

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SİNİRSEL BULANIK TABANLI KAYAN KİPLİ
KONTROL İLE DÖRT SERBESTLİK DERECELİ BİR
ROBOTUN KONTROLU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak. Müh. Mehmet KORKMAZ

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : MAKİNE TASARIMI VE İMALAT
Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Şinasi ARSLAN

Mayıs 2012

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ


SİNİRSEL BULANIK TABANLI KAYAN KIPLI
KONTROL İLE DÖRT SERBESTLİK DERECELİ BİR
ROBOTUN KONTROLU


YÜKSEK LİSANS TEZİ


Mak. Müh. Mehmet KORKMAZ

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : MAKİNE TASARIMI VE İMALAT

Bu tez 14/06/2012 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Yrd. Doç. Dr.
Şinasi ARSLAN

Jüri Başkanı

Prof. Dr.
Saadettin AKSOY

Üye

Yrd. Doç. Dr.
Ömer Kadir Mergül

Üye

ÖNSÖZ

Teknolojik gelişmelere paralel olarak robotlar endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaya başlanmış ve bu amaçla birçok farklı robot yapısı geliştirilmiştir. Tasarlanan robot yapılarının performanslarının iyileştirilmesi amacıyla da çeşitli kontrol yöntemleri geliştirilmiştir. Bu çalışmada, endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan ve üç serbestlik derecesine sahip PUMA tipi robot yapısından farklı olarak çalışma uzayının daha da genişletilmesi ve hareket kabiliyetinin artırılması amacıyla uç elemanın takıldığı ekleme dördüncü bir kol ilavesi yapılarak dört serbestlik dereceli bir robot kolu yapısı oluşturulmuştur. Oluşturulan robot yapısının önceden belirlenen yörüngeleri en iyi şekilde takip edebilmesi ve yörünge takip hatalarının en aza indirilebilmesi için farklı kontrol yöntemleri geliştirilmiş ve performans sonuçları değerlendirilmiştir.

Çalışmanın planlanması ve gerçekleştirilmesinde, sonuçların değerlendirilip yorumlanmasında ve tezin hazırlık aşamasında bilgisi ve öngörüsü ile beni sürekli olarak destekleyen ve moral veren çok değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Şinasi ARSLAN'a, projeyi gerçekleştirmemde bana verdiği destek için çok değerli dostum Fatih ERMİŞ'e, maddi ve manevi hiçbir desteğini esirgemeyip beni daimi olarak eğitime teşvik eden canım aileme ve kesintisiz moral desteğiyle çalışmayı sürdürmemde büyük payı olan biricik eşim Feyza KORKMAZ'a teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

| | |
|--------------------------------------|------|
| ÖNSÖZ..... | ii |
| İÇİNDEKİLER | iii |
| SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ..... | ix |
| ŞEKİLLER LİSTESİ..... | x |
| TABLolar LİSTESİ..... | xv |
| ÖZET..... | xvi |
| SUMMARY..... | xvii |

BÖLÜM 1

| | |
|--|----|
| GİRİŞ..... | 1 |
| 1.1. Robotun Tanımı | 2 |
| 1.2. Robotların Sınıflandırılması..... | 3 |
| 1.2.1. Serbestlik derecelerine göre robotlar..... | 3 |
| 1.2.1.1. Kartezyen düzenleşim..... | 4 |
| 1.2.1.2. Silindirik düzenleşim..... | 5 |
| 1.2.1.3. Scara düzenleşim..... | 6 |
| 1.2.1.4. Küresel düzenleşim..... | 6 |
| 1.2.1.5. Dönel düzenleşim..... | 7 |
| 1.3. Robotların Avantajları ve Dezavantajları..... | 8 |
| 1.3.1. Kartezyen düzenleşim..... | 8 |
| 1.3.2. Silindirik düzenleşim..... | 8 |
| 1.3.3. Küresel düzenleşim..... | 9 |
| 1.3.4. Dönel düzenleşim..... | 9 |
| 1.4. Kontrol yöntemlerine göre robotlar..... | 10 |
| 1.4.1. Noktasal kontrol edilen robotlar..... | 10 |
| 1.4.2. Sürekli yörünge kontrollü robotlar..... | 11 |
| 1.5. Robot eyleyicilerinin kullandığı güç kaynağına göre robotlar..... | 11 |

| | |
|---|----|
| 1.5.1. DC servo ve adım motorları..... | 11 |
| 1.5.2. Hidrolik robotlar..... | 11 |
| 1.5.3. Pnömatik eyleyiciler..... | 11 |
| 1.6. Kesinlik derecelerine göre robotlar..... | 11 |
| 1.6.1. Çözünürlük..... | 12 |
| 1.6.2. Doğruluk..... | 12 |
| 1.6.3. Yenilenebilirlik..... | 12 |
| 1.7. Robotların Kullanıldığı Yerler..... | 12 |
| 1.7.1. Tıp endüstrisinde kullanılan robotlar..... | 12 |
| 1.7.2. Savaş silahları endüstrisinde kullanılan robotlar..... | 13 |
| 1.7.3. Film endüstrisinde kullanılan basit robotlar..... | 13 |
| 1.7.4. Uzay endüstrisinde kullanılan robotlar | 13 |
| 1.7.5. Evde ve ev çevresinde kullanılan basit robotlar..... | 13 |
| 1.7.6. Tıp alanında kullanılan basit robotlar..... | 13 |
| 1.7.7. Robotların sanayideki kullanım alanları..... | 14 |
| 1.8. Robotların Kullanım Avantajları..... | 15 |
| | |
| BÖLÜM 2 | |
| LİTERATÜR ÇALIŞMASI..... | 17 |
| | |
| BÖLÜM 3 | |
| FİZİKSEL SİSTEM YAPISININ TANIMI..... | 25 |
| 3.1. Robot Kolunun fiziksel Yapısı | 25 |
| 3.1. Çalışma Uzayının Belirlenmesi..... | 31 |
| | |
| BÖLÜM 4 | |
| ROBOT KİNEMATİĞİ | 34 |
| 4.1. Eklem Çiftleri ve Seri Düzenleşim..... | 34 |
| 4.2. Robot Manipülator Bileşenleri..... | 35 |
| 4.2.1. Mekanik unite..... | 35 |
| 4.2.2. Sensör ünitesi..... | 36 |
| 4.2.3. Kontrol ünitesi..... | 37 |
| 4.2.4. Güç ünitesi..... | 37 |

| | |
|---|----|
| 4.3. Uzaysal yerleşim..... | 37 |
| 4.3.1. Uzaysal gösterim..... | 38 |
| 4.3.1.1. Konum..... | 39 |
| 4.3.1.2. Yönelim..... | 40 |
| 4.3.2. Yer değiştirme..... | 43 |
| 4.3.3. Sağ el kuralı ile koordinasyon tayini..... | 45 |
| 4.3.3.1. Dönmenin pozitif doğrultusu..... | 46 |
| 4.4. Robot Kinematığı..... | 46 |
| 4.4.1. Düz kinematik..... | 47 |
| 4.4.1.1. DH parametrelerinin belirlenmesi..... | 47 |
| 4.4.1.2. Dönüşüm matrislerinin hesaplanması..... | 51 |
| 4.4.1.3. Manipülatör dönüşüm matrisinin elde edilmesi..... | 53 |
| 4.4.1.4. Uç elemanın konum ve oryantasyonunun belirlenmesi..... | 54 |
| 4.4.2. Ters kinematik..... | 55 |
| 4.4.3. Dört serbestlik dereceli robot koluna ait ters kinematik ifadelerin türetilmesi..... | 56 |
| 4.5. Aşırı Serbestlik Derecelik Problemi..... | 60 |
| 4.5.1. Aşırı serbestlik derecelik probleminin bulanık mantık ile çözümlenmesi..... | 62 |
| 4.5.2. Sözel değişkenler..... | 63 |
| 4.5.3. Üyelik fonksiyonları..... | 63 |
| 4.5.4. Bulanık kurallar ve kural tablosu..... | 64 |
| 4.5.5. Bulanık diziler..... | 67 |
| 4.5.6. Durulama..... | 68 |

BÖLÜM 5

| | |
|--|----|
| ROBOT DİNAMİĞİ..... | 70 |
| 5.1. Manipülatör Dinamiğı..... | 70 |
| 5.1.1. Düz dinamik..... | 70 |
| 5.1.2. Ters dinamik..... | 71 |
| 5.2. Lagrange-Euler Formülasyonu..... | 72 |
| 5.3. Dört Serbestlik Dereceli Robot Kolunun Dinamik Denklemleri..... | 73 |

| | |
|---|----|
| 5.3.1. Dört eksenli robot kolunun düz dinamik ifadeleri..... | 73 |
| 5.3.2. Manipülator dinamiğinin matris formunda yazılması..... | 81 |
| 5.3.2.1. Robot kol dinamiğinin özellikleri..... | 82 |
| 5.3.2.2. Kütle matrisinin oluşturulması..... | 83 |
| 5.3.2.3. Merkezkaç ve coriolis matrisinin oluşturulması..... | 85 |
| 5.3.2.4. Sürtünme matrisinin oluşturulması..... | 87 |
| 5.3.2.5. Yerçekimi matrisinin oluşturulması..... | 87 |
| 5.3.2.6. Tork ifadesinin yazılması..... | 88 |
| 5.3.3. Dört eksenli robot kolunun ters dinamik denklemleri..... | 88 |

BÖLÜM 6

| | |
|---|-----|
| ROBOT KONTROLÜ..... | 90 |
| 6.1. Kayan Kipli Kontrol..... | 91 |
| 6.1.1. Kayan kipli kontrol yapısı..... | 91 |
| 6.1.1.1. Sistem parametreleri..... | 91 |
| 6.1.1.2. Kayma yüzeyinin belirlenmesi..... | 92 |
| 6.1.1.3. Lyapunov kararlılık ifadesi..... | 94 |
| 6.1.1.4. Eşdeğer kontrol kuvvetinin kestirimi..... | 96 |
| 6.1.2. Kayan kipli kontrolün dört eksenli robot koluna uygulanması..... | 96 |
| 6.2. Yapay Sinir Ağı Kontrolü..... | 100 |
| 6.2.1. Biyolojik sinir ağları..... | 100 |
| 6.2.1.1. Beynin süreç işleme yapısı..... | 100 |
| 6.2.1.2. Beyindeki sinir ağları..... | 101 |
| 6.2.1.3. Nöronlar ve sinapslar..... | 102 |
| 6.2.1.4. Sinaptik öğrenme..... | 103 |
| 6.2.2. Yapay sinir ağları..... | 103 |
| 6.2.2.1. Yapay sinir ağlarının uygulama alanları..... | 104 |
| 6.2.2.2. Yapay sinir ağlarında öğrenme algoritmaları..... | 105 |
| 6.2.2.2.1. Danışmanlı öğrenme..... | 106 |
| 6.2.2.2.2. Danışmansız öğrenme..... | 106 |
| 6.2.2.2.3. Takviyeli öğrenme..... | 106 |
| 6.2.3 Yapay nöron modeli..... | 106 |

| | | |
|----------|--|-----|
| 6.2.3.1 | Aktivasyon fonksiyonları..... | 107 |
| 6.2.3.2 | Tanımlama fonksiyonu..... | 107 |
| 6.2.3.3 | Signum tipi aktivasyon fonksiyonu (Sert Geçişli Fonksiyon)..... | 108 |
| 6.2.3.4 | Sigmoid tipi aktivasyon fonksiyonu..... | 108 |
| 6.2.3.5 | Tanjant hiperbolik aktivasyon fonksiyonu..... | 109 |
| 6.2.4 | İleri beslemeli yapay sinir ağları..... | 109 |
| 6.2.4.1 | Hata dağılımının hesaplanması..... | 111 |
| 6.3. | Bulanık Yapay Sinir Ağları..... | 113 |
| 6.3.1. | Bulanık sistemler..... | 113 |
| 6.3.2. | Yapay sinir ağı sistemleri..... | 115 |
| 6.3.3. | Hibrit sistemler..... | 116 |
| 6.3.4. | Sinirsel bulanık mantık kontrolörü..... | 118 |
| 6.3.4.1. | Sinirsel bulanık mantık kontrolör yapısı..... | 119 |
| 6.3.4.2. | Dinamik bulanık yapay sinir ağının eğitilmesi..... | 120 |
| 6.3.4.3. | Geri yayılım algoritması..... | 120 |
| 6.4. | Yapay Sinir Ağı Tabanlı Kayan Kipli Kontrol..... | 124 |
| 6.4.1. | ψ_i sabitken λ_i değerlerinin yapay sinir ağlarıyla hesaplanması..... | 125 |
| 6.4.2. | λ_i sabitken ψ_i değerlerinin yapay sinir ağlarıyla hesaplanması..... | 126 |
| 6.4.3. | λ_i ve ψ_i değerlerinin yapay sinir ağlarıyla hesaplanması.... | 126 |
| 6.5. | Bulanık Yapay Sinir Ağı Tabanlı Kayan Kipli Kontrol..... | 127 |
| 6.5.1. | “ λ_i “ parametrelerinin FNN tarafından belirlendiği kayan kipli kontrol yapısı..... | 128 |
| 6.5.2. | “ ψ_i “ parametrelerinin FNN tarafından belirlendiği kayan kipli kontrol yapısı..... | 129 |
| 6.5.3. | “ λ_i “ ve “ ψ_i “ parametrelerinin beraberce FNN tarafından belirlendiği kayan kipli kontrol yapısı..... | 129 |
| 6.6. | Hesaplanmış Moment Yöntemi ve Geri Besleme Doğrusallaştırması..... | 131 |

| | |
|---|-----|
| 6.6.1. Sinirsel bulanık mantık tabanlı kayan kipli kontrol ile hesaplanan moment yöntemi..... | 132 |
| BÖLÜM 7. | |
| YÖRÜNGE PLANLAMASI..... | 134 |
| 7.1. Yörünge Yapıları | 135 |
| 7.2. Tek noktaya ulaşma | 135 |
| 7.3. Çembersel yörünge takibi | 135 |
| 7.4. Uzayda doğrusal yörünge hareketi..... | 136 |
| BÖLÜM 8. | |
| SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI | 138 |
| BÖLÜM 9. | |
| SONUÇ ve İLERİ ÇALIŞMALAR | 153 |
| KAYNAKLAR..... | 155 |
| ÖZGEÇMİŞ | 162 |

SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ

| | |
|----------|---|
| CPU | : Merkezi İşlem Birimi |
| CTC | : Hesaplanan Moment Yöntemi |
| DC | : Doğru Akım |
| DH | : Denavit Hartenberg Dönüşümü |
| FNN | : Sinirsel Bulanık Mantık Kontrolörü |
| FNSMC | : Sinirsel Bulanık Mantık Tabanlı Kayan Kipli Kontrol |
| FNSMCCTC | : Hesaplanan Moment Yöntemi ile Sinirsel Bulanık Mantık Tabanlı Kayan Kipli Kontrol |
| FSMC | : Bulanık Mantık Tabanlı Kayan Kipli Kontrol |
| G-D | : Genelleştirilmiş D'Alembert |
| L-E | : Lagrange-Euler Metodu |
| N-E | : Newton-Euler Metodu |
| NN | : Yapay Sinir Ağı |
| PLC | : Programlanabilir Mantık Devresi |
| PD | : Oransal-Türevsel Kontrol |
| PID | : Oransal-İntegral-Türevsel Kontrol |
| PPP | : Prizmatik Prizmatik Prizmatik |
| R^2 | : Düzlem |
| R^3 | : Uzay |
| R-L | : Rekürsif Lagrange Metodu |
| RPP | : Döner Prizmatik Prizmatik |
| RRP | : Döner Döner Prizmatik |
| RRR | : Döner Döner Döner |
| SCARA | : Selective Compliant Articulated Robot for Assembly |
| SMC | : Kayan Kipli Kontrol |
| YSA | : Yapay Sinir Ağı |

ŞEKİLLER LİSTESİ

| | | |
|------------|---|----|
| Şekil 1.1. | Kartezyen robot ve çalışma uzayı..... | 4 |
| Şekil 1.2. | Epson-Seiko kartezyen robotu..... | 4 |
| Şekil 1.3. | Silindirik robot ve çalışma uzayı..... | 5 |
| Şekil 1.4. | Seiko RT3300 silindirik robotu..... | 5 |
| Şekil 1.5. | SCARA robotu ve çalışma uzayı..... | 6 |
| Şekil 1.6. | Epson E2L653S SCARA robotu | 6 |
| Şekil 1.7. | Küresel robot ve çalışma uzayı..... | 7 |
| Şekil 1.8 | Stanford arm küresel robotu..... | 7 |
| Şekil 1.9 | Dönel robot ve çalışma uzayı..... | 7 |
| Şekil 3.1 | Dört eksenli robot kolunun şematik gösterimi..... | 26 |
| Şekil 3.2 | Fiziksel uygulaması gerçekleştirilen beş eksenli robot kolu..... | 27 |
| Şekil 3.3 | Robot kolunun harekete başlamadan önceki yerleşimi ve konumlanması..... | 29 |
| Şekil 3.4 | Dairesel bir yörüngeyi takibi..... | 29 |
| Şekil 3.5 | Uzayda doğrusal yörüngeyi takibi..... | 30 |
| Şekil 3.6 | Dört eksenli robot koluna ait kinematik düzenleşim..... | 30 |
| Şekil 3.7 | Dört eksenli robot koluna ait düzlemsel çalışma uzayı..... | 32 |
| Şekil 3.8 | Dört eksenli robot koluna ait 3-boyutlu çalışma uzayı..... | 32 |
| Şekil 4.1 | En yaygın eklem tipleri..... | 30 |
| Şekil 4.2 | Yaygın robot kolu düzenleşimleri..... | 35 |
| Şekil 4.3 | R^2 ve R^3 kartezyen koordinatların vektör olarak gösterimi..... | 39 |
| Şekil 4.4 | Polar koordinatın gösterimi..... | 39 |
| Şekil 4.5 | Silindirik koordinatın gösterimi..... | 40 |
| Şekil 4.6. | Küresel koordinatın gösterimi..... | 40 |
| Şekil 4.7 | OUV sisteminin OXY referans sistemine göre oryantasyonu..... | 41 |
| Şekil 4.8 | Sağ el kuralı için x ve y eksenlerinin yerleşimi..... | 45 |

| | | |
|------------|--|----|
| Şekil 4.9 | Sağ el kuralı ile z ekseninin bulunması..... | 45 |
| Şekil 4.10 | Pozitif dönme yönünü bulmak için uygulanan sağ el kuralı..... | 46 |
| Şekil 4.11 | Eklem türleri ve değişik varyasyonları..... | 47 |
| Şekil 4.12 | 1.tip bağlantı şekli..... | 48 |
| Şekil 4.13 | 2.tip bağlantı şekli..... | 48 |
| Şekil 4.14 | 3.tip bağlantı şekli..... | 48 |
| Şekil 4.15 | 4.tip bağlantı şekli..... | 49 |
| Şekil 4.16 | 5.tip bağlantı şekli..... | 49 |
| Şekil 4.17 | Dört serbestlik dereceli robot kolunun DH parametrelerinin gösterimi..... | 51 |
| Şekil 4.18 | Düz kinematik ve ters kinematik arasındaki parametre ilişkisi..... | 56 |
| Şekil 4.19 | Dört serbestlik dereceli robot kolunun detaylı düz kinematik gösterimi..... | 57 |
| Şekil 4.20 | Bileğin konum koordinatlarının gösterilmesi..... | 58 |
| Şekil 4.21 | 6 serbestlik dereceli bir robot kolunun istenilen bir noktaya ulaşması..... | 61 |
| Şekil 4.22 | 7 serbestlik dereceli robot kolunun verilen bir noktaya ulaşması.. | 61 |
| Şekil 4.23 | Bulanık mantık yapısı..... | 62 |
| Şekil 4.24 | Bazı örnek üyelik fonksiyonları..... | 64 |
| Şekil 4.25 | 3 boyutlu kural tablosu (ilk 5 Z değeri için)..... | 65 |
| Şekil 4.26 | Bulanık mantık girdi ve çıktıları..... | 66 |
| Şekil 4.27 | X konum bilgisi..... | 66 |
| Şekil 4.28 | Y konum bilgisi..... | 66 |
| Şekil 4.29 | Z konum bilgisi..... | 66 |
| Şekil 4.30 | Ø açısı bilgisi..... | 67 |
| Şekil 4.31 | Durulama işlemi..... | 68 |
| Şekil 5.1 | Düz dinamik ile ters kinematik arasındaki ilişki..... | 71 |
| Şekil 5.2 | Dört serbestlik dereceli robot kolunun dinamik yapısı..... | 74 |
| Şekil 6.1 | Kayan kipli kontrol şeması..... | 91 |
| Şekil 6.2 | Kayma Yüzeyi..... | 92 |
| Şekil 6.3 | Dört eksenli robot kolu için tasarlanan kayan kipli kontrol yapısına ait Simulink blok diyagramı. | 97 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| Şekil 6.4 | Biyolojik sinir hücresi yapısı. | 102 |
| Şekil 6.5 | Sinapsın yapısı. | 103 |
| Şekil 6.6 | Basit bir yapay sinir hücresi modeli..... | 107 |
| Şekil 6.7 | Doğrusal aktivasyon fonksiyonu..... | 108 |
| Şekil 6.8 | Signum tipi aktivasyon fonksiyonu..... | 108 |
| Şekil 6.9 | Sigmoid tipi aktivasyon fonksiyonu..... | 109 |
| Şekil 6.10 | Tanjant Hiperbolik Aktivasyon Fonksiyonu..... | 109 |
| Şekil 6.11 | İleri beslemeli yapay sinir ağı yapısı. | 110 |
| Şekil 6.12 | Dört eksenli robotu koluna ait yapay sinir ağı tabanlı kontrol şeması..... | 111 |
| Şekil 6.13 | Model Referans Adaptif Kontrol Şeması..... | 117 |
| Şekil 6.14. | Dinamik sinirsel bulanık ağ yapısı blok diyagramı..... | 122 |
| Şekil 6.16 | Yapay sinir ağı tabanlı kayan kipli kontrol yapısı..... | 124 |
| Şekil 6.17 | λ_i değerinin yapay sinir ağlarıyla tayin edildiği kontrol yapısı..... | 126 |
| Şekil 6.18 | λ_i parametrelerinin FNN tarafından belirlendiği kayan kipli kontrol yapısı..... | 129 |
| Şekil 6.19 | ψ_i parametrelerinin FNN tarafından belirlendiği kayan kipli kontrol yapısı..... | 129 |
| Şekil 6.20 | Sinirsel bulanık mantık tabanlı kayan kipli kontrol yapısı..... | 130 |
| Şekil 6.21 | FNSMC kontrol yapısına ait şematik diyagram..... | 130 |
| Şekil 6.22 | Hesaplanan moment kontrolörü yapısı..... | 131 |
| Şekil 6.23 | FNSMC tabanlı hesaplanan moment yöntemi yapısı..... | 132 |
| Şekil 6.24 | FNSMC tabanlı hesaplanan moment yapısına ait Simulink blok diyagramı | 133 |
| Şekil 7.1 | Robot kolunun başlangıçta ve çemberin ilk noktasında yönelme durumu | 136 |
| Şekil 7.2 | Robot kolunun başlangıçta ve uzayda doğrusal yörüngeyi takibi esnasında yönelme durumu | 17 |
| Şekil 8.1 | Dördüncü kolun ağırlık merkezine bozucu yük ilave edilmesi durumunda dördüncü kolun toplam kütesinin zamana bağlı olarak değişimi..... | 139 |
| Şekil 8.2 | FNSMC ile Px hedefine ulaşma..... | 140 |
| Şekil 8.3 | FNSMCCTC ile Px hedefine ulaşma..... | 140 |

| | | |
|------------|---|-----|
| Şekil 8.4 | FNSMC ile Py hedefine ulaşma | 141 |
| Şekil 8.5 | FNSMCCTC ile Py hedefine ulaşma | 141 |
| Şekil 8.6. | FNSMC ile Pz hedefine ulaşma | 142 |
| Şekil 8.7 | FNSMCCTC ile Pz hedefine ulaşma | 142 |
| Şekil 8.8 | FNSMC ile bozucu sinyalsiz çembersel yörünge takibi | 143 |
| Şekil 8.9 | FNSMCCTC ile bozucu sinyalsiz çembersel yörünge takibi | 143 |
| Şekil 8.10 | FNSMC ile bozucu sinyalsiz uzayda doğrusal yörünge | 144 |
| Şekil 8.11 | FNSMCCTC ile bozucu sinyalsiz uzayda doğrusal yörünge..... | 144 |
| Şekil 8.12 | FNSMC ile çembersel yörünge takibinde beyaz gürültü tork değerleri..... | 145 |
| Şekil 8.13 | FNSMC ile beyaz gürültü altında çembersel yörünge takibi. | 145 |
| Şekil 8.14 | FNSMCCTC ile çembersel yörünge takibinde beyaz gürültü tork değerleri..... | 146 |
| Şekil 8.15 | FNSMCCTC ile beyaz gürültü altında çembersel yörünge takibi | 146 |
| Şekil 8.16 | FNSMC ile çembersel yörünge takibinde ağırlık değişimiyle uygulanan tork değerleri | 147 |
| Şekil 8.17 | FNSMC ile ağırlık değişimi altında çembersel yörünge takibi | 147 |
| Şekil 8.18 | FNSMCCTC ile çembersel yörünge takibinde ağırlık değişimiyle uygulanan tork değerleri | 148 |
| Şekil 8.19 | FNSMCCTC ile ağırlık değişimi altında çembersel yörünge takibi | 148 |
| Şekil 8.20 | FNSMC ile uzayda doğrusal yörünge takibinde beyaz gürültü tork değerleri | 149 |
| Şekil 8.21 | FNSMC ile beyaz gürültü altında uzayda doğrusal yörünge takibi | 149 |
| Şekil 8.22 | FNSMCCTC ile uzayda doğrusal yörünge takibinde beyaz gürültü tork değerleri. | 150 |
| Şekil 8.23 | FNSMCCTC ile beyaz gürültü altında uzayda doğrusal yörünge takibi. | 150 |
| Şekil 8.24 | FNSMC ile uzayda doğrusal yörünge takibinde ağırlık değişimiyle tork değerleri | 151 |
| Şekil 8.25 | FNSMC ile ağırlık değişimi altında uzayda doğrusal yörünge takibi. | 151 |

| | | |
|------------|---|-----|
| Şekil 8.26 | FNSMCCTC ile uzayda doğrusal yörünge takibinde ağırlık değişimiyle tork değerleri. | 152 |
| Şekil 8.27 | FNSMCCTC ile ağırlık değişimi altında uzayda doğrusal yörünge takibi | 152 |

TABLolar LİSTESİ

| | | |
|------------|--|-----|
| Tablo 1.1 | Endüstriyel uygulamalarda sık olarak kullanılan bazı robot tiplerine ait temel performans tanımlamaları..... | 10 |
| Tablo 3.1 | Dört eksenli robot kolunun fiziksel özellikleri. | 28 |
| Tablo 3.2 | Robot kollarının alabileceği en yüksek ve en düşük açı ve konum değerleri..... | 31 |
| Tablo 4.1 | Sağ el kuralı ile pozitif dönme yönünü bulmak için uygulanan kural tablosu..... | 46 |
| Tablo 4.2 | DH tablosunun gösterimi..... | 51 |
| Tablo 4.3 | Bulanık mantık algoritma aşamaları..... | 63 |
| Tablo 4.4 | Kural tablosu girdi ve çıktıları..... | 64 |
| Tablo 4.5 | Bulanık matris örnekleri..... | 65 |
| Tablo 4.6 | Bulanık dizi işlemleri..... | 67 |
| Tablo 4.7 | Sonuçların bir araya toplanması..... | 68 |
| Tablo 4.8 | Durulama algoritmaları..... | 68 |
| Tablo 6.1. | Beyin ile işlemcinin süreç işleme performans değerleri..... | 101 |
| Tablo 7.1 | Tek noktadan oluşan yörünge­nin matematiksel konumu..... | 125 |
| Tablo 7.2 | Çembersel yörünge­nin uzaysal konumu ve çember parametreleri | 126 |
| Tablo 7.3 | Üç boyutlu uzayda ulaşılması istenen noktaların konumları | 137 |
| Tablo 8.1 | Tek nokta hedefe ulaşmada kontrolör performanslarının karşılaştırılması..... | 139 |

ÖZET

Anahtar kelimeler: Dört serbestlik dereceli robot kolu, sinirsel bulanık mantık tabanlı kayan kipli kontrol, hesaplanan moment yöntemi, aşırı serbestlik dereceli problemi.

Robot kolları, endüstriyel uygulamalarda, malzeme taşımada ve sürekli imalat sistemlerinde sık olarak kullanılmaktadırlar. Özellikle endüstriyel uygulamalarda kullanılan dört mafsallı robot kollarının gelişmiş hareket yeteneği ve yüksek hassasiyete sahip olmaları ve ayrıca yüksek performanslı olmaları istenir. Bu durum, kontrol sistemleri uygulanarak sağlanabilir; ancak robot kollarının yüksek hızda çalışmaları ve uygulanan dış yüklerin etkileri, robot kontrolü tasarlanırken göz önünde bulundurulması gereken önemli parametrelerdir. Bu çalışmada, dört serbestlik dereceli bir robot kolu için sinirsel bulanık tabanlı kayan kipli kontrol ve hesaplanan moment yöntemi ile sinirsel bulanık mantık tabanlı kayan kipli kontrol yapısı tasarlanmış, simülasyon çalışmaları ile performansları değerlendirilmiştir.

Yapay sinir ağları, bulanık mantık, kayan kipli kontrol ve hesaplanan moment yöntemi, robot kontrolünde en çok uygulanan yöntemlerdir. Ancak, karmaşık kinematik ve dinamik yapıya sahip robotlarda her bir kontrolörün tek başına uygulanması çoğu kez istenilen performansı sağlamak için yeterli olmaz. Bu nedenle bu çalışmada, robotun verilen yörüngeleri en iyi şekilde takip edebilmesi için sinirsel bulanık mantık tabanlı kayan kipli kontrolör (FNSMC) geliştirilmiştir. Tasarlanan kontrolör, ayrıca hesaplanan tork yöntemi (FNSMC) ile birleştirilerek geri besleme kontrolünün iyileştirilmesi amaçlanmıştır.

Çalışmanın sonuçları her iki kontrol yönteminin verilen yörüngeleri takip etmede başarılı ve benzer özellikte olduklarını, ancak bozucu sinyallerin varlığında FNSMCCTC'nin, FNSMC'den daha başarılı olduğunu göstermiştir.

NEURO-FUZZY BASED SLIDING MODE CONTROL OF A FOUR DEGREE OF FREEDOM ROBOT ARM

SUMMARY

Keywords: Four degrees of freedom robot arm, neuro-fuzzy based sliding mode control, computed torque method, redundant degree of freedom problem.

Robot arms are being used in industrial applications such as material handling and continuous production lines. In particular, four joint robot arms have high maneuverability and high precision capability required in industry. This can be provided by using control systems, but effects of some disturbances such as external applied torques and high speed working conditions should be taken into consideration during designing of controllers. In this study, a neural fuzzy based sliding mode control (FNSMC) structure had been designed, and the performances of that were evaluated with simulation works.

Neural network, fuzzy logic, sliding mode, and computed torque methods are the most common in the control of robots. However, the use of each method is not individually sufficient to provide the required performance in the complex kinematic and dynamic structured robots. The neural fuzzy sliding mode controller has been developed to track the given trajectories in the best way. The designed FNSMC with computed torque method (FNSMCCTC) was aimed to enhance the feedback control.

The obtained results have shown that both controllers have similar properties, but the FNSMCCTC was more successful than the FNSMC in the presence of disturbances.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Robotik sistemler, endüstriyel modernizasyon ve ergonomik entegrasyon sağlamada en etkili araçlardandır. Üretkenlik, esneklik ve kalitedeki gelişmeler, robotlarda ve robotik sistemlerde aranan yapay zeka ve otomasyon seviyesiyle yakından alakalıdır. Günümüzde robotlar birçok alanda kullanılmakta ve yeteneklerine göre farklı işlevleri yerine getirmektedirler. Bu durum, birçok farklı robot yapısının gelişimine zemin hazırlamıştır.

Robot yapılarındaki çeşitlilik ve hassas işlem beklentileri, robot tasarımında ikinci bir problemi beraberinde getirmektedir. Robotların istenen görevleri en hassas şekilde yerine getirebilmeleri ve gerektiğinde belirli görevlere kendilerini daha iyi adapte edebilmeleri için uygun bir kontrol mekanizmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Robot kontrolü, teknolojinin gelişimine paralel olarak robot kullanımının yaygınlaşması ile birlikte büyük önem kazanmıştır.

Robot kontrolörleri, yerine getirilmek istenen görevin karmaşıklığına ve işleme hassasiyetine bağlı olarak farklı şekillerde geliştirilebilir. Bu amaçla literatürde birçok farklı kontrol mekanizması geliştirilmiştir. Bu kontrol mekanizmalarının birçoğu halihazırda endüstriyel robot uygulamalarında kullanılmaktadır [1].

Günümüzde endüstriyel açıdan değişik imalat sistemleri için zeki robot sistemlerinin uygulama alanlarına yönelik planlar yapılmaktadır. Yine de bu sistemler yarı otonom olup insan denetimine muhtaçtır. Yeni zeki, esnek ve dayanıklı otonom sistemler, gelecekte hizmet endüstrisi, tıp, biyoloji ve makine mühendisliğinin kilit noktalarını teşkil edecektir.

1.1. Robotun Tanımı

Robot kelimesi ilk olarak Çek filozofu ve oyun yazarı Karel Capek' in "Rossum's Universal Robot " isimli oyunu içerisinde 1922' de kullanılmıştır. Çek dilinde robot "işçi" veya "esir" anlamındadır. Karel Capek robotu, “insanlara benzeyen ama hiç yorulmadan çalışan makinelerdir” şeklinde tarif etmiştir.

Daha sonra 1940’lı yıllarda, bir bilim kurgu yazarı olan Isaac Asimov tarafından Robot kelimesine yeni anlamlar kazandırılmıştır. Yazar robotları uymak zorunda oldukları 3 kuralla tanımlamıştır.

- 1) Robot hiçbir zaman insana zarar verecek hareketler yapmamalı ve insanın zarar görebileceği hallerde hareketsiz kalmalıdır.
- 2) Birinci kanunu çiğnememek şartıyla robot, insana her zaman itaat etmelidir.
- 3) Birinci ve ikinci kanunu çiğnememek şartıyla robot, kendini de korumalıdır.

Günümüzdeki kullanım alanlarından yola çıkarak genel bir ifadeyle robot; fiziksel nesnelere hareket ettirebilmek amacıyla belirli bir çalışma uzayı içerisinde ve programlanmış hareketler dâhilinde bir veya daha çok uç elemanı yönlendirmek için sensör kullanan, yazılım kontrollü bir cihaz olarak tanımlanabilir [2].

Amerikan Robot Enstitüsüne göre robot; değişik türdeki işlerin yerine getirilmesi, programlanmış hareketler ile malzemeleri, parçaları, takım ve özel araçları taşıyabilecek, yeniden programlanabilme özelliğine sahip çok amaçlı bir manipülatördür.

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.

Japonya Endüstriyel Robotlar Birliği ise; sanayide kullanılan robotları, bilgi girdileri,

eğitim açısından ele alarak sınıflandırmaktadır. Bu sınıflandırmaya göre robot tanımına, el ile idare edilen manipülatör ve sabit işlem sıralı robotlar da dâhil edilmektedir [3].

Robot aşağıdaki üç temel esasın bir araya gelmesiyle oluşur:

- 1) Birçok fiziksel görevi yerine getirebilen mekanik-fiziksel cihaz,
- 2) Sistemi harekete geçiren eyleyiciler ve robotun kendi durumu ile çevresel durumunu algılayabilen sensörlerden oluşan dayanıklı bir sistem,
- 3) Yüksek karmaşıklığa sahip mantık yapısından oluşan ve yeniden programlanabilen bir kontrolör.

Kombine sistemlerin en temel özelliği yerine getirilebilecek görevlerin ve tekrar programlanabilme kabiliyetinin karmaşık bir durum arz etmesidir.

Bilgisayar destekli tasarım (CAD) ve bilgisayar destekli retim (CAM) gibi tekniklerin bulunmasıyla, endüstriyel otomasyon sistemleri kısa zamanda çok hızlı gelişmiştir. Bu hızlı gelişmenin sonucunda endüstriyel robotların kullanımı ivme kazanmıştır. Günümüze kadar büyük aşama kaydeden robotlar, madde taşınması (konveyör sistemler), boyacılık, kaynak endüstrisi, tıp vs. gibi birçok sektörde kullanılmaktadır. Bunun bir sonucu olarak robotlar, fiziksel yapılarına göre farklı sınıflara ayrılmışlardır [4].

1.2. Robotların Sınıflandırılması

Robotlar, serbestlik derecelerine, kontrol yöntemlerine, eyleyicilerin kullandığı güç kaynağına, kesinlik derecelerine ve ikili harf kodu olmak üzere beş farklı şekilde sınıflandırılabilir.

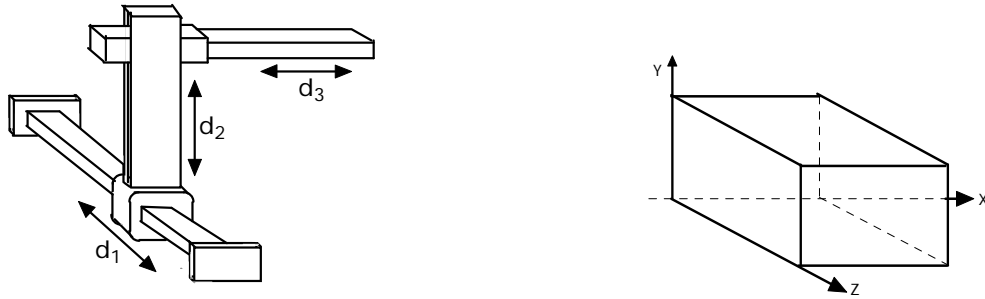
1.2.1. Serbestlik derecelerine göre robotlar

Günümüz endüstrisinde genellikle altı serbestlik derecesine sahip robotların kullanılması tercih edilmektedir. Robotlar serbestlik derecelerine göre

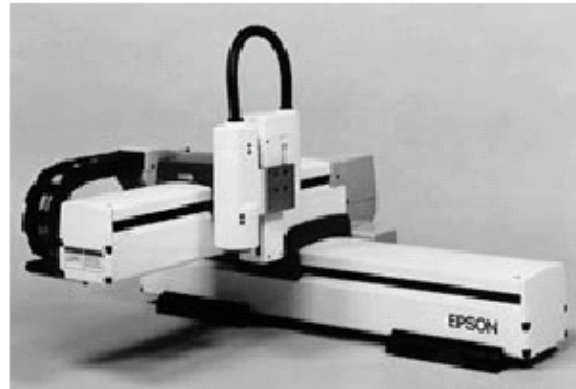
sınıflandırılırken ilk üç bağıın eklem özelliği dikkate alınır. Eğer ilk üç bağıın tamamı prizmatik eklemlere sahipse, sonuçta oluşan kinematik düzenleme kartezyen (PPP), ilk bağı döner, ikinci ve üçüncü bağı prizmatik eklemlere sahipse, bu tip sınıflandırma silindirik (RPP), ilk iki bağı döner, üçüncü bağı prizmatik eklemlere sahipse ve bütün eklemler bir birine paralelse, SCARA (RRP), ilk iki bağı döner, üçüncü bağı prizmatik eklemlere sahipse küresel (RRP), ilk üç bağıın tamamı döner eklemlere sahipse, sonuçta oluşan kinematik düzenleme ise dönel (RRR) sınıflandırma denir.

1.2.1.1. Kartezyen düzenleşim

Daha önce de belirtildiği gibi ilk üç eklem tamamı prizmatikse bu şekilde tasarlanan robota kartezyen manipülatör denir. Kinematik düzenleşimi en basit olan robot türüdür. Bu tip robotlar madde ve kargo taşınması gibi ağır materyal trnasferinde kullanılırlar. Şekil 1.1’de kartezyen robot ve çalışma uzayı, Şekil 1.2’de ise endüstride kullanılan Epson-Seiko kartezyen robotu görülmektedir.



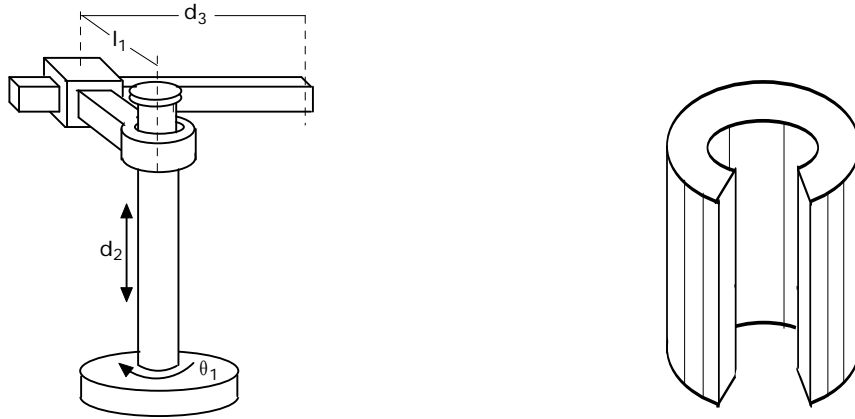
Şekil 1.1. Kartezyen robot ve çalışma uzayı.



Şekil 1.2. Epson-Seiko kartezyen robotu.

1.2.1.2. Silindirik düzenleşim

Silindirik düzenleşime sahip bir robotun ilk eklemi dönel, ikinci eklemi birinci ekleme paralel ve prizmatik, üçüncü eklemse ikinci ekleme dik ve prizmatiktir. Şekil 1.3'te silindirik düzenleşime sahip bir robot ve çalışma uzayı, Şekil 1.4'te ise endüstride kullanılan Seiko RT3300 silindirik robotu görülmektedir.



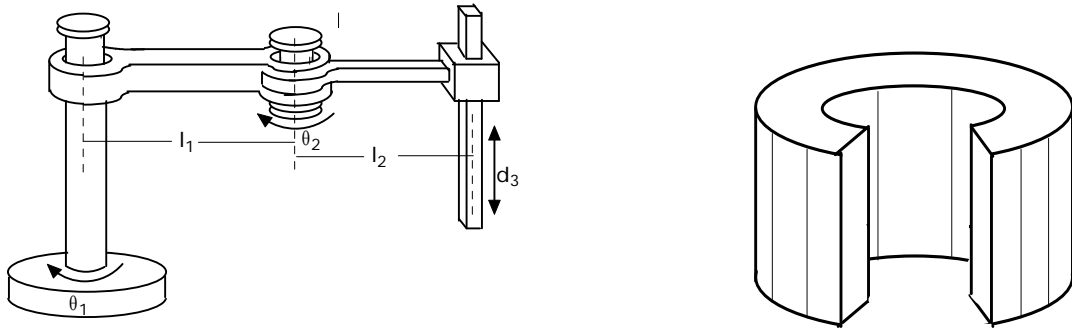
Şekil 1.3. Silindirik robot ve çalışma uzayı.



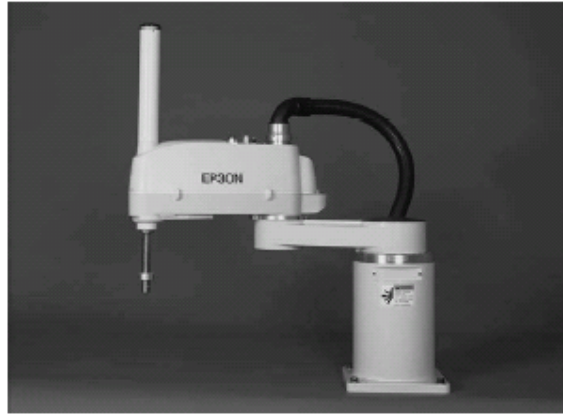
Şekil 1.4. Seiko RT3300 silindirik robotu.

1.2.1.3. SCARA düzenleşim

SCARA (Selective Compliant Articulated Robot for Assembly) düzenleşime sahip bir robot, eklem yapısı (RRP) itibariyle küresel düzenleşime benzemesine rağmen eklemlerin geometrisi açısından tamamen küresel robottan farklıdır. SCARA düzenleşimde ilk üç eklemin tamamı bir birine paraleldir ve endüstride sıklıkla tercih edilmektedir. Şekil 1.5'te SCARA düzenleşime sahip bir robot ve çalışma uzayı, Şekil 1.6'da ise endüstride kullanılan Epson E2L653S SCARA robotu görülmektedir.



Şekil 1.5. SCARA robotu ve çalışma uzayı.

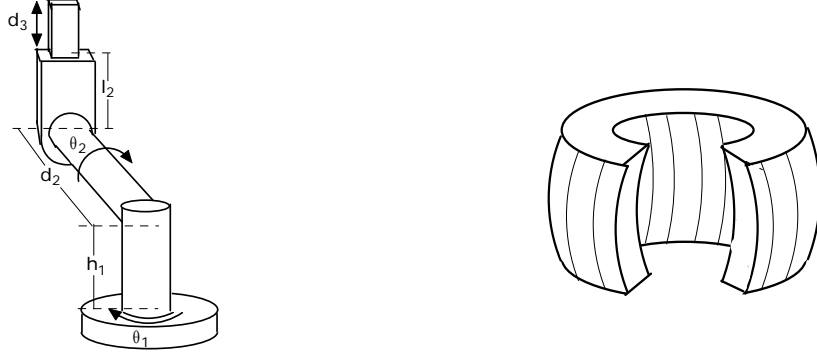


Şekil 1.6. Epson E2L653S SCARA robotu.

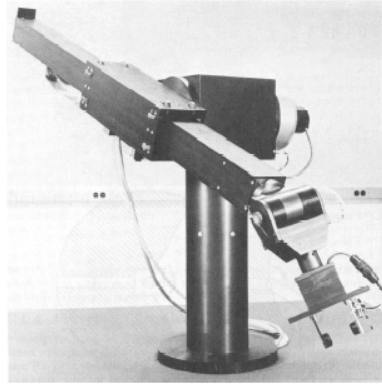
1.2.1.4. Küresel düzenleşim

Küresel düzenleşime sahip bir robotun ilk iki eklemi dönel, üçüncü eklemi ise prizmatiktir. Bu robot düzenleşime sahip robotlarda SCARA gibi endüstride oldukça fazla tercih edilir. Şekil 1.7'de küresel düzenleşime sahip bir robot ve

çalışma uzayı, Şekil 1.8’de ise endüstride kullanılan Stanford Arm küresel robotu görülmektedir.



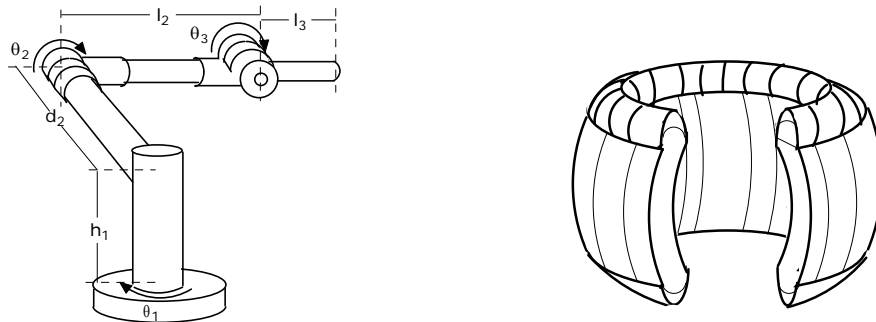
Şekil 1.7. Küresel robot ve çalışma uzayı.



Şekil 1.8. Stanford Arm küresel robotu.

1.2.1.5. Dönel düzenleşim

Dönel düzenleşime sahip bir robotun üç eklemi de döneldir. Şekil 1.9’da dönel düzenleşime sahip bir robot ve çalışma uzayı görülmektedir [4].



Şekil 1.9. Dönel robot ve çalışma uzayı.

1.3. Robotların Avantajları ve Dezavantajları

Robot düzenleşimlerinin birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları aşağıda sıralanmıştır. Ayrıca, endüstriyel uygulamalarda sıklıkla kullanılan bazı robot tiplerine ait performans özellikleri ve fiziksel tanımlamalar Tablo 1.1’de verilmiştir [5].

1.3.1. Kartezyen düzenleşim

Avantajları:

- Kinematik denklemler basit olduğundan kontrolü çok kolaydır,
- Gövde yapısı çok sağlam olduğundan yük kaldırabilme kapasitesi çok iyidir,
- Çalışma uzayının her noktasında geniş çaplı hareket kabiliyeti aynıdır,
- Kinematik yapısı basit olduğundan yeni eleman eklenmesi çok kolaydır.

Dezavantajları:

- Çalışma uzayının hacmi robotun boyutlarından küçüktür,
- Robotun kendi ana gövdesine ulaşamaz,
- Prizmatik eklemlerinin çalışma ortamındaki tozlardan korunması güçtür.

1.3.2. Silindirik düzenleşim

Avantajları:

- Temel çerçevenin dönel olmasından dolayı uç işlevci hızlı hareket eder,
- Kinematik denklemler basit olduğunda kontrolü de kolaydır,
- Kartezyen robotlara göre daha büyük çalışma uzayına sahiptir.

Dezavantajları:

- Küresel robotlara göre daha küçük çalışma uzayına sahiptir,

- Geniş çaplı hareket kabiliyeti kol uzunluğuna göre değişir.

1.3.3. Küresel düzenleşim

Avantajları:

- Çok büyük çalışma uzayına sahiptir.

Dezavantajları:

- Çok karmaşık kinematik denklemlere sahip olduğundan kontrolleri de zordur,
- Geniş çaplı hareket kabiliyeti her noktada farklıdır. Özellikle ana çerçeve civarında çok düşük olduğundan eklem açılarındaki küçük bir değişim uç işlevcinin daha büyük bir yer değiştirmesine sebep olur.

1.3.4. Dönel düzenleşim

Avantajları:

- Çok büyük bir çalışma uzayına sahiptirler,
- Tamamı dönel olan eklemlerin hareket ettirilmesi kolaydır,
- Çok esnek ve hızlıdır.

Dezavantajları:

- Geniş çaplı hareket kabiliyeti her noktada farklıdır. Çalışma uzayında her noktaya ulaşamaz,
- Çok karmaşık kinematik denklemlere sahip olduğundan kontrolleri de zordur,
- Doğruluğu düşüktür. Her eklem oluşturduğu küçük hatalar sonuçta toplanarak daha büyük bir hataya neden olur [4].

Tablo 1.1. Endüstriyel uygulamalarda sık olarak kullanılan bazı robot tiplerine ait temel performans tanımlamaları.

| Robot yapısı | Modeli | Eksen sayısı | Yük kapasitesi (kg) | Erişilebilen max uzaklık (mm) | Tekrarlanabilirlik (mm) | Hız |
|--------------|--|--------------|---------------------|-------------------------------|---------------------------|--|
| Mafsallı | Fanuc M-410i | 4 | 155 | 3139 | +/- 0,5 | eksen 1, 85 derece/sn eksen 2, 90 derece/sn eksen 3, 100 derece/sn eksen 4, 190 derece/sn |
| | Nachi 8683 | 6 | 200 | 2510 | +/- 0,5 | |
| | Nachi 7603 | 6 | 5 | 1405 | +/- 0,1 | eksen 1, 115 derece/sn eksen 2, 115 derece/sn eksen 3, 115 derece/sn |
| | Staubli RX90 | 6 | 6 | 985 | +/- 0,2 | eksen 1, 240 derece/sn eksen 2, 200 derece/sn eksen 3, 286 derece/sn |
| Tip 1 SCARA | AdeptOne | 4 | 9,1 | 800 | +/- 0,025 | 1700 mm/sn |
| | Fanuc A-510 | 4 | 20 | 950 | +/- 0,065 | |
| Tip 2 SCARA | Adept 1850 | 4 | 70 | 1850 | X, Y +/- 0,3 Z +/- 0,3 | eksen 1, 1500 mm/sn eksen 2, 120 derece/sn eksen 3, 140 derece/sn eksen 4, 225 derece/sn |
| | Staubli RS 184 | 4 | 60 | 1800 | +/-0,15 | |
| | PaR Systems XR225 | 5 | 190 | X 18000 Y 5500 Z 2000 | +/- 0,125 | |
| Kartezyen | AdeptModules | 3 | 15 | X 500 Y 450 | +/- 0,02 | eksen 1, 1200 mm/sn eksen 2, 1200 mm/sn eksen 3, 600 mm/sn |
| | Kohl K45 | 4 | 34 | 1930 | +/- 0,2 | eksen 1, 90 derece/sn eksen 2, 500 mm/sn eksen 3, 1000 mm/sn |
| Silindirik | Kohl K45 | 4 | 34 | 1930 | +/- 0,2 | eksen 1, 90 derece/sn eksen 2, 500 mm/sn eksen 3, 1000 mm/sn |
| Kırsel | Unimation 2000 (Hidrolik, üretimi yok) | 5 | 135 | | +/- 1,25 | eksen 1, 35 derece/sn eksen 2, 35 derece/sn eksen 3, 1000 mm/sn |

1.4. Kontrol yöntemlerine göre robotlar

Kontrol yöntemlerine göre robotlar iki alt sınıfa ayrılabilir.

1.4.1. Noktasal kontrol edilen robotlar

Bu tür robotlar için özellikle belirtilmiş bir çalışma alanı yoktur. Bu sınıfa giren robotların serbestlik derecesi altıdan küçüktür ve genellikle bir nesneyi bir yerden başka bir yere yerleştirmede kullanılır.

1.4.2. Sürekli yörünge kontrollü robotlar

Bu tip robotlar bir kullanıcı tarafından belli bir yörüngeyi izleyecek şekilde kontrol edilirler. Kaynak işlemleri gerçekleştiren robotlar bu sınıf için uygun bir örnektir.

1.5. Robot eyleyicilerinin kullandığı güç kaynağına göre robotlar

Bu grup temel olarak elektrik, pnömatik ve hidrolik olmak üzere üçe ayrılır.

1.5.1. DC servo ve adım motorları

DC servo motorların robotlarda kullanılmasının en önemli nedeni, düşük gerilimde yüksek tork üretmeleridir. Adım motorları ise daha basit uygulamalarda (tut ve yerleştir) kullanılırlar. Çünkü bu uygulamalarda yüksek tork ihtiyacı yoktur.

1.5.2. Hidrolik robotlar

Bu tip robotlar, daha çok ağır endüstride kullanılırlar. Ürettikleri yüksek torka oranla tükettikleri güç düşüktür. Bu avantajlarına rağmen performansları doğrusal olmadığından elektrik motorlarına göre kontrolleri daha zordur.

1.5.3. Pnömatik eyleyiciler

Robot uygulamalarında kullanılan en basit tasarıma sahip sürücülerdir. Prensip olarak hidrolik robotlara benzerler. Fakat hareket eden robot pistonlarının ataletini hızla ortadan kaldıracak hava basıncının üretilmemesinden dolayı pnömatik sürücülerin kontrolü zordur. Bu yüzden basit uygulamalarda kullanılırlar.

1.6. Kesinlik derecelerine göre robotlar

Bu sınıf, çözünürlük, doğruluk ve yinelenbilirlik şeklinde üçe ayrılır.

1.6.1. Çözünürlük

Çok küçük bir yer değiştirmeyi gerçekleştirme yeteneği olan çözünürlük endüstriyel gelişmelere paralel olarak her geçen gün artmaktadır.

1.6.2. Doğruluk

Doğruluğu tanımlamak oldukça güçtür. Doğruluk daha çok çevrim dışı uygulamalarda kullanılan bir özelliktir ve bir robotun hareket edebilmesi için yazılan programın, uç işlevci tarafından gerçekleştirilme derecesidir.

1.6.3. Yinelenebilirlik

Robotun uç işlevcisinin birçok işlemi gerçekleştirdikten sonra tekrar aynı noktaya gelebilme özelliğidir. Bir robotun “tut ve yerleştir” özelliği için programlandığında her seferinde aynı noktadan nesneyi alabilmesi örnek olarak verilebilir. Günümüzde kullanılan robotların tekrar edebilirliği 0.05 ile 0.005 inç arasındadır.

1.7. Robotların Kullanıldığı Yerler

Robotlar uzun zamandan beri sanayide ve çeşitli endüstri dallarında kullanılmaktadır. Bunlar bazen sabit makine şeklinde, bazen de algılayıcılar ve bilgisayarlarla donatılmış hareketli araçlar biçiminde olabilirler.

1.7.1. Tıp endüstrisinde kullanılan robotlar

Günümüzde laboratuvar düzeyinde olsa da robot cerrahlar ile yapılan, oldukça ileri cerrahi uygulamalar bilinmektedir. Bir cerrahın denetimindeki bir makinenin bir ameliyatı gerçekleştirmesi, robotların yaptığı ameliyata örnek verilebilir. Bir tarafta görüntü sistemleri ve cerrahi el aletlerindeki gelişme ve değişim; diğer tarafta robot sistemler ve mikro makinelerdeki değişim robot cerrahisinin temellerini oluşturacaktır.

1.7.2. Savaş silahları endüstrisinde kullanılan robotlar

Askeri endüstri alanında geliştirilen pilotsuz uçaklar, yerdeki mevzilenmiş askerlere her türlü olay hakkında kuşbakışı görüntü verebilmektedir. Savaş esnasında işgalci tarafın tahrip gücü yüksek olan silahları harekete geçirmek için gönderdikleri sinyalleri karıştırarak, etkisiz hale getirebilmektedir. Başarılı gözcülükleri ile olayları anında savaş kontrol merkezine iletmeleri sayesinde, savaşların kazanılmasına büyük ölçüde yardımcı olmaktadır. Askeri endüstri alanında çalışan bilim adamları tüm bu işlemleri gerçekleştirmek için uzaktan kumandalı pilotsuz uçaklar geliştirmişlerdir.

1.7.3. Film endüstrisinde kullanılan robotlar

Robotlar, bilimkurgu filmlerinde kullanılmaktadır. Hepimizin sinema ve televizyonlarda izlediği bilimkurgu filmlerinin başrolünü robotlar aldığı görülmüştür.

1.7.4. Uzay endüstrisinde kullanılan robotlar

Uzay endüstrisinde kullanılan robot örneklerinin önemli bir bölümünü NASA geliştirmiştir. NASA yapmış olduğu uzay çalışmalarını İnternet üzerinden tüm dünyaya bildirmektedir.

1.7.5. Evde ve ev çevresinde kullanılan basit robotlar

Çiçeklerin sulanması, tozların alınması, gazetenin getirilmesi, mumların yakılması ve meşrubat servisinin yapılması gibi işlerde kullanılmak üzere Omnibot 2000 robotu geliştirilmiştir. Ayrıca görme engelliler için düşünülen kılavuz robotlar üretilmiştir.

1.7.6. Tıp alanında kullanılan basit robotlar

Japonların geliştirdiği hastabakıcı robotlar hastayı yatağından yavaşça kaldırarak

röntgen odasına veya ameliyathaneye götürebilmektedir. Ayrıca tıp öğrencilerini yetiştirmek için vücut sıcaklığı, nabız ve kalp atışı olan ve verilen programa göre öğrencinin tespiti gereken değişik hastalık numaralarını yaparak tıp öğrencilerinin geliştirilmesi sağlanabilmektedir.

1.7.7. Robotların sanayideki kullanım alanları

Sanayi robotlarının başlıca uygulama alanları aşağıdaki şekilde sıralanabilir.

Pres döküm: Robotların pres döküm sanayinde kullanılmalarına önemli iki etken neden olmaktadır. İlki, kalıplama işleminde sıcak metalin dikkatli ve düzenli bir şekilde pres altında kalıplanması işlemidir. İkincisi, robotların döküm işleminde kullanılmasında yardımcı materyali asgariye indirmedir. İnsan sağlığı açısından uygun olmayan çalışma şartlarından olan dökümcülükte robotların kullanılması uygulamayı kolaylaştırmaktadır.

Nokta kaynağı: 1969 yılında ilk elektrikli nokta kaynağı sanayi robotlarının başlıca uygulama alanı olan otomobil sanayinde kullanılmaya başlanmıştır. Bugün otomobil sanayisinde nokta kaynaklarının hemen hemen tümü robotlarla yapılmaktadır.

Ark kaynağı: Ark kaynağı daha kompleks bir işlem gerektirmektedir ve nokta kaynağından daha zordur. Bu işlem için karmaşık robotların kullanılması gerekmektedir.

Dökümcülük: Kompleks ve nitelikli parçaların üretiminde döküm kalıplarının bir araya getirilmesinde kullanılır.

Dövmecilik: İnsan sağlığı açısından tehlikeli olan elle yapılan sıcak işlemcilik yerine robot kullanılmaktadır.

Presleme: Otomobil parçası, kaportası, uçaklar ve sanayi içinde birçok işlemde pres kullanılmaktadır. Yapılan presleme işlemlerinde robot istihdam edilmektedir.

Yüzey işleme ve spreyleme: İnsan sağlığına birinci derecede zararlı, püskürtme ile boyama işleminde özellikle otomobil sanayinde kullanılır. Diğer sahada beyaz eşyada, mobilya ve marangozluk sanayinde boyama, cilalama ve porselen gibi malzemelerin yüzey düzenlemesi işlemlerinde kullanılmaktadır.

Plastik kalıplama: Robotlar palet, yükleme, boşaltma, ayarlama, püskürtme makinelerinde malzemelerin boşaltılmasında kullanılmaktadır.

Takım tezgâhları yüklenmesinde: Robotlar takım tezgâhlan depolarında artan önemde rol oynamaktadır. Takım tezgâhları yanında parka kaldırma, yerleştirme, yerini değiştirme vb. birçok yerlerde kullanılmaktadır.

Paketleme işinde: Sanayi robotları ticari, dağıtımda ve üretimde özellikle paketlemede yararlı bir şekilde kullanılmaktadır.

Montaj hattı uygulamasında: Robotlar montaj hattında, aletlerde, makine mühendisliğinde, otomobil elektrik malzemesinde, elektrik ve elektronik makinelerinin imalatında kullanılmaktadır. Ayrıca ısı işlem, boya işleri, radyoaktif malzeme kullanan alanlar, uzay çalışmaları ve sualtı çalışmalarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

1.8. Robotların Kullanım Avantajları

Günümüz çalışma şartları ve rekabet ortamında, yapılan işin mükemmelliği ve kalitesi büyük önem kazanmış durumdadır. Robot kullanımıyla, kalite arttırılmakta, standard üretim sağlanmakta, işçilik ve malzeme giderleri azaltılmaktadır. Böylece robot sistemine sahip şirketlerin rakipleriyle arasındaki rekabet güçleri artmaktadır. Bunların yanında, robotlar insanları monoton ve ağır hacimli işlerden, kaynakhane ve boyahanenin zehirleyici etkili ortamlarından kurtarırlar. Dar alanlarda birçok işlemin yapılması imkânını tanırlar. Son zamanlarda yapılan ve gelişmiş ülkeleri kapsayan bir araştırmaya göre son 130 yılda kişi başına üretkenlik yaklaşık 25 kat artmıştır. Bu üretkenlik artışının yarısı yani 13 kat kadarı fiziki ürün artışı, diğer yarısı da insanların çalışma sürelerinin yaklaşık yarı yarıya düşmesi şeklinde görülmüştür.

Fiziki ürün artışı ancak, otomasyon, anında üretim (just-in-time) ve esnek (flexible) üretim ile gerçekleşebilmektedir. Bugün yarı yarıya çalışıp 13 kat daha yüksek bir refah seviyesinde yaşamak da sadece sanayi devriminin getirdiği makineleşme, otomasyon ve günden güne artan robot kullanımı sayesinde gerçekleşmiştir.

Herhangi bir alanda robot kullanımının düşünülmesi aşağıdaki temel faktörlere bağlıdır;

- Üretimde esneklik ve prodüktivitenin yükseltilmesi,
- İnsan sağlığını tehdit eden bir tehlikenin bulunması,
- İş gücünün zor bulunması ve pahalı olması; ayrıca insanların bu işleri yapmak istememesi,
- Üretimde bozuk parça sayısının azaltılması ve malzeme tasarrufu,
- Eğitim, hizmet, sağlık, güvenlik alanlarında çeşitli kolaylıkların sağlanması [6].

BÖLÜM 2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Endüstriyel robot kullanımlarında en başta gelen konu, robotların mekanik modellenmesi ve ihtiyaca göre serbestlik derecelerinin tayin edilerek kinematik ve dinamiksel olarak modellerinin çıkartılarak kontrol işlemlerinin gerçekleştirilmesidir. Literatürde birçok farklı kinematik özellik ve yapılarla sahip robot tiplerine rastlanabilmektedir. En yaygın kullanılan robot tipleri iki, üç ve altı serbestlik dereceli robot tipleridir.

Kuntalp ve İnan [7], Akbaş ve Esin [8], Canberi [9] tarafından iki serbest dereceli robot yapısı geliştirilmiştir. Albayrak [10], Sönmez ve ark. [11], Hacıoğlu [12], Köker ve ark. [13] tarafından üç boyutlu uzayda hareket edebilen üç serbestlik robot kolu yapısının tasarımı gerçekleştirmiştir ve değişik kontrol yöntemleri ile robotların kontrolü sağlanmıştır. Dört serbestlik dereceli robot tipine bir örnek Öztürk [14] tarafından gerçekleştirilmiştir. Bayrak [15] ise beş serbestlik derecesine sahip robot yapısını geliştirerek robotun kinematiksel olarak kontrolünü gerçekleştiren bir yapı tasarlamıştır. Yine altı serbestlik dereceli kinematik yapıya ait tipik bir örnek de Beykont [16] tarafından geliştirilmiştir.

Çalışmalardan, en çok mafsallı robot kolu yapısının tercih edildiği görülmektedir. Bunun sebebi ise çalışma uzaylarının diğer robot yapılarına göre daha geniş olmasının yanı sıra manipülasyon yeteneklerinin yüksek olması ve yüksek hassasiyet özelliği sergileyebilmeleridir. Yoğun olarak tercih edilen diğer bir robot yapısı da SCARA robot yapısıdır. SCARA robotların en önde gelen özellikleri yüksek hızda hareket edebilme ve kinematiksel olarak mafsallı robot yapısına göre daha basit bir yapı teşkil etmeleridir.

Gerçekleştirilen fiziksel sistemlerde amacın çoğunlukla referans bir yörüngenin en iyi hassasiyette gerçekleştirilmesi olduğu görülmektedir. Bu amaçla da robot kontrolü alanında bugüne kadar değişik tipte ve değişik yapıda robot tipi geliştirilmiştir. Sönmez ve ark. [11], kontrol için kullanılan YSA (yapay sinir ağı) modeli ile yeterli doğrulukta öğrenme algoritması kullanarak sisteme adaptiflik kazandırmış, robot eklem açılarının konum ve yer bilgilerini sensör kullanmadan belirleyebilmişlerdir.

Köker ve ark. [12], tasarladıkları üç eklemlili bir robot kolunun ters kinematik probleminin çözümü için bir yapay sinir ağı önermişler ve bunu kabul edilebilir bir hata seviyesine ulaşmaya kadar eğiterek yapay sinir ağının ters kinematik probleminin çözümü için uygunluğunu göstermişlerdir.

Öztürk [14] dört serbestlik dereceli SCARA tipi robot kolunun yapay sinir ağı ile eğitilmesi konusunu ele almış. Tork değerlerini yapay sinir ağına giriş; konum değerlerini ise çıkış olarak vererek, robotun yapay sinir ağları ile eğitilmesi sonucu; performans grafiği ile her bir eklemin, konumlarının çıkış ve hata değerlerinin görülebildiği grafikler elde etmiş ve yapay sinir ağlarının hiç görmediği test setindeki değerleri ağa göstererek ağın verdiği cevapları incelemiştir.

Canberi [9], çalışmasında robot kontrolü amaçlı bulanık yapay sinir ağı denetleyici önermiş ve eklemlerine zamanla değişen bozucu yükler uygulanan iki serbestlik dereceli düzlemsel robota sinüs ve basamak girişleri uygulanmış ve oldukça iyi bir referans model izleme performansını gözlemlemiştir.

Durmaz [17], Yapay sinir ağları, bulanık mantık ve model referans adaptif kontrol dinamik sinirsel bulanık mantık kontrolörü yapısı altında birleştirilerek bir, iki ve üç serbestlik dereceli robot kollarına verilen yörüngeler izlettirmiş ve performans değerlerini gözlemlemiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde, dinamik sinirsel bulanık mantık kontrolörünün, hata takibinde oldukça başarılı olduğu görülebilmektedir.

Kuntalp ve İnan [7], Bulanık Mantık ve Yapay Sinir Ağlarını iki parçalı bir robot kolunun kontrolündeki performans kıyaslamalarını bir bilgisayar simülasyonu olarak sunmuşlardır. Sonuçta elde edilen bulgular ışığında her iki kontrolörün de birbirine çok yakın ve tatmin edici bir performans sergilediğini gözlemlemişlerdir. Literatürde Bulanık-Sinirsel yapıların uygulandığı kontrol yapılarının uygulandığı farklı sistemlere de rastlanmaktadır [19, 20].

Benzer şekilde Hacıoğlu [12], bulanık mantık ile kayan kipli kontrolün avantajlarını bir araya getiren bir kontrol mekanizmasının tasarlayarak kayan kipli kontrolcünün kontrol kazancının ve kayma yüzeyi eğiminin bulanık mantık ile belirlendiği, bulanık mantıklı kayan kipli kontrolör tanıtarak bu kontrolörü robot modeline uygulamıştır.

Sağgöz [21], kayan yüzeyde oluşturulabilecek farklı kontrolör yapılarını incelenmiş ve birbirlerine göre avantaj ve dezavantaj durumlarını değerlendirmiştir.

Farklı kontrol yapılarının karşılaştırılması hususunda Altınorak [18], hidrolik ve pnömatik devre elemanlarıyla spreyci boyama için tasarlamış olduğu 6 serbestlik dereceli bir boya robotunun 2. ve 3. hidrolik eksenlerinin referans yörünge takibinin en az hatayla gerçekleştirilmesi için değişik kontrolörlerin denenmesi ve karşılaştırılmasını ele almıştır. Noktasal kütle yaklaşımıyla iki ayaklı bir robot modeli oluşturularak sistemin yürüme kontrolü için özgün bir yöntem geliştirmiştir. Yürüme davranışını dinamik benzetimlerle incelemiş ve önerilen “model – kontrol yöntemi” ikilisi ile elde edilen sonuçları gözlemlemiştir.

Akbaş ve Esin [8], de doğrusal olmayan sistemler için bir Neuro-Fuzzy (NN) kontrolör yaklaşımı sunarak iki serbestlik dereceli robot kolunda yüklü ve yüksüz durumlarda yörüngeyi takip ettirerek iyi sonuçlar elde etmişler ve kontrol yaklaşımları içerisinde iyi bir kontrol yöntemi olduğunu gözlemlemişlerdir. Yapay sinir ağları ile kullanımının yanı sıra bulanık mantık denetleyicilerinin tek başına kullanıldığı çalışmalar da mevcuttur [22].

Yapısındaki basitliği sebebiyle en sık olarak kullanılan kontrol yöntemlerinden biri de PID kontrol yöntemidir. Son yıllarda kendinden uyarlamalı PID kontroller üzerinde yoğun çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Leva [23] ve Wang [24] birkaç sistem sınıfı için geri besleme tekniğine dayalı kendinden uyarlamalı PID kontrolünü uygulamışlardır. Adaptif bir PID kontrolörü de dış gürültülere maruz bir takım kaotik sistemlerin denetiminde kullanılmıştır [25].

Erdoğan ve ark. [26] uyum fonksiyonu olarak integral mutlak hatasının alındığı ve PID parametrelerinin genetik tabanlı bir algoritma ile belirlendiği kontrol yapısını geliştirmişlerdir.

Robotik sistemlerde karşılaşılan en büyük sorunlardan birisi de belirsiz parametrelerdir. Sistem yapısındaki belirsizlikler arttıkça bu sistemin kontrol edilmesi daha da zorlaşmaktadır. Bu sebeple kontrolörlerden istenen en önemli özelliklerden biri parametre değişimleri ve belirsizliklerle başarılı bir şekilde başa çıkabilmesidir. Bunun yanı sıra robotik sistemler çoğunlukla ağır işlerde kullanıldığından, sistemin maruz kaldığı bozucu etkilerle de başa çıkabilecek bir kontrol yapısı geliştirebilmek gerekmektedir.

Kayan kipli kontrol yapısı, belirsiz sistem yapılarını kontrol etmede kullanılan en popüler kontrolörlerden biri olma özelliğini taşımaktadır [27, 28]. Kayan kipli kontrol yapısının en önde gelen özelliği parametre değişimlerine ve dış kaynaklı bozucu etkilere karşı dayanıklı bir yapı sergilemesi ve sistemi rahatsız eden bu değişimleri başarılı bir şekilde düzenleyebilmesidir. Kayan kipli kontrol yapısı, robot manipulatörleri, hava araçları, DC motorlar, kaotik sistemler ve benzeri sistemlerde yoğun olarak tercih edilen ve kullanılan bir kontrol yapısı olma özelliğini taşımaktadır.

Gelişmiş mikroişlemcilerin bulunmaması ve SMC sistemlerinde karşılaşılan yüksek salınım sebebiyle kayan kipli kontrol yapısı 1970'li yıllardan önce pek rağbet görmemiştir. Ancak 1980'li yıllarda, sahip olduğu dayanıklı kontrol yapısı sayesinde kayan kipli kontrol yapısına olan ilgi artmaya başlamıştır. Genel olarak ele alındığında çoğu durumlarda sistem parametreleri tam olarak bilinmemekle

beraber çevresel bozucu etkiler de tam olarak belirlenememektedir. Kayan kipli kontrol yapısının parametre değişimlerine karşı göstermiş olduğu hassasiyet ve dayanıklılık, SMC'nin temel tercih sebebi olmuştur. Ancak bu avantajlarının yanı sıra kayan kipli kontrol yapısında karşılaşılan en büyük sorun, anahtarlama kısmındaki sonlu hızdan dolayı aşırı sıçramaların yaşanmasıdır. Bu durum ise sistemin davranışını olumsuz yönde etkilemektedir. Diğer bir dezavantajı da kayan kipli kontrol yapısının, sistemin maruz kaldığı belirsizlikleri de içerecek şekilde sisteme ait matematiksel modelin bilinmesini zorunlu kılmasıdır [29, 30].

Kayan kipli kontrol yapısının dayanıklılık ve hassasiyetini arttırmak ve özellikle de başlangıç aşamasında oluşturduğu aşırı sıçramaları bir nebze de olsa azaltmak için değişik kontrol yöntemleri, SMC kontrol ile eşzamanlı olarak kullanılmış ve SMC kontrol parametreleri düzenlenmeye çalışılmıştır.

Kuo, and et al. [31], PID uyarlamalı kayan kipli kontrol mekanizmasını geliştirerek bu yapıyı belirsiz sistemlere uygulamış ve parametre değişikliğinin yanı sıra sistemi rahatsız eden bozucu etkilere karşı sisteme dayanıklılık kazandırmışlardır. Kontrolörün anahtarlama kısmında oluşan yüksek frekanslı sıçramaları önlemek için ise sınır katman tekniğini kullanmışlardır. Benzer şekilde bir PID uyarlama mekanizması, yapay sinir ağları ile birlikte kullanılmış ve iki serbestlik derecesine sahip bir düzlemsel robota uygulanarak robotun PD, PID, PD tabanlı yapay sinir ağı ve PID tabanlı yapay sinir ağı kontrolörlerinin uygulanması durumunda sergilediği davranışlar gözlemlenerek değerlendirilmiştir [32].

Onur ve ark. [33] de kendinden uyarlamalı, bulanık tabanlı bir PID kontrol yapısı geliştirerek "FEEDBACK PCS 327 Process Control Simulator" PLC sisteminde uygulamışlardır.

Kayan kipli kontrol yapısı ile birlikte kullanılan en yaygın kontrol yöntemlerinde birisi de yapay sinir ağı esaslı kontrol yapısıdır. Yapay sinir ağları, bilinmeyen ve lineer olmayan sistemlerin kontrolünde karşılaşılan güçlükleri çözmede kullanılan bir araç rolünü üstlenmektedirler. Yapay sinir ağları (NN), sistemin detaylı

analitik modeline ihtiyaç duymaksızın karmaşık giriş-çıkış ilişkilerini çözebilme yeteneğine sahip olduklarından dolayı karmaşık fiziksel sistemlerin modellenmesinde ve kontrol edilmesinde yaygın olarak kullanılırlar [34, 35].

Fallahi ve Azadi [36], yapay sinir ağı tabanlı kayan kipli kontrol yapısını geliştirerek bir DC motorun uyarlamalı kontrolünü gerçekleştirmişlerdir.

Kayan kipli kontrol yapısının geliştirilmesinde ve iyileştirilmesinde kullanılan diğer bir kontrol yöntemi de bulanık mantık kontrol yapılarıdır. Knight, Sutton ve Jenkins [37], bulanık kural tabanlı bir kayan kipli kontrol yapısını geliştirerek lineer ön tanımlı ve hareketli bir sistem üzerinde uygulamışlardır. Elde edilen netice, sistemin sabit hal durumuna getirilebildiğini ve bunun kısa bir zaman içerisinde gerçekleştiğini göstermektedir. Bulanık mantık tabanlı kayan kipli kontrol (FSMC) yapılarının yanı sıra kayan kipli kontrol parametrelerinin en iyi şekilde optimize edilmesi için bulanık mantık ve yapay sinir ağlarının kayan kipli kontrolör ile birlikte kullanıldığı kontrol yapılarına literatürde rastlamak mümkündür.

Zhao, and et al. [38], bulanık sinir ağı tabanlı bir yapıyı kayan kipli kontrolörün optimize edilmesi için kullanarak bulanık sinir ağı tabanlı kayan kipli kontrolör yapısını geliştirmişler ve bu kontrol yapısını misil yükleme sistemlerinde faz karakteristiklerinin minimize edilmesinde kullanmışlardır. Elde edilen sonuçlar, bulanık sinir ağı tabanlı kayan kipli kontrol yapısının iyi bir hata takibi sergilediğini ve belirsizlikleri iyi derecede tahmin edebildiğini göstermiştir.

Robot kontrolünde en çok tercih edilen diğer bir kontrol yöntemi de hesaplanmış moment yöntemidir. Bu yöntem, sistemin durum-uzay yapısının oluşturulmasına gerek duymaksızın eklem yerlerine uygulanması gereken torqların hesaplanmasında kullanılan düz dinamik denklemlerin türetilikten sonra geri besleme doğrusallaştırması yöntemiyle hatayı minimize etme ve verilen hedefe ulaşmaya odaklı bir kontrol yöntemidir.

Hesaplanmış moment yöntemi üzerinde bir çalışma, Yapıcı [39] tarafından yürütülmüştür. Bu çalışmada 14 serbestlik derecesine sahip iki ayaklı bir robotun hareket analizleri ve hata minimize işlemleri, hesaplanmış moment yöntemi ile sağlanmış olup elde edilen sonuçlar, hesaplanmış moment yönteminin robot uygulamalarında başarılı olduğunu göstermiştir. Sankaran [40] ise hesaplanmış moment yöntemini kullanarak esnek bir robot kolu yapısının kontrol uygulamasını gerçekleştirmiş ve robot koluna farklı yükler yükleyerek performans değerlendirmesi yapmıştır. Elde edilen sonuçlar, hesaplanmış moment yönteminin, sistem üzerine uygulanan bozucu etkileri dengelemede oldukça başarılı olduğunu göstermiştir.

Yapılan literatür çalışmaları göz önüne alındığında yüksek serbestlik derecesine sahip sistemlerin oldukça az olduğu saptanmıştır. Bununla beraber sistemleri kontrol etmek amacıyla seçilmiş olan kontrol yapılarının çoğunlukla tekil kontrolör yapısından müteşekkil olduğu ve çoklu kontrol yapılarının da çoğunlukla Neural-Fuzzy veya FSMC yapısında olduğu görülmekte olup Yapay Sinir Ağları, Bulanık Mantık Kontrol ve Kayan Kipli Kontrolün birlikte kullanıldığı kontrol yapılarının literatürde çok az uygulandığı tesbit edilmiştir. Bu sebeple bu üç kontrol yönteminin birlikte kullanıldığı Bulanık-Yapay Sinir Ağı Tabanlı Kayan Kipli Kontrol yapısının gerçekleştirilmesine ve elde edilen sonuçların diğer kontrol yapılarının sergilediği sonuçlar ile karşılaştırılarak en ideal kontrol yapısının belirlenmesine karar verilmiştir.

Bunların yanı sıra kontrol edilecek sistem olarak literatürde çoğunlukla kinematik olarak basit yapıların ve düşük serbestlik derecesine sahip sistemlerin tercih edildiği tespit edildiğinden bu çalışmada kinematik olarak daha kompleks bir yapı teşkil etmekte olan dört serbestlik dereceli bir robot kolunun kinematik ve dinamik olarak modellenerek kontrolünün gerçekleştirilmesine karar verilmiştir. Kontrol sistemlerinin uygulanması dâhilinde temel olarak literatürde en çok tercih edilen yöntemlerden biri olan referans bir yörüngenin minimum hata ile takip edilmesi esas alınmış ve sistemin bu hatayı hangi yakınlıkta takip ettiği gözlemlenerek başarımlar değerlendirilmesinin yapılmasına karar verilmiştir.

Üçüncü bölümde, tasarımı gerçekleştirilen mekanik sistemin fiziksel özellikleri ve açısal parametreleri tanıtılıp sistemin çalışma uzayı ve limitlerinin tayin edilmesi üzerinde durulacaktır.

Dördüncü bölümde, robot kinematiğine ait temel kavramlara yer verilerek dört eksenli robota ait kinematik eşitliklerin türetilmesi işlemi gerçekleştirilecektir. Düz ve ters kinematik çözümlenmelerle elde edilecek olan parametreler, sistemin hareket denklemlerinin türetilmesinde kullanılacak olan ve referans yörüngenin belirlenmesinde kullanılacak olan parametrelerin temelini teşkil edecektir.

Beşinci bölümde, dinamik sistemler hakkında genel bilgi verildikten sonra dört eksenli robot kolunun düz ve ters dinamik işlemlerinin yapılarak mekanik sistemin hareketini tanımlayacak olan hareket denklemlerinin çıkartımı üzerinde durulacaktır. Elde edilen hareket denklemleri, sistemin kontrol yapısının geliştirilmesinde kullanılacak olan denklemler olmaktadır.

Altıncı bölümde ise kinematik ve dinamik yapıya bağlı olarak oluşturulan her bir kontrol yapısının kullanılması durumunda sistemin simülasyon sonuçları değerlendirilecektir. Elde edilen sonuçlara göre kontrol yapılarının performans durumları göz önüne alınarak karşılaştırma yapılacak ve sistem için en uygun kontrol yapısı belirlenmeye çalışılacaktır.

Yedinci bölümde de robot koluna, hareket analizi yapmak ve performans tablosu oluşturmak amacıyla takip ettirilecek referans yörüngelere yönelik bilgiler verilecektir.

Son olarak sekizinci bölümde de altıncı bölümde oluşturulan kontrol yapılarının dört eksenli robot kolu üzerinde uygulanması sonucu elde edilen simülasyon sonuçları değerlendirilerek her bir kontrolörün performans takibi ve bozucu etkilere karşı kontrolörlerin dayanımı irdelenecektir.

BÖLÜM 3. FİZİKSEL SİSTEM YAPISININ TANIMI

Bu çalışmada, ağırlıklı olarak endüstriyel amaçlı olarak kullanılan 4 serbestlik dereceli bir robot kolu yapısı ele alınacaktır. Robot, 4 adet eklem ile birbirine tutturulan dört adet koldan meydana gelmektedir. Robot yapısında mevcut olan eklemler sırasıyla:

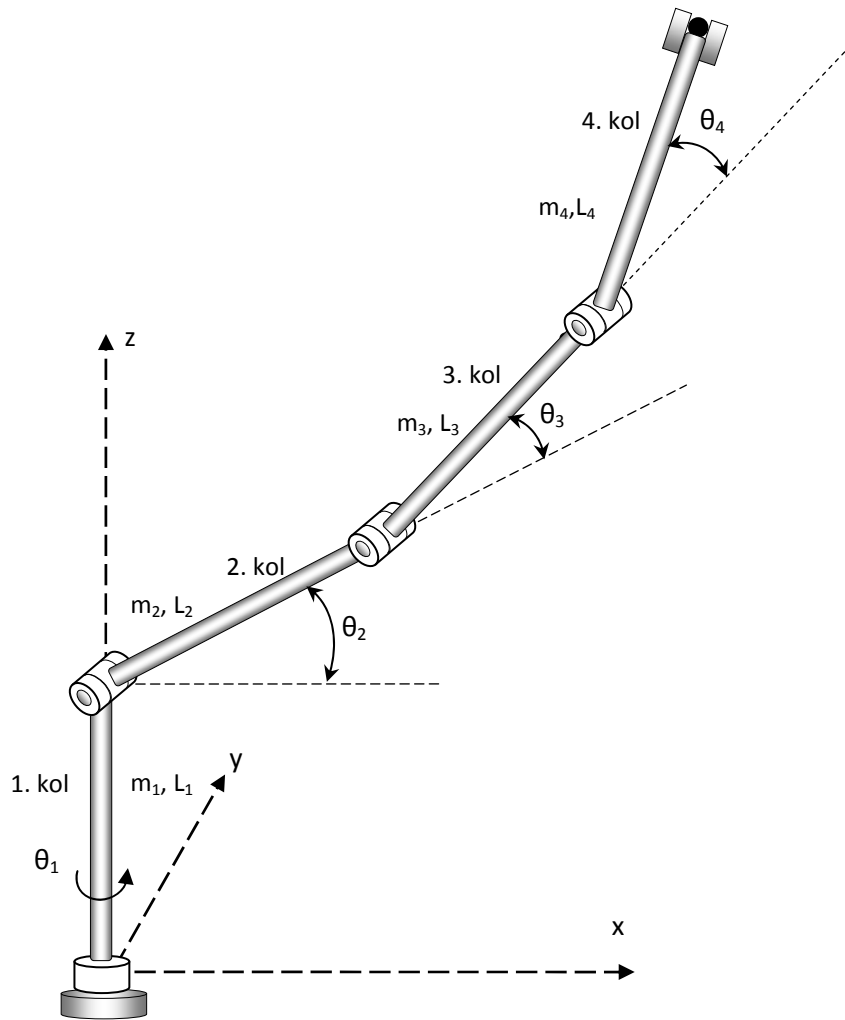
1. kol: Zemine tutturulmuş olup yalnızca z eksenini etrafında dönme yapabilmektedir. Taban eklemi sayesinde robot kolu 3-boyutlu uzayda hareket edebilmektedir. Taban ile omuz eklemi arasında kalan bağlantı elemanıdır.
2. kol: Omuz eklemi ile dirsek eklemi arasında kalan bağlantı elemanıdır. 1. kol üzerine yerleştirilmiş olup 1. kolün önme eksenine dik olarak dönme hareketi yapabilmektedir.
3. kol: Dirsek eklemi ile bilek eklemi arasında kalan bağlantı elemanıdır. 2. kola bitleştirilmiş olup 2. kolün dönme eksenine paralel dönme hareketi yapabilmektedir.
4. kol: Bilek eklemi ile 3. kola bitleştirilmiş olup, 3. kolün dönme eksenine paralel olarak dönme hareketi yapabilmektedir.

3.1. Robot Kolunun Fiziksel Yapısı

Bütün kollar birbirlerine döner eklemler ile bağlıdırlar. Sistemde kullanılan eklem sayısı dört olduğundan sistem dört serbestlik derecesine sahiptir. Robot koluna ait bir resim şekil 3.1’de verilmiştir.

Şekil 3.1’de de görüldüğü gibi robot kolunun uç noktası sistemin diğer bir koluna veya zemine bağlı değildir. Bundan dolayı açık bir kinematik zincir yapısı özelliği teşkil eder.

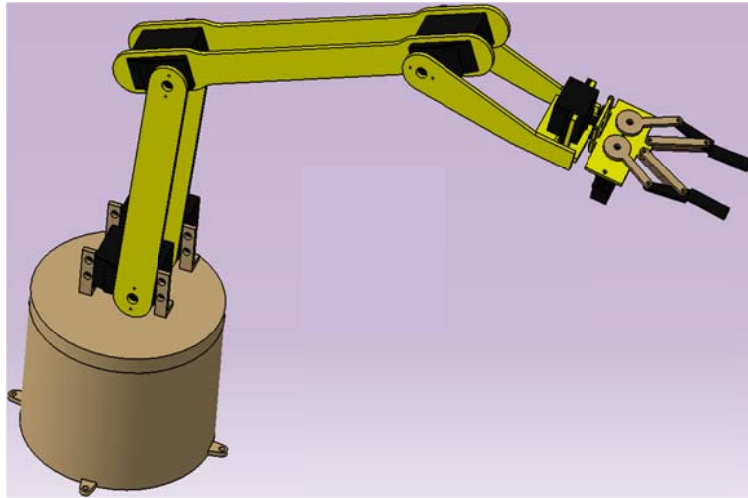
Robot kolları, endüstriyel alanlarda değişik uygulama alanlarında kullanılmaktadırlar. Mafsallı robot yapıları, çalışma uzayları geniş olduğundan dolayı nispeten daha çok tercih edilen robot tipleridirler. Özellikle kaynak ve parça montajı gibi farklı işlemlerde kullanılırlar. Yapılan işlemlerin hassaslığından dolayı robot kolunun farklı hızlarda çalışması gerekebilir. Bundan dolayı bu çalışmada robot kollarının tahrik mekanizması olarak servo motor tercih edilmiştir. Servo motorlar, hassas çalışma yapıları ve değişken hızlarda çalışabilme özelliklerinden dolayı, robotik uygulamalarda en çok tercih edilen motor tipleri olma özelliğini taşımaktadırlar.



Şekil 3.1. Dört eksenli robot kolunun şematik gösterimi.

Uygulaması gerçekleştirilen robotun şematik görünümü Şekil 3.1'de verilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere robot kolu, ucunda 3 eksenli bir tutucunun bulunduğu

beş eksenli bir mekanizma şeklindedir. Robot kolunun kontrolünü gerçekleştirmek üzere bir kontrol kartı hazırlanmış olup sistemin kinematik bilgisi kodlanarak karta yüklenmiştir. Ancak burada yapacağımız çalışma yalnızca kinematik analizden ibaret kalmayacaktır. Fiziksel çalışmadan ziyade, sistemin matematiksel modeli üzerinde durulacak ve olası bir kontrolörün tasarlanması ve sisteme uygulanması halinde robot kolunun nasıl bir cevap vereceğine yönelik tahmini veriler elde etmektir. Robot kolunun kinematik ve dinamik modellemesi esnasında tutucu kısmı hesaba katılmamış ve dört serbestlik dereceli ana gövde üzerinde çalışılmıştır. Şekil 3.1’de verilen modelde; $\{m_1, m_2, m_3, m_4\}$ kol ağırlıklarını, $\{L_1, L_2, L_3, L_4\}$ kol uzunluklarını ve $\{\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4\}$ ise kolların dönme açılarını (bir önceki kola göre) ifade etmektedir. Bu amaçla robot kolunun hem kinematik ve hem de dinamik olarak matematiksel modeli çıkartılarak öngörülen kontrol yöntemleri dahilinde MATLAB, Simulink® ortamında sayısal olarak analizi gerçekleştirilecektir. Tablo 3.1’de sistemin fiziksel tanımlanması esnasında kullanılan değerler verilmiştir.



Şekil 3.2. Fiziksel uygulaması gerçekleştirilen beş eksenli robot kolu.

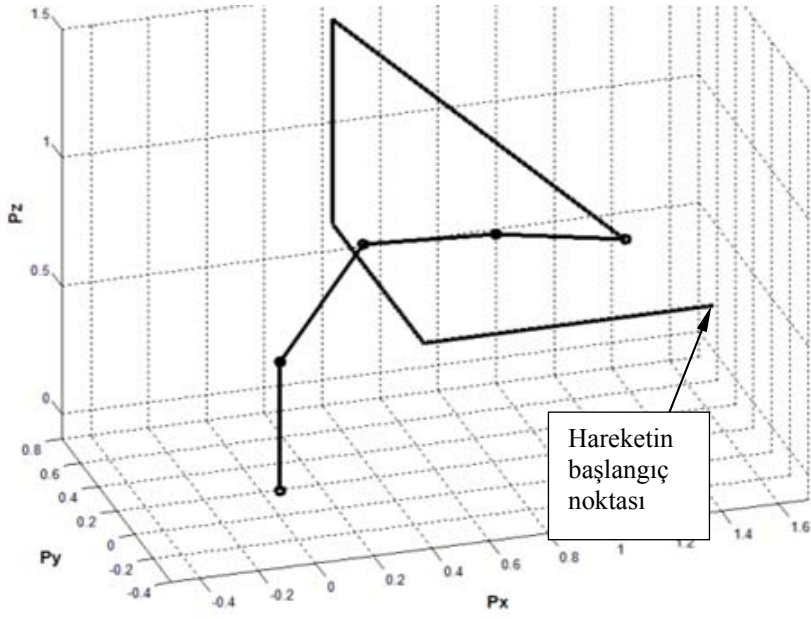
Robot kolunun Simulink® ortamında analizinin gerçekleştirilebilmesi ve farklı uygulamalar için analizlerinin karşılaştırılabilmesi için değişik yörüngeler tanımlanmıştır. Tanıtılan yörüngeler çerçevesinde robot kolunun farklı yol takibi için nasıl bir performans sergilediği gözlemlenmiştir. Her bir takip esnasında robot kolu belirli bir başlangıç noktasından başlatılarak istenen hedefi yakalamak ve onu en az hata ile takip etmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla robot koluna sabit bir başlangıç noktası atanmıştır. Şekil 3.3’de de görüldüğü gibi bu başlangıç noktası, bütün

kolların açılış değerlerinin sıfır olduğu ve robot kolunun x-y düzlemi üzerinde uzandığı bir konumlanma halidir. Başlangıç noktasına ait bu değerler de Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1. Dört eksenli robot kolunun fiziksel özellikleri.

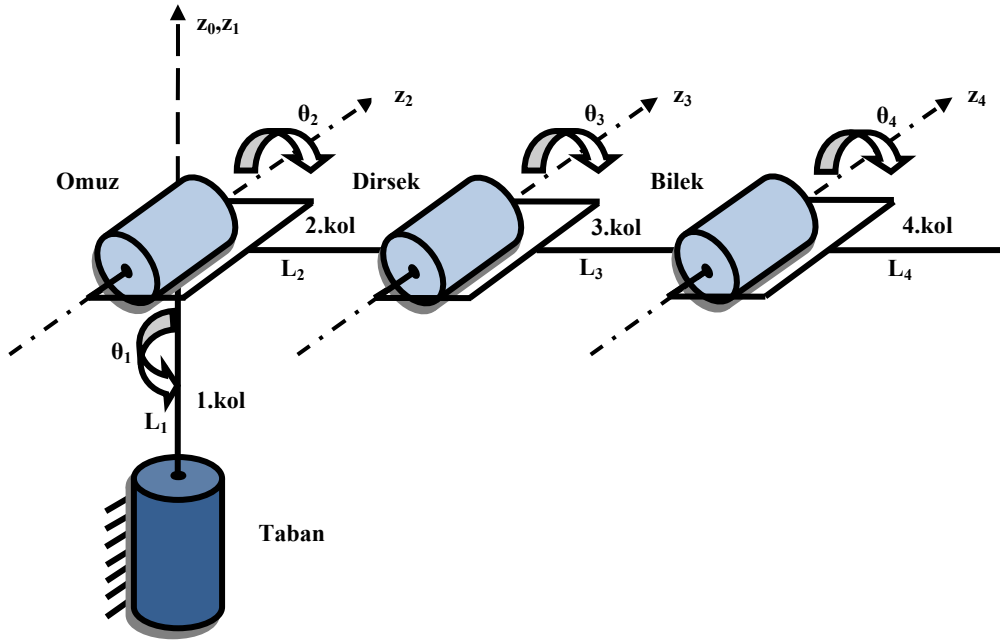
| Fiziksel Özellik | Gösterimi | Değeri | Birimi |
|------------------------------|--|---------------------------|---------------------|
| 1. Kolun kütlesi | m_1 | 1 | [kg] |
| 2. Kolun kütlesi | m_2 | 1 | [kg] |
| 3. Kolun kütlesi | m_3 | 1 | [kg] |
| 4. Kolun kütlesi | m_4 | 1 | [kg] |
| 1. Kolun yarıçapı | R | 0,05 | [m] |
| 1. Kolun uzunluğu | L_1 | 0,5 | [m] |
| 2. Kolun uzunluğu | L_2 | 0,5 | [m] |
| 3. Kolun uzunluğu | L_3 | 0,5 | [m] |
| 4. Kolun uzunluğu | L_4 | 0,5 | [m] |
| 1. Kolun sürtünme katsayısı | b_1 | 0,5 | [Nms] |
| 2. Kolun sürtünme katsayısı | b_2 | 0,5 | [Nms] |
| 3. Kolun sürtünme katsayısı | b_3 | 0,5 | [Nms] |
| 4. Kolun sürtünme katsayısı | b_4 | 0,5 | [Nms] |
| Yer çekimi ivmesi | g | 9,81 | [m/s ²] |
| 1. Kolun atalet momenti | I_1 | $\frac{1}{2}(m_1 R^2)$ | [kgm ²] |
| 2. Kolun atalet momenti | I_2 | $\frac{1}{12}(m_2 L_2^2)$ | [kgm ²] |
| 3. Kolun atalet momenti | I_3 | $\frac{1}{12}(m_3 L_3^2)$ | [kgm ²] |
| 4. Kolun atalet momenti | I_4 | $\frac{1}{12}(m_4 L_4^2)$ | [kgm ²] |
| Açıların başlangıç değerleri | $[\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4]$ | [0, 0, 0, 0] | [°] |

Tasarımı yapılan kolun en önemli avantajı 3-boyutlu uzayda hareket edebilmesi ve 4. kol yardımıyla çalışma uzayının genişletilmiş olmasıdır. Bu sayede robotun çalışma uzayı içerisindeki nesnelere manipüle etmesi daha da kolaylaştırılmış ve hareket kabiliyeti artırılmıştır. Bununla beraber matematiksel modelin türetilmesi



Şekil 3.5. Uzayda doğrusal yörünge takibi.

Şekil 3.6’te tasarlanmış olan dört eksenli robot kolunun kinematik düzeni şematik olarak verilmiş ve kolların hareket eksenleri tanımlanmıştır. Tasarlanan kinematik yapının matematiksel çözümüne ise 4. bölümde detaylı olarak değinilecektir.



Şekil 3.6. Dört eksenli robot koluna ait kinematik düzenleşim.

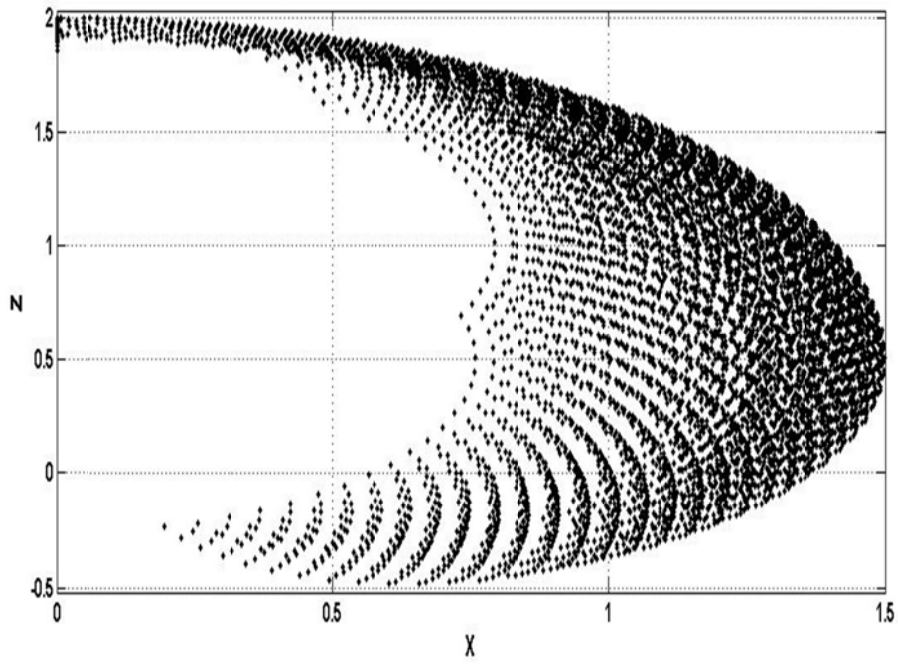
3.2. Çalışma Uzayının Belirlenmesi

Bu kısımda, dört eksenli robot koluna ait çalışma uzayına yönelik bazı çalışmalar gerçekleştirilecektir. İlk olarak robot kolunun düzlemsel olarak alabileceği en yüksek ve en düşük açı değerleri dâhilinde ulaşabileceği noktaların kümesi çıkartılacaktır. Robot koluna ait açı değerleri ve açısal sınırlandırmalar Tablo 3.2’de verilmiştir.

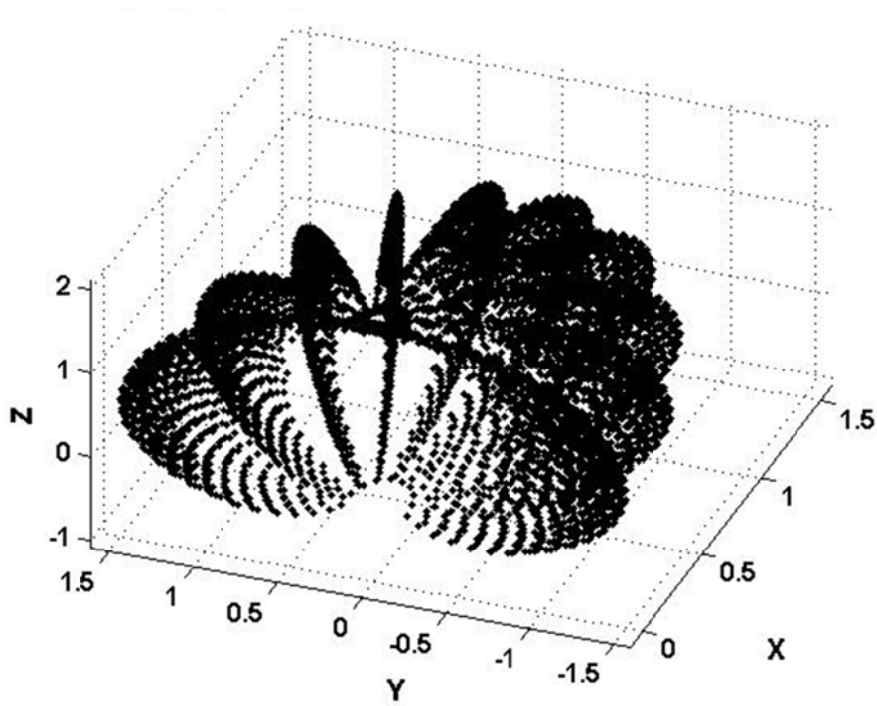
Tablo 3.2. Robot kollarının alabileceği en yüksek ve en düşük açı ve konum değerleri.

| Fiziksel Kısım | Özellik | Değer |
|--------------------|-------------------|---------------|
| 1. Kol | En alt açı değeri | $-\pi$ |
| | En üst açı değeri | π |
| 2. Kol | En alt açı değeri | 0 |
| | En üst açı değeri | π |
| 3. Kol | En alt açı değeri | $-5\pi/12$ |
| | En üst açı değeri | $\pi/6$ |
| 4. Kol | En alt açı değeri | $-5\pi/12$ |
| | En üst açı değeri | $\pi/4$ |
| Uç noktanın konumu | En alt Px değeri | 0 |
| | En üst Px değeri | $L_2+L_3+L_4$ |

Robot kolu, yalnızca tayin edilen bu açılar dâhilinde hareket edebilir. Kinematik çözümlene esnasında bu değerlerin üstünde veya altında bir değer elde edilmesi halinde robot kolu bu noktaya gitmez ve çalışma uzayının dışına çıktığına dair uyarı verir. Robot kolunun XZ çalışma alanı ile XYZ çalışma uzayı Şekil 3.7 ve 3.8’de verilmiştir. Endüstriyel uygulamalarda da bu tür sınırlandırmalar yapılmakla beraber bu işlem, robotun çalışma uzayı içerisindeki hareketinin kontrol edilmesi ve robotun hasar görmesinin önlenmesi için alınan bir takım tedbirlerdendir. Açısal sınırlama ile beraber gerçekleştirilen diğer bir sınırlama da robot kolunun uç noktasının ‘Px=0’ noktasının gerisine kaymayacak şekilde sürekli x ekseninde sıfır ve üstü değerlerde kalmasıdır.



Şekil 3.7. Dört eksenli robot koluna ait düzlemsel çalışma uzayı ($\theta_1=0$).



Şekil 3.8. Dört eksenli robot koluna ait 3-boyutlu çalışma uzayı.

Bir sonraki bölümde, robot kinematiğine ait temel kavramlara yer verilerek dört eksenli robota ait kinematik eşitliklerin türetilmesi işlemi gerçekleştirilecektir. Elde edilen eşitlik ve ifadeler, verilmiş olan referans bir noktaya karşılık gelen yönelme

hali için gerekli olan referans açı değerlerinin bulunmasında kullanılacak ve elde edilen açı değerlerinden ve açılardaki değişimlerden yola çıkılarak dinamik sistem için gerekli olan konum, hız ve ivme değerleri türetilmiş olacaktır. Türetilen konum, hız ve ivme değerleri, daha ileriki kısımlarda, robot kolunun gerçek zamanlı analizinde kullanılacaktır. Bu referans veriler, sistemin çıkış değerleri ile karşılaştırılarak aralarındaki hata belirlenecek ve bu hata minimize edilmeye çalışılarak, sistemin istenen konum, hız ve açı değerlerini en iyi şekilde takip etmesi ve bu sayede de kabul edilir tolerans aralıklarında optimum hareket takibinin gerçekleştirilmesi sağlanmaya çalışılacaktır.

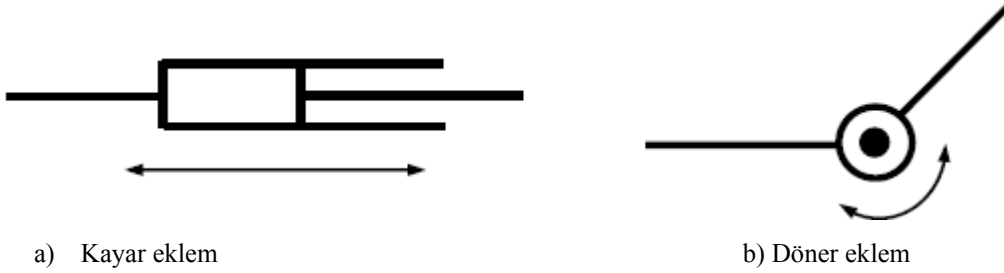
BÖLÜM 4. ROBOT KİNEMATİĞİ

Robotlarda, uzuvların konum, hız ve ivme gibi davranışlarının mafsalsal hareketlerine ve tahrik elemanlarına bağlı olarak değişimleri robot kinematığı olarak adlandırılmaktadır. Diğer bir deyişle robot kinematığı, kuvvetler ve momentler göz ardı edilerek robot kolu hareketlerinin zamanın bir fonksiyonu olarak referans eksen takımına göre incelenmesidir. Yani, robot uzuvları veya uzuvlar üzerindeki bir noktanın konum, hız ve ivmelerinin incelenmesidir [41].

4.1. Eklem Çiftleri ve Seri Düzenleşim

Robot mekanizması, birçok elemanın birbirine bağlanmasıyla oluşmuş çoklu bir sistemdir. Bu çalışmada, yüklerden dolayı oluşan esneklik ve deformasyonları göz ardı edilerek her bir eleman rijit olarak kabul edilecektir. Bir robot mekanizmasında birbirine bağlanan her bir elemana kol denmektedir. Bu kolların bir araya gelerek oluşturduğu yapı ise düzenleşim olarak adlandırılır. Bir düzenleşimin izah edilmesi esnasında her bir kolun bir diğer kola nasıl bağlandığının izah edilebilmesi gerekir.

Bağlantı çiftlerinin birbiri ile bağlantısının gerçekleştirilmesinde genel olarak iki tip eklemden söz edilebilir. Birinci tip eklem, iki elemanın sabit bir eksen boyunca birbirlerine göre kayma hareketini gerçekleştirdiği kayar eklemlerdir. Diğer bir deyişle kollardan biri, belirli bir doğrultuda diğer kol üzerinde kayma hareketi yapar. Bundan dolayı bu tür eklemlere kaymalı eklem de denilir. İkinci eklem tipi ise, iki kolun sabit bir eksen etrafında birbirlerine göre dönme hareketi gerçekleştirilmesine olanak veren döner eklemlerdir. Bu tür eklemler bazen menteşe, mafsalsal veya dönme eklem olarak da adlandırılır. Bütün biyolojik varlıkların yalnızca döner eklemlerden oluşup hiç kayar eklem bulundurmadıkları düşünülürse döner eklemlerin önemi daha iyi anlaşılabilir olur. Kayar ve döner eklem yapıları Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1. En yaygın eklem tipleri.

Kontrol edilecek sistemin tam olarak anlaşılabilmesi için robot sisteminin morfolojisinin tanımlanması gerekmektedir.

4.2. Robot Manipülâtör Bileşenleri

Robot sistemlerinde mekanik, elektriksel ve hesaba dayalı yapılar değişiklik gösterse de çoğu aşağıdaki 4 ana bileşeni bulundurur:

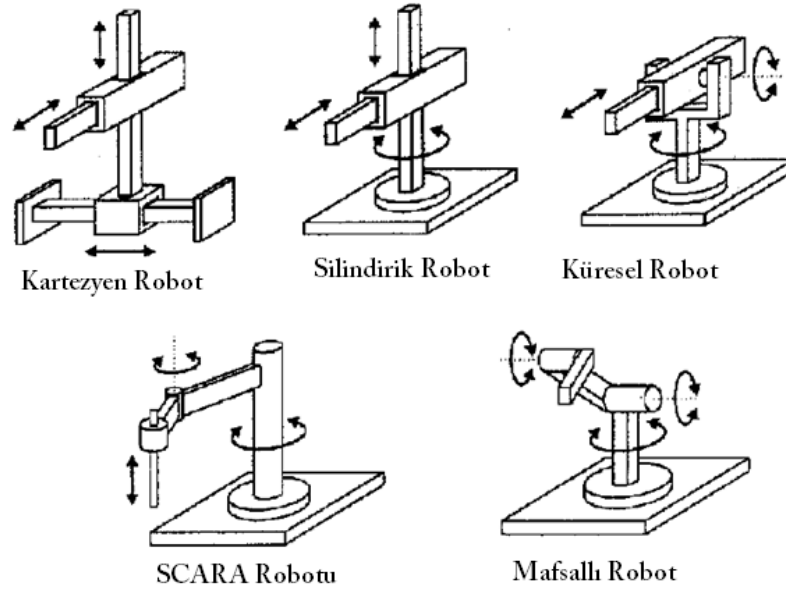
1. Manipülâtör veya kol (Mekanik ünite),
2. Bir veya daha çok sensör (Sensör ünitesi),
3. Kontrolör (Kontrol ünitesi),
4. Güç ünitesi.

Bazı robotlarda mekanik yapı içerisinde uç eleman da bulunur. Uç elemanlar, spesifik görevleri yerine getirmek için kullanışlı araçlardır.

4.2.1. Mekanik ünite

Bir robot manipülâtörü, eklemler aracılığıyla birbirine bağlanan bağlantı kollarından meydana gelir ve bir açık kinematik zincir oluşturur. Bu açık kinematik zincir, ardışık iki bağlantı elemanı arasında izafi hareketin oluşturulabilmesini sağlar. Her bir eklem hareketi yer değiştirme, dönme veya her ikisinin bir kombinasyonu şeklinde gerçekleşebilir. Altı çeşit muhtemel hareket çeşidinden (küresel, düzlemsel, helisel, prizmatik, dönme, silindirik) yalnızca üçü (prizmatik, dönme, küresel) normalde kullanılan hareket çeşitlerini teşkil eder.

Bir eklemin diğer bir ekleme oranla gerçekleştirebildiği bağımsız harekete serbestlik derecesi denir. O halde eklem sayısı, robotun serbestlik derecesini ifade eder. Bu üç eklemin farklı kullanışı ile farklı robot düzenleşimleri elde edilebilir. Şekil 4.2’de en yaygın robot düzenleşimleri gösterilmiştir [42].



Şekil 4.2. Yaygın robot kolu düzenleşimleri.

Eklem-bağlantı elemanı yapısı ile tanımlanmış olan bir manipülör, çoğunlukla kol, bilek ve uç eleman olmak üzere üç ana yapı elemanını içerir. Bu kısım cihazlar tahrik elemanları olarak adlandırılırlar ve pnömatik, hidrolik veya elektriksel yapıya sahip olabilirler. Bir nesneyi manipülörün çalışma uzayı içerisindeki bir noktaya yerleştirebilmek için altı parametrenin tanımlanması gerekir. Bu parametrelerin üçü konum ve üçü de dönme ile ilgilidir. Bu sebeple genellikle altı serbestlik derecesine ihtiyaç duyulur. Bununla beraber endüstriyel amaçlı olarak kullanılan birçok robot, verilen bir görevi yerine getirmede yeterli olmaları sebebiyle dört veya beş serbestlik derecesine sahiptir.

4.2.2. Sensör ünitesi

Bir robotun verilen bir görevi tam olarak, hızlı ve hassas bir biçimde yerine getirebilmesi için robot yapısının iç ve dış durumlarına yönelik bilgiye ihtiyaç

duyulur. Bu bilgi sensörlerden elde edilir. İç sensörler eklemlerin konum, hız ve ivmeleri hakkında, dış sensörler ise ortam hakkında bilgi toplarlar.

4.2.3. Kontrol ünitesi

Bu ünite, verilen görevi yerine getirebilmeleri için diğer mekanizmaların uyarlama işlemlerini yürütür. Robot kontrolörleri çoğunlukla üç temel işlevin yürütülmesinde kullanılırlar:

1. İstenilen sıklıkta ve belirli noktalarda manipülâtörün her bir bileşenin hareketini başlatmak ve durdurmak,
2. Konum ve sıklık bilgilerini hafızalarında kaydetmek,
3. İşlemin gerçekleştirildiği alan içerisinde sensörlerden yardım alarak robot ile dış dünya arasında bir arabirim olarak görev yürütmek.

Bu işlemlerin yerine getirilebilmesi için kontrolörlerin, doğru manipülâtör yolunun, hızının ve konumunun belirlenmesini sağlayacak aritmetik hesaplamaları yerine getirebilmeleri gerekir. Kontrolörlerin ayrıca kolu hareket ettirecek olan mekanizmalara sinyal göndererek sensörlerden alınan bilgiyi değerlendirmeleri gereklidir. Bunun yanında manipülâtör ile harici cihazlar arasında bağlantıya izin vermelidirler.

4.2.4. Güç ünitesi

Bu bileşenin amacı, manipülâtörün tahrik elemanlarına gerekli enerjiyi sağlamaktır. Servo motor tahrikli sistemlerde ise güç yükseltici halini alabilir.

4.3. Uzaysal Yerleşim

Manipülasyon, nesnelerin başarılı bir şekilde tutulması ve hareket ettirilmesi, yani kaldırılması, bir yerden bir yere götürülmesi, birbirlerine tutturulması ve üzerlerinde gerekli araçlar ile işlem yapılabilmesi işlemidir [43]. Bir robot tarafından nesnelerin manipülasyonu, robot elemanlarının uzaydaki hareketleri yardımıyla gerçekleştirilir. Robotun uç elemanını hareket ettirerek nesneye yaklaştırabilmek için nesnenin

robotun temel koordinatına göre konum ve dönme bilgisine ihtiyaç duyulur. Bu bilgi, nesnenin robotun tutucusuna göre konumunun belirlenmesi ve tutucunun da hareketinin bu bilgiye göre tayin edilmesinde kullanılacak bir programlama yönteminin geliştirilmesini gerektirir.

Bir uç elemanın hareketini kontrol etmek karmaşık bir hal alabilir. Çünkü uç elemanın, hedef nesne üzerine yerleştirilmesi işlemi bazen birkaç farklı şekilde mümkün olabilir. Bu durum ise optimal bir yerleşim şeklinin seçilmesi ihtiyacını doğurmaktadır. Bir robotun el kısmının bir nesneye yaklaşacağı oryantasyon biçimi yalnızca nesneye değil, çevreye de bağlıdır. Örneğin, ortam içerisinde bazı engeller bulunabilir. Bu sebeple eldeki mevcut takip yolu sayısı, bu çevresel sınırlandırmalar sebebiyle azalabilir. Bunun yanı sıra, eğer hedef nesne hareket halindeki bir nesne ise, nesnenin konumunun yanı sıra hedef nesnenin bir sonraki muhtemel konumunun da hesaplanması, böylece robotun bu tahmini noktaya yönelmesini sağlayacak bilginin elde edilmesi gerekir.

Uç eleman hareketinin kontrolünü güçleştiren diğer bir durum, robota ait her bir eklemin tek serbestlik derecesi olması, ancak insan eklemlerinin ulaşabildiği hareket miktarından daha fazlasını sağlayabilmeleridir.

Bir robot, kol yapısına ait kinematik modeli kullanarak uç elemanın konum ve oryantasyonunu hesaplar. Bu sebeple de, manipüle edilecek olan nesnenin yanı sıra uç elemanın da konum ve oryantasyonunun belirlenebilmesi için matematiksel araçlara ihtiyaç duyulur. Bu araçların da farklı nesnelere arasında ve özellikle nesnelere ile manipülatör arasında uzaysal ilişkiyi sağlayabilecek derecede güçlü olmaları gerekmektedir [42, 43].

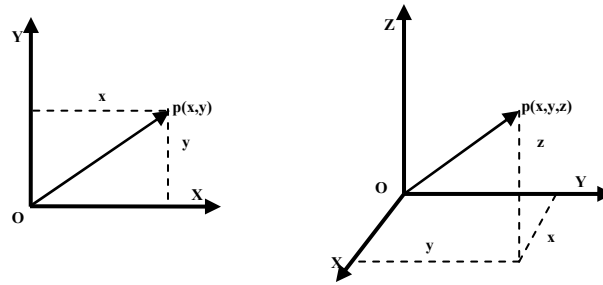
4.3.1. Uzaysal gösterim

Bir uç elemanın veya eklemin uzaysal gösterimi konum ve oryantasyon olmak üzere iki bileşenden oluşur. Konum bir nesnenin n -boyutlu bir uzaydaki durumunu, oryantasyon ise nesnenin verilen bir referans sisteme göre dönme durumunu ifade eder.

4.3.1.1. Konum

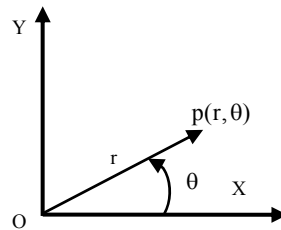
Bir nesnenin konum gösterimi uzayın kaç boyutlu olduğuna bağlıdır. Bir nesnenin iki boyutlu uzaydaki konumunu ifade etmek için kullanılan ortak sistemler kartezyen ve polar koordinat sistemler, üç boyutlu uzaydaki konumunu ifade etmek için kullanılan ortak sistemler ise kartezyen, silindirik, küresel koordinat sistemleri olarak sınıflandırılır.

- a) Kartezyen koordinatlar: R^2 'de bir nesnenin p pozisyonu $p(x,y)$ olarak gösterilir. Burada x , X ekseninin orijininden olan uzaklığı, y de Y-ekseninin orijininden olan uzaklığı ifade etmektedir. R^3 'de ise bir nesnenin p pozisyonu $p(x,y,z)$ olarak ifade edilir. Burada R^2 'ye benzer şekilde x ve y , X-ekseni ile Y-ekseninin orijinlerine olan uzaklıkları, z de Z-eksenine olan uzaklığı ifade ederler. Her iki gösterim Şekil 4.3'de verilmiştir.



Şekil 4.3. R^2 ve R^3 kartezyen koordinatların vektör olarak gösterimi.

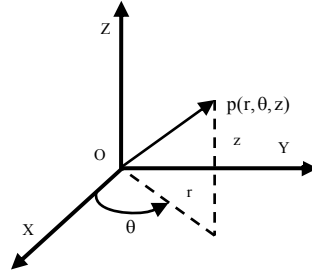
- b) Polar koordinatlar: R^2 'de bir nesnenin p pozisyonu $p(r,\theta)$ olarak gösterilir. Burada r , p noktasının orijinine olan uzaklığı, θ da p vektörünün X-ekseni ile oluşturduğu açığı ifade eder. Bu gösterim Şekil 4.4 'de verilmiştir.



Şekil 4.4 Polar koordinatın gösterimi.

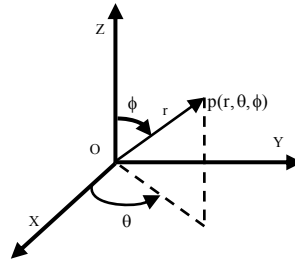
- c) Silindirik koordinatlar: R^3 'de bir nesnenin p pozisyonu $p(r,\theta,z)$ olarak ifade edilir. Burada r ve θ , polar koordinatlarda olduğu gibi p noktasının orijininden olan uzaklığı ve p vektörünün X-ekseni ile oluşturduğu açığı ifade ederken z de,

p vektörünün Z -ekseni üzerindeki izdüşümünü ifade etmektedir. Bu koordinat sistemine ait gösterim Şekil 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.5 Silindirik koordinatın gösterimi.

- d) Silindirik koordinatlar: Şekil 4.6'da de gösterildiği gibi bir nesnenin p pozisyonu $p(r, \theta, \Phi)$ ile gösterilir. Burada r , p noktasının orijininden olan uzaklığı, θ da p 'nin OXY düzlemi üzerindeki izdüşümünü, Φ ise p vektörünün Z -ekseni ile oluşturduğu açıyı gösterir.



Şekil 4.6. Küresel koordinatın gösterimi

4.3.1.2 Yönelim

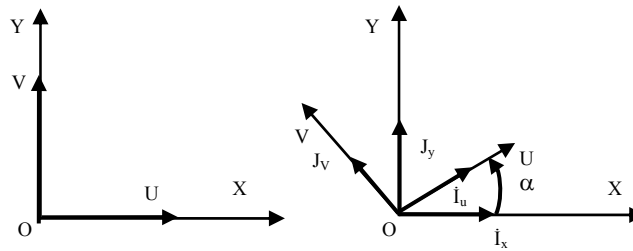
Katı bir nesne uzaya yalnızca konumu itibariyle değil, referans bir sisteme göre oryantasyonu itibariyle de yerleştirilir. R^2 'de dönme işlemi X -eksenine göre yapılabilirken R^3 'de X -ekseninin yanı sıra Y -eksenine ve Z -eksenine göre dönme işlemi de gerçekleştirilebilir. Oryantasyon işlemi göstermede kullanılan ortak yöntem dönme matrislerini, Euler açı setini, dönme çiftlerini ve dördey dönme işlemlerini içermektedir.

Dönme Matrisleri: Dönme matrisleri, cebirsel ve matris özellikleri sebebiyle oryantasyon tanımlama işlemlerinde en yaygın olarak kullanılan yöntemdir. Sabit bir

OXY referans sistemi ve aynı orijine sahip nesnenin OUV sistemi olmak üzere iki referans sistemi göz önüne alındığında i_x ve j_y , nesnenin sabit referans sistemine ait birim vektörleri olur (Şekil 4.7). Bir p vektörü Denklem 4.1 ve 4.2'deki gibi gösterilir.

$$p_{xy} = [p_x, p_y]^t = p_x \cdot i_x + p_y \cdot j_y \quad (4.1)$$

$$p_{uv} = [p_u, p_v]^t = p_u \cdot i_u + p_v \cdot j_v \quad (4.2)$$



Şekil 4.7 OUV sisteminin OXY referans sistemine göre oryantasyonu.

Doğrusal yer değiştirme uygulanırsa, OUV sisteminin OXY referans sistemine göre oryantasyonunu ifade eden dönme matrisi olup nesnenin referans sistemi içerisindeki bir vektörün koordinatlarının sabit OXY referans sistemi gibi diğer bir sisteme çevrilmesi işleminde Denklem 4.3 kullanılır. $R^{2,2}$ 'deki oryantasyon, OXY üzerindeki açı olarak tanımlanan α ile gösterilir.

$$\begin{bmatrix} p_x \\ p_y \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} p_u \\ p_v \end{bmatrix}, \quad \text{Burada; } R = \begin{bmatrix} i_x \cdot i_u & i_x \cdot j_v \\ j_y \cdot i_u & j_y \cdot j_v \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Dönme matrisi ise Denklem 4.4'teki gibi ifade edilir:

$$R = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

$R^{3,3}$ 'de de $R^{2,2}$ 'dekine benzer şekilde, bir p nesnesinin oryantasyonu Denklem 4.5, 4.6 ve 4.7'de ifade edilmiştir.

$$p_{uvw} = [p_u, p_v, p_w]^t = p_u \cdot i_u + p_v \cdot j_v + p_w \cdot k_w \quad (4.5)$$

$$p_{xyz} = [p_x, p_y, p_z]^t = p_x \cdot i_x + p_y \cdot j_y + p_z \cdot k_z \quad (4.6)$$

$$\begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} p_u \\ p_v \\ p_w \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Bir nesnenin OUVW sistemi U-ekseni, X-ekseni ile çakışacak şekilde bir OXYZ sisteminin üzerine konulduğunda dönme matrisi;

$$R(X, \alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

V-ekseni dönme işleminden sonra Y-ekseni ile çakışırsa dönme matrisi;

$$R(Y, \gamma) = \begin{bmatrix} \cos \gamma & 0 & \sin \gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \gamma & 0 & \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

W-ekseni dönme işleminden sonra Z-ekseni ile çakışırsa dönme matrisi;

$$R(Y, \phi) = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi & 0 \\ \sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

ile elde edilir. Yukarıda verilen matrisler üç boyutlu uzaysal sistemde temel dönme matrisleri olarak adlandırılırlar.

a) Euler açısı seti: OUVW referans sisteminin OXYZ referans sistemine göre dönme işlemi Euler açıları olarak bilinen α , γ ve Φ olmak üzere üç açı ile tanımlanır. Ancak açıların değerlerinin yanı sıra dönme eksenlerinin de bilinmesi gerekir. Bir koordinat sisteminin döndürülmesi işleminde 24 tanımlı muhtemel durum söz konusudur. Aşağıda en çok kullanılan dönme şekilleri verilmiştir:

- b) ZYX Euler Aç1 Seti: Sırasıyla z-ekseni, y-ekseni, x-ekseni etrafında ardışık döndürmeler yapılmasıyla oluşan aç1 seti.
- c) RPY (Roll, Pitch, Yaw) Aç1 Seti: x-ekseni etrafında dönme (yaw), y-ekseni etrafında dönme (pitch), z-ekseni etrafında dönme (roll) ardışık dönme işlemlerinin uygulanmasıyla oluşan aç1 seti.
- d) Dönme Çiftleri: OUVW koordinat sisteminin OXYZ referans sistemine göre oryantasyonunu göstermede kullanılan diğeri bir gösterim şekli, $K=(k_x, k_y, k_z)$ ve θ açısı ile ifade edilen dönme çiftleridir. Bir p vektörünü θ açısı kadar K üzerinde döndürecek olan döndürme çifti Denklem 4.11'de ifade edilmiştir.

$$\text{Rot}(K, \theta)p = p \cos \theta - (K \cdot p) \sin \theta + K(K \cdot p)(1 - \cos \theta) \quad (4.11)$$

- e) Dördey Operatörler: Dördey operatörler, dönme ve oryantasyonlar ile çalışmada çok yönlü bir matematiksel araçtır. Dördey operatörler, dört elemandan (q_0, q_1, q_2, q_3) oluşurlar ve bu elemanlar temel bir $\{e, i, j, k\}$ dördeyinin koordinatlarını ifade ederler. $e:q$ elementi skaler bir değer olmakla beraber (i, j, k) bir vektördür. Dönme çiftleri ile dördey operatörler arasındaki eşdeğerlik durumu Denklem 4.12 ve 4.13'de verilmiştir [44].

$$Q = [q_0, q_1, q_2, q_3] = [s, v] \quad (4.12)$$

$$Q = \text{Rot}(K, \theta) = \left(\cos \frac{\theta}{2}, K \sin \frac{\theta}{2} \right) \quad (4.13)$$

4.3.2. Yer değiştirme

Bağımsız bir gösterim için robot kolunun uç elemanının sabit bir referans sistemine göre konum ve oryantasyonuna ihtiyaç duyulur. Yukarıda gösterilen yöntemlerin hiçbiri bunu yapmak için yeterli değildir. Konum ile oryantasyonun her ikisini içeren bir gösterim elde etmek için homojen koordinatlar kullanılabilir. Katı nesnelerin n -boyutlu uzay içerisinde yerleşimini ifade edecek homojen koordinata dayalı bir

gösterim, $(n+1)$ boyutlu uzayın koordinatlarından yola çıkılarak hesaplanabilir. Yani, n boyutlu bir uzay, homojen koordinatlar yardımıyla $(n+1)$ boyutlu bir uzayda gösterilebilir. Örneğin, bir $p(x,y,z)$ vektörü, $p(w_x, w_y, w_z, w)$ ile gösterildiğinde, w , ölçek değeri olarak bilinir ve keyfi herhangi bir değer alabilir. i, j, k X, Y, Z- eksenlerine ait birim vektörler olarak alındığında bir $p=ai+bj+ck$ vektörü homojen koordinatlar kullanılarak genellikle Denklem 4.14'deki gibi gösterilebilir [45].

$$p = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} aw \\ bw \\ cw \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a \\ c \\ c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (\text{eğer } w = 1 \text{ ise}) \quad (4.14)$$

Homojen koordinatların tanımından yola çıkarak homojen matris kavramına ulaşmak mümkündür. T homojen matrisi, 4×4 'lük bir matris olup bir vektöre ait homojen koordinatların bir sistemden başka bir referans sistemine taşınması işlemini ifade eder. Bu ifade matematiksel olarak Denklem 4.15'te verilmiştir.

$$T = \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & P_{3 \times 1} \\ f_{1 \times 3} & W_{1 \times 1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Dönüşüm} & \text{Öteleme} \\ \text{Perspektif} & \text{Ölçek} \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

T'nin bir diğer ifade şekli ise Denklem 4.16'deki gibidir.

$$T = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

Bu ifadede (n, o, a) oryantasyonu ifade eden üçlü bir birim matris olup p konumu ifade eden vektördür.

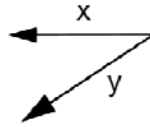
Karmaşık bir homojen yer değiştirme matrisi, basit dönüşümlerin art arda uygulanmasıyla,

$$T = T_1 \cdot T_2 \dots T_N \quad (4.17)$$

ile elde edilebilir.

4.3.3. Sağ el kuralı ile koordinasyon tayini

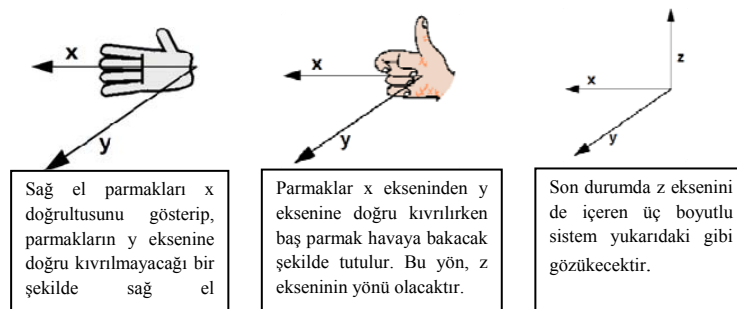
Çoğu zaman bir koordinat sistemi üzerinde yön ve doğrultuların bulunması için sağ el kuralı kullanılır. Sağ el kurallı bir koordinat sisteminde iki eksenin doğrultusu bilindiğinde üçüncü eksenin doğrultusu kolayca bulunabilir.



x eksenini sol tarafa yönelmiş ve y eksenini de kağıt düzlemden dışarıya doğru olan eksenini gösterebilir.

Şekil 4.8. Sağ el kuralı için x ve y eksenlerinin yerleşimi.

Örneğin bir kağıt üzerinde, Şekil 4.8’de de gösterildiği gibi x’in yönü sol taraf, y’nin yönü de kağıt düzleminin dışına doğru olsun. Böyle bir durumda z ekseninin yönünü bulmak istediğimizde sağ el parmakları x doğrultusunu gösterip, parmakların y eksenine doğru kıvrılmayacağı bir şekilde sağ el yerleştirilir. Bu işlemden sonra baş parmağın göstereceği yön z ekseninin yönüdür. Bu işlemin aşamaları Şekil 4.9’da gösterilmiştir.



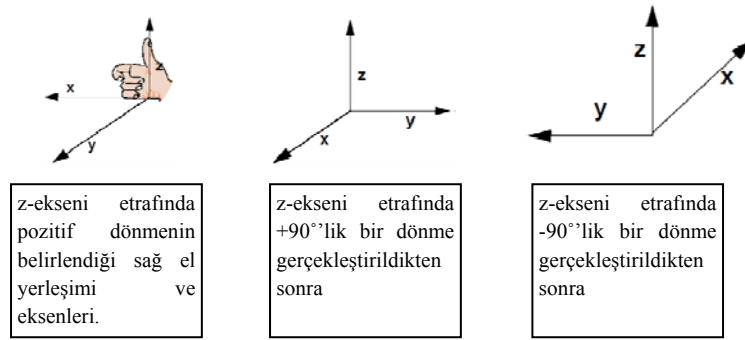
Şekil 4.9. Sağ el kuralı ile z ekseninin bulunması.

4.3.4.1.Dönmenin pozitif doğrultusu

Dönüşüm matrislerinde de olduğu gibi bazı durumlarda eksen takımları belirli açılarda döndürülmek istenir. Dönmenin pozitif yönünün belirlenmesinde uygulanan sağ el kuralı Tablo 4.1’de verilmiştir. Bunu yaparken izlenecek adımlar ise Şekil 4.10’da verilmiştir.

Tablo 4.1. Sağ el kuralı ile pozitif dönme yönünü bulmak için uygulanan kural tablosu.

| Eksenlerin doğrultusu biliniyorsa | Sağ elin yönlendirileceği eksen | Parmakların kıvrılacağı eksen | Başparmağın göstereceği eksen |
|-----------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| x&y | x | y | z |
| y&z | y | z | x |
| x&z | z | x | y |



Şekil 4.10. Pozitif dönme yönünü bulmak için uygulanan sağ el kuralı.

4.4. Robot Kinematığı

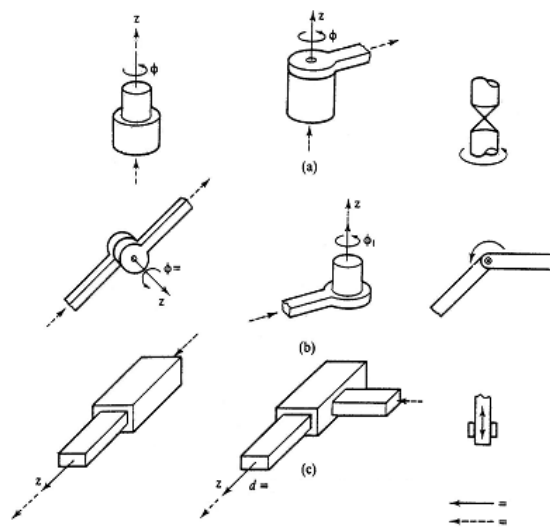
Kinematik, hareketi etkileyen kuvvet veya benzeri diğer faktörlerden bağımsız olarak bir yapının referans bir sisteme göre hareketinin incelenmesi işlemidir. Robot kolunun uzaysal hareketini zamana bağlı olarak tanımlayan analitik bir ifadenin geliştirilmesi, kinematığın temel amacı olmakla beraber kısmen robot kolunun uç noktası ile eklemlerin koordinatları arasındaki konum ve oryantasyon ilişkisini de inceler. Robot kolu eklemleri ile robot kolunun uç noktasının hareket hızları arasındaki ilişki de kinematik tarafından incelenen bir diğer konudur. Kinematik işleminin temelinde düz ve ters kinematik olmak üzere iki ana kavram yer alır.

4.4.1. Düz kinematik

Düz kinematik işlemi, eklem açıları verilen bir robotun uç noktasına ait konum ve oryantasyonun sabit bir referans sistemine göre belirlenmesi işlemidir. Diğer bir deyişle, robot kolunun uç noktasının eklem koordinatları yardımıyla konum ve oryantasyonu ifade edecek olan bir T dönüşüm matrisinin bulunmasıdır. Eklem koordinatları, Denavit-Hartenberg (DH) tarafından geliştirilen nümerik algoritma ve homojen dönüşüm matrislerinin uygulanmasıyla tespit edilebilir. DH algoritmasına göre, her bir bağlantı elemanı üzerinde doğru bir koordinat sistemi seçildiği zaman, dört temel dönüşüm yardımıyla bir sonraki bağlantı elemanına taşınması mümkün olacaktır. Bu dönüşümler dönme ve yer değiştirme olup k'inci bağlantı elemanının koordinat sistemi ile k-1'inci bağlantı elemanının koordinat sistemi arasındaki ilişkinin kurulabilmesini sağlar.

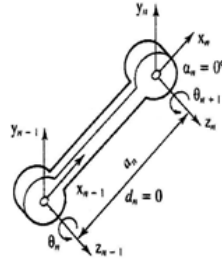
4.4.1.1. DH parametrelerinin belirlenmesi

DH parametreleri robot kolunun sıfır konumuna getirilmesiyle, yani her bir ekleme ait değerlerin sıfır olduğu konuma getirilmesiyle, daha sonra da eklemlerin bağlantı elemanı ve eklem türüne göre referans bir karenin tanımlanması ile belirlenir. Robotlarda kullanılan eklem türleri döner ve prizmatik olmak üzere iki kısımdır. Şekil 4.11'de her iki eklem türü ve bunların varyasyonları gösterilmiştir. Eklemin eksenı boyunca gerçekleştirilen dönme açısı ϕ ile gösterilmekle beraber DH gösteriminde θ değişkenine karşılık gelmektedir.



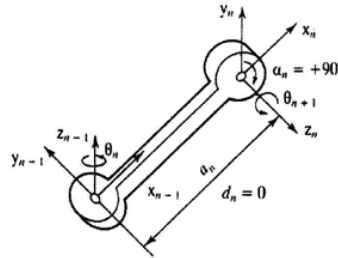
Şekil 4.11. Eklem türleri ve değişik varyasyonları.

1. tip bağlantı şekli: En basit bağlantı çeşididir. Eksenleri arasında herhangi bir bükülme olmayan ve birbirlerine paralel olan iki dönel eklemi vardır. Eklem eksenleri de birbirlerine paraleldir ve bağlantı kolu uzunluğu olarak bilinen a_n kadar uzaktadırlar. Eklem değişkeni θ_{n+1} olarak bilinen dönme açısıdır. z_{n-1} eklem eksenine ile çakışacak şekilde ve x_{n-1} eksenine de eklem merkezi çizgisi ile çakışacak şekilde tayin edilir. y_{n-1} de sağ el kuralı yardımıyla bulunur.



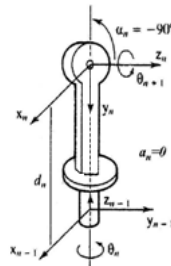
Şekil 4.12. 1.tip bağlantı şekli.

2. tip bağlantı şekli: Bu tip bağlantı, 1. tip bağlantının merkez çizgisi (x_{n-1} eksenine) boyunca α_n açısı kadar bükülmesiyle elde edilen bağlantı tipidir.



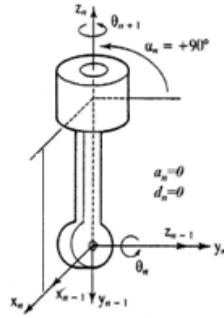
Şekil 4.13. 2.tip bağlantı şekli.

3. tip bağlantı şekli: Bu şekil konfigürasyonda eklem eksenleri birbirini keser ve z_{n-1} ile z_n eksenleri arasındaki mesafe sıfır olduğundan bağlantı kolu uzunluğu da sıfır olur. Ancak iki eklem arasında bir d_n mesafeli yer değiştirme söz konusudur ve bu mesafe eklem eksenlerinin (çoğunlukla x_{n-1} ve x_n eksenleri) ortak dik doğrultuları arasında ölçülen mesafeyi temsil eder.



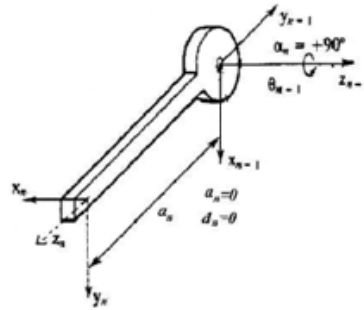
Şekil 4.14. 3.tip bağlantı şekli.

4. tip bağlantı şekli: Bu bağlantı şekli, 3. Tip bağlantı şekline benzerdir, ancak eklem yerleşimleri birbirine göre terstir ve bağlantı kolu parametreleri de birbirlerinden farklıdır. Her şeyden evvel iki eklemin eksen orijinleri çakışmıştır. Bu da bağlantı kolları arasındaki uzaklık ile bağlantı kolu uzaklığını sıfır yapar. İki eklem arasındaki fiziksel mesafe ise bir sonraki bağlantı şeklinde mevcuttur.



Şekil 4.15. 4.tip bağlantı şekli.

5. tip bağlantı şekli: Bu tip bir bağlantı şekli, eksenini bağlantı koluna dik olan döner bir eklemden ibarettir. Bu tip bir bağlantı şeklinde eklem eksenleri (Z_{n-1} ve Z_n) birbirlerini keserler. Bu tip bağlantılarda eklem değişkeni θ_{n+1} 'dir.



Şekil 4.16. 5.tip bağlantı şekli.

Referans eksen takımının her bir ekleme uygulaması aşağıda sıralanan adımların sırasıyla gerçekleştirilmesi ile sağlanır:

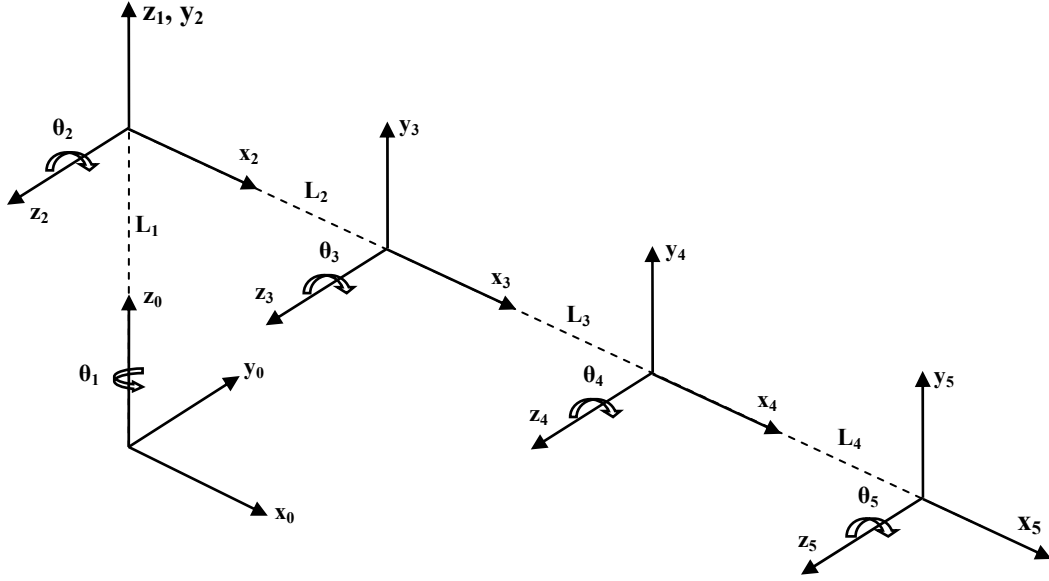
1. Robot kolu sıfır konumuna yerleştirildikten sonra, tabandan başlayarak eklemler sıfırdan N'e kadar numaralandırılır.
2. Taban koordinat sisteminin eksenini, global eksen takımına paralel olacak şekilde yerleştirilir.

3. Eksen takımının orijini eklemlerin ortak dik doğrultuları ile merkezden uzak olan eklem ekseninin kesişim noktasına yerleştirilir. Eklem eksenlerinin paralel olması durumunda orijinin konumu, bağlantı elemanları arasındaki mesafeyi (d_n ve α_n) sıfır yapacak şekilde seçilir. Eklem eksenlerinin kesişmesi halinde ise orijin, eklemlerin kesişim noktasına yerleştirilir.
4. z-ekseni, eklem eksenini ile karşılaştırılır. Döner bir eklem için z-ekseninin yönü, z-ekseni etrafında pozitif yönlü bir dönme ile belirlenir.
5. x-ekseni, bağlantı kolunun eklem eksenleri arasındaki ortak dik doğrultuya paraleldir. Paralel eksen halinde x-ekseni, bağlantı elemanının merkez çizgisi ile çakışır. Eksenlerin kesişmesi durumunda ise ortak bir doğrultudan bahsedilemez ve bu durumda eksen de z_{n-1} ve z_n 'in vektörel çarpımına paralel veya anti-paraleldir. Birçok durumda bu işlem x-ekseninin, bir önceki bağlantı kolunun x-ekseni ile aynı yönde olması ile sonuçlanır. Bu noktada robot kolunun sıfır konumu ile x-ekseni atamasının birbiri ile uyumlu olup olmadığının kontrol edilmesi gerekir.
6. y-ekseninin yönü sağ el kuralı uygulanarak bulunabilir.
7. Son kolun (N) ucuna bir koordinat eksenini tutturulur.

Koordinat eksenini tanımlandıktan sonra DH parametreleri aşağıdaki şekilde tanımlanır:

1. θ_{n+1} : z_n -ekseni etrafındaki dönme açısı
2. d_{n+1} : z_n -ekseni üzerinde x_n ile x_{n+1} (veya y_n ile y_{n+1}) arasındaki mesafe
3. a_{n+1} : x_n -ekseni (veya y_n -ekseni) boyunca z_n ile z_{n+1} arasındaki mesafe
4. α_{n+1} : x_{n+1} -ekseni etrafındaki dönme
5. γ_{n+1} : y_{n+1} -ekseni etrafındaki dönme açısı

Şekil 4.17'de dört eksenli robot koluna ait DH gösterimi verilmiştir. DH gösterimine bağlı olarak dört eksenli robot kolu için belirlenmiş olan DH parametrelerinin değerleri ise Tablo 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.17. Dört serbestlik dereceli robot kolunun DH parametrelerinin gösterimi.

Tablo 4.2. DH parametreleri tablosu.

| Link | Eklem | Tip | θ | d | a | α |
|------|-------|-----|------------|-------|-------|----------|
| 1 | 0-1 | II | θ_1 | L_1 | 0 | 0 |
| 2 | 1-2 | I | θ_2 | 0 | 0 | 90 |
| 3 | 2-3 | IV | θ_3 | 0 | L_2 | 0 |
| 4 | 3-4 | III | θ_4 | 0 | L_3 | 0 |
| 5 | 4-5 | V | 0 | 0 | L_4 | 0 |

4.4.1.2. Dönüşüm matrislerinin hesaplanması

Dönüşüm matrisinin genel ifadesi 4.18'de verilmiştir.

$${}^n A_{n+1} = \begin{bmatrix} t_{(1,1)} & t_{(1,2)} & t_{(1,3)} & t_{(1,4)} \\ t_{(2,1)} & t_{(2,2)} & t_{(2,3)} & t_{(2,4)} \\ t_{(3,1)} & t_{(3,2)} & t_{(3,3)} & t_{(3,4)} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

Burada;

$$t_{(1,1)} = \cos \theta_{n+1} \cos \gamma_{n+1} - \sin \theta_{n+1} \sin a_{n+1} \sin \gamma_{n+1}$$

$$t_{(1,2)} = -\sin \theta_{n+1} \cos a_{n+1}$$

$$t_{(1,3)} = \cos \theta_{n+1} \sin \gamma_{n+1} + \sin \theta_{n+1} \sin a_{n+1} \cos \gamma_{n+1}$$

$$\begin{aligned}
t_{(1,4)} &= a_{n+1} \cos \theta_{n+1} \\
t_{(2,1)} &= \sin \theta_{n+1} \cos \gamma_{n+1} + \cos \theta_{n+1} \sin a_{n+1} \sin \gamma_{n+1} \\
t_{(2,2)} &= \cos \theta_{n+1} \cos a_{n+1} \\
t_{(2,3)} &= \sin \theta_{n+1} \sin \gamma_{n+1} - \cos \theta_{n+1} \sin a_{n+1} \cos \gamma_{n+1} \\
t_{(2,4)} &= a_{n+1} \sin \theta_{n+1} \\
t_{(3,1)} &= -\cos a_{n+1} \sin \gamma_{n+1} \\
t_{(3,2)} &= \sin a_{n+1} \\
t_{(3,3)} &= \cos a_{n+1} \cos \gamma_{n+1} \\
t_{(3,4)} &= d_{n+1}
\end{aligned}$$

Denklem 4.18'de yer alan genel yapıya göre hesaplanan dönüşüm matrisleri:

$${}^0A_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & 0 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

$${}^1A_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & \sin \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

$${}^2A_3 = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & L_2 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

$${}^3A_4 = \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & -\sin \theta_4 & 0 & L_3 \\ \sin \theta_4 & \cos \theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

$${}^4A_5 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & L_4 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

4.4.1.3. Manipülâtör dönüŖüm matrisinin elde edilmesi

Manipülâtör dönüŖüm matrisi, bütün dönüŖüm matrislerinin art arda çarpılmasıyla aŖağıdaki gibi elde edilir.

$${}^0T_5 = {}^0A_1 \times {}^1A_2 \times {}^2A_3 \times {}^3A_4 \times {}^4A_5 = {}^R T_H \quad (4.24)$$

Trigonometrik ifadelerde kısaltma yapılarak manipülâtör dönüŖüm matrisleri:

$${}^0T_1 = {}^0A_1 \quad (4.25)$$

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} C_1 & -S_1 & 0 & 0 \\ S_1 & C_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

$${}^0T_2 = {}^0A_1 \times {}^1A_2 \quad (4.27)$$

$${}^0T_2 = \begin{bmatrix} C_1C_2 & -C_1S_2 & S_1 & 0 \\ S_1C_2 & -S_1S_2 & -C_1 & 0 \\ S_2 & C_2 & 0 & L_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

$${}^0T_3 = {}^0A_1 \times {}^1A_2 \times {}^2A_3 \quad (4.29)$$

$${}^0T_3 = \begin{bmatrix} C_1C_{23} & -C_1S_{23} & S_1 & C_1C_2L_2 \\ S_1C_{23} & -S_1S_{23} & -C_1 & S_1C_2L_2 \\ S_{23} & C_{23} & 0 & S_2L_2 + L_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

$${}^0T_4 = {}^0A_1 \times {}^1A_2 \times {}^2A_3 \times {}^3A_4 \quad (4.31)$$

$${}^0T_4 = \begin{bmatrix} C_1C_{234} & -C_1S_{234} & S_1 & C_1(L_2C_2 + L_3C_{23}) \\ S_1C_{234} & -S_1S_{234} & -C_1 & S_1(L_2C_2 + L_3C_{23}) \\ C_4(C_{23} + S_{23}) & C_{234} & 0 & L_1 + L_2S_2 + L_2S_{23} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.32)$$

$${}^0T_5 = {}^0A_1 \times {}^1A_2 \times {}^2A_3 \times {}^3A_4 \times {}^4A_5 \quad (4.33)$$

$${}^0T_5 = \begin{bmatrix} C_1C_{234} & -C_1S_{234} & S_1 & C_1(L_2C_2 + L_3C_{23} + L_4C_{234}) \\ S_1C_{234} & -S_1S_{234} & -C_1 & S_1(L_2C_2 + L_3C_{23} + L_4C_{234}) \\ C_4(S_{23} + C_{23}) & C_{234} & 0 & L_1 + L_2S_2 + L_3S_{23} + L_4S_{234} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.34)$$

şeklinde elde edilebilir. Bu durumda manipülör dönüşüm matrisi 4.35'deki gibi elde edilmiş olur [46].

$${}^R T_H = \begin{bmatrix} C_1C_{234} & -C_1S_{234} & S_1 & C_1(L_2C_2 + L_3C_{23} + L_4C_{234}) \\ S_1C_{234} & -S_1S_{234} & -C_1 & S_1(L_2C_2 + L_3C_{23} + L_4C_{234}) \\ C_4(S_{23} + C_{23}) & C_{234} & 0 & L_1 + L_2S_2 + L_3S_{23} + L_4S_{234} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.35)$$

Denklemlerde geçen bazı kısaltılmış terimler Denklem 4.36 ve Denklem 4.37'de verilmiştir.

$$\sin \theta_i \cos \theta_j + \cos \theta_i \sin \theta_j = \sin(\theta_i + \theta_j) = s_{ij} \quad (4.36)$$

$$\cos \theta_i \cos \theta_j + \sin \theta_i \sin \theta_j = \cos(\theta_i + \theta_j) = c_{ij} \quad (4.37)$$

4.4.1.4. Uç elemanın konum ve oryantasyonunun belirlenmesi

Euler açı seti yardımıyla ZYX dönüşümü uygulandığında oryantasyon $[n \ o \ a]_{3 \times 3}$ ile ve konum da p ile gösterilerek Denklem 4.38'deki denklem elde edilir.

$${}^0T_5 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^0T_5 = \begin{bmatrix} \cos \phi \cos \gamma & \cos \phi \sin \gamma \sin a - \sin \phi \cos a & \cos \phi \sin \gamma \cos a + \sin \phi \sin a & p_x \\ \sin \phi \cos \gamma & \sin \phi \sin \gamma \sin a + \cos \phi \cos a & \sin \phi \sin \gamma \cos a - \cos \phi \sin a & p_y \\ -\sin \gamma & \cos \gamma \sin a & \cos \gamma \cos a & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.68)$$

Uç elemanın konum ve oryantasyonu :

$$P_x = C_1 (L_2 C_2 + L_3 C_{23} + L_4 C_{234}) \quad (4.39)$$

$$P_y = S_1 (L_2 C_2 + L_3 C_{23} + L_4 C_{234}) \quad (4.40)$$

$$P_z = L_1 + L_2 S_2 + L_3 S_{23} + L_4 S_{234} \quad (4.41)$$

$$n_x = C_1 C_{234} \quad (4.42)$$

$$n_y = S_1 C_{234} \quad (4.43)$$

$$n_z = C_4 (S_{23} + C_{23}) \quad (4.44)$$

$$o_x = -C_1 S_{234} \quad (4.45)$$

$$o_y = -S_1 S_{234} \quad (4.46)$$

$$o_z = C_{234} \quad (4.47)$$

$$a_x = S_1 \quad (4.48)$$

$$a_y = S_1 \quad (4.50)$$

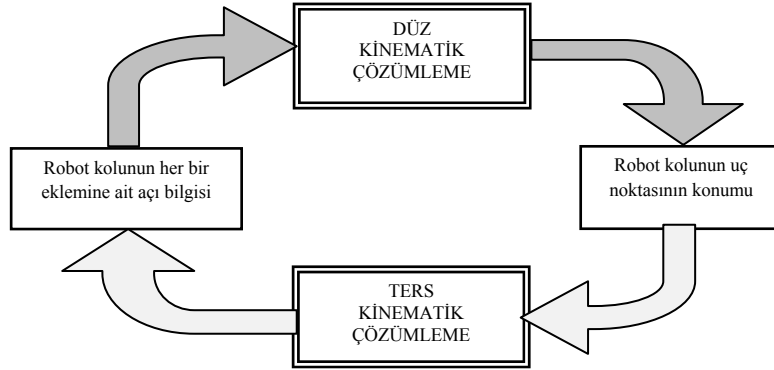
$$a_z = 0 \quad (4.51)$$

şeklinde belirlenir [44].

4.4.2. Ters kinematik

Ters kinematik işlemi, bir robot kolunun uç noktasına ait koordinatların verilmesi durumunda robot kolunun gerekli konuma ve oryantasyona ulaşmasını sağlayacak

olan eklem açılarının bulunması işlemidir. Düz kinematik işlemi ile ters kinematik işlemi arasındaki bağıntı Şekil 4.18'deki gibi basitçe tanımlanabilir. Matematiksel olarak Denklem 4.52 ve Denklem 4.53'deki gibi gösterilebilir.



Şekil 4.18. Düz kinematik ve ters kinematik arasındaki parametre ilişkisi.

$$\theta_k = f_k(x, y, z, \alpha, \gamma, \Phi) \quad (4.52)$$

$$k = 1, \dots, N \quad (4.53)$$

Bu ifadede θ_k eklem açılarını ve $(x, y, z, \alpha, \gamma, \Phi)$ da konum ve oryantasyonu ifade etmektedir.

4.4.3. Dört serbestlik dereceli robot koluna ait ters kinematik ifadelerin türetilmesi

Tasarlanan dört serbestlik dereceli robot kolu, Şekil 4.19'da görülebileceği üzere sabit bir taban ve üç boyutlu uzayda hareket edebilen dört koldan oluşur. Bütün kollar birbirlerine dönel eklemler ile bağlanmışlardır. Robot kolu kapalı bir zincir oluşturmadığından açık bir seri bağlantı mekanizması niteliğindedir. Robot kolunun fiziksel yapısına ait değerler ve kol uzunlukları Tablo 3.1'de verilmiştir.

Sistemin içerdiği kollardan birinci kol olan taban kolu, birinci servo motorun hareketi ile taban eksenini etrafında dönme hareketi yaparak θ_1 açısını oluşturur. İkinci, üçüncü ve dördüncü kollar da kendilerinden önceki kollara tutturularak servo motorların hareketleri sonucu θ_2 , θ_3 , ve θ_4 açılarını oluştururlar. Robot kontrolünde asıl amaç konum kontrolü olduğundan bu çalışmada en önem arz eden kısım uç elemanın

konumudur. Uç elemanın konumunu tanımlamak için bir taban üzerine yerleştirilmiş bir O-xyz koordinat sistemi kullanılmış ve uç elemanın konum koordinatları bu noktaya göre $P(x,y,z)$ olarak tanımlanmıştır. Kinematik ve dinamik analizler esnasında robot kolunun ucuna yerleştirilen uç elemanın hareketi göz ardı edildiğinden ters kinematik işlemler esnasında 5. eksen olarak tanımlanan yönlenme hareketi işlemlere dâhil edilmeyecektir.

Robot kolunun uç noktasına ait koordinatlar Denklem 4.54'de verilmiştir.

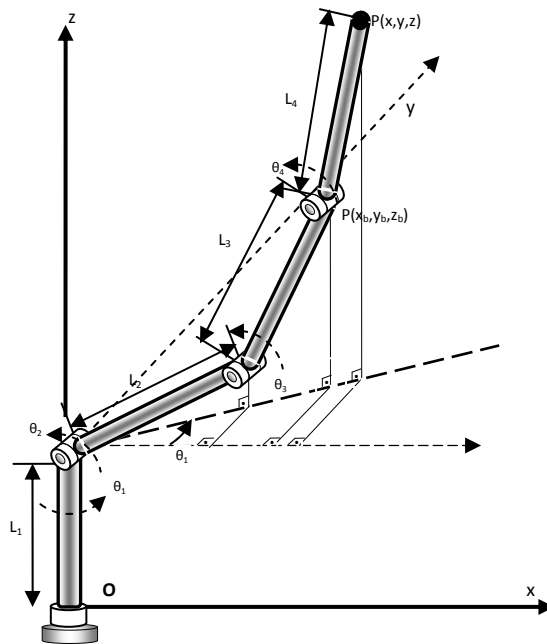
$$P_x = C_1 (L_2 C_2 + L_3 C_{23} + L_4 C_{234})$$

$$P_y = S_1 (L_2 C_2 + L_3 C_{23} + L_4 C_{234}) \quad (4.54)$$

$$P_z = L_1 + L_2 C_2 + L_3 C_{23} + L_4 C_{234}$$

Robot kolu ulaşılmak istenen bir noktaya farklı yönlendirmeler dahilinde ulaşabilir. Bu durumda uç elemanın konumlanması önem arz etmektedir. 4. Kolun x eksenine göre yerleşimi açısasal yer değişimleri cinsinden denklem 4.56'da verilmiştir.

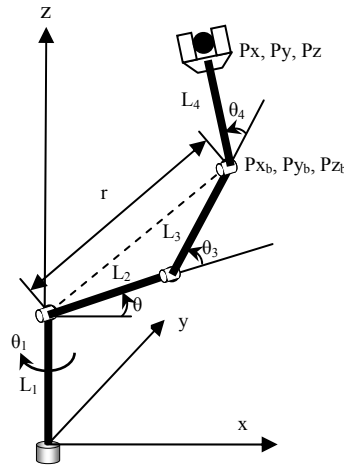
$$\phi = \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 \quad (4.55)$$



Şekil 4.19. Dört serbestlik dereceli robot kolunun detaylı düz kinematik gösterimi.

Robot kolunun bilek noktasına ait koordinatlar Denklem 4.55'te verilmiştir.

$$\begin{aligned} P_{x_b} &= C_1 (L_2 C_2 + L_3 C_{23}) \\ P_{y_b} &= S_1 (L_2 C_2 + L_3 C_{23}) \\ P_{z_b} &= L_1 + L_2 C_2 + L_3 C_{23} \end{aligned} \quad (4.56)$$



Şekil 4.20. Bileğin konum koordinatlarının gösterilmesi.

Şekil 4.20'da bilek noktasına ait koordinatlar gösterilmiştir. Bileğin konumunu ifade eden denklem ise aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned} P_{x_b} &= P_x - C_1 L_4 C_{234} = P_x - C_1 L_4 C_j \\ P_{y_b} &= P_y - S_1 L_4 C_{234} = P_y - S_1 L_4 C_j \\ P_{z_b} &= P_z - L_4 S_{234} = P_z - L_4 S_j \end{aligned} \quad (4.57)$$

Robot kolunun taban dönme açısı, robot kolunun uç noktasına ait x ve y konumlarından Denklem 4.58'deki gibi türetilir.

$$\theta_1 = \text{atan} \left(\frac{P_y}{P_x} \right) \quad (4.58)$$

Tabanın üst noktasından bileğe kadar çizilen bir r doğru parçasının uzunluğu kosinüs teoreminden faydalanılarak aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$r^2 = L_2^2 + L_3^2 - 2L_2L_3 \cos(180 - \theta_3) \quad (4.59)$$

Hipotenüs teoreminden yararlanarak aynı r doğru parçasının uzunluğu aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$r^2 = \left(\frac{P_{x_b}}{C_1} \right)^2 + (P_{z_b} - L_1)^2 \quad (4.60)$$

Denklem 4.59 ve Denklem 4.60'ı birbirine eşitlenirse:

$$L_2^2 + L_3^2 - 2L_2L_3 \cos(180 - \theta_3) = \left(\frac{P_{x_b}}{C_1} \right)^2 + (P_{z_b} - L_1)^2 \quad (4.61)$$

Denklem 4.61 düzenlenip ifadeden θ_3 çekilirse, üçüncü kolun ikinci kola göre açısı Denklem 4.62'deki gibi bulunabilir:

$$\theta_3 = \arccos \left(\frac{\left(\frac{P_{x_b}}{C_1} \right)^2 + (P_{z_b} - L_1)^2 - L_2^2 - L_3^2}{2L_2L_3} \right) \quad (4.62)$$

Buradan yola çıkarak ikinci kolun zemine göre olan açısı aşağıdaki gibi türetilebilir.

$$\theta_2 = \operatorname{atan} \left(\frac{C_1 (P_{z_b} - L_1)}{P_{x_b}} \right) - \operatorname{atan} \left(\frac{L_3 S_3}{L_2 + L_3 C_3} \right) \quad (4.63)$$

Denklem 4.56'dan yola çıkarak dördüncü kolun üçüncü kola göre açısı Denklem 4.64 yardımıyla bulunabilir:

$$\theta_4 = \phi - (\theta_2 + \theta_3) \quad (4.64)$$

Robot kolunun istenen bir noktaya uç elemanını getirebilmesi için gerekli açılal parametreleri vektörel olarak gösterimi Denklem 4.65'te verilmiştir.

$$q = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \end{bmatrix} \quad (4.65)$$

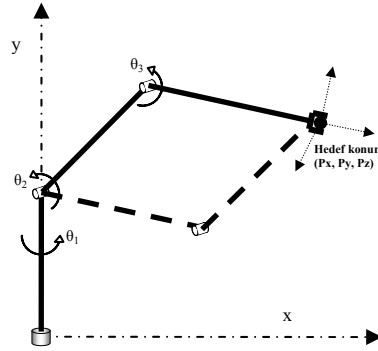
4.5. Aşırı Serbestlik Derecelik Problemi

Bir robot yapısının ters kinematığının çözümlenmesi için robotun uç noktasının konumuna ihtiyaç duyulmaktadır. Verilen uç noktanın konumundan yola çıkılarak önceden türetilen ters kinematik ifadeler ile robot kolunun istenen noktaya ulaşabilmesi için gerekli açı değerleri hesaplanır. Ancak aşırı serbestlik derecesine sahip robot yapılarında robotun uç noktasının konumunun bilinmesi yeterli olmadığından ek parametrelere ihtiyaç duyulmaktadır.

Şekil 4.21'den de görüleceği üzere 6 serbestlik dereceli bir robot kolunun verilen bir noktaya ulaşabilmesi için 3. kolun açı değerinin pozitif veya negatif olacağını belirtmesi yeterlidir. Ters kinematik çözüm için ilave sayısal parametrelere ihtiyaç duyulmamaktadır. Bu tür robotlar, Puma tipi robotlar olarak bilinirler.

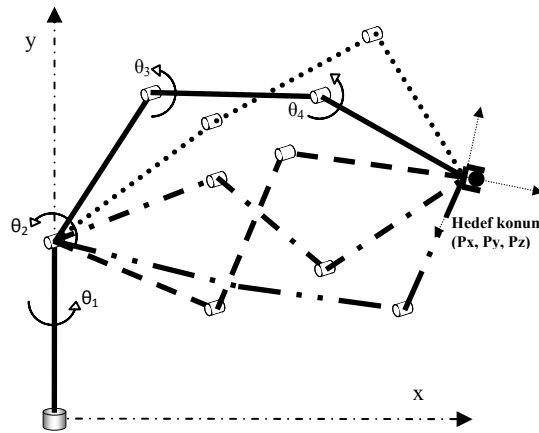
Aşırı serbestlik derecelik durumu genel anlamda, bir robot yapısının ulaşılmal istenen bir noktaya birden çok farklı konfigürasyonla ulaşabilmesidir [43]. Literatürde ise 6'dan fazla serbestlik derecesine sahip robotlar "aşırı serbestlik dereceli" olarak tanımlanır [47].

Bu çalışmada üzerinde durulan robot kolu yapısı, belirli bir nokta için sonsuz sayıda çözüme sahip bir kinematik yapıyı haizdir. Uygulamada bu tür robot kolları, üç eksenli bir uç elemanın da kullanılması ile yedi serbestlik dereceli robot kolu yapısını alabilmektedirler.



Şekil 4.21. 6 serbestlik dereceli bir robot kolunun istenilen bir noktaya ulaşması.

Aşırı serbestlik derecesine sahip bir robot kolunun ters kinematik denklemlerinin çözümünde ise robotun sadece uç noktasının konumunun bilinmesi, çözüm için yeterli olmamakta ve bazı robot parametrelerinin önceden belirlenmesine ihtiyaç duyulmaktadır.



Şekil 4.22. 7 serbestlik dereceli robot kolunun verilen bir noktaya ulaşması.

Şekil 4.22’de de görüldüğü gibi 7 serbestlik dereceli bir robot kolu için verilen bir uç nokta konumu için sonsuz sayıda çözüm mevcuttur. Dolayısıyla sadece uç noktanın konumunun bilinmesi, ters kinematik çözüm için yeterli değildir. Böyle bir robot kolunun ters kinematik çözümünün elde edilebilmesi için, robot koluna ait bazı parametrelerin kontrol parametresi olarak, ihtiyaca göre önceden belirlenmesi gerekmektedir (uç eleman ters kinematik çözümlenmeye katılmadığından tüm hesaplamalar 4 serbestlik dereceli ana robot gövdesi için yapılmıştır).

Bu çalışmada, aşırı serbestlik sorununun çözülebilmesi için denklem 4.56'da da verildiği gibi 4. kolun yere göre açısı kontrol parametresi olarak alınacak olup varılmak istenen hedef noktaya göre bu açıların belirlenebilmesi için bulanık mantık tabanlı bir çözüm yapısı sunulacaktır.

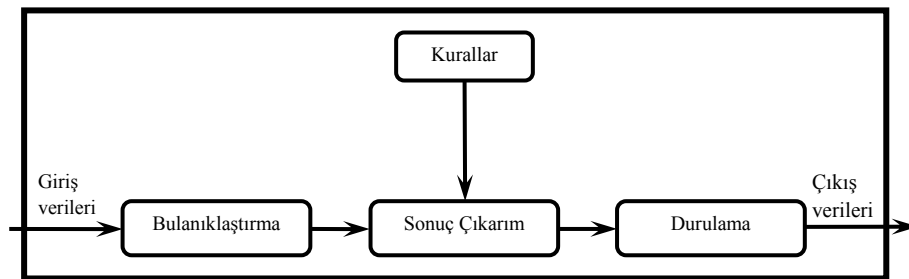
4.5.1. Aşırı serbestlik derecelik probleminin bulanık mantık ile çözümlenmesi

Bulanık mantık, sayısal ve sözel birçok ifadenin aynı anda işlenebildiği bir kontrol sistemidir. Bulanık mantıkta lineer olmayan bir takım sözel veriler girdi olarak kontrolöre aktarılır ve bu verilere bağlı olarak kontrolörden bir takım sayısal veriler çıktı olarak alınır.

Genel anlamda bulanık mantık, bir giriş vektörünün sayısal bir çıktıya dönüştürülmesinde kullanılan lineer olmayan bir çözüm yöntemi olarak tanımlanır. Bulanık mantığın en önemli avantajı, sistemin ihtiyacına göre farklı çözümlere ulaşılmasını sağlayabilecek birçok ihtimali bünyesinde barındırmasıdır. Ancak bu durum, bulanık mantık yapısının ve sistem davranışının çok iyi anlaşılabilmesini zorunlu kılmaktadır.

Bulanık mantık yapısı, Şekil 4.23'de gösterildiği gibi dört ana kısımdan oluşur.

1. Bulanıklaştırma,
2. Kurallar,
3. Sonuç çıkarım,
4. Durulama.



Şekil 4.23. Bulanık mantık yapısı.

Bulanık mantık çözümleme süreci Tablo 4.3'te verilmiştir. İlk olarak kontrolöre aktarılacak olan veri seti oluşturularak bulanık sözel değişkenler, bulanık sözel ifadeler ve üyelik fonksiyonları kullanılarak bulanık bir diziye dönüştürülür. Bu aşama bulanıklaştırma olarak tanımlanır. Ardından, önceden tanımlanan kurallara bağlı olarak sonuç çıkarım yapılır. Son olarak da elde edilen bulanık sonuçlar üyelik fonksiyonları yardımıyla nihai bir çıktı haline dönüştürülür. Bu son aşama, durulama olarak bilinir.

Tablo 4.3. Bulanık mantık algoritma aşamaları.

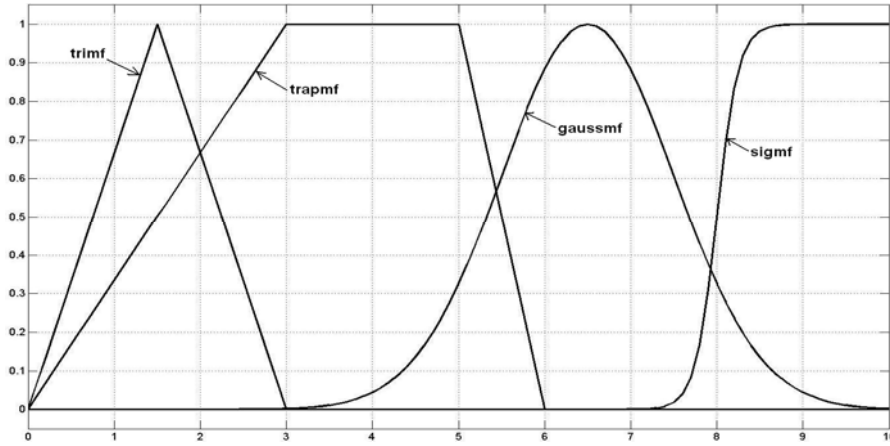
| Bulanık mantık algoritması | |
|-----------------------------------|--|
| 1 | Sözel değişkenlerin ve ifadelerin belirlenmesi |
| 2 | Üyelik fonksiyonlarının oluşturulması |
| 3 | Kural tablosunun oluşturulması |
| 4 | Üyelik fonksiyonları yardımıyla kontrolör giriş verilerinin bulanık değerlere dönüştürülmesi (Bulanıklaştırma) |
| 5 | Kural tablosundaki kuralların değerlendirilmesi (Sonuç çıkarım) |
| 6 | Her bir kurala ait sonuçların derlenmesi (Sonuç çıkarım) |
| 7 | Elde edilen sonuçların bulanık olmayan sayısal verilere dönüştürülmesi (Durulama) |

4.5.2. Sözel değişkenler

Sözel değişkenler, sayısal değerlerden ziyade günlük hayatta kullanılan kelime ve cümlelerden oluşan giriş veya çıkış değişkenleridirler. Sözel değişkenler genelde bir dizi sözel kısaltmalarla simgelenirler.

4.5.3. Üyelik fonksiyonları

Üyelik fonksiyonları, bulanıklaştırma ve durulama aşamalarında, bulanık olmayan giriş değerlerinin bulanık sözel ifadelerle dönüştürülmesi ve çıkarımı yapılan sözel ifadelerin bulanık olmayan sayısal ifadelerle dönüştürülmesi amacıyla kullanılırlar. Bulanık mantıkta kullanılan farklı yapıda bir çok üyelik fonksiyonu mevcuttur. Ancak en yaygın olarak kullanılan üyelik fonksiyonları üçgen tipli, trapezoidal ve gauss tipi fonksiyonlardır [48, 49].



Şekil 4.24. Bazı örnek üyelik fonksiyonları.

4.5.4. Bulanık kurallar ve kural tablosu

Bulanık mantıkta çıktılarının kontrol edilebilmesi amacıyla kural tablosu oluşturulur. En basit haliyle bir bulanık kural, “**eğer** durum buysa, **o zaman** sonuç şudur” şeklinde bir kuraldır. Kural tablosu, sistemin girdileri ile çıktıları arasındaki bütün ilişkileri içerir. Bulanık mantık kural tablosunun girdi ve çıktıları Tablo 4.5’te verilmiştir. Yine dört serbestlik dereceli robot kolunun 4. kolu için oluşturulan bulanık matris tablosuna ait bir bölüm, örnek olarak Tablo 4.5’te verilmiştir.

Tablo 4.4. Kural tablosu girdi ve çıktıları

| Kural tablosu girdileri | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|----|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Parametreler | | Sözel değişkenler | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| X | X0 | X1 | X2 | X3 | X4 | X5 | X6 | X7 | | | | | | | | | | | | |
| Y | + | Y0 | Y1 | Y2 | Y3 | Y4 | Y5 | Y6 | Y7 | | | | | | | | | | | |
| | - | | Y1 | Y2 | Y3 | Y4 | Y5 | Y6 | Y7 | | | | | | | | | | | |
| Z | Z0 | Z1 | Z2 | Z3 | Z4 | Z5 | Z6 | Z7 | Z8 | Z9 | | | | | | | | | | |
| Kural tablosu çıktıları | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Sözel değişkenler | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ø | + | Ø ₀ | Ø ₁₈ | Ø ₁₇ | Ø ₁₆ | Ø ₁₅ | Ø ₁₄ | Ø ₁₃ | Ø ₁₂ | Ø ₁₁ | Ø ₁₀ | Ø ₉ | Ø ₈ | Ø ₇ | Ø ₆ | Ø ₅ | Ø ₄ | Ø ₃ | Ø ₂ | Ø ₁ |
| | - | | Ø ₁₈ | Ø ₁₇ | Ø ₁₆ | Ø ₁₅ | Ø ₁₄ | Ø ₁₃ | Ø ₁₂ | Ø ₁₁ | Ø ₁₀ | Ø ₉ | Ø ₈ | Ø ₇ | Ø ₆ | Ø ₅ | Ø ₄ | Ø ₃ | Ø ₂ | Ø ₁ |

Bütün kurallar tablosu “AND” (ve) operatörü kullanılarak oluşturulmuştur. AND operatörü kullanılarak oluşturulmuş kurallardan bir örnek aşağıdaki gibi verilebilir:

Eğer $X=X1$ AND $Y=Y3$ AND $Z=Z2$ ise, O zaman $\emptyset = \emptyset_8$ dir.

Tablo 4.5. Bulanık matris örnekleri.

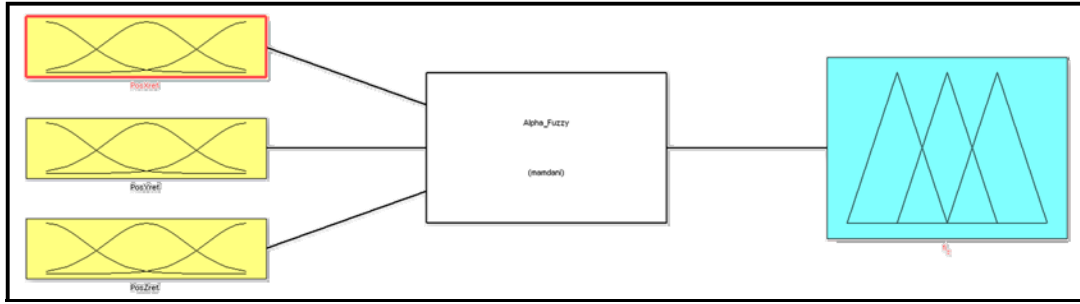
| X/Y | Y0 | Y1 | Y2 | Y3 | Y4 | Y5 | Y6 | Y7 | |
|-----|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|------------------|-----|----|
| X0 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | Z1 |
| X1 | N/A | \emptyset_{-16} | \emptyset_{-15} | \emptyset_{-12} | \emptyset_{-10} | \emptyset_{-8} | \emptyset_{-5} | N/A | |
| X2 | \emptyset_{-16} | \emptyset_{-14} | \emptyset_{-13} | \emptyset_{-11} | \emptyset_{-9} | \emptyset_{-7} | \emptyset_{-5} | N/A | |
| X3 | \emptyset_{-14} | \emptyset_{-12} | \emptyset_{-11} | \emptyset_{-10} | \emptyset_{-9} | \emptyset_{-8} | \emptyset_{-6} | N/A | |
| X4 | \emptyset_{-12} | \emptyset_{-11} | \emptyset_{-10} | \emptyset_{-9} | \emptyset_{-7} | \emptyset_{-3} | N/A | N/A | |
| X5 | \emptyset_{-12} | \emptyset_{-10} | \emptyset_{-9} | \emptyset_{-8} | \emptyset_{-5} | N/A | N/A | N/A | |
| X6 | \emptyset_{-8} | \emptyset_{-8} | \emptyset_{-6} | \emptyset_{-4} | N/A | N/A | N/A | N/A | |
| X7 | \emptyset_{-6} | \emptyset_0 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | |
| X/Y | Y0 | Y1 | Y2 | Y3 | Y4 | Y5 | Y6 | Y7 | |
| X0 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | Z2 |
| X1 | \emptyset_{-15} | \emptyset_{-15} | \emptyset_{-9} | \emptyset_{-8} | \emptyset_{-7} | \emptyset_{-5} | \emptyset_{-4} | N/A | |
| X2 | \emptyset_{-11} | \emptyset_{-12} | \emptyset_{-8} | \emptyset_{-7} | \emptyset_{-6} | \emptyset_{-4} | \emptyset_{-2} | N/A | |
| X3 | \emptyset_{-9} | \emptyset_{-10} | \emptyset_{-7} | \emptyset_{-6} | \emptyset_{-5} | \emptyset_{-2} | N/A | N/A | |
| X4 | \emptyset_{-7} | \emptyset_{-8} | \emptyset_{-6} | \emptyset_{-5} | \emptyset_{-3} | N/A | N/A | N/A | |
| X5 | \emptyset_{-5} | \emptyset_{-6} | \emptyset_{-4} | \emptyset_{-1} | N/A | N/A | N/A | N/A | |
| X6 | \emptyset_0 | \emptyset_{-4} | \emptyset_{-2} | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | |
| X7 | \emptyset_0 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | |

Bulanık mantık tablosu, her bir “X, $\pm Y$, $\pm Z$ ” değerine karşılık gelen her bir “ $\pm \emptyset$ ” değeri için bu şekilde oluşturularak “8x15x19” ebatlarında 3 boyutlu bir kural tablosu oluşturulmuştur. Tabloda kullanılan bütün giriş ve çıkışlar, robot kolunun fiziksel olarak alması istenen konumlanmasından yola çıkılarak keyfi olarak seçilmiş değerlerdir.

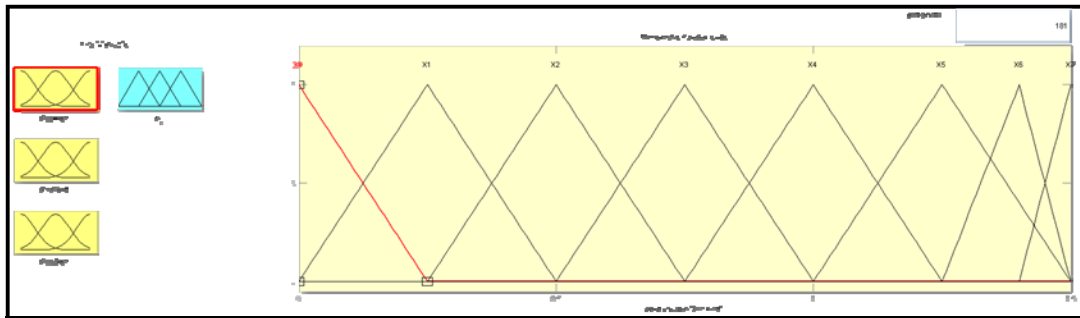
| X/Y | Y0 | Y1 | Y2 | Y3 | Y4 | Y5 | Y6 | Y7 | |
|-----|-------------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----|----|
| X0 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | Z5 |
| X1 | \emptyset_{-15} | \emptyset_{-15} | \emptyset_{-9} | \emptyset_{-8} | \emptyset_{-7} | \emptyset_{-5} | \emptyset_{-4} | N/A | |
| X2 | \emptyset_{-11} | \emptyset_{-12} | \emptyset_{-8} | \emptyset_{-7} | \emptyset_{-6} | \emptyset_{-4} | \emptyset_{-2} | N/A | |
| X3 | \emptyset_{-9} | \emptyset_{-10} | \emptyset_{-7} | \emptyset_{-6} | \emptyset_{-5} | \emptyset_{-2} | N/A | N/A | |
| X4 | \emptyset_{-7} | \emptyset_{-8} | \emptyset_{-6} | \emptyset_{-5} | \emptyset_{-3} | N/A | N/A | N/A | |
| X5 | \emptyset_{-5} | \emptyset_{-6} | \emptyset_{-4} | \emptyset_{-1} | N/A | N/A | N/A | N/A | |
| X6 | \emptyset_0 | \emptyset_{-4} | \emptyset_{-2} | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | |
| X7 | \emptyset_0 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | |
| X/Y | Y0 | Y1 | Y2 | Y3 | Y4 | Y5 | Y6 | Y7 | |
| X0 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | Z4 |
| X1 | \emptyset_{-15} | \emptyset_{-15} | \emptyset_{-9} | \emptyset_{-8} | \emptyset_{-7} | \emptyset_{-5} | \emptyset_{-4} | N/A | |
| X2 | \emptyset_{-11} | \emptyset_{-12} | \emptyset_{-8} | \emptyset_{-7} | \emptyset_{-6} | \emptyset_{-4} | \emptyset_{-2} | N/A | |
| X3 | \emptyset_{-9} | \emptyset_{-10} | \emptyset_{-7} | \emptyset_{-6} | \emptyset_{-5} | \emptyset_{-2} | N/A | N/A | |
| X4 | \emptyset_{-7} | \emptyset_{-8} | \emptyset_{-6} | \emptyset_{-5} | \emptyset_{-3} | N/A | N/A | N/A | |
| X5 | \emptyset_{-5} | \emptyset_{-6} | \emptyset_{-4} | \emptyset_{-1} | N/A | N/A | N/A | N/A | |
| X6 | \emptyset_0 | \emptyset_{-4} | \emptyset_{-2} | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | |
| X7 | \emptyset_0 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | |
| X/Y | Y0 | Y1 | Y2 | Y3 | Y4 | Y5 | Y6 | Y7 | |
| X0 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | Z3 |
| X1 | \emptyset_{-15} | \emptyset_{-15} | \emptyset_{-9} | \emptyset_{-8} | \emptyset_{-7} | \emptyset_{-5} | \emptyset_{-4} | N/A | |
| X2 | \emptyset_{-11} | \emptyset_{-12} | \emptyset_{-8} | \emptyset_{-7} | \emptyset_{-6} | \emptyset_{-4} | \emptyset_{-2} | N/A | |
| X3 | \emptyset_{-9} | \emptyset_{-10} | \emptyset_{-7} | \emptyset_{-6} | \emptyset_{-5} | \emptyset_{-2} | N/A | N/A | |
| X4 | \emptyset_{-7} | \emptyset_{-8} | \emptyset_{-6} | \emptyset_{-5} | \emptyset_{-3} | N/A | N/A | N/A | |
| X5 | \emptyset_{-5} | \emptyset_{-6} | \emptyset_{-4} | \emptyset_{-1} | N/A | N/A | N/A | N/A | |
| X6 | \emptyset_0 | \emptyset_{-4} | \emptyset_{-2} | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | |
| X7 | \emptyset_0 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | |
| X/Y | Y0 | Y1 | Y2 | Y3 | Y4 | Y5 | Y6 | Y7 | |
| X0 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | Z2 |
| X1 | \emptyset_{-15} | \emptyset_{-15} | \emptyset_{-9} | \emptyset_{-8} | \emptyset_{-7} | \emptyset_{-5} | \emptyset_{-4} | N/A | |
| X2 | \emptyset_{-11} | \emptyset_{-12} | \emptyset_{-8} | \emptyset_{-7} | \emptyset_{-6} | \emptyset_{-4} | \emptyset_{-2} | N/A | |
| X3 | \emptyset_{-9} | \emptyset_{-10} | \emptyset_{-7} | \emptyset_{-6} | \emptyset_{-5} | \emptyset_{-2} | N/A | N/A | |
| X4 | \emptyset_{-7} | \emptyset_{-8} | \emptyset_{-6} | \emptyset_{-5} | \emptyset_{-3} | N/A | N/A | N/A | |
| X5 | \emptyset_{-5} | \emptyset_{-6} | \emptyset_{-4} | \emptyset_{-1} | N/A | N/A | N/A | N/A | |
| X6 | \emptyset_0 | \emptyset_{-4} | \emptyset_{-2} | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | |
| X7 | \emptyset_0 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | |
| X/Y | Y0 | Y1 | Y2 | Y3 | Y4 | Y5 | Y6 | Y7 | |
| X0 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | Z1 |
| X1 | \emptyset_{-15} | \emptyset_{-15} | \emptyset_{-9} | \emptyset_{-8} | \emptyset_{-7} | \emptyset_{-5} | \emptyset_{-4} | N/A | |
| X2 | \emptyset_{-11} | \emptyset_{-12} | \emptyset_{-8} | \emptyset_{-7} | \emptyset_{-6} | \emptyset_{-4} | \emptyset_{-2} | N/A | |
| X3 | \emptyset_{-9} | \emptyset_{-10} | \emptyset_{-7} | \emptyset_{-6} | \emptyset_{-5} | \emptyset_{-2} | N/A | N/A | |
| X4 | \emptyset_{-7} | \emptyset_{-8} | \emptyset_{-6} | \emptyset_{-5} | \emptyset_{-3} | N/A | N/A | N/A | |
| X5 | \emptyset_{-5} | \emptyset_{-6} | \emptyset_{-4} | \emptyset_{-1} | N/A | N/A | N/A | N/A | |
| X6 | \emptyset_0 | \emptyset_{-4} | \emptyset_{-2} | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | |
| X7 | \emptyset_0 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | |

Şekil 4.25. 3 boyutlu kural tablosu (ilk 5 Z değeri için).

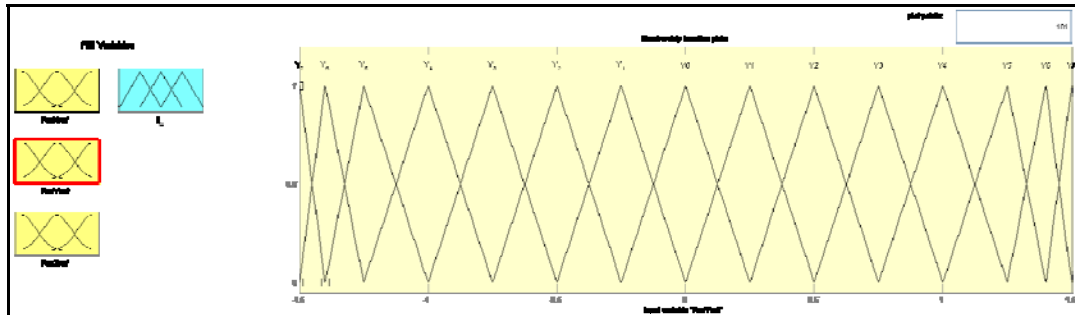
Şekil 27, 28, 29 ve 30’da da görüldüğü gibi bütün giriş ve çıkış değerlerinin çözümlenmesinde üçgen tipli üyelik fonksiyonu seçilmiştir.



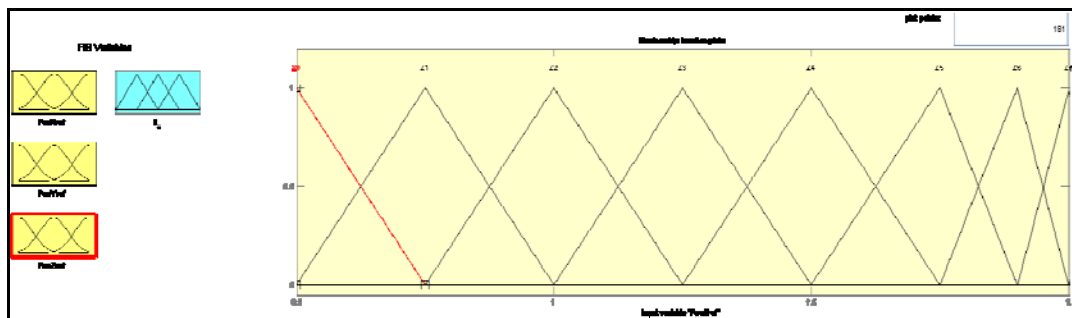
Şekil 4.26. Bulanık mantık girdi ve çıktıları.



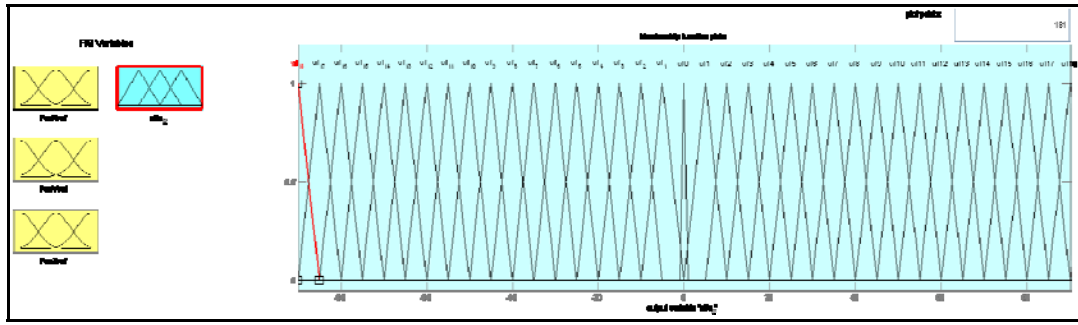
Şekil 4.27. X konum bilgisi.



Şekil 4.28. Y konum bilgisi.



Şekil 4.29. Z konum bilgisi.



Şekil 4.30. Ø açığı bilgisi.

4.5.5. Bulanık diziler

Bulanık kuralların değerlendirilmesi ve her bir kurala ait sonuçların kombinasyonu, bulanık dizi operasyonlarının kullanımıyla gerçekleştirilir. Bulanık dizilerdeki işlemler, bulanık olmayan dizilerdeki işlemlerden farklıdır. μ_A ve μ_B , A ve B gibi iki farklı bulanık dizisine ait üyelik fonksiyonları olsun. Tablo 4.6’da bu bulanık dizilere ait OR ve AND operatörleri için muhtemel işlemler, karşılaştırmalı olarak verilmiştir. OR ve And operatörleri için en sık kullanılan işlemler sırasıyla Max ve Min’dir. NOT operatörü için ise bulanık dizilerde aşağıdaki denklem 4.66’da verilmiştir.

$$\mu_{A^-}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (4.66)$$

Tablo 4.6. Bulanık dizi işlemleri

| OR (birleşim) | | AND (kesişim) | |
|---------------|--|---------------|--|
| MAX | $\text{Max}\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}$ | MIN | $\text{Min}\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}$ |
| ASUM | $\mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x)\mu_B(x)$ | PROD | $\mu_A(x)\mu_B(x)$ |
| BSUM | $\text{Max}\{1, \mu_A(x) + \mu_B(x)\}$ | BDIF | $\text{Max}\{0, \mu_A(x) + \mu_B(x) - 1\}$ |

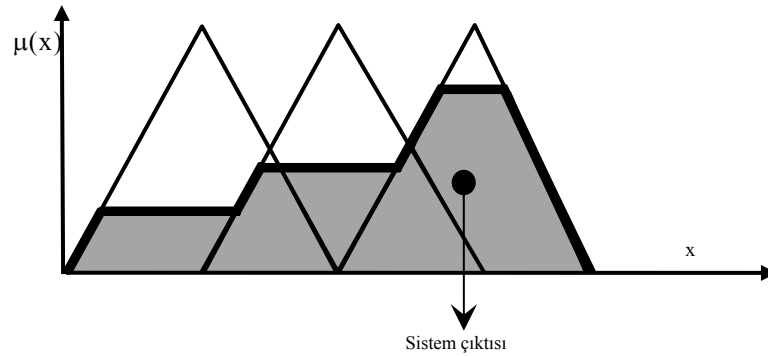
Her bir kuralın çıktısı değerlendirildikten sonra bu sonuçlar nihai bir çözüm elde etmek üzere kombine edilmelidirler. Bu işlem “sonuç çıkarım” olarak adlandırılır. Her bir kuralın sonucu farklı şekillerde kombine edilebilir. Tablo 4.7’de her bir kural sonucunun kombine edilmesinde kullanılan yöntemler verilmektedir.

Tablo 4.7. Sonuçların bir araya toplanması.

| İşlem | Formül |
|----------------|---|
| Maximum | $\text{Max}\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}$ |
| Bounded Sum | $\text{Max}\{1, \mu_A(x) + \mu_B(x)\}$ |
| Normalized Sum | $\frac{\mu_A(x) + \mu_B(x)}{\text{Max}\{1, \text{Max}\{\mu_A(x'), \mu_B(x')\}\}}$ |

4.5.6. Durulama

“Sonuç çıkarım” aşamasından sonra elde edilen veriler bulanık veriler olduğundan nihai bir sayısal değer elde edilebilmesi için durulama aşamasından geçmesi gerekmektedir. Durulama işlemi, çıkış değişkenine atanan üyelik fonksiyonuna göre gerçekleştirilir. Durulama işleminde de farklı algoritmalar mevcuttur. En sık kullanılan algoritmalar Tablo 4.8’de verilmiştir [48, 50].



Şekil 4.31. Durulama işlemi.

Tablo 4.8. Durulama algoritmaları

| İşlem | Formül |
|-----------------------------------|--|
| Kütle merkezi | $U = \frac{\int_{\min}^{\max} u\mu(u) du}{\int_{\min}^{\max} \mu(u) du}$ |
| Her bir eleman için kütle merkezi | $\frac{\sum_{i=1}^p [u_i \mu_i]}{\sum_{i=1}^p [\mu_i]}$ |
| Sol Maximum | $U = \inf(u'), \mu(u') = \sup(\mu(u))$ |
| Sağ Minimum | $U = \sup(u'), \mu(u') = \sup(\mu(u))$ |

Bu bölümde robot kolunun düz ve ters kinematik çözümlenmeleri gerçekleştirilmiştir. Bir sonraki bölümde ise dinamik sistemlerin çözümlenmesinde kullanılan değişik yöntemlerin özellikleri hakkında gerekli bazı bilgiler verilerek dört eksenli robot kolunun hareketini tanımlayan düz dinamik ve ters dinamik ifadelerinin türetilmesine yer verilecektir.

BÖLÜM 5. ROBOT DİNAMIĞI

Bu bölümde, robot kolunun simülasyonunda kullanılacak olan dinamik yapıya ait denklem ve algoritmaların türetilmesi üzerinde durulacaktır.

Dinamik, hareketli bir sistemde, sistemin hareketini tanımlayan parametreler, sistemin kuvvet ve torkları arasındaki ilişki olarak tanımlanabilir. Bir robot kolunun dinamik modeli, robot kolunun dinamik davranışını belirleyen hareket denklemlerinden oluşur.

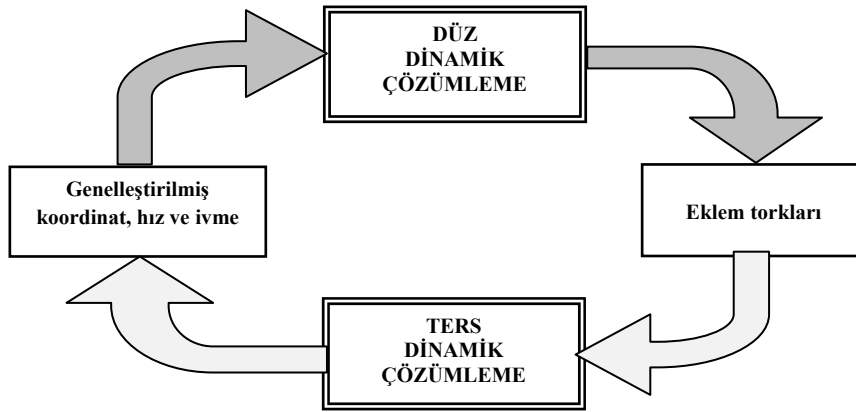
Böyle bir analizin yapılabilmesi için, robot kolunun dinamik davranışını tanımlayan, doğrusal olmayan diferansiyel denklem takımlarının elde edilmesi ve çözülmesi gerekir [51].

5.1. Manipülator Dinamiği

Robotların dinamik analizinde düz dinamik ve ters dinamik olmak üzere iki temel prensip mevcuttur.

5.1.1. Düz dinamik

Robot kolunun istenen bir konuma gelmesi için genelleştirilmiş koordinatları, hızı ve ivmesi verildiğinde, bu noktaya gelebilmesi için tahrik elemanlarının üreteceği moment ve kuvvetlerin bulunması işlemidir.



Şekil 5.1. Düz dinamik ile ters kinematik arasındaki ilişki.

5.1.2. Ters dinamik

Herhangi bir t anında istenen moment ve kuvvetler verildiğinde robot kolunun alacağı konum için gerekli olan genelleştirilmiş koordinatlarını, eklem hız ve ivmelerini bulma işlemidir. Diğer bir deyişle robot kolunun istenen bir konuma gelmesi için genelleştirilmiş koordinatları, hızı ve ivmesi verildiğinde, bu noktaya gelebilmesi için tahrik elemanlarının üreteceği moment ve kuvvetlerin bulunması problemi.

Robot kollarının dinamik denklemlerini elde etmek için literatürde bilinen birçok yöntemden bazıları şunlardır:

- Lagrange-Euler (L-E) yöntemi
- Rekürsif Lagrange (R-L) yöntemi
- Newton-Euler (N-E) yöntemi
- Genelleştirilmiş D'Alembert (G-D) yöntemi

Bu yöntemlerden, robot kollarının modellenmesi ile ilgili literatürde en çok kullanılanları (L-E) ve (N-E) yöntemleri olmuştur. Lagrange-Euler (L-E) yönteminde sistem dinamik davranışı, genelleştirilmiş koordinatları kullanan iş ve enerji ifadelerinden elde edilir. (L-E) denklemlerinin üretilmesi basit ve sistematiktir. Bu

yönü ile MATLAB Simulink simülasyon paket programı içinde oldukça uygun bir yapıya sahiptir. Ancak (L-E) denklemleri kullanılarak yapılacak düz ve ters dinamik probleminin çözümü aşırı miktarda aritmetik işlem gerektirmesi nedeni ile gerçek-zaman uygulaması için her zaman uygun değildir. Ancak buna rağmen bilgisayar teknolojisindeki çok hızlı gelişmeler nedeni ile kullanılabilceğini söylemek mümkündür.

5.2. Lagrange-Euler Formülasyonu

Bir sistemin, içerdiği toplam iş ve enerji ile ifade edilmesi, bu yöntemin esasını oluşturur. Lagrange denklemi [52],

$$Q_i = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i}, \quad i=1, 2, \dots, n \quad (5.1)$$

Burada;

q_i : (i) inci eklemin genelleştirilmiş koordinatları,

\dot{q}_i : (i) inci eklemin genelleştirilmiş hızları,

Q_i : genelleştirilmiş (i) inci kuvvet,

L: Lagrange fonksiyonu,

$$L = K - P \quad (5.2)$$

olarak ifade edilir.

Burada;

K: robotun kinetik enerjisini,

P: robotun potansiyel enerjisini

ifade etmektedir.

v_i doğrusal hızı ve ω_i açısal hızı ile hareket eden robotun dört kolundaki toplam kinetik enerjisi,

$$T = \sum_{i=1}^4 \left(\frac{1}{2} m_i v_i^2 + \frac{1}{2} I \omega_i^2 \right) \quad (5.3)$$

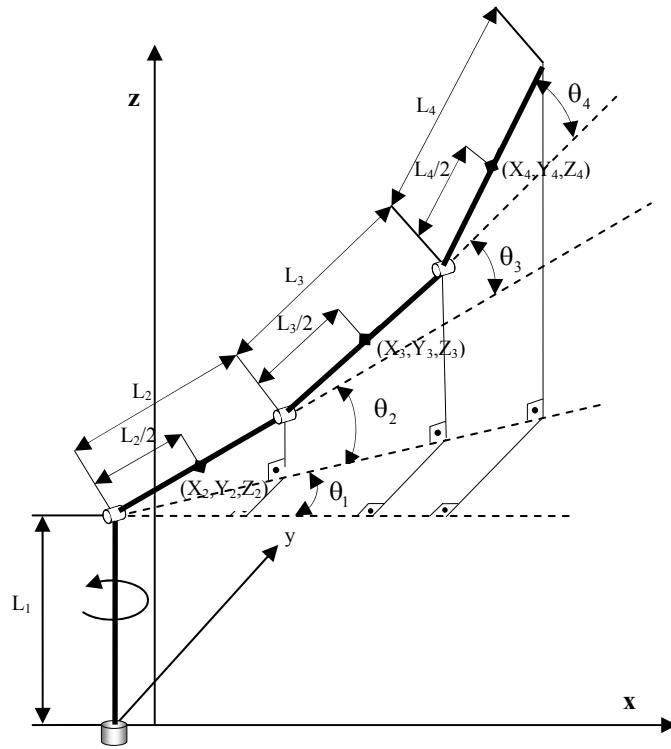
ile ifade edilir. Burada; v_i değeri hız vektörünün büyüklüğünü ifade etmektedir. Burada doğrusal hız ile açısal hızın birbirinden bağımsız değerler olmayıp eklem açıları ile eklem açısal hızlarının birer fonksiyonu olduklarına dikkat edilmelidir [54].

5.3. Dört Serbestlik Dereceli Robot Kolunun Dinamik Denklemleri

Şekil 5.2’de dört eksenli robot kolunun dinamik yapısına yer verilmiştir. Robot kolunun dinamik denklemlerinin çıkartılmasında Lagrange - Euler yönteminden faydalanılacaktır. İlk olarak robot koluna ait düz dinamik yapı analiz edilerek robotun hareket parametrelerinden yola çıkılarak istenen konum ve yönlenmeye ulaşabilmek için servo motorlar tarafından uygulanması gereken torkları ifade eden denklemler elde edilecektir. Düz kinematik analizin ardından sisteme uygulanan torklardan yola çıkılarak, buna karşılık gelen ivme, hız ve konum değerlerinin türetilmesini sağlayan ters dinamik ifadeler elde edilecektir.

5.3.1. Dört eksenli robot kolunun düz dinamik ifadeleri

Bu bölümde tasarlanmış olan robot koluna ait düz dinamik ifadelerin türetilmesine yer verilecektir. Manipülatörün kinetik enerjinin bulunabilmesi için her bir kolun kütle merkezinin hızlarını ifade eden denklemlerin çıkartılması gerekir. Bunun için ise her bir kolun ağırlık merkezinin konumunu ifade eden denklemlerin bilinmesi gerekmektedir.



Şekil 5.2. Dört serbestlik dereceli robot kolunun dinamik yapısı.

$P(x,y,z)$ noktasının konumu, Denklem 5.4'de ifade edilmiştir.

$$\begin{aligned}
 P_x &= (L_2 \cos \theta_2 + L_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + L_4 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)) \cos \theta_1 \\
 P_y &= (L_2 \cos \theta_2 + L_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + L_4 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)) \sin \theta_1 \\
 P_z &= L_1 + L_2 \sin \theta_2 + L_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) + L_4 \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)
 \end{aligned} \tag{5.4}$$

Bu denklemler aynı zamanda kolun ileri kinematik denklemleridir. Robot kolunun homojen olduğu ve ağırlık merkezinin kolun orta noktası olduğu kabul edilirse, kolların ağırlık merkezlerinin koordinatları Denklem 5.5'teki gibi yazılabilir.

$$x_2 = \frac{L_2}{2} \cos \theta_2 \cos \theta_1$$

$$y_2 = \frac{L_2}{2} \cos \theta_2 \sin \theta_1$$

$$z_2 = L_1 + \frac{L_2}{2} \sin \theta_2$$

$$\begin{aligned}
x_3 &= (L_2 \cos \theta_2 + \frac{L_3}{2} \cos \theta_{23}) \cos \theta_1 \\
y_3 &= (L_2 \cos \theta_2 + \frac{L_3}{2} \cos \theta_{23}) \sin \theta_1 \\
z_3 &= L_1 + L_2 \sin \theta_2 + \frac{L_3}{2} \sin \theta_{23} \\
x_4 &= (L_2 \cos \theta_2 + L_3 \cos \theta_{23} + \frac{L_4}{2} \cos \theta_{234}) \cos \theta_1 \\
y_4 &= (L_2 \cos \theta_2 + L_3 \cos \theta_{23} + \frac{L_4}{2} \cos \theta_{234}) \sin \theta_1 \\
z_4 &= L_1 + L_2 \sin \theta_2 + L_3 \sin \theta_{23} + \frac{L_4}{2} \sin \theta_{234}
\end{aligned} \tag{5.5}$$

Burada $\theta_{ijk} = (\theta_i + \theta_j + \theta_k)$ olarak kısaltılmıştır. Robot kolunun Lagrange-Euler denklemlerinden yola çıkarak tork değerlerini bulabilmek için kinetik enerji, potansiyel enerji ve sürtünme kayıpları enerji denklemleri Denklem 5.6, 5.7 ve 5.8'de olduğu gibidir.

$$T = \frac{1}{2} I_1 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} I_2 \dot{\theta}_2^2 + \frac{1}{2} I_3 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3)^2 + \frac{1}{2} I_4 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4)^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 + \frac{1}{2} m_3 v_3^2 + \frac{1}{2} m_4 v_4^2 \tag{5.6}$$

Verilen ifadede;

$$I_1 = \frac{1}{2} m_1 R^2, \quad I_2 = \frac{1}{2} m_2 L_2^2, \quad I_3 = \frac{1}{2} m_3 L_3^2, \quad I_4 = \frac{1}{2} m_4 L_4^2$$

$$v_2^2 = \dot{x}_2^2 + \dot{y}_2^2 + \dot{z}_2^2, \quad v_3^2 = \dot{x}_3^2 + \dot{y}_3^2 + \dot{z}_3^2, \quad v_4^2 = \dot{x}_4^2 + \dot{y}_4^2 + \dot{z}_4^2$$

Potansiyel enerji denklemi ise Denklem 5.7'de verilmiştir.

$$\begin{aligned}
P = & m_2 g \left(L_1 + \frac{L_2}{2} \sin \theta_2 \right) + m_3 g \left(L_1 + L_2 \sin \theta_2 + \frac{L_3}{2} \sin \theta_3 \right) \\
& + m_4 g \left(L_1 + L_2 \sin \theta_2 + L_3 \sin \theta_3 + \frac{L_4}{2} \sin \theta_4 \right)
\end{aligned} \tag{5.7}$$

Sürtünme kayıplarını ifade eden enerji denklemi,

$$F = \frac{1}{2} b_1 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} b_2 \dot{\theta}_2^2 + \frac{1}{2} b_3 \dot{\theta}_3^2 + \frac{1}{2} b_4 \dot{\theta}_4^2 \tag{5.8}$$

olarak elde edilir. Burada; K kinetik enerji denklemini, P Potansiyel enerji denklemini ve F Sürtünme kayıpları enerjisi denklemini ifade etmektedir. Kinetik enerji denklemindeki; (I) kolun atalet momentini, (R) birinci kolun yarıçapını, (v) ise kütle merkezinin hızını ifade etmektedir. Sürtünme kayıpları enerjisi denklemindeki (b) ise sürtünme katsayısıdır.

Lagrange-Euler denklemi dört serbestlik dereceli robot koluna uygulandığında genelleştirilmiş koordinatlar,

$$q_1 = \theta_1, \quad q_2 = \theta_2, \quad q_3 = \theta_3, \quad q_4 = \theta_4$$

Genelleştirilmiş kuvvetler,

$$Q_1 = \tau_1, \quad Q_2 = \tau_2, \quad Q_3 = \tau_3, \quad Q_4 = \tau_4$$

Robot kolunun açısal hızları,

$$\omega_1 = \dot{\theta}_1, \quad \omega_2 = \dot{\theta}_2, \quad \omega_3 = \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3, \quad \omega_4 = \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4$$

olmaktadır.

Robot kollarının kütle merkezlerine ait bileşenlerin konumlarına ait türevlerinin karesi alınıp toplandığında verilen kütle merkezine ait çizgisel hızın karesi elde

edilir. Kütle merkezlerinin hızları Denklem 5.9, 5.10 ve 5.11’de her bir kol için ayrı olarak türetilmiştir.

İkinci kolun çizgisel hız ifadesi:

$$\begin{aligned}\dot{x}_2 &= -\frac{L_2}{2}(\dot{\theta}_1 \sin \theta_1 \cos \theta_2 + \dot{\theta}_2 \sin \theta_2 \cos \theta_1) \\ \dot{y}_2 &= -\frac{L_2}{2}(-\dot{\theta}_1 \cos \theta_1 \cos \theta_2 + \dot{\theta}_2 \sin \theta_1 \sin \theta_2) \\ \dot{z}_2 &= \frac{L_2}{2} \dot{\theta}_2 \cos \theta_2 \\ v_2^2 &= \frac{L_2^2}{4}(\dot{\theta}_1^2 \cos^2 \theta_2 + \dot{\theta}_2^2)\end{aligned}\quad (5.9)$$

Üçüncü kolun çizgisel hız ifadesi:

$$\begin{aligned}\dot{x}_3 &= -L_2(\dot{\theta}_1 \sin \theta_1 \cos \theta_2 + \dot{\theta}_2 \sin \theta_2 \cos \theta_1) - \frac{L_3}{2}(\dot{\theta}_1 \sin \theta_1 \cos \theta_{23} + \dot{\theta}_{23} \sin \theta_{23} \cos \theta_1) \\ \dot{y}_3 &= L_2(\dot{\theta}_1 \cos \theta_1 \cos \theta_2 - \dot{\theta}_2 \sin \theta_1 \sin \theta_2) - \frac{L_3}{2}(-\dot{\theta}_1 \cos \theta_1 \cos \theta_{23} + \dot{\theta}_{23} \sin \theta_1 \sin \theta_{23}) \\ \dot{z}_3 &= L_2 \dot{\theta}_2 \cos \theta_2 + \frac{L_3}{2} \dot{\theta}_{23} \cos \theta_{23} \\ v_3^2 &= L_2^2(\dot{\theta}_1^2 \cos^2 \theta_2 + \dot{\theta}_2^2) + \frac{L_3^2}{4}(\dot{\theta}_1^2 \cos^2 \theta_{23} + \dot{\theta}_{23}^2) + L_2 L_3(\dot{\theta}_1^2 \cos \theta_2 \cos \theta_{23} + \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_{23} \cos(-\theta_3))\end{aligned}\quad (5.10)$$

Dördüncü kolun çizgisel hız ifadesi:

$$\begin{aligned}\dot{x}_4 &= -L_2(\dot{\theta}_1 S_1 C_2 + \dot{\theta}_2 S_2 C_1) - L_3(\dot{\theta}_1 S_1 C_{23} + \dot{\theta}_{23} S_{23} C_1) - L_4(\dot{\theta}_1 S_1 C_{234} + \dot{\theta}_{234} S_{234} C_1) \\ \dot{y}_4 &= L_2(\dot{\theta}_1 C_1 C_2 - \dot{\theta}_2 S_2 S_1) + L_3(\dot{\theta}_1 C_1 C_{23} - \dot{\theta}_{23} S_{23} S_1) + L_4(\dot{\theta}_1 C_1 C_{234} - \dot{\theta}_{234} S_{234} S_1) \\ \dot{z}_4 &= L_2 \dot{\theta}_2 C_2 + L_3 \dot{\theta}_{23} C_{23} + L_4 \dot{\theta}_{234} C_{234}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
v_4^2 = & L_2^2 (\dot{\theta}_1^2 \cos^2 \theta_2 + \dot{\theta}_2^2) + L_3^2 (\dot{\theta}_1^2 \cos^2 \theta_{23} + \dot{\theta}_{23}^2) + L_4^2 (\dot{\theta}_1^2 \cos^2 \theta_{234} + \dot{\theta}_{234}^2) \\
& + 2L_2 L_3 \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_{23} \cos(-\dot{\theta}_3) + 2L_2 L_4 \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_{234} \cos(-\dot{\theta}_3 - \dot{\theta}_4) + 2L_3 L_4 \dot{\theta}_{23} \dot{\theta}_{234} \cos(-\dot{\theta}_4) \\
& + 2L_2 L_3 \dot{\theta}_1^2 \cos \theta_2 \cos \theta_{23} + 2L_2 L_4 \dot{\theta}_1^2 \cos \theta_2 \cos \theta_{234} + 2L_3 L_4 \dot{\theta}_1^2 \cos \theta_{23} \cos \theta_{234}
\end{aligned} \quad (5.11)$$

Toplam kinetik enerji denklemi aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\begin{aligned}
T = & \frac{1}{2} I_1 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} I_2 \dot{\theta}_2^2 + \frac{1}{2} I_3 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3)^2 + \frac{1}{2} I_4 (\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4)^2 \\
& + \frac{1}{2} m_2 \frac{L_2^2}{4} (\dot{\theta}_1^2 \cos^2 \theta_2 + \dot{\theta}_2^2) \\
& + \frac{1}{2} m_3 \left(\begin{aligned} & L_2^2 (\dot{\theta}_1^2 \cos^2 \theta_2 + \dot{\theta}_2^2) + \frac{L_3^2}{4} (\dot{\theta}_1^2 \cos^2 \theta_{23} + \dot{\theta}_{23}^2) \\ & + L_2 L_3 (\dot{\theta}_1^2 \cos \theta_2 \cos \theta_{23} + \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_{23} \cos(\theta_2 - \theta_{23})) \end{aligned} \right) \\
& + \frac{1}{2} m_4 \left(\begin{aligned} & L_2^2 (\dot{\theta}_1^2 \cos^2 \theta_2 + \dot{\theta}_2^2) + L_3^2 (\dot{\theta}_1^2 \cos^2 \theta_{23} + \dot{\theta}_{23}^2) \\ & + L_4^2 (\dot{\theta}_1^2 \cos^2 \theta_{234} + \dot{\theta}_{234}^2) + 2L_2 L_3 \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_{23} \cos(-\dot{\theta}_3) \\ & + 2L_2 L_4 \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_{234} \cos(-\dot{\theta}_3 - \dot{\theta}_4) + 2L_3 L_4 \dot{\theta}_{23} \dot{\theta}_{234} \cos(-\dot{\theta}_4) \\ & + 2L_2 L_3 \dot{\theta}_1^2 \cos \theta_2 \cos \theta_{23} + 2L_2 L_4 \dot{\theta}_1^2 \cos \theta_2 \cos \theta_{234} \\ & + 2L_3 L_4 \dot{\theta}_1^2 \cos \theta_{23} \cos \theta_{234} \end{aligned} \right)
\end{aligned} \quad (5.12)$$

Toplam kinetik enerji denkleminin, denklem 5.1'de verilen Lagrange-Euler kuralı gereği açısal hız cinsinden kısmi türevlerinin zamana göre türevleri ve açısal konum cinsinden kısmi türevleri hesaplanarak birbirinden çıkartılır. Toplam kinetik enerji denkleminin açık hali, denklem 6.12'de verilmiştir. Benzer şekilde denklem 5.7 ve 5.8'de verildiği gibi toplam potansiyel enerji ve sürtünme kayıpları enerjisinin de sırasıyla açısal konum ve açısal hıza göre kısmi türevleri alınarak kinetik enerjinin türevletilmesinden elde edilen sonuca eklenir. Verilen bilgilere dayanarak, robot kolunun istenen hareketi yerine getirebilmesi için anlık konum, hız ve ivme değerlerine bağlı olarak her bir servo motor tarafından uygulanması gereken torku ifade eden düz dinamik denklemleri aşağıda verilmiştir.

1. Kola ait düz dinamik denklem ifadesi:

$$\begin{aligned} \tau_1 = & \ddot{\theta}_1 \left[I_1 + m_2 l_2^2 + m_2 L_2^2 C_2^2 + m_3 l_3 C_{23}^2 + 2m_3 l_3 C_2 C_{23} + m_4 L_2^2 C_2^2 + m_4 L_3^2 C_{23}^2 + m_3 l_4^2 C_{234}^2 \right. \\ & \left. + 2m_4 L_2 L_3 C_2 C_{23} + 2m_4 L_2 l_4 C_2 C_{234} + 2m_4 L_3 l_4 C_{23} C_{234} \right] \\ & + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \left[-2m_2 l_2^2 S_2 C_2 - 2m_3 L_2^2 S_2 C_2 - 2m_3 l_3^2 S_{23} C_{23} - 2m_3 L_2 l_3 \sin(2\theta_2 + \theta_3) \right. \\ & \left. - 2m_4 L_2^2 S_2 C_2 - 2m_4 L_3^2 S_{23} C_{23} - 2m_4 l_4^2 S_{234} C_{234} - 2m_4 L_2 L_3 \sin(2\theta_2 + \theta_3) \right. \\ & \left. - 2m_4 L_2 l_4 \sin(2\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) - 2m_4 L_3 l_4 \sin(2\theta_2 + 2\theta_3 + \theta_4) \right] \\ & + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 \left[-2m_3 l_3^2 S_{23} C_{23} - 2m_3 L_2 l_3 S_{23} C_2 - 2m_4 L_3^2 S_{23} C_{23} - 2m_4 l_4^2 S_{234} C_{234} \right. \\ & \left. - 2m_4 L_2 L_3 S_{23} C_2 - 2m_4 L_2 l_4 S_{234} C_2 - 2m_4 L_3 l_4 \sin(2\theta_2 + 2\theta_3 + \theta_4) \right] \\ & + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_4 \left[-2m_4 l_4^2 S_{234} C_{234} - 2m_4 L_2 l_4 S_{234} C_2 - 2m_4 L_3 l_4 S_{234} C_{23} \right] \end{aligned}$$

2. Kola ait düz dinamik denklem ifadesi:

$$\begin{aligned} t_2 = & \ddot{q}_2 \left[I_2 + m_2 l_2^2 + I_2 + m_3 L_2^2 + m_3 l_3^2 + 2m_3 L_2 l_3 \cos(-q_3) + I_4 + m_4 L_2^2 + m_4 L_3^2 + m_4 l_4^2 \right. \\ & \left. + 2m_4 L_2 L_3 \cos(-q_3) + 2m_4 L_2 l_4 \cos(-q_3 - q_4) + 2m_4 L_3 l_4 \cos(-q_4) \right] \\ & + \ddot{q}_3 \left[I_2 + m_3 l_3^2 + m_3 L_2 l_3 \cos(-q_3) + I_4 + m_4 l_3^2 + m_4 l_4^2 + m_4 L_2 L_3 \cos(-q_3) \right. \\ & \left. + m_4 L_2 l_4 \cos(-q_3 - q_4) + 2m_4 L_3 l_4 \cos(-q_4) \right] \\ & + \ddot{q}_4 \left[I_4 + m_4 l_4^2 + m_4 L_2 l_4 \cos(-q_3 - q_4) + m_4 L_3 l_4 \cos(-q_4) \right] \\ & + \dot{q}_2 \dot{q}_3 \left[2m_3 L_2 l_3 \sin(-q_3) + 2m_4 L_2 L_3 \sin(-q_3) + 2m_4 L_2 l_4 \sin(-q_3 - q_4) \right] \\ & + \dot{q}_2 \dot{q}_4 \left[2m_4 L_2 l_4 \sin(-q_3 - q_4) + 2m_4 L_3 l_4 \sin(-q_4) \right] \\ & + \dot{q}_3 \dot{q}_4 \left[2m_4 L_2 l_3 \sin(-q_3 - q_4) + 2m_4 L_3 l_4 \sin(-q_4) \right] \\ & + \dot{q}_1^2 \left[m_2 l_2^2 S_2 C_2 + m_3 L_2^2 S_2 C_2 + m_3 l_3^2 S_{23} C_{23} + m_3 L_2 l_3 \sin(2q_2 + q_3) + m_4 L_2^2 S_2 C_2 \right. \\ & \left. + m_4 L_3^2 S_{23} C_{23} + m_4 l_4^2 S_{234} C_{234} + m_4 L_2 L_3 \sin(2q_2 + q_3) + m_4 L_2 l_4 \sin(2q_2 + q_3 + q_4) \right. \\ & \left. + m_4 L_3 l_4 \sin(2q_2 + 2q_3 + q_4) \right] \\ & + \dot{q}_3^2 \left[m_3 L_2 l_3 \sin(-q_3) + m_4 L_2 L_3 \sin(-q_3) + m_4 L_2 l_4 \sin(-q_3 - q_4) \right] \\ & + \dot{q}_4^2 \left[m_4 L_2 l_4 \sin(-q_3 - q_4) + m_4 L_3 l_4 \sin(-q_4) \right] \\ & + m_2 g l_2 C_2 + m_3 g (L_2 C_2 + l_3 C_{23}) + m_4 g (L_2 C_2 + L_3 C_{23} + l_4 C_{234}) \end{aligned}$$

3. Kola ait düz dinamik denklem ifadesi:

$$\begin{aligned}
\tau_3 = & \ddot{\theta}_2 \left[I_2 + m_3 l_3^2 + m_3 L_2 l_3 \cos(-\theta_3) + I_4 + m_4 L_3^2 + m_4 l_4^2 + m_4 L_2 L_3 \cos(-\theta_3) \right] \\
& + m_4 L_2 l_4 \cos(-\theta_3 - \theta_4) + 2m_4 L_3 l_4 \cos(-\theta_4) \\
& + \ddot{\theta}_3 \left[I_2 + m_3 l_3^2 + I_4 + m_4 L_3^2 + m_4 l_4^2 + 2m_4 L_3 l_4 \cos(-\theta_4) \right] \\
& + \ddot{\theta}_4 \left[I_4 + m_4 l_4^2 + m_4 L_3 l_4 \cos(-\theta_4) \right] \\
& + \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_4 \left[2m_4 L_3 l_4 \sin(-\theta_4) \right] + \dot{\theta}_3 \dot{\theta}_4 \left[2m_4 L_3 l_4 \sin(-\theta_4) \right] \\
& + \dot{\theta}_1^2 \left[m_3 l_3^2 S_{23} C_{23} + m_3 L_2 l_3 S_{23} C_2 + m_4 L_3^2 S_{23} C_{23} + m_4 l_4^2 S_{234} C_{234} + m_4 L_2 l_3 C_2 S_{23} \right. \\
& \left. + m_4 L_2 l_4 C_2 S_{234} + m_4 L_3 l_4 \sin(2\theta_2 + 2\theta_3 + \theta_4) \right] \\
& + \dot{\theta}_2^2 \left[-m_3 L_2 l_3 \sin(-\theta_3) - m_4 L_2 l_3 \sin(-\theta_3) - m_4 L_2 l_4 \sin(-\theta_3 - \theta_4) \right] \\
& + \dot{\theta}_3^2 \left[m_4 L_3 l_4 \sin(-\theta_4) \right] + m_3 g l_3 C_{23} + m_4 g (L_3 C_{23} + l_4 C_{234})
\end{aligned}$$

4. Kola ait düz dinamik denklem ifadesi:

$$\begin{aligned}
\tau_4 = & \ddot{\theta}_2 \left[I_4 + m_4 l_4^2 + m_4 L_2 l_4 \cos(-\theta_3 - \theta_4) + m_4 L_3 l_4 \cos(-\theta_4) \right] \\
& + \ddot{\theta}_3 \left[I_4 + m_4 l_4^2 + m_4 L_3 l_4 \cos(-\theta_4) \right] + \ddot{\theta}_4 \left[I_4 + m_4 l_4^2 \right] \\
& + \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 \left[-2m_4 L_3 l_4 \sin(-\theta_4) \right] \\
& + \dot{\theta}_1^2 \left[m_4 l_4^2 S_{234} C_{234} + m_4 L_2 l_4 C_2 S_{234} + m_4 L_3 l_4 C_{23} S_{234} \right] \\
& + \dot{\theta}_2^2 \left[-m_4 L_2 l_4 \sin(-\theta_3 - \theta_4) - m_4 L_3 l_4 \sin(-\theta_4) \right] \\
& + \dot{\theta}_3^2 \left[-m_4 L_3 l_4 \sin(-\theta_4) \right] + m_4 g l_4 C_{234}
\end{aligned}$$

Denklemlerin yazılması sırasında aşağıdaki kısaltmalardan yararlanılmıştır:

$$C_1 = \cos\theta_1, C_2 = \cos\theta_2, C_3 = \cos\theta_3, C_4 = \cos\theta_4$$

$$S_1 = \sin\theta_1, S_2 = \sin\theta_2, S_3 = \sin\theta_3, S_4 = \sin\theta_4$$

$$C_{23} = \cos(\theta_2 + \theta_3), C_{234} = \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)$$

$$S_{23} = \sin(\theta_2 + \theta_3), S_{234} = \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)$$

5.3.2. Manipülâtör dinamiğinin matris formunda yazılması

Dinamik ifadelerde karşılaşılan değışik türdeki normların, matris formda yazılarak kütle matrisi, merkezkaç ve Coriolis matrisi ve yer çekimi matrisi gibi kısımlara ayrılması mümkündür. Rijit yapılu bir robot manipülâtörüne ait dinamik denklemler, aşığıdaki gibi matris formunda yazılabilir:

$$\tau = M(q)\ddot{q} + H(q, \dot{q})\dot{q} + F(\dot{q}) + G(q) + \tau_d \quad (5.13)$$

Verilen ifade de;

$M(q)$: [nxn] boyutlu kütle matrisi,

$H(q, \dot{q})$: [nx1] boyutlu merkezkaç ve Coriolis matrisi,

$F(\dot{q})$: [nx1] boyutlu sürtünme matrisi,

$G(q)$: [nx1] boyutlu yerçekimi matrisi,

τ_d : Bozucu etkiler,

τ : Kontrol giriş torkudur.

$M(q)\ddot{q}$ ve $G(q)$ 'nin her bir elemanı, q 'ya bağıli karmaşık bir fonksiyondur. $H(q, \dot{q})\dot{q}$ 'nin her bir elemanı ise q ve \dot{q} 'nin her ikisine de bağıli karmaşık bir fonksiyondur [41].

Eklem değışkenlerini içeren $q(t)$ matrisi, [nx1] boyutlu bir matris olup dönel eklemler için eklem açılarını, kayar eklemler için ise eklem yer değıştirmelerini içerir. Bazı durumlarda robot dinamiğı Denklem 5.14'teki gibi kısaltılarak da yazılabilir.

$$\tau = M(q)\ddot{q} + N(q, \dot{q})\dot{q} + \tau_d \quad (5.14)$$

Bu durumda;

$$N(q, \dot{q})\dot{q} = H(q, \dot{q})\dot{q} + F(\dot{q}) + G(q) \quad (5.15)$$

yazılabilir. Denklem 5.15'te; $N(q, \dot{q})$ doğrusal olmayan bir vektörü temsil etmektedir.

Denklem 5.13'te verilen dinamik denklem yapısı, Lagrange esaslı bir sistem olması sebebiyle bazı temel özelliklere sahiptir. Bu özellikleri sayesinde robot kontrol problemlerini bir hayli kolaylaştırmaktadır. Bu özelliklerin başlıcaları bir sonraki bölümde verilecektir.

5.3.2.1. Robot kol dinamiğinin özellikleri

1. Atalet matrisi (kütle matrisi) $M(q)$ simetrik ve pozitif tanımlı olup bütün $q(t)$ değerleri için $\mu_1 I \leq M(q) \leq \mu_2 I$ olacak şekilde sınırlandırılmıştır. Dönel eklemler için bütün q_i değişkenleri, $\sin(q_i)$ ve $\cos(q_i)$ olarak işleme tabi tutulur. Kayar eklem içermeyen kollar için μ_1 ve μ_2 sabittir,
2. Merkezkaç ve Coriolis matrisi $V(q, \dot{q})$ kuadratik olup $\|H\dot{q}\| \leq v_b \|\dot{q}\|^2$ olacak şekilde sınırlandırılmıştır,
3. Coriolis matrisi her zaman $\dot{M}(q) - 2H(q, \dot{q})$ çarpık simetrik olacak şekilde seçilebilir. Bu durum, robot sistemindeki sürtünme kuvvetlerinin iş yapmamasından doğan bir neticedir,
4. Sürtünme kuvvetleri için yaklaşık bir $F(\dot{q}) = F_v \dot{q} + F_d(\times)$ formu geçerlidir. Burada F_v , viskoz sürtünmeyi temsil eden katsayılarından oluşan köşegen bir matris olup $F_d(\times)$ de $K_{d_i} \text{sgn}(\dot{q}_i)$ gibi ifadelerden oluşan bir vektördür ($\text{sgn}(\cdot)$ signum fonksiyonunu, K_{d_i} dinamik sürtünme katsayısını temsil etmektedir). Bu fonksiyon ifadeleri, v_B , k_B ifadeleri için $\|F(\dot{q})\| \leq v_B \|\dot{q}\| + k_B$ sınırlı olacak şekilde sınırlandırılmışlardır,

5. Yerçekimi vektörü $G(q)$, $\|G(q)\| \leq g_B$ olacak şekilde sınırlandırılmıştır. Dönel eklemler için bütün q_i eklem değişkenleri yalnızca $\sin(q_i)$ ve $\cos(q_i)$ işlemlerine tabi tutulur. Dönel eklemler için g_B sınırı sabit bir değerdir,
6. Bozucu etkiler, $\|\tau_d(t)\| \leq d$ olacak şekilde sınırlandırılmışlardır,
7. Lineer olmayan robot ifadeleri, kütle ve sürtünme parametrelerinde lineer olduklarından aşağıdaki ifadeyi yazmak mümkün olur:

$$M(q)\ddot{q} + H(q, \dot{q})\dot{q} + F(\dot{q}) + G(q) = W(q, \dot{q}, \ddot{q})\phi \quad (5.16)$$

Denklem 5.16'da verilen $W(q, \dot{q}, \ddot{q})$ ifadesi, bilinen robot fonksiyonlarından oluşan bir matris olup ϕ de çoğunlukla bilinmeyen kütle ve sürtünme katsayı parametrelerinden oluşan bir vektördür. Bu sebeple $W(\times)$ regresyon matrisinin herhangi bir robot tipi için elde edilmesi mümkündür.

Son olarak ele alınan 7. özellik, çoğunlukla adaptif kontrol yaklaşımlarında çok faydalıdır. Sınırlanma özellikleri ise dayanıklı kontrol yapılarında büyük kolaylık sağlamaktadır. Çarpık simetri ise özellikle Lyapunov kontrol ispatları için büyük önem arz eder. Bu da iyi hareket takibi sağlar ve çoğunlukla da kontrol çevrimlerinin yapısını verir. En önemlisi de, zamanla değişkenli robot dinamiği yapılarında kullanılmak üzere bazı işe yarar lineer sistem tekniklerinin kullanımına olanak vermesidir [55].

Elde edilen dinamik denklemlerin ileride gerçekleştirilecek olan simülasyon çalışmasında kullanılabilmesi ve kontrol yapısına uygun hale getirilebilmesi için durum uzay denklemlerine ihtiyaç vardır. Bunun için de dinamik denklemlerin ilk olarak matris formuna dönüştürülmesi gerekmektedir.

5.3.2.2. Kütle matrisinin oluşturulması

Dört eksenli robot koluna ait kütle (atalet) matrisinin açık ifadesi Denklem 5.17'deki gibidir.

$$M = \begin{bmatrix} M_{(1,1)} & M_{(1,2)} & M_{(1,3)} & M_{(1,4)} \\ M_{(2,1)} & M_{(2,2)} & M_{(2,3)} & M_{(2,4)} \\ M_{(3,1)} & M_{(3,2)} & M_{(3,3)} & M_{(3,4)} \\ M_{(4,1)} & M_{(4,2)} & M_{(4,3)} & M_{(4,4)} \end{bmatrix} \quad (5.17)$$

Her bir kolun ivme değerini içeren \ddot{q} matrisi Denklem 5.18'deki gibidir.

$$\ddot{q} = \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_3 \\ \ddot{\theta}_4 \end{bmatrix} \quad (5.18)$$

Daha önce de bahsedildiği gibi atalet matrisi köşegen ve simetrik bir matristir. Bu sebeple kütle matrisinin bileşenleri arasında $M(i,j)=M(j,i)$ eşitliği söz konusudur.

Atalet matrisinin bileşenleri aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned} M_{(1,1)} &= I_1 + m_2 l_2^2 + m_2 L_2^2 C_2^2 + m_3 l_3 C_{23}^2 + 2m_3 l_3 C_2 C_{23} + m_4 L_2^2 C_2^2 + m_4 L_3^2 C_{23}^2 + m_3 l_4^2 C_{234}^2 \\ &\quad + 2m_4 L_2 L_3 C_2 C_{23} + 2m_4 L_2 l_4 C_2 C_{234} + 2m_4 L_3 l_4 C_{23} C_{234} \\ M_{(2,2)} &= I_2 + m_2 l_2^2 + I_2 + m_3 L_2^2 + m_3 l_3^2 + 2m_3 L_2 l_3 \cos(-\theta_3) + I_4 + m_4 L_2^2 + m_4 L_3^2 + m_4 l_4^2 \\ &\quad + 2m_4 L_2 L_3 \cos(-\theta_3) + 2m_4 L_2 l_4 \cos(-\theta_3 - \theta_4) + 2m_4 L_3 l_4 \cos(-\theta_4) \\ M_{(2,3)} &= I_2 + m_3 l_3^2 + m_3 L_2 l_3 \cos(-\theta_3) + I_4 + m_4 l_3^2 + m_4 l_4^2 + m_4 L_2 L_3 \cos(-\theta_3) \\ &\quad + m_4 L_2 l_4 \cos(-\theta_3 - \theta_4) + 2m_4 L_3 l_4 \cos(-\theta_4) \\ M_{(2,4)} &= I_4 + m_4 l_4^2 + m_4 L_2 l_4 \cos(-\theta_3 - \theta_4) + m_4 L_3 l_4 \cos(-\theta_4) \\ M_{(3,2)} &= I_2 + m_3 l_3^2 + m_3 L_2 l_3 \cos(-\theta_3) + I_4 + m_4 L_3^2 + m_4 l_4^2 + m_4 L_2 L_3 \cos(-\theta_3) \\ &\quad + m_4 L_2 l_4 \cos(-\theta_3 - \theta_4) + 2m_4 L_3 l_4 \cos(-\theta_4) \\ M_{(3,3)} &= I_2 + m_3 l_3^2 + I_4 + m_4 L_3^2 + m_4 l_4^2 + 2m_4 L_3 l_4 \cos(-\theta_4) \\ M_{(3,4)} &= I_4 + m_4 l_4^2 + m_4 L_3 l_4 \cos(-\theta_4) \\ M_{(4,2)} &= I_4 + m_4 l_4^2 + m_4 L_2 l_4 \cos(-\theta_3 - \theta_4) + m_4 L_3 l_4 \cos(-\theta_4) \\ M_{(4,3)} &= I_4 + m_4 l_4^2 + m_4 L_3 l_4 \cos(-\theta_4) \\ M_{(4,4)} &= I_4 + m_4 l_4^2 \\ M_{(1,2)} &= 0 \end{aligned}$$

$$M_{(1,3)}=0$$

$$M_{(1,4)}=0$$

$$M_{(2,1)}=0$$

$$M_{(3,1)}=0$$

$$M_{(4,1)}=0$$

5.3.2.3. Merkezkaç ve Coriolis matrisinin oluşturulması

Dört eksenli robot koluna ait merkezkaç ve Coriolis matrisinin açık ifadesi Denklem 5.19'deki gibidir.

$$H = \begin{bmatrix} H_{(1,1)} & H_{(1,2)} & H_{(1,3)} & H_{(1,4)} \\ H_{(2,1)} & H_{(2,2)} & H_{(2,3)} & H_{(2,4)} \\ H_{(3,1)} & H_{(3,2)} & H_{(3,3)} & H_{(3,4)} \\ H_{(4,1)} & H_{(4,2)} & H_{(4,3)} & H_{(4,4)} \\ H_{(5,1)} & H_{(5,2)} & H_{(5,3)} & H_{(5,4)} \\ H_{(6,1)} & H_{(6,2)} & H_{(6,3)} & H_{(6,4)} \\ H_{(7,1)} & H_{(7,2)} & H_{(7,3)} & H_{(7,4)} \\ H_{(8,1)} & H_{(8,2)} & H_{(8,3)} & H_{(8,4)} \\ H_{(9,1)} & H_{(9,2)} & H_{(9,3)} & H_{(9,4)} \\ H_{(10,1)} & H_{(10,2)} & H_{(10,3)} & H_{(10,4)} \end{bmatrix}^T \quad (5.19)$$

$\dot{\theta}_i$ çarpımlarını karışık halde içeren \dot{q}_i vektörü Denklem 5.20'deki gibidir.

$$\dot{q} = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1^2 \\ \dot{\theta}_2^2 \\ \dot{\theta}_3^2 \\ \dot{\theta}_4^2 \\ \dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_1\dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_1\dot{\theta}_4 \\ \dot{\theta}_2\dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_2\dot{\theta}_4 \\ \dot{\theta}_3\dot{\theta}_4 \end{bmatrix} \quad (5.20)$$

H matrisinin bileşenleri ise aşağıdaki gibidir.

$$\begin{aligned} H_{(1,9)} = & -2m_2l_2^2S_2C_2 - 2m_3L_2S_2C_2 - 2m_3l_3^2S_{23}C_{23} - 2m_3L_2l_3\sin(2\theta_2 + \theta_3) \\ & - 2m_4L_2^2S_2C_2 - 2m_4L_3^2S_{23}C_{23} - 2m_4l_4^2S_{234}C_{234} - 2m_4L_2L_3\sin(2\theta_2 + \theta_3) \\ & - 2m_4L_2l_4\sin(2\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) - 2m_4L_3l_4\sin(2\theta_2 + 2\theta_3 + \theta_4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H_{(1,10)} = & -2m_3l_3^2S_{23}C_{23} - 2m_3L_2l_3S_{23}C_2 - 2m_4L_3^2S_{23}C_{23} - 2m_4l_4^2S_{234}C_{234} \\ & - 2m_4L_2L_3S_{23}C_2 - 2m_4L_2l_4S_{234}C_2 - 2m_4L_3l_4\sin(2\theta_2 + 2\theta_3 + \theta_4) \end{aligned}$$

$$H_{(1,11)} = -2m_4l_4^2S_{234}C_{234} - 2m_4L_2l_4S_{234}C_2 - 2m_4L_3l_4S_{234}C_{23}$$

$$\begin{aligned} H_{(2,5)} = & m_2l_2^2S_2C_2 + m_3L_2S_2C_2 + m_3l_3^2S_{23}C_{23} + m_3L_2l_3\sin(2\theta_2 + \theta_3) + m_4L_2^2S_2C_2 + m_4L_3^2S_{23}C_{23} \\ & + m_4l_4^2S_{234}C_{234} + m_4L_2L_3\sin(2\theta_2 + \theta_3) + m_4L_2l_4\sin(2\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \\ & + m_4L_3l_4\sin(2\theta_2 + 2\theta_3 + \theta_4) \end{aligned}$$

$$H_{(2,7)} = m_3L_2l_3\sin(-\theta_3) + m_4L_2L_3\sin(-\theta_3) + m_4L_2l_4\sin(-\theta_3 - \theta_4)$$

$$H_{(2,8)} = m_4L_2l_4\sin(-\theta_3 - \theta_4) + m_4L_3l_4\sin(-\theta_4)$$

$$H_{(2,12)} = 2m_3L_2l_3\sin(-\theta_3) + 2m_4L_2L_3\sin(-\theta_3) + 2m_4L_2l_4\sin(-\theta_3 - \theta_4)$$

$$H_{(2,13)} = 2m_4L_2l_4\sin(-\theta_3 - \theta_4) + 2m_4L_3l_4\sin(-\theta_4)$$

$$H_{(2,14)} = 2m_4L_2l_3\sin(-\theta_3 - \theta_4) + 2m_4L_3l_4\sin(-\theta_4)$$

$$\begin{aligned} H_{(3,5)} = & m_3l_3^2S_{23}C_{23} + m_3L_2l_3S_{23}C_2 + m_4L_3^2S_{23}C_{23} + m_4l_4^2S_{234}C_{234} + m_4L_2l_3C_2S_{23} \\ & + m_4L_2l_4C_2S_{234} + m_4L_3l_4\sin(2\theta_2 + 2\theta_3 + \theta_4) \end{aligned}$$

$$H_{(3,6)} = -m_3L_2l_3\sin(-\theta_3) - m_4L_2l_3\sin(-\theta_3) - m_4L_2l_4\sin(-\theta_3 - \theta_4)$$

$$H_{(3,7)} = m_4L_3l_4\sin(-\theta_4)$$

$$H_{(3,13)} = 2m_4L_3l_4\sin(-\theta_4)$$

$$H_{(3,14)} = 2m_4L_3l_4\sin(-\theta_4)$$

$$H_{(4,5)} = m_4l_4^2S_{234}C_{234} + m_4L_2l_4C_2S_{234} + m_4L_3l_4C_{23}S_{234}$$

$$H_{(4,6)} = -m_4L_2l_4\sin(-\theta_3 - \theta_4) - m_4L_3l_4\sin(-\theta_4)$$

$$H_{(4,7)} = -m_4L_3l_4\sin(-\theta_4)$$

$$H_{(4,12)} = -2m_4L_3l_4\sin(-\theta_4)$$

$$H_{(1,1)} = H_{(1,2)} = H_{(1,3)} = H_{(1,4)} = H_{(1,8)} = H_{(1,9)} = H_{(1,10)} = 0$$

$$\begin{aligned}
H_{(2,2)} &= H_{(2,5)} = H_{(2,6)} = H_{(2,7)} = 0 \\
H_{(3,1)} &= H_{(3,3)} = H_{(3,5)} = H_{(3,6)} = H_{(3,7)} = H_{(3,8)} = 0 \\
H_{(4,4)} &= H_{(4,5)} = H_{(4,6)} = H_{(4,7)} = H_{(4,9)} = H_{(4,10)} = 0
\end{aligned}$$

5.3.2.4. Sürtünme matrisinin oluşturulması

Dört eksenli robot koluna ait sürtünme matrisinin açık ifadesi aşağıdaki gibidir.

$$F = \begin{bmatrix} F_{(1,1)} \\ F_{(2,1)} \\ F_{(3,1)} \\ F_{(4,1)} \end{bmatrix} \quad (5.21)$$

Sürtünme matrisinin bileşenleri aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned}
F_{(1,1)} &= b_1 \dot{\theta}_1 \\
F_{(1,2)} &= b_2 \dot{\theta}_2 \\
F_{(1,3)} &= b_3 \dot{\theta}_3 \\
F_{(1,4)} &= b_4 \dot{\theta}_4
\end{aligned}$$

5.3.2.5. Yerçekimi matrisinin oluşturulması

Dört eksenli robot koluna ait yerçekimi matrisinin açık ifadesi aşağıdaki gibidir.

$$G = \begin{bmatrix} G_{(1,1)} \\ G_{(2,1)} \\ G_{(3,1)} \\ G_{(4,1)} \end{bmatrix} g \quad (5.22)$$

Yerçekimi matrisinin bileşenleri ise aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned}
G_{(1,1)} &= 0 \\
G_{(2,1)} &= m_2 g l_2 C_2 + m_3 g (L_2 C_2 + l_3 C_{23}) + m_4 g (L_2 C_2 + L_3 C_{23} + l_4 C_{234}) \\
G_{(3,1)} &= m_3 g l_3 C_{23} + m_4 g (L_3 C_{23} + l_4 C_{234})
\end{aligned}$$

$$G_{(4,1)} = m_4 g l_4 C_{234}$$

5.3.2.6. Tork ifadesinin yazılması

Robot kolunun belirli bir konumlanma anındaki konum, hız ve ivmesine bağlı olarak sisteme uygulanması gereken torku belirleyecek olan nihai ifade Denklem 5.23'te verilmiştir.

$$\tau = M\ddot{q} + H\dot{q} + F + G \quad (5.23)$$

$C = V\dot{q}$ olarak kısaltılırsa nihai düz dinamik ifadesi, Denklem 5.24'teki halini alır.

$$\tau = M\ddot{q} + C + F + G \quad (5.24)$$

5.3.3. Dört eksenli robot kolunun ters dinamik denklemleri

Ters Dinamik, robot kollarına uygulanan tork değerlerinden yola çıkarak uygulanan torku sağlayacak olan ivme, konum ve hız değerlerinin elde edilmesi işlemidir. İlk olarak bozucu etkileri göz ardı edecek şekilde Denklem 5.25'te verilen dinamik denklem ifadesini tekrar ele alarak basitleştirilmiş formda tekrar yazalım.

$$\tau = M\ddot{q} + H\dot{q} + F + G \quad (5.25)$$

Bu yapı bir matris formunda yazılmış olduğundan, ivme değerlerini içine alan \ddot{q} vektörünü elde etmek oldukça kolaydır. Eşitliğin her iki tarafından $H(q, \dot{q})\dot{q} + F(\dot{q}) + G(q)$ ifadesi çıkartılıp $M(q)\ddot{q}$ matrisi tek başına bırakılırsa,

$$M\ddot{q} = \tau - (H\dot{q} + F + G) \quad (5.26)$$

elde edilir. Denklem 5.26'da ifadenin her iki tarafı M^{-1} ile çarpılırsa,

$$\ddot{q}=M^{-1}(\tau-(H\dot{q}+F+G)) \quad (5.27)$$

elde edilir. $C=V\dot{q}$ olarak tekrar kısaltma yapılacak olursa, son ters dinamik ifade, Denklem 5.28'deki halini alacaktır.

$$\ddot{q}=M^{-1}(\tau-(C+F+G)) \quad (5.28)$$

Denklem 5.28, robot koluna ait ters dinamik ifadeyi teşkil etmektedir. \ddot{q} vektörü, robotun her bir robot koluna ait ivme değerlerini içerir. \dot{q} vektörünün bir kere integralinin alınmasıyla robot kolunun açısal hız değerleri; iki defa integralinin alınmasıyla da robot kolunun açısal konum değerleri elde edilir. Elde edilen bu değerler, simülasyon içerisinde geri besleme amacıyla kullanılacaktır.

Bir sonraki bölümde, simülasyon esnasında takibi gerçekleştirilecek olan yörüngeler planlanarak robot kolunun başlangıç ve son durumlardaki konfigürasyon durumları belirlenecektir. Tasarlanacak olan bu yörüngeler, kontrol yöntemlerinin farklı yörünge durumlarındaki performans değerlendirmelerinin gerçekleştirilebilmesi amacıyla kullanılacaktır.

BÖLÜM 6. ROBOT KONTROLÜ

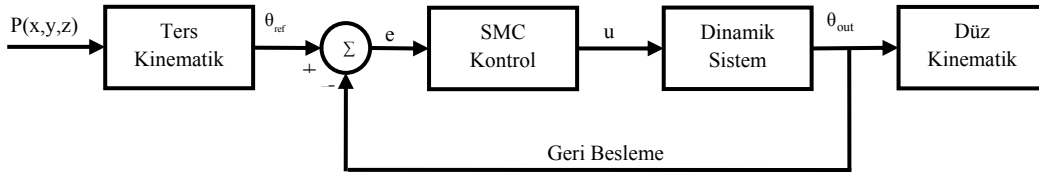
Bu bölümde, fiziksel özellikleri ve dinamik yapısı tanımlanan robot yapısının gerçek zamanlı hareket kontrolü ele alınacaktır. Robot yapıları, lineer olmayan karmaşık dinamik yapı özelliği taşıdığından dinamik yapılarının matematiksel türetimi ve kontrolü zordur. Ancak robotların, Lagrange esaslı dinamik sistemler sınıfına dâhil olmaları, kontrol yapılarını kolaylaştırıcı birkaç özelliği de beraberinde getirmektedir.

Robot kontrolü, son zamanlarda, üzerinde yoğun olarak araştırma, geliştirme ve üretim çalışmalarının gerçekleştirildiği bir alan olma özelliğini taşımaktadır. Endüstriyel robotlar temel olarak konumlandırma ve belirli nesnelere bir konumdan diğer bir konuma taşınmasında kullanılan robot tipleridir. Dolayısıyla endüstriyel robotlarda hareketin yanı sıra robot ile ortam arasında etkileşim halinde bulunan kuvvet ve torkların da iyi bir şekilde kontrol edilebilmesi istenir. Kontrol işlemi çoğunlukla robotların matematiksel yapılarının türetilmesini gerekli kılar. Bir robotun matematiksel modeli, robotun hareketini tanımlayan fiziksel kanunlardan yola çıkarak türetilir. Robot yapısına ait kinematik denklemler ve dinamik ifadeler sırasıyla 4. ve 5. bölümde çıkartılmıştır.

Bu bölümde, birbirinden farklı birkaç kontrol tekniği kullanılarak robotun gerçek zamanlı kontrol işlemi gerçekleştirilecektir. Önerilen kontrol yapıları, kayan kipli kontrol, yapay sinir ağları ve bulanık mantığın tekil veya birlikte kullanımını esas alarak tasarlanmıştır. Robot kolunun çalışma analizinin gerçekleştirilmesinde ise her üç kontrol yönteminin de birlikte kullanımından faydalanılmış ve elde edilen sonuçlar sekizinci bölümde değerlendirilmiştir.

6.1. Kayan Kipli Kontrol

Dayanıklı kontrol yapılarının en basitlerinden biri olan kayan kipli kontrol, Lyapunov kararlılık teoremi ve değişmezlik teoremine dayalı bir kontrol yapısıdır. Temelde bir durum uzay yaklaşımını ihtiva eder. Kontrol hedeflerine mutabık olarak, kayan kipli kontrol yapısı, bir kayma yüzeyi oluşturarak kontrol değişkenlerini veya durumlarını kayma yüzeyi üzerinde tutarak kontrol hedefine ulaşmaya çalışır. Kayma yüzeyi fonksiyonunun karesi, bir Lyapunov fonksiyonu işlevi görür. Modelin belirsizlikleri de göz önüne alınarak bazı parametreler dikkatlice seçilir ve bu sayede kayma yüzeyi değişken olmayan bir yapı özelliği kazanır. Kayan kipli kontrolün en öne çıkan dezavantajı, süreksizlik özelliği taşıyan kontrol kuralına bağlı olarak açığa çıkan “çatırtı” problemidir. Gerçek sistem uygulamalarında bu durum, yüksek kontrol aktivitelerini kapsayacağından ve ileride istenmeyen yüksek frekanslı dinamiksel durumlara yol açabileceğinden, çatırtı istenmeyen bir durumdur [56-64]. Kayan kipli kontrol yapısının blok şeması Şekil 6.1’de verilmiştir.



Şekil 6.1. Kayan kipli kontrol şeması

6.1.1. Kayan kipli kontrol yapısı

Doğrusal olmayan sistemlerin değişken yapıli kontrol uygulamaların da, çoğunlukla temel olarak hatanın belirli bir anahtarlama veya kayma yüzeyine ulaşacak şekilde zorlanmasına ihtiyaç duyulur. Çünkü sistem kayma moduna girdiği andan itibaren herhangi bir modelleme belirsizliğinden veya dış etkenlerden etkilenmeyecektir [57].

6.1.1.1. Sistem parametreleri

Denklem 6.1’de verildiği gibi doğrusal olmayan, çok girişli ve çok çıkışlı bir sistem yapısı,

$$\dot{x}_i^{k_i} = f_i(X) + \sum_{j=1}^m b_{ij} u_j \quad (6.1)$$

ifade edilir. Burada; $x_i^{k_i}$, x_i 'nin k_i 'inci türevini ifade etmektedir. u_j bileşenlerinden oluşan U vektörü de kontrol giriş vektörüdür. X vektörü ise x_i bileşenlerinden ve bunların ilk k_i-1 türevinden oluşur [58].

Kayan kipli kontrol yapısı, durum uzayı esaslı bir kontrol yapısı olduğundan, robot koluna ait dinamik ifadeler, Denklem 5.28'den yola çıkılarak durum uzay denklemi şeklinde,

$$\dot{X}(t) = F(X) + BU(t) \quad (6.2)$$

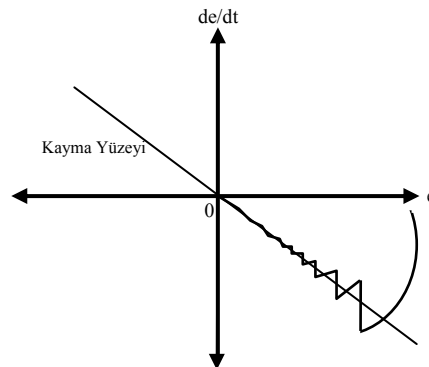
yazılabilir. Burada; $X [nx1]$ boyutlu bir vektör olup, $B [nxn]$ boyutlu bir katsayı matrisi olma özelliği taşır.

6.1.1.2. Kayma yüzeyinin belirlenmesi

Denklem 6.2'de verilen durum uzay sistemi için kayma yüzeyi,

$$S(t) = GE(t) \quad (6.3)$$

ifade edilir. Burada; S kayma yüzeyi genellikle $[mx1]$ boyutundadır.



Şekil 6.2. Kayma Yüzeyi

Sistemin hata denklemi, arzu edilen referans konum değerlerinden sistemin anlık konum değerlerinin çıkartılmasıyla elde edilebilir.

$$E(t) = X_d(t) - X(t) \quad (6.4)$$

Bu durumda kayma yüzeyi ifadesi,

$$S(t) = \phi(t) - S_a(X) \quad (6.5)$$

halini alır. Verilen ifadede,

$$\phi(t) = GX_d(t) \text{ ve } S_a(X) = GX(t) \quad (6.6)$$

olarak belirtilir. Denklem 6.6'da verilen $\phi(t)$ ve $S_a(X)$, sırasıyla zamana ve duruma bağlı kısımları simgelemektedirler. G matrisi ise kayma yüzeyine ait eğimleri içeren $[m \times n]$ boyutlu bir matristir.

Denklem 6.3 açılarak aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$S_i = \lambda_i E_i + \dot{E}_i \quad (6.7)$$

Burada; E $[m \times 1]$ boyutlu hata vektörüdür. λ_i ise G matrisinin eğim bileşenleridirler.

Bu durumda G matrisi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$G = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_4 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.8)$$

Kayan kipli kontrolün temel amacı, sistemin durumlarını kayma yüzeyi üzerinde kalmaya zorlamaktır. Sistemin durumları kayma yüzeyine ulaştığı andan itibaren sistem hataları, G matrisi yardımıyla hata dinamiğinde sıfıra ulaşır.

6.1.1.3. Lyapunov kararlılık ifadesi

Bu çalışmada matematiksel yapısı tanımlanan kayan kipli kontrol yapısı, Lyapunov yaklaşımını esas almaktadır. Sistemi dengeye getirecek olan kontrol yapısı, Lyapunov fonksiyonunun gereksinimlerini yerine getirebilecek şekilde tasarlanmalıdır. Lyapunov fonksiyonu aşağıdaki gibi seçilmiştir.

$$V(S) = \frac{S^T S}{2} \quad (6.9)$$

Kararlılığın sağlanabilmesi için Lyapunov ifadesinin Denklem 6.10 ve 6.11’de verilen şartları sağlaması gerekmektedir.

$$V(S) = \frac{S^T S}{2} > 0 \quad (6.10)$$

$$\frac{dV(S)}{dt} = \frac{\dot{S}^T S}{2} + \frac{S^T \dot{S}}{2} \leq 0 \quad (6.11)$$

Bu şartların sağlanması halinde Lyapunov fonksiyonu pozitif tanımlı, türevi ise negatif tanımlı olacaktır. Bu şart, Denklem 6.12’nin uygulanması ile sağlanabilir.

$$\frac{dV(S)}{dt} = -S^T D \operatorname{sgn}(S) \quad (6.12)$$

Verilen ifadedeki D matrisi, [m x m] boyutlu, pozitif tanımlı bir köşegen matris olup, $\operatorname{sgn}(S)$ de her bir S için uygulanan bir signum fonksiyonunu ifade eder.

$$\text{sgn}(S_i) = \begin{cases} +1, & S_i > 0 \\ -1, & S_i < 0 \end{cases} \quad (6.13)$$

Denklem 6.5 ve Denklem 6.12'den, sistem ifadesi kullanılarak Denklem 6.5'te verilen ifadenin türevi alınır,

$$\frac{dS}{dt} = \frac{d\phi}{dt} - \frac{\partial S_a}{\partial X} \frac{dX}{dt} \quad (6.14)$$

$$\frac{d\phi}{dt} - G[F(X) + BU] \quad (6.15)$$

ifadesi elde edilir. Denklem 6.15, Denklem 6.14'te yerine konursa kontrol giriş sinyali aşağıdaki halini alır.

$$U(t) = U_{eq}(t) + U_c(t) \quad (6.16)$$

Buradaki U_{eq} ifadesi eşdeğer kontrol kuvvetini temsil etmekte olup Denklem 6.17'deki gibi verilmektedir.

$$U_{eq}(t) = -(GB)^{-1} \left[GF(X) - \frac{d\phi(t)}{dt} \right] \quad (6.17)$$

Eşdeğer kuvvet, sistemi kayma yüzeyi üzerinde tutacak olan kuvvettir. Ancak, sistemi kayma düzlemine taşıyacak olan düzeltici bir kuvvete de ihtiyaç duyulmaktadır. Bu kuvvet, Denklem 6.18'deki gibi ifade edilebilir.

$$U_c(t) = [GB]^{-1} D \text{sgn}(S)$$

$$U_c(t) = [K] \text{sgn}(S) \quad (6.18)$$

6.1.1.4. Eşdeğer kontrol kuvvetinin kestirimi

Eşdeğer kontrol kuvvetinin, toplam kuvvetin ortalaması olarak kabul edildiği görüşünden yola çıkılarak alçak gerilimli bir filtre yardımıyla eşdeğer kontrol kuvveti Denklem 6.19'daki gibi ifade edilebilir:

$$\hat{U}_{eq} = \frac{1}{\tau S + 1} U \quad (6.19)$$

Bu durumda kontrol işareti Denklem 6.20'deki gibi olur.

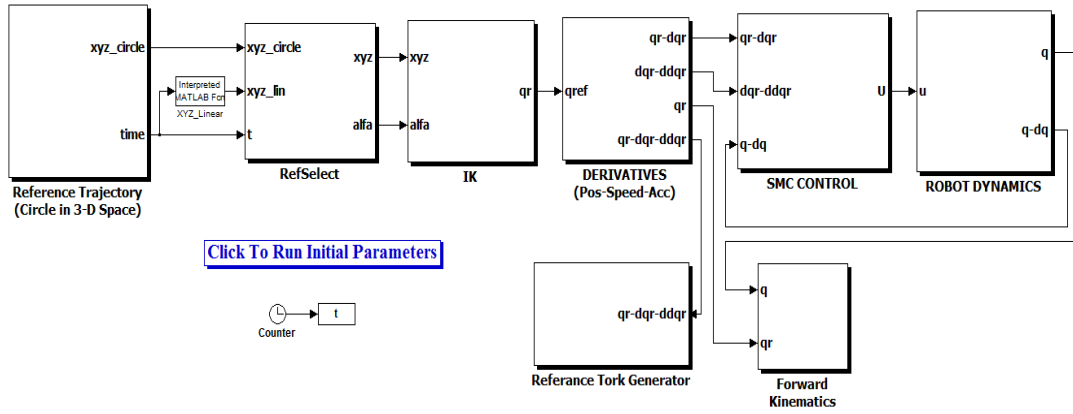
$$U = \hat{U}_{eq} + [K] \text{sgn}(S) \quad (6.20)$$

Denklem 6.20'deki signum fonksiyonu, süreksizliğe sebep olan bir davranış sergiler. Bu durum, sistem davranışlarında istenmeyen çattırtıların oluşmasına neden olur. Bunu önlemek için signum fonksiyonu elimine edilerek kontrol işareti aşağıdaki gibi elde edilir [58, 59].

$$U = \hat{U}_{eq} + [K] S \quad (6.21)$$

6.1.2. Kayan kipli kontrolün dört eksenli robot koluna uygulanması

Şekil 6.3'te, dört eksenli robot yapısı için tasarlanmış olan kontrol yapısına ait blok diyagramı gösterilmiştir. Dört eksenli robota ait kayan kipli kontrol yapısının uygulanabilmesi için öncelikle robot kolunun dinamik davranışını ifade eden denklemlerin, durum uzayı formunda yazılmasına ihtiyaç duyulur. Bunun için ilk olarak Denklem 5.28'de verilen ters dinamik ifadeden yola çıkılarak sistemin ters dinamik ifadesinin Denklem 6.2'deki formda yazılması gerekmektedir.



Şekil 6.3. Dört eksenli robot kolu için tasarlanan kayan kipli kontrol yapısına ait Simulink blok diyagramı.

Kayan kipli kontrol yapısı için öngörülen durum uzayı denkleminin yazılmadan önce sistemin durumu,

$$X = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \\ \dot{X}_3 \\ \dot{X}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \\ \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_4 \end{bmatrix} \quad (6.22)$$

ifade edilir. Bu durumda \dot{X} vektörü,

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \\ \dot{X}_3 \\ \dot{X}_4 \\ \ddot{X}_1 \\ \ddot{X}_2 \\ \ddot{X}_3 \\ \ddot{X}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_4 \\ \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_3 \\ \ddot{\theta}_4 \end{bmatrix} \quad (6.23)$$

olarak elde edilir. Vektörün son dört bileşeni, her bir kol açısına ait ivmenin bileşenlerini ifade etmektedir. Dinamik ifadelerden de hatırlanacağı gibi ivme, tork değerlerinin giriş olarak verildiği ters dinamik denklemlerden türetilmektedir.

Dört serbestlik dereceli robot sisteminin Denklem 5.28'de verilen ters dinamik ifadesini,

$$\ddot{q} = M^{-1} (\tau - (C+F+G)) \quad (6.24)$$

tekrar göz önüne alınarak, sistemin durum uzayı matrisinin açılımı,

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_4 \\ \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_3 \\ \ddot{\theta}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1(X) \\ F_2(X) \\ F_3(X) \\ F_4(X) \\ F_5(X) \\ F_6(X) \\ F_7(X) \\ F_8(X) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ B_{51} & B_{52} & B_{53} & B_{54} \\ B_{61} & B_{62} & B_{63} & B_{64} \\ B_{71} & B_{72} & B_{73} & B_{74} \\ B_{81} & B_{82} & B_{83} & B_{84} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} \quad (6.25)$$

ifade edilir. Denklem 6.24'de verilen ters dinamik ifadesinde tork ifadesi ortak çarpan parantezine alınır,

$$\ddot{q} = M^{-1} \tau - M^{-1} (C+F+G) = M^{-1} \tau - \hat{W} \quad (6.26)$$

ile gösterilebilir. Burada; $\hat{W} = M^{-1} (C+F+G)$ olarak kısaltılmış olup $[m \times 1]$ boyutlu bir vektördür. $F(X)$ matrisinin bileşenleri aşağıdaki gibidir.

$$F_1(X) = \dot{\theta}_1$$

$$F_2(X) = \dot{\theta}_2$$

$$F_3(X) = \dot{\theta}_3$$

$$F_4(X) = \dot{\theta}_4$$

$$F_5(X) = -\hat{W}_1$$

$$F_6(X) = -\hat{W}_2$$

$$F_7(X) = -\hat{W}_3$$

$$F_8(X) = -\hat{W}_4$$

B matrisinin bileşenleri ise,

$$B_{51} = M_{11}^{-1} \tau_1$$

$$B_{52} = M_{12}^{-1} \tau_2$$

$$B_{53} = M_{13}^{-1} \tau_3$$

$$B_{54} = M_{14}^{-1} \tau_4$$

$$B_{61} = M_{21}^{-1} \tau_1$$

$$B_{62} = M_{22}^{-1} \tau_2$$

$$B_{63} = M_{23}^{-1} \tau_3$$

$$B_{64} = M_{24}^{-1} \tau_4$$

$$B_{71} = M_{31}^{-1} \tau_1$$

$$B_{72} = M_{32}^{-1} \tau_2$$

$$B_{73} = M_{33}^{-1} \tau_3$$

$$B_{74} = M_{34}^{-1} \tau_4$$

$$B_{81} = M_{41}^{-1} \tau_1$$

$$B_{82} = M_{42}^{-1} \tau_2$$

$$B_{83} = M_{43}^{-1} \tau_3$$

$$B_{84} = M_{44}^{-1} \tau_4$$

şeklinde gösterilebilir.

Kayan kipli kontrol yapısı, gerçekleştirilecek olan gerçek zamanlı farklı kontrol yapılarında, temel kontrol yapısı olarak görev yapacaktır. Kayan kipli kontrol yapısında kazan katsayılarının bulunduğu matrislerin (G,D) parametre tayinleri (λ_i, ψ_i) için ise farklı kontrol yöntemleri öngörülebilecektir. Bu kontrol yöntemleri temel olarak yapay sinir ağları ve bulanık mantık kontrol yapılarının birer karışımı şeklinde sunulacaktır.

Bir sonraki bölümde, yapay sinir ağlarının genel tanımı ve yapay sinir ağları ile dört eksenli robotun gerçek zamanlı kontrolü üzerinde durulacaktır.

6.2. Yapay Sinir Ağı Kontrolü

Yapay sinir ağları dinamik sistemlerin modellenmesi için kullanıldığından beri, mühendislikte aktif bir araştırma konusu haline gelmiştir [60]. Yapay sinir ağlarının büyük bir kısmı sadece statik işlem kabiliyetlerine sahiptirler [61]. Ancak yapay sinir ağları kontrol amaçlı olarak kullanıldıkları zaman, dinamik yapılara uyum sağlayabilmelidirler. Bu sebeple dinamik yapay sinir ağlarının türetilmesine ihtiyaç duyulmaktadır [62]. Her ne kadar dinamik yapay sinir ağları karmaşık dinamiklerin öğrenilmesinde çok etkili olsalar da, sinir ağının genişliği (nöronlar ve ağırlıklar açısından) çok büyük olabilir. Dinamik yapay sinir ağlarında ise ağın genişliği daha da fazladır. Bu durum, uyarlanabilir parametrelerin öğrenilmesi esnasında çok güçlü hesaplama cihazlarına ihtiyaç duyulmasına yol açmaktadır [63].

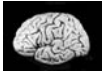

6.2.1. Biyolojik sinir ağları

6.2.1.1. Beynin süreç işleme yapısı

İnsan beyni 10 milyar sinir hücresi veya nöron içerir. Ortalama olarak her bir nöron diğer nöronlara 10 bin sinaps vasıtasıyla bağlanır. Beynin nöronlardan oluşan bu ağ yapısı, çok büyük bir bilgi işleme sistemini oluşturur. Bu durum, bir dizi bilgiyi işleyen geleneksel bilgisayarlardaki tekdüze işlemci yapısı ile tezatlık gösterir.

- Buna karşılık olarak, her bir temel işlemin gerçekleşmesi için geçen zamanı göz önüne alırsak; nöronlar genel olarak maksimum 100 Hz hızda hareket ederken, geleneksel standart bir işlemci, saniyede birkaç yüz milyon makine seviye işlemi gerçekleştirir. Beyin her ne kadar yavaş bir donanım yapısına sahip olsa da tamamen kendine has yeteneklere sahiptir:
- Kısmi hasar durumlarında beyin performansı dereceli olarak düşüş gösterir, buna karşılık çoğu program ve mühendislik sistemleri çok hassas ve kırılğındırlar. Rastgele bir parça söküp alındığında, netice bütün sistemi etkiler.
- Beyin kendi kendine tecrübelerden öğrenebilir ve kendini organize edebilir. Bu demektir ki beyinin sağlıklı kısımları, yaralanan kısımların işlevlerini yerine getirebilirse, yaralanmalardan dolayı oluşan aksaklıklar kısmi olarak iyileştirilebilir.
- İnsan beyni çok fazla sayıda paralel hesaplama gerçekleştirir. Örneğin, karmaşık görsel algılama işlemi 10 ms'den daha kısa zamanda, 10 süreç işleme adımında gerçekleşir.
- Zekâmızı ve kendisel farkındalığımızı destekler (bunun nasıl gerçekleştiğini ise henüz kimse tam olarak bilemiyor).

Tablo 6.1. Beyin ile işlemcinin süreç işleme performans değerleri.

| | İşlemdeki eleman | Element boyutu | Enerji kullanımı | İşleme hızı | Hesaplama türü | Hata toleransı | Öğrenme | Zeki, bilinçli |
|---|----------------------------|--------------------|------------------|--------------------|---------------------|----------------|---------|----------------|
|  | 10 ¹⁴ sinaps | 10 ⁻⁶ m | 30 W | 100 Hz | Paralel, dağıtılmış | Evet | Evet | Genel olarak |
|  | 10 ⁸ transistör | 10 ⁻⁶ m | 30 W (CPU) | 10 ⁹ Hz | Seri, merkezi | Hayır | Biraz | Henüz değil |

6.2.1.2. Beyindeki sinir ağları

Beyin homojen değildir. En geniş anatomik ölçekte korteks, orta beyin, beyin sapı ve beyincik ayırt edilebilir. Bunların her biri hiyerarşik olarak birçok bölgeye ayrılabilir. Bu bölgeler de anatomik yapısına göre, içerdiği ağ yapısına göre veya gerçekleştirdiği fonksiyona göre birçok alana ayrılabilir.

Bu alanlar arasındaki sinirsel bağlantı çıkışlarının genel dağılımı çok karmaşıktır ve kısmen bilinmemektedir. Beyinde en iyi ve en geniş şekilde görüntülenebilen sistem, görme sistemi olup ilk 10 veya 11 işleme kademesi şu ana kadar tanımlanabilmiştir. Ön kademelerden çıkarak bir sonraki kademelere ulaşan ileri beslemeli ağ çıkışları ve ters yöne doğru giden geri besleme bağlantıları ayırt edilebilmiştir.

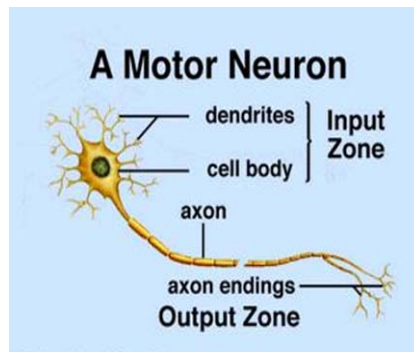
Bu uzun süreçli bağlantılara ek olarak nöronlar, binlerce komşuları ile bağlantılı haldedirler. Bu sayede çok yoğun, karmaşık yerel ağlar oluşturabilmektedirler.

6.2.1.3. Nöronlar ve sinapslar

Sinir sistemindeki temel hesaplama birimi sinir hücresi (nöron) dur. Bir sinir hücresi aşağıdaki temel birimleri içerir:

- Dendritler (girişler)
- Hücre yapısı
- Aksonlar (çıkışlar)

Her bir nöron, diğer nöronlardan bilgi alır. Girişler belirli bir kritik değerini aştıklarında ise nöron bir tepki açığa çıkararak sinir hücresinden aksonlara doğru ve oradan da diğer nöronlara doğru hareket eden bir elektrik sinyali üretir. Bu tepki işlemine depolarizasyon adı verilir ve nöronun sinyal üretmediği durumlarda refraktör periyodu tarafından takip edilir.

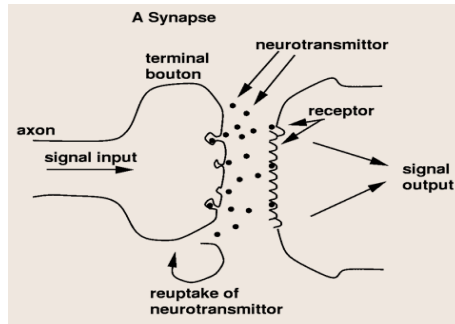


Şekil 6.4. Biyolojik sinir hücresi yapısı.

Her bir nörona ait akson uçları, bir sonraki nöronun dendritlerine veya hücre yapısına neredeyse degecek bir yakınlıkta bulunur. Bir elektrik sinyalinin akson uçları vasıtasıyla bir nörondan diğer bir nörona iletilmesi, nörotransmitter adı verilen ve ilk nörondan salınarak ikinci nörondaki alıcılara bağlanan kimyasallar tarafından etkilenir. Bu bağlantıya sinaps adı verilir. Bir nörondan diğer bir nörona elektrik sinyalinin geğtiği uzantı, mevcut nörotransmitter sayısı, alıcı dağılımı ve tekrar absorbe edilen nörotransmitter sayısı gibi birçok etkene bağlıdır.

6.2.1.4. Sinaptik öğrenme

Beyin sürekli olarak öğrenir. Öğrenme yöntemlerinden biri, nöronlar arasındaki ağırlıkların değiştirilmesi ve nöronlar arasındaki bağlantı sayısının artması veya azaltılması şeklindedir. Bununla beraber, tecrübeye bağlı olarak da öğrenebilir. Tecrübeye dayalı olan ve herhangi bir öğretmen yardımı olmaksızın gerçekteşen bu öğrenme işleminin, “on-line” olarak gerçekteşen bir öğrenme çeşididir.



Şekil 6.5. Sinapsın yapısı.

Bir sinapsın verimlilik durumu tecrübeye bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Bu durum hafızayı arttırarak öğrenme olayının gerçekteşmesini sağlar. Bunu gerçekteşirmenin bir yolu da daha fazla nörotransmitterin salınımıdır. Diğer birçok değişik neden öne sürmek de mümkündür [64].

6.2.2. Yapay sinir ağları

Genel anlamda YSA, beynin bir işlevi yerine getirme yöntemini modellemek için tasarlanan bir sistem olarak tanımlanabilir. YSA, yapay sinir hücrelerinin birbirleri

ile çeşitli şekillerde bağlanmasından oluşur ve genellikle katmanlar şeklinde düzenlenir. Donanım olarak elektronik devrelerle ya da bilgisayarlarda yazılım olarak gerçekleştirilebilir. Beynin bilgi işleme yöntemine uygun olarak YSA, bir öğrenme sürecinden sonra bilgiyi toplama, hücreler arasındaki bağlantı ağırlıkları ile bu bilgiyi saklama ve genelleme yeteneğine sahip paralel dağılmış bir işlemcidir. Öğrenme süreci, arzu edilen amaca ulaşmak için YSA ağırlıklarının yenilenmesini sağlayan öğrenme algoritmalarını ihtiva eder [65].

YSA' nın hesaplama ve bilgi işleme gücünü, paralel dağılmış yapısından, öğrenebilme ve genelleme yeteneğinden aldığı söylenebilir. Genelleme, eğitim ya da öğrenme sürecinde karşılaşılmayan girişler için de YSA' nın uygun tepkileri üretmesi olarak tanımlanır. Bu üstün özellikleri, YSA' nın karmaşık problemleri çözebilme yeteneğini gösterir. Günümüzde birçok bilim alanında YSA, aşağıdaki özellikleri nedeniyle etkin olmuş ve uygulama yeri bulmuştur. YSA' nın temel işlem elemanı olan hücre doğrusal değildir. Dolayısıyla hücrelerin birleşmesinden meydana gelen YSA da doğrusal değildir ve bu özellik bütün ağa yayılmış durumdadır. Bu özelliği ile YSA, doğrusal olmayan karmaşık problemlerin çözümünde en önemli araç olmuştur. YSA' nın arzu edilen davranışı gösterebilmesi için amaca uygun olarak ayarlanması gerekir. Bu, hücreler arasında doğru bağlantıların yapılması ve bağlantıların uygun ağırlıklara sahip olmasını gerektirir. Bu nedenle YSA, istenen davranışı gösterecek şekilde ilgilendiği problemde aldığı eğitim örneklerini kullanarak problemi öğrenmelidir. YSA, ilgilendiği problemi öğrendikten sonra eğitim sırasında karşılaşmadığı test örnekleri için de arzu edilen tepkiyi üretebilir. Belirli bir problemi çözmek amacıyla eğitilen YSA, problemdeki değişimlere göre tekrar eğitilebilir, değişimler devamlı ise gerçek zamanda da eğitime devam edilebilir [66].

6.2.2.1. Yapay sinir ağlarının uygulama alanları

Son yıllarda YSA' ları, özellikle günümüze kadar çözümü güç ve karmaşık olan ya da ekonomik olmayan çok farklı alanlardaki problemlerin çözümünde uygulanmış ve genellikle başarılı sonuçlar alınabilmiştir. YSA' ları çok farklı alanlara

uygulanabildiğinden bütün uygulama alanlarını burada sıralamak zor olmakla birlikte, genel olarak aşağıdaki gibi 6 grup içerisinde toplanabilir.

Arıza analizi ve tespiti: Bir sistemin, cihazın ya da elemanın düzenli (doğru) çalışma şeklini öğrenen bir YSA yardımıyla bu sistemlerde meydana gelebilecek arızaların tanımlanma olanağı vardır. Bu amaçla YSA; elektrik makinelerinin, uçakların yada bileşenlerinin, entegre devrelerin v.s. arıza analizinde kullanılmıştır.

Tıp alanında: EEG ve ECG gibi tıbbi sinyallerin analizi, kanserli hücrelerin analizi, protez tasarımı, transplantasyon zamanlarının optimizasyonu ve hastanelerde giderlerin optimizasyonu v.s gibi uygulama yeri bulmuştur.

Savunma sanayi: Silahların otomasyonu ve hedef izleme, nesnelere/görüntüleri ayırma ve tanıma, yeni algılayıcı tasarımı ve gürültü önleme v.s gibi alanlara uygulanmıştır.

Haberleşme: Görüntü ve veri sıkıştırma, otomatik bilgi sunma servisleri, konuşmaların gerçek zamanda çevirisi v.s gibi alanlarda uygulama örnekleri vardır.

Üretim: Üretim sistemlerinin optimizasyonu, ürün analizi ve tasarımı, ürünlerin (entegre, kağıt, kaynak v.s.) kalite analizi ve kontrolü, planlama ve yönetim analizi v.s. alanlarına uygulanmıştır.

Otomasyon ve kontrol: Uçaklarda otomatik pilot sistemi otomasyonu, ulaşım araçlarında otomatik yol bulma/gösterme, robot sistemlerin kontrolü, doğrusal olmayan sistem modelleme ve kontrolü, elektrikli sürücü sistemlerin kontrolü v.s. gibi yaygın bir uygulama yeri bulmuştur.

6.2.2.2. Yapay sinir ağlarında öğrenme algoritmaları

Öğrenme; gözlem, eğitim ve hareketin doğal yapıda meydana getirdiği davranış değişikliği olarak tanımlanmaktadır. O halde, birtakım metot ve kurallar, gözlem ve eğitime göre ağıdaki ağırlıkların değiştirilmesi sağlanmalıdır. Bunun için genel olarak

üç öğrenme metodundan ve bunların uygulandığı değişik öğrenme kurallarından söz edilebilir.

6.2.2.2.1. Danışmanlı öğrenme

Bu tip öğrenmede, YSA'na örnek olarak bir doğru çıkış verilir. İstenilen ve gerçek çıktı arasındaki farka (hataya) göre nöronlar arası bağlantıların ağırlığını en uygun çıkışı elde etmek için sonradan düzenlenebilir. Bu sebeple danışmanlı öğrenme algoritmasının bir “öğretmene” veya “danışmana” ihtiyacı vardır.

6.2.2.2.2. Danışmansız öğrenme

Girişe verilen örnekten elde edilen çıkış bilgisine göre ağ sınıflandırma kurallarını kendi kendine geliştirmektedir. Bu öğrenme algoritmalarında, istenilen çıkış değerinin bilinmesine gerek yoktur. Öğrenme süresince sadece giriş bilgileri verilir. Ağ daha sonra bağlantı ağırlıklarını aynı özellikleri gösteren desenler oluşturmak üzere ayarlar.

6.2.2.2.3. Takviyeli öğrenme

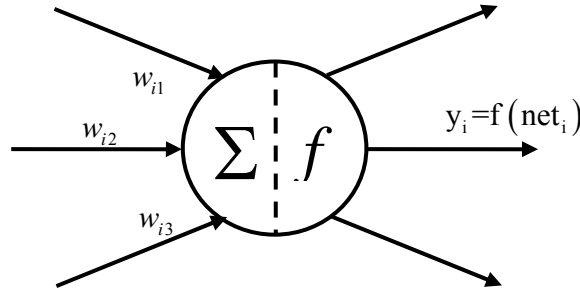
Bu öğrenme kuralı danışmanlı öğrenmeye yakın bir metottur. Denetimsiz öğrenme algoritması, istenilen çıkışın bilinmesine gerek duymaz. Hedef çıktıyı vermek için bir “öğretmen” yerine, burada YSA'na bir çıkış verilmemekte fakat elde edilen çıkışın verilen girişe karşılık iyiliğini değerlendiren bir kriter kullanılmaktadır [65].

6.2.3. Yapay nöron modeli

Nöronlar, yapay sinir ağlarının en temel hesaplama elemanlarıdır. Her bir nöron, diğer birimlerden veya dış kaynaklardan bilgi alır. Her bir giriş de belirli bir w_i ağırlık değerine sahiptir ve sinaptik öğrenmenin modellenmesi için değiştirilebilir. Her bir nöron birimi girişlerin ağırlıklandırılmış toplamlarına ait bir f fonksiyonunu hesaplar. Her bir nöron çıkış değeri, bir sonraki nöron için giriş değeri olarak görev yapar.

$$y_i = f\left(\sum_j w_{ij} y_j\right) \quad (6.27)$$

Verilen ifade, ağırlıklandırılmış toplam olup i 'inci birimin (nöronun) net girişi olarak adlandırılır ve çoğunlukla net_i olarak yazılır. Burada dikkat edilmelidir ki, w_{ij} ifadesi, j 'inci birimden çıkıp i 'inci birime giren ağırlığı ifade eder. f fonksiyonu, nörona ait aktivasyon fonksiyonudur. En basit durumda f , tanımlama fonksiyonu olur ve böyle bir durumda nöron çıkışı, nöron girişinin kendisidir. Bu durumda nöron lineer bir birim halini alır [67].



Şekil 6.6. Basit bir yapay sinir hücresi modeli.

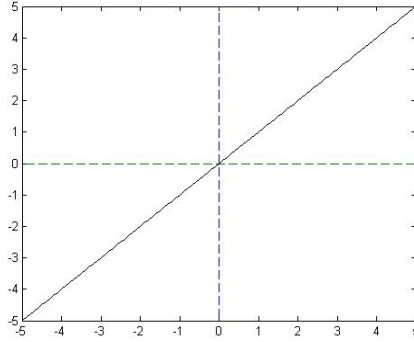
6.2.3.1. Aktivasyon fonksiyonları

Aktivasyon fonksiyonu, birleştirme fonksiyonundan elde edilen net girdiyi bir işlemde geçirerek hücre çıktısını belirleyen ve genellikle doğrusal olmayan bir fonksiyondur. Hücre modellerinde, hücrenin gerçekleştireceği işleve göre çeşitli tipte aktivasyon fonksiyonları kullanılabilir. Aktivasyon fonksiyonları sabit parametrelili ya da uyarlanabilir parametrelili seçilebilir. En uygun aktivasyon fonksiyonu tasarımcının denemeleri sonucunda belli olur. Temel olarak yapay sinir ağlarında kullanılan aktivasyon fonksiyonları aşağıda verilmiştir.

6.2.3.2. Tanımlama fonksiyonu

Tanımlama fonksiyonları lineer fonksiyonlar olduklarından nöronun çıkış değeri, nöronun giriş değeri ile aynıdır ve Denklem 6.28'deki gibi bir cebirsel ifadesi vardır.

$$f(x)=x \quad (6.28)$$



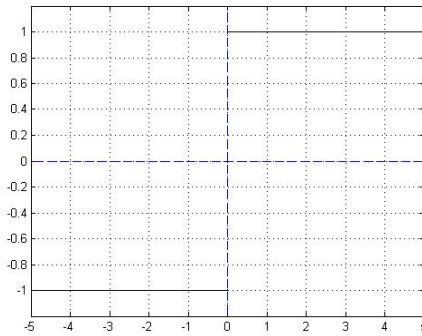
Şekil 6.7. Doğrusal aktivasyon fonksiyonu.

6.2.3.3. Signum tipi aktivasyon fonksiyonu

Adım giriş fonksiyonu, ani değişimleri içerir ve sistemde sert geçişler oluşturur.

Birim adım girişi için aşağıdaki kurallar geçerlidir:

$$f(x) \begin{cases} -1, & x < 0 \\ \text{Tanımsız}, & x = 0 \\ +1, & x > 0 \end{cases} \quad (6.29)$$

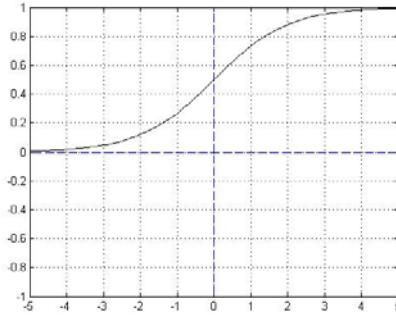


Şekil 6.8. Signum tipi aktivasyon fonksiyonu

6.2.3.4. Sigmoid tipi aktivasyon fonksiyonu

Sigmoid Aktivasyon Fonksiyonu, türevi alınabilir, sürekli ve doğrusal olmayan bir fonksiyon olması nedeniyle uygulamada en çok kullanılan aktivasyon fonksiyonudur.

Bu fonksiyon, girdinin her değeri için sıfır ile bir arasında bir değer üretir.



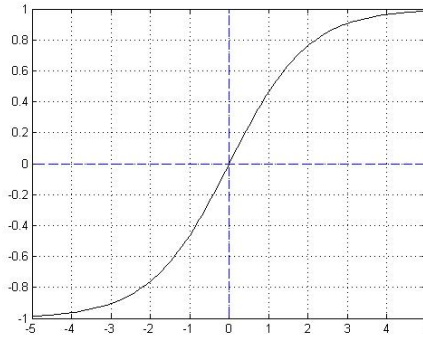
Şekil 6.9. Sigmoid tipi aktivasyon fonksiyonu.

Sigmoid tipi aktivasyon fonksiyona ait denklem, Denklem 6.30'da verilmiştir.

$$y = \frac{1}{1+e^{-x}} \quad (6.30)$$

6.2.3.5. Tanjant hiperbolik aktivasyon fonksiyonu

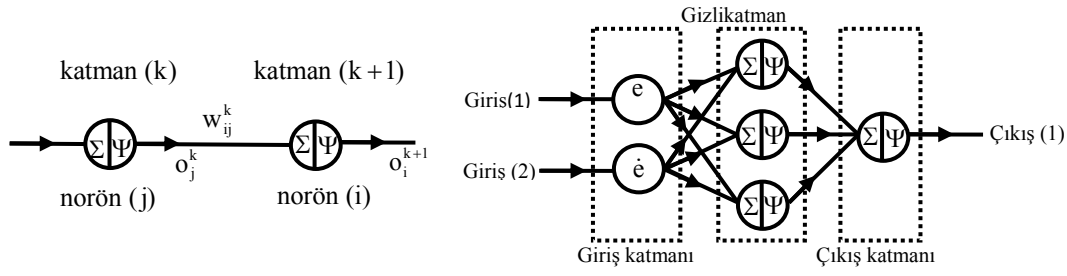
Tanjant hiperbolik fonksiyonu, sigmoid fonksiyonunun biraz farklı şeklindedir. Giriş uzayının genişletilmesinde etkili bir aktivasyon fonksiyonudur. Sigmoid fonksiyonun çıktı aralığı 0 ve 1 olurken, hiperbolik tanjant fonksiyonunun çıktısı -1 ve 1 aralığında oluşmaktadır [69].



Şekil 6.10. Tanjant Hiperbolik Aktivasyon Fonksiyonu.

6.2.4. İleri beslemeli yapay sinir ağları

Tanımlama işlem sırası genel anlamda, sistem girişleri ile çıkışları arasında bir ilişkinin kurulmasını gerekli kılar. Yapay sinir ağlarının bir özelliği, universal yaklaşımçı olarak kullanılabilir olmalarıdır.



Şekil 6.11. İleri beslemeli yapay sinir ağı yapısı.

Şekil 6.11’de verilen yapı göz önüne alınarak sistemin maliyet fonksiyonu aşağıdaki gibidir.

$$J = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N (d_i^p - y_i^p)^2 \quad (6.31)$$

Denklem 6.31’de y_i^p , sinirsel ağ cevabı içerisindeki p ’inci örüntünün i ’inci girişini, d_i^p de p ’inci hedef vektörün i ’inci girişini ifade etmektedir. Denklem 6.32, sırasıyla, çıkış katmanı ile gizli katmana ait delta değerlerinin hesaplanmasında kullanılır.

$$\delta_j^{k+1,p} = \left(\sum_{h=1}^{N_{k+2}} \delta_h^{k+2,p} w_{jh}^{k+1} \right) \psi'(S_j^{k+1,p}) \quad (6.32)$$

Verilen ifadede S_j , $k+1$ ’inci katmandaki j ’inci nöronun net toplamını, ψ ise gizli katmandaki her bir nörona bitişik lineer olmayan aktivasyon fonksiyonunu ifade eder. Geri geçiş esnasında delta değerlerinin çıkartılmasından sonra, her bir eğitim çifti için Denklem 6.33’te verilen ağırlık güncelleme kuralı uygulanır [68].

$$\Delta w_{ij}^k = \eta \delta_j^{k+1,p} o_i^{k,p} \quad (6.33)$$

6.2.4.1. Hata dağılımının hesaplanması

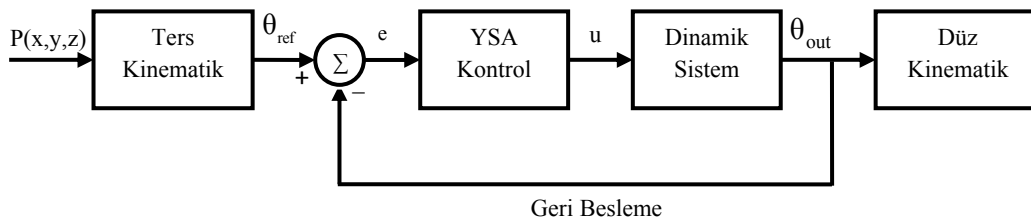
Bu çalışmada ağırlıkların güncelleştirilmesi Şekil 6.11’de verilen iki nöron arasındaki gösterimle formüle edilmiştir. Bu işlem geriye yayılım öğrenmesi sırasında çıkış nöronları ve gizli katman nöronları arasındaki ağırlıkları ile giriş nöronları ve gizli katman nöronları arasındaki ağırlıkların güncelleşmesi aynı şekilde olur.

Yapay sinir ağlarının eğitilebilmesi için, her bir w_{ij} ağırlığına bağlı olarak kayıp fonksiyonun G gradyanının bulunması gereklidir. Elde edilecek sonuçlar, ağırlıklardaki değişimlerin sistemin E genel hata durumunu nasıl etkilediğini görmede yardımcı olacaktır. İlk olarak kayıp fonksiyonunu her bir p eğitim verisi,

$$E = \sum_p E^p \quad E^p = \frac{1}{2} \sum_o (t_o^p - y_o^p)^2 \quad (6.34)$$

İfade edilir. Denklem 6.34’te “ o ” değeri, yapay sinir ağının her bir birimine ait çıkışı simgelemektedir. İfadedeki p değeri de bir üssel ifade olmayıp her bir eğitim setini ifade etmektedir.

İleri beslemeli yapay sinir ağlarının performans değerlendirmesini yapabilmek için dört eksenli robot kolu üzerinde simülasyon çalışmaları gerçekleştirilecektir. Dört eksenli robot kolu için uygulanan kontrol şemasına ait blok diyagramı Şekil 6.12’de verilmiştir.



Şekil 6.12. Dört eksenli robotu koluna ait yapay sinir ağı tabanlı kontrol şeması.

Türevleme işlemi ve toplama işlemi kendi aralarında değiştirilebildiklerinden, gradyanı her bir eğitim seti için farklı kısımlara ayırmak da mümkün olabilmektedir.

$$G = \frac{\partial E}{\partial w_{ij}} = \frac{\partial}{\partial w_{ij}} \sum_p E^p = \sum_p \frac{\partial E^p}{\partial w_{ij}} \quad (6.35)$$

Bundan sonra, tekil bir eğitim noktası için gradyanın hesaplanması işlemi gerçekleştirilebilir. Bu amaçla ilk olarak gradyanın iki kısma ayrılması için zincir kuralı kullanılır.

$$\frac{\partial E}{\partial w_{oi}} = \frac{\partial E}{\partial y_o} \frac{\partial y_o}{\partial w_{oi}} \quad (6.36)$$

İlk kısım, Denklem 6.24'ün türevlenmesi ile elde edilebilir.

$$\frac{\partial E}{\partial y_o} = -(t_o - y_o) \quad (6.37)$$

İkinci kısımda ise $y_o = \sum_j w_{oj} y_j$ ifadesini yerine koyarsak:

$$\frac{\partial y_o}{\partial w_{oi}} = \frac{\partial}{\partial w_{oi}} \sum_j w_{oj} y_j = y_i \quad (6.38)$$

Denklem 6.36 ve 6.38 birbiri içerisinde yerlerine konularak hatanın ağırlıklara göre değişimi bulunabilir.

$$\frac{\partial E}{\partial w_{oi}} = -(t_o - y_o) y_i \quad (6.39)$$

G gradyanının bulunabilmesi için bütün veri noktalarında her bir ağırlık için Denklem 6.38 ile verilen ifadenin sonucu toplanır. Bu işlemin ardından, eğimli bir azalma elde edebilmek için ağırlıklardan G'nin öğrenme oranı kadarlık bir kısmı çıkartılarak ağırlıklar güncellenmiş olur. Denklem 6.33 de göz önüne alınarak ağırlık güncelleme kuralı Denklem 6.40, ağırlıkların son durumları ise Denklem 6.41'deki gibi yazılabilir [64, 70].

$$\Delta w_{ij} = -\eta \frac{\partial E}{\partial w_{ij}} \quad (6.40)$$

$$w_{ij} = w_{ij} + \eta \Delta w_{ij} \quad (6.41)$$

6.3. Bulanık Yapay Sinir Ağları

Yapay zekanın modern teknikleri, bilim dünyasının hemen her alanında kendine yer bulmuştur. Bu tekniklerin en çok uygulandığı dalı ise mühendisliktir. Yapay sinir ağları ve bulanık mantık teknikleri, klasik yöntemlerin istenen performansı sağlayamadığı veya problemi çözemediği konularda çok defa birlikte kullanılmıştır. Bulanık-sinirsel ifadesi, bu iki yöntemin bir araya getirilmesinden doğmuştur. Genel anlamda bulanık-sinirsel ifadesi, bulanık mantık kurallarının yapay sinir ağı içerisinde seçici bir rol oynadığı ve yapay sinir ağı çıkışlarının bulanık mantık tarafından belirlendiği bir kontrol yapısını anlatır.

Bu tür sistemler iki farklı davranış gösterirler. Öğrenme fazı olarak adlandırılan ilk fazda, off-line olarak yapısal parametreleri öğrenmeye çalışan yapay sinir ağı gibi davranır. Sonraki aşamada, yani sonuçların elde edildiği aşamada, bulanık mantık sistem davranışı sergiler.

Bu iki tekniğin her biri kendine özgü avantaj ve dezavantajlara sahiptir. Her iki sistem bir araya getirildiğinde, elde edilen yapı, her birinin ayrı ayrı kullanılması durumunda elde edilenden daha iyi bir sonuç verir.

6.3.1. Bulanık sistemler

Bulanık sistemler, gerçek süreçlerdeki göreceli insan bilgisinin ifade edilmesinde kullanılan bir matematiksel işlemci olarak görev görürler. Bu işlem, pratikte mevcut olan bir bilgiyi belirli bir hata dahilinde işlemede kullanılan bir tekniktir. Bulanık diziler teorisi, Lütfi Asker Zadeh tarafından öne sürülmüştür [72]. Bu tür sistemlerin davranışı bir dizi kurallar tarafından belirlenir. Bu kurallar,

Eğer <İfade> O zaman <Sonuç>

şeklinde tanımlanırlar ve sembolik ifadeler içeren dilsel değişkenler kullanırlar. Her bir ifade, bir bulanık dizi ifade eder. Giriş uzayındaki ifadeler, sistemin bulanık yapısını oluştururlar.

Bulanık mantık sistemlerinin daha iyi bir performans gerçekleştirmelerini sağlayan bazı temel karakteristikler aşağıdaki gibidir:

- Bulanık sistemler, belirsiz veya yaklaşık çözümlemede ve özellikle de matematiksel modelinin türetilmesi zor olan sistemlerde iyidirler.
- Bulanık mantık, eksik veya belirsiz bilgi durumlarında tahmini değerler ile dahi karar verilebilmesini sağlar [72].

Bulanık arayüz mekanizması üç kademedden oluşur. İlk kademedede sayısal giriş değerleri bir fonksiyon tarafından, bu işleme karşılık gelen bulanık dizilerin uyumluluk derecesine bağlı olarak gruplandırılır. Bu işleme bulanıklaştırma işlemi denir. İkinci aşamada ise bulanık sistem, her bir girdinin etki gücüne bağlı olarak girişleri işler. Üçüncü aşamada da sonuçlandırılmış olan bulanık değerler tekrar sayısal değerlere dönüştürülürler. Bu işleme de bulanıklaştırmanın giderilmesi (durulama) işlemi denir. Temel olarak bu süreç, kelimelerin ve insanlar tarafından kullanılan bazı öz fikirlerin karar verme aşamasında bulanık kategoriler olarak kullanılmasını mümkün kılmaktadır [71]. Geleneksel yaklaşımlar ile bulanık kavramların ifade edebilmesi mümkün değildir. Sonuç olarak birinci dereceden mantık ve klasik olasılık teorilerini esas alan yaklaşımlar, duyuşal bilgilerin ifade edilebilmesinde uygun bir kavramsal yaklaşım sağlayamazlar. Çünkü bu tür bilgiler, doğaları gereği sözel olarak kesinlik arz etmezler ve kategorik bilgiler değildir.

Bulanık mantığın gelişimi, belirsizlik ve sözel karmaşıklığı ifade eden kavramsal yaklaşımlara duyulan ihtiyaçtan ileri gelmiştir [73]. Bulanık mantığın bazı temel karakteristikleri aşağıdaki gibidir.

Bulanık sistemlerin avantajları:

- İnsan bilgisinin içyapısında mevcut olan belirsizlikleri dilsel değişkenler ile ifade edebilme yeteneği,

- Uzman denetimci yapılarının sistemin mühendislik tasarımı ile kolay etkileşimi,
- Doğal kural gösteriminin bir sonucu olarak sonuçların kolayca değerlendirilebilmesi,
- Kural tabanının yeni kurallar eklenmesi suretiyle kolayca genişletilebilmesi,
- Sistem içerisindeki muhtemel dış etkilere karşı dayanıklılık sergileyebilmesidir.

Bulanık sistemlerin dezavantajları:

- Genelleştirme yapamaması ve sadece kural tabanında yazılı olan bilgi doğrultusunda cevap verebilmesi,
- Kural tabanında değişiklik gerektirmeleri sebebiyle sistemdeki topolojik değişimlere karşı dayanıklılık gösterememesi,
- Arayüz mantıksal kurallarının belirlenmesinde bir uzmanın varlığına muhtaç olmasıdır [71].

6.3.2. Yapay sinir ağı sistemleri

Yapay sinir ağları, daha önce de bahsedildiği gibi insan beyninin biyolojik fonksiyonlarının bir benzerini oluşturmaya çalışır. Bu durum, nöronların dağınık işleme üniteleri halinde idealleştirilmelerini gerekli kılar. Ağ içerisindeki yerel ve global bağlantıları da idealleştirilir. Yapay sinir ağlarının temel karakteristiği, örnekler yardımıyla öğrenebilmeleridir. Yapay sinir ağları içyapılarında değişiklikler meydana getirerek yapay nöronları arasındaki bağlantıların ağırlıklarını değiştirerek istenen cevap ile tam uyuma sağlamaya çalışırlar.

Yapay sinir ağlarının avantajları:

- Öğrenme yetenekleri,
- Genelleştirme yetenekleri,
- Bozucu etkilere karşı dayanıklılık gösterebilmeleridir.

Yapay sinir ağlarının dezavantajları:

- Fonksiyonelliğin yorumlanamaması,
- Katman sayılarının ve nöron sayılarının belirlenmesinin zor olmasıdır [71].

Yapay sinir ağlarının en öne çıkan özelliklerinden biri adaptif olmalarıdır. Yapay sinir ağları ağırlıklarını kendi başlarına güncellediklerinden örüntü işleme, karar yürütme, sistem kontrolü, tahmin yürütme gibi işlemlerde kullanılabilirler. Adaptiflik özellikleri, yapay sinir ağlarının, ortamın veya kontrol edilecek sistemin zamanla değişmesi durumunda bile iyi sonuç elde edebilmelerini sağlar.

6.3.3.Hibrit sistemler

Bulanık mantık, sinirsel ağlar, genetik algoritmalar ve uzman sistemler, birçok çeşitli gerçek zaman probleminde etkinliklerini ispatlamışlardır. Her bir zeka tekniğinin, kendilerini problem çözümlerine özgü yapan ve diğerlerinden farklı kılan, kendine özgü bazı özellikleri vardır. Örneğin, yapay sinir ağları örüntü tanımlamasında iyi iken, karar aşamalarına nasıl ulaştıklarını açıklamakta iyi değillerdir. Belirsiz bilgileri belirli bir mantık sırasında ele alabilen bulanık mantık sistemler, bu kararları açıklamakta iyidirler ancak bu kararları almak için gerekli kuralları kendi kendilerine tayin edemezler.

Bu sınırlandırmalar, hibrit sistemlerin oluşturulmasında en tetikleyici sebepler olarak ele alınmışlardır. Hibrit sistemlerin oluşturulmasındaki temel amaç, her bir tekniğin kendi başına kullanıldığı durumlarda açığa çıkan sınırlandırmaların elimine edilmesidir. Gerçek hayatta karşılaştığımız sistem yapılarının farklı davranış ve karakter yapıları sergilemeleri, hibrit sistemlerin öneminin anlaşılmasına yardımcı olmaktadır. Birçok karmaşık yapı, farklı sayıda bileşen problemine sahip olup bunların her biri farklı işleme biçimine ihtiyaç duyabilmektedir.

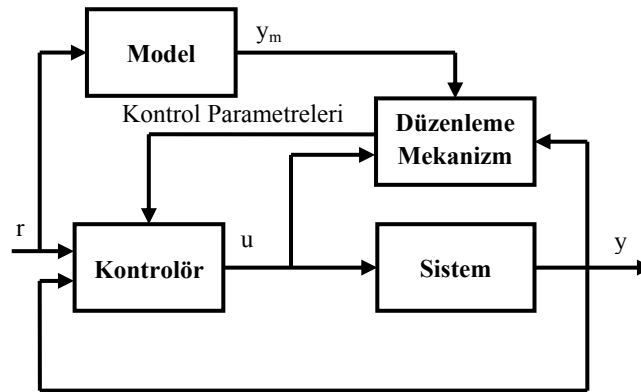
Bir sistemin kavramsal belirsizliklere karşı insanlara benzer şekilde çözüm bulabilmesini temin etmek için bulanık mantık ve yapay sinir ağlarının karışımı olan

bir yapı kullanılabilir. Bu iki kontrolörün birleşiminden doğan yapı bir hibrit sistem olup bulanık-sinirsel, sinirsel-bulanık olarak isim alabilir [71].

6.3.4. Sinirsel bulanık mantık kontrolörü

Bu çalışmada, dört eksenli bir robot kolunun konum kontrolünün gerçekleştirilmesinde kullanılan ve yapay sinir ağları ile bulanık mantığın avantajlarını bir araya toplayan hibrit bir kontrolör tasarımı gerçekleştirilecektir. Kontrolör yapısı, bir yapay sinir ağı içerisinde aktivasyon fonksiyonu olarak bulanık mantık esaslı bir üyelik fonksiyonun kullanımını esas almaktadır. Kontrolörün etkinliğini arttırabilmek ve sisteme adaptiflik kazandırabilmek için model referans adaptif denetim sistemi de öngörülen yapıya dâhil edilmiştir. Her üç ayrı yapının bütünleşmesi ile oluşturulan bu yapı, kontrol yapısının daha hızlı öğrenbilmesi ve sistemin daha esnek bir hale gelmesine yardımcı olmaktadır. Önerilen bulanık yapay sinir ağında diğer sistemlerden farklı olarak üyelik fonksiyonlarındaki parametre sayılarının ve üyelik işlevi sayısının değişebilmesidir.

Model referans kontrolde sistem modelinin referans modelin çıkışını izlemesi istenir. Buna model izleme problemi denir. Burada önemli olan hatanın ne kadar küçük olacaktır. Bu da modele, sisteme ve kumanda işaretine bağlıdır. Model izleme problemi kutup yerleştirme yöntemi kullanılarak çözülebilir. Sistemin blok diyagramı Şekil 6.13'te gösterilmiştir [74].



Şekil 6.13. Model Referans Adaptif Kontrol Şeması.

Dubowsky ve DesForges [75] 1979 yılında mekanik manipulatörlerin denetimi için basit bir model referans adaptif denetleyiciyi önermişlerdir. Önerilerinde uç eleman yükü kolun son parçasıyla birleştirilerek hesaba katılmış ve uç elemanın diğer parçalara göre çok daha kısa olduğu varsayılmıştır. Bu varsayımlar altında seçilen ikinci dereceden zamanla değişmeyen bir doğrusal diferansiyel denklem referans model olarak kullanılmış, sonuç olarak etkin ve esnek bir kontrol performansı elde edilmiştir. Dubowsky ve DesForges tarafından yukarıdaki varsayımlarla ikinci dereceden zamanla değişmeyen bir doğrusal diferansiyel denklemin her serbestlik derecesindeki robotlar için bir referans model seçilebileceği gösterilmiştir. Bu tezde kullanılan yaklaşım, önce bir ve iki serbestlik dereceli düzlemsel robot kollarında daha sonra da üç serbestlik dereceli uzaysal bir endüstriyel robot tipinin kontrolünde referans model olarak kullanılmıştır [17, 62].

6.3.4.1. Sinirsel bulanık mantık kontrolör yapısı

Temelinde sinir ağı yapısı bulunan ve bulanık mantığın da yardımıyla çıkarım işlemini kolaylaştırmak için Şekil 6.14'teki gibi bir sinirsel bulanık ağ yapısı önerilmiştir. Bu yapıda, bulanık çıkarım parametreleri, yapay sinir ağının bağlantı ağırlıkları ve süreç elemanı işlevlerinin elde edilmesinde kullanılmaktadır. Bulanık mantık sisteminin yapay sinir ağı kullanılarak ifade edilmesi, yapay sinir ağının öğrenme yeteneği sayesinde bulanık mantık parametrelerinin otomatik olarak ayarlanması avantajını sağlar. Önerilen ağ yapısının girişlerini, robot kolunun konumu, hızı ve ivmeleri oluştururken çıkışını da robot kolunun hareketi için gerekli olan tork oluşturmaktadır. Dinamik sinirsel bulanık ağı, her bir serbestlik derecesi için ayrı bir katman içerdiğinden ayrık bir kontrolör yapısı teşkil etmektedir. Ayrık bir yapının tercih edilmesi, hesap yükünü hafifletmek ve iterasyon sayısını azaltarak çevrim zamanının uzamasına engel olmaktadır.

6.3.4.2. Dinamik bulanık yapay sinir ağının eğitilmesi

Önerilen sinir ağı yapısı, ileri beslemeli dinamik bir sinir ağı yapısı olup konvansiyonel yapay sinir ağları gibi dört ana katmandan oluşmaktadır.

1. Katman: Bu katman, robota ait konum, hız ve ivme değerlerinin ağa girdiği giriş katmanıdır. Bu katmanda alınan veriler herhangi bir işleme veya değişikliğe tabi tutulmaksızın ikinci katmana iletilirler.

2. Katman: Bu katman, bulanık işlevcilerin birinci katmandan alınan verileri işleyerek her bir bulanık verinin hangi kümeye ait olduğunu belirler. Her bir düğüm için bulanık işlevci olarak Gauss tipi üyelik fonksiyonu seçilmiştir.

$$\mu_{A_i^j} = \exp \left[-\frac{(x_i - m_{ji})^2}{\sigma_{ji}^2} \right] \quad (6.42)$$

Verilen ifadede m_{ji} , i 'inci giriş değişkeni ile x_i ile ilgili olan, j 'inci terimin Gauss fonksiyonunun merkezini ve σ_{ji} de aynı terimin Gauss fonksiyonunun genişliğini ifade eder. m_{ji} ve σ_{ji} terimleri değiştirilerek aynı düğüm için farklı sayıda üyelik fonksiyonu elde etmek mümkündür [9].

3. Katman: Bulanık mantık kuralları sonucu işlenen her bir veri seti, bulanık mantık kurallarının bir ön koşulu gibi davranır ve girişlerden alınan her bir veri seti içerisinde en küçük olanını bulur.

$$O_j = \min \left[\mu_{A_i^j}(x_i) \right] \quad (6.43)$$

u_j , j 'inci kural düğümünün çıkışı temsil etmek şartıyla kuralın ateşleme gücü Denklem 6.44'teki gibi verilebilir.

$$O_j = \prod_i \mu_{A_i^j}^j(x_i) \quad (6.44)$$

4. Katman: Bu katman, bulanık yapay sinir ağının çıkış kumanda sinyalıdır. Bu katmanda durulama işlemi gerçekleştirilir ve çıkışa gelen bütün işaretler toplanır.

$$O_k = \sum_{j=1}^M w_j O_j \quad (6.45)$$

Verilen ifadeye O_k , bulanık yapay sinir ağının çıkışını temsil etmektedir.

6.3.4.3. Geri yayılım algoritması

Gauss fonksiyonunun, sırasıyla merkezini ve genişliğini belirleyen m_{ji} ve σ_{ji} değişkenlerinin ayarlanması işi diğer bir deyişle parametre güncellenmesi gözlemcili bir öğrenmedir. m_{ji} ve σ_{ji} terimleri değiştirilerek aynı keskin noktada değişik üyelik işlevleri elde edilebilir. Sonuç kısmındaki bağlantı ağırlıkları ve üyelik işlevlerinin parametreleri, verilen enerji fonksiyonunu minimize eden geri yayılma algoritması ile ayarlanır [76].

Ağ parametreleri bir parametre vektörünün elemanları olarak kabul edilirse, öğrenme süreci, verilen enerji fonksiyonunu minimize edecek vektörün belirlenmesini içerir. Vektöre göre enerji fonksiyonunun eğimi hesaplanır ve vektör negatif eğimi boyunca ayarlanır. Eğim vektörü her nöronun çıkışına ters yönde hesaplandığı için bu metot genellikle geriye yayılma öğrenme kuralı olarak bilinir [17].

Gözlemcili eğim düşümü kuralını kullanarak bulanık yapay sinir ağının gerçek zamanda parametre güncelleme algoritmasını elde etmek için aşağıdaki enerji fonksiyonu,

$$E = \frac{1}{2} (\theta_m - \theta)^2 = \frac{1}{2} e_m^2 \quad (6.46)$$

ile tanımlanabilir.

Parametrelerin güncellenebilmesi için daha önce de bahsedildiği gibi hatanın geriye yayılarak önceki katmanlara doğru aktarımını esas alan geriye yayılma yöntemi

kullanılır. Dördüncü katmandan başlayarak hata geriye doğru yayılması, Denklem 6.47'deki gibi ifade edilebilir.

$$\delta^4 = -\frac{\partial E}{\partial O_k} = -\frac{\partial E}{\partial e_m} \frac{\partial e_m}{\partial O_k} = -\frac{\partial E}{\partial e_m} \frac{\partial e_m}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial O_k} \quad (6.47)$$

Denklem 6.41'den yola çıkarak ağırlıkların yeni değerleri aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$w(k+1) = w(k) + \eta \left(-\frac{\partial E}{\partial w_j} \right) \quad (6.48)$$

Denklem 6.47, Denklem 6.48'de yerine konursa;

$$w(k+1) = w(k) + \left(-\eta \frac{\partial E}{\partial O_k} \right) \left(\frac{\partial O_k}{\partial w_j} \right) \quad (6.49)$$

İfade, Denklem 6.47'den yola çıkılarak düzenlenirse ağırlıkların güncellenmiş hali aşağıdaki halini alır.

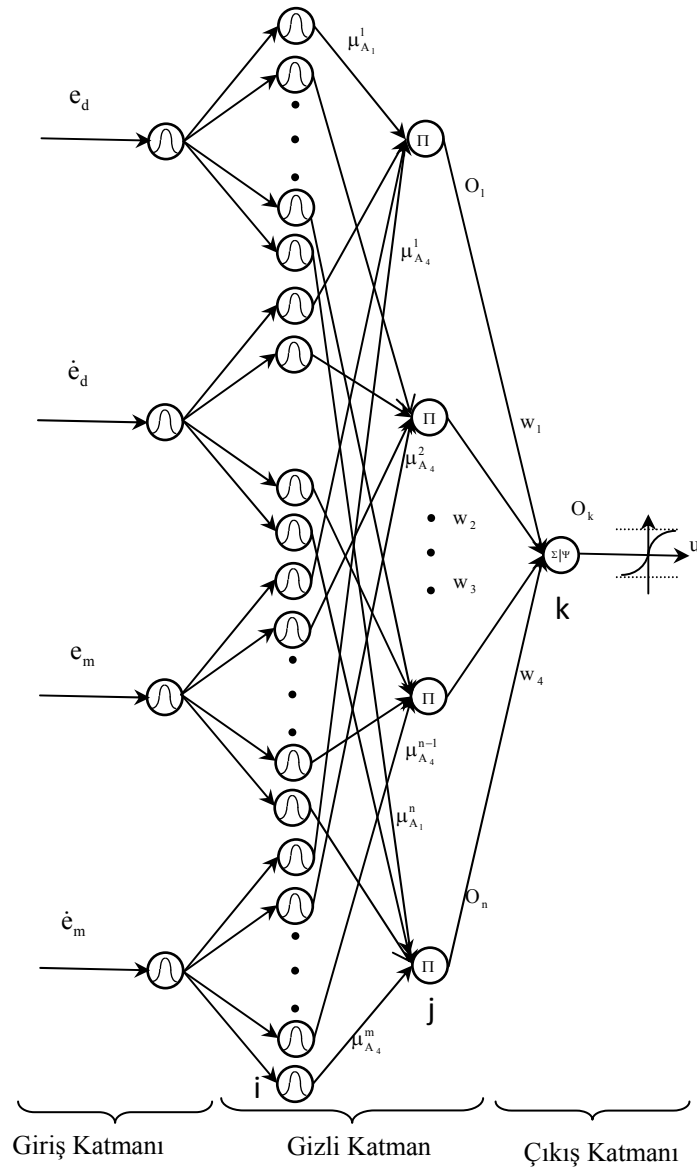
$$w(k+1) = w(k) - \eta \delta^4 O_j \quad (6.50)$$

ifadelerde geçen η değeri, öğrenme oranını göstermektedir.

Üçüncü katmandan başlayarak hatanın ikinci katmana doğru yayılabilmesi için Denklem 6.47'de geçen ifade tekrarlanır.

(6.51)

$$\delta_j^3 = -\frac{\partial E}{\partial O_j} = -\frac{\partial E}{\partial O_k} \frac{\partial O_k}{\partial O_j} = \delta^4 w_j$$



Şekil 6.14. Dinamik sinirsel bulanık ağ yapısı blok diyagramı.

Benzer şekilde hatanın ikinci katmandan ilk katmana doğru yayılması için işlem tekrarlanır.

$$\delta_j^2 = -\frac{\partial E}{\partial \mu_{A_i}^j} = -\frac{\partial E}{\partial O_k} \frac{\partial O_k}{\partial O_j} \frac{\partial O_j}{\partial \mu_{A_i}^j} = \delta^3 \quad (6.52)$$

Gauss fonksiyonunun merkezini belirleyen m_{ji} parametresinde meydana gelen değişimler, ağırlıklara benzer şekilde güncellenerek alacağı yeni değerler aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$m_{ji}(k+1) = m_{ji}(k) + \eta_m \left(-\frac{\partial E}{\partial m_{ji}} \right) \quad (6.53)$$

$$m_{ji}(k+1) = m_{ji}(k) - \eta_m \frac{\partial E}{\partial \mu_{\Lambda_i}^j} \frac{\partial \mu_{\Lambda_i}^j}{\partial m_{ji}} \quad (6.54)$$

Gerekli düzenlemeler yapılırsa Gauss fonksiyonunun merkezinin güncellenmiş hali aşağıdaki gibi olacaktır.

$$m_{ji}(k+1) = m_{ji}(k) - \eta_m \delta_{ji}^2 \frac{(x_i^2 - m_{ji})}{2(\sigma_{ji})^2} \quad (6.55)$$

ifadelerde geçen η_m değeri, m_{ji} parametreleri için tayin edilen öğrenme faktörüdür. Üyelik fonksiyonunun genişliğini belirleyen σ_{ji} , benzer işlemlerden geçirilerek güncellenir.

$$\sigma_{ji}(k+1) = \sigma_{ji}(k) + \eta_\sigma \left(-\frac{\partial E}{\partial \sigma_{ji}} \right) \quad (6.66)$$

$$\sigma_{ji}(k+1) = \sigma_{ji}(k) - \eta_\sigma \frac{\partial E}{\partial \mu_{\Lambda_i}^j} \frac{\partial \mu_{\Lambda_i}^j}{\partial \sigma_{ji}} \quad (6.67)$$

$$\sigma_{ji}(k+1) = \sigma_{ji}(k) - \eta_\sigma \delta_{ji}^2 \frac{(x_i^2 - m_{ji})}{2(\sigma_{ji})^2} \quad (6.68)$$

ifadelerde geçen η_σ değeri, σ_{ji} parametreleri için tayin edilen öğrenme faktörüdür

Dördüncü katmandaki δ^4 hata teriminin hesaplanabilmesi için $\frac{\partial E}{\partial O_k}$ ifadesinin veya sistemin jakobiyesi olan $\frac{\partial \theta}{\partial O_k}$ ifadesinin hesaplanması gerekmektedir. Ancak

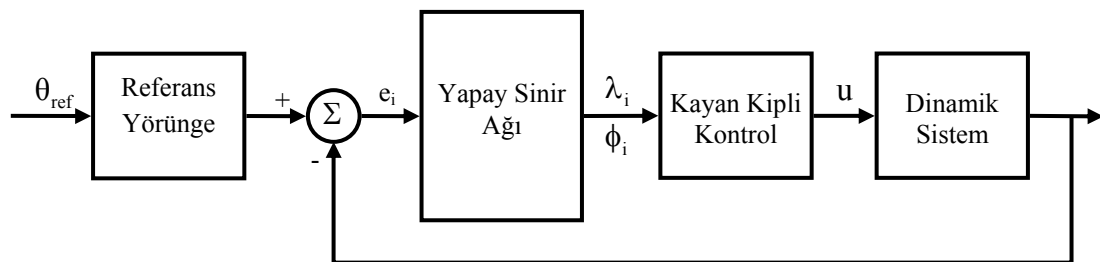
sistem parametrelerindeki değişim, sistem yapısının lineer olmaması ve hesabında yaşanan zorluklar, dış ortamdaki kaynaklanan ve sistem üzerine etkiyen bozucu etkilerin tam olarak ifade edilememesine bağlı olarak sistem jakobiyeninin hesaplanması çok güç bir hal almaktadır. Bu sorunun üstesinden gelebilmek için adaptasyon kuralı kullanılmış ve hata jakobiyeninin hesaplanması yerine aşağıdaki ifadeden yararlanılmıştır.

$$\delta^4 = A e_m + B \frac{\partial e_m}{\partial t} \quad (6.69)$$

Verilen ifadeye A ve B kazanç katsayıları olup $e_m = y_m - y$ olarak ele alınan model hatasıdır.

6.4. Yapay Sinir Ağı Tabanlı Kayan Kipli Kontrol

Bu bölümde, yapay sinir ağlarının ve kayan kipli kontrol yapısının avantajlarını bir arada barındıran, kombine bir kontrol yapısının tasarımı üzerinde durulacaktır. Bu iki kontrol yapısını bir arada kullanılmaktaki asıl amaç, kayan kipli kontrolde karşılaşılan çatırtı problemini elimine etmektir [77]. Bu sayede, kayan kipli kontrolörün performansında artış sağlanmaya çalışılacaktır. Bu yaklaşımda, yapay sinir ağları kayan kipli kontrol yapısı ile birleştirilerek yapay sinir ağı tabanlı kayan kipli kontrol (NSMC) oluşturulacaktır. Yapay sinir ağının ağırlık uyumu, kayan kipli kontrol denklemlerine bağlı olarak sağlanmakla beraber, yapay sinir ağından alınan çıktıları, kayan kipli kontrolde çatırtı problemini elimine etmek amacıyla kullanılacaktır. Şekil 6.16'de yapay sinir ağı tabanlı kayan kipli kontrol yapısı gösterilmiştir.



Şekil 6.16. Yapay sinir ağı tabanlı kayan kipli kontrol yapısı.

Kayan kipli kontrol yapısı, kapalı çevrim kontrol sistemlerinde yıllardır uygulanmaktadır [27, 28]. SMC'nin temel karakteristikleri, geri besleme sistemlerinin süreksiz olması ve uzayda birden çok kayma yüzeyine geçiş yapabilmesidir. Sisteme ait durumlar her bir süreksiz kayma yüzeyini geçtiğinde, geri besleme sisteminin yapısı değişiklik gösterir. Sistem kayma yüzeyi içerisinde kaldığında, eşdeğer kontrol kuvveti, sistemin kayma yüzeyi üzerinde kalmasını sağlayabilecek niteliktedir. Pratikteki uygulamalarda SMC temelde iki problemle karşı karşıya kalmaktadır [27]. Bu dezavantajların ilki, kontrol girisinde sürekli yüksek frekansın bulunmasıdır ve bu da çattırtı olarak bilinir. İkinci dezavantaj ise sistem parametrelerinin belirlenmesinde yaşanan zorluktur. Kayan kipli kontrol ve yapay sinir ağı tabanlı kayan kipli kontrol yapıları [79, 80, 81, 82, 83]'de çalışılmıştır.

Kontrolör tasarımında karşılaşılan bu iki zorluğu yenmek için, yapay sinir ağları kullanılarak sistemde çattırtı elimine edilmeye ve kayan kipli kontrol parametrelerinin en uygun şekilde belirlenmesi sağlanmaya çalışılacaktır. Oluşturulan bu kombine kontrol yapısı, dört serbestlik dereceli robot koluna adapte edilmeye çalışılarak optimum takip ve minimum takip hatası temin edilmeye çalışılacaktır.

Bu bölümde, daha önce tasarlanmış olan kayan kipli kontrol yapısında deneme yanılma yoluyla hesaplanan iki parametrenin (λ_i, ψ_i) yapay sinir yoluyla tahmini gerçekleştirilecektir.

6.4.1. ψ_i sabitken λ_i değerlerinin yapay sinir ağlarıyla hesaplanması

Kayan kipli kontrolde deneme yanılma yoluyla belirlenen parametrelerin optimum olarak tayin edilebilmesi için yapay sinir ağları kullanılacaktır. İlk olarak " ψ_i " değerlerinin tahmini yöntemle belirlenip " λ_i " değerlerinin yapay sinir ağıyla belirlendiği yapı üzerinde durulacaktır. Bilindiği gibi " λ_i " ifadesi, kayma yüzeyinin yatay eksenle yapmış olduğu eğimi ifade etmektedir. Bu değer sabit olarak alınmayıp yapay sinir ağlarıyla hesaplanması, simülasyon sürecinde kayma yüzeyinin sürekli değişmesini sağlayacak ve sabit bir kayma yüzeyinden

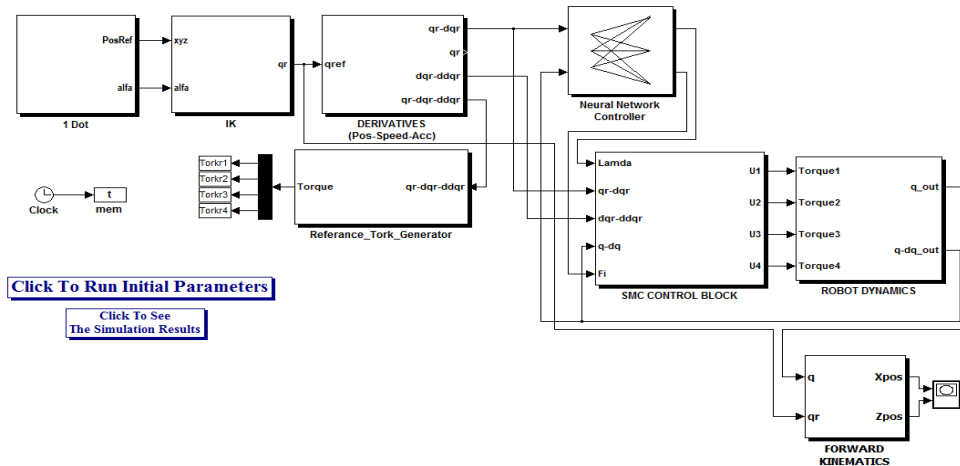
bahsedilemeyecektir. Kayma yüzeyinin değişkenlik göstermesi, çatırtı problemini azaltmak için kullanacağımız yöntemlerden biri olma özelliğini taşımaktadır. Simülasyon sonuçlarına ise sekizinci bölümde yer verilecektir.

6.4.2. λ_i sabitken ψ_i değerlerinin yapay sinir ağlarıyla hesaplanması

İkinci aşamada, " λ_i " değerleri tahmini yöntemle belirlenip " ψ_i " değerlerinin yapay sinir ağıyla belirlendiği yapı üzerinde durulacaktır. Denklem 6.18'den de hatırlanacağı üzere " λ_i " değeri, sistemi kayma yüzeyinde tutacak kontrol kuvveti için gerekli bir parametredir. Bu sebeple " λ_i " değerinin, kuvvet ihtiyacına bağlı olarak değişkenlik göstermesi gerekebilir. Bu ihtiyacı gidermek için, yapay sinir ağları kullanılacak ve optimum " λ_i " değerleri tayin edilmeye çalışılacaktır. Simülasyon sonuçlarına ise sekizinci bölümde yer verilecektir. " λ_i " değerlerinde yapılacak değişkenlikler, çatırtı problemini elimine etmekte yardımcı olacaktır.

6.4.3. λ_i ve ψ_i değerlerinin yapay sinir ağlarıyla hesaplanması

Kayan kipli kontrol sisteminde kayma yüzeyi açısının optimum şekilde elde edilebilmesi ve kayma yüzeyi üzerinde ideal tutunmanın sağlanabilmesi için her iki kontrol parametresi de yapay sinir ağları ile tayin edilmeye çalışılacaktır. Her iki parametrenin yapay sinir ağlarıyla belirlendiği kontrol yapısına ait Simulink blok diyagramı Şekil 6.17'de verilmiştir.



Şekil 6.17. λ_i değerinin yapay sinir ağlarıyla tayin edildiği kontrol yapısı.

6.5. Bulanık Yapay Sinir Ağı Tabanlı Kayan Kipli Kontrol

Daha önceki bölümlerde kayan kipli kontrol yapısı üzerinde durulmuş ve matematiksel yapısı detaylı olarak incelenmiştir. Sistem tasarımında da bahsedildiği gibi kayan kipli kontrol iki kısımdan oluşmaktadır: eşdeğer kontrol kısmı ve düzeltici kontrol kısmı. Kayan kipli kontrol kuralı, kapalı çevrim bir sistemdeki çıktıların referans yörüngeyi temsil eden kayma yüzeyi üzerine taşınmasını sağlayacak ve bu değerleri, orijine ulaşana kadar belirlenen kayma yüzeyi üzerinde tutacak şekilde tasarlanmıştır. Sistem kayma yüzeyi üzerine taşındıktan sonra sistemin durumu kayma yüzeyi tarafından tayin edilir ve bu durum, sistemin belirsizlikler ve bozucu etkilere karşı dayanıklılık göstermesini sağlamaktadır. Ancak pratikte, kayan kipli kontrolde kayma yüzeyi genelde iki büyük dezavantajla karşı karşıya kalmaktadır. Bunlardan ilki, daha önce de bahsedildiği gibi çattırtı problemi olup, sistem çıktılarında yüksek frekanslı titreşimler olarak karşımıza çıkmaktadır. İkinci dezavantaj ise eşdeğer kontrolün hesaplanmasındaki zorluktur. Bu sebeple, sistem dinamiğine yönelik detaylı bir bilgi birikimine ihtiyaç duyulmaktadır [84].

Bulanık mantık, otomatik kontrol alanında genellikle verilen bir sistemin bilinmeyen parametrelerinin yaklaşık olarak belirlenmesinde [85, 86] veya kontrolör performansının artırılmasında kullanılmaktadır. Literatürde bulanık mantığın, kayan kipli kontrolör performansını arttırmak için kullanıldığı çalışmalar mevcuttur [87, 88]. Elmas ve ark. [87], çattırtı sorununu ortadan kaldırıp hızlı ve düzgün bir dinamik cevap sağlayan kayan kipli kontrol yapısı tasarlamaya çalışmışlardır. Bu çalışmada, yapay sinir ağları ve bulanık mantıktan oluşan hibrit bir yapı, kayan kipli kontrole paralel olarak bağlanmıştır. [88]'te ise kayan kipli kontrol yapısındaki çattırtı sorununu ortadan kaldırmak için bulanık mantık kullanılarak uyum mekanizması oluşturulmaya çalışılmıştır. Ancak, özellikle yüksek dereceli sistemlerde, kontrol kuralının hesaplanması oldukça zordur.

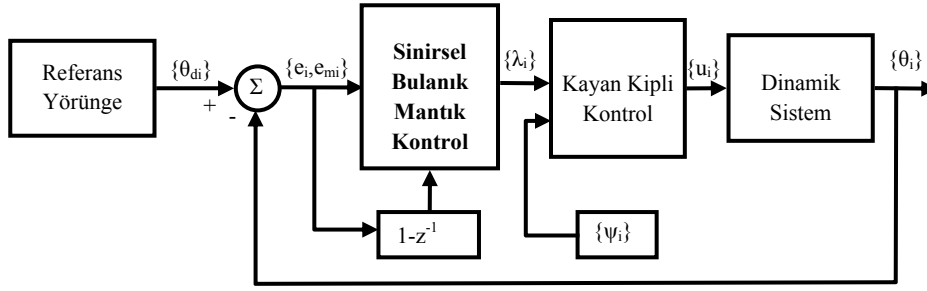
Literatürde, eşdeğer kontrolün hesaplanmasında karşılaşılan sıkıntıları ortadan kaldırmak için geliştirilmiş yapılara rastlanabilmektedir [89]. Geçmiş yıllarda, daha çok yapay sinir ağı tabanlı kontrolörler üzerinde durulmuştur. Bunun sebebi de, yapay sinir ağlarının sahip olduğu lineer olmayan eşleme ve öğrenme yetenekleridir.

Sistemde belirsiz parametrelerin bulunması durumunda eşdeğer kontrolün hesaplanmasında genellikle kayan kipli kontrol algoritmasına göre seçilmiş bir öğrenme kuralına sahip yapay sinir ağları kullanılmaktadır [77, 83, 90].

Bu çalışmada bulanık mantık, yapay sinir ağları ve kayan kipli kontrol kavramlarını beraberce içeren hibrit bir kontrol yapısı üzerinde durulacaktır. İlk aşamada, kayan kipli kontrolör için optimum kayma yüzeyinin belirlenebilmesi için bulanık mantık tabanlı yapay sinir ağı kullanılarak sistemin verdiği cevaplar değerlendirilecektir. Daha sonra, sistemi kayma yüzeyi üzerinde tutacak olan düzeltici kontrol parametrelerinin bulanık mantık tabanlı yapay sinir ağı tarafından belirlendiği kontrol yapısı üzerinde durulacaktır. Son olarak da sistemi kayma yüzeyine taşıyacak eşdeğer kontrol kuvveti parametrelerinin ve sistemi kayma yüzeyi üzerinde tutacak düzeltici kontrol kuvveti parametrelerinin her ikisinin de bulanık mantık tabanlı yapay sinir ağı tarafından belirlendiği kayan kipli kontrol yapısı tasarlanarak elde edilen iyileştirmeler değerlendirilecektir.

6.5.1. “ λ_i ” parametrelerinin FNN tarafından belirlendiği kayan kipli kontrol yapısı

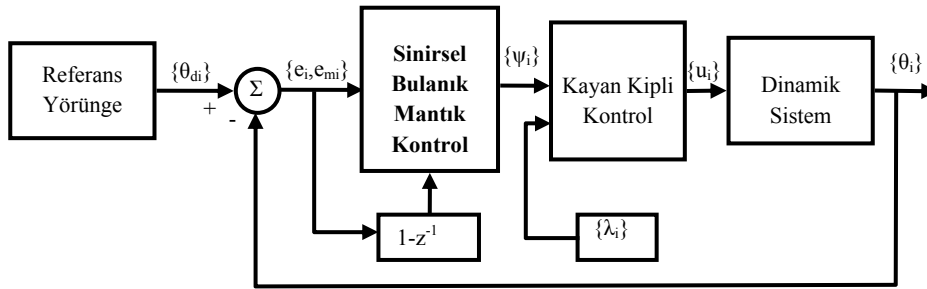
Bu bölümde, sistemi kayma yüzeyi üzerinde tutacak olan düzeltici kontrol kuvveti parametreleri (ψ_i) elle tayin edilerek sistemi kayma yüzeyine taşıyacak olan eşdeğer kontrol kuvveti parametreleri (λ_i) FNN tarafından belirlenecektir. Bunun için FNN çıktıları, kayan kipli kontrolöre girdi olarak alınacak ve bu sebeple de kayan kipli kontrolörün kayma yüzeyi sürekli olarak değişkenlik arz edecektir. Kayma yüzeyinin değişkenlik göstermesindeki avantaj, sistemi sabit bir kayma yüzeyine ulaşmaya zorlamaktan ziyade sistemin dinamik davranışına göre belirlenecek olan bir kayma yüzeyine ulaşmaya çalışılmasıdır. “ λ_i ” parametrelerinin FNN tarafından belirlendiği FNSMC kontrol yapısına ait sistem yapısı Şekil 6.18’te verilmiştir. Sistemin çıktılarında elde edilen iyileştirmelere ise sekizinci bölümde yer verilecektir.



Şekil 6.18. λ_i parametrelerinin FNN tarafından belirlendiği kayan kipli kontrol yapısı

6.5.2. “ ψ_i ” parametrelerinin FNN tarafından belirlendiği kayan kipli kontrol yapısı

Bu bölümde, sistemi kayma yüzeyine ulaştıracak olan eşdeğer kontrol kuvveti parametreleri (λ_i) elle tayin edilerek, sistemi kayma yüzeyinde tutacak olan düzeltici kontrol kuvveti parametreleri (ψ_i) FNN yardımıyla tayin edilecektir. Bu yapı içerisinde kayma yüzeyi sabit tutularak sistemin belirlenen kayma yüzeyi üzerinde optimum şekilde tutunabilmesi sağlanmaya çalışılacaktır. “ ψ_i ” parametrelerinin FNN tarafından belirlendiği FNSMC kontrol yapısına ait şematik diyagram Şekil 6.19’da verilmiştir. Sistemin çıktılarında elde edilen iyileştirmelere ise sekizinci bölümde yer verilecektir.

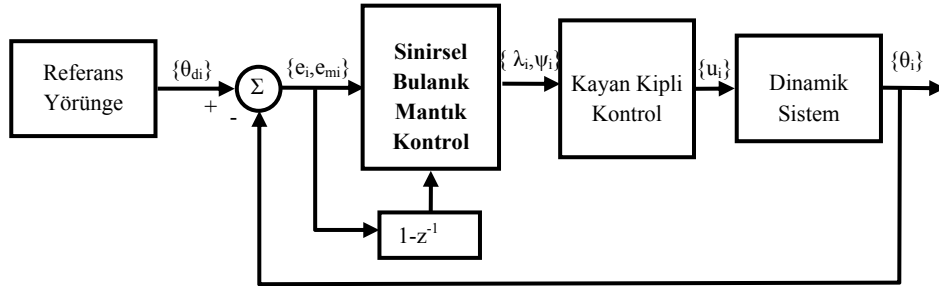


Şekil 6.19. ψ_i parametrelerinin FNN tarafından belirlendiği kayan kipli kontrol yapısı

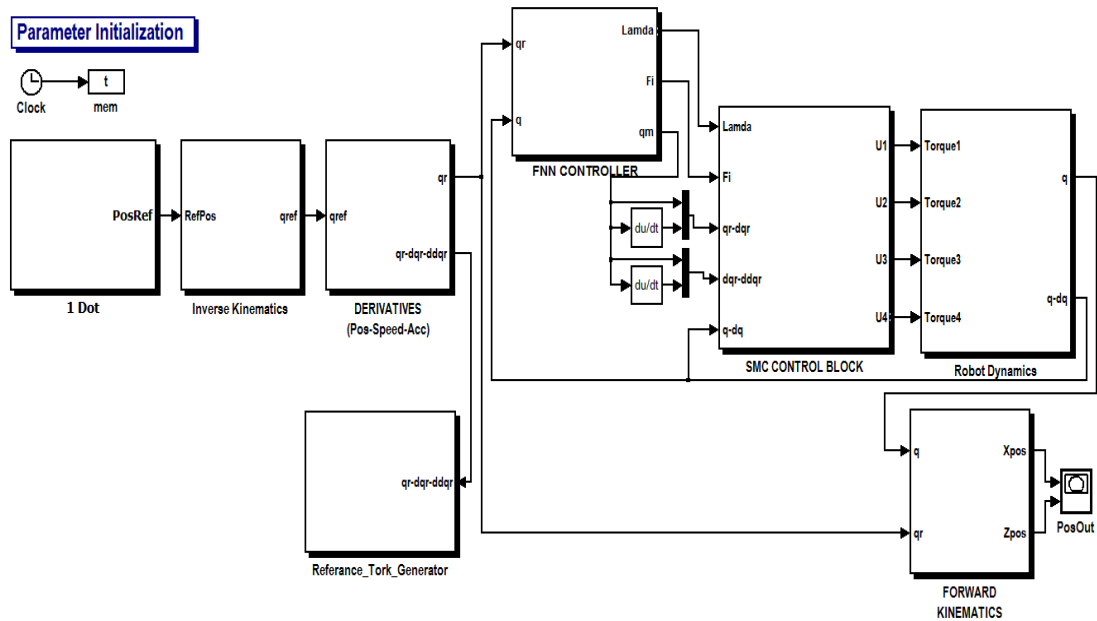
6.5.3. “ λ_i ” ve “ ψ_i ” parametrelerinin beraberce FNN tarafından belirlendiği kayan kipli kontrol yapısı

Bu bölümde, sistemi kayma yüzeyine ulaştıracak olan eşdeğer kontrol kuvveti parametreleri (λ_i) ve sistemi kayma yüzeyi üzerinde tutacak olan düzeltici kontrol

kuvveti parametrelerinin (ψ_i) her ikisinin de FNN tarafından belirlendiği kontrol yapısı üzerinde durulacaktır. Bu tür bir kontrol yapısının avantajı, hem kayma yüzeyinin ve hem de sistemi kayma yüzeyi üzerinde tutacak olan düzeltici kontrolün değişken olmasıdır. Bu sayede sistemin ihtiyacına göre optimum kayma yüzeyi belirlenebilecek olup, sistemin kayma yüzeyi üzerinde en ideal şekilde tutunması sağlanmış olacaktır. Her iki " λ_i ve (ψ_i)" parametresinin FNN tarafından belirlenmesiyle oluşturulan FNSMC kontrol yapısına ait şematik diyagram Şekil 6.20'de, Simulink blok diyagramı ise Şekil 6.21'de verilmiştir. Sekizinci bölümde, her üç yapının birbirine göre ve kayan kipli kontrolün tek başına kullanıldığı duruma göre avantaj ve dezavantaj durumları tartışılacak ve karşılaştırılacaktır.



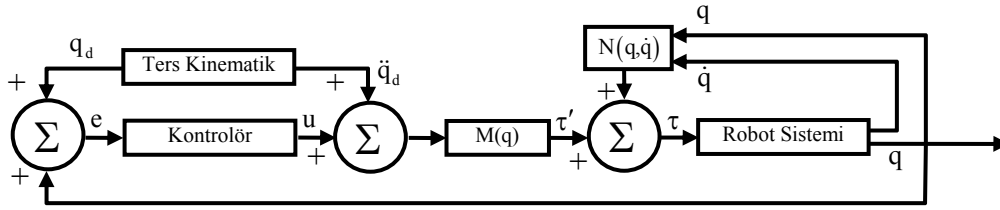
Şekil 6.20. Sinirsel bulanık mantık tabanlı kayan kipli kontrol yapısı.



Şekil 6.21. FNSMC kontrol yapısına ait şematik diyagram.

6.6. Hesaplanan Moment Yöntemi ve Geri Besleme Doğrusallaştırması

1960 ve 1970'li yıllarda robot tekniği üzerine tasarlanan klasik dinamik kontrol yapıları, hesaplanan moment yöntemi üzerine dayandırılmış olup bu yapının değişik türleri mevcuttur. Son zamanlarda ise geri besleme doğrusallaştırması üzerine, ileri matematiksel teknikler geliştirilmiştir. Genel bir hesaplanan moment kontrol sistemi Şekil 6.22'de gösterilmektedir.



Şekil 6.22. Hesaplanan moment kontrolörü yapısı.

Manipülatörün takip etmesi istenen yörüngenin önceden tanımlanacağı gerçeğinden yola çıkarak takip hatası, Denklem 6.70'te verildiği gibi hesaplanabilir.

$$e(t) = q_d(t) - q(t) \quad (6.70)$$

Denklem 6.70'te verilen ifadenin iki kere türevi alınır, Brunovsky kanonik formu, $x = [e^T \ \dot{e}^T]^T$ ifadesine bağlı olarak aşağıdaki gibi elde edilebilir.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} e \\ \dot{e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e \\ \dot{e} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u \quad (6.71)$$

Denklem 6.71'den yola çıkarak kontrol sinyali, aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$u = \ddot{q}_d + M^{-1}(q)(N(q, \dot{q}) - \tau) \quad (6.72)$$

Burada iki kademeli bir süreç uygulanabilir. İlk olarak lineer sistem tasarım teknikleri kullanılarak Denklem 6.71'de verilen takip hatasını iyileştirecek bir $u(t)$

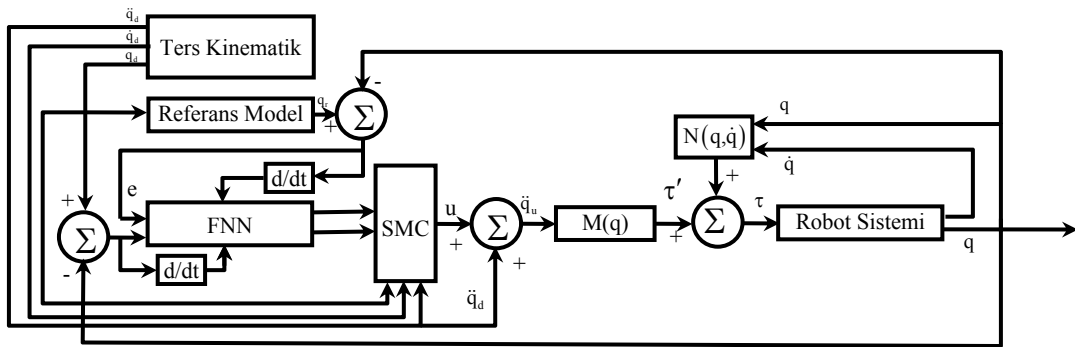
seçilir ve daha sonra Denklem 6.72 ifadesinin tersini kullanarak gerekli kol momentlerini hesaplamaktır. Bu durum, Denklem 6.79'te olduğu gibi ifade edilebilir.

$$\tau = M(q)(\ddot{q}_d + u) + N(q, \dot{q}) \quad (6.73)$$

Bu ifade, arzu edilen yörüngenin takibini garantileyen, doğrusal olmayan bir kontrol kuralıdır. Bu durum, Denklem 5.13'te verilen ve doğrusal olmayan ifadenin, Denklem 6.71'de verilen lineer dinamik denkleme eşdeğer kılan τ torkunun hesaplanmasına dayanır. Bu da geri besleme doğrusallaştırması olarak adlandırılır [40, 55].

6.6.1. Sinirsel bulanık mantık tabanlı kayan kipli kontrol ile hesaplanan moment yöntemi

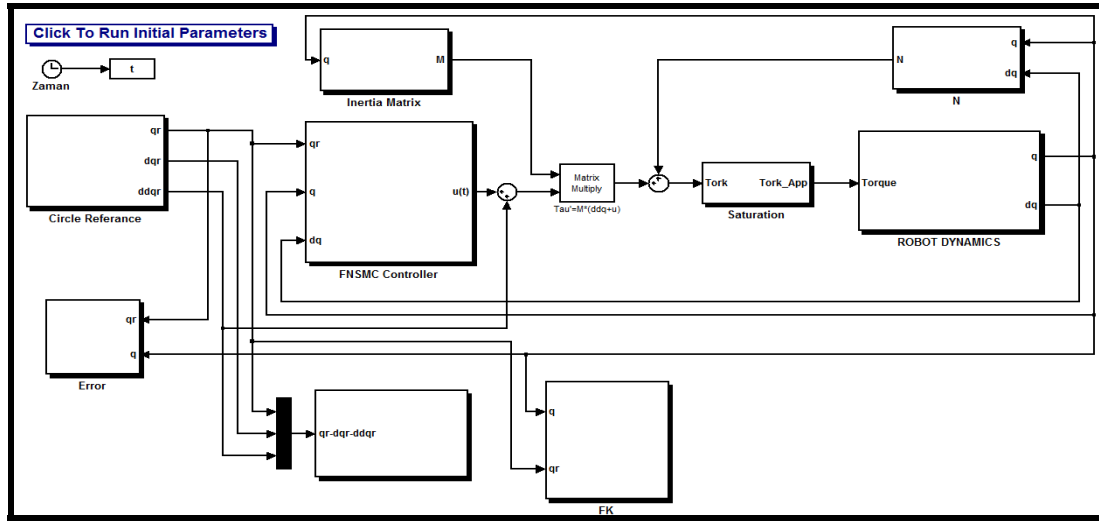
Bu bölümde, hesaplanan moment yönteminde kullanılacak olan $u(t)$ geri besleme sinyali, sinirsel bulanık mantık tabanlı kayan kipli kontrol ile hesaplanacaktır. Oluşturulan kontrol yapısına ait şematik gösterim Şekil 6.23'te verilmiştir. Sistemin Simulink blok diyagramı ise Şekil 6.24'te verilmiştir.



Şekil 6.23. FNSMC tabanlı hesaplanan moment yöntemi yapısı.

$u(t)$ kontrol sinyalinin sinirsel bulanık mantık tabanlı kayan kipli kontrol ile tayin edildiği durumda sistemin hareket denklemi Denklem 6.74 ile tanımlanabilir.

$$\tau = M(q)(\dot{q}_d + u(t)) + N(q, \dot{q}) \quad (6.74)$$



Şekil 6.24. FNSMC tabanlı hesaplanan moment yapısına ait Simulink blok diyagramı

BÖLÜM 7. YÖRÜNGE PLANLAMASI

Robot manipulatörleri endüstride çok çeşitli alanlarda ve farklı çalışma ortamlarında kullanılmaktadır. Bu sebeple verilen işe göre farklı yörüngeleri takip etmeleri gerekir. Özellikle mafsallı robotlar yapılarındaki hareket esnekliği ve çalışma uzaylarının genişliği sebebiyle farklı yörüngelerde çalışılması gereken durumlarda en çok tercih edilen robot kollarıdır.

Bu çalışmada, daha önceki bölümlerde fiziksel yapısı tanıtılarak matematiksel yapısı kinematik ve dinamiksel olarak türetilen dört eksenli robot kolu için altıncı bölümde tasarlanan kontrol yöntemlerinin uygulanması esnasında robot koluna takip ettirilecek yörüngeler belirlenecektir.

Robot kolunun verilen bir yörüngeyi takip edebilmesi için, öncelikle robot koluna belirli bir başlangıç noktası belirlenmiştir. Hareket esnasında kolların birbirine çarpılmaması ve belirli bir çalışma uzayının dışına çıkarak hasar görmemesi için hareket sınırlandırmaları, Tablo 3.2’de verildiği gibi tayin edilmiştir. Daha sonra robot kolu için farklı yörünge türleri atanmış olup robot koluna, altıncı bölümde tanıtılan kontrol yöntemlerinin denetiminde, her bir yörüngeyi ayrı ayrı takip ettirilerek kontrolör performansı belirlenmeye çalışılmıştır.

Dört eksenli robot kolunun simülasyon çalışmaları esnasında robot koluna takip ettirilen yörüngeler aşağıda verilmiştir.

1. Tek noktaya ulaşma,
2. Uzayda 3 boyutlu doğrusal hareket,
3. Dairesel yörünge takibi.

7.1. Yörünge Yapıları

Bu bölümde, yukarıda verilen yörüngelerin planlanması esnasında takip edilen stratejiye yer verilecektir. Her bir yörünge takibinde robot kolunun uç noktasının başlangıç noktası, referans yörüngenin, uç noktanın başlangıç noktasına olan uzaklığı önceden belirlenmiş olup her bir yörüngenin matematiksel ifadesi Simulink içerisinde tanıtılmıştır. Bu sebeple yörünge, sistem hareket halindeyken önceden belirlenmiş matematiksel bir ifadeye göre veya değere göre simülasyon esnasında oluşturulmaktadır.

Dairesel yörünge takibinde, robot kolunun başlangıç konumundan verilen yörüngeyi çizmeye başlayacağı noktaya kadarki hareketini en kısa zamanda gerçekleştirebilmesi ve bu noktaya en kısa yoldan ulaşabilmesi istenir. Bunun için başlangıç konumu ile yörüngenin başlangıç noktası arasındaki kısım, robot koluna doğrusal bir doğru ile tanıtılmış ve bu doğruyu takip ederek referans yörüngeyi çizmeye başlayacağı noktaya ulaşması sağlanmıştır.

7.2. Tek noktaya ulaşma

Tek noktadan oluşan yörüngede robot kolu, başlangıç noktasından başlayarak uzayda verilen bir noktaya ulaşmaya çalışacaktır. Robot kolundan ulaşması istenen tek noktanın konumu ve robot kolunun başlangıç konumu Tablo 7.1’de verilmiştir.

Tablo 7.1. Tek noktadan oluşan yörüngenin matematiksel konumu.

| Uç noktanın konumu | Ulaşılması istenen nokta | Başlangıçta uç noktanın konumu |
|--------------------|--------------------------|--------------------------------|
| X konumu | 0.9 | $L_2+L_3+L_4=1.5$ |
| Y konumu | 0.7 | 0.0 |
| Z konumu | 1.3 | $L_1=0.5$ |

7.3. Çembersel yörünge takibi

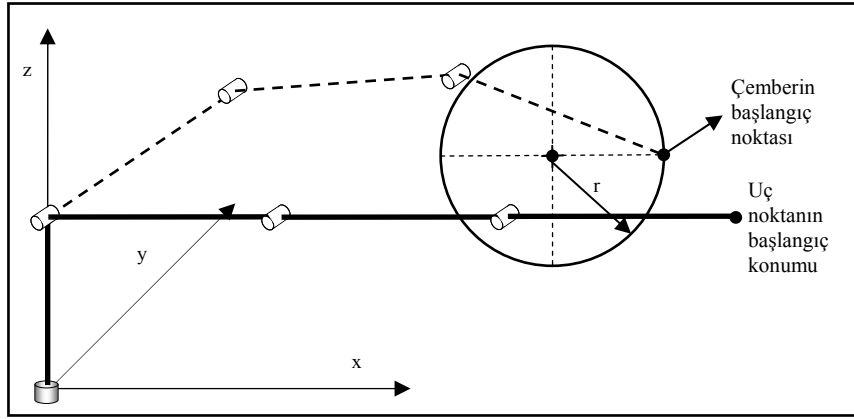
Çembersel yörünge takibinde, robot kolunun taban noktasından belirli uzaklıktaki bir noktayı merkez kabul eden “r” yarıçaplı bir çemberden oluşan bir yörüngenin takibi gerçekleştirilecektir. Önce çember çizimine başlanacağı nokta tayin edilir. Takibi

gerçekleştirilecek olan çembersel yörüngeyi konumsal ve fiziksel özellikleri Tablo 7.3'te verilmiştir.

Tablo 7.2. Çembersel yörüngeyi uzaysal konumu ve çember parametreleri.

| Başlangıçta uç noktanın konumu | | Çember merkezinin konumu | | Çember yarıçapı (m) |
|--------------------------------|-------------------|--------------------------|-----------------|---------------------------------|
| X konumu | $L_2+L_3+L_4=1.5$ | X konumu | $X_{dist}=0.85$ | $r=0.45$ $\theta_c=45^\circ$ |
| Y konumu | 0.0 | Y konumu | $Y_{dist}=0.0$ | |
| Z konumu | $L_1=0.5$ | Z konumu | $Z_{dist}=0.75$ | |

Buradaki $\theta_c = 45^\circ$ açısı, çemberin xz eksenini ile yaptığı açiyı temsil etmektedir.



Şekil 7.1. Robot kolunun başlangıçta ve çemberin ilk noktasında yönelme durumu.

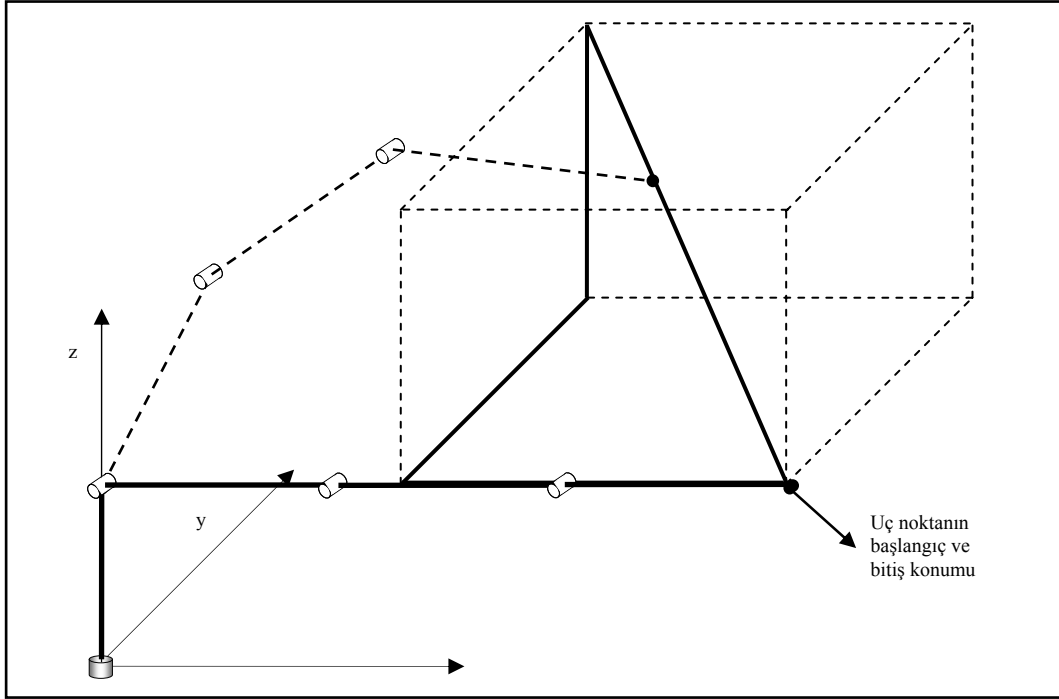
7.4. Uzayda doğrusal yörünge hareketi

Üç boyutlu doğrusal yörünge takibinde, robot kolunun her üç eksen boyunca belirli bir mesafe boyunca doğrusal hareketi gerçekleştirilecektir. Bu çalışmanın tek nokta takibinden farkı, robot kolunun takip etmesi istenen yörüngeyi hareket boyunca sabit kalmayıp sürekli olarak değişkenlik göstermesidir. Doğrusal yer değişimlerinin uzayda dört nokta tanımlanmış olup robot kolunun ilk noktadan başlayarak son noktaya kadar her iki nokta arasında doğrusal bir doğru oluşacak şekilde takip etmesi ve son olarak da başlangıç noktasına dönmesi sağlanmıştır.

Üç boyutlu uzayda ulaşılması istenen noktaların konumları ve robot kolunun başlangıç konumu Tablo 7.2'de verilmiştir.

Tablo 7.3. Üç boyutlu uzayda ulaşılması istenen noktaların konumları.

| Uç noktanın konumu | Birinci nokta | İkinci nokta | Üçüncü nokta | Dördüncü nokta | Başlangıçta ve son durumdauç noktanın konumu |
|--------------------|---------------|--------------|--------------|----------------|--|
| X konumu | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 1.5 | $L_2+L_3+L_4=1.5$ |
| Y konumu | 0.0 | 1.0 | 1.0 | 0.0 | 0.0 |
| Z konumu | 0.5 | 0.5 | 1.3 | 0.5 | $L_1=0.5$ |



Şekil 7.2. Robot kolunun başlangıçta ve uzayda doğrusal yörüngeyi takibi esnasında yönelme durumu.

BÖLÜM 8. SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI

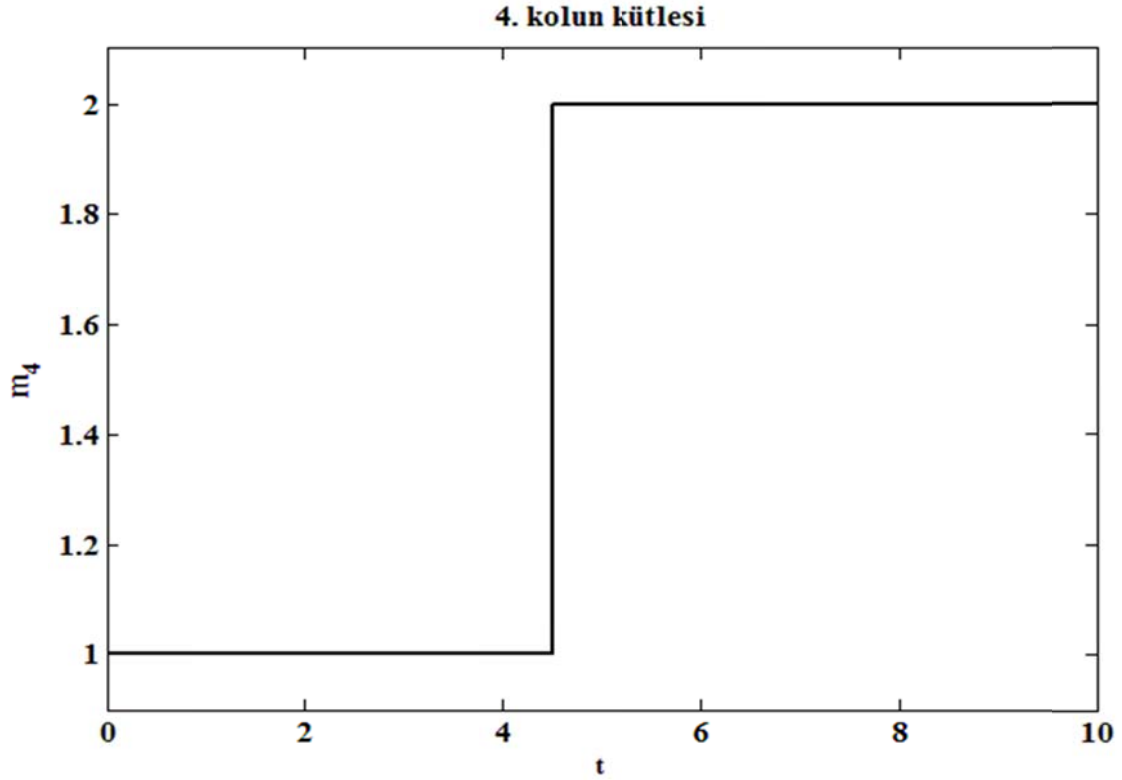
Bu çalışmada, sinirsel bulanık mantık tabanlı kayan kipli kontrolü (FNSMC) ve hesaplanan moment yöntemi ile sinirsel bulanık mantık tabanlı kayan kipli kontrolü (FNSMCTC) uygulanan dört serbestlik dereceli robot kolunun tek noktaya ulaşma, uzayda dört doğrusal hareket (5 nokta takibi) ve çembersel yörünge takibini başarılı bir şekilde gerçekleştirebildiği gösterilmiştir.

Robot kolunun dış etkilere maruz kalması durumunda kontrolörlerinin performanslarını değerlendirebilmek amacıyla önce bozucu sinyalsiz daha sonra dördüncü kol üzerine sırasıyla harici bir beyaz gürültü ve harici bir yük ekleme şeklinde bozucu tork uygulanmıştır. Eklenen bozucu yük ile birlikte dördüncü kolun ağırlık merkezine uygulanan toplam yük miktarındaki değişim, Şekil 8.1'de verilmiştir.

Yapılan yörünge analizleri, MATLAB Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan kontrolörlerin $P_i(1.5,0.0, 0.5)$ hareket başlangıç noktasından, $P_f(0.9, 0.7, 1.3)$ verilen bitiş noktasına doğru harekette robot kolunun uç işlevcisinin hedef noktaya varma performans ölçütleri; t_r cevap verme zamanı, M_p aşım oranı, t_s oturma zamanı ve e_{ss} kalıcı rejim hataları Tablo 8.1'deki gibi elde edilmiştir.

Tek nokta hedef hareketleri Şekil 8.1'den Şekil 8.6'ya kadar grafiklerde elde edilmiştir. Bozucu sinyalsiz uzayda doğrusal hareketler ve çembersel yörünge takibi Şekil 8.7 ve Şekil 8.10 arasındaki grafiklerde elde edilmiştir. Aynı şekilde bozucu sinyalli hedef ve yörünge hareketleri Şekil 8.11 ve Şekil 8.26 arasında gösterilmiştir.

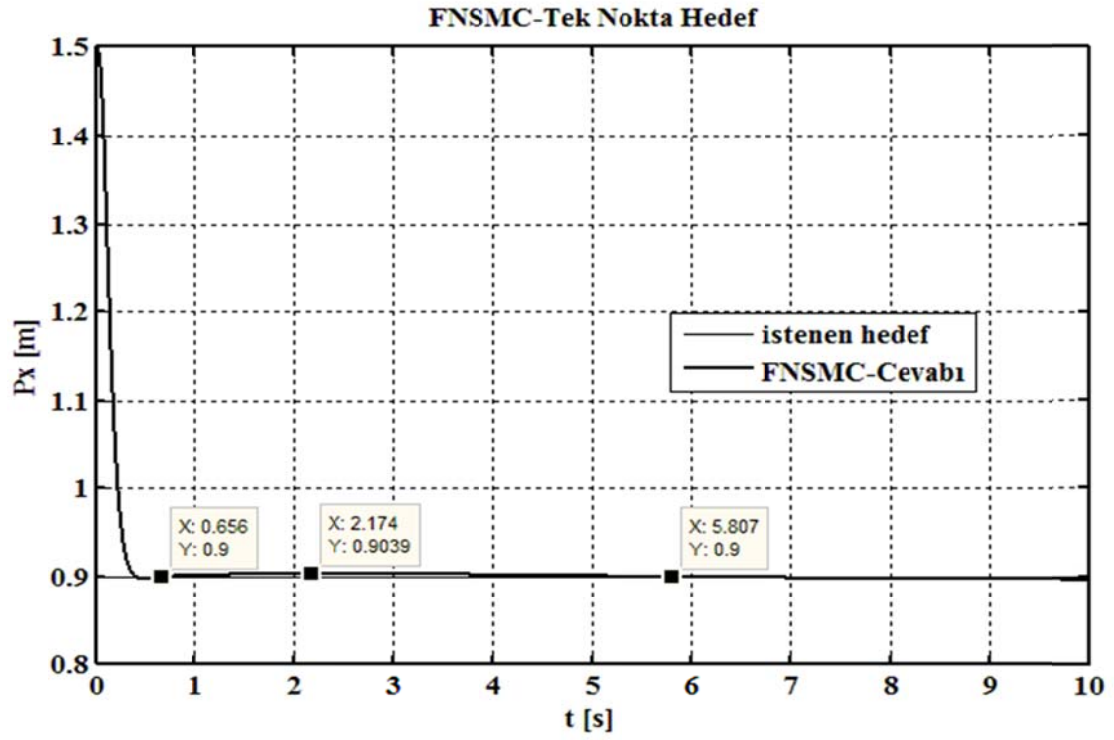
Elde edilen sonuçlar, hesaplanan moment yöntemi ile sinirsel bulanık mantık tabanlı kayan kipli kontrol uygulamasının, bozucu etkileri elimine etme konusunda çok daha başarılı olduğunu gözlenmiştir.



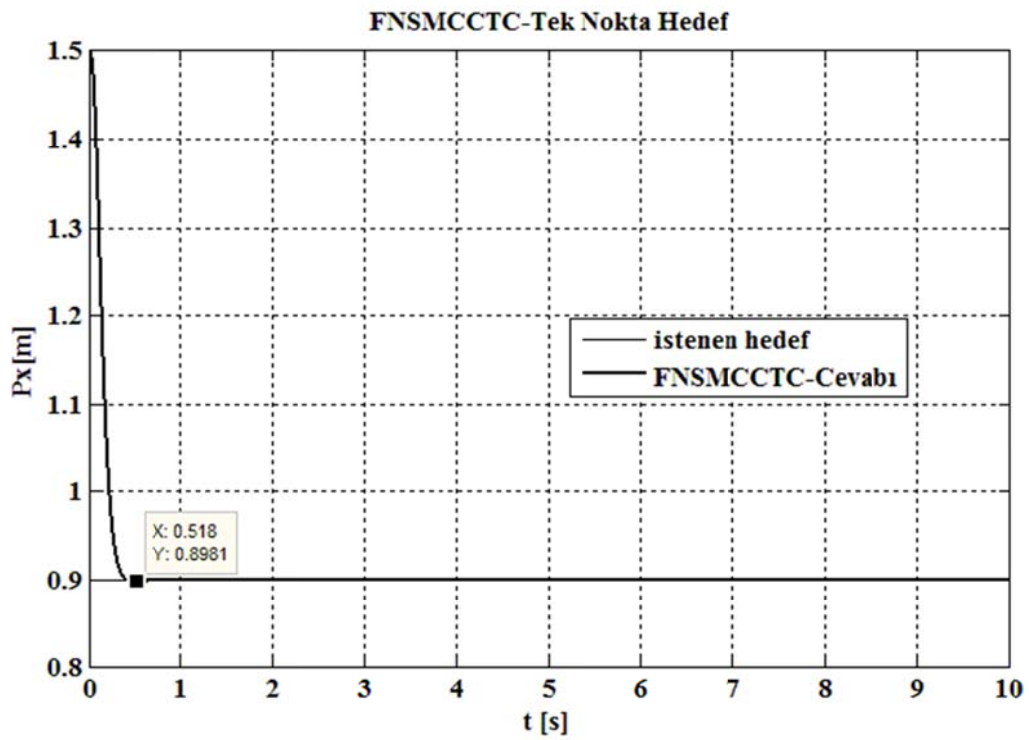
Şekil 8.1. Dördüncü kolun ağırlık merkezine bozucu yük ilave edilmesi durumunda dördüncü kolun toplam kütleinin zamana bağlı olarak değişimi.

Tablo 8.1. Tek nokta hedefe ulaşmada kontrolör performanslarının karşılaştırılması.

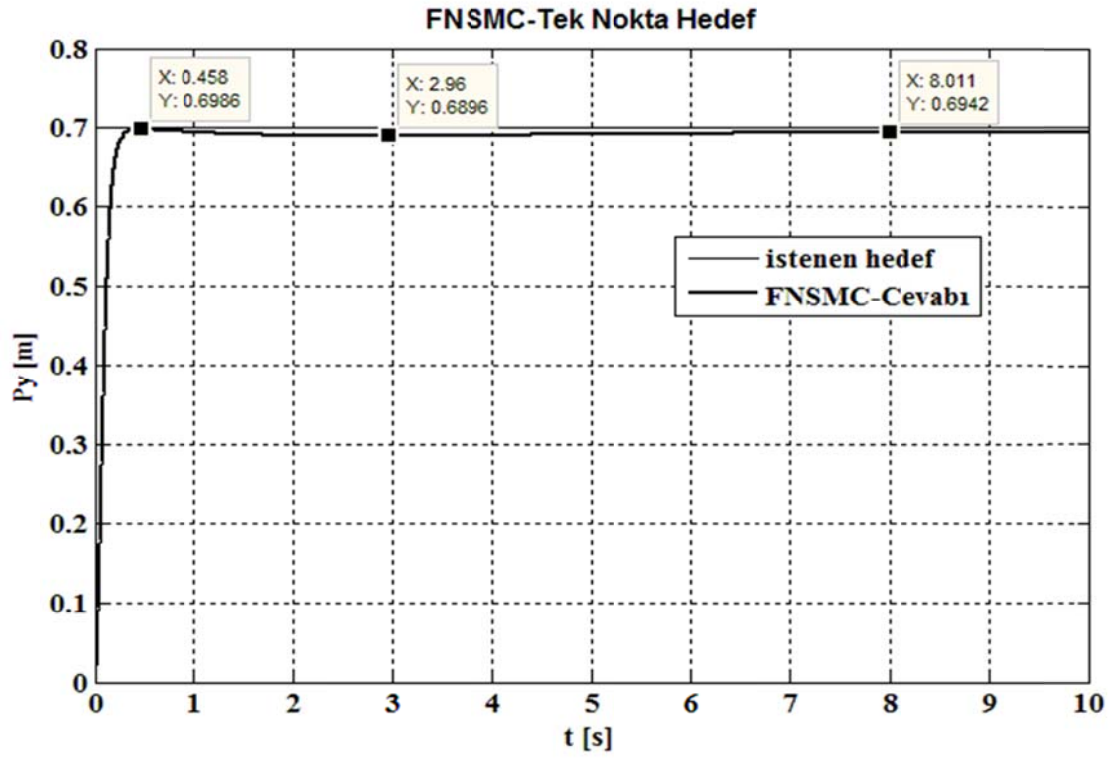
| Px için Kontrolör Performanslarının Karşılaştırılması | | | | | |
|--|--|-----------|-----------|-----------|----------------|
| Kontrolör | Başlangıç-Bitiş Konumları | t_r [s] | M_p (%) | t_s [s] | e_{ss} [rad] |
| FNSMC | $P_i=(1.5, 0.0, 0.5)$ $P_f=(0.9, 0.7, 1.3)$ | 0.46 | 0.22 | 0.65 | 0.003 |
| FNSMCCTC | | 0.45 | 0.22 | 0.45 | 0.00065 |
| Py için Kontrolör Performanslarının Karşılaştırılması | | | | | |
| Kontrolör | Başlangıç-Bitiş Konumları | t_r [s] | M_p (%) | t_s [s] | e_{ss} [rad] |
| FNSMC | $P_i=(1.5, 0.0, 0.5)$ $P_f=(0.9, 0.7, 1.3)$ | 0.42 | 0 | 0.42 | 0.005 |
| FNSMCCTC | | 0.4 | 0 | 0.4 | 0.0005 |
| Pz için Kontrolör Performanslarının Karşılaştırılması | | | | | |
| Kontrolör | Başlangıç-Bitiş Konumları | t_r [s] | M_p (%) | t_s [s] | e_{ss} [rad] |
| FNSMC | $P_i=(1.5, 0.0, 0.5)$ $P_f=(0.9, 0.7, 1.3)$ | 0.45 | 0 | 0.45 | 0.0075 |
| FNSMCCTC | | 0.45 | 0 | 0.45 | -0.00175 |



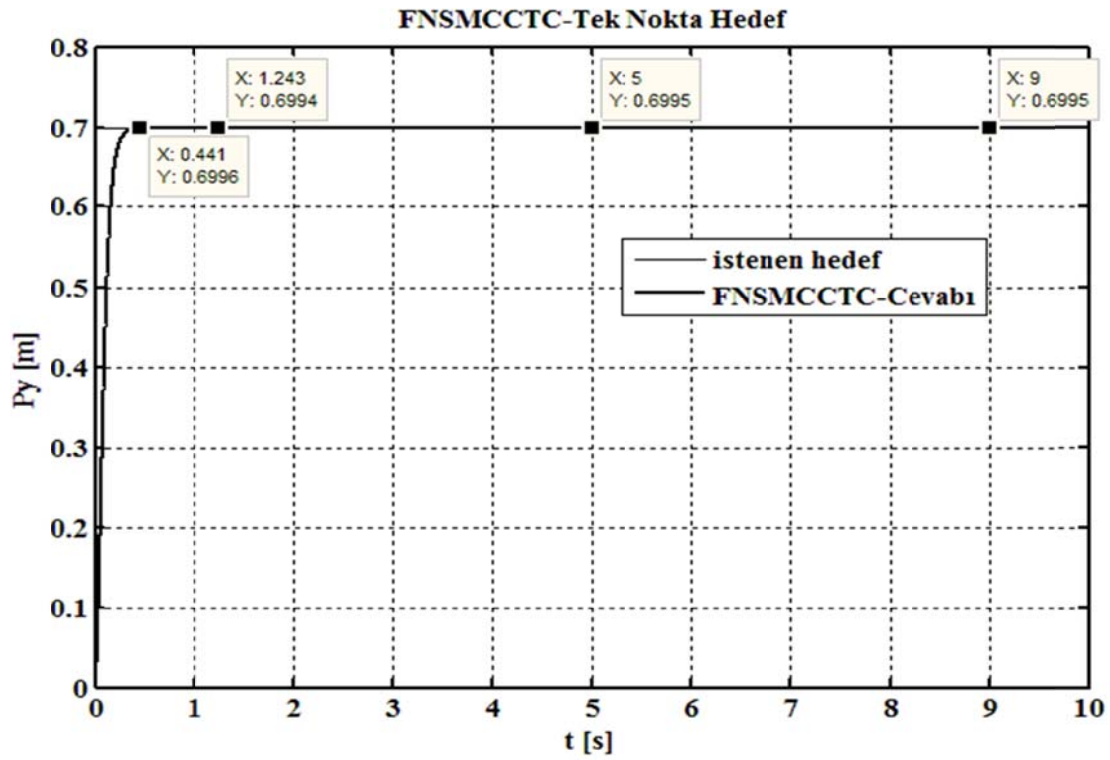
Şekil 8.2. FNSMC ile Px hedefine ulaşma.



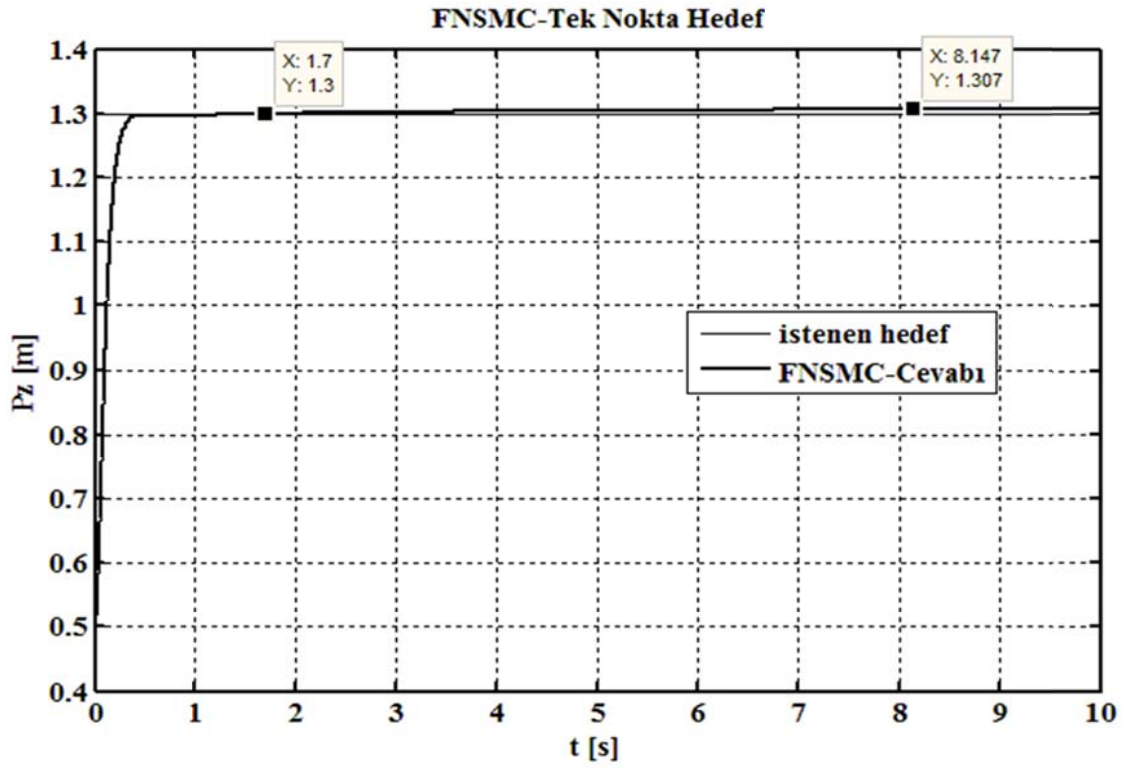
Şekil 8.3. FNSMCCTC ile Px hedefine ulaşma.



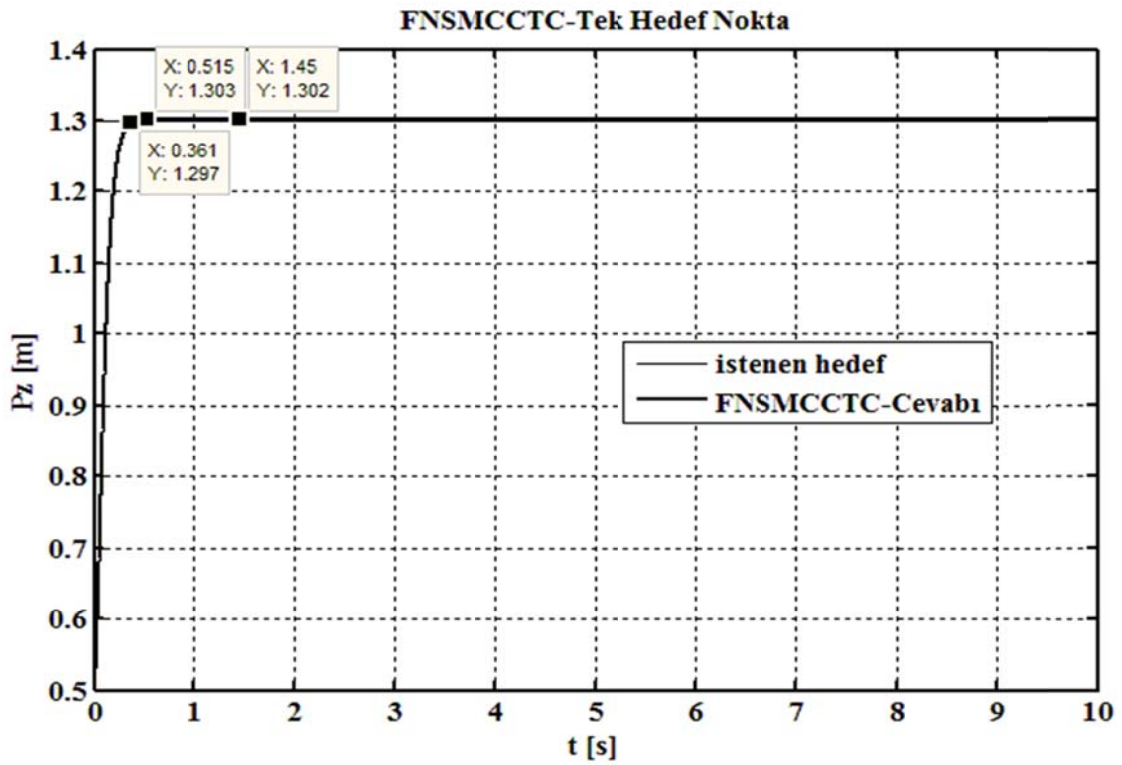
Şekil 8.4. FNSMC ile Py hedefine ulaşma.



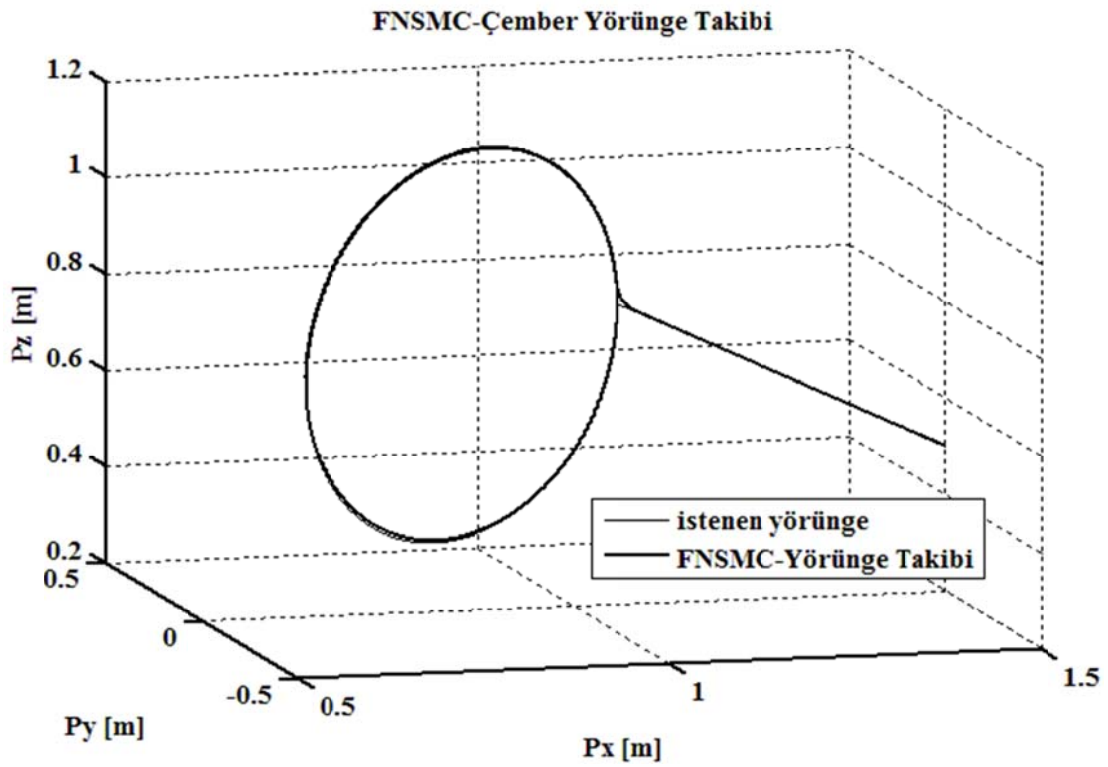
Şekil 8.5. FNSMCCTC ile Py hedefine ulaşma.



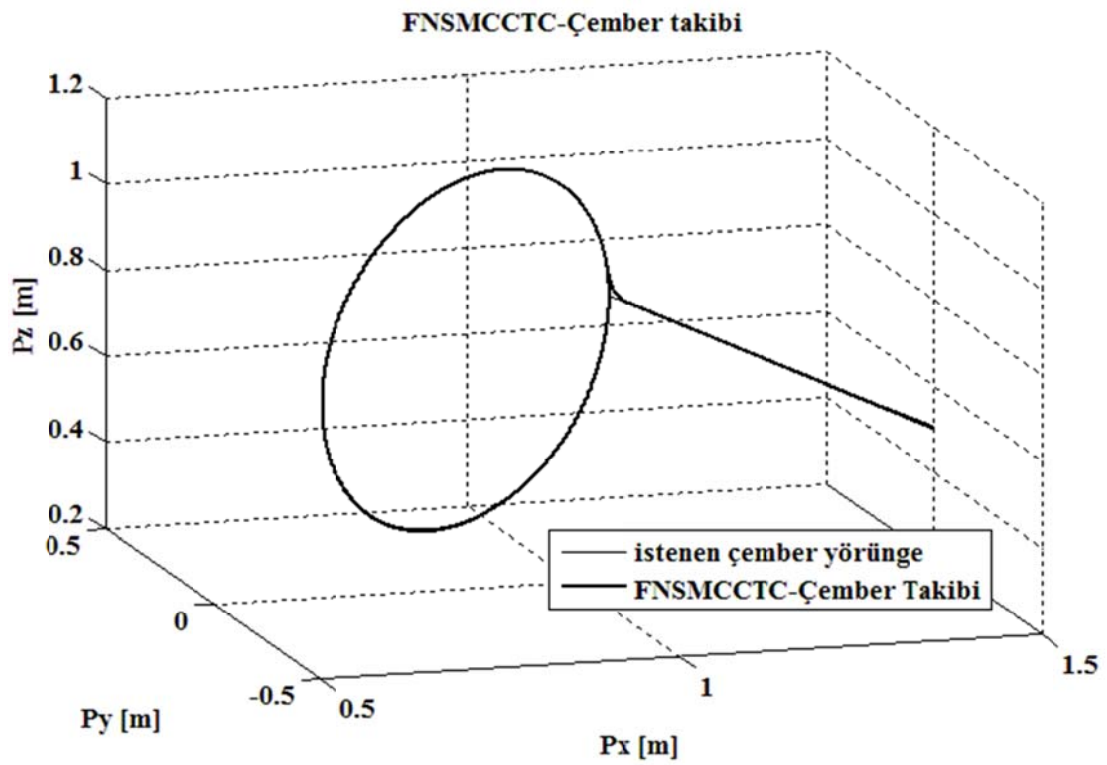
Şekil 8.6. FNSMC ile P_z hedefine ulaşma.



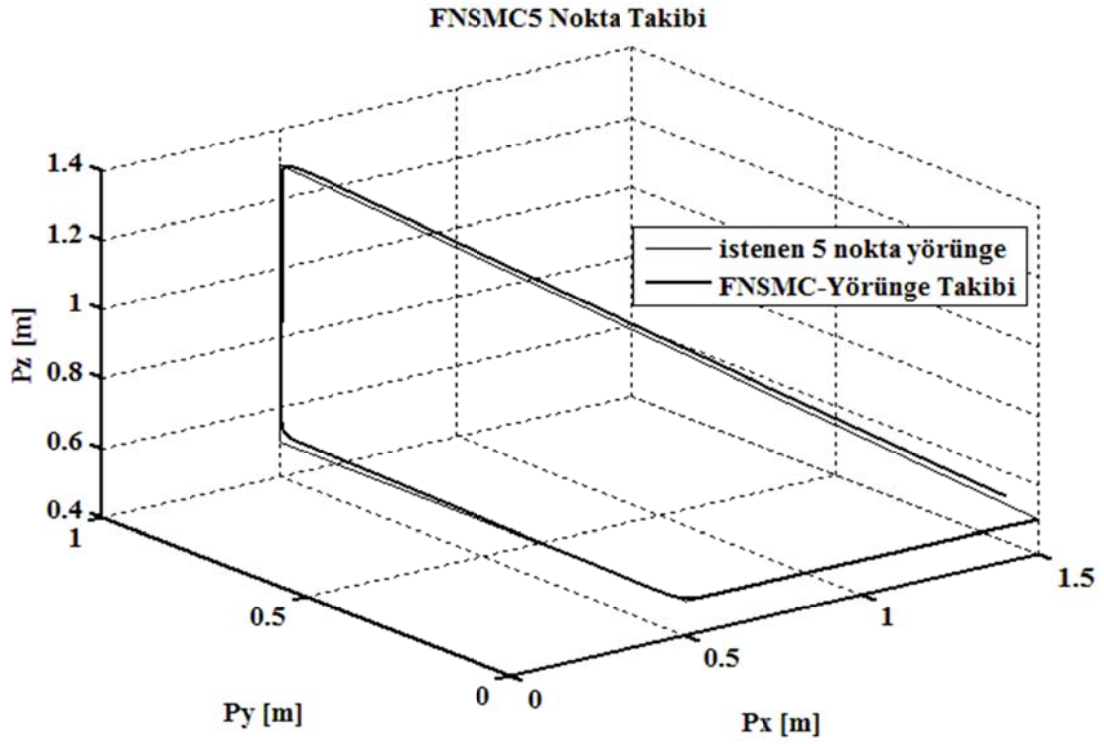
Şekil 8.7. FNSMCCTC ile P_z hedefine ulaşma.



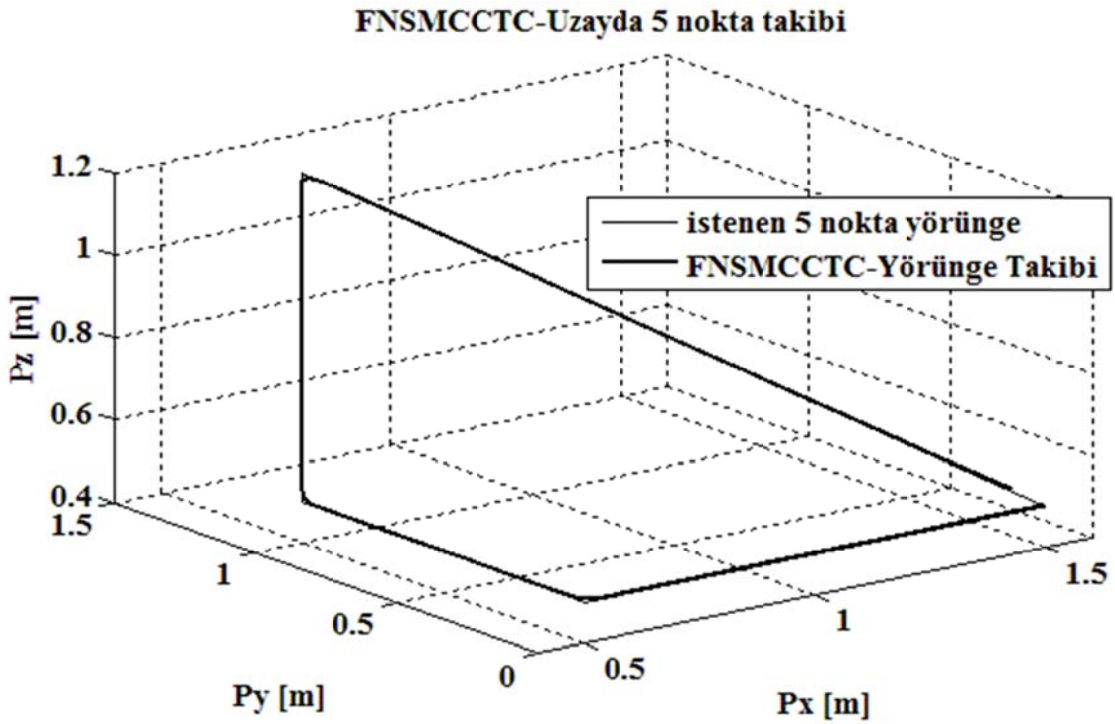
Şekil 8.8. FNSMC ile bozucu sinyalsiz çembersel yörünge takibi.



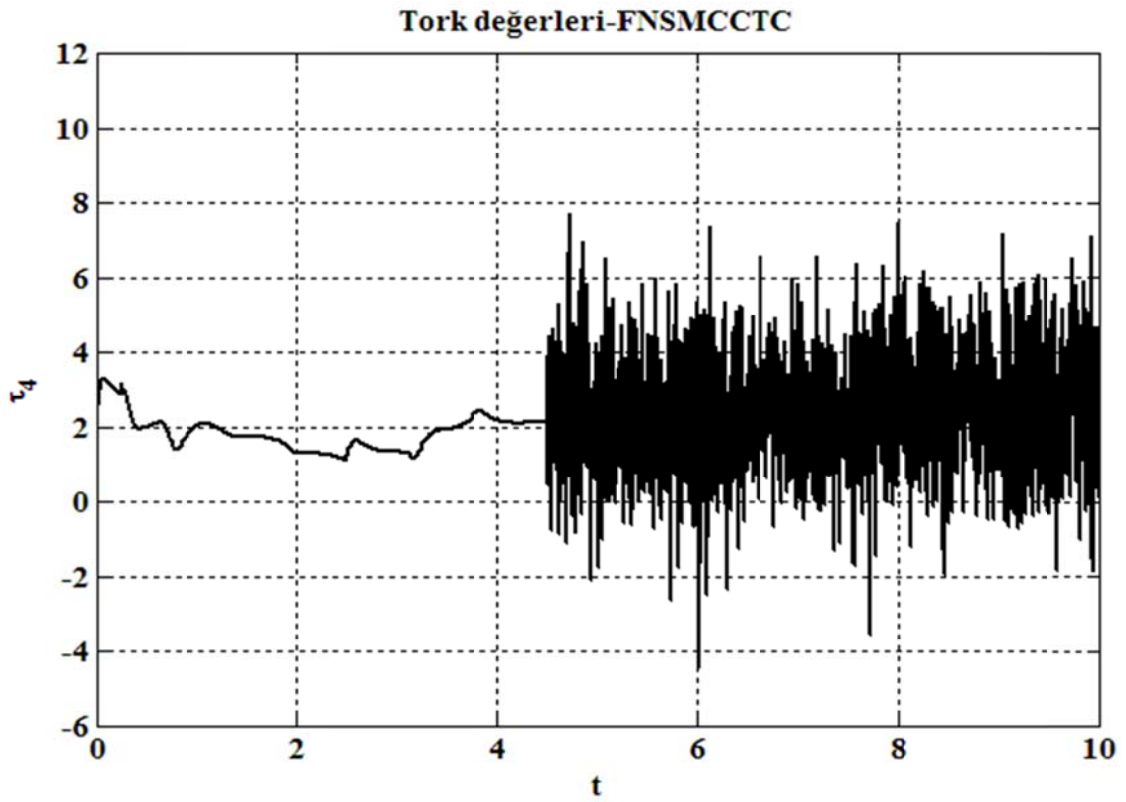
Şekil 8.9. FNSMCCTC ile bozucu sinyalsiz çembersel yörünge takibi.



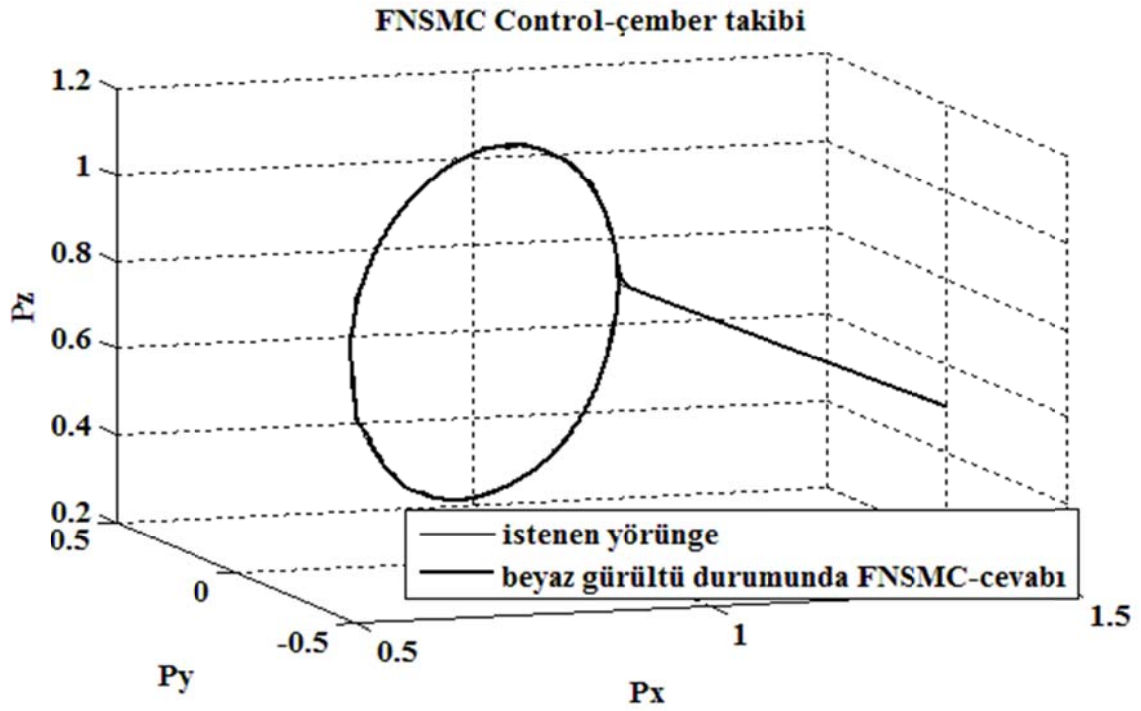
Şekil 8.10. FNSMC ile bozucu sinyalsiz uzayda doğrusal yörünge.



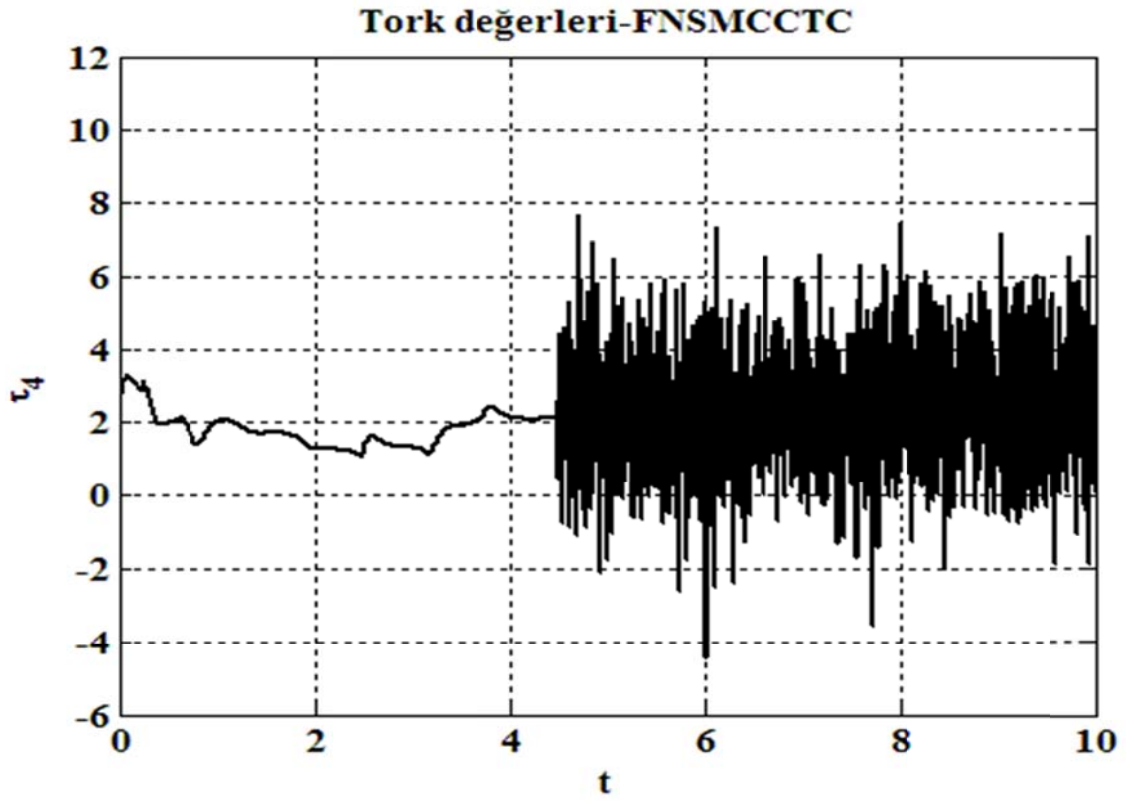
Şekil 8.11. FNSMCCTC ile bozucu sinyalsiz uzayda doğrusal yörünge.



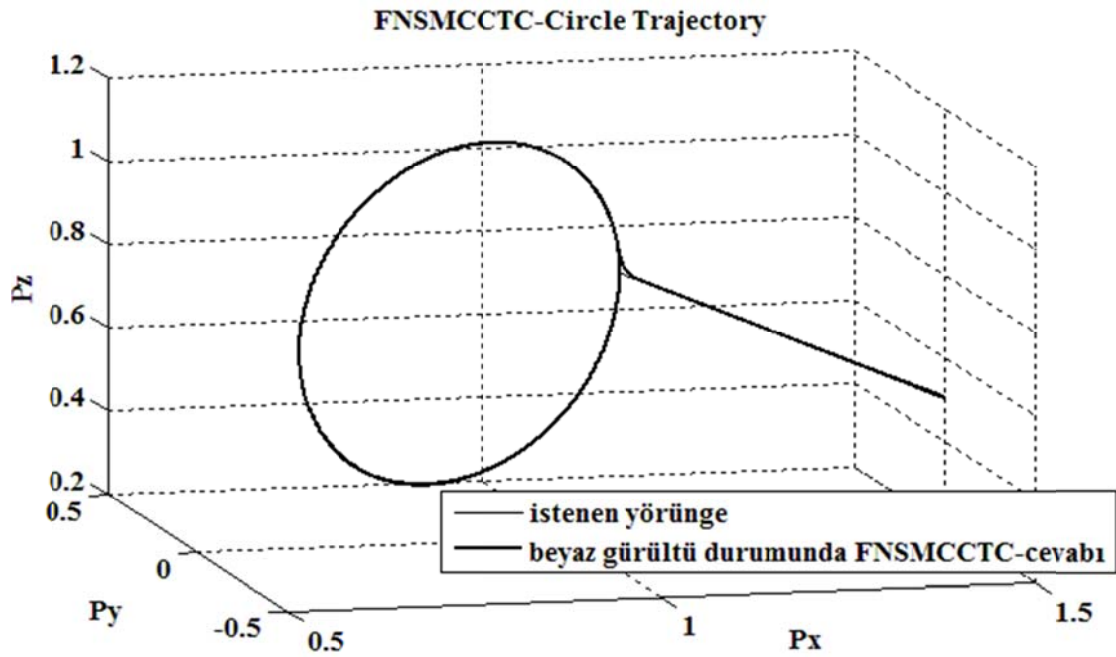
Şekil 8.12. FNSMC ile çembersel yörünge takibinde beyaz gürültü tork değerleri.



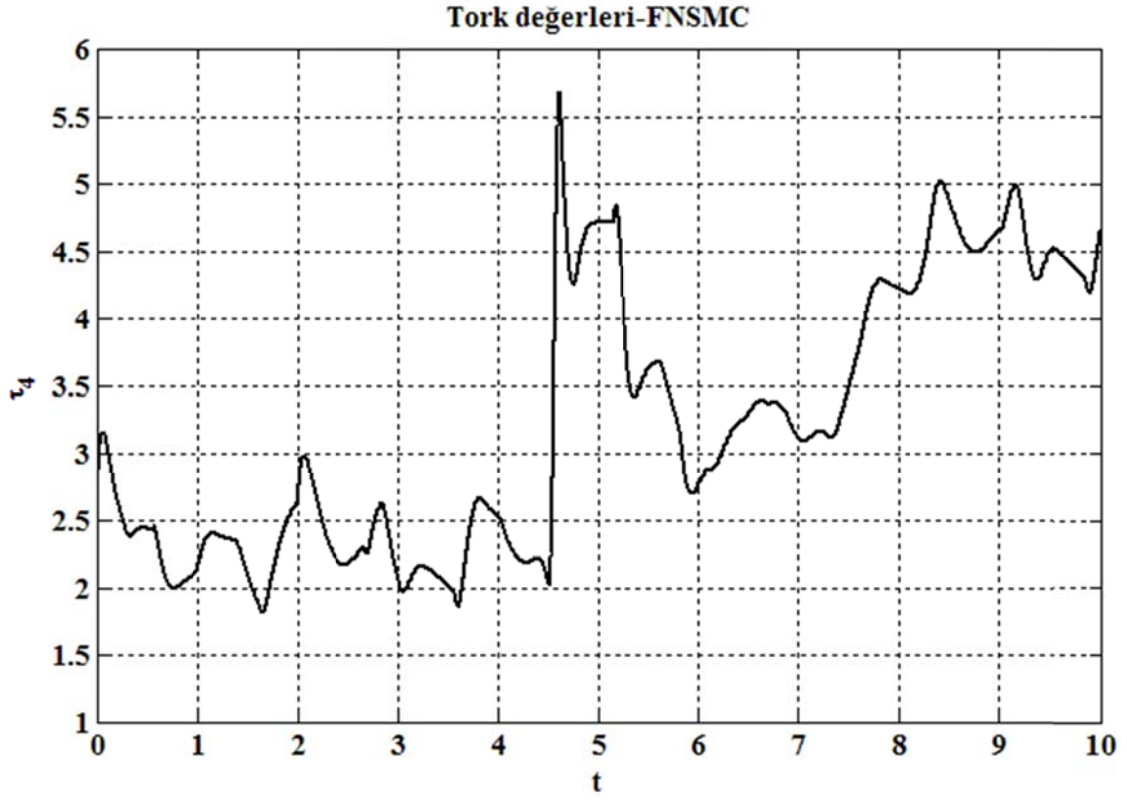
Şekil 8.13. FNSMC ile beyaz gürültü altında çembersel yörünge takibi.



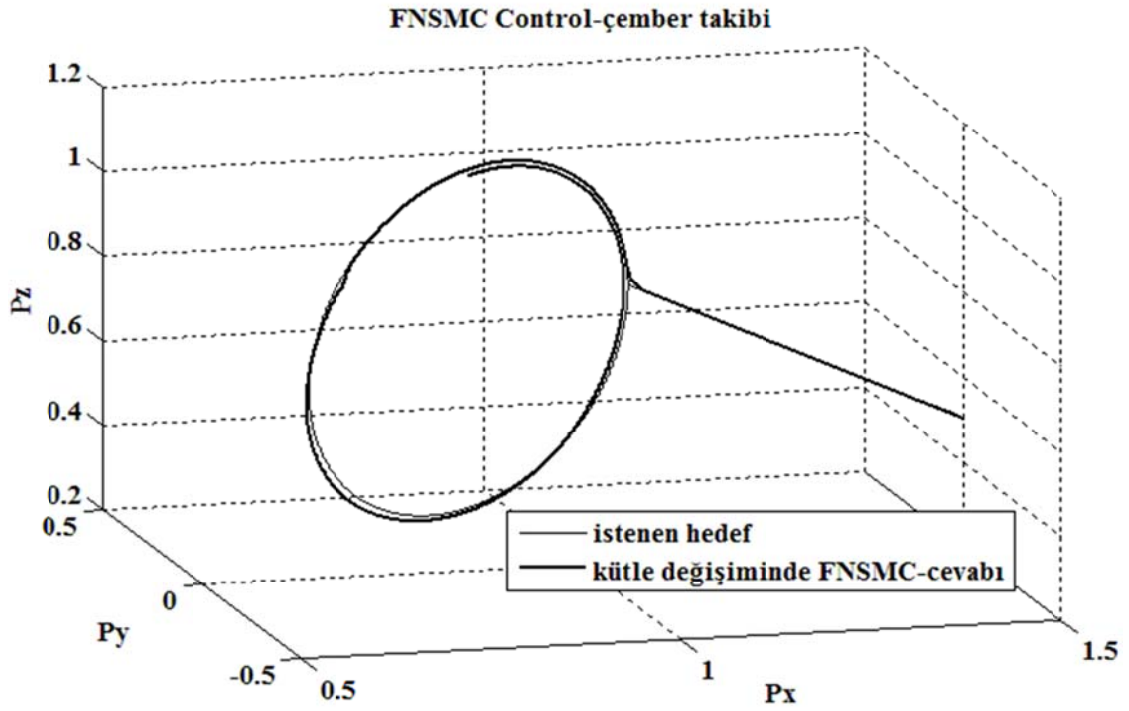
Şekil 8.14. FNSMCCTC ile çembersel yörünge takibinde beyaz gürültü tork değerleri.



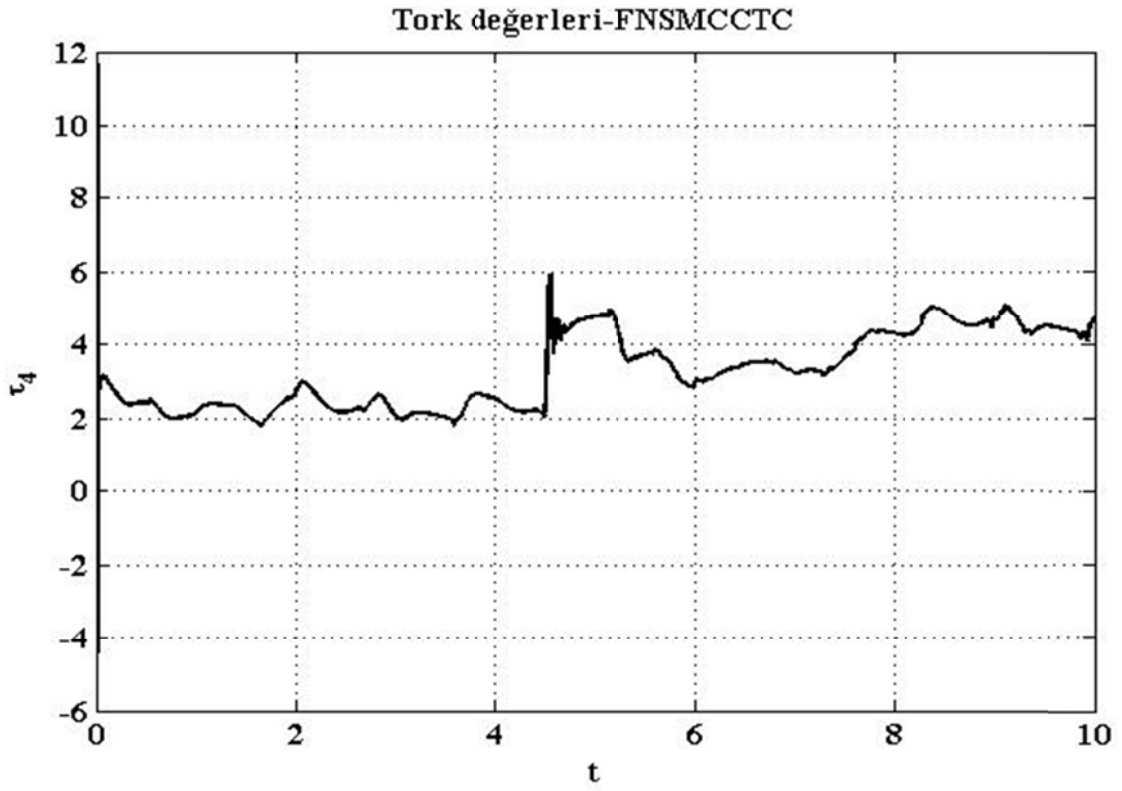
Şekil 8.15. FNSMCCTC ile beyaz gürültü altında çembersel yörünge takibi.



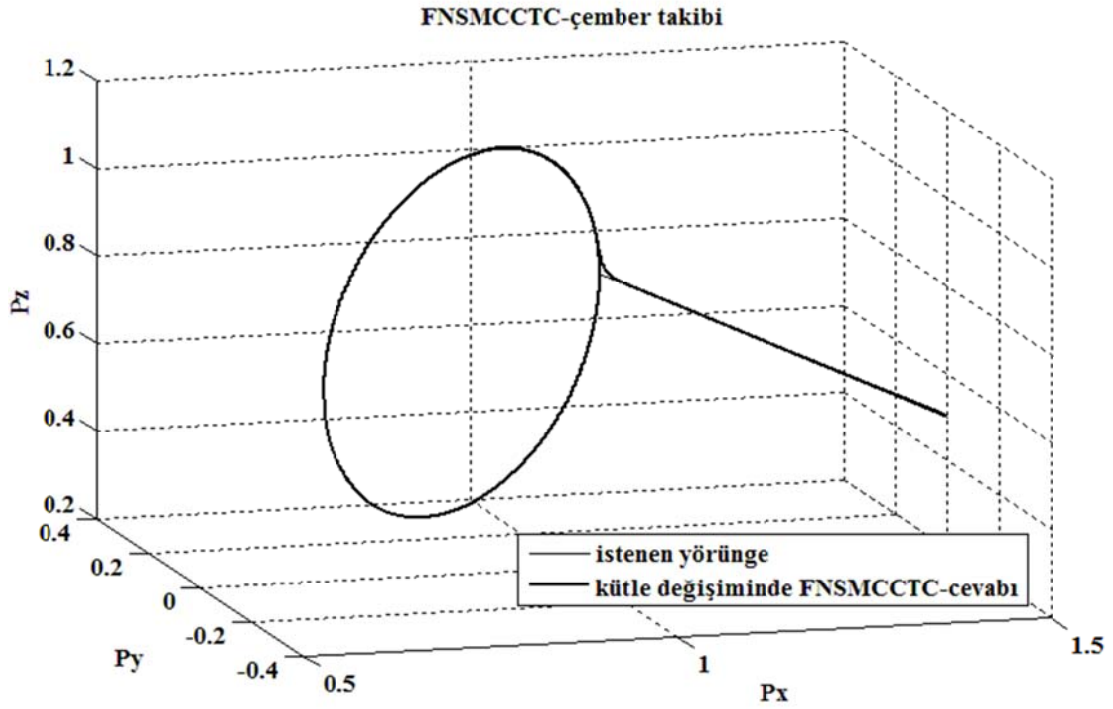
Şekil 8.16. FNSMC ile çembirsel yörünge takibinde ağırlık değişimiyle uygulanan tork değerleri.



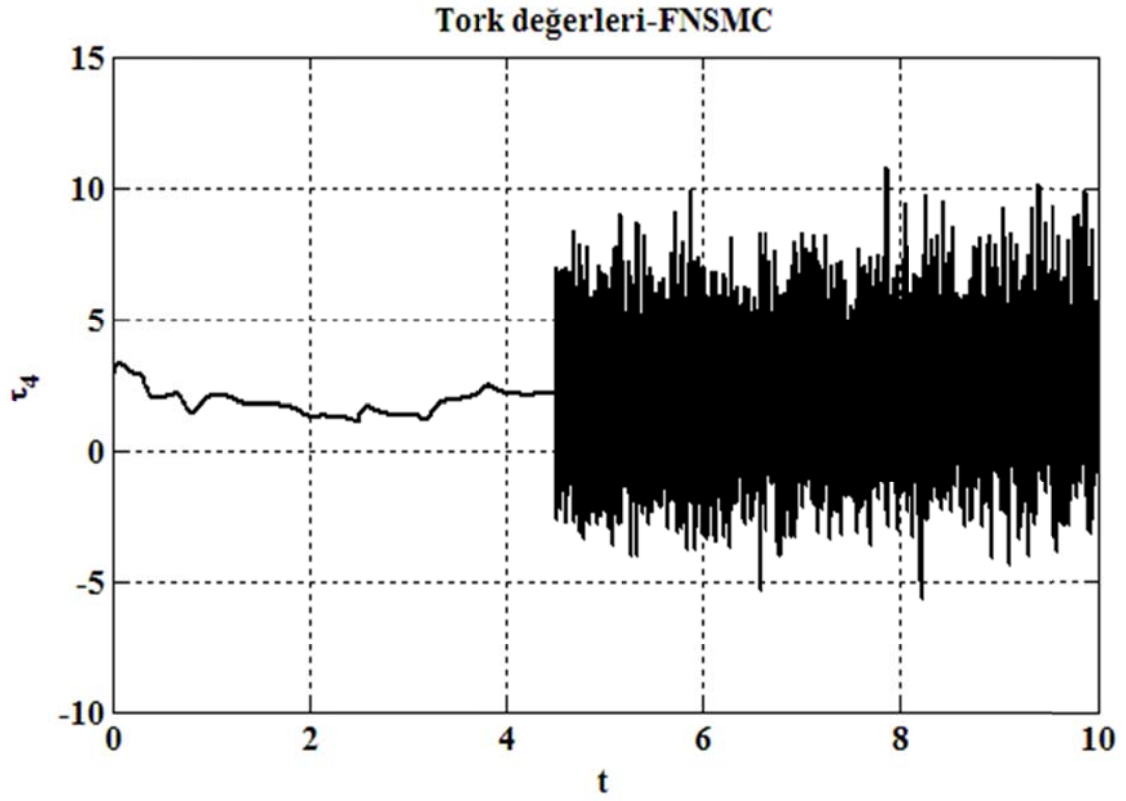
Şekil 8.17. FNSMC ile ağırlık değişimi altında çembirsel yörünge takibi.



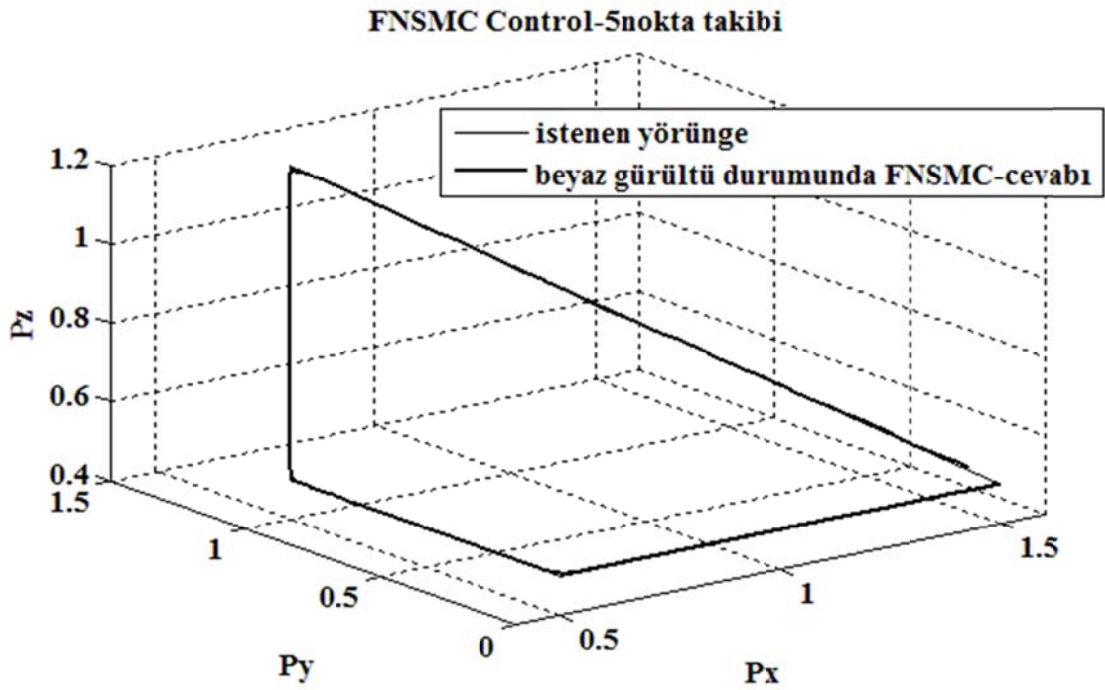
Şekil 8.18. FNSMCCTC ile çemberseel yörünge takibinde ağırlık değişimiyle uygulanan tork değerleri.



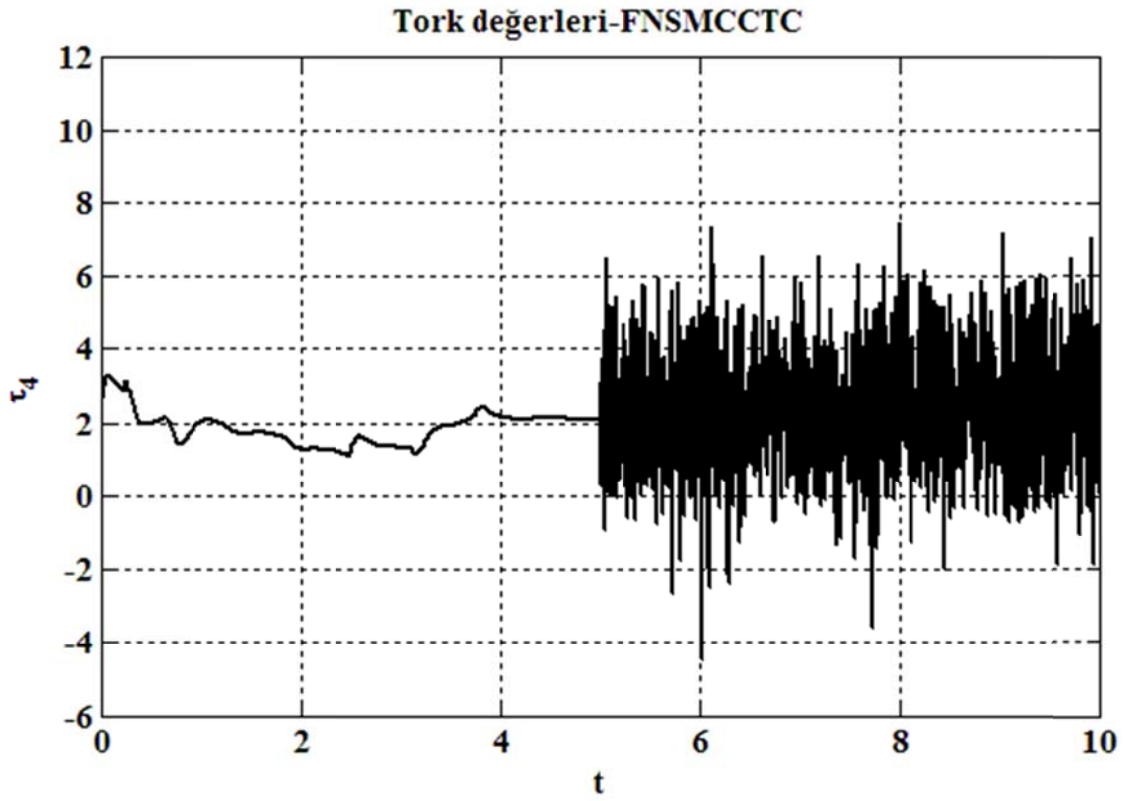
Şekil 8.19. FNSMCCTC ile ağırlık değişimi altında çemberseel yörünge takibi.



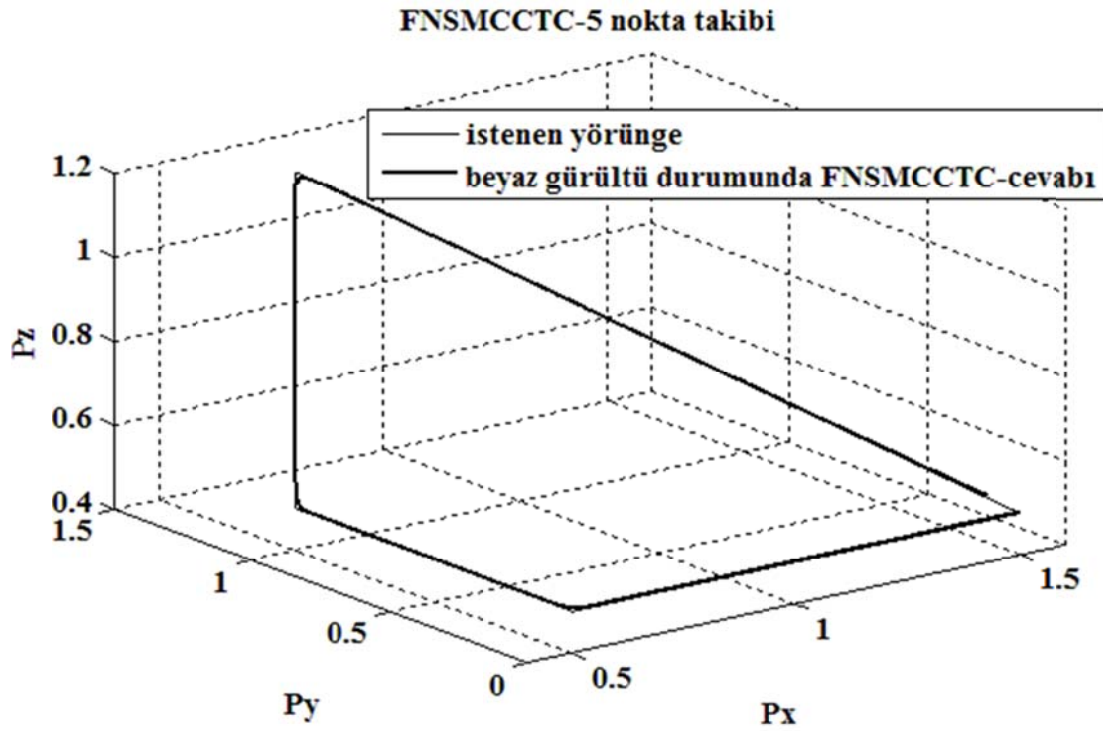
Şekil 8.20. FNSMC ile uzayda doğrusal yörünge takibinde beyaz gürültü tork değerleri.



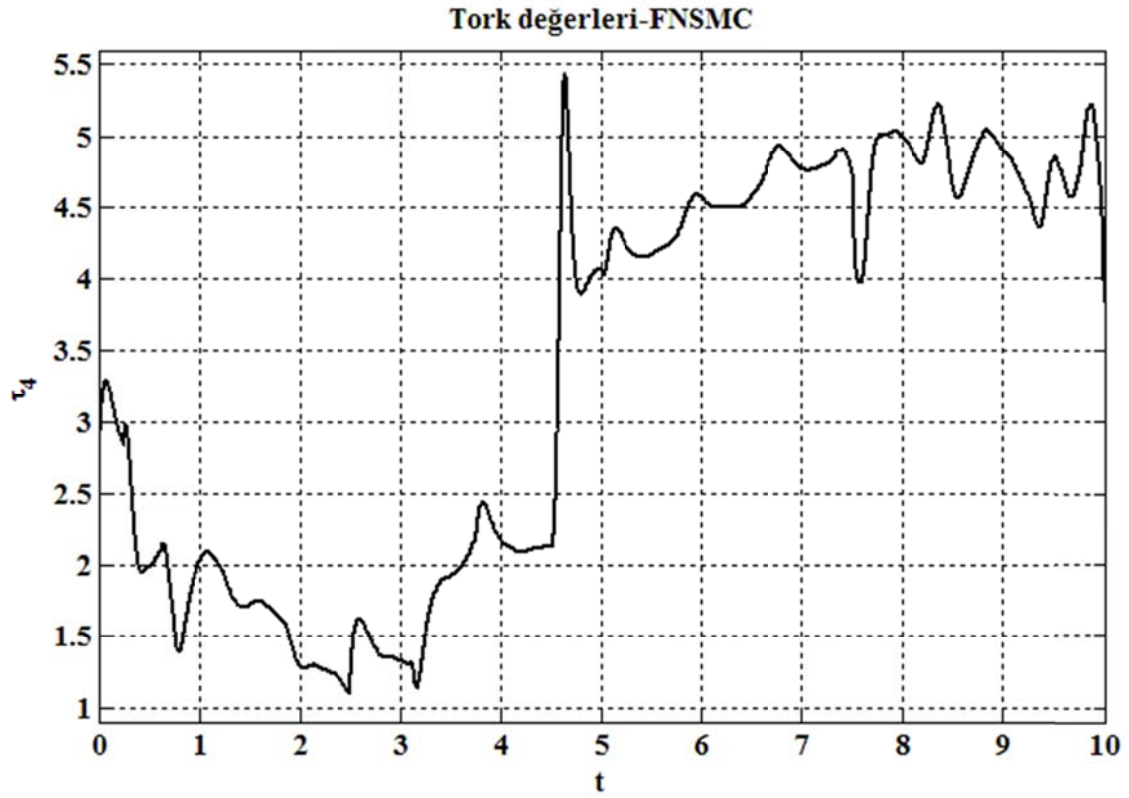
Şekil 8.21. FNSMC ile beyaz gürültü altında uzayda doğrusal yörünge takibi.



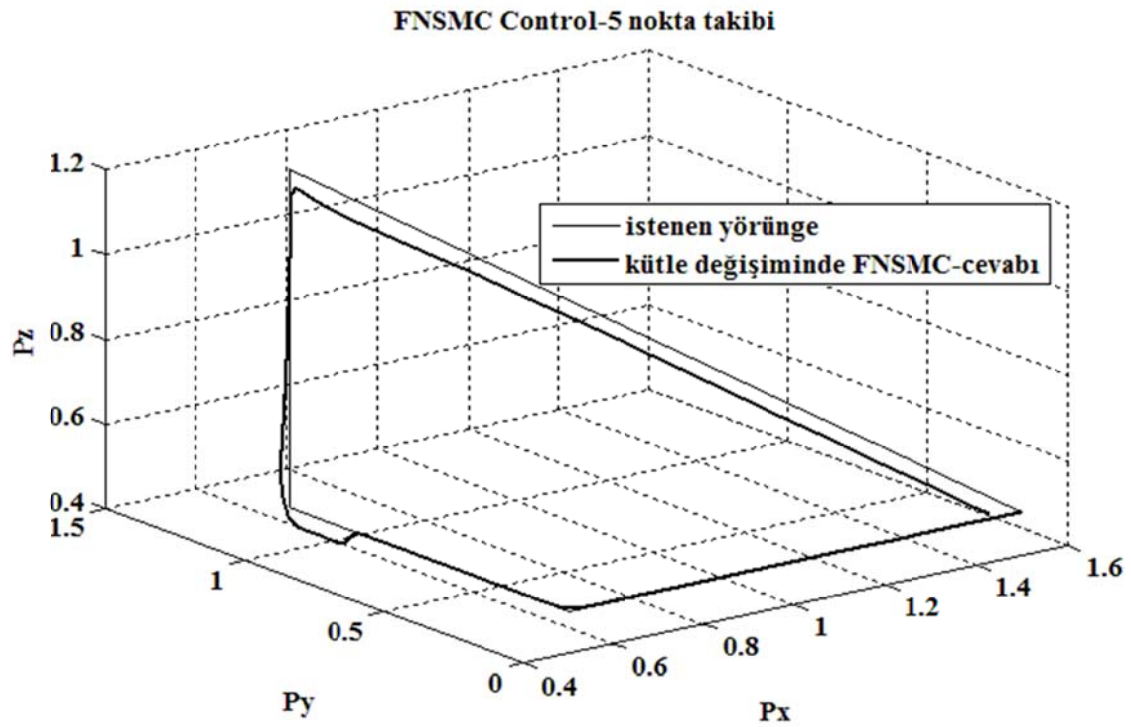
Şekil 8.22. FNSMCCTC ile uzayda doğrusal yörünge takibinde beyaz gürültü tork değerleri.



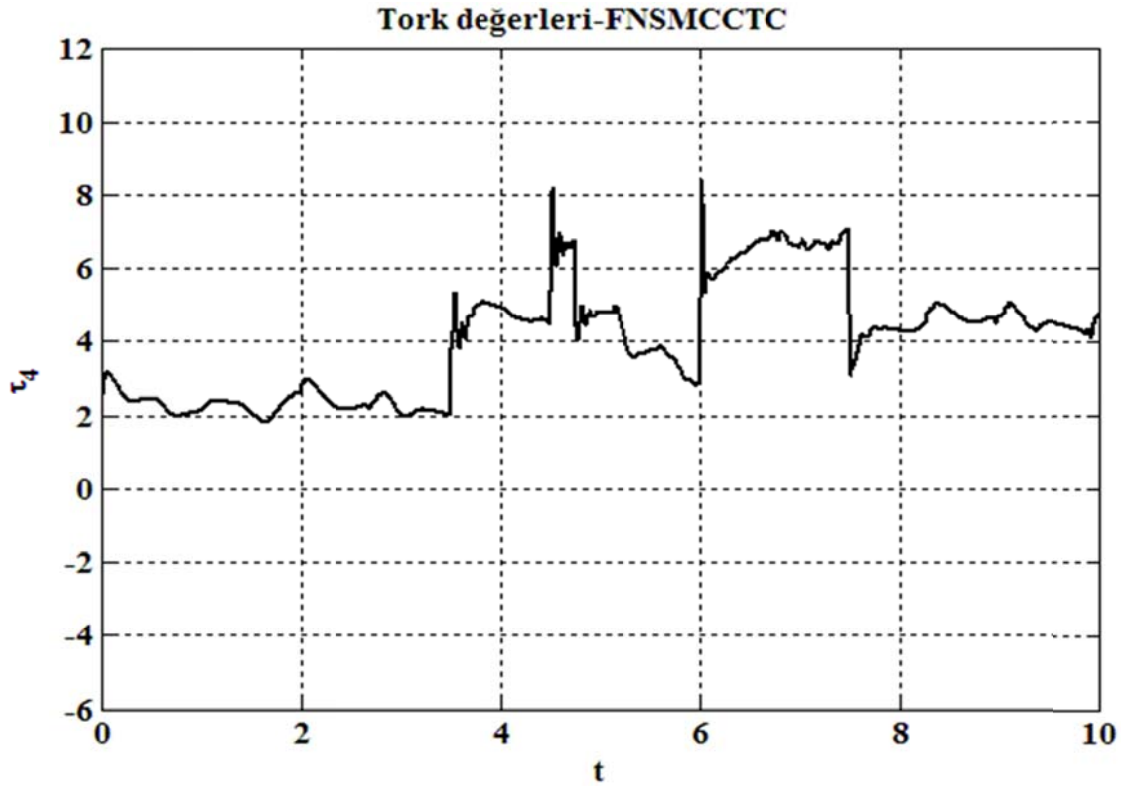
Şekil 8.23. FNSMCCTC ile beyaz gürültü altında uzayda doğrusal yörünge takibi.



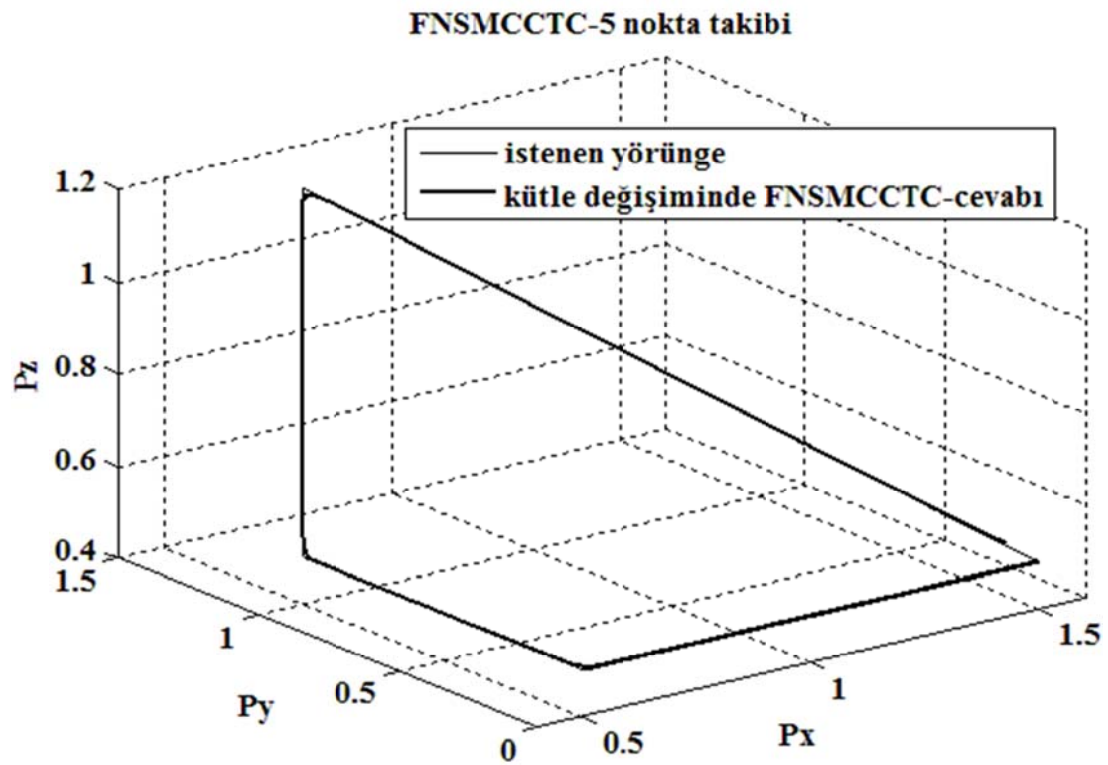
Şekil 8.24. FNSMC ile uzayda doğrusal yörünge takibinde ağırlık değişimiyle tork değerleri.



Şekil 8.25. FNSMC ile ağırlık değişimi altında uzayda doğrusal yörünge takibi.



Şekil 8.26. FNSMCCTC ile uzayda doğrusal yörünge takibinde ağırlık değişimiyle tork değerleri.



Şekil 8.27. FNSMCCTC ile ağırlık değişimi altında uzayda doğrusal yörünge takibi.

BÖLÜM 9. SONUÇ ve İLERİ ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, dört serbestlik dereceli bir robot kolunun sinirsel bulanık mantık tabanlı kayan kipli kontrol ve hesaplanmış moment yöntemi ile sinirsel bulanık mantık tabanlı kayan kipli kontrol uygulaması gerçekleştirilmiş ve simülasyon sonuçları grafiksel olarak sunulmuştur. Simülasyon sonuçları incelendiğinde her iki kontrol yönteminin verilen bir yörüngeyi takip etmede oldukça başarılı olduğu saptanmıştır.

Verilen bir noktaya ulaşma olarak gerçekleştirilen simülasyon çalışması her iki kontrolörün de robot kolunun istenen noktaya kısa bir süre içerisinde ve aşımaya yol açmayacak şekilde ulaşmasında etkili olduğunu göstermiştir. Ancak tek noktaya ulaşma performans tablosu incelendiğinde, her ne kadar oturma zamanı kısa olsa da FNSMC kontrolörünün kalıcı hatayı sıfıra yakınsama konusunda FNSMCCTC kontrolörüne göre daha başarısız olduğu görülebilmektedir. FNSMCCTC kontrolörünün ise oturma zamanından sonraki hedef takip aşamasında hatayı sürekli olarak minimum seviyede tutabildiği görülmektedir.

Daire ve 3 boyutlu lineer hareketin (5 nokta takibi) tek nokta hedefinden farkı, referans girdilerin simülasyon boyunca sürekli olarak değişkenlik göstermesi ve hatanın minimize edilme işleminin daha zor olmasıdır. Bu tür yörünge takiplerinde, kontrolörün kendini değişken yapıya adapte edebilme yetenekleri öne çıkmaktadır.

Dairesel yörünge takibi simülasyon sonuçları incelendiğinde sisteme dışarıdan bir bozucu sinyalin etki etmediği durumlarda her iki kontrolörün de birbirine yakın ve çok iyi takip sonuçları sergilediğini göstermiştir. 3 boyutlu lineer yörünge takibinde ise FNSMCCTC'nin, FNSMC'den daha başarılı ve referans yörüngeyi daha iyi takip edecek şekilde sonuçlar verdiği görülebilmektedir.

Dinamik sistemler, yerine getirilmesi istenen görevlere göre farklı ortamlarda, farklı şartlarda ve farklı yükler altında çalışabilmekte ve çoğunlukla bozucu sinyal gibi davranan dış etkilere maruz kalmaktadırlar. Bu sebeple robot manipülatörlerinin, bozucu etkilere karşı dayanıklılık göstermesi ve bozucu etkileri bertaraf ederek yörünge takibini kabul edilebilir limitler içerisinde tamamlaması istenir. Bu amaçla robot kontrolörlerinin tasarlanmasında bozucu etkilere karşı dayanıklılık, robot kontrolünde önemli bir rol oynamaktadır.

Dairesel ve 3 boyutlu doğrusal yörünge takiplerinde kontrolörlerin bozucu etkilere karşı performansını değerlendirebilmek amacıyla dördüncü kol üzerine harici bir yük yüklenmiş ve dördüncü kolu hareket ettiren motora beyaz gürültü şeklinde bozucu bir sinyal eklenmiştir. Bozucu etkiler dahilinde yapılan analizler, beyaz gürültü altında her iki kontrolöründe bozucu etkilere karşı oldukça başarılı bir şekilde cevap verdiği, ancak FNSMCCTC kontrolörünün bu dış etkilere karşı FNSMC kontrolörüne nispetle daha başarılı olduğunu göstermektedir. Harici yük eklenmesi durumunda ise robot kolunun FNSMC kontrolü altında istenen yörüngeden çok az da olsa saptığı, FNSMCCTC kontrolünde ise yine dış yüklerden kaynaklanan etkilere karşı başarılı bir şekilde cevap verdiği gözlenmiştir. Yapılan tüm analizler her iki kontrolörün de çok iyi yörünge takibi performansı sergileyebildiğini, ancak FNSMCCTC kontrolörünün hem hareket takibinde ve hem de dış etkilere karşı koymada FNSMC'ye göre daha başarılı olduğunu göstermiştir.

FNSMC ve FNSMCCTC kontrolörleri yörünge takibinde ideal olarak kullanılacak kontrol yöntemleridirler. Ayrıca, dış etkilere karşı koymada oldukça başarılıdırlar. Ancak bu tür kompleks kontrol yapıları, uygulamada da aynı şekilde karmaşık ve gelişmiş bilgisayar ve kontrol ünitelerinin kullanımını da zorunlu kılmaktadır. Bu da kontrol aşamasında maliyetleri arttırıcı sonuçlar doğurmaktadır.

Kayan kipli kontrolörün, literatürde sık olarak tercih edilen PID ve bulanık mantık kontrolörü ile iyileştirilmesi, elde edilecek sonuçların, bu çalışmada elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılması ve kabul edilebilir yörünge takip performansı sergileyebilecek daha az kompleks bilgisayar ve kontrol ünitelerinin kullanımını gerektiren, daha az maliyetli kontrol sistemlerinin tasarlanmasını sağlayacak çalışmalara gereksinim vardır.

KAYNAKLAR

- [1] JACAK, W., Intelligent Robotic Systems, Design, Planning and Control, Kluwer Academic Publishers, New York, 2002.
- [2] TIM, N. and SUMEDHA, W., Artificial Intelligence – An Introduction to Robotics, 2003.
- [3] BOB, W., An Introduction to Robotics, Mechanical Engineering, Ohio University, 2003.
- [4] BİNGÜL, Z. ve KÜÇÜK,S., Robot Tekniği-I, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2005.
- [5] LEWIS, F.L., Mechanical Engineering Handbook-Robotics, CRC Pres, 1999.
- [6] DAILEY, D. J., Small Computer Theory and Applications, McGraw Hill Book Co., International Edition, Singapore, 1988.
- [7] KUNTALP, M. ve İNAN, Z.H., İki Eklemlili Bir Robot Kolunun Yapay Sinir Ağları ve Bulanık Mantık Tabanlı İki Denetleyici Tarafından Kontrolü, Dokuz Eylül Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Buca, İzmir, 2002.
- [8] AKBAŞ, E. ve ESİN, M.E., A Simulational Comparison of Intelligent Control Algorithms on Direct Drive Manipulator, Robotics and Autonomous Systems 49, pp. 235-244, 2004.
- [9] CANBERİ, O., Bulanık Yapay Sinir Ağıyla Model Referans Robot Denetimi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Doktora Tezi, 2002
- [10] ALBAYRAK, M., Üç Boyutlu Uzayda Hareket Edebilen Robot Kolun, Bilgisayar Destekli Kontrolü, Tasarımı ve Uygulaması, Gazi Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 1997.
- [11] SÖNMEZ, M., NİL, M., YÜZGEÇ, U. ve KANDİLLİ, İ., Üç Serbest Dereceli Endüstriyel Bir Robotun Yapay Sinir Ağları ile Denetimi, Kocaeli Üniversitesi, KMYO. Endüstriyel Elektronik Bölümü, Kocaeli.
- [12] HACIOĞLU, Y., Bir Robotun Bulanık Mantıklı Kayan Kipli Kontrolü, İstanbul Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 2004.

- [13] KÖKER, R., ÖZ, C., ÇAKAR, T. ve EKİZ, H., A Study of Neural Network Based Inverse Kinematics Solution for a Three Joint Robot, Robotics and Autonomous Systems, 2003.
- [14] ÖZTÜRK, S., Scara Tipi Robotun Yapay Sinir Ağları ile Eğitilmesi, Sakarya Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 2007.
- [15] BAYRAK, A., BeşEksenli Bir Robot Kolunun Simülasyonu ve Kontrolü, Gazi Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 2007.
- [16] BEYKONT, C., Bir Hidrolik Robotun Kinematik Kompanzasyonu ve Yapay Sinirsel Ağ ile İleri Beslemeli Bulanık Mantık Kontrolü, İstanbul Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 2007.
- [17] DURMAZ, U., Bir Robot Kolunun Sinirsel Bulanık Kontrolü, Sakarya Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 2007.
- [18] ALTINORAK, S., İki Ayak Robot Modellemesi Denetleyici Tasarımı ve Dinamik Benzetimi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 2006.
- [19] ÖZBEN, Ö., Bulanık Mantık ve Yapay Sinir Ağları ile Bir Radar İzleme Sistemi Simülasyonu, Meteksan Sistem ve Bilgisayar Teknolojileri A. Ş., Ankara, 2002.
- [20] GÜCÜYENER, İ. ve EMEL, E., Bulanık Sinir Ağı Tabanlı Programın Araç Modeline Uygulanması, TBMYO Endüstriyel Otomasyon Programı, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Uludağ Üniversitesi, Görükle, 2005.
- [21] SAĞGÖZ, A., Kayan Kipli Kontrolörlerde Doğrusal Olmayan Yüzeylerin Bulanık Mantık ile Tasarımı ve Uygulanması, İstanbul Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 2006.
- [22] ERENTÜRK, K., Farklı Tip Bulanık Mantık Denetleyicilerin PMDC Motor Denetimine Etkisi, Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, 2006.
- [23] LEVA, A., PID Autotuning Algorithm Based on Relay Feedback, IEEE Proc-Control Theory Appl., Vol. 140, 1993.
- [24] WANG, Q.G., ZOU, B., LEE, T.H., and BI, Q., Auto-Tuning of Multivariable PID Controller from Decentralized Relay Feedback, Automatica, Vol. 33, 1997, Pp. 319-330.
- [25] CHANG, W.D., and YAN, J.J., Adaptive Robust PID Controller Design Based on A Sliding Mode for Uncertain Chaotic Systems, Chaos Solitions and Fractals, Vol. 26, pp. 167-175, 2005.
- [26] ERDOGAN, A.S., ALIOĞLU, F., HAPOĞLU, H., ve ALPBAZ, M., Application of Adaptive PID with Genetic Algorithm to a Polymerization Reactor, Chemical Eng. Comm., Vol. 191, pp. 1158-1172, 2004.

- [27] HUNG, J.Y., GAO, W., and HUNG, J.C., Variable Structure Control: A Survey, IEEE Transactions Industrial Electronics, Vol. 40, pp. 2-22, 1993.
- [28] YOUNG, K.D., UTKIN, V.I., and ÖZGÜNER, Ü., A Control Engineer's Guide to Sliding Mode Control, IEEE Transactions Control System Technologies, Vol. 7, pp. 328-342, 1999.
- [29] KOSHKOUEI, A.J., and ZINOBER, A.S.I., Sliding Mode Controller-Observer Design for SISO Linear Systems, International Journal of Systems Science, 29, pp. 1363-1373, 1998.
- [30] SARWER, M.G., ABDUR RAFIQ, M.D., and GHOSH, B.C., Sliding Mode Speed Controller of a D.C Motor Drive, Journal of Electrical Engineering, The Institution of Engineers, Bangladesh, Vol. 31, No. I & II, December, 2004.
- [31] KUO, T.C., HUANG, Y.J., CHEN, C.Y. and CHANG, C.H., Adaptive Sliding Mode Control with PID Tuning for Uncertain Systems, Engineering Letters, 2008.
- [32] FALLAH, L.A., KORAYEM, M.H., AMIN, N., FARBOD, S., Neural Network Controller Based on PID Controller for Two Links-Robotic Manipulator Control, Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science, WCECS, October 22 - 24, San Francisco, USA, 2008.
- [33] ONUR, K., ENGİN, Y., MÜJDE, G. and İBRAHİM, E., Implementation of a New Self-Tuning Fuzzy PID Controller on PLC, Turkish Naval Academy, Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences, Vol.13, No.2, TUBITAK, Turkey, 2005.
- [34] MINKOVA, M.D., MINKOV, D., RODGERSON, J.L. and HARLEY, R.G., Adaptive Neural Speed Controller of a DC Motor, Department of Electrical Engineering, University of Natal, Durban 4014, South Africa, 1998.
- [35] NOURI, K., DHAOUADI, R., BRAIEK, B.N., Adaptive Control of a Nonlinear DC Motor Drive Using Recurrent Neural Networks, Elsevier, 2007.
- [36] FALLAHI, M. and AZADI, S., Adaptive Control of a DC Motor Using Neural Network Sliding Mode Control, Proceedings of the International Multi Conference of Engineers and Computer Scientists, Vol II, IMECS 2009, March 18 - 20, 2009, Hong Kong, 2009.
- [37] KNIGHT, M.J., SUTTON, R., JENKINS, D.F.L., Fuzzy Model Based Sliding Mode Control of a Linear Precision Motion Control System, DMME, University of Plymouth DMME, University of Plymouth DCEE, University of Plymouth Drake Circus, Plymouth. Devon, 2007.

- [38] HONGCHAO, Z., HONGYUN, Y., WENJIN, G., Fuzzy Neural Network-Based Sliding Mode Control for Missile's Overload Control System, Department of Scientific Research Naval Aeronautical Engineering Institute Yantai, China, 2005.
- [39] YAPICI, K.O., 14 Serbestlik Dereceli İki Ayaklı Bir Robotun Dinamik Yürüme Hareketinin Kontrolü, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2008.
- [40] SANKARAN, J., Real-Time Computed Torque Control of Flexible-Joint Robots, Master of Applied Science, Department of Mechanical and Industrial Engineering University of Toronto, 1997.
- [41] CRAIG, J.J., Introduction To Robotics:Mechanics And Control, USA, 1989.
- [42] BARRIENTOS, A., PENIN, L.F., BALAGUER, C.And ARACIL., R., Fundamentals of Robotics, McGrawHill, 1997.
- [43] MCKERROW, P.J., Introduction to Robotics, Addison-Wesley Publishing Company , Sydney , 1991.
- [44] KLAFTER, R.D., CHMIELEWSKI, T.A., NEGIN, M., Robotic Engineering –AnIntegral Approach, Prentice Hall, 1989.
- [45] NIKU, S.B., Introduction to Robotics: Analysis, Systems, Applications, Prentice Hall, 2001.
- [46] XU, D., CALDERON, C.A.A., GAN, J.Q., HU, H., TAN, M., An Analysis of The Inverse Kinematics for a 5-Dof Manipulator, International Journal of Automation and Computing 2, 2005.
- [47] SAMSON, C. and BORGNE, M., Robot Control, Oxford University Press, New York, 1990.
- [48] MENDEL, J.M., Fuzzy Logic Systems For Engineering: A Tutorial, Proceedings of the IEEE, 83(3):345{377, Mar 1995.
- [49] KERMICHE, S., LARBI, S.M., ABBASI, H.A., Fuzzy Logic Control of Robot Manipulator in The Presence of Fixed Obstacle, The Internation Arab Journal of Information Technology, Vol 4, No 1, January 2007.
- [50] KIM, C.S., SEO, W.H., HAN, S.H., KHATIB, O., Fuzzy Logic Control of a Robot Manipulator Based on Visual Servoing, Robotics Laboratory, Department of Computer Science Stanford University, Stanford, 2002.
- [51] ANGELES, J., Fundamentals of Robotic Mechanical Systems: Theory, Methods and Algorithms, Department of Mechanical Engineering and Center for Intelligent Machines, McGill University, Canada, 2006.

- [52] FU, K.S., GONZALEZ, R.C., LEE C.S.G., Robotics: Control, Sensing, Vision, and Intelligence, Mcgraw-Hill Book Company, 1987.
- [53] LEE, C.S.G., Robot Arm Kinematics, Dynamics and Control, Computer, vol. 15, No. 12, Pp. 62-80, 1982.
- [54] AMIROUCHE, F., Fundamentals of Multibody Dynamics, Theory and Application, Birkhäuser Boston Publishing, 2005.
- [55] KREITH, F., Mechanical Engineering Handbook, CRC Press, Colorado, USA, March 1998.
- [56] KHALIL, H.K., Nonlinear Systems, 2nd Edition, Prentice Hall, 1996.
- [57] UTKIN, V.I., Sliding Modes In Control Optimization, Springer-Verlag, Berlin, 1981.
- [58] ERTUĞRUL, M., KAYNAK, O., KERESTECİOĞLU, F., Gain Adaptation in Sliding Mode Control For Robotic Manipulators, International Journal of Systems Science, Vol. 31, 2000.
- [59] YAĞIZ, N., GÜRSEL, A., Active Suspension Control of A Railway Vehicle With A Flexible Body, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Istanbul University, 34320 Avcılar, Istanbul, Turkey, 2005.
- [60] ÇOBAN, R., AVAN, D., ve ERÇİN, Ö., Dinamik Sistem Modelleme İçin Yeni Bir Geri Beslemeli Sınır Ağı Yaklaşımı, Elektrik-Elektronik Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği 13. Ulusal Kongresi, 23-26 Aralık 2009, Ankara.
- [61] RUMELHEART, D.E., MCCLELLAND, J.L., PDP Research Group, Parallel Distributed Processing: Explanations in the Microstructure of Cognition, MIT Press, Cambridge, 1986.
- [62] LEWIS, F.L., LIU, K., YEŞİLDİREK, A., Neural Net Robot Controller With Guaranteed Tracking Performance, IEEE Transactions on Neural Networks, Vol.6, 1995.
- [63] GE, S.S., LEE, T.H., HARRIS, C.J., Adaptive Neural Network Control of Robotic Manipulators, World Scientific Publishing, Singapore, 1999.
- [64] ORR, G., Neural Networks, Lecture Notes, Willamette University, Fall 99.
- [65] SARAÇ, T., Yapay Sınır Ağları, Gazi Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü Ana Bilim Dalı, 2004, Ankara.
- [66] ŞEKER, M., BERKAY, A., ESİN, E.M., Robotların Yapay Sınır Ağları Kullanılarak Denetimi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü.

- [67] EFE, M.O., KAYNAK, O., A Comparative Study of Neural Network Structures In Identification of Nonlinear Systems, Mechatronics Research And Application Center, Boğazici University, Istanbul, Turkey, 1999.
- [68] EFE, M.O., Novel Neuronal Activation Functions For Feedforward Neural Networks, Neural Process Lett., Springer Science+Business Media, Llc. 2008.
- [69] HRISTEV, R., Artificial Neural Networks, 1st Edition, 1997.
- [70] EFE, M.O., KAYNAK, O., A Comparative Study of Neural Network Structures in Identification of Nonlinear Systems, Mechatronics, v.9, no.3, pp.287-300, 1999.
- [71] VIEIRA, J., DIAS, F.M., MOTA, A., Neuro-Fuzzy Systems: A Survey, Portugal, 2004.
- [72] ZADEH, L.A.; Fuzzy Sets, Information And Control, 1965, Vol. 8.
- [73] FULLER, R., Neural Fuzzy Systems, Donner Visiting Professor, Abo Akademi University, 1995.
- [74] ASTROM, K.J., WIITENMARK, B., Adaptive Control, Addison-Wesley Publishing Company, New York, 1989.
- [75] DUBOWSKY, S., DESFORGES, D.T., The Application of Model Referenced Adaptive Control To Robotic Manipulators, Journal of Dynamic Systems, Measurement, And Control, Vol.101/193-200 , September, 1979.
- [76] KELLER, J.M., and TAHANI, H., Backpropagation Neural Networks For Fuzzy Logic, Information Science, 1992.
- [77] TSAI, C.H., CHUNG H.Y., and YU, F.M., Neuro-sliding Mode Control with Its Applications to Seesaw Systems, IEEE Transactions on Neural Networks, 2004.
- [78] GAO, W., WANG, Y., and HOMAIFA, A., Discrete-Time Variable Structure Control Systems, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 42, no. 2, pp.117-122, April 1995.
- [79] ŠABANOVIĆ, A., JEZERNIK, K. and RODIČ, M., Neural Network Application in Sliding Mode Control Systems, VSS '96. Proceedings, 1996 IEEE International Workshop on , 1996 , pp. 143 –147.
- [80] ŠAFARIČ, R., JEZERNIK, K., RODIČ, M. and ŠABANOVIĆ, A., Sliding-Mode Neural Network Robot Controller, AMC '96-MIE. Proceedings, 1996 4th International Workshop on , vol. 1, pp. 395-400, 1996.

- [81] FANG, Y., CHOW, T.W.S. and LI, X.D., Use of a Recurrent Neural Network in Discrete Sliding-Mode Control, *Control Theory and Applications*, IEE Proceedings, vol. 146, pp. 84-90, 1999.
- [82] CAO, Y.J., CHENG, S.J., and WU, Q.H., Sliding Mode Control of Nonlinear Systems Using Neural Network, *Control '94. International Conference on*, 1994, vol. 1, pp. 855-859, 1994.
- [83] ERTUGRUL, M., KAYNAK, O., Neuro-Sliding Mode Control of Robotic Manipulators, *Mechatronics* 10, pp. 239-263, 2000.
- [84] BOUBAKIR, A., BOUDJEMA, F. and LABIOD, S., A Neuro-fuzzy-sliding Mode Controller Using Nonlinear Sliding Surface Applied to the Coupled Tanks System, *International Journal of Automation and Computing*, February 2009.
- [85] LABIOD, S., BOUCHERIT, M.S. and GUERRA, T.M., Adaptive Fuzzy Control of a Class of MIMO Nonlinear Systems, *Fuzzy Sets and Systems*, 2005.
- [86] LABIOD, S., GUERRA, T.M., Adaptive Fuzzy Control of a Class of SISO Nonaffine Nonlinear Systems, *Fuzzy Sets and Systems*, 2007.
- [87] ELMAS, C., ÜSTÜN, O., A Hybrid Controller for the Speed Control of a Permanent Magnet Synchronous Motor Drive, *Control Engineering Practice*, 2008.
- [88] ABDELHAMEED, M.M., Enhancement of Sliding Mode Controller by Fuzzy Logic with Application to Robotic Manipulators, *Mechatronics*, 2005.
- [89] ERTUĞRUL, M., KAYNAK O., SABANOVIC, A. and OHNISHI, K., A Generalized Approach for Lyapunov Design of Sliding Mode Controllers for Motion Control Applications, In *Proceedings of the 4th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control*, IEEE Press, Mie University, Japan, 1996.
- [90] HUSSAIN, M.A., HO, P.Y., Adaptive Sliding Mode Control with Neural Network Based Hybrid Models, *Journal of Process Control*, 2004.

ÖZGEÇMİŞ

1985 yılında Trabzon ili Çaykara ilçesine bağlı Uzungöl beldesinde dünyaya gelen Mehmet KORKMAZ, ilköğrenimin ilk beş yılını Çamlık İlköğretim Okulu'nda, son üç yılını ise Uzungöl İlköğretim Okulu'nda tamamladı. Ortaöğretimini tamamlamak üzere 1999 yılında İstanbul'a taşındı ve 2002 yılında Pendik Şevket Sabancı Lisesi'nden mezun oldu. 2003 yılında Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünü kazandı. Hazırlık ve lisans eğitimini tamamlayıp 2008 yılında mezun olduktan sonra aynı yıl içerisinde Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde Makine Tasarımı ve İmalatı bölümünde yüksek lisans eğitimine başladı. Halen bu bölümde son sınıf öğrencisi olarak öğrenimini sürdürmektedir.