilmiştir [64].



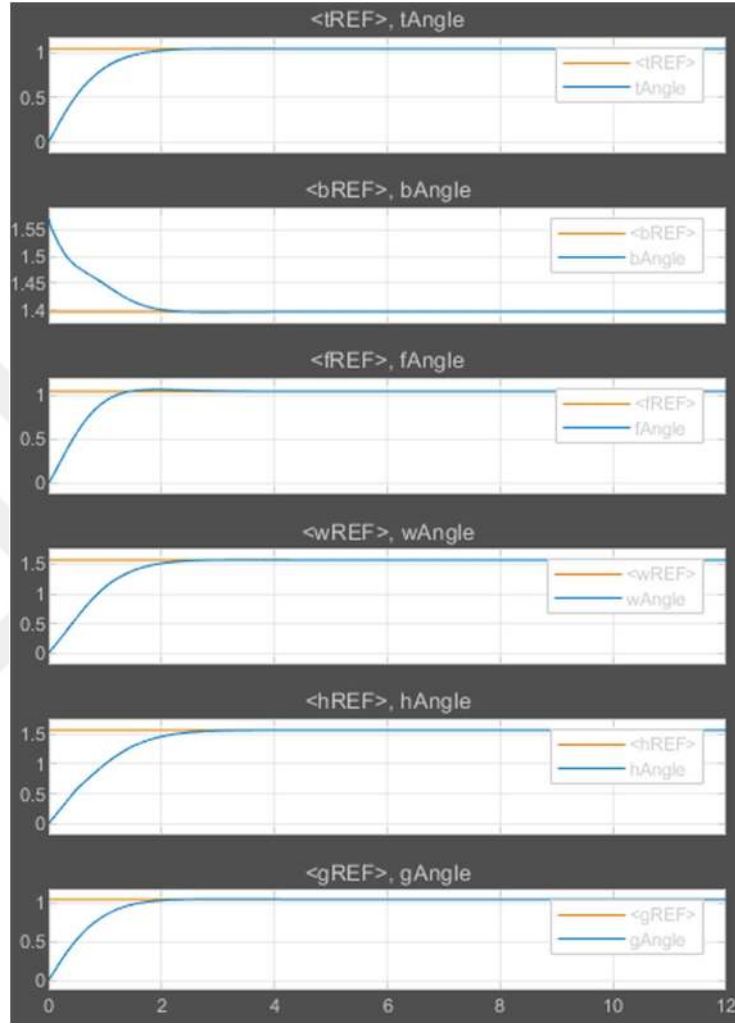
Şekil 6.18. Kontrol öncesi robot kol



Şekil 6.19. Kontrol sonrası robot kol

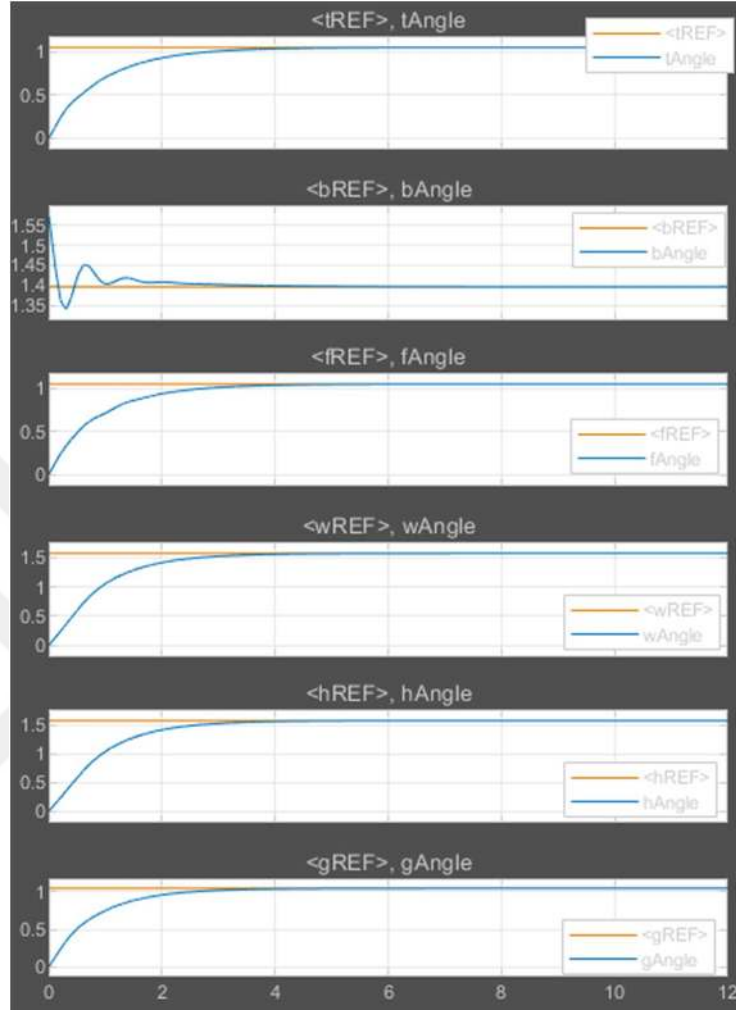
Başlangıç ve hedef açı değerleri belirlenerek oluşturulan referans hareket grafiği ile kontrolcüler sonucunda elde edilen hareket grafiklerinin karşılaştırılması yapıldıktan sonra, robot kol için ilk üç ekleme açı değerleri girilerek, hareket incelemesi yapılmıştır. Şekil 6.1’de verilen Matlab blok diyagramında yer alan kontrol bölümüne uygulanan girişlerden ayarlanabilir açı girişi bölümünün uygulanması ile birinci eksen için başlangıç açı değeri 0° , hedef açı değeri 60° olarak girilmiştir. İkinci eksen için başlangıç açı değeri 90° , hedef açı değeri 80° , üçüncü eksen başlangıç açı değeri 0° hedef açı değeri 60° olarak sisteme yazılmıştır.

Eklemlere girilen açı değerlerine göre robot kol için üç farklı kontrolcü ile sonuçlar elde edilmiştir.



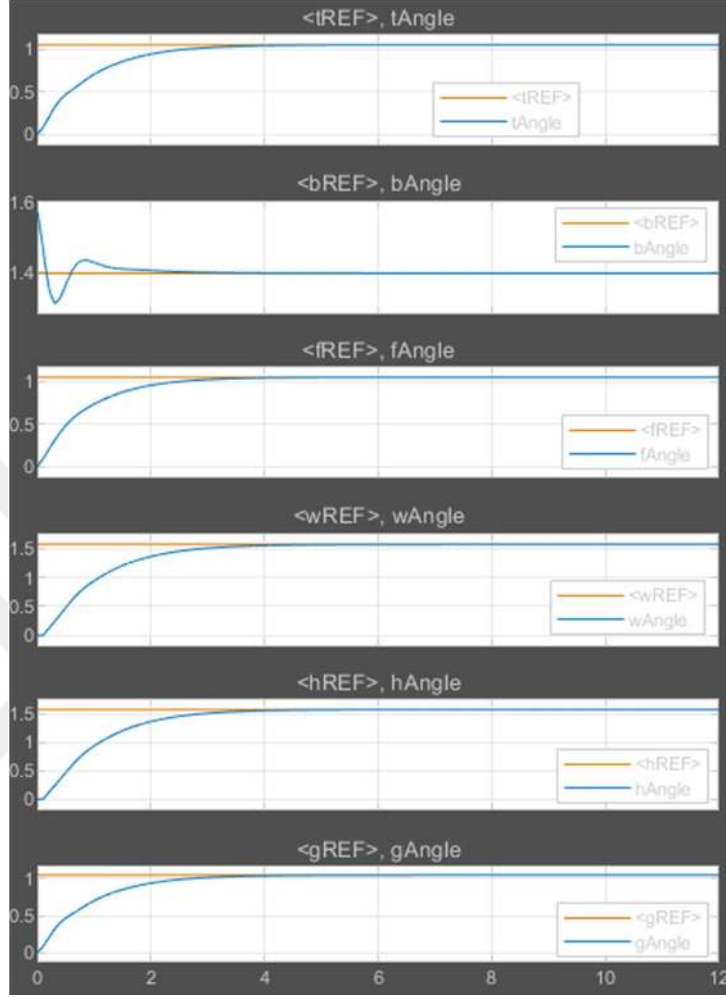
Şekil 6.20. Açı değerleri verilen robot kolun PID kontrol sonuçları

İlk olarak PID kontrolcü ile eksenlerin kontrolü gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.20’de verilen sonuç grafiğine göre PID kontrol ile robot kol, istenilen açı değerlerini belirli zaman kayıpları yaparak yakalamıştır.



Şekil 6.21. Açık değerleri verilen robot kolun Sugeno tipi Bulanık Mantık Denetleyici sonuçları

İkinci kontrolcü olarak tasarlanan Sugeno tipi Bulanık Mantık Denetleyici ile Şekil 6.21’de robot kolun verilen açı değerlerine ulaştığı gözlemlenmiştir. Özellikle ikinci eksen referans açısını yakalama olayında hızlı sonuç alınmaya çalışıldığı ancak bir gürültü yaşandığı açıkça yer almaktadır. Bu kontrol yöntemi ile birinci ve üçüncü eklem için PID kontrole göre hedef açısına geç ulaşan bir hareket gerçekleşmiştir.



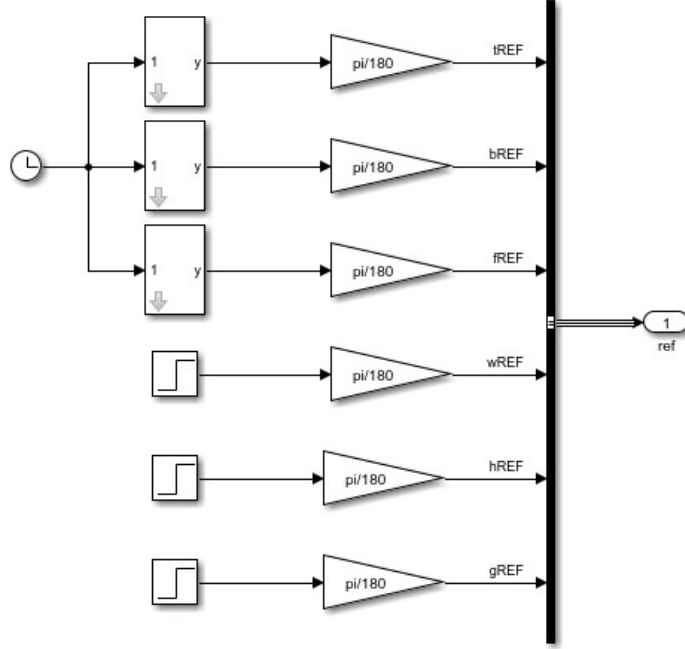
Şekil 6.22. Açık değerleri verilen robot kolun Mamdani tipi Bulanık Mantık Denetleyici sonuçları

Bir diğer kontrol yöntemi olan Mamdani tipi Bulanık Mantık Denetleyici ile eklemlerin istenilen açı değerlerine göre gerçekleştirdiği hareket grafiği Şekil 6.22’de yer almaktadır. Bu kontrolcü ile ikinci kontrol yöntemindekine yakın sonuçlar elde edilmiştir. Sadece ikinci eksen için daha az gürültülü bir sonuç bulunmuştur.

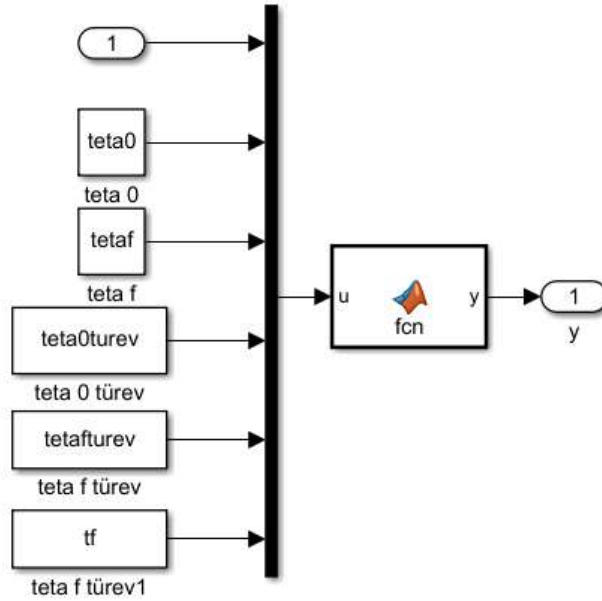
Robot kol için uygulanan tüm kontrol yöntemlerinin sonuçları karşılaştırıldığında, kontrol yöntemleri ile tam olarak uygun sonuçlara ulaşamadığı gözlemlenmiştir. Bu sonucu çözmek için tüm eksenlere aynı üyelik aralıklarına sahip olarak uygulanan Bulanık Mantık Denetleyicilerin her iki çıkarım tipi içinde eklemler için uygun sonuçlar üreten aralık dereceleri ayarlanmış ve kontrole bu şekilde devam edilmiştir.

Bölüm 5.3’te anlatılan yörünge planlamasının eklem uzayında kontrol çeşidi ile robot kol eklemlerinden ilk üç eklem için yörünge planlaması yapılmıştır. Şekil 6.20, 6.21 ve 6.22’de sonuçları gösterilen açı girişleri Matlab Step bloğu ile yapılmıştır. Yörünge planlaması

hesaplamaları yapıp, Matlab Simulink ortamında robot kol eklemlerine Şekil 6.23'teki yörünge planlaması girişi uygulanmıştır. Gösterilen yörünge planlamasının içerisinde Şekil 6.24'te gösterilen Matlab Function bloğu kullanılarak hesaplanan katsayılarının girişleri ayarlanmıştır.



Şekil 6.23. Eklemlere uygulanan yörünge planlaması



Şekil 6.24. Matlab function ile açış girişleri

Bölüm 5.3'te anlatılan yörünge planlaması konusunda yer alan eklem uzayında yörünge planlamasına göre matlab üzerinde uygulama yapılmıştır. Denklem 5.42'de verilen 3.dereceden polinom katsayıları matlab function bloğuna yazılmıştır. Şekil 6.21'deki Sugeno tipi çıkarım grafik değerlerini veren açı değerleri ile yörünge planlaması hesaplaması yapılmıştır. Şekil 6.18'de görüldüğü gibi robot kolun sıfır açılara göre konumunda ikinci eksen yani alt kol yatay olarak durmaktadır. Bu görüntüyü düzenlemek için tüm hesaplamalarda ikinci eksenin giriş açısı 90° olarak alınacaktır.

Birinci eksen için $\theta_0 = 0^\circ, \theta_f = 10^\circ, \dot{\theta}_0 = 0 \text{ mm/s}, \dot{\theta}_f = 0 \text{ mm/s}, t_f=12\text{s}$ olarak alınmıştır. Belirtilen açı değerlerinin girilmesi ile denklem 6.1'de konum denklemi bulunmuştur. Konum denkleminin türevinin alınması ile denklem 6.2'de hız denklemi elde edilmiştir. Hız denkleminin de türevinin alınması sonucunda denklem 6.3'te yer alan ivme denklemi oluşmuştur.

$$\theta(t) = (0.208).t^2 + (-0.011).t^3 \quad (6.1)$$

$$\dot{\theta}(t) = (0.416).t + (-0.034).t^2 \quad (6.2)$$

$$\ddot{\theta}(t) = (0.416) + (-0.069).t \quad (6.3)$$

İkinci eksen için $\theta_0 = 90^\circ, \theta_f = 0^\circ, \dot{\theta}_0 = 0 \text{ mm/s}, \dot{\theta}_f = 0 \text{ mm/s}, t_f=12\text{s}$ olarak alınmıştır. Yörünge planlamasının genel denklemine belirtilen değerlerin girilmesi ile denklem 6.4'te konum, denklem 6.5'te hız ve denklem 6.6'da ikinci eksen için ivme denklemleri hesaplanmıştır.

$$\theta(t) = 90 + (-1.875).t^2 + (0.104).t^3 \quad (6.4)$$

$$\dot{\theta}(t) = (-3.75).t + (0.312).t^2 \quad (6.5)$$

$$\ddot{\theta}(t) = (-3.75) + (0.625).t \quad (6.6)$$

Üçüncü eksen için $\theta_0 = 0^\circ, \theta_f = 70^\circ, \dot{\theta}_0 = 0 \text{ mm/s}, \dot{\theta}_f = 0 \text{ mm/s}, t_f=12\text{s}$ olarak alınmıştır. Denklem 6.6'da konum, denklem 6.7'de hız ve denklem 6.8'de ivme denklemleri verilmiştir.

$$\theta(t) = (1.45).t^2 + (-0.081).t^3 \quad (6.7)$$

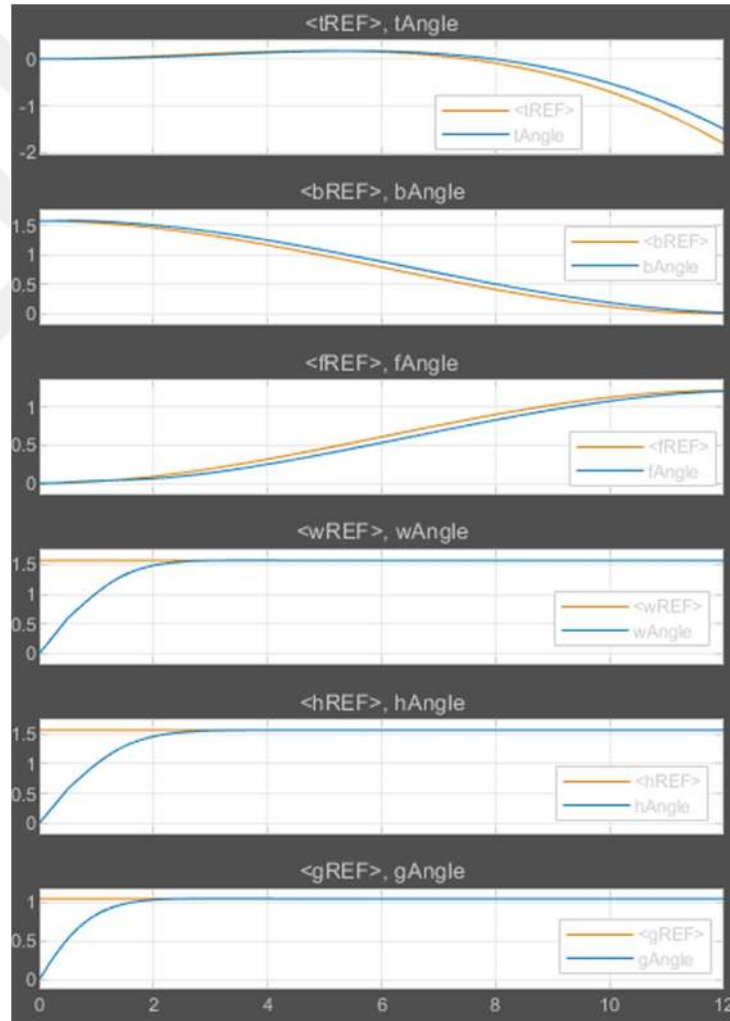
$$\dot{\theta}(t) = (2.9).t + (-0.243).t^2 \quad (6.8)$$

$$\ddot{\theta}(t) = (2.9) + (-0.486).t \quad (6.9)$$

Robot kol için doğrudan açı girişleri ile kontrol sağlandıktan sonra hedef noktası belirlenip, bu noktaya ulaşmak için gerekli açı hesapları ters kinematik analiz ile yapılmıştır. Kinematik analiz

sonucu her eksen için elde edilen açı değerleri kullanılarak yörünge planlaması hesaplamaları yapılmıştır. Robot kol eksenleri için üç farklı kontrolcü tasarlanmış, her bir kontrolcünün sonuç grafikleri verilmiştir.

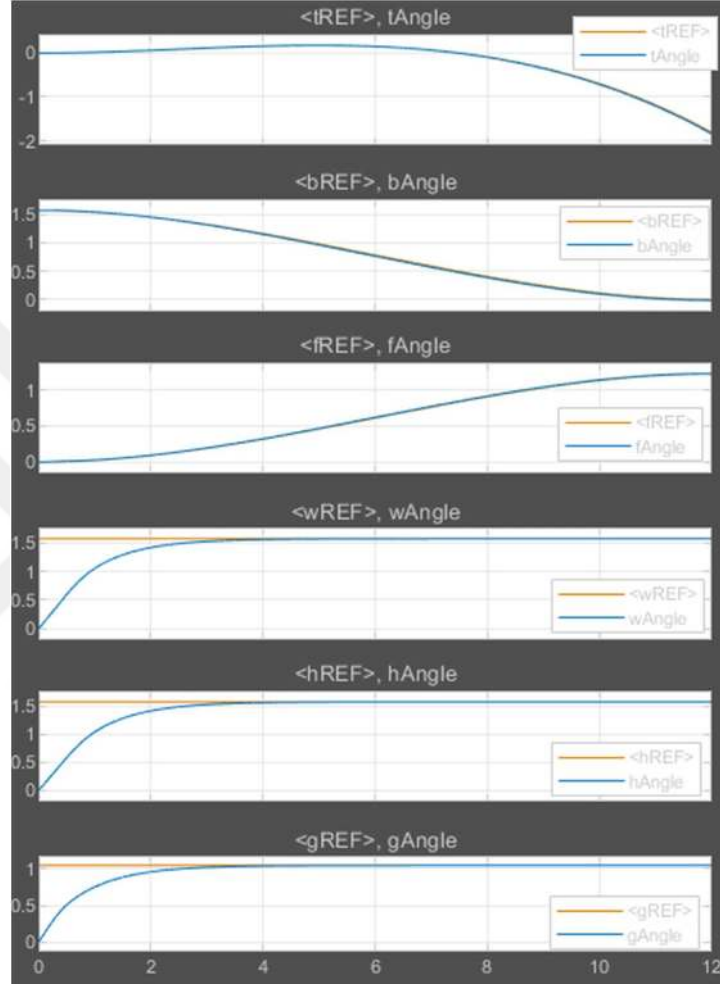
Şekil 6.23’de verildiği gibi robot kol eklemlerinden birinci, ikinci ve üçüncü eklemlere denklemler de verilen açı değerleri girilerek sistem çalıştırılmıştır. Yörünge planlaması yapılmadan önceki açı girişleri ile elde edilen sonuç grafikleri incelendiğinde, belirlenen açı değerlerine ulaşmak için yörünge planlaması ile parabolik bir grafik elde edildiği, doğrudan açı girişi olan grafiklerde ise düz bir değere ulaşılmaya çalışıldığı açıkça yer almaktadır.



Şekil 6.25. Yörünge planlaması uygulanan PID kontrol hareket grafiği

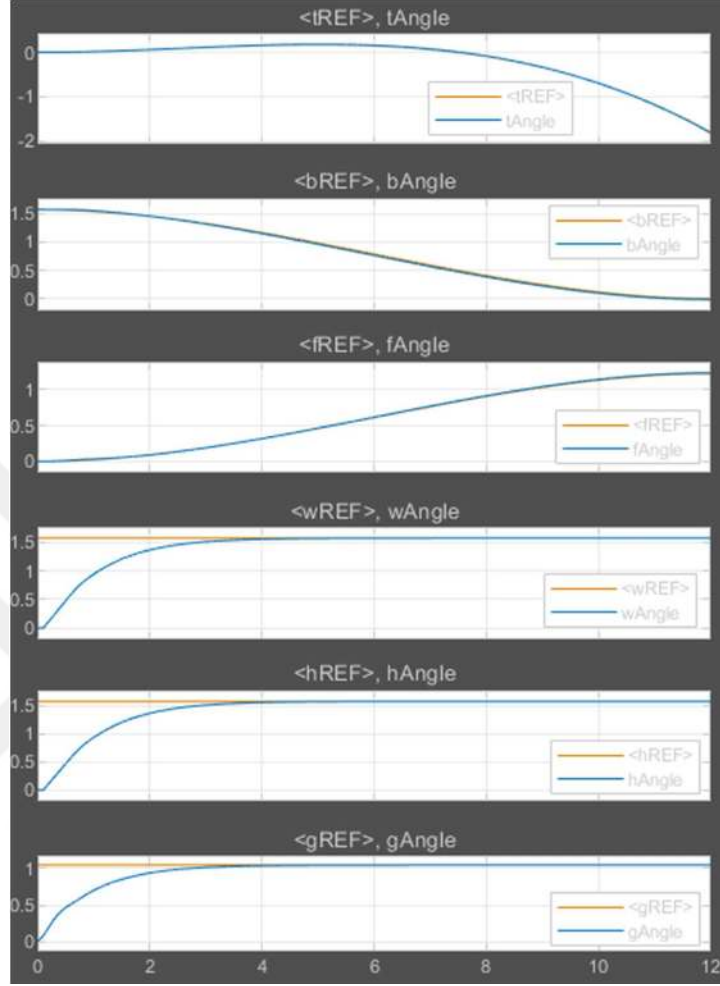
Robot kol eksenleri için ilk önce PID kontrolör kullanılarak kontrol sağlanmıştır. Yörünge planlaması yapılan robot kol eksenlerinin referans noktasına göre elde edilen sonuç grafiği Şekil 6.25’te verilmiştir. Hareket başlangıcında referans hareketi ile uyumlu olarak çalıştığı ancak

Çalışma süresi ilerledikçe harekette sapma olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle birinci eksen de hedef noktaya ulaşılamadığı açıkça yer almaktadır.



şekil 6.26. Yörünge planlaması uygulanan Sugeno tipi Bulanık Mantık Denetleyici hareket grafiği

Robot kol için hazırlanan ikinci kontrolör olarak Sugeno tipi çıkarım methoduna sahip Bulanık Mantık Denetleyici kullanılmıştır. İki girişli olarak tasarlanan kontrolör ile ters kinematik analiz ile elde edilen açı değerleri kullanılarak şekil 6.26’da kullanılan hareket grafiği elde edilmiştir. Grafik incelendiğinde referans grafiği ile eşdeğer hareket grafikleri elde edildiği gözlemlenmiştir.

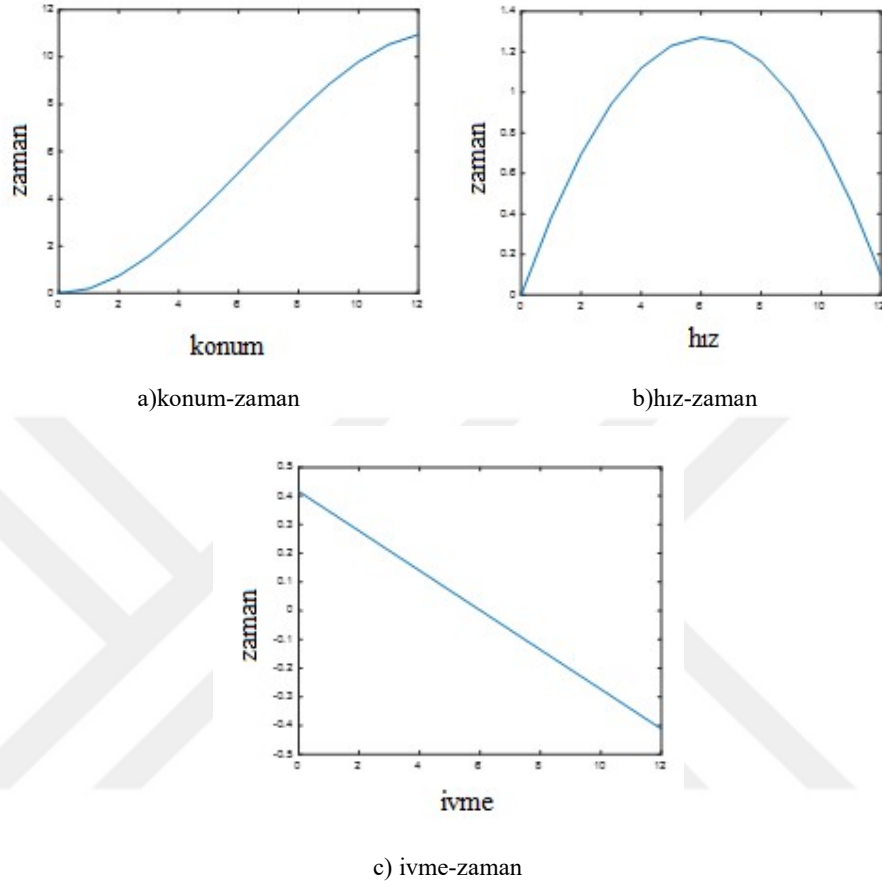


Şekil 6.27. Yörünge planlaması uygulanan Mamdani tipi Bulanık Mantık Denetleyici hareket grafiği

Bir diğer kontrolör olarak hazırlanan Mamdani tipi çıkarım methodu ile hazırlanan Bulanık Mantık Denetleyici ile referans ve hareket grafik sonuçları Şekil 6.27’de verilmiştir.

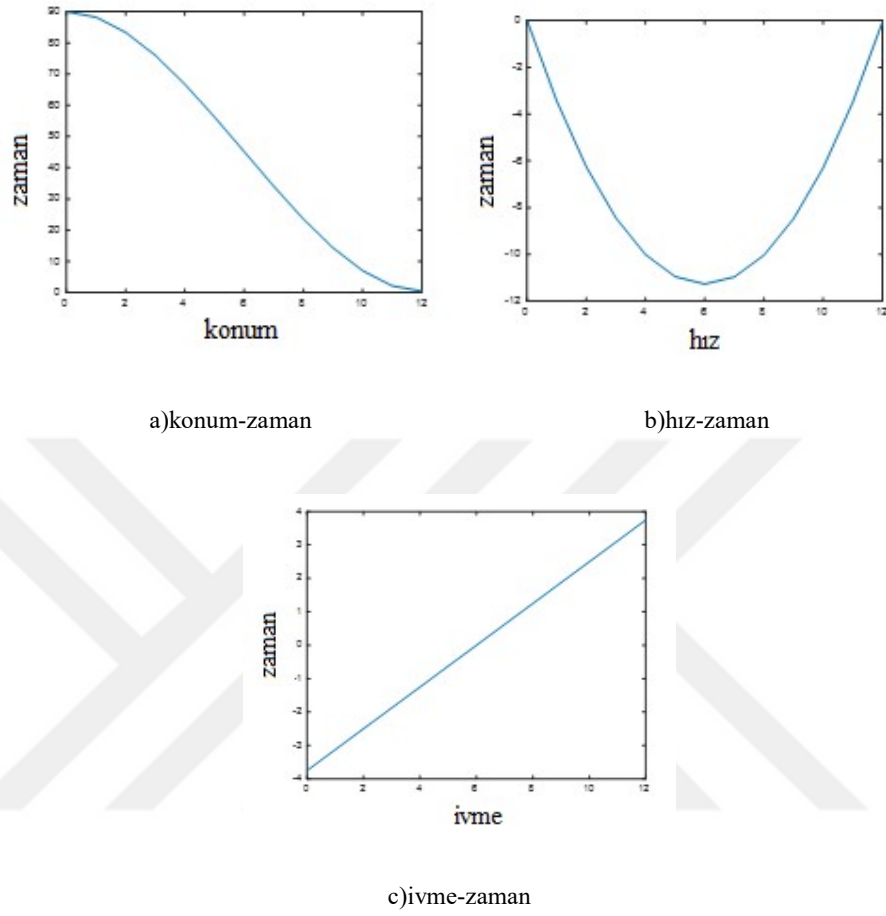
Şekil 6.25’de PID kontrol yöntemi ile yörünge planlaması uygulanması sonucu ile Şekil 6.26 ve Şekil 6.27’de Bulanık Mantık Denetleyici sonuç grafikleri verilmiştir. Tüm sonuçlar incelendiğinde PID kontrolör ile istenilen açı değerlerine göre oluşan hareket grafiğinin referans değerlere tam olarak ulaşmadığı, ikinci ve üçüncü eksenlerde başlangıç ve son noktalarda referans noktaya ulaşıldığı ancak birinci eksenle son noktanın referans noktaya ulaşamadığı görülmüştür. Bulanık Mantık Denetleyiciler ile gerçekleşen kontrollerde ise, grafiklerde yer aldığı gibi referans açı değerlerini oldukça yakın bir hareket grafiği çizen kontrol sonuçları elde edilmiştir.

Verilen açı değerlerine göre her eklem için hesaplanan yörünge planlaması denklemleri ile konum-zaman, hız-zaman ve ivme-zaman grafik çizimleri verilmiştir.



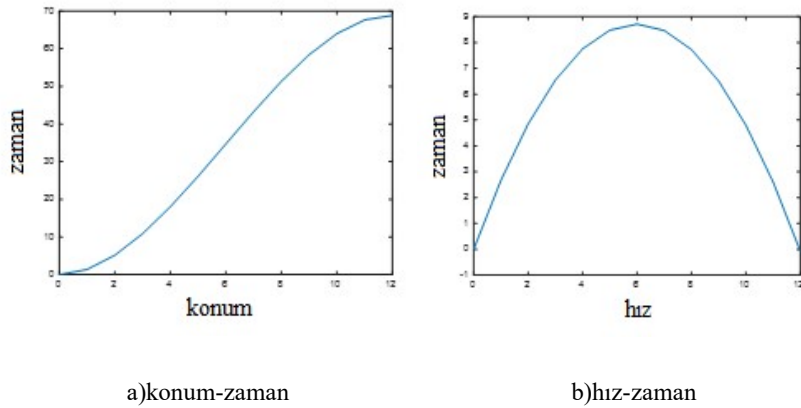
Şekil 6.28. Birinci eklemin a)konum-zaman , b)hız-zaman ve c)ivme-zaman grafikleri

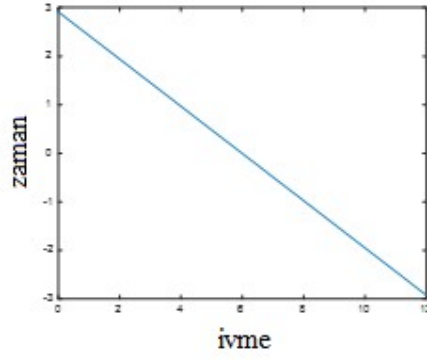
Birinci eksen için hesaplanan denklemlere göre konum, hız ve ivme grafiklerinin sonucu Şekil 6.28’de verilmiştir. Bu eksen için yörünge planlaması bölümünde verildiği gibi başlangıç açısı 0° , hedef açısı 10° olarak alınmıştır. 3.dereceden polinom denkleminin birinci ve ikinci türevleri alınarak hız ve ivme denklemleri elde edilmiştir. Polinom denklemleri incelenerek konum denkleminde belirtildiği gibi sıfırdan başlayıp istenilen değere doğru yönelen parabolik bir grafik elde edilmiştir. Hız denkleminde yer aldığı gibi sıfır ile başlayıp sıfır ile tamamlayan bir grafik sonucu bulunmuştur. Şekilde yer alan ivme grafiği ise hız grafiğine ters olarak elde edilmiştir. Böylece hesaplamaya uygun sonuçlara ulaşıldığı gözlemlenmiştir.



Şekil 6.29. İkinci eklem a)konum-zaman , b)hız-zaman ve c)ivme-zaman grafikleri

Şekil 6.29’da görüldüğü gibi ikinci eklem başlangıç açısı 90° , son açısı 0° alındığı için konum grafiğinde artıdan eksiye doğru bir hareket gerçekleşmiştir. Konum grafiğine paralel olarak hız grafiği de sıfır ile başlamış negatif olarak ilerlemiş ve tekrar sıfır noktasına gelerek grafiği sonlandırmıştır. İvme grafiği ise hız grafiğine ters olarak pozitif bir artış göstermiştir.



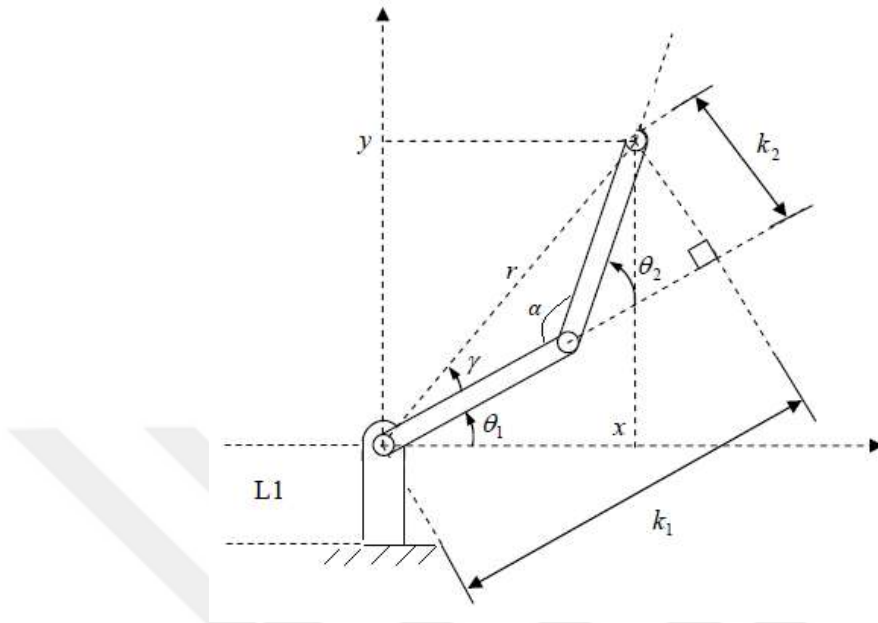


c) ivme-zaman

Şekil 6.30. Üçüncü eklemin a) konum-zaman , b) hız-zaman ve c) ivme-zaman grafikleri

Şekil 6.30'da üçüncü eklem konum, hız ve ivme grafikleri verilmiştir. Konum grafiği verilen açı değerlerine uygun olarak başlangıç için 0° , son konum olarak 70° açıyla eş değer sonuçlar üretmiştir. Hız grafiği de sıfır olarak başlamış çalışma zamanının tam ortasında maksimum seviyeye ulaşmış ve tekrar azalarak sıfırlanıp çalışmayı tamamlamıştır. İvme grafiği ise hız grafiği ile ters yönde bir eğilim göstermiştir. Böylece eklemlerine farklı açı değerleri girilmiş olan robot kolun, tüm eklemlerinin aynı sürede çalışmayı tamamlaması sağlanmıştır.

Bölüm 5.2'de anlatılan kinematik denklem çözümlerinden ters kinematik hesaplamaya göre robot kolun, kol uzunluklarının bilinmesi ile uç noktasının hedeflenen konuma gelmesi için gereken açı değerleri hesaplanabilir. Bu hesaplama sonucuna göre elde edilen açı değerlerine göre yörünge planlaması gerçekleştirilebilir. Bu özellik kullanılarak kol uzunlukları sırası ile $L_1=53\text{mm}$, $L_2=61.85\text{mm}$, $L_3=155.64\text{mm}$ olarak tasarlanan çalışmada, İlk eksenin sıfır noktasında olduğu bilinen ve $P_x=165.7\text{mm}$ $P_y=184.38\text{mm}$ hedef noktalarına ulaşması için gereken açı değerlerinin hesaplaması yapılmıştır.



Şekil 6.31. X-Y noktaları bilinen robot kolun geometrik çözümü [65]

Robot kolun koordinat düzlemi üzerinde görünümü Şekil 6.31’de verilmiştir. Ters kinematik hesaplamaya ait eşitlikler kullanılarak r uzunluğu hesaplanır. Bulunan r uzunluğu ile θ_2 açısı bulunur. Koordinat düzlemine bakılarak $P_x = x$ $P_y = L_1 + y$ olduğu gözlemlenmektedir $x = 165.7\text{mm}$ $y = P_y - L_1 = 131.38\text{mm}$ olarak bulunur.

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (6.10)$$

$$r^2 = x^2 + y^2 - 2 \cdot x \cdot y \cdot \cos(\alpha) \quad (6.12)$$

$$r = \sqrt{165,7^2 + (131.38)^2} = 211.46\text{mm}$$

x ve y değerlerinin Şekil 6.31’e bakarak bulunması ile denklem 6.10’da yer alan r değeri hesaplanmıştır. Denklem 6.12’de verilen kosinüs teoreminde x ve y robot kolun ikinci ve üçüncü eksenlerini oluşturan L_2 ve L_3 kollarının uzunluklarıdır. Hesaplanan r değerinin denklem 6.12’de yerine yazılması ile $\cos(\alpha)$ değeri 150° olarak bulunmuştur.

$$\theta_2 = 180 - \alpha \quad (6.13)$$

Denklem 6.13’te yer alan eşitliğe göre $\theta_3 = 30^\circ$ olarak bulunur.

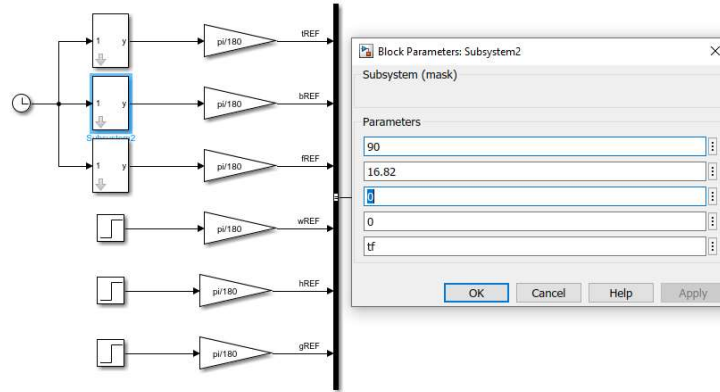
$$\theta_1 = \text{atan2}\left(\frac{y}{x}\right) - \text{atan2}\left(\frac{s_3.L3}{L2+c_3.L3}\right) \quad (6.14)$$

Ters Kinematik çözümlemede yapılan hesaplamalara göre denklem 6.14'teki eşitlik bulunmuştur.

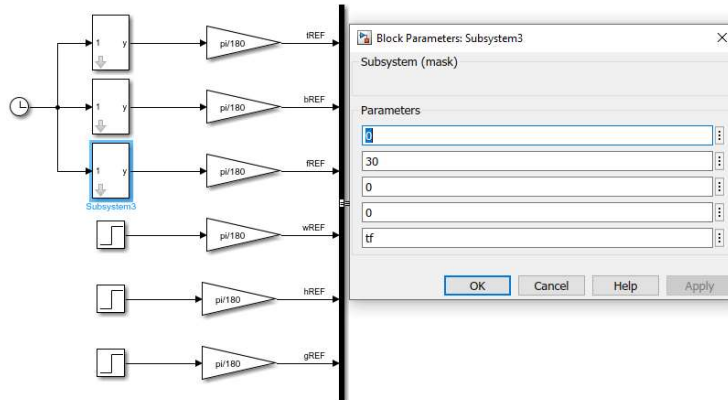
$$\theta_1 = \text{atan2}\left(\frac{131.38}{165.7}\right) - \text{atan2}\left(\frac{\sin(30).155.64}{61.85+\cos(30).155.64}\right) \quad (6.15)$$

Hesaplanan θ_2 değeri denklem 6.15'te yerine yazılmıştır. $\theta_1 = 16.82^\circ$ olarak bulunmuştur.

Şekil 6.31'da görülen θ_1 açısı ikinci eklemin, θ_2 açısı ise üçüncü eklemin dönüş açısını ifade etmektedir. Yapılan hesaplamaya göre son açı değerleri bulunan eklemlerin ilk açıları ve açıların türev değerleri sıfır olarak alınır, tf=12s olarak belirlenir ve ikinci ve üçüncü eklemlerin yörünge planlaması yapılır. Yörünge planlamasında Şekil 6.32'de ikinci eklemin, Şekil 6.33'de ise üçüncü eklemin yörünge planlaması için girişleri gösterilmiştir.



Şekil 6.32. İkinci eklemin yörünge planlaması girişleri



Şekil 6.33. Üçüncü eklemin yörünge planlaması girişleri

Denklem 6.16'da ikinci eksen için yörünge planlaması hesaplaması yapılmıştır

$$\theta(t) = 90 + \left(\frac{3}{12^2} (16.82 - 90) \right) \cdot t^2 + \left(-\frac{2}{12^3} (16.82 - 90) \right) \cdot t^3 \quad (6.16)$$

$$\theta(t) = 90 + (-1.52) \cdot t^2 + (0.084) \cdot t^3 \quad (6.17)$$

$$\dot{\theta}(t) = (-3.04) \cdot t + (0.254) \cdot t^2 \quad (6.18)$$

$$\ddot{\theta}(t) = (-3.04) + (0.762) \cdot t \quad (6.19)$$

. Denklem 6.17'nin elde edilmesi ile konum denkleminde ulaşılmıştır. Konum denkleminin birinci dereceden türevi alınarak elde edilen denklem 6.18 ile hız denkleminde bulunur. Hız denkleminin de türevi alınarak oluşan denklem 6.19 ikinci eksenin ivme denkleminin sonucudur.

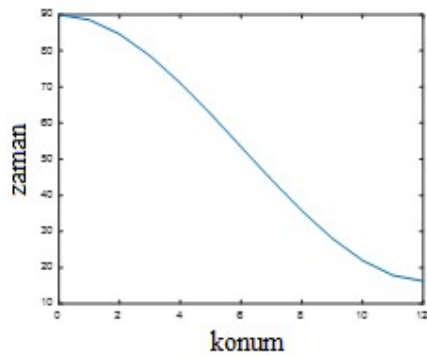
$$\theta(t) = \left(\frac{3}{12^2} (30) \right) \cdot t^2 + \left(-\frac{2}{12^3} (30) \right) \cdot t^3 \quad (6.20)$$

$$\theta(t) = (0.625) \cdot t^2 - (0.034) \cdot t^3 \quad (6.21)$$

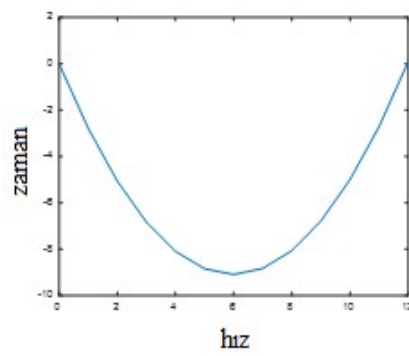
$$\dot{\theta}(t) = (1.25) \cdot t - (0.104) \cdot t^2 \quad (6.22)$$

$$\ddot{\theta}(t) = (1.25) - (0.208) \cdot t \quad (6.23)$$

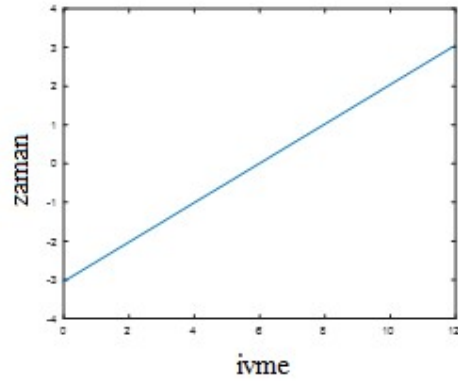
Ters kinematik hesaplama ile bulunan üçüncü eklem için son açı değeri ile bu eklem için yörünge planlaması yapılmıştır. Denklem 6.20'da üçüncü eklem için yörünge planlaması denkleminde bulunan açı değerinin yazılması ile oluşturulmuştur. Denklem 6.21 ise konum denkleminin katsayıları ile yazılmış halidir. Konum denkleminin birinci türevi ile denklem 6.22, ikinci türevi ile de denklem 6.23 elde edilmiştir. Bu denklemler sırası ile hız ve ivmeyi verir.



a)konum-zaman

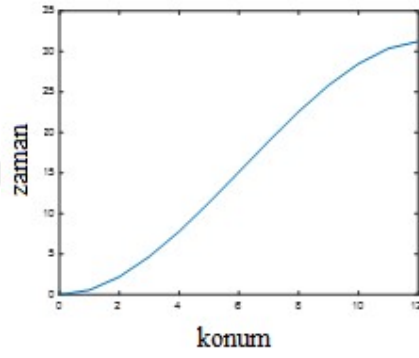


b)hız-zaman

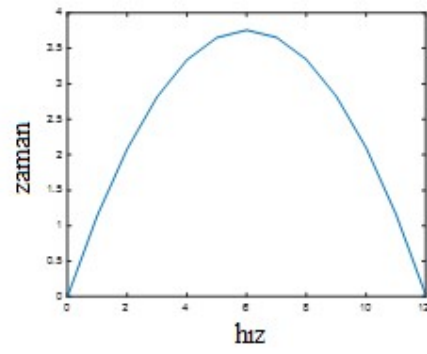


c) ivme-zaman

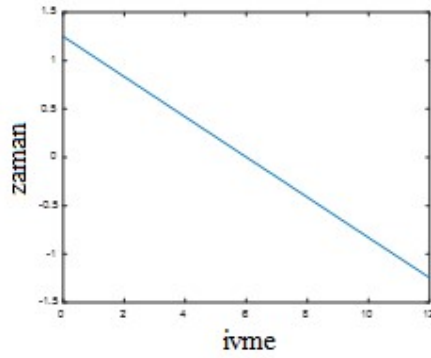
Şekil 6.34. Ters kinematik hesaplaması yapılan ikinci eklemin grafikleri



a) konum-zaman



b) hız-zaman



c) ivme-zaman

Şekil 6.35. Ters kinematik hesaplaması yapılan üçüncü eklemin grafikleri

Denklem 6.16 ve denklem 6.23 arasında yer alan sonuçlar ile hazırlanan ikinci ve üçüncü eklemin yörünge planlama denklemleri kullanılarak elde edilen sonuçlar Şekil 6.34 ve Şekil 6.35'te verilmiştir. Birinci eklemin konum, hız ve ivme grafikleri yörünge planlamasında kullanılan açı değerlerinin sıfır olması nedeni ile denklem çıkarımlarının hesaplanamaması nedeninden kaynaklanmaktadır. Diğer iki ekleme ait grafikler Şekil 6.34 ve Şekil 6.35'te verilmiştir.

İkinci eklemin 90°'den başlayıp 16,82°'de hareketi sonlandırması, konum grafiğinde açıkça gözlemlenmektedir. Bu nedenle negatif bir hız grafiği elde edilmiştir. Hız ve ivme grafiklerinin ters olması gerekçesi ile hıza ters bir ivme grafiği sonucuna ulaşıldığı Şekil 6.34'te yer almaktadır.

Üçüncü eklemin yörünge denklemleri incelendiğinde, konum grafiğinde yer aldığı gibi sıfırdan başlayıp hesaplanan açı değerine kadar artış yaşayan bir harekete ulaşılmıştır. Hareket süresi 12s olarak alınan çalışmada, hız grafiğinde yer alan maksimum değer hareket süresinin tam ortasında gerçekleşmesi ile doğru bir grafik elde edilmiştir.

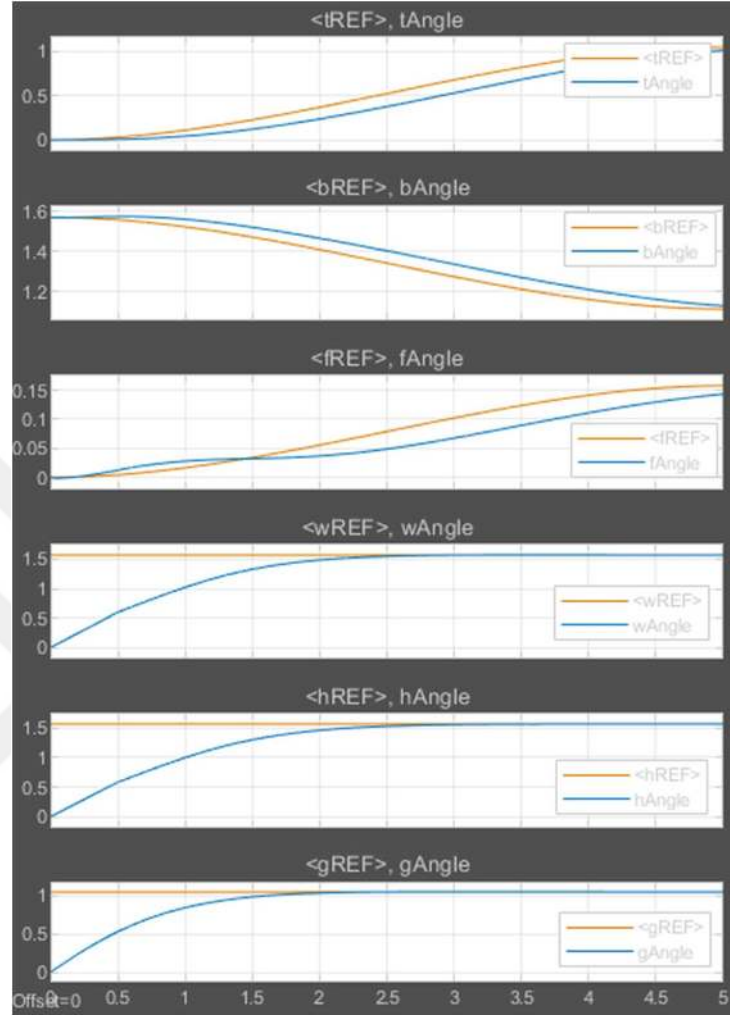
Robot kol hareket kontrolünde verilen açı değerlerine göre hesaplama yapılmıştır. İlk eksen açısı sıfır olarak alınarak verilen x,y noktalarına göre de hesaplama yapılmıştır. Şimdi tüm eksen açılarını hesaplamak için hedef noktadaki x-y-z noktaları bilinen robot kolun ters kinematik analiz ile açı hesaplaması ve yörünge kontrolü gerçekleştirilecektir.

Tüm eksenlerin sıfır noktasından başladığı baz alınarak, ilk üç eklemin hedef konumunun koordinatları olan, $P_x = 100\text{mm}$, $P_y = 250\text{mm}$ ve $P_z = 220\text{mm}$ noktalarına ulaşmak için başlangıç ve son hızı 0 mm/s, $t_f = 5\text{s}$ olduğu bilinen robot kol eksenlerinin yapması gereken açı değerleri ters kinematik hesaplaması yapılmıştır.

$$\theta_1 = 60^\circ,$$

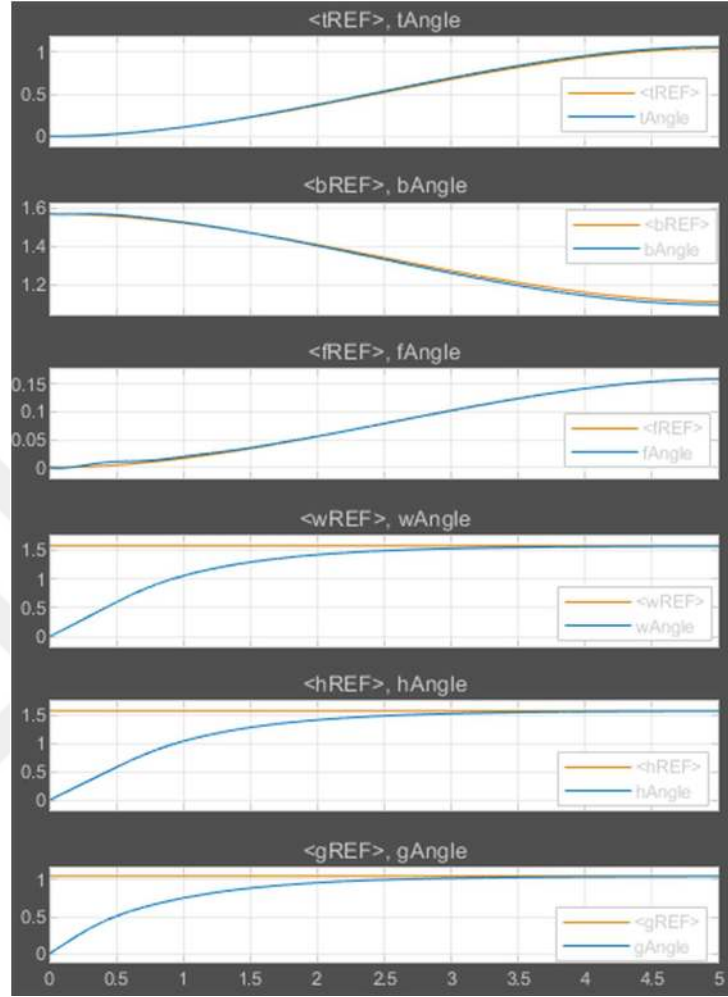
$$\theta_2 = 63.73^\circ$$

$$\theta_3 = 9.03^\circ \text{ olarak bulunmuştur. Her eklem için yörünge planlaması yapılmıştır.}$$



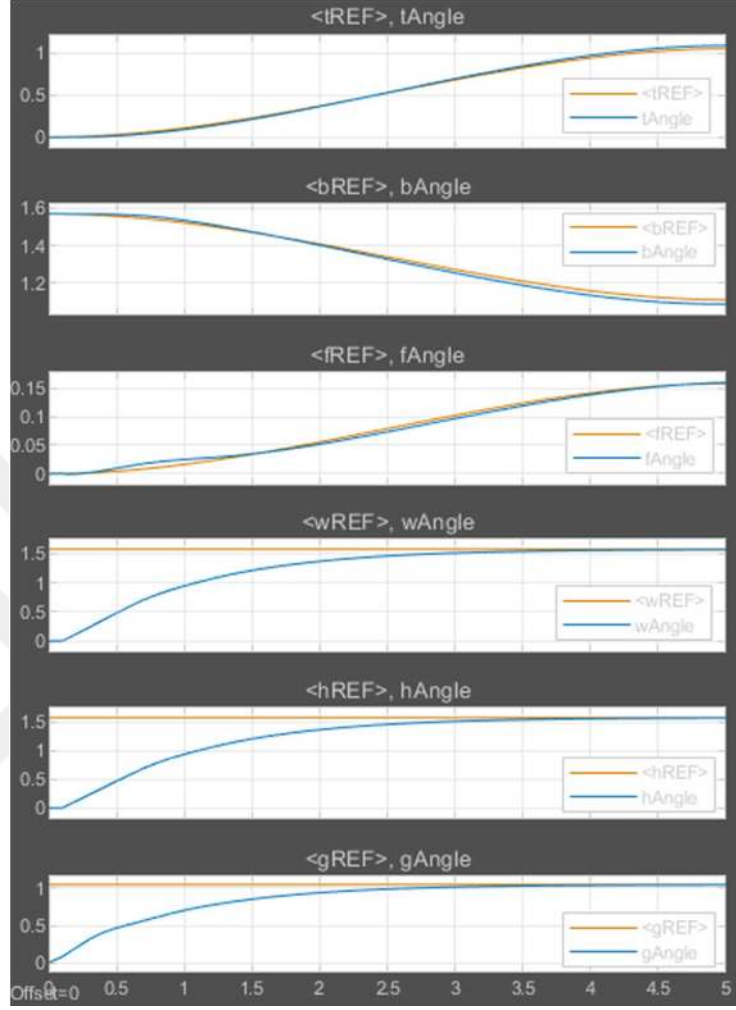
Şekil 6.36. Hedef noktası bilinen robot kolun PID kontrol hareket grafiği

Hedef konum koordinatları verilen robot kolun, istenilen noktalara ulaşması için gereken açı değerlerinin ters kinematik hesaplama ile bulunması sonucunda yörünge planlaması ile eksenlere açı değerlerinin girişi yapılmış ilk olarak PID kontrolör ile kontrol sağlanmıştır. Şekil 6.36'da yer alan grafik sonuçlarında da görüldüğü üzere, bu kontrol yöntemi ile istenilen açı değerlerinin oluşturduğu referans hareketine ulaşamadığı, harekette sapma yaşandığı gözlemlenmiştir.



Şekil 6.37. Hedef noktası bilinen robot kolun Sugeno tipi Bulanık Mantık Denetleyici hareket grafiği

Robot kol için uygulanan ikinci kontrol yöntemi Sugeno tipi Bulanık Mantık Denetleyici ile ters kinematikte elde edilen açılar değerlerinin oluşturduğu Şekil 6.37’de yer alan referans hareket grafiğini birebir takip eden bir kontrol sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 6.38. Hedef noktası bilinen robot kolun Mamdani tipi Bulanık Mantık Denetleyici hareket grafiği

Üçüncü kontrolör olan Mamdani tipi Bulanık Mantık Denetleyici de istenilen açı değerlerine ulaşan, Şekil 6.38’de verilen referans hareket grafiği ile eşdeğer ilerleyen bir hareket kontrolü gerçekleştirmiştir.

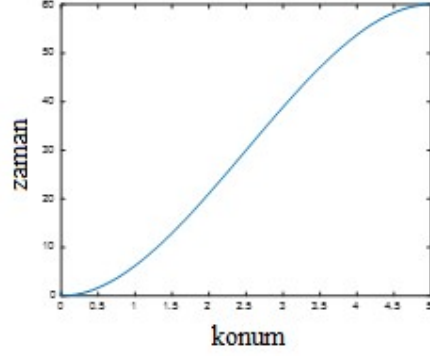
Böylece tüm kontrol yöntemlerinin sonuçları incelenerek Bulanık Mantık Denetleyicilerin PID kontrolöre göre yüksek oranda istenilen hareketleri gerçekleştirdiği sonucuna ulaşılmıştır. Bulanık Mantık Denetleyiciler kendi arasında incelenecek olursa da Mamdani tipi Denetleyicinin üçüncü eksen grafiklerinde küçük sapmalar yaşadığı ancak Sugeno tipi Denetleyici ile daha iyi sonuçlar alındığı gözlemlenmiştir.

Hedef açı değeri 60° olarak belirlenen birinci eksenin yörünge planlamasında konum, hız ve ivme denklemleri sırası ile denklem 6.24, 6.25 ve 6.26’da verilmiştir.

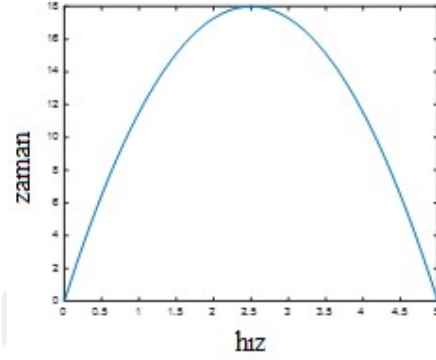
$$\theta(t) = (7.2).t^2 - (0.96).t^3 \quad (6.24)$$

$$\dot{\theta}(t) = (14.4).t - (2.88).t^2 \quad (6.25)$$

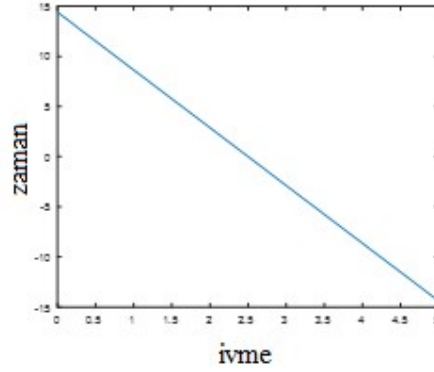
$$\ddot{\theta}(t) = (14.4) - (5.76).t \quad (6.26)$$



a)konum-zaman



b)hız-zaman



c)ivme-zaman

Şekil 6.39. Koordinat noktaları verilen robot kolun birinci ekleminin a)konum-zaman, b)hız-zaman ve c)ivme-zaman grafikleri

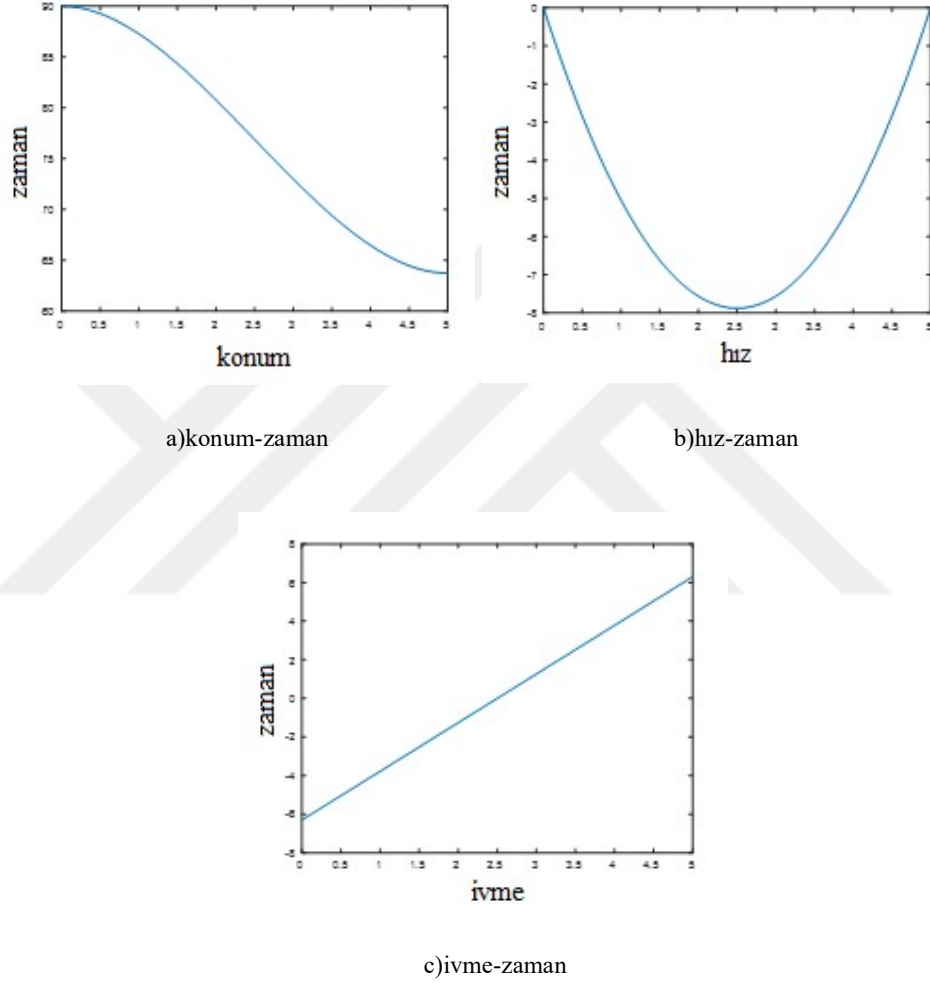
Hedef noktaları bilinen robot kolun birinci ekleminin ilk açısı 0° , hesaplama sonucu bulunan son açısı ise 60° olarak alınıp yörünge denklemleri hesaplanmıştır. Elde edilen Şekil 6.39'daki konum grafiği istenilen noktaya yumuşak bir hareket ile ulaşıldığını göstermektedir.

Yörünge planlamasına yazılan açı ve konum değerlerine göre ikinci eksen için sonuçlara denklem 6.27, 6.28 ve 6.29'da yer verilmiştir.

$$\theta(t) = 90 + (-3.15).t^2 + (0.42).t^3 \quad (6.27)$$

$$\dot{\theta}(t) = (-6.3).t + (1.26).t^2 \quad (6.28)$$

$$\ddot{\theta}(t) = (-6.3) + (2.52).t \quad (6.29)$$



Şekil 6.40. Koordinat noktaları verilen robot kolun ikinci eklemin a)konum-zaman, b)hız-zaman ve c)ivme-zaman grafikleri

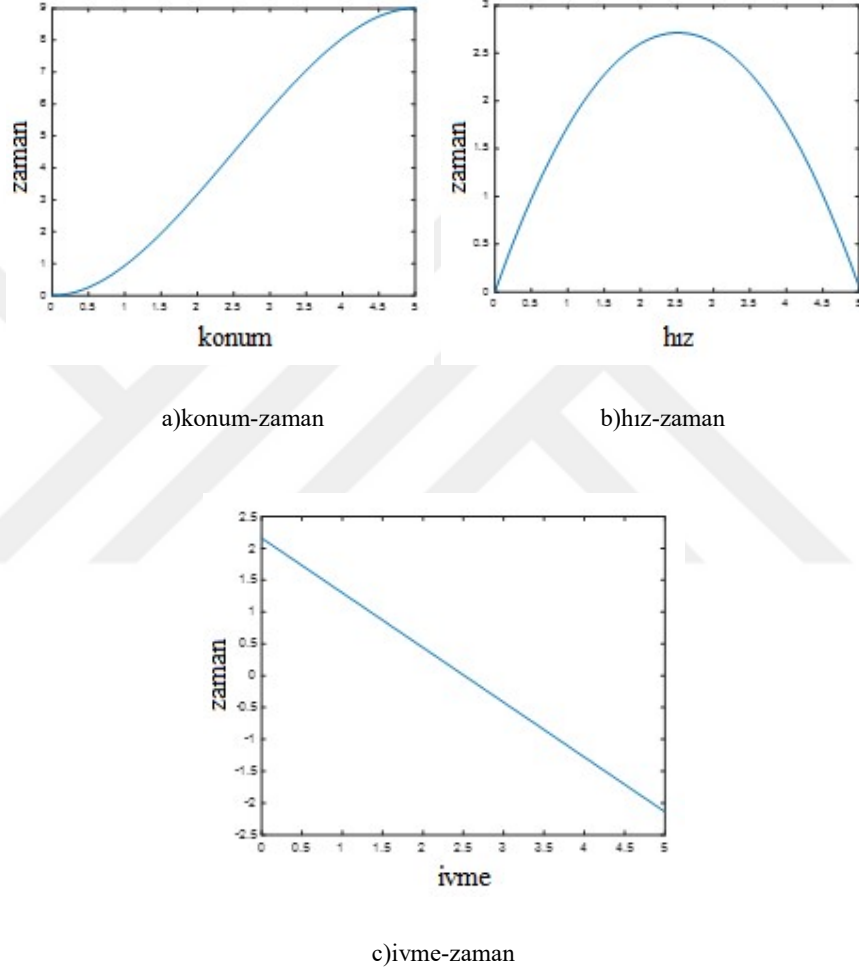
İkinci olarak hesaplaması yapılan eksen robot kolun başlangıç açısının sıfırdan farklı alınmasının nedeni daha önce belirtilmiştir. Bu nedenle ilk açısı 90° son açısı 63.73° derece olarak bulunmuş ve denklemler hesaplanmıştır. Başlangıç açısına göre bir azalma yaşayan ikinci eksenin konum grafiğinde de bu durum Şekil 6.40'da açıkça gözlemlenmiştir

Üçüncü eksen için denklem çözümleri 6.30, 6.31 ve 6.32'deki gibi bulunmuştur.

$$\theta(t) = (1.08).t^2 + (-0.14).t^3 \quad (6.30)$$

$$\dot{\theta}(t) = (2.16).t + (-0.43).t^2 \quad (6.31)$$

$$\ddot{\theta}(t) = (2.16) + (-0.86).t \quad (6.32)$$



Şekil 6.41. Koordinat noktaları verilen robot kolun üçüncü eklem için a)konum-zaman, b)hız-zaman ve c)ivme-zaman grafikleri

Bulunan açı değerlerine göre son hesaplama üçüncü eklem için yapılmıştır. 9.03° 'lik küçük bir açı ile hareket gerçekleştiren bu eklem yörünge planlaması denklemlerinde yer aldığı gibi konum, hız ve ivme grafiklerine Şekil 6.41'de yer verilmiştir. Konum grafiği, yapılan hesaplamalarda görüldüğü gibi sıfır ile başlayıp bulunan açı değerine doğru polinomal bir yönelim gerçekleştirmiştir. Hız grafiği ise çalışmanın başında belirtildiği gibi başlangıç ve bitiş aşamalarına sıfır olarak alınmış, grafikte bu nedenle sıfır noktasından başlayıp sıfır noktasında sonlanmıştır.

Tüm eklemlerin sonuçları karşılatırılacak olursa, konum grafikleri verilen birinci açı değeri ile başlayıp hesaplanan son açı değeri ile ulaşarak çalışmayı tamamlamıştır. Hız grafikleri tüm eklemler için sıfır olarak başlamış çalışma zamanının tam ortasında maksimum seviyeye ulaşmış kalan zamanda da tekrar sıfır noktasına dönmüştür. İvme grafikler her eklemden hız grafiklerine ters olarak sonuçlar elde etmiştir Böylelikle eklemlerin açı değeri ne kadar farklı olursa olsun istenilen hedef noktasına aynı zamanda ulaşım sağlanmıştır.



7. SONUÇLAR

Solidworks programı üzerinden gerçekleştirilen robot kol tasarımı kontrol uygulamaları için Matlab/Simmechanics ortamına aktarılmıştır. Altı eksen den oluşan robot kol için her eksene tek tek PID ve Bulanık Mantık Denetleyici bağlantıları yapılmıştır. Kullanılan Bulanık Mantık Denetleyici için Sugeno ve Mamdani çıkarım methodlarına sahip iki farklı kontrolör hazırlanmıştır. İki çıkarım tipi için de iki girişli ve tek çıkışlı bir sistem hazırlanmıştır. Sugeno ve Mamdani tipi çıkarım yöntemlerinin temel farklı olan çıkış üyelik fonksiyonları, Sugeno tipi için fonksiyonel, Mamdani tipi için beş üyelik fonksiyonu şeklinde tasarlanmıştır. Mamdani tipi çıkarım methodunda girişler beş farklı üyelik fonksiyonu ile oluşturulmuştur. Dolayısı ile 25 kurallı bir kural tablosu elde edilmiştir.

Robot kol hareket kontrolü için referans noktaları belirlenen çalışmada hem PID kontrol hem de iki farklı çıkarım yöntemi kullanılarak Bulanık Mantık Denetleyici ile gerçekleştirilmiştir. Elde edilen hareket grafikleri incelendiğinde Bulanık Mantık Denetleyici'lerin PID kontrolöre göre referans hareketini daha iyi yakaladığı görülmüştür. Altı serbestlik derecesinden oluşan ancak üç serbestlik derecesinin yalnızca gripper hareketini oluşturulduğu robot kolda, eklemlerin hareketlerini belirleyen üç eksen için kontrol sağlanmıştır.

Tasarlanan üç farklı kontrolcü ile robot kol hareket eksenlerine açılışları gerçekleştirilmiş ve karşılaştırma yapılmıştır. Elde edilen grafiklere göre PID kontrolör istenilen hareket grafiğini küçük bir sapma ile takip etmiştir. Bulanık Mantık Denetleyiciler incelendiğinde ise her ikisi de birinci ve üçüncü eksenlerde referans değerini belirli bir zaman kaybindan sonra yakaladığı ancak ikinci eksen de daha erken ulaşmaya çalışıldığı bu nedenle de harekette bir gürültü olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bulanık Mantık Denetleyicilerde tüm eksenler için aynı aralık derecesine sahip üyeler kullanılmıştır. Elde edilen hareket grafiği sonucunda iyileştirme yapılabilmesi için eklemlere yerleştirilen Bulanık Mantık Denetleyicilerde farklı üyelik aralıkları denenmiş daha iyi sonuçlar alınmıştır.

Çalışmada yer alan kinematik hesaplamalar kullanılarak hedef noktaları belirlenmiş, robot kolun bu noktalara ulaşması için gerekli açılış değerleri ters kinematik analiz ile hesaplanmıştır. Bulunan açılış değerleri eksenlere yörünge planlaması ile girilmiştir ve robot kolun hareket grafikleri incelenmiştir. Üç kontrol yönteminden PID kontrolör ile hesaplanan açılış değerlerinin hareket grafiklerinde uygun sonuçlara ulaşamadığı, Sugeno ve Mamdani tipi Bulanık Denetleyiciler ile çok yakın sonuçlar elde edildiği ancak küçük farklılıkların olduğu sonuçları bulunmuştur. Dolayısı ile bu çalışmada uygulanan kontrol yöntemlerinden en iyi cevaplar Sugeno tipi Bulanık Mantık Denetleyici ile elde edilmiştir.

İlerideki çalışmalarda, ters kinematik hesaplaması geometrik yöntem ile gerçekleştirilen bu çalışmada yörünge planlaması alanında doğrudan hedef noktalar girilerek otomatik hesaplamalar yapılması önerilir.



KAYNAKLAR

- [1] Yarım, M.A. (2004). *Robot Control Over Internet Using TCP/IP Protocol*, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [2] Alanoğlu, Z. (2017). *Altı Eksen Robot Kol Tasarımı ve Raspberry Pi Tabanlı Robot Görme Uygulaması*, Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [3] Yüzgeç, U., Büyüktepe, H. E. ve Karakuzu, C. (2016). Kablosuz Eldiven Sistemi İle Kontrol Edilen Robot Kol Tasarımı, *Türkiye Bilişim Vakfı Bilgisayar Bilimleri Ve Mühendisliği dergisi*, cilt 9(2), ss. 35-42
- [4] Lin, C.C., Gonzalez, P., Cheng, M.Y., Luo, G.Y., Ve Kao, T.Y. (2016). Vision Based Object Grasping Of Industrial Manipulator, *In 2016 International Conference On Advanced Robotics And Intelligent Systems (ARIS)* (Pp. 1-5). IEEE
- [5] Tektaş, Ü.A. (2010). *İki Eklemlili Robotun Lineer Olmayan Kontrol Yöntemleriyle Kontrolü*, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik Ve Fen Bilimleri Enstitüsü
- [6] Yazar, M.N. (2010). *Üç Eksenli Robot Kolu Tasarımı Ve Uygulaması*, Yüksek Lisans Tezi, Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [7] Hacıoğlu, Y. (2004). *Bir Robotun Bulanık Mantıklı Kayan Kipli Kontrolü*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [8] Danışmaz, M. (2008). *İki Eklemlili Robot Kolun Dinamik Analizinin Yapılması*, Yüksek Lisans Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [9] Durmaz, U. (2007). *Bir Robot Kolunun Sinirsel Bulanık Kontrolü*, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [10] Çolak, A.K. (2008). *Bir Dc Motor ile Sürülen Konum Kontrol Sisteminin Konum Algılayıcısız Kontrolü*, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [11] Aytan, E. (2007). *İki Eksenli Robot Kolunun Genetik Tabanlı Bulanık Mantık Kontrolü*, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [12] Ayberk, A. (2001). *Visual and Tracking Control of a Robot Manipulator*, Yüksek lisans tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [13] Çalışkan, A. (2004). *Mekatronik Sistemlerde İnternet Tabanlı Kontrol ve Kartezyen Robot Üzerinde Bir Uygulama*, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [14] Bostan, B. (2004). *Puma 560 Robotunun Hesaplanmış Moment Metoduyla Kontrolü*, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [15] Kazan, R. ve Tiryaki Eğrisöğüt, A. (2005). SCARA Robot Dinamiğinin Yapay Sinir Ağları Kullanarak Modellenmesi. *Mühendis ve Makina Dergisi*, ss.550
- [16] Tonbul, T. Ve Sarıtaş, M. (2003). Beş Eksenli Bir Edubot Robot Kolunda Ters Kinematik Hesaplamalar ve Yörünge Planlaması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, cilt 18(1).
- [17] Korkmaz, A. (2012). Robot Nedir, Asp.Net ve C# ile Web Yazılım& Robotik Projeleri
- [18] İspir, T. (2019). *Endüstriyel Amaçlı Bir Otonom Robotun Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü

- [19] Spong, M.W., Hutchinson, S., ve Vidyasagar, M. (2004). Robot dynamics and control. *Vol. 28. Automatica*, 5-303.
- [20] Ortatepe, Z. (2015). *Bulanık Mantık Tabanlı Sinirsel Ağlarla Robot Kontrolü*, Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [21] Sakarya, A. (2010). *Humonoid Robot Bacağı Tasarımı ve Yürüme Konumlarına Göre Analiz*, Bitirme Projesi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi
- [22] Akı, M.O. Robot Bilimi Robotların Sınıflandırılması, Trakya Üniversitesi İpsala Meslek Yüksekokulu Ders Notları
- [23] Buğday, M. (2018). *Endüstriyel Robot Kollarının Tasarımından Kaynaklanan Ölü Yüklerin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Optimize Edilmesi Ve İşletme Maliyetlerine Etkisinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [24] Geliş, K. (2014). Endüstriyel Robotlar, Meslek Yüksekokulu Elektrik ve Otomasyon Bölümü *Mekatronik Programı Ders Notları*
- [25] Hamida El Naser, Y. (2018). *Endüstriyel Amaçlı Robot Kol Tasarımı ve Üretimi*, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [26] Gülesin, M. (2015). Endüstriyel Robotlar, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Ders Kitabı
- [27] Bayrak, A. (2007). *Beş Eksenli Bir Robot Kolumun Simülasyonu ve Kontrolü*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [28] Yıldırım, M.Y. (2019). *Gerçek Zamanlı Görüntü İşleme Temelli Al-Bırak Yapabilen Endüstriyel Robot Kol*, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [29] Bingül, Z. ve Küçük S. (2009). Robot Kinematiği, Birsen Yayınevi
- [30] Yavuz, E. (2015). 3 Serbestlik Dereceli (3R) Bir Robot Manipülatörün Kontrolü ve Görüntü İşlemeye Dayalı Nesne Taşınması, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [31] Vatansever, F. Ve Şen, D. (2013). Genetik Algoritma Tabanlı Pıd Kontrolör Simülatörü Tasarımı, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Cilt 18, Sayı 2
- [32] Paz, R. A. (2001). The Design Of The PID Controller, *Klipsch School Of Electrical And Computer Engineering*, 8, 1-23
- [33] Malhotra, R., Kaur, T. Ve Deol, G.S. (2011). DC Motor Control Using Fuzzy Logic Controller, *International Journal Of Advanced Engineering Sciences And Technologies*, Cilt 8(2), Ss 291-296
- [34] Hekimoğlu, B., Ekinci, S., Demiray, V., Doguruci, R., Ve Yıldırım, A. (2018). *Speed Control Of DC Motor Using PID Controller Tuned By Salp Swarm Algorithm*. Proc. IENSC, pp. 1878-1889.
- [35] Zadeh L.A. (1965). *Fuzzy Sets, Information and Control*, V.8, pp. 338-353
- [36] Kıyak, E., Kahvecioğlu, A. (2003). *Bulanık Mantık ve Uçuş Kontrol Problemine Uygulanması*. Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi, cilt 1/2, ss 63-72.
- [37] Zadeh, L.A. (1991). *Fuzzy Logic, Principles, Application and Perspectives*, University of Oklahoma, Norman OK
- [38] Zhang H.C., Huang S.H. (1994). *A Fuzzy Approach to Process Plan Selection*, IJ. of Pro. Res., V.32. N. 6. pp. 1265-1279
- [39] Klir G.J., Folger T.A. (1988). *Fuzzy Sets, Uncertainty, and Information*, Prentice-Hall, Inc..

- [40] LEE, C.C., (1990). *Fuzzy Logic In Control Systems:Fuzzy Logic Controller*, Part 2, IEEE, Transactions On Systems And Cybematics, Vol.20, No.2
- [41] Pehlivan, İ. (2001). *Bulanık Mantık Kontrolörler ile Klasik Pıd Kontrolörlerin Karşılaştırılması ve Bir Bulanık Mantık Kontrolör Tasarımı*, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [42] Nguyan, H.T., Walkey E.A., (1996). *A First Course in Fuzzy Logic*, Chapman and Hall.
- [43] KOSKO, B., (1993). *Neural Network and Fuzzy Systems*, Academic Press
- [44] Altaş, İ. H. (1999). Bulanık Mantık: Bulanıklılık Kavramı, *Enerji, Elektrik, Elektromekanik-3e*, Sayı 62, ss.80-85
- [45] Zadeh, L.A., Kacprzyk, J. (1992). *Fuzzy Logic for The Management of Uncertainty*, Newyork: John Wiley&Sons Inc., p.214.
- [46] Atin, M. H. (1999). *Bulanık Lineer Programlama* (Basılmamış Yüksek Lisans Tezi), Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [47] Elmas Ç. (2003). *Bulanık Mantık Denetleyiciler*, Ankara: Seçkin Kitabevi.
- [48] Ertuğrul, İ. (1996). *Bulanık Mantık ve Bir Üretim Planlamasında Uygulama Örneği* (Basılmamış Yüksek Lisans Tezi) Pamukkale Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü
- [49] Maiers J. ve Sherif Y. S., (1985). *Applications of Fuzzy Set Theory*, IEEE Trans. Systems,Man, and Cybernetics, SMC-15, 1[175-189
- [50] Ömür, Y.G. (2009). *Adaptif Bulanık Denetleyici ile Doğrusal Olmayan Sistem Kontrolü* (Doctoral dissertation, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [51] Passino, K. M., Yurkovich, S., ve Reinfrank, M. (1998). *Fuzzy control* (Vol. 42, pp. 15-21). Reading, MA: Addison-wesley.
- [52] Uçuk, S. (2009). *Bir Vinçteki Yük Salınımının Bulanık Mantık Tabanlı Kontrolü*, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [53] Hacımurtazaoglu., M. (2013). *Bulanık Mantık ile Manyetik Kilit Uygulaması*, XV.Akademik Bilişim Konferans Bildirileri, Akdeniz Üniversitesi
- [54] Lochan, K., ve Roy, B.K. (2015). *Control Of Two-Link 2-Dof Robot Manipulator Using Fuzzy Logic Techniques, A Review*. In Proceedings Of Fourth International Conference On Soft Computing For Problem Solving (Pp. 499-511). Springer, New Delhi.
- [55] Güvenç, U., Sönmez, Y., Ve Biroğul, S. (2007). *Bulanık Mantık Denetimli Da-Da Çeviricileri İçin Geliştirilen Bir Eğitim Seti*, Politeknik Dergisi, 10(4), 339-346.
- [56] Şen, Z. (2001). *Bulanık Mantık ve Modelleme İlkeleri*, Bilge Kültür Sanat, İstanbul.
- [57] Keskinkılıç, F. (2018). *Mühendislik Tasarım Sürecinde Bulanık Mantık ve Bulanık Yapay Sinir Ağı Kullanımı*, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [58] Balas C.E., Koc L., Tür R., (2010) *Artificial neural networks based on principal component analysis, fuzzy systems and fuzzy neural networks for preliminary design of rubble mound breakwaters*, Applied Ocean Research 32, 425-433,
- [59] Mamdani, E. H. (1974). *Application of fuzzy algorithms for simple dynamic plant*, Proc. IEEE, 121(12), 1585–1588

- [60] Dolaş, K., (2016). *Bulanık .Mantık Yöntemiyle Risk Değerlendirmesi: Matbaa Sektörü Örneği, Yüksek Lisans Tezi*, Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü
- [61] Pani A.K., Mohanta H.K. (2016). *Online Monitoring Of Cement Clinker Quality Using Multivariate Statistics And Takagisugeno Fuzzy-Inference Technique*, Control Engineering Practice, 57, 1-17,
- [62] Takagi, T., and Sugeno, M. (1985). *Fuzzy Identification Of Systems And Its Application To Modeling And Control*, IEEE Trans. Syst. Man Cybern., 15, 116–132.
- [63] Cho, H.C., Han, S.J., Heo, I, Kang, H., Kang, W.H. and K.S. Kim, K.S. (2020) *Heating Temperature Prediction of Concrete Structure Damaged by Fire Using a Bayesian Approach*, Sustainability, 12(10), 1-18. doi:10.3390/su12104225.
- [64] Mathworks, Matlab/Mathworks, [Çevrimiçi]. Available:
https://www.mathworks.com/help/releases/R2021a/search.html?qdoc=cst_robotarm&selectedsource=mw&s_tid=doc_ta. [Erişildi: Ekim 2021].
- [65] S. Krishna, RosRobotics, [Çevrimiçi]. Available:
<https://www.rosroboticslearning.com/inverse-kinematics>. [Erişildi: Kasım 2021].
- [66] Uzun, S., Akkuş, N., ve Toz. M., (2017). *5 Eksenli Manipülâtörün Eklem Uzayında Yörünge Planlaması*, Politeknik Dergisi cilt 20 (1), ss 151-157

ÖZGEÇMİŞ

Hicran EBOĞLU

KİŞİSEL BİLGİLER

[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]

ARAŞTIRMACI BİLGİLERİ

[REDACTED]	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]

EĞİTİM BİLGİLERİ

[REDACTED]	[REDACTED]
	[REDACTED]
	[REDACTED]
	[REDACTED]
	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]
	[REDACTED]
[REDACTED]	[REDACTED]

ARAŞTIRMA DENEYİMİ

- ✓ Kullandığınız laboratuvar cihazları, bildiğiniz deney sistemleri gibi bilgiler veriniz
- ✓ Bildiğiniz bilgisayar programlama dillerini yazınız (C-C#-C++,MATLAB, ANSYS,SOLİDWORKS,PROTEUS,FRITZING,JAVA SCRIPT)
- ✓ Kullanabildiğiniz bilgisayar programlarını yazınız (MATLAB, PROTEUS, SOLIDWORKS,C#)