

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ROBOT YÖRÜNGE TAKİBİ İÇİN YSA TEMELLİ
BULANIK KAYAN KIPLI KONTROLÖR TASARIMI**

Elektrik-Elektronik Yük. Müh. Ayça GÖKHAN AK

**FBE Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı Kontrol ve Otomasyon Programında
Hazırlanan**

DOKTORA TEZİ

Tez Savunma Tarihi : 17.11.2008
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Galip CANSEVER (YTÜ)
Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Burhanettin CAN (MÜ)
: Prof. Dr. Oruç BİLGİÇ (YTÜ)
: Prof. Dr. Çingiz HACIYEV (İTÜ)
: Doç. Dr. Haluk GÖRGÜN (YTÜ)

İSTANBUL, 2008

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	v
KISALTMA LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
ÇİZELGE LİSTESİ	xii
ÖNSÖZ.....	xiii
ÖZET	xiv
ABSTRACT	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYAN KİPLİ KONTROL	6
2.1 Süreksiz Dinamik Sistemlerde Kayma Kipi	8
2.2 Robotun Kayan Kipli Kontrolü	9
2.2.1 Kayma yüzeyi	9
2.2.2 Kayan kipli kontrolör tasarımı.....	10
2.3 Çatırdama.....	11
3. BULANIK MANTIK	13
3.1 Bulanık Kümeler.....	13
3.2 Bulanık Kontrolör.....	14
3.2.1 Bulanıklaştırma.....	15
3.2.2 Bilgi tabanı	15
3.2.3 Bulanık çıkarım	16
3.2.4 Durulaştırma	16
4. YAPAY SİNİR AĞLARI.....	18
4.1 Yapay Sinir Ağ Modelleri	20
4.2 Radyal Temelli Fonksiyonlu Ağlar (RTFA)	20
4.2.1 Temel Radyal Temelli Fonksiyonlu Ağ modelleri.....	21
4.2.3 Gaussian Radyal Temelli Fonksiyonlu Ağlar.....	22
4.3 RTF Ağın Yakınsama Özellikleri.....	26
4.4 RTF Ağlar ve Çok katmanlı Algılayıcıların Karşılaştırılması.....	26
5. ÖNERİLEN YSA TEMELLİ BULANIK KAYAN KİPLİ KONTROL	28
5.1 Düzeltici Kontrol Kazancının Bulanık Adaptasyon ile Ayarlanması.....	28
5.2 Kayma Yüzeyinin Eğiminin Bulanık Mantık ile Hesaplanması.....	31

6.	3 EKSENLİ SCARA ROBOT İÇİN SİMÜLASYON SONUÇLARI	34
6.1	3 Eksenli Scara Robotun Modeli	34
6.2	Düzeltilici Kontrol Kazancının Bulanık Mantık ile Ayarlanması Durumunda 3 Eksenli Scara Robotun Yörünge Takibi İçin Simülasyon Sonuçları.....	35
6.2.1	Robot eksenlerinin 1 radyan dönmesi durumunda simülasyon sonuçları	35
6.2.2	Simülasyon sonuçlarının yorumlanması.....	39
6.2.3	Robot eksenlerinin sinüzoidal yörünge izlemesi durumunda simülasyon sonuçları	40
6.2.4	Simülasyon sonuçlarının yorumlanması.....	45
6.3	Kayma Yüzeyi Eğiminin Bulanık Mantık İle Ayarlanması Durumunda 3 Eksenli Scara Robotun Yörünge Takibi İçin Simülasyon Sonuçları.....	45
6.3.1	Robot eksenlerinin 1 radyan dönmesi durumunda simülasyon sonuçları	45
6.3.2	Simülasyon sonuçlarının yorumlanması.....	50
6.3.3	Robot eksenlerinin sinüzoidal yörünge izlemesi durumunda simülasyon sonuçları	50
6.3.4	Simülasyon sonuçlarının yorumlanması.....	55
7.	ROBOT MANİPULATÖR.....	56
7.1	Manutec-r15.....	56
7.2	Manutec-r15 Robotun Dinamik Modelinin Belirlenmesi.....	56
7.2.1	Dişli sürtünmesinin modellenmesi ve belirlenmesi.....	57
7.2.2	Rijid yapı dinamiklerinin doğrusal parametre formunda modellenmesi	58
7.2.2.1	Dinamik parametreler	58
7.2.2.2	Doğrusallaştırılmış parametre formundaki hareket denklemleri	59
7.2.2.3	Taban parametrelerinin ve dinamik denklemlerin gruplandırılması	59
7.3	Manutec-r15 İçin Simülasyon Sonuçları	62
7.3.1	Düzeltilici kontrol kazancının bulanık mantık ile ayarlanması durumunda simülasyon sonuçları	63
7.3.1.1	Eksenler 5° döndürüldüğünde simülasyon sonuçları.....	63
7.3.1.2	Simülasyon sonuçlarının yorumlanması.....	67
7.3.1.3	Sinüzoidal yörünge takibi için simülasyon sonuçları	68
7.3.1.4	Simülasyon sonuçlarının yorumlanması.....	73
7.3.2	Kayma yüzeyi eğiminin bulanık mantık ile ayarlanması durumunda simülasyon sonuçları.....	73
7.3.2.1	Eksenler 5° döndürüldüğünde simülasyon sonuçları.....	73
7.3.2.2	Simülasyon sonuçlarının yorumlanması.....	77
7.3.2.3	Sinüzoidal yörünge takibi için simülasyon sonuçları.....	78
7.3.2.4	Simülasyon sonuçlarının yorumlanması.....	82
8.	KONTROL SİSTEMİ.....	83
8.1	Veri Toplama Kartı.....	84
8.2	Robot Manipulator.....	85
8.3	Motor Sürücüleri.....	85
8.4	Temel Kontrol Yapısı	87
9.	DENEY SONUÇLARI.....	91
9.1	Düzeltilici Kontrol Kazancının Bulanık Adaptasyon ile Ayarlanması Durumunda Deney Sonuçları	91
9.1.1	Eksenler 5° döndürüldüğünde deney sonuçları.....	91
9.1.2	Deney sonuçlarının yorumlanması	96
9.1.3	Sinüzoidal yörünge takibi için deney sonuçları	96

9.1.4	Deney sonuçlarının yorumlanması	100
9.2	Kayma Yüzeyinin Eğiminin Bulanık Mantık ile Hesaplanması Durumunda Deney Sonuçları	101
9.2.1	Eksenler 5° döndürüldüğünde deney sonuçları.....	101
9.2.2	Deney sonuçlarının yorumlanması	105
9.2.3	Sinüzoidal yörünge takibi için deney sonuçları.....	106
9.2.4	Deney sonuçlarının yorumlanması	110
9.3	Deney ve Simülasyon Sonuçlarının Karşılaştırılması	111
9.4	PD Kontrol ile Deney Sonuçları	114
9.4.1	Eksenler 5° döndürüldüğünde deney sonuçları.....	115
9.4.2	Deney sonuçlarının yorumlanması	118
9.4.3	Sinüzoidal yörünge takibi için deney sonuçları.....	118
9.4.4	Deney sonuçlarının yorumlanması	122
9.5	PID Kontrol ile Deney Sonuçları.....	122
9.5.1	Eksenler 5° döndürüldüğünde deney sonuçları.....	122
9.5.2	Deney sonuçlarının yorumlanması	125
9.5.3	Sinüzoidal yörünge takibi için deney sonuçları.....	125
9.5.4	Deney sonuçlarının yorumlanması	129
9.6	Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması	129
SONUÇ.....		132
KAYNAKLAR.....		135
ÖZGEÇMİŞ.....		139

SİMGE LİSTESİ

A	Robotun bilinen kinematik niteliklerini içeren matris
B	Giriş kazanç matrisi
$c(q, \dot{q})$	Merkezkaç ve coriolis etkisi
c_{ik}	Giriş vektör uzayında RTF merkezleri
e	Hata
f	Sürtünme kuvveti
$g(q)$	Yerçekimi etkisi
G	Kayma yüzeyinin eğimi
G_f	İntegrallenebilir sınırlı bir fonksiyon
h	Kaydırılmış sigmoid fonksiyonu
h_{ijk}	Korelasyon katsayısı
H_i	i.RTF'nin kovaryans matrisinin tersiyle tanımlanan biçim matrisi
$I_i^{(i)}$	Atalet tensörü
I_{mi}	Motorun atalet momentleri
k_{ijk}	Marjinal standart sapma
K	Pozitif sabit
m_i	Kütle
$M(q)$	Kütle matrisi
N	Saklı katmandaki nöron sayısı
p	Parametre vektörü
q	Eklem açıları
r	Merkez
R	Kural miktarı
r_{Ci}	Linkin koordinat çatısından kütlelerin merkezine olan vektör
s	Kayma yüzeyi
s_a	Kayma fonksiyonunun durum bağımsız kısmı
u	Eklem torkları
$u_d(t)$	Düzeltilici kontrol kuralı
$u_e(t)$	Eşdeğer kontrol kuralı

t_I	Dış bozulma
V	Lyapunov fonksiyonu
w_{ik}	Çıkış katmanının ağırlıkları
x_d	İstenen durum
X	Değer değişim aralığı (universe of discourse)
φ	Kayma fonksiyonunun zaman bağımsız kısmı
Γ	Birim matris
λ_e	Sigmoid fonksiyonunun eğimini ayarlayan katsayı
λ_i	Pozitif sabit
μ_A	Üyelik fonksiyonu
$\phi_k(\cdot)$	\mathfrak{R}^+ 'dan \mathfrak{R} 'ye bir fonksiyon
σ	Yayma (spread) parametresi
$Q_{i,f1}$	Sürtünme terimi
θ_{ki}	Üyelik fonksiyonlarının merkez vektörü
ψ_{ki}^m	Üyelik fonksiyonlarının yükseklik vektörü
$\ \cdot\ $	Euclidean normu

KISALTMA LİSTESİ

ÇKA	Çok Katmanlı Algılayıcı
DYK	Değişken Yapılı Kontrol
KKK	Kayan Kipli Kontrol
PD	Oransal-Türev
PID	Oransal-İntegral-Türev
RTF	Radyal Temelli Fonksiyon
RTFA	Radyal Temelli Fonksiyonlu Ağ
YSA	Yapay Sinir Ağı

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Süreksizlik yüzeyi ile durum uzayının bölümlenmesi	6
Şekil 2.2 İki kararsız yapının faz resimleri.....	7
Şekil 2.3 İki kararsız yapıdan oluşan kararlı yapı	8
Şekil 3.1 Örnek üyelik fonksiyonları.....	14
Şekil 3.2 Bulanık kontrolörün blok diyagramı	14
Şekil 4.1 Yapay bir nöronun modeli.....	18
Şekil 4.2 Çok katmanlı ağ	20
Şekil 4.3 RTFA' nın yapısı.....	21
Şekil 4.4 Gaussian Radyal Temelli Fonksiyon.....	23
Şekil 4.5 Gaussian Radyal Temelli Fonksiyonlu Sinir Ağının şematik diyagramı	24
Şekil 4.6 Gaussian RTFA' nın giriş ve çıkışının blok diyagramı.....	24
Şekil 5.1 Düzeltici kontrol kazancının ayarlanması durumunda sistemin blok diyagramı	28
Şekil 5.2 Düzeltici kontrol kazancı için giriş ve çıkış üyelik fonksiyonları.....	30
Şekil 5.3 Düzeltici kontrol kazancının ayarlanması durumunda programın akış diyagramı ...	31
Şekil 5.4 Kayma yüzeyi eğiminin ayarlanması durumunda sistemin blok diyagramı	32
Şekil 5.5 Kayma yüzeyi eğiminin ayarlanması için giriş ve çıkış üyelik fonksiyonları	32
Şekil 5.6 Kayma yüzeyi eğiminin ayarlanması durumunda programın akış diyagramı.....	33
Şekil 6.1 Düzeltici kontrol kazancının bulanık adaptasyon ile ayarlanmasında 1 radyanlık dönme durumunda 1. eksen için simülasyon sonuçları	37
Şekil 6.2 Düzeltici kontrol kazancının bulanık adaptasyon ile ayarlanmasında 1 radyanlık dönme durumunda 2. eksen için simülasyon sonuçları	38
Şekil 6.3 Düzeltici kontrol kazancının bulanık adaptasyon ile ayarlanmasında 1 radyanlık dönme durumunda 3. eksen için simülasyon sonuçları	39
Şekil 6.4 Düzeltici kontrol kazancının bulanık adaptasyon ile ayarlanmasında sinüzoidal yörünge takibinde 1. eksen için simülasyon sonuçları.....	43
Şekil 6.5 Düzeltici kontrol kazancının bulanık adaptasyon ile ayarlanmasında sinüzoidal yörünge takibinde 2. eksen için simülasyon sonuçları.....	44
Şekil 6.6 Düzeltici kontrol kazancının bulanık adaptasyon ile ayarlanmasında sinüzoidal yörünge takibinde 3. eksen için simülasyon sonuçları.....	45
Şekil 6.7 Kayma yüzeyi eğiminin bulanık adaptasyon ile ayarlanmasında 1 radyanlık dönme durumunda 1. eksen için simülasyon sonuçları	47
Şekil 6.8 Kayma yüzeyi eğiminin bulanık adaptasyon ile ayarlanmasında 1 radyanlık dönme durumunda 2. eksen için simülasyon sonuçları	48

Şekil 6.9 Kayma yüzeyi eğiminin bulanık adaptasyon ile ayarlanmasında 1 radyanlık dönme durumunda 3. eksen için simülasyon sonuçları	49
Şekil 6.10 Kayma yüzeyi eğiminin bulanık adaptasyon ile ayarlanmasında sinüzoidal yörünge takibinde 1. eksen için simülasyon sonuçları.....	52
Şekil 6.11 Kayma yüzeyi eğiminin bulanık adaptasyon ile ayarlanmasında sinüzoidal yörünge takibinde 2. eksen için simülasyon sonuçları.....	54
Şekil 6.12 Kayma yüzeyi eğiminin bulanık adaptasyon ile ayarlanmasında sinüzoidal yörünge takibinde 3. eksen için simülasyon sonuçları.....	55
Şekil 7.1 Manutec-r15	56
Şekil 7.2 Manutec-r15 için değiştirilmiş Den.-Har. koordinat çatısı ve parametreleri	58
Şekil 7.3 Düzeltici kontrol kazancının bulanık adaptasyon ile ayarlanmasında 5°'lik dönme durumunda 1. eksen için simülasyon sonuçları	65
Şekil 7.4 Düzeltici kontrol kazancının bulanık adaptasyon ile ayarlanmasında 5°'lik dönme durumunda 2. eksen için simülasyon sonuçları	66
Şekil 7.5 Düzeltici kontrol kazancının bulanık adaptasyon ile ayarlanmasında 5°'lik dönme durumunda 3. eksen için simülasyon sonuçları	67
Şekil 7.6 3. eksenin kontrol işareti	68
Şekil 7.7 Düzeltici kontrol kazancının bulanık adaptasyon ile ayarlanması durumunda sinüsoidal yörünge takibinde 1. eksen için simülasyon sonuçları	70
Şekil 7.8 Düzeltici kontrol kazancının bulanık adaptasyon ile ayarlanması durumunda sinüzoidal yörünge takibinde 2. eksen için simülasyon sonuçları	71
Şekil 7.9 Düzeltici kontrol kazancının bulanık adaptasyon ile ayarlanması durumunda sinüsoidal yörünge takibinde 3. eksen için simülasyon sonuçları	72
Şekil 7.10 Kayma yüzeyi eğiminin bulanık mantık ile ayarlanmasında 5°'lik dönme durumunda 1. eksen için simülasyon sonuçları	75
Şekil 7.11 Kayma yüzeyi eğiminin bulanık mantık ile ayarlanmasında 5°'lik dönme durumunda 2. eksen için simülasyon sonuçları	76
Şekil 7.12 Kayma yüzeyi eğiminin bulanık mantık ile ayarlanmasında 5°'lik dönme durumunda 3. eksen için simülasyon sonuçları	77
Şekil 7.13 Kayma yüzeyi eğiminin bulanık mantık ile ayarlanmasında sinüzoidal yörünge takibinde 1. eksen için simülasyon sonuçları.....	80
Şekil 7.14 Kayma yüzeyi eğiminin bulanık mantık ile ayarlanmasında sinüzoidal yörünge takibinde 2. eksen için simülasyon sonuçları.....	81
Şekil 7.15 Kayma yüzeyi eğiminin bulanık mantık ile ayarlanmasında sinüzoidal yörünge	

takibinde 3. eksen için simülasyon sonuçları.....	82
Şekil 8.1 Sistemin blok diyagramı.....	83
Şekil 8.2 İzolasyon devresi.....	84
Şekil 8.3 Wincon uygulamasının yapısı	85
Şekil 8.4 Wincon kullanıcı arayüzü.....	85
Şekil 8.5 Deneylerde kullanılan Manutec-r15.....	86
Şekil 8.6 Sürücü sistemi	87
Şekil 8.7 Kontrol sistemi	88
Şekil 8.8 Manutec-r15 bloğu	89
Şekil 8.9 YSA Temelli Bulanık Kayan Kipli Kontrolör bloğu	90
Şekil 9.1 Düzeltici kontrol kazancının bulanık adaptasyon ile ayarlanmasında 5°'lik dönme durumunda 1. eksen için deney sonuçları	93
Şekil 9.2 Düzeltici kontrol kazancının bulanık adaptasyon ile ayarlanmasında 5°'lik dönme durumunda 2. eksen için deney sonuçları	94
Şekil 9.3 Düzeltici kontrol kazancının bulanık adaptasyon ile ayarlanmasında 5°'lik dönme durumunda 3. eksen için deney sonuçları	95
Şekil 9.4 Düzeltici kontrol kazancının bulanık adaptasyon ile ayarlanması durumunda sinüsoidal yörünge takibinde 1. eksen için deney sonuçları	98
Şekil 9.5 Düzeltici kontrol kazancının bulanık adaptasyon ile ayarlanması durumunda sinüzoidal yörünge takibinde 2. eksen için deney sonuçları.....	99
Şekil 9.6 Düzeltici kontrol kazancının bulanık adaptasyon ile ayarlanması durumunda sinüsoidal yörünge takibinde 3. eksen için deney sonuçları	100
Şekil 9.7 Kayma yüzeyinin eğiminin bulanık mantık ile hesaplanmasında 5°'lik dönme durumunda 1. eksen için deney sonuçları	103
Şekil 9.8 Kayma yüzeyinin eğiminin bulanık mantık ile hesaplanmasında 5°'lik dönme durumunda 2. eksen için deney sonuçları	104
Şekil 9.9 Kayma yüzeyinin eğiminin bulanık mantık ile hesaplanmasında 5°'lik dönme durumunda 3. eksen için deney sonuçları	105
Şekil 9.10 Kayma yüzeyi eğiminin bulanık mantık ile ayarlanması durumunda sinüzoidal yörünge takibinde 1. eksen için deney sonuçları	108
Şekil 9.11 Kayma yüzeyi eğiminin bulanık mantık ile ayarlanması durumunda sinüzoidal yörünge takibinde 2. eksen için deney sonuçları	109
Şekil 9.12 Kayma yüzeyi eğiminin bulanık mantık ile ayarlanması durumunda sinüzoidal yörünge takibinde 3. eksen için deney sonuçları	110

Şekil 9.13 Düzeltici kontrol kazancının bulanık mantık ile ayarlanması durumunda sinüzoidal yörünge takibinde simülasyon ve deney sonuçları	113
Şekil 9.14 Kayma yüzeyi eğiminin bulanık mantık ile ayarlanması durumunda sinüzoidal yörünge takibinde simülasyon ve deney sonuçları	114
Şekil 9.15 PD kontrolör	114
Şekil 9.16 PD kontrolör ile 5°lik dönme durumunda 1. eksen için deney sonuçları.....	116
Şekil 9.17 PD kontrolör ile 5°lik dönme durumunda 2. eksen için deney sonuçları.....	117
Şekil 9.18 PD kontrolör ile 5°lik dönme durumunda 3. eksen için deney sonuçları.....	118
Şekil 9.19 PD kontrolör ile sinüzoidal yörünge takibinde 1. eksen için deney sonuçları	119
Şekil 9.20 PD kontrolör ile sinüzoidal yörünge takibinde 2. eksen için deney sonuçları	120
Şekil 9.21 PD kontrolör ile sinüzoidal yörünge takibinde 3. eksen için deney sonuçları	121
Şekil 9.22 PID kontrolör ile 5°lik dönme durumunda 1. eksen için deney sonuçları	123
Şekil 9.23 PID kontrolör ile 5°lik dönme durumunda 2. eksen için deney sonuçları	124
Şekil 9.24 PID kontrolör ile 5°lik dönme durumunda 3. eksen için deney sonuçları	125
Şekil 9.25 PID kontrolör ile sinüzoidal yörünge takibinde 1. eksen için deney sonuçları.....	127
Şekil 9.26 PID kontrolör ile sinüzoidal yörünge takibinde 2. eksen için deney sonuçları.....	128
Şekil 9.27 PID kontrolör ile sinüzoidal yörünge takibinde 3. eksen için deney sonuçları.....	129
Şekil 9.28 Deney sonuçlarının karşılaştırılması	131

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 6.1 Üç yöntemin simülasyon sonuçları	40
Çizelge 6.2 Önerilen iki yöntemin karşılaştırılması	50
Çizelge 7.1 Manutec-r15'in üç eksenini için sürtünme katsayıları	57
Çizelge 7.1 Her link için $p_{link,i}$ 'nin kalan elemanları (Grotjahn vd., 2001).....	60
Çizelge 7.2 Taban parametrelerinin $q(q)$ ve $M(q)$ üzerindeki etkileri (Grotjahn vd., 2001)	61
Çizelge 7.3 Taban parametreleri (yükli A ve yüksüz B) (Grotjahn vd., 2001)	62
Çizelge 8.1 Manutec-r15 motor özellikleri	85
Çizelge 9.1 Düzeltici kontrol kazancının bulanık mantık ile ayarlanması durumunda Simülasyon ve deney sonuçlarının karşılaştırılması	111
Çizelge 9.2 Kayma yüzeyi eğiminin bulanık mantık ile ayarlanması durumunda Simülasyon ve deney sonuçlarının karşılaştırılması	111
Çizelge 9.3 Deney sonuçlarının karşılaştırılması	129

ÖNSÖZ

Tez çalışmam esnasında gerekli yönlendirmeleri, yardımları ve yapıcı önerileriyle bana destek veren tez danışmanım Sn. Prof. Dr. Galip CANSEVER'e teşekkürlerimi sunarım.

Yönlendirmeleri ile tezin gelişimine katkı sağlayan tez izleme jüri üyeleri Sn. Prof. Dr. Burhanettin Can'a ve Sn. Prof. Dr. Oruç BİLGİÇ'e ve deneyler esnasındaki yardımlarından dolayı Sn. Arş. Gör. Akın DELİBAŞI' na da teşekkür ederim.

Çalışmalarım süresince bana destek olan eşim Alper AK'a, ihtiyacım olduğunu hissettikleri her an yardımına koşan anne ve babam, Fatma ve Ahmet GÖKHAN'a teşekkür ederim.

Tez çalışması sırasında dünyaya gelen oğlum Özgür Boran, varlığıyla bana güç ve moral verdi.

Bu tez çalışması doktora projesi olarak Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğünce desteklenmiştir. Proje No: 25-04-02-03.

ÖZET

Bir robot manipulatorü istenen bir yörüngeyi izlemesi için kontrol etmek son elli yıldan beri oldukça ilgi çeken bir konudur. Ancak, manipulator belirsizlikler içeren çok değişkenli doğrusal olmayan dinamik sistem olduğundan, klasik ve modern kontrol kuralları için doğru bir matematiksel model elde etmek zordur.

Klasik kayan kipli kontrol belirsizlik içeren doğrusal olmayan sistemler için güçlü bir yöntemdir. Kayan kipli kontrol uygulamalarındaki temel problem eşdeğer kontrolün hesaplanması için sistem parametrelerine ihtiyaç duyulmasıdır. Dayanıklı kontrolör oluşturabilmek için belirsizlik sınırını bilmek gerekir. Bu sınırı pratik uygulamalarda belirlemek zordur ve genellikle belirsizlik sınırı dayanıklı kararlılığı sağlamak için yeterince büyük seçilir. Ancak büyük kazanç, kontrolde önemli bir çatlamaya neden olacaktır. Öte yandan, eğer sınır çok küçük seçilirse dayanıklı kararlılık garanti edilemez.

Bu tez çalışmasında sistem bilgisine ihtiyaç duymayan yeni dayanıklı bir kontrolör geliştirilmesi hedeflenmiştir. Bu hedef çerçevesinde iki farklı kontrol yöntemi geliştirilmiştir. İlk olarak belirsizlik sınırı gereksinimini azaltmak için bulanık mantıktan yararlanılmış ve düzeltici kontrol kazancı bulanık mantık ile hesaplanmıştır. İkinci olarak bulanık mantık kayma yüzeyi eğimini ayarlamak için kullanılmıştır. Her iki kontrol yönteminde de eşdeğer kontrolü hesaplamak için radyal temelli fonksiyonlu yapay sinir ağı kullanılmıştır. Radyal temelli ağın ağırlıkları sistem durumları kayma yüzeyini kesip üzerinde salınacak şekilde adaptif bir algoritma ile değiştirilmektedir.

Geliştirilen kontrol yöntemlerinin test edilebilmesi için 6 eksenli endüstriyel bir robot olan manutec-r15'in sürücü ve kontrol sistemi yeniden oluşturulmuştur.

Geliştirilen kontrol yöntemleri öncelikle 3 eksenli scara robotun parametreleri ile simüle edilmiştir. Ardından simülasyonlar manutec-r15 için yapılmıştır. Son olarak kontrol yöntemleri manutec-r15'e uygulanarak deney sonuçları elde edilmiştir. Aynı deneyler klasik PD ve PID kontrol kullanılarak da yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Yapay Sinir Ağları, Bulanık Mantık, Kayan Kipli Kontrol, Robot

FUZZY SLIDING MODE CONTROLLER DESIGN BASED ON NN FOR ROBOT TRAJECTORY TRACKING

ABSTRACT

Controlling of a robotic manipulator to track a desired trajectory is the hot topics for fifty years. But, because manipulator is multi variable nonlinear dynamic system including uncertainties, it is a difficult task to obtain true mathematical model for classical and modern control techniques.

Classical sliding mode control is a powerful method for system including uncertainties. Basic problem on sliding mode control applications is the need of system parameters to calculate the equivalent computation. It is necessary to know boundary of the uncertainty to build the robust control. It is difficult to determine this boundary on practical applications and usually boundary of the uncertainty is selected sufficiently large to provide the robust stability. But large gain will cause important chattering on control. On the other hand, if the boundary is selected very small, robust stability can't be guaranteed.

In this thesis, it is aimed to develop new robust controller that no need to system knowledge. For this aim, two different control methods are developed. Firstly, fuzzy logic is used to reduce the need of uncertainty boundary and the gain of the corrective control is calculated with fuzzy logic. Secondly, fuzzy logic is used to adjust the slope of the sliding surface. Radial basis function neural network is used to calculate the equivalent control for both control method. The weights of the radial basis function neural network are adjusted according to some adaptive algorithm for the purpose of controlling the system states to hit the sliding surface and then slide along it.

To test the developed control methods, drive and control system of manutec-r15 that is 6 axis industrial robot, is rebuild.

Developed control methods are firstly simulated on 3 link scara robot. Then, simulations are made for manutec-r15. Finally control methods are applied to manutec-r15 and experiments results are obtained. Same experiments are done with classical PD and PID control. Then results are compared.

Keywords: Artificial Neural Networks, Fuzzy Logic, Sliding Mode Control, Robot

1. GİRİŞ

Robot, maddeleri, parçaları veya özel cihazları çeşitli işler için planlanmış yörüngeler boyunca hareket ettirmek amacıyla tasarlanmış yeniden programlanabilen çok fonksiyonlu mekanik cihazdır.

Robot otomatikleştirilmiş fabrikalar için en önemli makinelerden biridir. Çok fonksiyonlu robotik manipulatorler elektronik, otomotiv, tekstil gibi endüstriyel alanlarda, uzay ve denizaltı çalışmalarında, tıpta ve tehlikeli çevrelerde uygulama alanına sahiptirler. Özellikle insanlar için risk taşıyan kimyasal veya radyoaktif çalışmalarda robotlardan yararlanmak giderek önem kazanmaktadır (Craig, 1986).

Manipulatorler yüksek hassasiyetli görevleri yapmak için kullanıldıkça, kontrolörlerin robotik hareketin yörüngesini doğru ve verimli olarak kontrol etmeleri gerekir. Bir robot manipulatorü istenen bir yörüngeyi izlemesi için kontrol etmek son elli yıldan beri oldukça ilgi çeken bir konudur. Ancak, manipulator belirsizlikler içeren çok değişkenli doğrusal olmayan dinamik sistem olduğundan, klasik ve modern kontrol kuralları için doğru bir matematiksel model elde etmek zordur. Birbirinden farklı birçok kontrol yöntemi robot denetleyiciler için önerilmekte ve geliştirilmiş birçok algoritma literatürde bulunmaktadır (Spong ve Vidyasagar, 1989). Ancak bu, yüksek doğrusal olmayan yapı ve robot dinamiklerindeki güçlü kuplaj etkisi nedeniyle karmaşık kontrol teknikleri gerektiren zor bir iştir (Palaz, 2000).

Kontrol edilecek sisteme ait model tam olarak bilindiğinde, doğrusal olmayan sistemlerin geri besleme yardımıyla doğrusal olarak parametrelerine ayrılması tekniği diğer bir deyişle hesaplanmış tork (computed torque) metodu robot kontrolünde kullanılmaktadır (Craig, 1986). Son yıllarda hesaplanmış tork tekniği robotikte tek olarak kullanılmamakta diğer tekniklerle sentezlenmektedir (Cleary vd, 1992, Bestaioui ve Benmerzouk, 1993).

Oransal-İntegral-Türev (PID) kontrolörler gibi geleneksel geri beslemeli kontrolörler kontrol yapılarının çok basit olması ve kolay uygulanabilirlikleri nedeniyle çoğunlukla endüstride, robot kontrolünde kullanılırlar (Cervantes ve Alvarez-Ramirez, 2001, Li vd. 2000, Eroğlu vd., 2004). Ama bu geleneksel geri beslemeli kontrolörler doğrusal olmayan sisteme doğrudan uygulandıklarında, bilinmeyen doğrusal olmayan özellikler ve dış bozulmalar nedeniyle zayıf performans ve düşük dayanıklılık verirler. Bilinmeyen doğrusal olmayan özellikler ve dış bozulmalarla ilgili olarak PID kontrolörlerin otomatik ayarlanması, Değişken Yapılı Kontrol (DYK) (Variable Structure Control), geri beslemeli doğrusallaştırma, adaptif kontrolörler,

akıllı kontrolörler vb. formunda çeşitli kontrol stratejileri amaçlanmıştır (Lee ve Choi, 2000).

DYK ve Değişken Yapılı Sistemlerin özel bir biçimi olan Kayan Kipli Kontrol (KKK) (Sliding Mode Control) farklı şekillerde robot kontrol uygulamalarında kullanılmıştır. KKK'nın özelliği kontrolörün iki ayrı kontrol yapısı arasında anahtarlanmasıdır. Değişken Yapılı Kontrolör tasarımı iki faza ayrılabilir: Ulaşma fazı ve kayma fazı. Sistem kayma yüzeyine ulaşmadan önce yönelten bir kontrol sistemi vardır (ulaşma fazı). Sistem durumları başlangıç noktasından kayma yüzeyine ulaştığında kayma hareketi olur (kayma fazı) ve bütün kontrol sistemi belirsizliklerden, dış bozulmalardan etkilenmez (Utkin, 1997, Hung, 1993, Edwards ve Supergeon, 1998). Stepanenko ve Su doğrusal olmayan veya zamanla değişen manifoldlarda kayan kipi varlığını garanti eden bir kontrol algoritması sunmuşlar ve doğrusal olmayan kayma yüzeyleri ile robot manipulatorlerin DYK gerçekleştirmişlerdir (Stepanenko ve Su, 1993). Utkin KKK metodolojisinin, kayan kipli sistem dinamiklerine karşı değişmezken tasarım yönteminin daha düşük boyutlardaki alt görevlere dönüşmesine olanak sağladığını belirterek mobil manipulatorlerin kontrolü için KKK tasarlamıştır (Utkin, 1994). Chen ve Lin dinamik bir KKK kullanarak robot manipulatorlerin takip kontrolünü incelemiştir. Sürekli bir kontrol sinyali veren dinamik KKK için sistematik tasarım yöntemini elde etmek amacıyla hesaplanmış tork tekniğini kullanmışlardır (Chen ve Lin, 2002).

1950'lerin başında başlayan adaptif kontrol yöntemleri, değişen sistem dinamikleri karşısında kontrolörlerin parametrelerini otomatik olarak ayarlayabildiklerinden dolayı bir kaç on yıldan beri çeşitli sistemlere uygulanmıştır. Online adaptasyon kuralları sistemin bilinmeyen parametrelerini tahmin etmek için kullanılırlar ve uygun kontrolörler istenen performansı sağlamak amacıyla sistemi kontrol etmek için tasarlanırlar. Pek çok pratik sistemde etkileyici uygulamalar yapılmış olmasına ve adaptif kontrol algoritmalarının temelini oluşturan karmaşık matematiksel mekanizmaya rağmen, bu yöntemlerin temel karakteristiği model bağımlılıkları, yani açık bir önceden belirlenmiş model yapısına gereksinim duymalarıdır.

Robotik sistemler standart pratiğe doğru yöneldikçe, geniş spektrumlu karmaşık uygulamaların kapısını açmış oldular. Bu tip uygulamalar genellikle robotların yüksek derecede zeki olmasını gerektirir. Robotikte yüksek kalitede kontrol ve performans elde etmek için yeni akıllı kontrol teknikleri geliştirilmelidir. Bu yüzden zeki robotik sistem arayışları son yıllardaki en cazip araştırma başlığı olmuştur. Öte yandan teknoloji geliştikçe, bulanık mantık ve yapay sinir ağlarını içeren yapay zeka teknikleri zeki robotik sistemlere doğru en çok ümit veren yöntemler olarak görülmektedir (Katic ve Vukobratovic, 2003).

Yapay Sinir Ağları (YSA) ve bulanık çıkarım sistemleri gibi akıllı kontrol yaklaşımları matematiksel model gerektirmezler ve doğrusal olmayan sistemi yakınsama yeteneğine sahiptirler (Lee ve Choi, 2004).

YSA robotik uygulamalarında farklı şekillerde denenmiştir. Patino, Carelli ve Kuchen robot manipulatorlerin hareket dinamiklerinin kontrolü için nöral ağ tabanlı kontrolör tasarlamışlardır. Ters-dinamik model-tabanlı kontrol yapısı düşünmüşlerdir. Lyapunov teorisi kullanılarak belirlenen kararlı kontrolör parametresi ayarlama mekanizması, link ataleti veya belirsiz dinamik parametrelere karşı YSA'nın çıkışlarının doğrusal kombinasyonunun katsayılarını ayarlamak için yapılandırılmıştır (Patino vd., 2002). Lewis, Yeşildirek ve Liu'nin çalışmalarında bir Lyapunov yaklaşımı kullanılarak takip performansı garanti edilir. Adaptif robot kontrolünden farklı olarak, robot fonksiyonlarının gerileme matrisinin yorucu şekilde her kolun dinamiğinden hesaplanması gereken yerlerde, nöral ağ yaklaşımı herhangi bir seri-link robot kol için nöral ağ teorisindeki standart aktivasyon fonksiyonlarının kullanımına olanak sağlamaktadır. Bu, başlangıç analizi olmadan herhangi bir rigid robot için aynı nöral ağ kontrolörün çalışacağı anlamına gelir (Lewis vd., 1996). Saad vd., robotun doğrusal olmayan dinamik modelini kontrol etmek için YSA kullanarak yörünge takip problemini incelemişlerdir. Kullandıkları kontrolör giriş-çıkış ölçümlerinden öğrenmeye dayanmaktadır. Sistemin dinamiklerini ve ters dinamik modelini tahmin etmek için çok katmanlı yinelemeli ağ kullanmışlar, ağı geriye yayılımı metodu ile eğitmişlerdir (Saad vd., 1994). Lee ve Choi de robot manipulatorler için nörokontrolör amaçlamışlardır. Kullandıkları nörokontrolör Radyal Temelli Fonksiyonlu Ağlara (RTFA) (Radial Basis Function Network, RBFN) dayanır. Kararlılığı garanti etmek için adaptasyon kuralını Lyapunov metoduna dayalı olarak türetmişlerdir (Lee ve Choi, 2004). Acosta vd. çalışmalarında uygulanan tork değerleri geri beslemeli kontrolörlerce hesaplanırken YSA geri beslemeli kontrolörün parametrelerini sağlar (Acosta vd, 1999).

Robot kontrolü için bulanık mantık ile de gerçekleştirilmiş pek çok çalışma bulunmaktadır. Kumbla vd. iki linkli robot manipulatorin kontrolünü bulanık mantık ile gerçekleştirmişlerdir (Kumbla vd.1993). Praturu yüksek lisans tezinde iki linkli bir manipulator için bulanık mantık kontrolör tasarlamıştır (Praturu, 1996). Sun ve Wang robot yörünge takip kontrolü için adaptif bulanık kontrol stratejisi geliştirmişlerdir (Sun ve Wang, 2004). Sumathi üç linkli bir manipulator için bulanık pozisyon kontrol yöntemi önermiştir (Sumathi, 2005).

Literatürde geleneksel DYK yöntemini robot manipulatorlerin yörünge takibi için kullanan çalışmaların iki temel dezavantajı vardır. İlki kontrol girişinde “çatırdama” denilen yüksek

frekanslı osilasyonların olmasıdır. İkincisi ise sistem parametrelerinin elde edilme zorluğudur. Bu dezavantajların üstesinden gelmek için bulanık mantık veya YSA gibi soft computing teknolojilerinin KKK ile birleştiren akıllı yaklaşımlar düşünülmüştür.

Ertuğrul ve Kaynak çatırdamayı elimine etmek için yapay sinir ağları ile kazancı uyarlamışlar ve Scara tipi bir robot manipulatöre uygulamışlardır (Ertuğrul ve Kaynak, 1997). Ertuğrul ve Kaynak robot yörünge takibi yaptıkları çalışmalarında eşdeğer kontrolün hesaplanmasını yapay sinir ağları ile gerçekleştirmişlerdir (Ertuğrul ve Kaynak, 1998). Bir başka çalışmalarında ise iki paralel yapay sinir ağı ile hem eşdeğer kontrolü hem de düzeltici kontrolü yapay sinir ağları kullanarak hesaplamışlardır (Ertuğrul ve Kaynak, 2000). Bunlar ve daha pek çok çalışmada kullanılan yapay sinir ağ modeli genellikle hata geriye yayılım algoritması ile eğitilen ileri beslemeli çok katmanlı ağlardır. Bunların yanı sıra KKK ile RTFA birleştiren çalışmalar da yapılmıştır (Lee ve Choi, 2004, Gökhan Ak ve Cansever, 2006).

Bulanık kontrol, parametreler ve doğrusal olmayan sistemin yapısı bilinmeden uzman bilginin kullanıldığı en etkin yöntemlerden biri olmasına rağmen, temel dezavantajı yeterli analiz ve dizayn tekniklerinin olmamasıdır.

Her iki yaklaşımın dezavantajlarını ortadan kaldırmak için bulanık kontrol ile KKK etkin özelliklerini birleştiren ve çok ilgi çeken bulanık kayan kipli kontrol ortaya çıkmıştır. Kayan kip kavramına bulanık kontrolü yerleştirerek ve kayma yüzeyi bulanıklaştırılarak kayan KKK sistemindeki çatırdama azaltılabilir, bulanık mantık kuralları KKK'nın ulaşma şartlarıyla sistematik olarak belirlenebilir. Bu özellikler kayan kipe dayalı adaptif bulanık kontrolör tasarımını pratik hale getirir.

Başbuğ doktora tezinde bulanık adaptif KKK'yı endüstriyel tipteki MAMROB ER-15 üzerinde uygulamıştır. Robotun eylemsizlik matrisinin, kayma yüzeyine erişim hızının ve kayma yüzeyinin eğiminin uyarlanması olarak üç farklı uyarlama denemiş ve hedeflediği yöntemin endüstriyel robotlar için uygulanabilir olduğu göstermiştir (Başbuğ, 1995). Choi ve Kim kayma yüzeyinin bulanıklaştırıldığı bir bulanık KKK amaçlamışlardır (Choi ve Kim, 1997). Sun vd., robotun doğrusal olmayan dinamiklerin için adaptif yakınsayıcı olarak bulanık sistem kullanmışlar ve robot yörünge takibi için sundukları bulanık adaptif kontrol yöntemi ile KKK'daki çatırdamaları elimine etmişlerdir (Sun vd., 1999). Ha vd. hareket eden bir kayma yüzeyi ile takip performansını geliştirmişlerdir (Ha vd., 1999). Yine Ha vd. kayan kipteki çatırdamayı azaltmak ve kontrol performansını artırmak için bulanık ayarlama

yaptıkları bir bulanık KKK önermiş ve bunu robotik ekskavatöre uygulamışlardır (Ha vd., 2001). Guo ve Woo kontrol kazancının tek girişli-tek çıkışlı bir bulanık sistemde hesapladıkları adaptif bulanık KKK amaçlamışlardır (Guo ve Wuo, 2003). Abdelhameed bir çatırdama indeksi ile KKK' nin adaptasyon mekanizması olarak bulanık mantık sistemini yorumlayan bir teknik amaçlamıştır (Abdelhameed, 2004). Javaheri ve Vossoughi çatırdamayı ortadan kaldırmak ve takip zamanı ile hatayı azaltmak için kontrol kazancını ve sınır katman kalınlığını optimize etmek amacıyla online bulanık olarak ayarlanan bir KKK önermişlerdir. (Javaheri ve Vossoughi, 2005). Derbel ve Alimi eşdeğer kontrol hesaplanmadan bulanık mantık ile bir KKK gerçekleştirmişlerdir. Kural sayısını azaltmak için sistemi alt sistemlere ayırmış ve her alt sistem için yerel geri beslemeli kontrol kullanmışlardır (Derbel ve Alimi, 2006).

Literatürde YSA ile KKK'yı ve bulanık mantık ile KKK'yı birleştiren pek çok çalışma bulunduğu görülmektedir. Ancak bu üç önemli yöntemi birleştiren çalışmalara çok rastlanmamaktadır. Bu tez çalışmasının amacı robotikte en çok çalışılan konulardan biri olan yörünge takibini etkin olarak gerçekleştirmek için akıllı kontrol yöntemleri olarak nitelendirilen YSA, bulanık mantık ve KKK'dan yararlanarak, sistem bilgisine ihtiyaç duymayan yeni dayanıklı bir kontrolör geliştirmektir.

Çalışmanın 2. bölümünde KKK, 3. bölümünde bulanık mantık ve 4. bölümünde ise YSA konusunda bilgi verilmiştir. 5. bölümde ise geliştirilen kontrol sistemleri açıklanmış ve önerilen yöntemlerin akış diyagramları verilmiştir. 6. bölümde 3 eksenli scara robot için simülasyon sonuçları sunulmuş, eşdeğer kontrolü hesaplamak için çok katmanlı algılayıcı kullanılarak ve eşdeğer kontrol klasik olarak hesaplanarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Ayrıca önerilen iki yöntemde kendi aralarında karşılaştırılmıştır. 7. bölümde endüstriyel bir robot olan manutec-r15'in modeli sunularak bu robot için simülasyon sonuçları verilmiştir. 8. bölümde deneylerin yapıldığı kontrol sistemi açıklanmıştır. Hem önerilen yöntemler hem de PD ve PID kontrol ile elde edilen deney sonuçları 9. bölümde sunulmuştur, deney ve simülasyon sonuçları karşılaştırılmıştır. Son bölümde sonuçların değerlendirilmesi yapılmıştır.

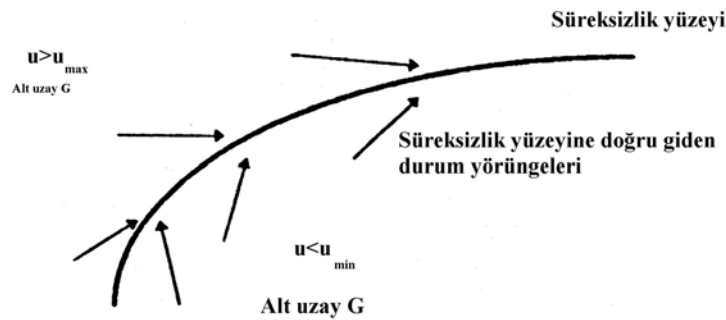
2. KAYAN KİPLİ KONTROL

DYK 1960'ların başında Rusya'da Emelyanov ve Barbashin'in öncü çalışmasından gelişmiştir. KKK'nın ilk fikri Emelyanov tarafından 1960'ların sonlarında ikinci derece sistem üzerinde oluşturulmuştur. Faz düzleminde, hata dinamikleri merkeze doğru sürülürken herhangi bir başlangıç durum vektörü düzleme doğru sürülebileceği ve orada kalabileceği özel bir hat belirlenebileceğini öngörmüştür. Bundan sonra, teori gelişmiş ve kayan hat kayma yüzeyi denilen çok boyutlu yüzey şeklini almıştır. Bu fikirler Itkis'in kitabı (1976) ve Utkin' in inceleme makalesinin İngilizce olarak yayınlandığı 1970'lerin ortasına kadar Rusya dışında ortaya çıkmamıştır (Edwards ve Supergeon, 1998).

Değişken yapıli sistem teorisine büyük katkılar son on yılda yapılmıştır. Doğrusal ve doğrusal olmayan sistemler için kontrol stratejisi gözden geçirilmiştir. Kanonik formlara diferansiyel denklemler koyan anahtarlama yöntemleri ve kontrollere dayalı basit KKK oluşturulması detaylı olarak düşünülmüştür. KKK yöntemini robotik manipülatörlere uygulamıştır ve yöntemin kalitesini tartışılmıştır.

Değişken yapıli kontrolü örnek sistem modellerinde belirsizliğe sahip sistemlerin çoğuna başarıyla uygulanmıştır. Kontrol stratejisinin iki amaca dayanan felsefesi basittir. Önce, sistem istenen dinamiklere doğru zorlanır, ikinci olarak sistem diferansiyel geometride korunur.

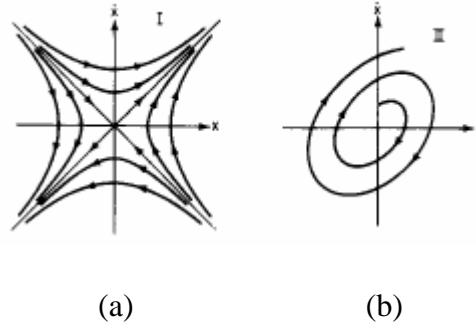
Değişken yapıli sistemlerde sistemin davranışı, süreksiz yüzeylerde, durum yörüngelerinde gösterilir. Hiper düzleme karşı gelen sistemin durumları olarak, kontrol girişi hiper düzleme karşı gelen sistemin durumları olarak bir u_{max} değerinden, bir u_{min} değerine kadar anahtarlanır (Şekil 2.1). Hiper düzlemler, anahtarlama veya kayma yüzeyleri (sliding surface) olarak bilinmektedir (Utkin, 1977).



Şekil 2.1 Süreksizlik yüzeyi ile durum uzayının bölünmesi

Kayma kipinde, durumların hareketi, tüm durum uzayının belli bir alt uzayında kalacak şekilde sınıflandırılır. Bu alt uzay içindeki sistem davranışı Utkin tarafından eşdeğer bir sistem olarak adlandırılmıştır.

Değişken yapıli sistemlerin teorisinin temel mantığının gösterilmesi için iki yapı göz önüne alınabilir (Şekil 2.2). Şekil 2.2a denge noktası merkezde bir odak olan sistemin faz düzlemi yörüngesini, Şekil 2.2b ise denge noktası merkezde olan bir eyerin faz düzlemi yörüngesini göstermektedir. Her iki sistem de kararsızdır (Hung vd., 1993).

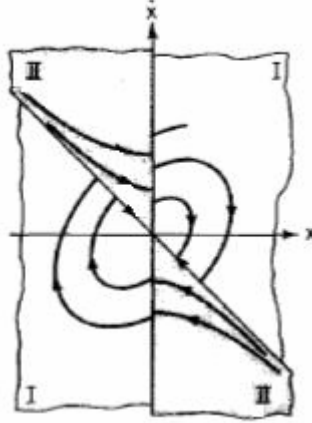


Şekil 2.2 İki kararsız yapının faz resimleri

Bir sistemin durumları, uygun bir anahtarlama kuralı ile süreksizlik yüzeylerinde sistemin kararsız bir yapısından, öteki kararsız yapısına geçebiliyorsa, kararsız bir sistemden kararlı bir sistem elde edilebilir.

Değişken yapıli sistemlerde bu yeni oluşan sistemlerin özellikleri, farklı yapıların yörünge parçalarından, istenen yörüngeler birleştirilerek elde edilmiş olur. Bu yörüngeler yeni bir tip hareketi tanımlar (Başbuğ, 1995). Kontrol stratejisi ismini dinamik davranıştan alır ve Kayan Kipli Kontrol denilir (Utkin, 1977).

Şekil 2.2' de verilen kararsız iki sistem, eksenlerinden üst üste koyarak çakıştırılırsa ve eksenlerin ayırdığı bölgenin birinde 1. sistemin, diğer bölgede 2. sistemin yörüngeleri izlenecek şekilde anahtarlama yapılırsa Şekil 2.3' de görülen asimptotik kararlı yapı oluşur. Bu sistemin faz yörüngesinin sistemin iki kipten gösteren iki kısımdan oluştuğu söylenebilir. İlk kısmı, faz düzleminin herhangi bir yerinden başlayan yörüngenin anahtarlama hattına doğru hareket ettiği ve sonlu zamanda hatta ulaştığı *ulaşma kipi*dir. Diğer kısım ise yörüngenin faz düzleminde asimptotik olarak merkeze yöneldiği *kayma kipi*dir.



Şekil 2.3 İki kararsız yapıdan oluşan kararlı yapı

2.1 Süreksiz Dinamik Sistemlerde Kayma Kipi

Genel bir değişken yapıli sistem ele alınırsa,

$$\dot{x} = f(x, t, u) \quad (2.1)$$

burada $x \in \mathcal{R}^n$, $u \in \mathcal{R}^m$ ve $f \in \mathcal{R}^n$ dir. Kontrol vektörünün her elemanı x ve t ' nin sürekli fonksiyonlarının kümesinden birisine eşit olabilir. Durum uzayında,

$$u(x, t) = u^+(x, t) \quad s(x) > 0 \text{ ise}$$

$$= u^-(x, t) \quad s(x) < 0 \text{ ise}$$

dir. Bu ifadenin fiziksel anlamı aşağıdaki gibidir:

a. Sisteminkinden daha düşük dereceli olan, istenen sistem dinamiklerinin göstermek için bir kayma yüzeyi $s(x) = 0$ tasarla.

b. Anahtarlama yüzeyinin dışında herhangi bir x durumunun sonlu zamanda yüzeye ulaştırmak için sürecek bir DYK ($u(x, t)$) tasarla. Kayma yüzeyinde, istenen sistem dinamiklerini izleyen kayma kipi yer alır. Bu yolla, bütün DYK sistemi global asimptotik kararlı olur (Hung vd, 1993).

İdeal kayma kiplerinin denklemlerini bulmak için *eşdeğer kontrol yöntemi* olarak adlandırılan bir teknik kullanılır. Bu yöntemde (2.1) sisteminin yörüngeleri boyunca $s(x)$ vektörünün zamana göre türevi sıfıra eşitlenir ve kontrol için bu sistem çözülür. Sonuçta elde edilen denklemler ideal kayma kipi denklemleri olur (Utkin, 1977).

2.2 Robotun Kayan Kipli Kontrolü

Robot dinamik modeli aşağıdaki gibidir:

$$u = M(q)\ddot{q} + c(q, \dot{q}) + g(q) \quad (2.2)$$

Kütle matrisi $M(q)$ eklem açıları q 'nin fonksiyonudur; $c(q, \dot{q})$ merkezkaç ve coriolis etkisini açıklar, $g(q)$ yerçekimi etkisini gösterir. u eklem torqlarının vektörüdür.

Buradan $x_1 = q$ ve $x_2 = \dot{q}$ dönüşümleri yapılırsa robotun dinamiği $M\dot{x} + cx + g = u$ biçimine gelir. Robotun durum uzayı matematiksel modeli,

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ -M(x_1)^{-1}[c(x_1, x_2)x_2 + g(x_1)] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ M(x_1)^{-1} \end{bmatrix} u \quad (2.3)$$

şeklinde elde edilir. Buradan robot dinamiğinin kapalı biçimi,

$$\dot{x}(t) = f(x, t) + Bu \quad (2.4)$$

şeklinde yazılabilir. B giriş kazanç matrisidir.

2.2.1 Kayma yüzeyi

KKK' deki çok önemli noktalardan biri kayma yüzeyin parametrelerinin seçimidir. Kayma yüzeylerin uyarlamalı tasarımına yönelik bazı çalışmalar, kayma yüzeyleri düzenli olarak yeniden tasarlayan bir uyarlama mekanizması ve ara birim oluşturulmasıyla kontrol sisteminin performansının artırılabilceğini göstermiştir. Bu, ise dayanıklı kontrol sistemlerinde sonuçlanır.

Amaç, sistem durumlarını kayma yüzeyine sürmektir. (2.4)'de verilen sistem için kayma yüzeyi genellikle aşağıdaki gibi seçilir:

$$s = \{x : s(x, t) = \varphi(t) - s_a(x) = 0\} \quad (2.5)$$

burada, $\varphi(t) = Gx_d(t)$ kayma fonksiyonunun zaman bağımsız kısmıdır. $s_a(x) = Gx(t)$ kayma fonksiyonunun durum bağımsız kısmını gösterir. x_d vektörü istenen (referans) durumu gösterir.

G tasarım parametresi kayma yüzeyinin eğimini belirler. İki matrisin bileşimi şeklinde oluşturulur: $G = [\Lambda \quad \Gamma]$, burada Γ birim matristir ve Λ , λ_i girişleri ile köşegen matristir.

Kayma yüzey değişkeni bundan dolayı aşağıdaki yapıdadır:

$$s_i = \left(\frac{d}{dt} + \lambda_i \right)^{k_i-1} e_i \quad (2.6)$$

e hatadır ($e = x_d - x$) ve λ_i tasarımcı tarafından seçilen pozitif sabittir.

Durum sonlu zamanda bir kez kayma yüzeyine ulaştığında hem e 'nin hem de \dot{e} 'nin üstel olarak sifıra yakınsayacağı $s = 0$ çözülerek gösterilebilir.

2.2.2 Kayan kipli kontrolör tasarımı

Bir robotik sistemde, kontrol amacı robotun istenen $q(t) = q_d(t)$ yörüngesini izlemesini sağlamaktır. Bu durumda, kayan kip yüzeyinin basit ve genel bir seçimi $\lambda > 0$ için $s = 0$ dır (Bekit vd., 1997).

Kontrol işareti, aday Lyapunov fonksiyonu Lyapunov kriterlerini sağlayacak şekilde seçilmelidir. Pozitif Lyapunov fonksiyonu tanımlanır:

$$V(s) = \frac{s^T s}{2} \quad (2.7)$$

Böylece,

$$\frac{dV}{dt} = s^T \dot{s} \quad (2.8)$$

bulunur. Lyapunov fonksiyonunun türevinin negatif tanımlı olması gerekir:

$$\frac{dV(s)}{dt} = -s^T D \text{sign}(s) \quad (2.9)$$

D pozitif tanımlı köşegen matristir.

(2.8) ile (2.9) eşitlenirse,

$$s^T \dot{s} = -s^T D \text{sign}(s) \quad (2.10)$$

elde edilir. Lyapunov fonksiyonunun türevi böylece negatif tanımlı olur ve bu kararlılığı sağlar.

Kayma fonksiyonu için zaman türevi ifadesi

$$\dot{s} = \dot{\varphi} - \frac{\partial s_a}{\partial x} \dot{x} = \dot{\varphi} - G(f(x,t) + Bu(t)) \quad (2.11)$$

dir. (2.11), (2.10)'da yerine yazılırsa KKK kuralı aşağıdaki gibi gösterilebilir (Palaz, 2000):

$$u(t) = u_e(t) + u_d(t) \quad (2.12)$$

burada $u_e(t)$ eşdeğer kontrol kuralıdır ve $u_d(t)$ düzeltici kontrol kuralıdır. $u_e(t)$ eşdeğer kontrol kuralını hesaplamak için kayma yüzeyi ifadesinin türevi (2.11) sıfıra eşitlenir:

$$\frac{d\varphi}{dt} - G(f(x,t) + Bu_e(t)) = 0 \quad (2.13)$$

buradan eşdeğer kontrol kuralı aşağıdaki gibi elde edilir:

$$u_{eq} = -(GB)^{-1} \left(Gf(x,t) - \frac{d\varphi}{dt} \right) \quad (2.14)$$

u_d aşağıdaki gibi gösterilir:

$$u_d = (GB)^{-1} D \text{sign}(s) = K \text{sign}(s) \quad (2.15)$$

burada K pozitif sabittir, $\text{sign}(s)$ signum fonksiyonudur ve aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\text{sign}(s_i) = \begin{cases} 1 & s_i > 0 \\ 0 & s_i = 0 \\ -1 & s_i < 0 \end{cases} \quad (2.16)$$

2.3 Çatırdama

(2.12)'deki kontrolör çıkışında çatırdama denilen yüksek frekanslı osilasyonlara yol açar. Çatırdama sistemin yüksek frekanslı dinamiklerini uyaracağı için istenmeyen bir durumdur.

DYK sistemlerinin tasarım ve analizindeki temel kabullerden biri kontrolün bir değerden diğerine son derece hızlı olarak anahtarlanabilmesidir. Ancak pratik sistemlerde pek çok DYK tasarımı için gerekli olan yüksek anahtarlama kontrolüne ulaşmak imkansızdır. Bunun pek çok sebebi vardır. Sebeplerden biri kontrol hesabı için sonlu zaman gecikmelerinin varlığıdır. İkinci sebep fiziksel aktuatorlerin limitleridir. Kontrolü çok hızlı olarak anahtarlamak mümkün olmadığından çatırdama daima olur.

Çatırdama engellenemediğinden onun etkilerini elimine etmeye veya azaltmaya yönelik

önemli araştırmalar yapılmıştır. Sürdürme yaklaşımında, anahtarlama yüzeyinin etrafında bir sınır katman getirilir. Bu sınır katmanla, kontrol, anahtarlama fonksiyonunun sürekli yakınsaması olarak seçilir. Bir yorum, yüksek kazançlı kontrolün yüzey yakınında kullanılmasıdır. Sistem sınır katman genişliğinin fonksiyonu olan dayanıklılığa sahiptir (Hung vd., 1993).

Diğer bir yaklaşımda, çatırdamayı elimine etmek için genellikle *sign* fonksiyonu yerine doyum veya kaydırılmış sigmoid fonksiyonu önerilir (Mkrttchian ve Lazaryan, 2000, Tsai vd., 2004):

$$h(s_i) = \frac{2}{1 + e^{-s_i}} - 1 \quad (2.17)$$

3. BULANIK MANTIK

İlk defa Zadeh (1965) tarafından kullanılan bu terim olayların oluşum ihtimalinden çok oluşum derecesiyle ilgilenen bir kavramı tanımlar. Bulanık mantığın oldukça kapsamlı ve ayrıntılı matematiksel temeli olmasına rağmen uygulanması oldukça basittir.

Bilinen geleneksel var-yok mantığında bir eleman bir kümenin ya elamanıdır ya da değildir (0 veya 1). Bu tür kümelere *keskin (crisp) kümeler* denir. Bir denetleyicide fiziksel büyüklüklerin oluşturduğu kümeler birbirinden böyle keskin çizgilerle ayrılmışsa denetim çıktısında ani değişikliklerin olması kaçınılmazdır. Örneğin sıcaklık denetimi yapan bir on/off denetleyicide soğuk sıcak sınırı 30°'de ise 29.9°C soğuk olarak algılanırken 30.1°C sıcak olarak algınacak ve ısıtma-soğutma işlemleri çok ani değişikliklerle gerçekleşecektir.

Bulanık mantık, keskin mantığın açık/kapalı, hızlı/ yavaş gibi ikili kavramlarını az açık/az kapalı, biraz hızlı/biraz yavaş gibi daha yumuşak niteleyicilerle temsil ederek gerçek dünya ile bağdaşan daha uygun bir mantık oluşturur.

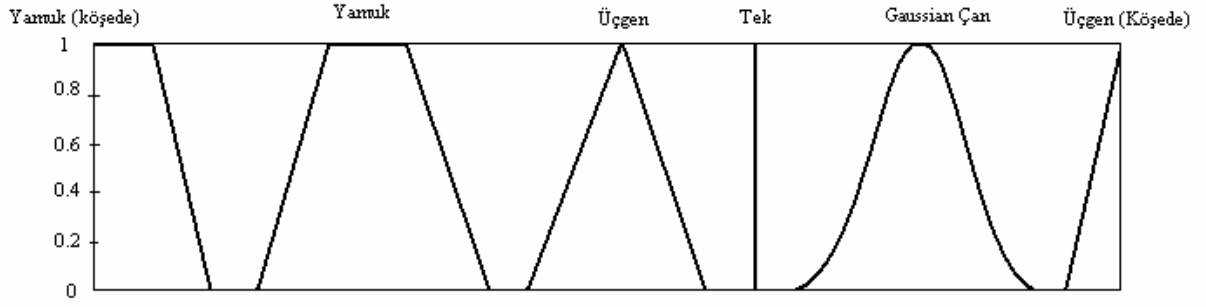
Denetlenecek sistemin matematiksel modelinden çok sistemi çalıştıran operatörün sistem hakkında sahip olduğu bilgiler daha önemlidir (Ross, 1995).

3.1 Bulanık Kümeler

Bulanık kümeler üyelik fonksiyonu denilen matematiksel formülasyonlarla temsil edilirler. Bu fonksiyon kümedeki üyeliğin derecesini gösterir. Yani bu fonksiyon A bulanık kümesinin elemanlarını 0 ve 1 aralığındaki gerçek değerlere haritalar. Eğer evrende bir eleman, mesela x , A bulanık kümesinin elemanı ise bu durumda haritalama $\mu_A(x) \in [0,1]$ olarak ifade edilir. Değer değişim aralığı (universe of discourse), X , ayrık ve sonlu ise bulanık kümenin kural gösterimi aşağıdaki gibi olur (Ross, 1995):

$$A = \left\{ \frac{\mu_A(x_1)}{x_1} + \frac{\mu_A(x_2)}{x_2} + \dots \right\} = \left\{ \sum_i \frac{\mu_A(x_i)}{x_i} \right\} \quad (3.1)$$

Üyelik fonksiyonları değişik biçimlerde olabilir. Genelde Şekil 3.1' de gösterildiği şekilde üçgen, çan veya yamuk biçiminde fonksiyonlarda olabilir (Kecman, 2001). Üyelik fonksiyonlarında kullanılan etiket sayısı kullanıcıya bağlıdır.



Şekil 3.1 Örnek üyelik fonksiyonları

Üç en çok bilinen ve önemli küme işlemi: Tümleyen (complement-NOT), kesişme (intersection, AND) ve birleşimdir (Union, OR).

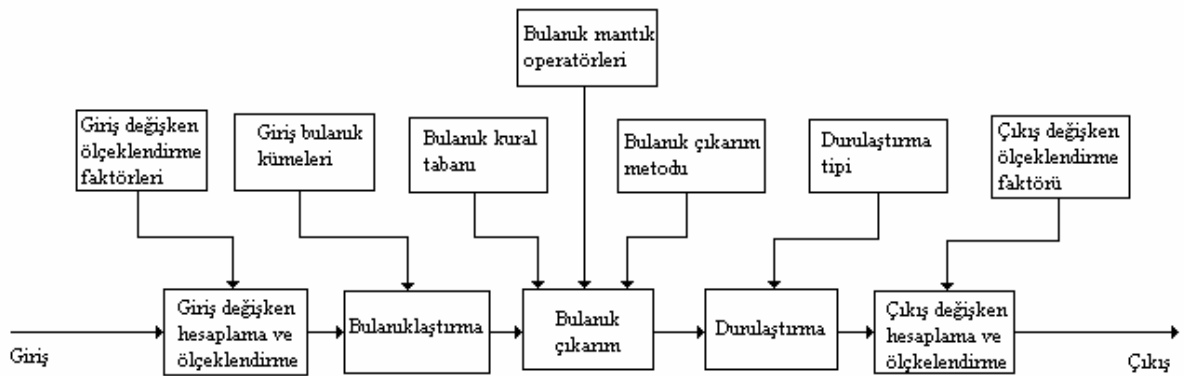
Birleşim: $\mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x))$

Kesişim: $\mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x))$

Tümleyen: $\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x)$

3.2 Bulanık Kontrolör

Bir bulanık kontrolörün blok diyagramı Şekil 3.2' de gösterilmiştir. Tipik bir bulanık kontrolörün ana elemanları bulanıklaştırma, bilgi tabanı, bulanık çıkarım ve durulaştırma'dır (Ying, 2000).



Şekil 3.2 Bulanık kontrolörün blok diyagramı

3.2.1 Bulanıklaştırma

Bulanık sistemler kesin olmayan dilsel ifadelerle gösterilen bilgileri kullanmaktadır. Başka bir deyişle bulanık küme teorisinde işlemler bulanık değerler üzerinde yapılmaktadır. Bu nedenle dış ortamdaki ölçülen reel giriş değişkenlerini bulanık değişkenlere çeviren bulanıklaştırma bulanık mantıkta önemli bir rol oynar ve ilk adımı teşkil eder.

Kontrolü yapılan sistemden giriş değişkenlerinin gerçek zamanda ölçümlerinin alınmasının ve eğer gerekirse giriş değişkenlerini sabit bir sayıyla çarpmak ya da bölmek gibi işlemlerle ölçeklendirme yapılmasının ardından bulanıklaştırma başlar. Ölçümü yapılan reel giriş değişkenlerinin her birisini o değişkene ait söylem uzayına göre dilsel değişkenlere dönüştürmek ve bunlara ait üyelik değerlerini bulmak bulanıklaştırma bölümünde gerçekleştirilir.

Sonuç olarak dilsel niteleyicisi ve üyelik değeri elde edilen her bir reel giriş değişkeni bulanık değişkenlere veya başka bir deyişle bulanık sayılara dönüştürülmüştür. Bu bölümde fiziksel dünyadan alınan gerçek değerlere dilsel nitelik kazandırılır [1].

3.2.2 Bilgi tabanı

Denetimi sağlamak amacı ile oluşturulan kurallar burada bulunur. Bu kurallar aşağıdaki formda gerçekleşir (Başbuğ, 1995):

If (*sağlanan koşullar kümesi*) **then** (*çıkarım yapılabilecek sonuçların kümesi*)

Temel olarak uygulama sahasına ait uzman bilgisini ve kontrol hedeflerini içeren bilgi tabanı bulanık kontrolörün dilsel kavramları kullanabilmesini sağlayan arabirimdir. Bulanık kontrol sistem tasarımında klasik kontrol sistemlerinde olduğu gibi analitik bir metot olmaması bu arabirimin oluşturulmasını güçleştirmektedir. Veri tabanı ve kural tabanı olmak üzere iki kısımdan oluşur:

Veri tabanı dilsel kavramları (bulanık değişkenleri) bulanık kontrol sisteminde kullanabilmek için gerekli tanımları içerir. Başlıca giriş, çıkış değişkenlerine ait dilsel uzayların tanımlarını, üyelik fonksiyonlarını, eğer sistemde değişkenler normalize edilmişse bu işlemlerle ilgili bilgileri ve bulanık kontrolörde kullanılan bulanık işlemlerinin tanımlarını kapsar.

Kural tabanı uygulama alanındaki uzman kişilerin kontrol hedeflerini ve kontrol sırasında takip ettikleri yöntemleri karakterize etmeyi sağlayan dilsel değişkenlerden oluşturulan kurallar kümesidir.

3.2.3 Bulanık çıkarım

Bulanık kontrolörün en önemli arabirimidir. Bilgi tabanında tanımlanan bulanık kavram ve kuralları kullanarak giriş değişkenlerinin durumuna göre uzman bir kişiden beklenen kontrol hareketlerini dilsel ifade olarak üretir. Çıkışta dilsel değişkeni ve üyelik fonksiyonu belli bulanık sayılar elde edilir. Çıkış değişkenlerine ait üyelik fonksiyonu bulunurken çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Literatürde en çok geçen yöntemler minimum korelasyonu ve çarpım korelasyonu olarak sayılabilir. Bu yöntemler kullanılırken ilk önce, dilsel çıkış değişkenlerinin üretilmesine sebep olan giriş değişkenlerine ait üyelik dereceleri isteğe bağlı olarak minimum (VE) veya maksimum (VEYA) işlemine tabi tutulur ve çıkış üyelik fonksiyonlarının etkinlik derecesi diyebileceğimiz tek bir üyelik derecesi elde edilir. Genelde etkinlik derecesini elde etmede literatürde minimum işlemi kullanılmıştır. Bu işlem üretilen her bir çıkış için tekrarlanır ve elde edilen bu etkinlik dereceleri yukarıda geçen metotlardan birinde kullanılarak çıkış dilsel değişkenleri ve üyelik fonksiyonları oluşturulur.

3.2.4 Durulaştırma

Durulaştırma arabirimi, sonuç çıkartım mekanizmasının ürettiği çıkış değişkenlerine ait bulanık sayılardan reel kontrol işaretlerinin elde edildiği bölümdür. Bulanık sayılardan reel çıkış değerleri maksimum kriteri, maksimumların ortalaması ve alanların ağırlık merkezi gibi üç farklı dönüşüm ile elde edilebilir. Maksimumların ortalaması yöntemi geçici durum için, alanların ağırlık merkezi yöntemi ise kalıcı durum için daha iyi sonuçlar vermektedir ve bu nedenle ağırlık merkezi durulaştırmada en çok kullanılan yöntemdir. Ayrıca çıkışa ait reel değişkenlerin sınırları, dilsel değişkenlerin söylem uzayından farklı ise bulanıklaştırmadaki gibi bir ölçeklendirme durulaştırmada da yapılabilir.

Bulanık sistemin dinamik davranışı uzman bilgisi tabanına dayalı dilsel tanımlama kurallarının bir kümesi ile karakterize edilir.

Bulanık çıkış fonksiyonlarını durulaştırma için literatürde en az yedi yöntem vardır. Bunlardan en çok tercih edilen dördü aşağıdadır (Ross,1995):

a. Maksimum üyelik prensibi: Yükseklik yöntemi olarak da bilinen bu yöntem çıkış fonksiyonlarının tepe değeri ile sınırlıdır. Bu yöntem aşağıdaki cebirsel ifade ile verilir (Örneğin Z değer değişim aralığı için):

$$\mu_A(z^*) \geq \mu_A(z) \quad \text{bütün } z \in Z \quad (3.2)$$

b. Kütle merkezi yöntemi: Bu yöntem en yaygın ve fiziksel olarak cazip olan durulaştırma yöntemidir. Aşağıdaki cebirsel ifade ile verilir:

$$z^* = \frac{\int \mu_A(z)zdz}{\int \mu_A(z)dz} \quad (3.3)$$

c. Ağırlıklı ortalama yöntemi: Bu yöntem sadece simetrik çıkışı olan üyelik fonksiyonları için geçerlidir.

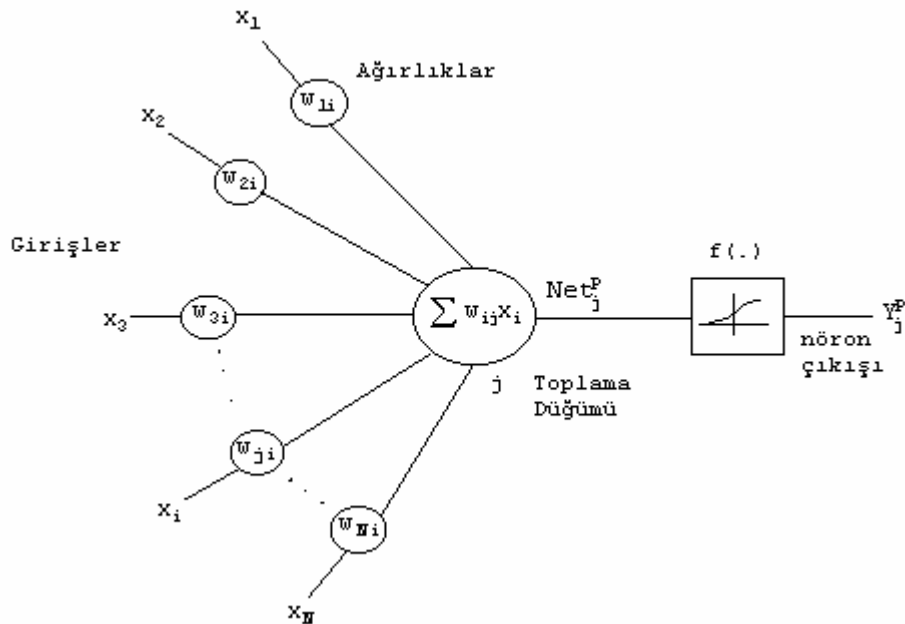
$$z^* = \frac{\sum \mu_A(\bar{z})\bar{z}}{\sum \mu_A(\bar{z})} \quad (3.4)$$

d. Ortalama-maksimum üyelik: Bu yöntem ilk yönteme maksimum üyelik fonksiyonlarının oldukça benzerdir. Burada maksimum değerinden farklı olarak tek bir nokta yerine düz olabilir.

4. YAPAY SİNİR AĞLARI

Yapay sinir ağları ile çalışmak geleneksel sayısal bilgisayarlardan tamamen farklı şekilde hesap yapan insan beyninin tanınmasıyla hız kazanmıştır. Gelişen nöron plastik beyin ile eş anlamlıdır: Plastisite etrafındaki çevreye uyum sağlamak için gelişen sinir sistemine olanak tanır. Nitekim plastisite insan beynindeki bilgi işleme üniteleri gibi nöronların çalışmasına temel olarak görülür. En genel yapıda, bir sinir ağı, bir işi beyin yaptığı şekilde modellemek için tasarlanmış bir makinedir (Haykin, 1999).

Bir biyolojik nöron dentrit adı verilen girişler üzerinden sinyalleri alıp birleştiren veya işleyen bir elemandır. Eğer bir nörona gelen birleştirilmiş sinyaller yeterince güçlü ise bu nöron akson adı verilen diğer nöronların dentritlerine, sinaps adı verilen tek yönlü bağlantı yolları ile işaretler gönderir. Dentrit girişleri ile bir nörona gelen her sinyal sinaptik düğümden geçer. Bu düğüm, dentrit içinde, sonsuz derecede küçük bir boşluktur ve elektrik yüklerinin (sinyallerin) akışını kolaylaştıran veya zorlaştıran bir sıvı ile doludur. Nöronların temel davranışları biokimyasaldır. Bu nöro-aktarıcı sinyaller, nöronların merkezlerine giden elektrik sinyallerinin oluşumunu sağlarlar. Sinaptik boşluğun empedansının veya kondüktansının ayarlanması, beyin hafıza veya öğrenme süreci olarak bilinir. Bu teoriye göre, beyin klasik bilgisayarlar gibi merkezi işlem birimi ve merkezi hafıza birimi yerine ilişkili hafıza (Associative Memory) özelliğine sahiptir. Biyolojik nöronlardan hareketle oluşturulan yapay bir nöronun modeli Şekil 4.1' de gösterilmiştir.



Şekil 4.1 Yapay bir nöronun modeli

x_1, x_2, \dots, x_N giriş sinyalleri genelde, biyolojik nöronlarda olduğu gibi kesikli sinyaller değil, sürekli sinyallerdir. Her giriş sinyali, biyolojik düğümde sinaptik düğümüne karşılık gelen "sinaptik ağırlık" veya "bağlantı şiddeti" adı verilen bir katsayı ile çarpılır. Ağırlık katsayıları pozitif veya negatif olabilir. Toplama düğümü ağırlıklı giriş sinyallerini toplayarak genellikle doğrusal olmayan bir fonksiyondan geçirir ve çıkışa iletir. Bu doğrusal olmayan fonksiyon doğrusal, eşik doğrusal, adım sürekli, sigmoid fonksiyon olabilir. Ama en çok kullanılanı sigmoid fonksiyondur. Sigmoid fonksiyonu şu şekilde yazılabilir:

$$Y = \frac{I}{1 + e^{-\lambda_e x}} \quad (4.1)$$

Burada λ_e , 0 ve 1 arasında değişen, fonksiyonunun eğimini ayarlayan bir katsayıdır. λ_e 'nin alacağı büyük değerler fonksiyonu basamak fonksiyonuna yaklaştırır. Bu fonksiyonun doğrusal olması nöronların doğrusal olmayan özelliği ortadan kaldırarak YSA'nın doğrusal olmayan sistemleri benzetim yapma yeteneğini etkisiz kılar.

Bir YSA birçok işleme elemanının bir arada bağlanmasından oluşmuştur. Her işleme elemanının birçok giriş işareti ve tek bir çıkış işareti vardır. Bu çıkış işareti, diğer işleme elemanlarına giriş oluşturmak amacıyla birçok yola dağılır. Dolayısıyla paralel bir çalışma söz konusudur. Bu yollar işleme elemanlarını bir ağ içinde bağlarlar.

Her işleme elemanının bir yerel belleği vardır. Bu yerel bellekte uyarlanan katsayıların önceki hesaplamaları ile belirlenen değerleri saklanır. Her elemanın yaptığı işleme elemanının son gelen giriş işaretlerinin ve yerel bellekteki adaptif katsayıların bir fonksiyonu olarak tanımlanan matematiksel bir formül olan transfer fonksiyonu ile belirlenir. Çoğu kez bir sinir ağı, hepsi aynı transfer fonksiyonuna sahip işleme elemanlarının grupları olan katmanlara ayrılır.

YSA'lar tasarımına bağlı olarak, işleme elemanları ya sürekli olarak çalışırlar ya da ayrık zamanda güncellenirler. Bir planlama fonksiyonu, her işleme elemanının transfer fonksiyonunu hangi sıklıkta ve nasıl uygulayacağını belirler.

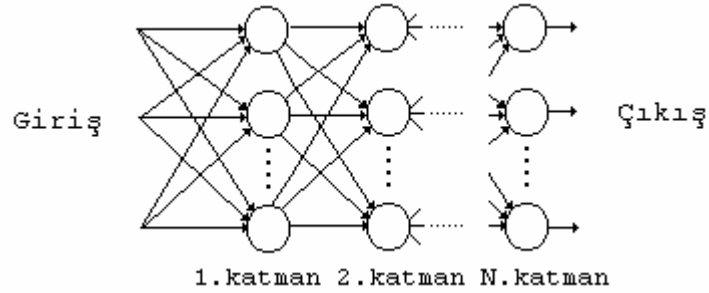
Her işleme elemanı tamamen kendi içinde yeterlidir ve kendi komşularında yapılan tüm işlemlere kayıtsız kalarak işini sürdürür. Ancak aynı anda tüm işleme elemanları bütün ağın davranışını gizli bir şekilde etkiler. İşleme elemanları arasındaki bağlantıların topolojisi, her işleme elemanının hangi bilgiyi aldığını ve dolayısıyla üzerinde çalışabileceği bilgiyi belirlediği için, bir YSA'nın yürütebileceği bilgi işleme fonksiyonlarını belirler (Özmeteler,

1989).

4.1 Yapay Sinir Ağ Modelleri

Yapay sinir ağ modelleri, temel olarak İleri Beslemeli ve Geri Beslemeli olmak üzere ikiye ayrılırlar. İleri Beslemeli ağ giriş çıkış üzerine haritalandığı zaman açık bir geri besleme bağlantısına sahip değildir, çıkış değerleri sıkça istenen çıkış değerini sağlayan öğretici bilgisiyyle karşılaştırılırlar ve bir hata sinyali ağ ağırlıklarını güncellemek için kullanılırlar (Çok Katmanlı Algılayıcı (Multi Layered Perceptron), Radyal Temelli Fonksiyonlu Ağlar) (Zurada, 1992). Az sayıda geri besleme ve transfer fonksiyonlarının doğrusal olduğu durumlarda bile, geri beslemeli sistemlerin çalışması genel olarak çok karmaşıktır. İnsan beyindeki nöronların doğrusal olmayan transfer fonksiyonuna sahip oldukları ve beyindeki geri besleme çevrimlerinin sayısının 10^{15} mertebelerinde olduğu düşünülürse, bu sistemin karmaşıklığı daha iyi anlaşılabilir.

1960'larda Widrow, Hoff ve diğerleri tarafından oluşturulan ağların çeşitli uygulamalarda sınırlı yetenekler gösterdikleri ispatlanmıştır. Fakat bu ağlar, iki veya daha fazla nöron katmanını kaskat bağlayarak oluşturulan, çok katmanlı ağlara (Şekil 4.2) öncülük yapmıştır. Geliştirilen algoritmalarla tek katmanlı ağların yapmakta başarısız olduğu birçok iş çok katmanlı ağlar tarafından başarılı bir şekilde yapılmıştır (Özmeteler, 1989).



Şekil 4.2 Çok katmanlı ağ

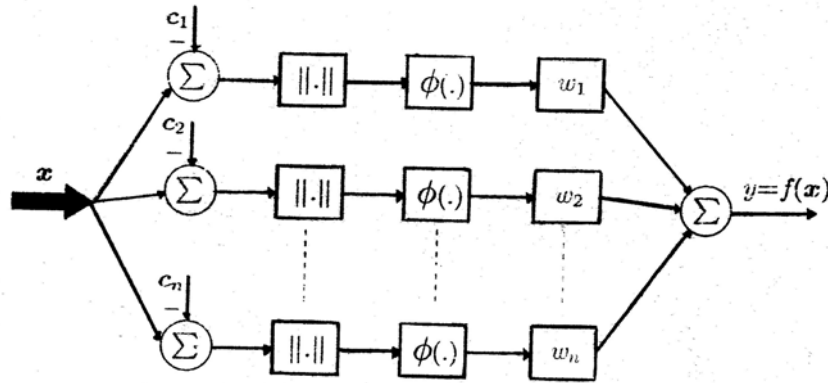
4.2 Radyal Temelli Fonksiyonlu Ağlar (RTFA)

Radyal Temelli Fonksiyonlu Ağ (RTFA) veya potansiyel fonksiyon ağı çok katmanlı ileri beslemeli ağlara bir alternatif olarak görülmektedir. Mükemmel yakınsama özellikleri vardır. Doğrusal olmayan yakınsama özelliklerinden dolayı RTFA karmaşık haritalamaları modelleyebilirler (McGarry&MacIntyre).

Radyal Temelli Fonksiyon (RTF) metodu ilk olarak Hardy tarafından amaçlanmış (Hardy, 1971) ve teorisi Powell tarafından geliştirilmiştir (Powell, 1987 ve 1992). Poggio ve Girosi Gaussian radyal temelli fonksiyonların doğrulama teorisini geliştirmiştir (Poggio ve Girosi, 1990). RTFA doğrusal olmayan kontrol sistemlerinin girişleri ve çıkışları arasındaki doğrusal olmayan haritalamayı göstermek için geniş çapta kullanılmıştır (Huang vd., 2001).

4.2.1 Temel Radyal Temelli Fonksiyonlu Ağ modelleri

RTFA'nın yapısı Şekil 4.3'de gösterilmiştir. Ağ üç katmandan oluşur: bir giriş katmanı, doğrusal olmayan işlem nöronlarından oluşan tek bir katman ve bir çıkış katmanı.



Şekil 4.3 RTFA'nın yapısı

İlk ve ikinci katmanlar arasında ağırlık yoktur. RTF kullanmak için, saklı birim aktivasyon fonksiyonlarını, işlem birimlerinin sayısını, verilen işi modellemek için bir kritere ve ağırlık parametrelerini bulmak için bir eğitime algoritmasına ihtiyaç vardır. Giriş katmanından saklı katmana doğrusal olmayan, saklı katmandan çıkış katmanına ise doğrusal işlem gerçekleştirirler.

Ağın çıkışı aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$y_i = f_i(x) = \sum_{k=1}^N w_{ik} \phi_k(x, c_k) = \sum_{k=1}^N w_{ik} \phi_k(\|x - c_k\|) \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (4.2)$$

burada $x \in \mathcal{R}^{n \times 1}$ giriş vektörü, $\phi_k(\cdot)$, \mathcal{R}^+ 'dan (bütün pozitif gerçek sayılar) \mathcal{R} 'ye bir fonksiyon, $\|\cdot\|$ Euclidean normu, w_{ik} çıkış katmanının ağırlıkları, N saklı katmandaki nöron sayısı ve $c_{ik} \in \mathcal{R}^{n \times 1}$ giriş vektör uzayında RTF merkezleridir. Saklı katmandaki her nöron ağ girişi ile ilgili merkez arasındaki Euclidean uzaklığını hesaplar. Bir saklı katmandaki nöronun

çıkışı mesafenin doğrusal olmayan fonksiyonudur. Yani her saklı katman nöronu bir radyal aktivasyon fonksiyonu gerçekleştirir. Son olarak ağın çıkışı birimleri saklı katman çıkışlarının ağırlıklı toplamı olarak hesaplanır. $\phi_k(\cdot)$ 'nin fonksiyonel formu aşağıdaki şekillerde olabilir:

1. $\phi(x) = x$ doğrusal fonksiyon
2. $\phi(x) = x^3$ kübik yakınsama
3. $\phi(x) = x^2 \ln x$ ince-düz- (thin-plate-spline) fonksiyon
4. $\phi(x) = \exp(-x^2 / \sigma^2)$ Gaussian fonksiyon
5. $\phi(x) = \sqrt{x^2 + \sigma^2}$ multiquadratik fonksiyon
6. $\phi(x) = \frac{1}{\sqrt{x^2 + \sigma^2}}$ ters multiquadratik fonksiyon

Burada σ genellikle yayma (spread) parametresi olarak adlandırılan radyal temelli fonksiyonun alıcı alan genişliği veya ölçekleme parametresi ve x giriş vektörüdür. Pratik uygulamalarda en çok kullanılan radyal temelli fonksiyon Gaussian radyal temelli fonksiyonudur (Ham ve Kostanic, 2001).

4.2.3 Gaussian Radyal Temelli Fonksiyonlu Ağlar

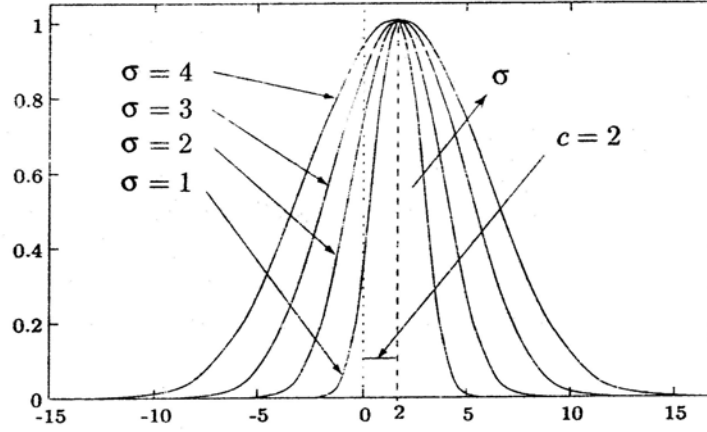
Aşağıdaki gibi ifade edilen normalize edilmemiş Gaussian yoğunluk fonksiyonu yapısından oluşan bir Gaussian Radyal Temelli Fonksiyonlu Ağ veya basit olarak Gaussian ağı, RTFA'ların en önemli sınıfıdır:

$$\phi(r) = \exp\left(-\left(\frac{r}{c}\right)^2\right) \quad (4.3)$$

Şekil 4.4 'de gösterildiği gibi \mathcal{R}^n 'de sınırlı, tamamen pozitif ve sürekli olan bir Gaussian fonksiyon $r = 0$ merkezinde tepe değerine sahiptir ve merkezden mesafe arttıkça azalır. Ayrıca Gaussian RTFA ayrılabilir doğrusal olmayan yapıya sahiptir veya bütün giriş vektörünün tek doğrusal olmayan dönüşümünün hesaplanması yerine ayrı \mathcal{R}^n 'nin ayrı alt uzayları ayrı olarak dönüştürülebilir ve ardından son ifadeyi elde etmek için çarpılır:

$$\phi(\|x - c\|) = \phi(x_1 - c_1)\phi(x_2 - c_2)\dots\phi(x_n - c_n) \quad (4.4)$$

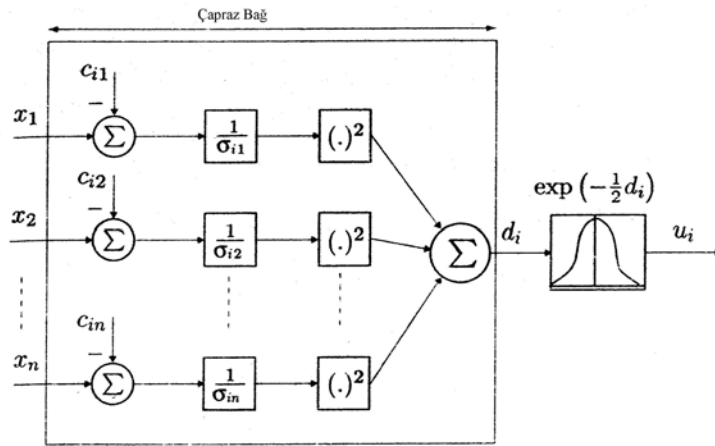
$$= \prod_{i=1}^n \phi(x_i - c_i)$$



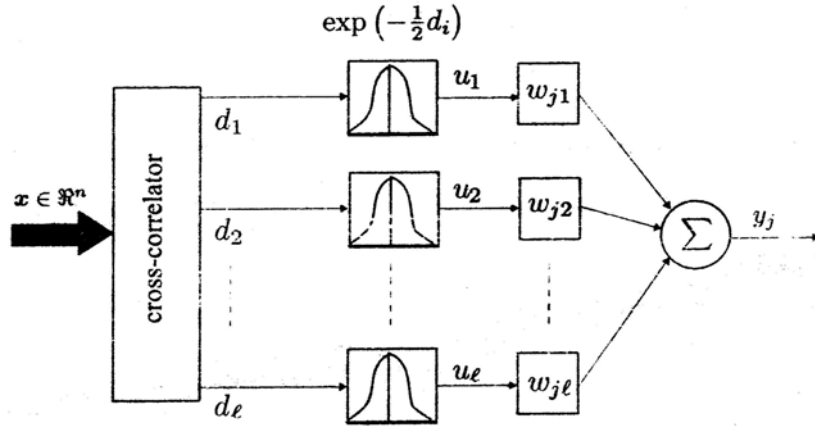
Şekil 4.4 Gaussian Radyal Temelli Fonksiyon

Gaussian ağılar doğrusal değildir ve artımlı öğrenme için iyi bir yerellik sağlar. Gaussian ağların iyi tanımlanmış matematiksel özelliklere sahip olduğu ve doğrusal olmayan dinamik sistemlerin öğrenmesinde ve kontrolünde kullanılabileceği ispatlanmıştır.

Şekil 4.5 'de gösterildiği gibi tipik bir Gaussian ağ, bir giriş katmanı, Gaussian birimlerinden oluşan bir orta katman ve geleneksel toplama birimlerinden oluşan bir çıkış katmanı ile üç katmanlı bir ağıdır. Gaussian RTFA'nın giriş-çıkışını gösteren diyagram Şekil 4.6' da verilmiştir.

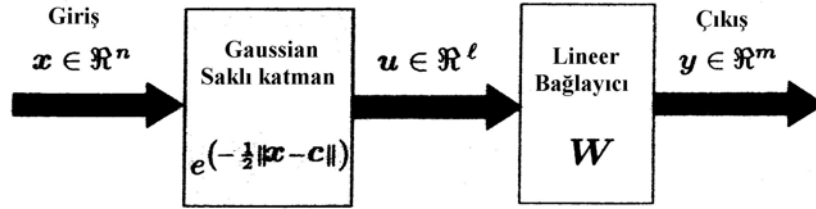


(a) Çapraz Bağ: Girişler ve i . Gaussian birimi arasındaki bağıntılar



(b) Saklı katman düğümleri ve çıkış arasındaki bağlantılar

Şekil 4.5 Gaussian Radyal Temelli Fonksiyonlu Sinir Ağının şematik diyagramı



Şekil 4.6 Gaussian RTFA' nın giriş ve çıkışının blok diyagramı

$x = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]^T$ ve $y = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_m]^T$ ağın girişleri ve çıkışları, ve $u = [u_1 \ u_2 \ \dots \ u_l]^T$ l Gaussian birimin l çıkışı olsun. Ağırlıklı norm ile bir Gaussian RTF ϕ_i aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\phi(\|x - c_i\|_{K_i}) = e^{-d(x, c_i, H_i)/2} \quad (4.5)$$

burada,

$$H_i = K_i^T K_i \text{ ile,}$$

$$d(x, c_i, H_i) \stackrel{\Delta}{=} \|x - c_i\|_{K_i}^2 = (x - c_i)^T H_i (x - c_i) \quad (4.6)$$

$c_i \in \mathcal{R}^n$ ve $H_i \in \mathcal{R}^{n \times n}$ sırasıyla ortalama vektörünü ve i.RTF'nin kovaryans matrisinin tersiyle tanımlanan biçim matrisini gösterir.

Ayrıca $d(x, c_i, H_i)$ genişletilmiş formda yeniden yazılabilir:

$$d(x, c_i, H_i) = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n h_{ijk} (x_j - c_{ij})(x_k - c_{ik}) \quad (4.7)$$

burada c_{ij} , c_i 'nin j . elemanı ve h_{ijk} ise H_i 'nin (j, k) . elemanıdır.

Genelliği kaybetmeden, h_{ijk} korelasyon katsayısı k_{ijk} 'nın marjinal standart sapmalar σ_{ij} ve σ_{ik} 'nın çarpımına oranı olarak gösterilebilir. Böylece,

$$h_{ijk} = \frac{k_{ijk}}{\sigma_{ij}\sigma_{ik}} \quad (4.8)$$

burada, σ_{ij} pozitif reel bir sayı, ve $j = k$ için $k_{ijk} = 1$, ve $|k_{ijk}| \leq 1$, $j \neq k$ dır.

Denklem (yukarıdaki) verilen h_{ijk} genel formu yerine H_i biçimlendirme matrisinin basit olarak pozitif köşegen olduğunu kabul edebiliriz; yani:

$$h_{ijk} = \begin{cases} \frac{1}{\sigma_{ij}^2}, & \text{eger } j = k \\ 0 & \text{diger} \end{cases} \quad (4.9)$$

burada σ_{ij}^2 Gaussian fonksiyonunun genişliğini kontrol eden değişmedir. Bundan dolayı çok çıkışı olan bir Gaussian sinir ağının giriş-çıkış bağıntısı aşağıdaki gibi verilir:

$$u_i = \exp\left(-\frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \left[\frac{x_k - c_{ik}}{\sigma_{ik}}\right]^2\right), \quad 1 \leq i \leq l \quad (4.10)$$

ve

$$\begin{aligned} y_j &= \sum_{i=1}^l w_{ji} u_i \\ &= \sum_{i=1}^l w_{ij} \exp\left(-\frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \left[\frac{x_k - c_{ik}}{\sigma_{ik}}\right]^2\right), \quad 1 \leq j \leq m \end{aligned} \quad (4.11)$$

u_i , bir hiperdüzlem yerine n boyutlu uzay \mathfrak{R}^n 'de bir hiperelipsoid yapısında olan bir

Gaussian fonksiyonu ile açıklanan i. saklı Gaussian nöronunun çıkışıdır; c_{ik} ve σ_{ij}^2 sırasıyla, \mathfrak{R}^n 'deki hiperelipsoidin geometrik biçimini ve pozisyonunu belirleyen i. Gaussian fonksiyonunun merkez ve değişim parametreleridir; l Gaussian nöronlarının sayısıdır. Yukarıdan görüldüğü gibi Gaussian ağındaki orta katman merkezler denilen bazı parametre vektörlerini içeren c_i düğümlerinin dizisini içerir. Bu orta düğümler merkezler ve ağ giriş vektörü arasındaki ağırlıklı Euclidean mesafesini hesaplar ve sonuç bir Gaussian fonksiyonundan geçirilir. Nöronların çıkış katmanı sadece doğrusal bağlayıcıların kümesidir (Gupta vd., 2003).

4.3 RTF Ağın Yakınsama Özellikleri

RTFA ailesi kompakt bir kümedeki herhangi bir fonksiyonu düzgün olarak yakınsamak için yeterince geniştir.

Evrensel Yakınsama Teoremi $G_f : \mathfrak{R}^{m_0} \rightarrow \mathfrak{R}$, G_f sürekli olacak şekilde integrallenebilir sınırlı bir fonksiyon olsun ve

$$\int_{\mathfrak{R}^{m_0}} G_f(x) dx \neq 0 \quad (4.13)$$

φ_G , aşağıdaki gibi gösterilen $F : \mathfrak{R}^{m_0} \rightarrow \mathfrak{R}$ fonksiyonlarından oluşan RTF ağların ailesini gösterebilir:

$$F(x) = \sum_{i=1}^{m_l} w_i G_f \left(\frac{x - c_i}{\sigma} \right) \quad (4.14)$$

Burada $i = 1, 2, \dots, m_l$ için $\sigma > 0$, $w_i \in \mathfrak{R}$ ve $c_i \in \mathfrak{R}^{m_0}$ dir. Bu durumda RTF ağlar için evrensel yakınsama teoremi verilebilir (Park ve Sandberg, 1991):

Herhangi bir sürekli giriş-çıkış haritalama fonksiyonu $f(x)$ için RTF ağıyla gerçekleştirilen $F(x)$ giriş-çıkış haritalama fonksiyonu $p \in [1, \infty]$ için L_p normunda $f(x)$ 'e yakın olacak şekilde $\{t_i\}_i = I_i^m \{t_{ij}\}_{i=1}^{m_i}$ merkez kümesi ve $\sigma > 0$ ortak genişliği olan bir RTF ağ vardır.

4.4 RTF Ağlar ve Çok katmanlı Algılayıcıların Karşılaştırılması

RTF Ağlar ve çok katmanlı algılayıcılar doğrusal olmayan katmanlı ileri beslemeli ağların örnekleridir. İkisi de evrensel yakınsayıcıdır. Belirli bir çok katmanlı ağ taklit eden bir

RTF ağın veya tam tersinin mevcut olması şaşırtıcı değildir. Ancak bu iki ağ pek çok bakımdan birbirlerinden ayrılırlar:

- Bir RTFA'nın (en çok temel formunda) tek bir saklı katmanı vardır, oysaki çok katmanlı algılayıcı bir veya daha fazla saklı katmana sahip olabilir.
- Tipik olarak, bir çok katmanlı algılayıcının hesaplama düğümleri, ki bunlar saklı veya çıkış katmanında bulunabilir, ortak bir nöron modeli sunarlar. Öte yandan, RTF ağın saklı katmanındaki hesaplama düğümleri oldukça farklıdır ve ağın çıkışındakilerden farklı bir amaca hizmet ederler.
- RTFA'nın saklı katmanı doğrusal değildir, çıkış katmanı ise doğrusaldır. Öte yandan, sınıflayıcı olarak kullanılan çok katmanlı algılayıcının saklı ve çıkış katmanları genellikle doğrusal değildir.
- RTFA'daki her saklı katman birimi aktivasyon fonksiyonunun değişkeni giriş vektörü ve o birimin merkezi arasındaki mesafeyi hesaplar. Çok katmanlı algılayıcının her saklı birimi giriş vektörü ve o birimin sinaptik ağırlık vektörünün iç çarpımını hesaplar.
- Çok katmanlı algılayıcılar doğrusal olmayan giriş-çıkış haritalamasına global yaklaşmalar oluştururlar. Bu nedenle, küçük veya eğitme verisi olmadığında giriş uzayının bölgelerinde genelleştirme yapabilirler. Öte yandan, üstel olarak azalan lokalleşmiş doğrusal olmayan özellikleri (mesela Gaussian fonksiyonu) kullanan RTF ağlar, doğrusal olmayan giriş-çıkış haritalamasına yerel yakınsama oluştururlar, bunun sonucu olarak bu ağlar hızlı öğrenme yeteneğine ve eğitme verisinin sunum sırasına azaltılmış hassasiyet oluştururlar (Haykin, S., 1999).

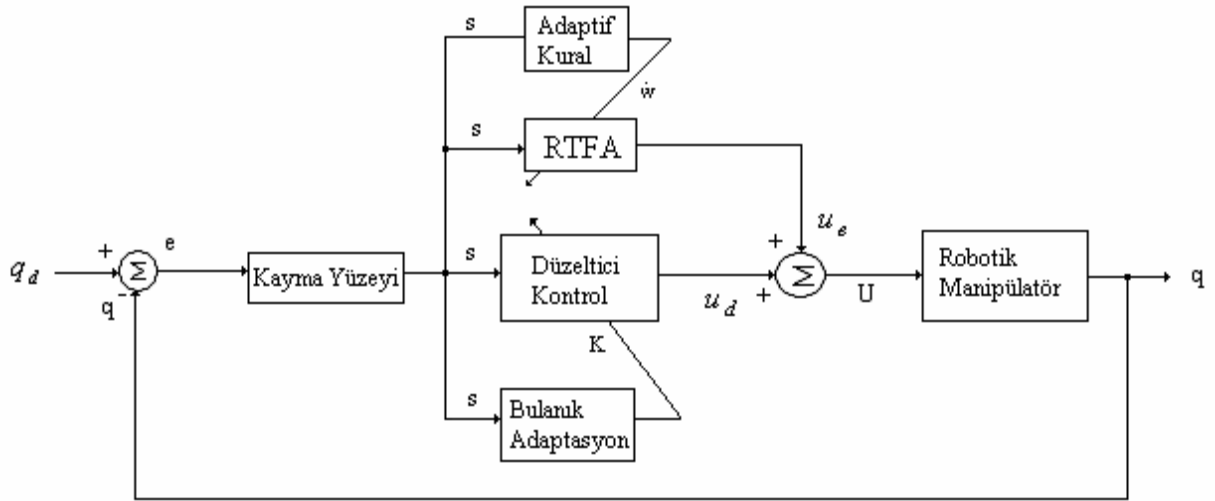
5. ÖNERİLEN YSA TEMELLİ BULANIK KAYAN KIPLİ KONTROL

Literatürde yörünge takip uygulamaları robotun üç ekseninde yapılmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada da hedeflenen kontrol sistemleri robotun üç temel ekseninde denenmiştir.

Amaçlanan YSA Temelli bulanık kayan kipli kontrol yönteminde bulanık adaptasyon iki farklı şekilde kullanılmıştır. İlkinde düzeltici kontrol kazancı bulanık adaptasyon ile ayarlanmış, ikincisinde ise kayma yüzeyi eğimi bulanık mantık ile belirlenmiştir.

5.1 Düzeltici Kontrol Kazancının Bulanık Adaptasyon ile Ayarlanması

Bu sistemin blok diyagramı Şekil 5.1’ de gösterilmiştir.



Şekil 5.1 Düzeltici kontrol kazancının ayarlanması durumunda sistemin blok diyagramı

Hedef konum (q_d) ile gerçek konum (q) karşılaştırılır ve elde edilen hataya (e) bağlı bir kayma yüzeyi değeri (s) hesaplanır. Kayma yüzeyinin eğimi sabittir. Kayma yüzeyinin değeri RTFA'ya girişte bir katsayıya (kayma yüzeyi eğimi) bölünür. Eşdeğer kontrol u_e RTFA tarafından hesaplanır. (4.10) bağıntısı uyarınca,

$$u_{eq} = \sum_{i=1}^l w_j \exp\left(-\frac{1}{2} \sum_{k=1}^N \left[\frac{s_k - c_{ik}}{\sigma_{ik}}\right]^2\right) \quad (5.1)$$

Kullanılan radyal temelli ağıın üç girişi ve üç çıkışı vardır. Saklı katmandaki nöronların sayısı beş olarak seçilmiştir. Gauss fonksiyonunun merkezi c -2 ile 2 arasında ayarlanmıştır.

Yayıma faktörü σ 0.1-0.7 arasında seçilmiştir. Ağın saklı katman ile çıkış katmanı arasındaki ağırlıklar başlangıçta sıfır olarak belirlenmiştir.

Lyapunov teoremine dayanarak, kayma yüzeyi ulaşma şartı $s\dot{s} < 0$ dır. Eğer kontrol girişi bu ulaşma şartını sağlamak amacıyla seçilirse, kontrol sistemi faz düzleminin merkezine yakınsayacaktır. Bir RTFA kayma yüzeyi ve kontrol kuralı arasındaki doğrusal olmayan haritalamayı yakınsatmak için kullanıldığından dolayı, radyal temelli ağın ağırlıkları ulaşma şartına ($s\dot{s} < 0$) dayanarak ayarlanır (Gökhan Ak ve Cansever, 2006).

Optimal ağırlık değerlerinin araştırılması ve kararlı yakınsama özelliğinin elde edilmesi için ağırlıkları ayarlamak amacıyla bir adaptif kural kullanılır. Adaptif kural $s\dot{s}$ 'un değerini w_j 'ye göre minimize etmek için eğim azaltma kuralından türetilir. Ağırlık parametrelerinin güncellenmiş denklemleri aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\dot{w}_j = -\tau \frac{\partial s(t)\dot{s}(t)}{\partial w_j(t)} \quad (5.2)$$

Zincir kuralı kullanılarak (5.2) denklemleri aşağıdaki gibi yeniden yazılabilir:

$$\dot{w}_j = -\tau \frac{\partial s(t)\dot{s}(t)}{\partial u_{eq}(t)} \frac{\partial u_{eq}(t)}{\partial w_j(t)} = \gamma s(t)\phi_j(s) \quad (5.3)$$

burada τ ve sistem parametreleri öğrenme parametresi olarak birleştirilir (γ).

γ öğrenme oranı 0.01 alınmıştır.

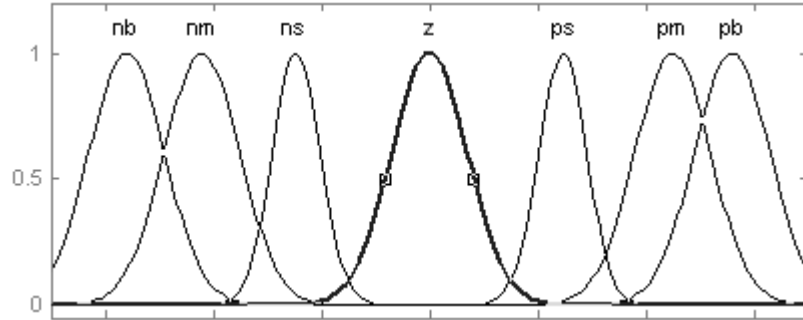
Düzeltilici kontrolün kazancı bulanık adaptasyon bloğunda bir bulanık kontrolör tarafından ayarlanır. Bulanık kontrolörün girişleri kayma yüzeyleri (s) çıkışları ise kazançtır (K). Bulanık kontrolörün kural tabanındaki kurallar aşağıdaki yapıdadır (Gökhan Ak ve Cansever, 2008):

IF s_i is A_i^r , THEN K_i is B_i^r

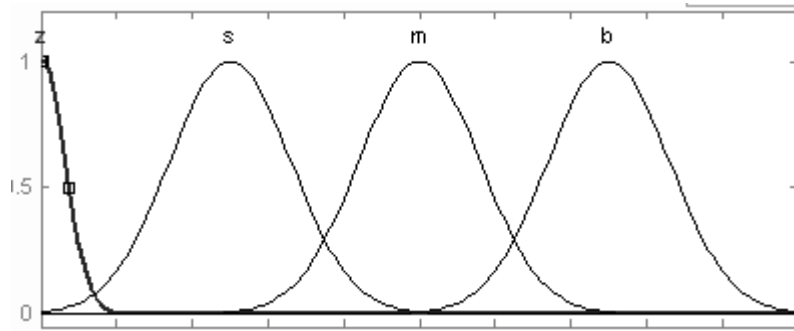
burada A_i^r ve B_i^r bulanık kümelerdir. s_i 'nin üyelik fonksiyonları: nb, nm, ns, z, ps, pm, pb (Şekil 5.2a), K_i 'nin üyelik fonksiyonları ise: z, s, m, b olarak belirlenmiştir (Şekil 5.2b). Burada n negatif, p pozitif, b büyük, m orta, s küçük, z sıfır gösterir. Kural tabanı aşağıdaki gibi seçilmiştir:

IF s_i is nb, THEN K_i is b

IF s_i is nm, THEN K_i is m
 IF s_i is ns, THEN K_i is s
 IF s_i is z, THEN K_i is z
 IF s_i is ps, THEN K_i is s
 IF s_i is pm, THEN K_i is m
 IF s_i is pb, THEN K_i is b



(a) Giriş üyelik fonksiyonları



(b) Çıkış üyelik fonksiyonları

Şekil 5.2 Düzeltici kontrol kazancı için giriş ve çıkış üyelik fonksiyonları

Bunların hepsi aşağıda gösterildiği gibi Gaussian üyelik fonksiyonlarına sahiptir:

$$\mu_A(x_i) = \exp\left(-\left(\frac{x_i - \alpha}{\sigma}\right)^2\right) \quad (5.4)$$

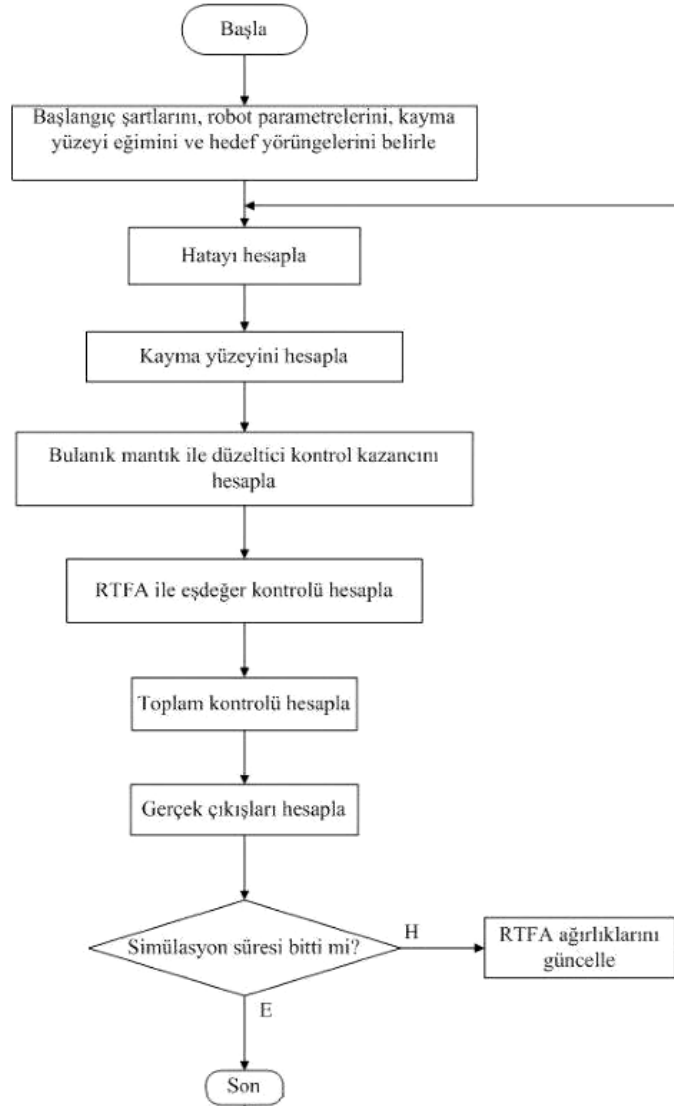
Bulanık sistemdeki bilgidен K_i aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$K_i = \frac{\sum_{r=1}^R \theta_{\lambda_i}^r \mu_{A^r}(s_i)}{\sum_{r=1}^R \mu_{A^r}(s_i)} = \theta_{ki}^T \psi_{ki}(s_i) \quad (5.5)$$

burada $\theta_{ki} = [\theta_{ki}^1, \dots, \theta_{ki}^r, \dots, \theta_{ki}^R]^T$, K_i 'nin üyelik fonksiyonlarının merkezidir,

$\psi_{ki}(s_i) = [\psi_{ki}^1(s_i), \dots, \psi_{ki}^r(s_i), \dots, \psi_{ki}^R(s_i)]^T$, $\psi_{ki}^r(s_i) = \mu_{A^r}(s_i) / \sum_{r=1}^R \mu_{A^r}(s_i)$ 'deki K_i 'nin üyelik fonksiyonlarının yükseklik vektörüdür ve R kural miktarıdır.

RTFA çıkışında elde edilen eşdeğer kontrol değeri kayma değerinin bölüldüğü katsayı ile çarpılır. Elde edilen bu değer ve düzeltici kontrol değeri toplanır. Bulunan kontrol işareti robot manipülatöre uygulanır. Bu yöntem için hazırlanan programın akış diyagramı Şekil 5.3' de verilmiştir.



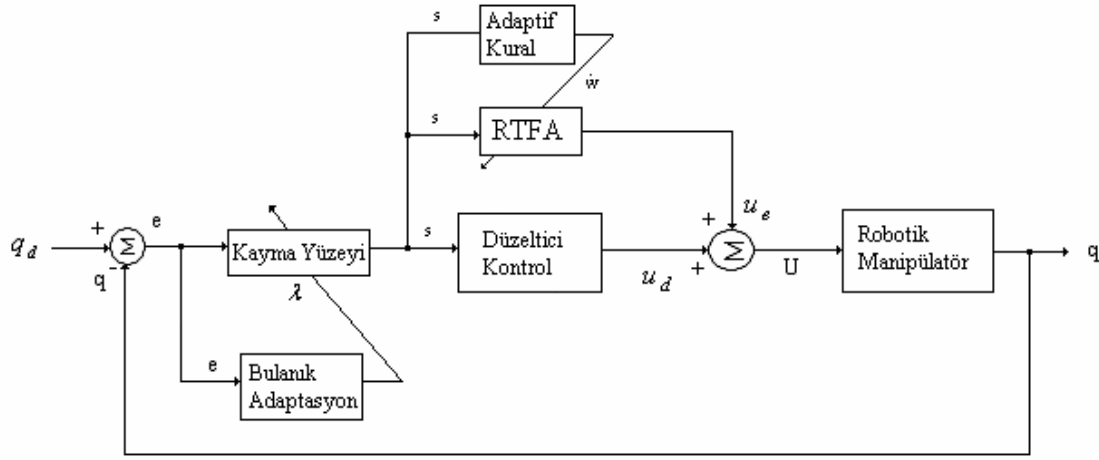
Şekil 5.3 Düzeltici kontrol kazancının ayarlanması durumunda programın akış diyagramı

5.2 Kayma Yüzeyinin Eğiminin Bulanık Mantık ile Hesaplanması

Bu sistemin blok diyagramı Şekil 5.4' de gösterilmiştir (Gökhan Ak ve Cansever, 2006).

Bu sistemde ise kayma yüzeyinin eğimi bir bulanık adaptasyon ile hesaplanır. Kayma

yüzeyinin eğimi, robotik manipülator ile ilgili daha az bilgi gerektiren ve böylece kontrolörün gerçekleştirilmesini basitleştiren bulanık sistemde ayarlanır. Mutlak hata bulanık sistemin girişi ve λ ise çıkışıdır (Gökhan Ak ve Cansever, 2006).

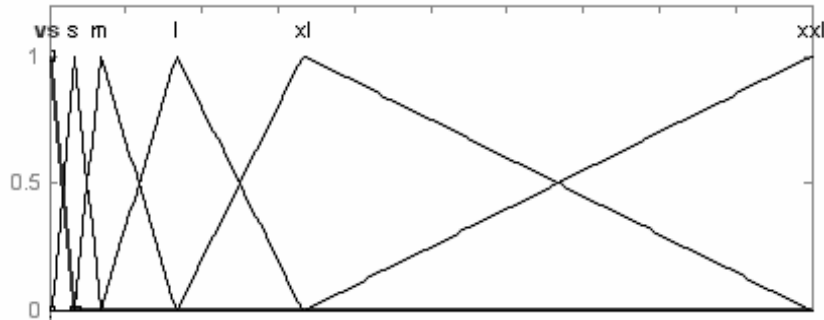


Şekil 5.4 Kayma yüzeyi eğiminin ayarlanması durumunda sistemin blok diyagramı

Kural tabanındaki kurallar aşağıdaki yapıdadır:

IF e is A_i^m , THEN λ_i is B_i^m

burada A_i^m ve B_i^m bulanık kümelerdir. s_i ve λ_i aynı tipte üyelik fonksiyonlarına sahiptir: vs, s, m, l, xl, xxl. vs çok küçük, s küçük, m orta, l büyük, xl ekstra büyük, xxl ekstra ekstra büyük. Giriş ve çıkış üyelik fonksiyonları aynı yapıdadır (Şekil 5.5).



Şekil 5.5 Kayma yüzeyi eğiminin ayarlanması için giriş ve çıkış üyelik fonksiyonları

Kural tabanı aşağıdaki gibi seçilmiştir:

IF e_i is vs, THEN λ_i is xxl

IF e_i is s, THEN λ_i is xl

IF e_i is m, THEN λ_i is l

IF e_i is l, THEN λ_i is m

IF e_i is xl, THEN λ_i is s

IF e_i is xxl, THEN λ_i is vs

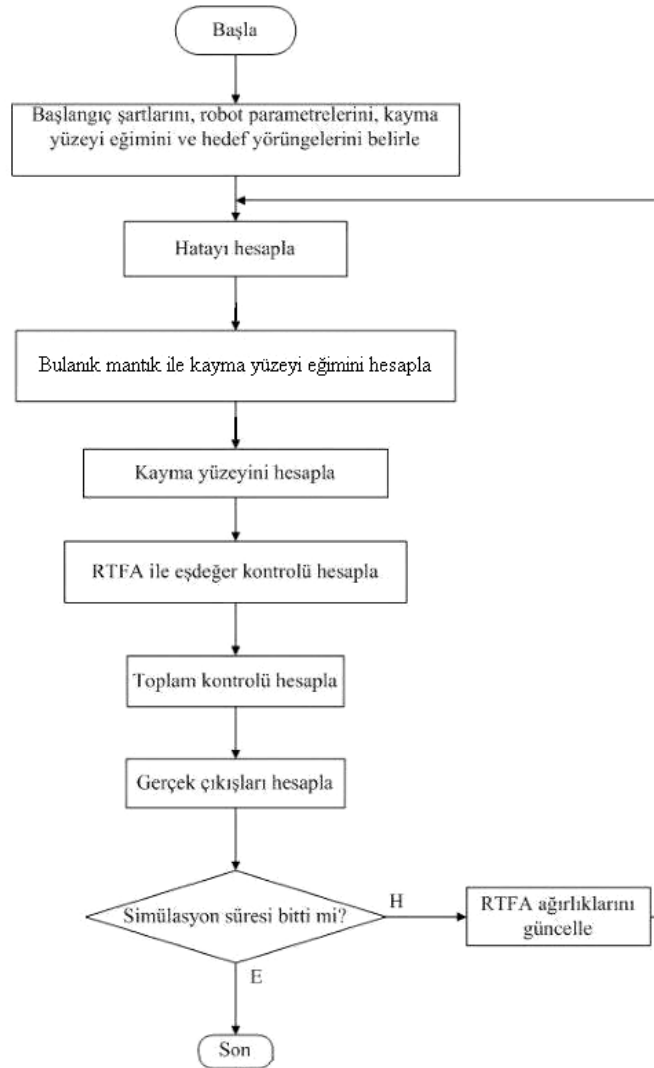
λ_i aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\lambda_i = \frac{\sum_{m=1}^R \theta_{\lambda_i}^m \mu_{A^m}(s_i)}{\sum_{m=1}^R \mu_{A^m}(s_i)} = \theta_{ki}^T \psi_{ki}(s_i) \quad (5.6)$$

burada $\theta_{ki} = [\theta_{ki}^1, \dots, \theta_{ki}^m, \dots, \theta_{ki}^R]^T$ λ_i 'nin üyelik fonksiyonlarının merkez vektörüdür,

$\psi_{ki}(s_i) = [\psi_{ki}^1(s_i), \dots, \psi_{ki}^m(s_i), \dots, \psi_{ki}^R(s_i)]^T$ $\psi_{ki}^m(s_i) = \mu_{A^m}(s_i) / \sum_{m=1}^R \mu_{A^m}(s_i)$ 'de λ_i 'nin üyelik fonksiyonlarının yükseklik vektörüdür.

Bu yöntem için hazırlanan programın akış diyagramı Şekil 5.6' de verilmiştir.



Şekil 5.6 Kayma yüzeyi eğiminin ayarlanması durumunda programın akış diyagramı

6. 3 EKSENLİ SCARA ROBOT İÇİN SİMÜLASYON SONUÇLARI

6.1 3 Eksenli Scara Robotun Modeli

3 eksenli scara robotun Euler-Lagrange metoduyla türetilen dinamik denklemleri aşağıdaki gibidir (Wai ve Hsich, 2002):

$$\begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \\ \ddot{q}_3 \end{bmatrix} + l_1 l_2 \sin(q_2) \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -m_3 g \end{bmatrix} + f(\dot{q}) + t_f(t) = u(t) \quad (6.1)$$

burada,

$$M_{11} = l_1^2 \left(\frac{m_1}{3} + m_2 + m_3 \right) + l_1 l_2 (m_2 + 2m_3) \cos(q_2) + l_2^2 \left(\frac{m_2}{3} + m_3 \right)$$

$$M_{13} = M_{23} = M_{31} = M_{32} = 0$$

$$M_{12} = -l_1 l_2 \left(\frac{m_2}{2} + m_3 \right) \cos(q_2) - l_2^2 \left(\frac{m_2}{3} + m_3 \right) = M_{21}$$

$$M_{22} = l_2^2 \left(\frac{m_2}{3} + m_3 \right)$$

$$M_{33} = m_3$$

$$C_{11} = -\dot{q}_2 (m_2 + 2m_3)$$

$$C_{12} = -\dot{q}_2 \left(\frac{m_2}{2} + m_3 \right)$$

$$C_{22} = -\dot{q}_2 \left(\frac{m_2}{2} + m_3 \right)$$

$$C_{13} = C_{22} = C_{23} = C_{31} = C_{32} = C_{33} = 0$$

burada q_1, q_2, q_3 , 1,2 ve 3 eklemlerinin açıları; m_1, m_2, m_3 1,2 ve 3 linklerinin kütleleri;

l_1, l_2, l_3 1,2 ve 3 linklerinin uzunluklarıdır.

Scara robotun sistem parametreleri aşağıdaki gibi seçilmiştir:

$$l_1 = 1.0m \quad l_2 = 0.8m \quad l_3 = 0.6m$$

$$m_1 = 1.0kg \quad m_2 = 0.8kg \quad m_3 = 0.5kg$$

Dış bozulmalar aşağıdaki gibi seçilmiştir:

$$t_f(t) = \begin{bmatrix} 0.2 \sin(2t) \\ 0.2 \sin(2t) \\ 0.2 \sin(2t) \end{bmatrix} \quad (6.2)$$

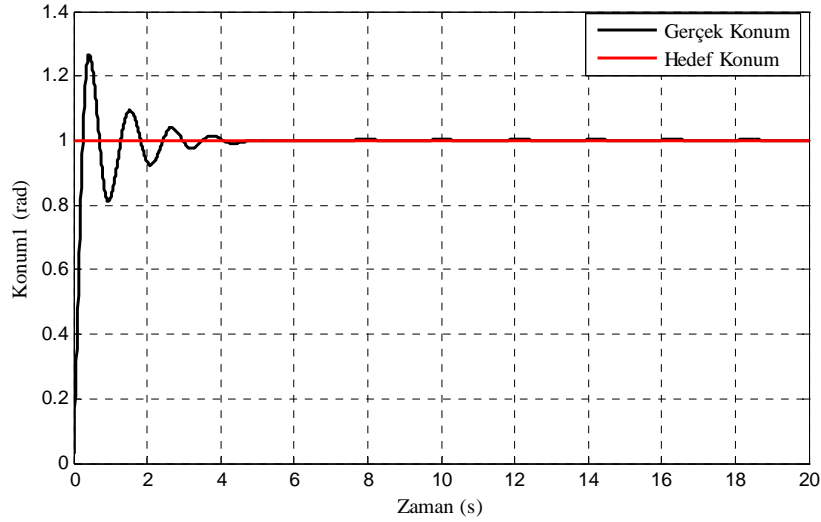
Sürtünme kuvvetleri ise şöyledir:

$$f(\dot{q}) = \begin{bmatrix} 12\dot{q}_1 + 0.3\text{sign}(\dot{q}_1) \\ 12\dot{q}_2 + 0.3\text{sign}(\dot{q}_2) \\ 12\dot{q}_3 + 0.3\text{sign}(\dot{q}_3) \end{bmatrix} \quad (6.3)$$

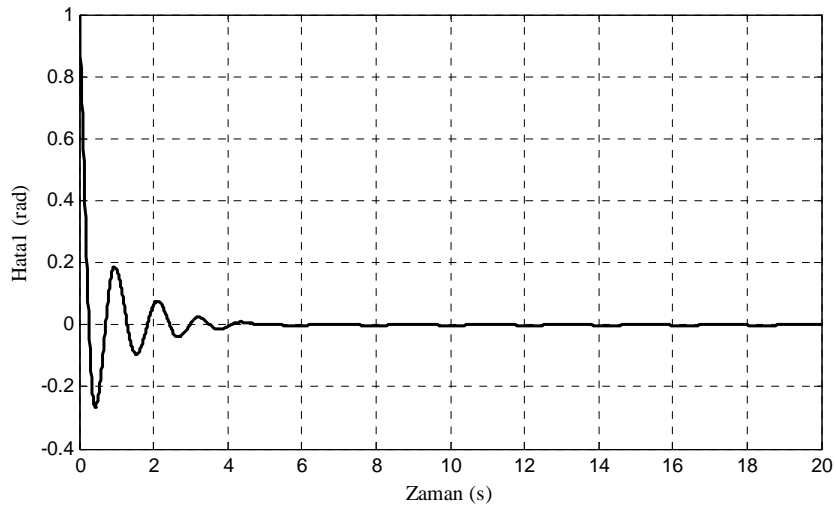
6.2 Düzeltici Kontrol Kazancının Bulanık Mantık ile Ayarlanması Durumunda 3 Eksenli Scara Robotun Yörünge Takibi İçin Simülasyon Sonuçları

6.2.1 Robot eksenlerinin 1 radyan dönmesi durumunda simülasyon sonuçları

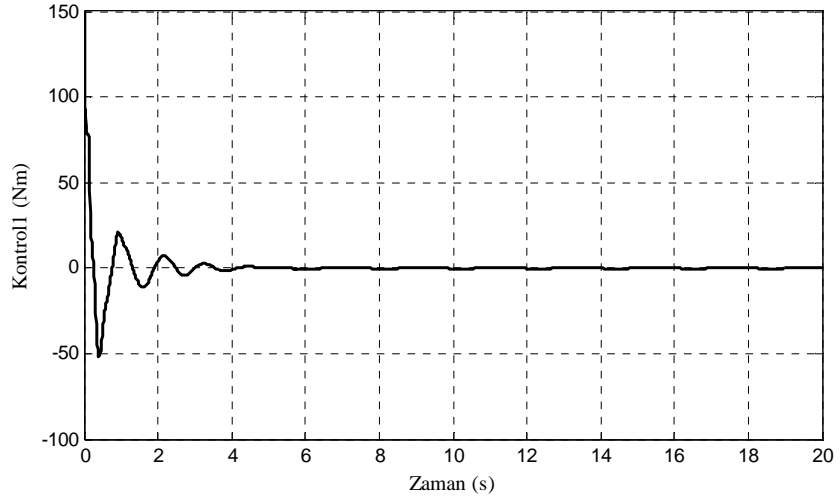
Şekil 6.1a 1. eksenin hedefi ve konumunu, Şekil 6.1b 1. eksenin hatasını, Şekil 6.1c kontrol işaretini, Şekil 6.1d kayma işaretini, Şekil 6.1e bulanık mantık ile elde edilen kazancı, Şekil 6.1f ise eşdeğer kontrolü göstermektedir.



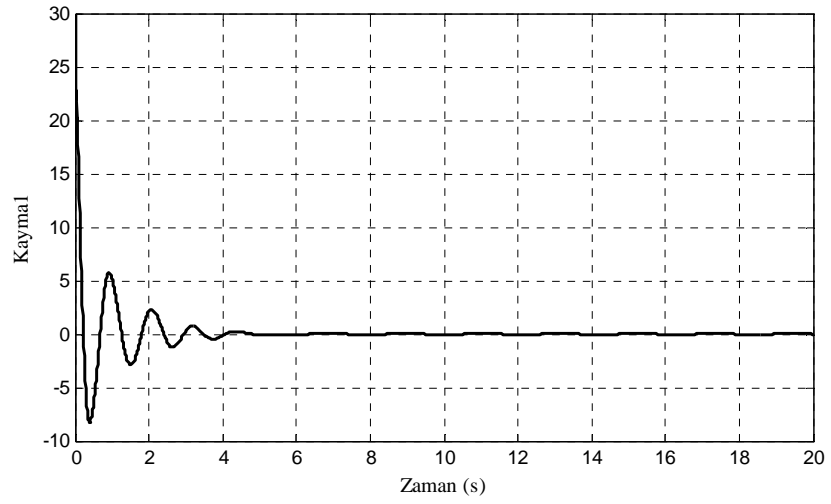
(a) 1. eksenin hedef ve gerçek konumu



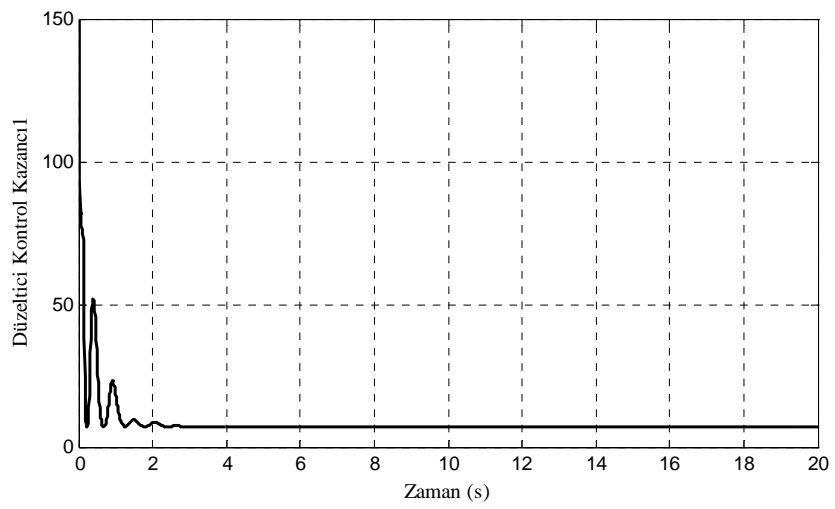
(b) 1. eksenin konum hatası



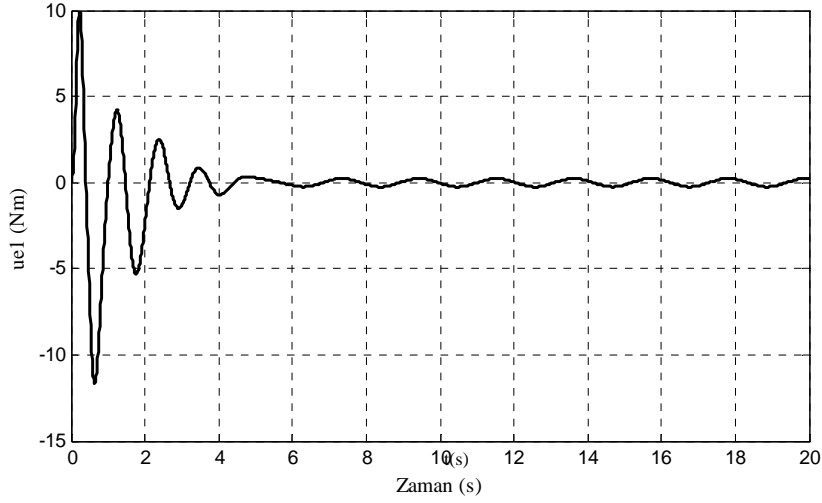
(c) 1. eksenin kontrol işareti



(d) 1. eksenin kayma işareti



(e) 1. eksenin düzeltilici kontrol kazancı

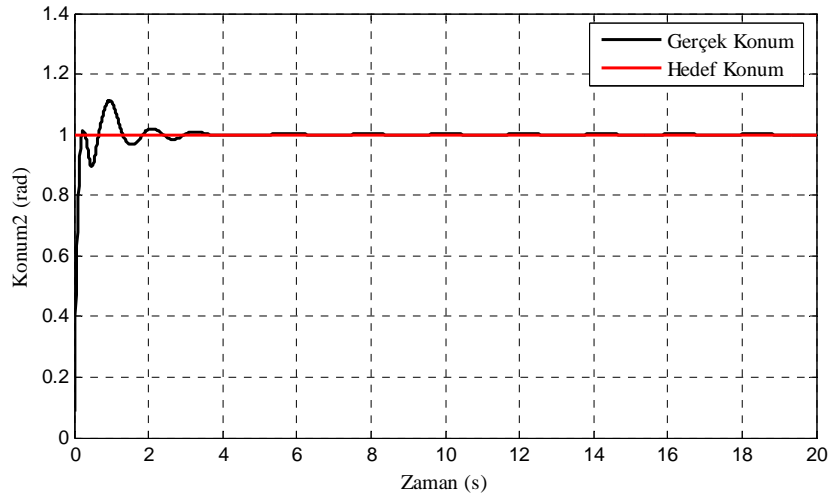


(f) 1. eksenin eşdeğer kontrolü

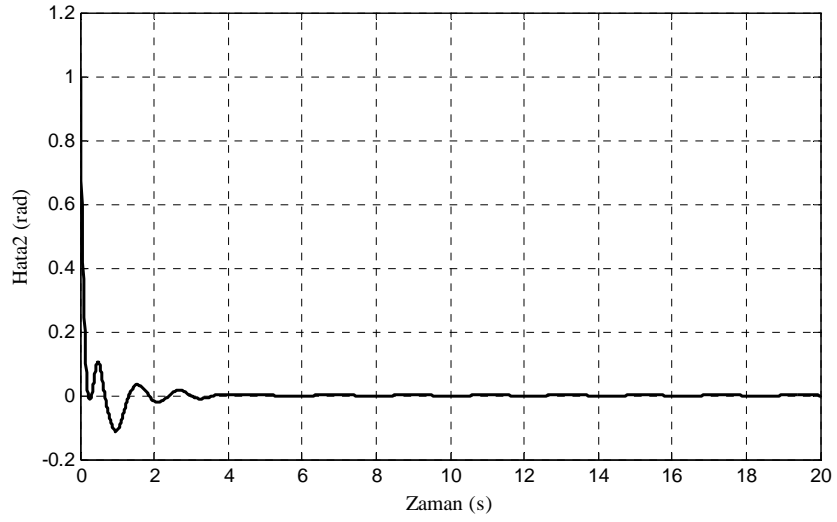
Şekil 6.1 Düzeltici kontrol kazancının bulanık adaptasyon ile ayarlanmasında 1 radyanlık dönme durumunda 1. eksen için simülasyon sonuçları

Kayma işareti, bulanık mantık ile elde edilen kazanç ve eşdeğer kontrolün şekillerinin tek bir eksen için verilmesinin yeterli olacağı düşünülmüştür. Şekil 6.2a 2. eksenin hedefi ve konumunu, Şekil 6.2b 2. eksenin hatasını, Şekil 6.2c kontrol işaretini göstermektedir.

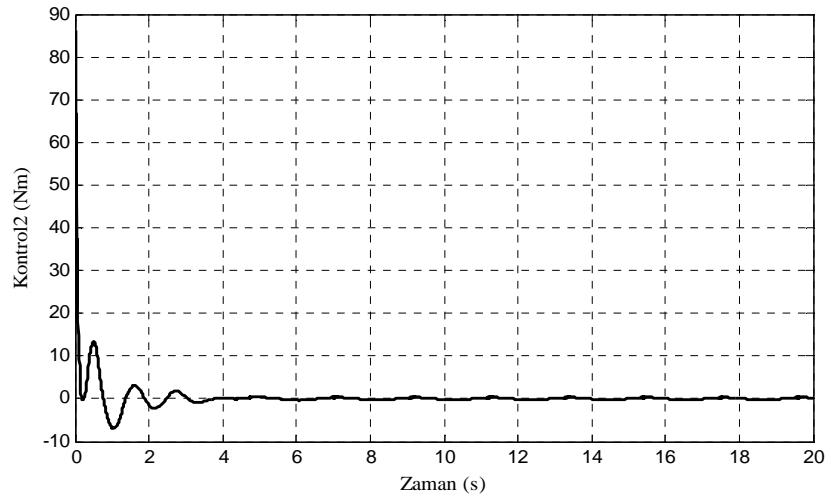
Şekil 6.3a'da 3. eksenin hedef ve konumu, Şekil 6.3b'de 3. eksenin hatası, Şekil 6.3c'de kontrol işareti verilmiştir.



(a) 2. eksenin hedef ve gerçek konumları

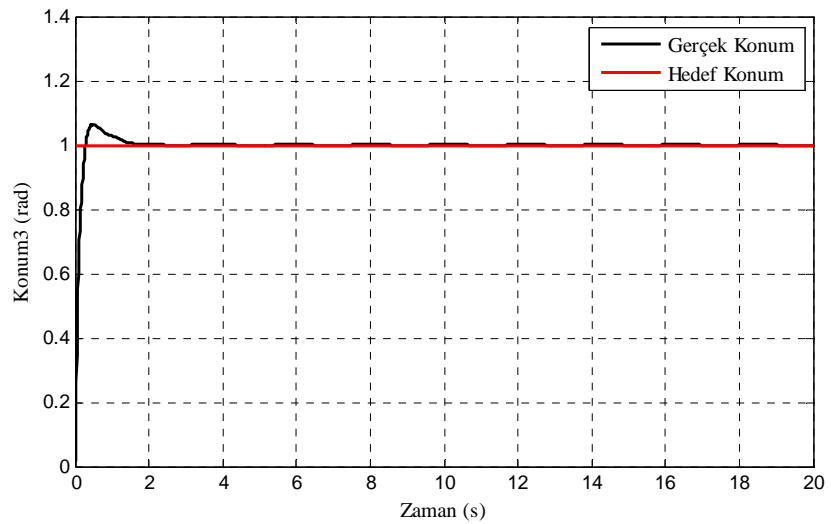


(b) 2. eksenin konum hatası

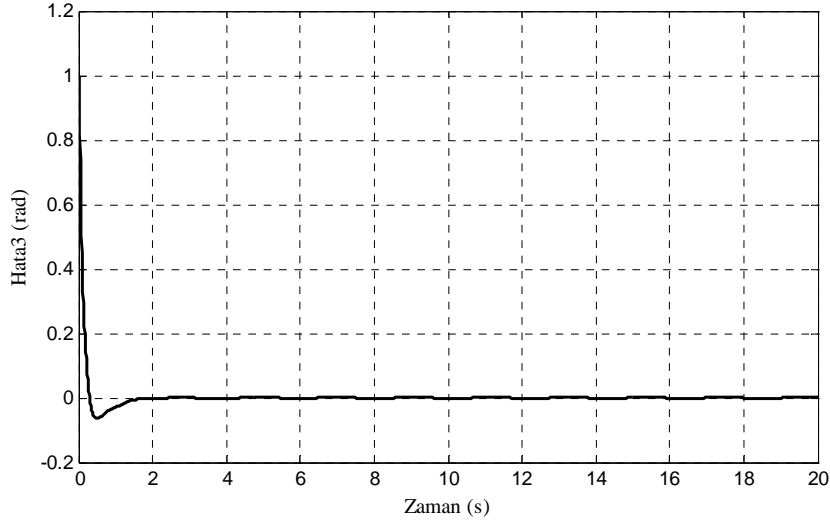


(c) 2. eksenin kontrol işareti

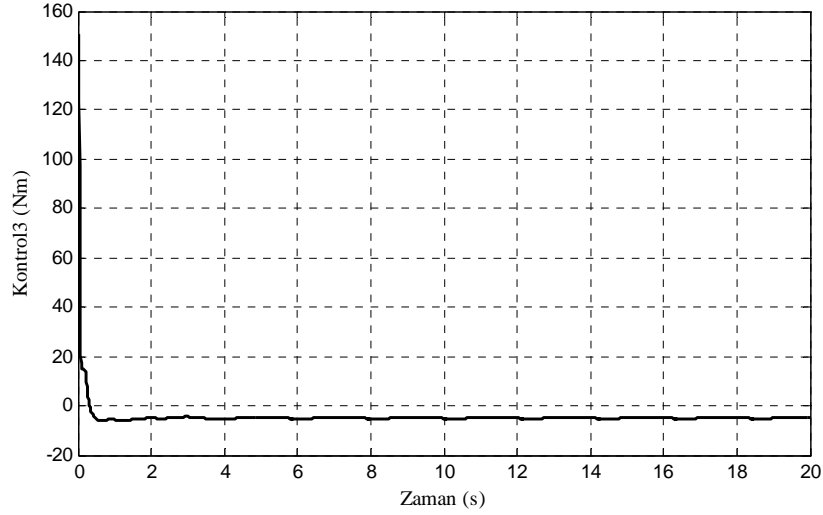
Şekil 6.2 Düzeltici kontrol kazancının bulanık adaptasyon ile ayarlanmasında 1 radyanlık dönme durumunda 2. eksen için simülasyon sonuçları



(a) 3. eksenin hedef ve gerçek konumları



(b) 3. eksenin konum hatası



(c) 3. eksenin kontrol işareti

Şekil 6.3 Düzeltici kontrol kazancının bulanık adaptasyon ile ayarlanmasında 1 radyanlık dönme durumunda 3. eksen için simülasyon sonuçları

6.2.2 Simülasyon sonuçlarının yorumlanması

Simülasyon sonuçlarından görüldüğü gibi konumlar 1 saniye civarında hedeflenen yörüngeye oturmaktadır. Özellikle 1. ekseninde aşım miktarı fazla görülmektedir. Bu kontrol işaretinin genliği küçültülerek azaltılabilir. Ancak bu durumda daha farklı yörüngelerin izlenmesi gerektiğinde istenen performans sağlanamayacaktır. Kontrol işaretlerinde çatırdama görülmemektedir. Önerilen RTFA ağ, bulanık mantık ve kayan kipli kontrole dayalı kontrolörün performansı değerlendirmek amacıyla aynı simülasyonlar RTFA yerine hata geriye yayılım algoritması ile eğitilen çok katmanlı ileri beslemeli ağ-Çok Katmanlı Algılayıcı (ÇKA) kullanılarak ve eşdeğer kontrol klasik yöntemle hesaplanarak yapılmıştır.

Çok katmanlı ağ olarak bir saklı katman ve bir çıkış katmanı olan iki katmanlı ileri beslemeli ağ seçilmiştir. Giriş olarak bütün gerçek ve istenen durumlar kullanılmıştır (12 giriş). Saklı katmandaki nöronların sayısı ağ, ters dinamiklerin bütün anlarını hesaplayacak şekilde 24 seçilmiştir. Simülasyonlardaki katsayılar önerilen yöntemle aynı seçilmiştir. Ancak ağırlık güncelleştirme yöntemi önerilen yöntemden farklıdır.

Üç durumda elde edilen sonuçlardan elde edilen veriler Çizelge 6.1’de sunulmuştur.

Çizelgede verilen sonuçlardan da görülebileceği gibi sürekli durum hatası önerilen yöntemde diğer yöntemlere göre çok düşüktür. Aşma eşdeğer kontrolün klasik olarak hesaplanmasından daha yüksek olmasına rağmen ÇKA kullanıldığı durumdan daha düşüktür. Sürekli duruma ulaşma süresinin önerilen yöntemde az da olsa yüksek olduğu görülmektedir.

Ayrıca önerilen yöntem ile elde edilen eşdeğer kontrol ile klasik yöntemle elde edilen eşdeğer kontrolün şekilleri oldukça yakındır. Tek bir eşdeğer kontrol çözümü olmadığı da göz önüne alınır önerilen yöntemin etkin bir kontrolör olacağı sonucuna varılabilir.

Çizelge 6.1 Üç yöntemin simülasyon sonuçları

Eksen	Önerilen Yöntem			ÇKA			Klasik u_e		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
e_s	$-0.05 \cdot 10^{-3}$	$-0.01 \cdot 10^{-3}$	$0.58 \cdot 10^{-3}$	0.0126	0.0061	-0.0103	$0.95 \cdot 10^{-3}$	$0.5 \cdot 10^{-3}$	$0.56 \cdot 10^{-3}$
Aşma	0.27	0.11	0.063	0.3	0.2	0.08	0.23	0.13	0
t_s (s)	1.7	1.2	0.7	1.5	1	2.5	0.7	0.6	0.4

Bozucu etkiler ilk an yerine $t = 10s$ ’de devreye alındığında simülasyonlar tekrar yapılmış, bu şartlarda sistemin kararlılığını koruduğu ve bozucu etkiler sisteme verildiğinde yukarıda verilen simülasyon sonuçlarına ulaşılmıştır.

6.2.3 Robot eksenlerinin sinüzoidal yörünge izlemesi durumunda simülasyon sonuçları

Robot eksenlerinin aşağıdaki yörüngeyi takip etmesi amaçlanmıştır:

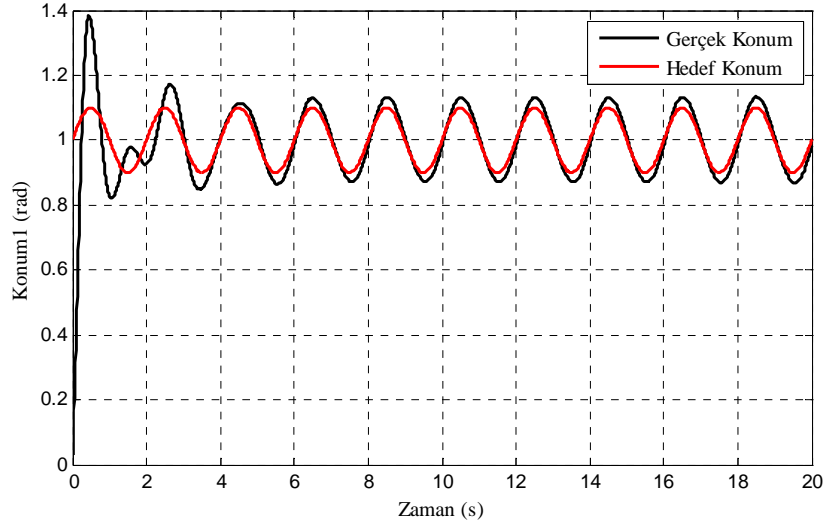
$$q_d(t) = 1 + 0.1 \sin(\pi t) \quad (6.4)$$

Şekil 6.4a 1. eksenin hedefi ve konumunu, Şekil 6.4b 1. eksenin hatasını, Şekil 6.4c kontrol

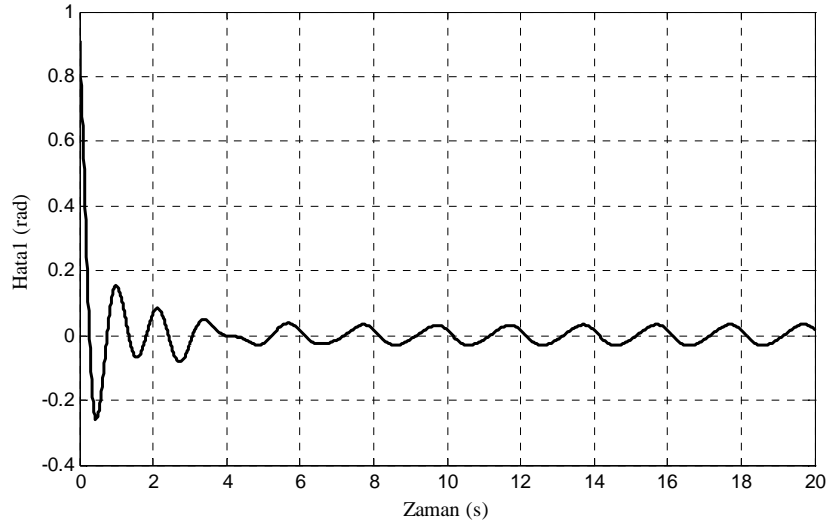
işaretini, Şekil 6.4d kayma işaretini, Şekil 6.4e bulanık mantık ile elde edilen kazancı, Şekil 6.4f ise eşdeğer kontrolü göstermektedir.

Şekil 6.5a 2. eksenin hedefi ve konumunu, Şekil 6.5b 2. eksenin hatasını, Şekil 6.5c kontrol işaretini göstermektedir.

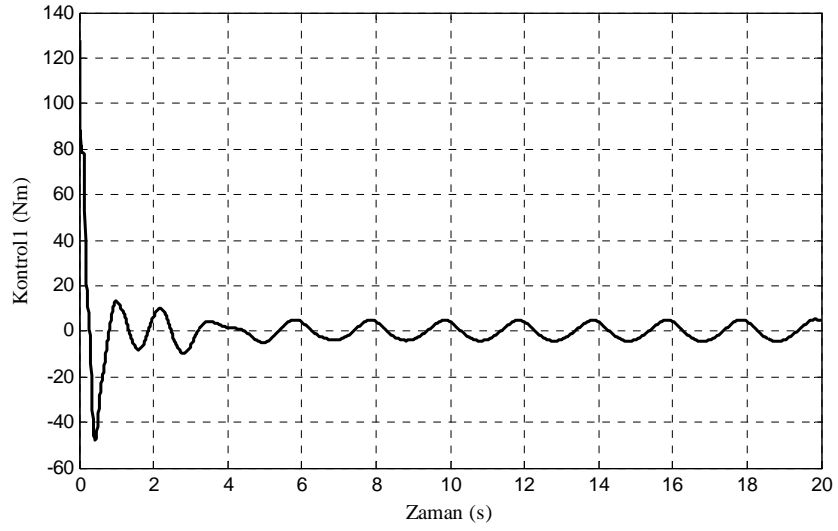
Şekil 6.6a'da 3. eksenin hedef ve konumu, Şekil 6.6b'de 3. eksenin hatası, Şekil 6.6c'de kontrol işareti sunulmuştur.



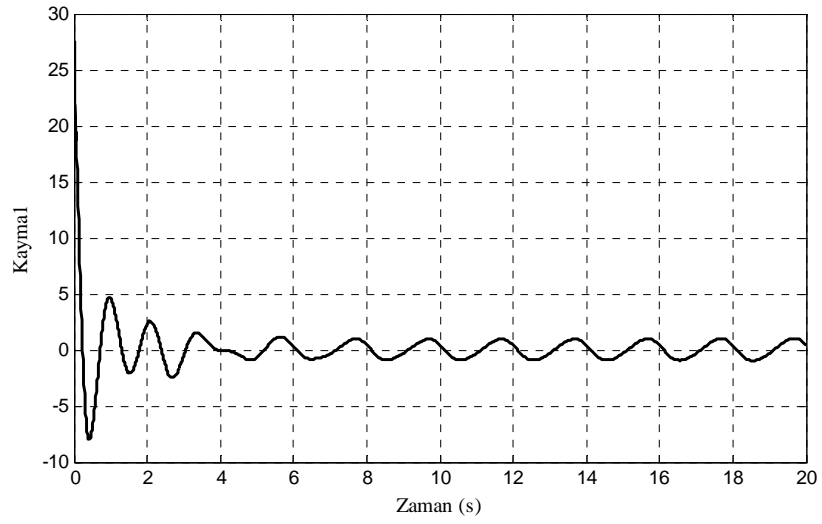
(a) 1. eksenin hedef ve gerek konumu



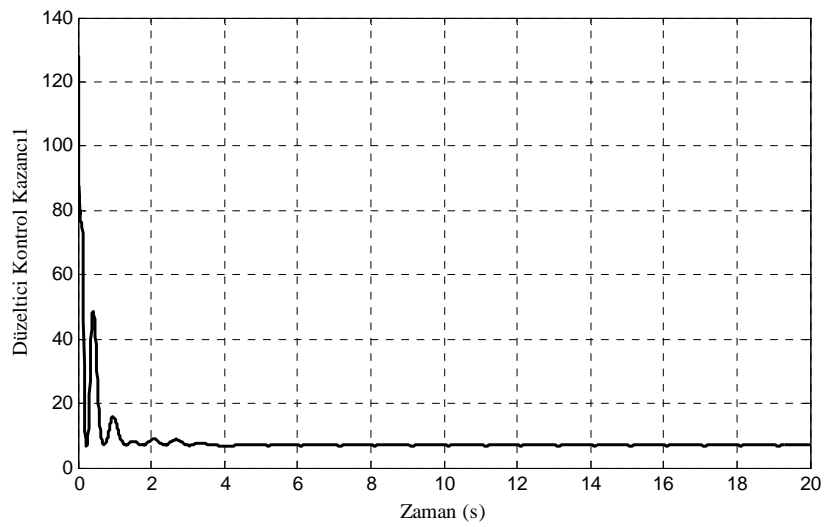
(b) 1. eksenin konum hatası



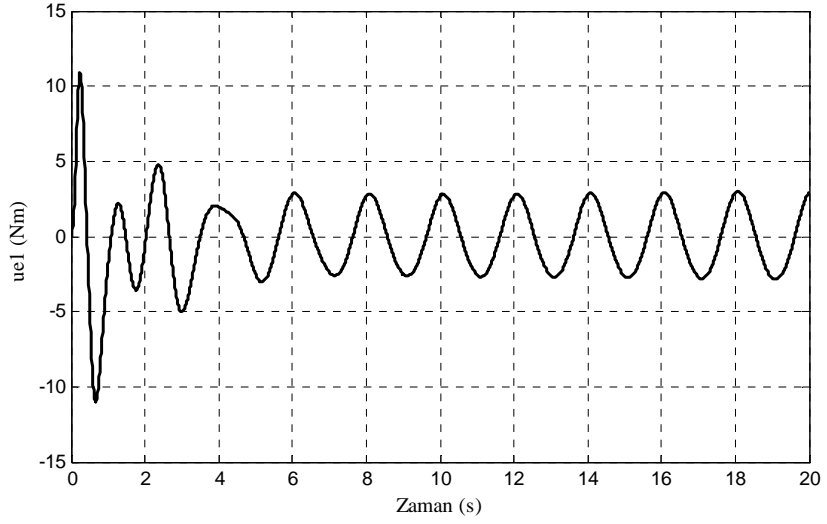
(c) 1. eksenin kontrol işareti



(d) 1. eksenin kayma işareti

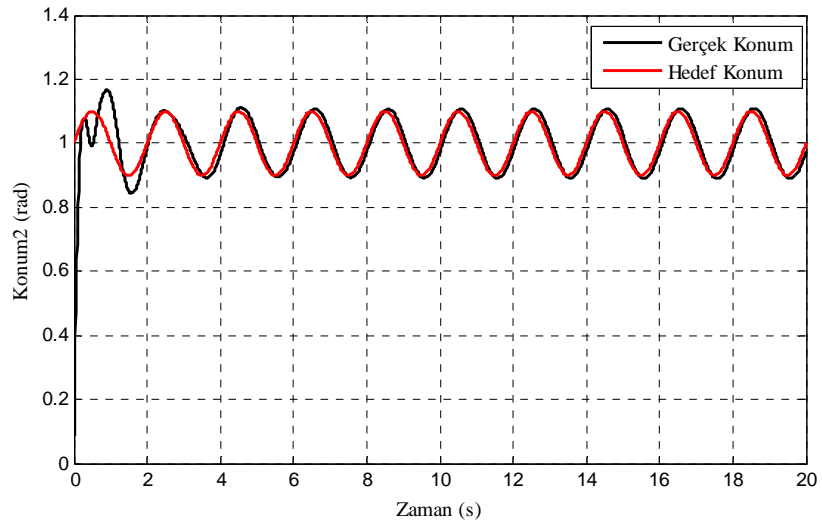


(e) 1. eksenin düzeltilici kontrol kazancı

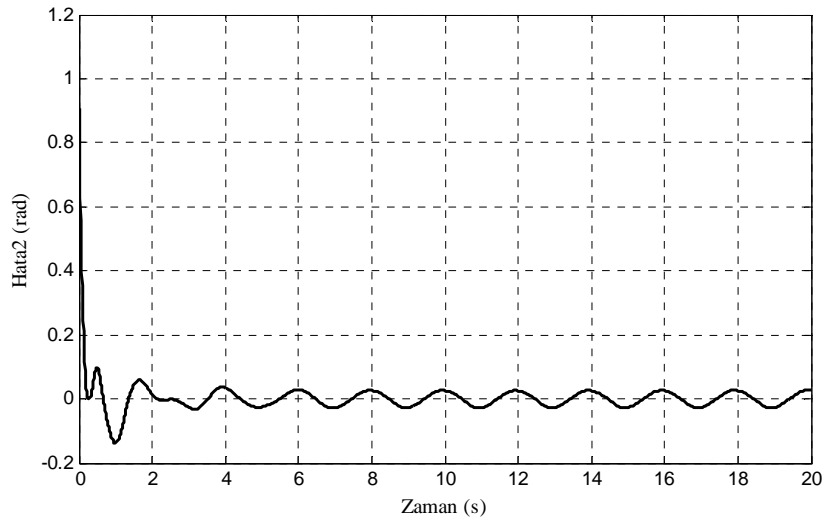


(f) 1. eksen için eşdeğer kontrolü

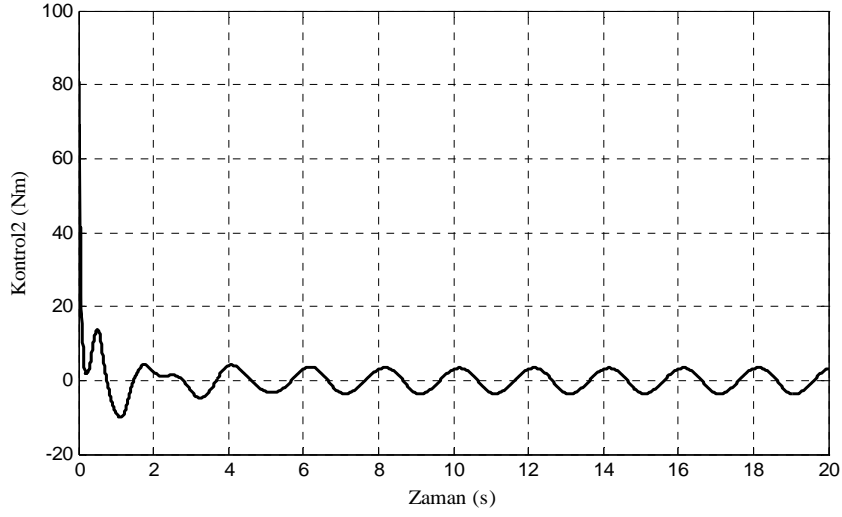
Şekil 6.4 Düzeltici kontrol kazancının bulanık adaptasyon ile ayarlanmasında sinüzoidal yörünge takibinde 1. eksen için simülasyon sonuçları



(a) 2. eksen için hedef ve gerçek konumları

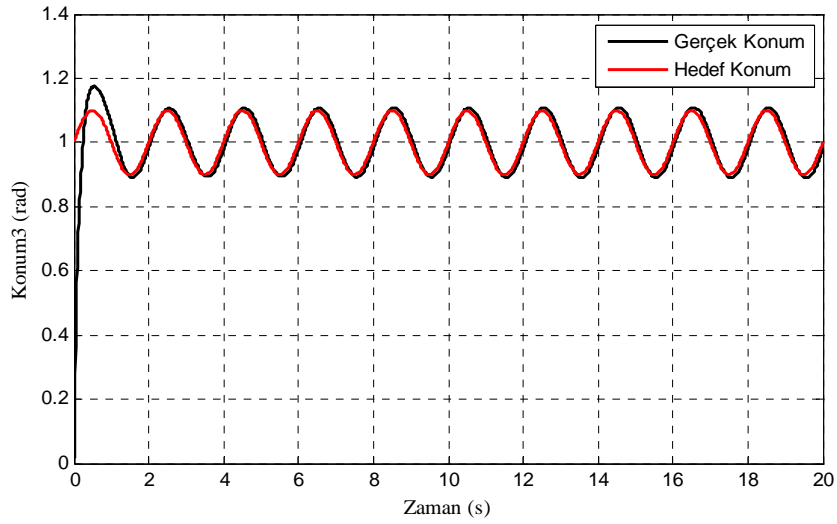


(b) 2. eksen için konum hatası

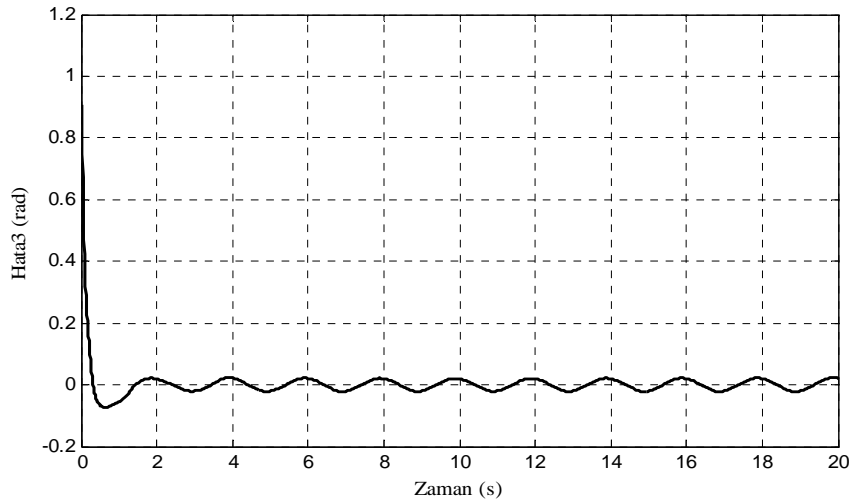


(c) 2. eksenin kontrol işareti

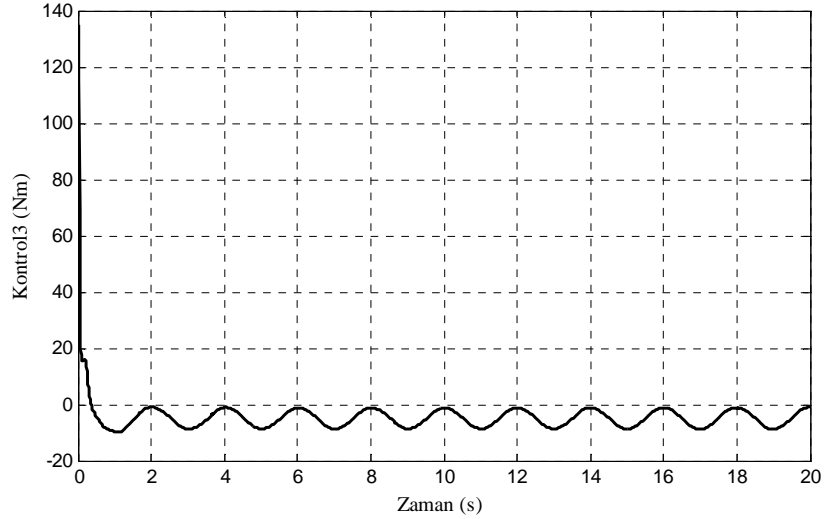
Şekil 6.5 Düzeltici kontrol kazancının bulanık adaptasyon ile ayarlanmasında sinüzoidal yörünge takibinde 2. eksen için simülasyon sonuçları



(a) 3. eksenin hedef ve gerçek konumu



(b) 3. eksenin konum hatası



(c) 3. eksenin kontrol işareti

Şekil 6.6 Düzeltici kontrol kazancının bulanık adaptasyon ile ayarlanmasında sinüzoidal yörünge takibinde 3. eksen için simülasyon sonuçları

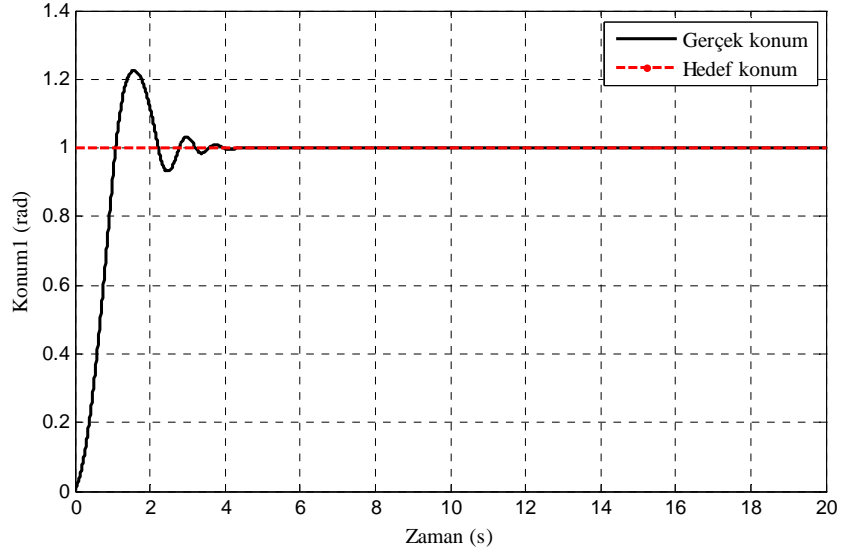
6.2.4 Simülasyon sonuçlarının yorumlanması

1. eksen 2.5, 2 ve 3. eksenler ise 0.5 saniye gibi kısa sürelerde hedeflenen yörüngeye ulaşmaktadır. İlk eksendeki aşma 1.36, ikinci eksen 1.2, 3. eksen 1.15 civarındadır. Kontrol işaretlerinde çatlama yoktur. Simülasyonlar yapılırken bozucu etkilerin de göz önüne alındığı düşünülürse kontrol yönteminin bu şartlar altında da dayanıklı bir kontrol sağladığı görülebilir. Kayma yüzeyinin eğimi artırıldığında sürekli durum hatasının, aşmanın ve sürekli durumu ulaşma zamanının azaldığı yapılan simülasyonlar sonucunda görülmüştür. Ancak bu durumda uygulanan kontrol işaretinin değeri artmaktadır.

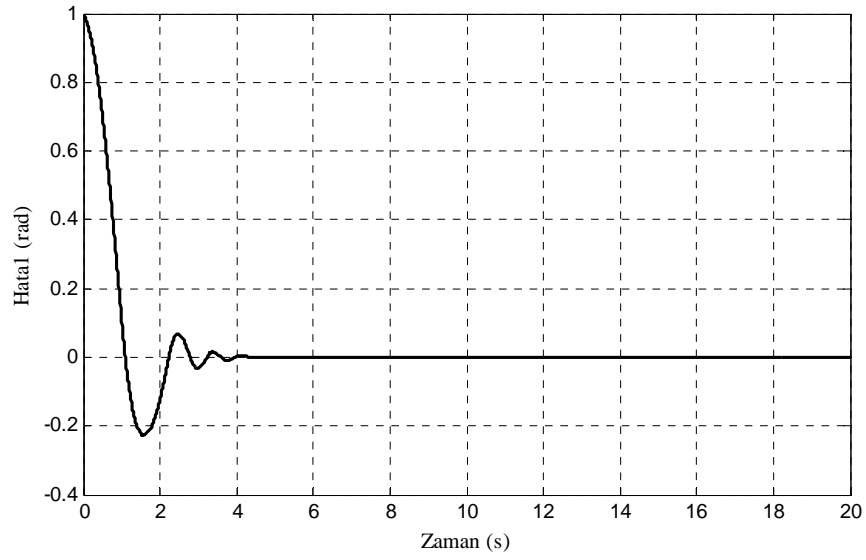
6.3 Kayma Yüzeyi Eğiminin Bulanık Mantık İle Ayarlanması Durumunda 3 Eksenli Scara Robotun Yörünge Takibi İçin Simülasyon Sonuçları

6.3.1 Robot eksenlerinin 1 radyan dönmesi durumunda simülasyon sonuçları

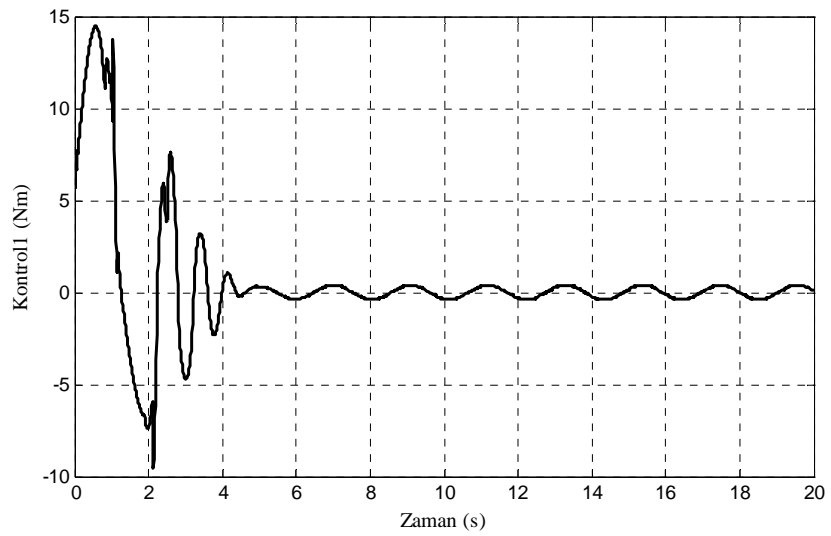
Şekil 6.7a 1. eksenin hedefi ve konumunu, Şekil 6.7b 1. eksenin hatasını, Şekil 6.7c kontrol işaretini, Şekil 6.7d kayma işaretini, Şekil 6.7e bulanık mantık ile elde edilen kayma yüzeyi eğimini, Şekil 6.7f ise eşdeğer kontrolü göstermektedir. Şekil 6.8a 2. eksenin hedefi ve konumunu, Şekil 6.8b 2. eksenin hatasını, Şekil 6.8c kontrol işaretini, Şekil 6.9a 3. eksenin hedefi ve konumunu, Şekil 6.9b 3. eksenin hatasını, Şekil 6.9c kontrol işaretini göstermektedir.



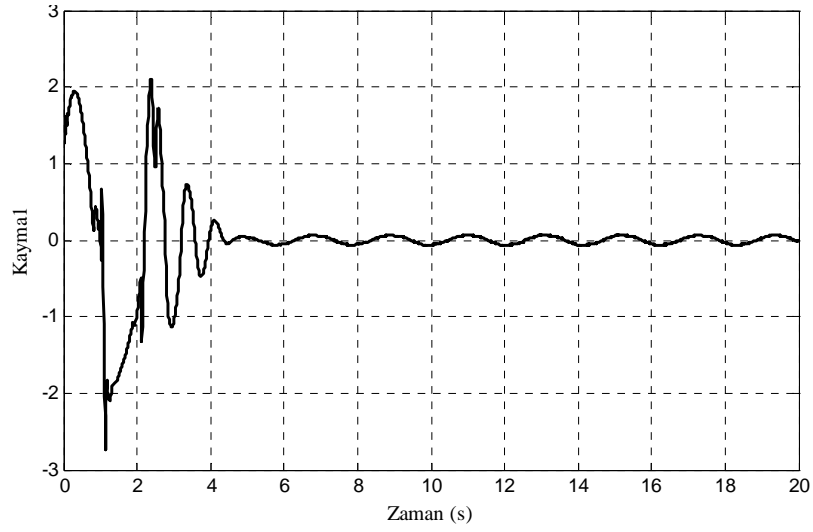
(a) 1. eksenin hedef ve gerçek konumu



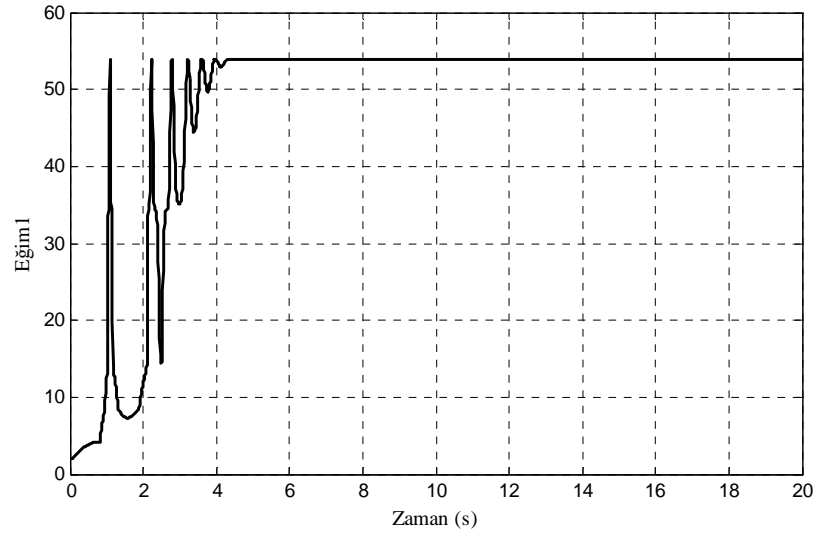
(b) 1. eksenin konum hatası



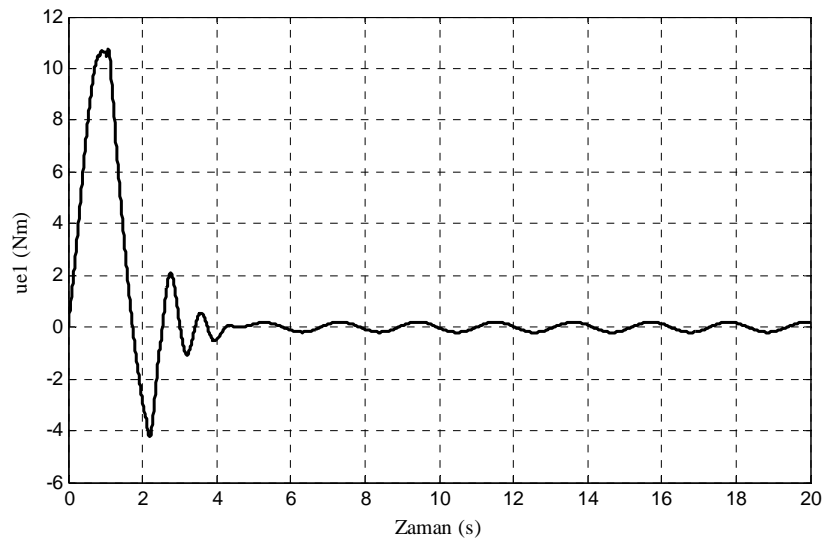
(c) 1. eksenin kontrol işareti



(d) 1. eksenin kayma işareti

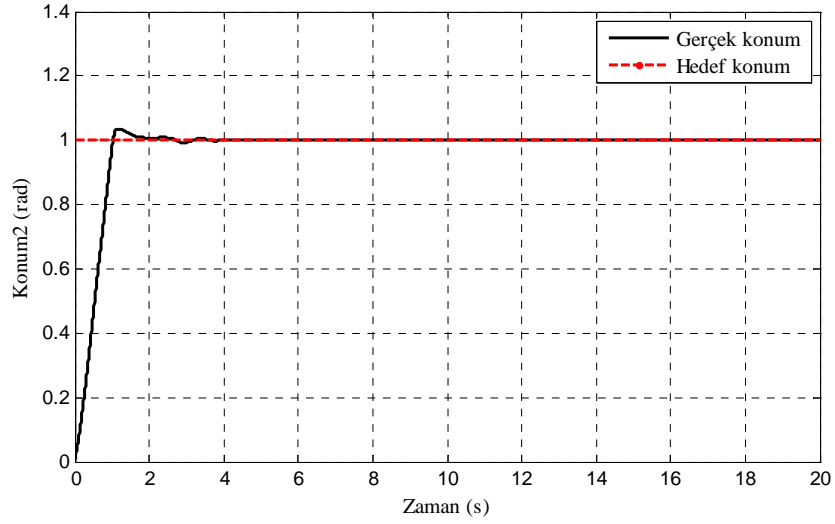


(e) 1. eksenin kayma yüzeyi eğimi

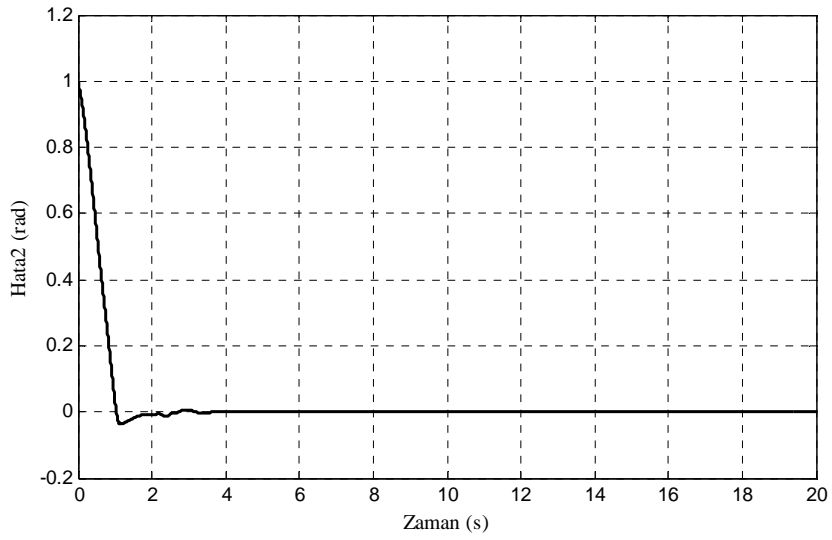


(f) 1. eksenin eşdeğer kontrolü

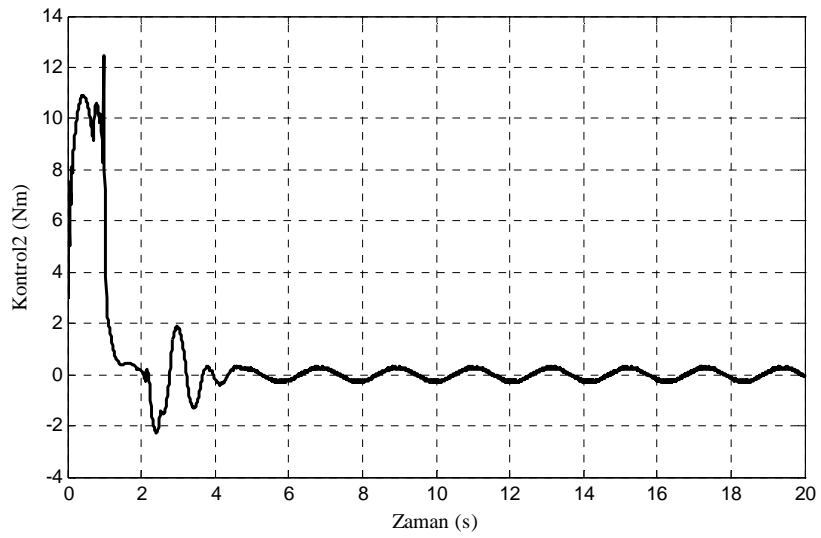
Şekil 6.7 Kayma yüzeyi eğiminin bulanık adaptasyon ile ayarlanmasında 1 radyanlık dönme durumunda 1. eksen için simülasyon sonuçları



a) 2. eksenin hedef ve gerçek konumu

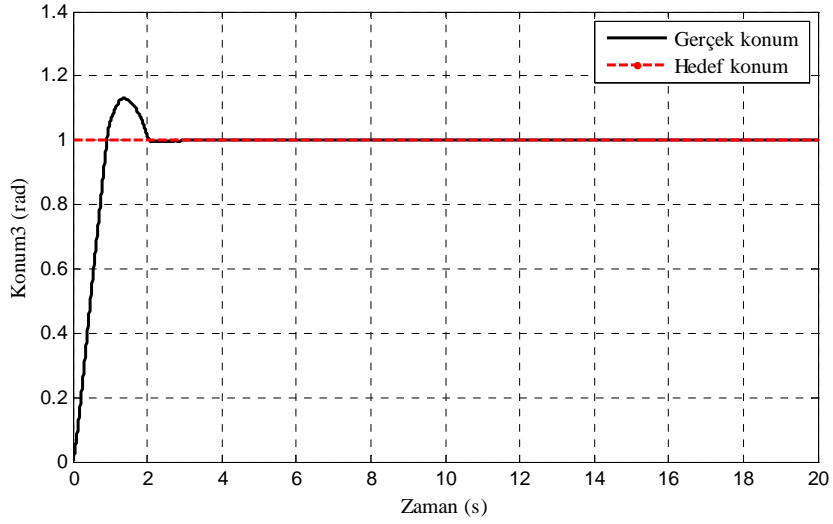


(b) 2. eksenin konum hatası

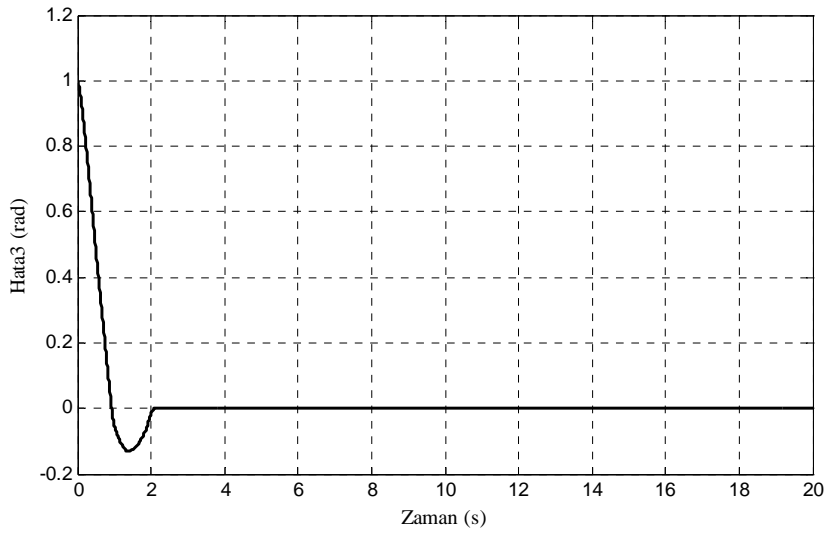


(c) 2. eksenin kontrol işareti

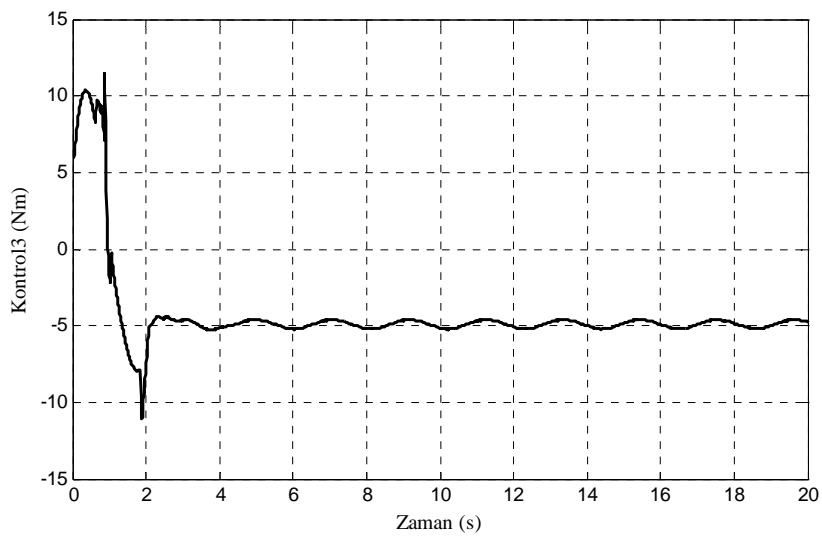
Şekil 6.8 Kayma yüzeyi eğiminin bulanık adaptasyon ile ayarlanmasında 1 radyanlık dönme durumunda 2. eksen için simülasyon sonuçları



a) 3. eksenin hedef ve gerçek konumu



(b) 3. eksenin konum hatası



(c) 3. eksenin kontrol işareti

Şekil 6.9 Kayma yüzeyi eğiminin bulanık adaptasyon ile ayarlanmasında 1 radyanlık dönme durumunda 3. eksen için simülasyon sonuçları

6.3.2 Simülasyon sonuçlarının yorumlanması

1. eksen 2.5, 2. eksen 1, 3. eksen ise 1.9 saniyede hedeflenen yörüngeye oturmaktadır. Kontrol işaretlerinde az da olsa çattırdama görülmektedir. Kontrol kazancının bulanık mantık ile ayarlanması ve kayma yüzeyi eğiminin bulanık adaptasyon ile ayarlanması durumlarını karşılaştırabilmek amacıyla Çizelge 6.2 hazırlanmıştır.

Çizelge 6.2 Önerilen iki yöntemin karşılaştırılması

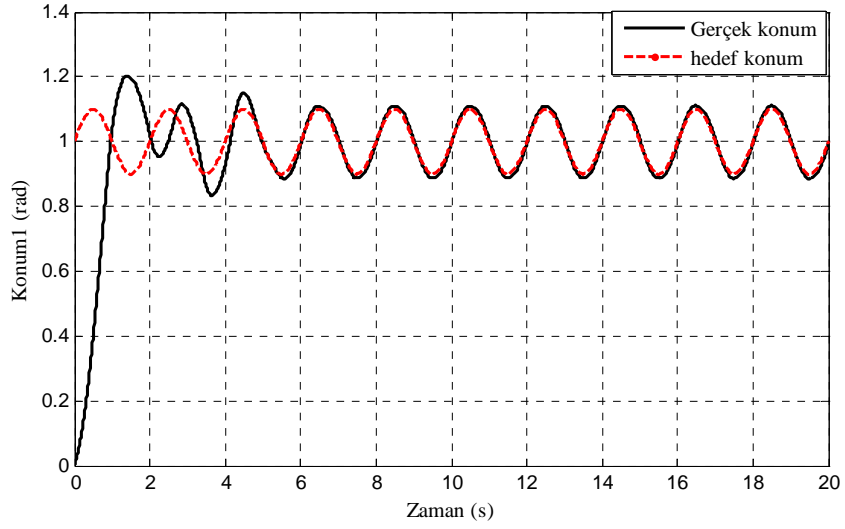
Eksen	Düzeltilici Kontrol Kazancının Bulanık Mantık ile Ayarlanması			Kayma Yüzeyi Eğiminin Bulanık Mantık ile Ayarlanması		
	1	2	3	1	2	3
e_s	$-0.05 \cdot 10^{-3}$	$-0.01 \cdot 10^{-3}$	$0.58 \cdot 10^{-3}$	$-0.28 \cdot 10^{-3}$	$-0.53 \cdot 10^{-3}$	$0.1 \cdot 10^{-3}$
Aşma	0.27	0.11	0.063	0.23	0.04	0.9
t_s (s)	1.7	1.2	0.7	2.6	1.1	1.9
U_{\max} (Nm)	150	86.2	150.8	14.4	12.49	11.5

1 ve 2. eksenler için düzeltilici kontrol kazancının bulanık mantık ile ayarlanması durumunda sürekli durum hatası daha düşük, 3. eksen için daha yüksektir. Aşma 1 ve 2. eksenler için düşük iken 3. eksen için yüksektir. İki yöntem arasındaki en önemli fark kontrol işaretlerinde göze çarpmaktadır. Kayma yüzeyinin eğiminin bulanık mantık ile ayarlanması durumunda kontrol değeri çok daha düşüktür. Ancak kontrol işaretleri düşük olmasına rağmen çattırdama bulunmaktadır.

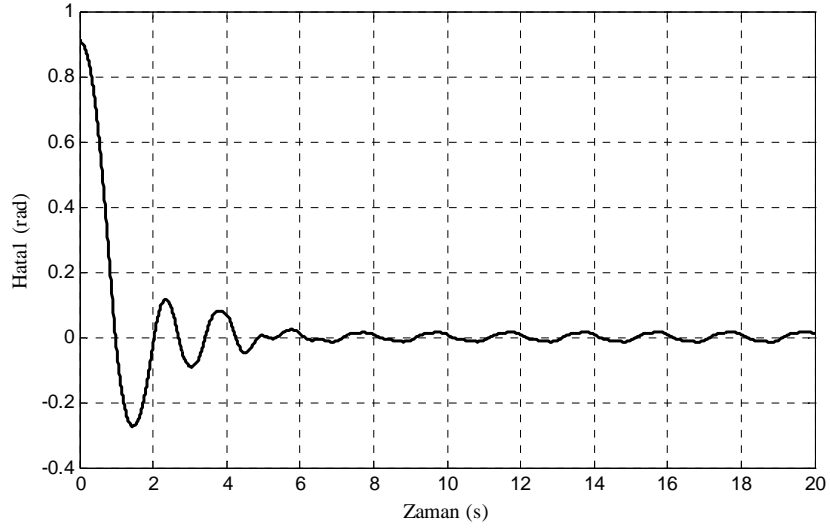
6.3.3 Robot eksenlerinin sinüzoidal yörünge izlemesi durumunda simülasyon sonuçları

Robot eksenlerinin yine (6.4) ifadesindeki yörüngeyi izlemesi hedeflenmiştir.

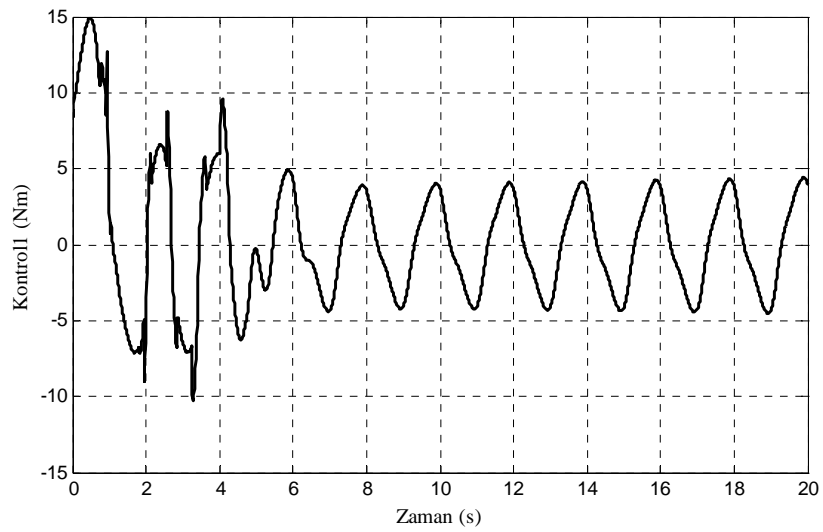
Şekil 6.10a 1. eksenin hedefi ve konumunu, Şekil 6.10b 1. eksenin hatasını, Şekil 6.10c kontrol işaretini, Şekil 6.10d kayma işaretini, Şekil 6.10e bulanık mantık ile elde edilen kayma yüzeyi eğimini, Şekil 6.10f ise eşdeğer kontrolü göstermektedir.



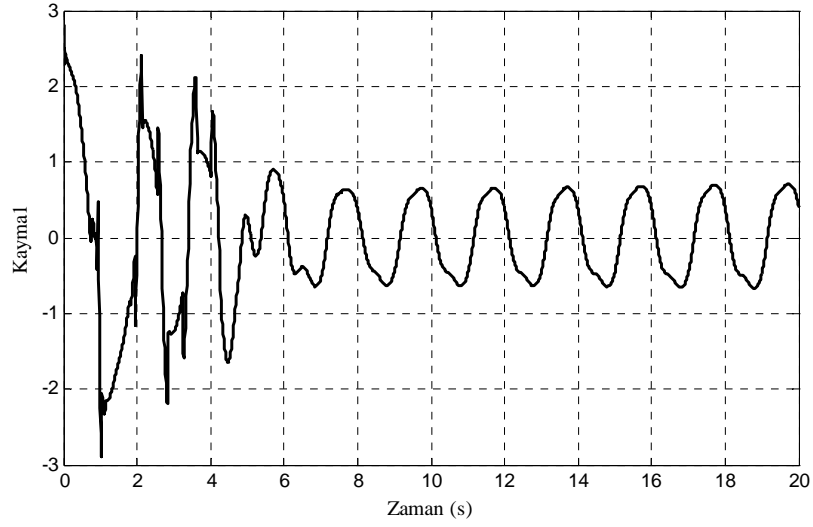
(a) 1. eksenin hedef ve gerçek konumu



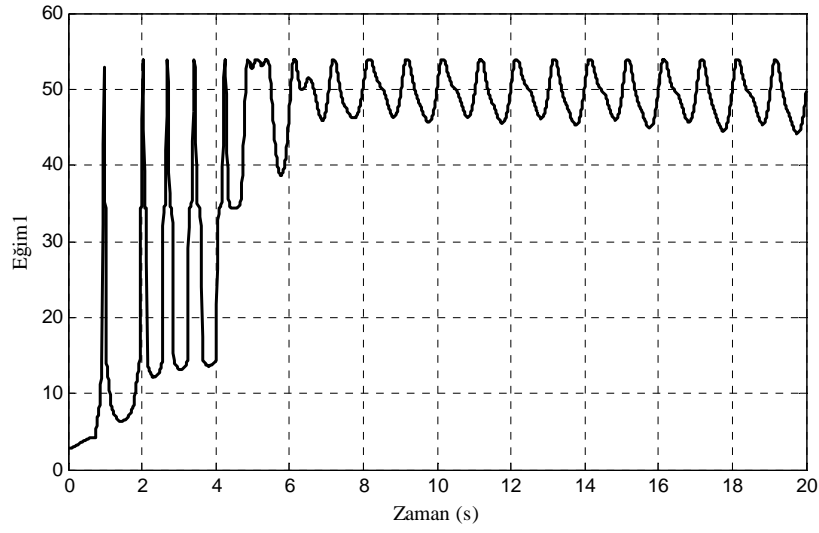
(b) 1. eksenin konum hatası



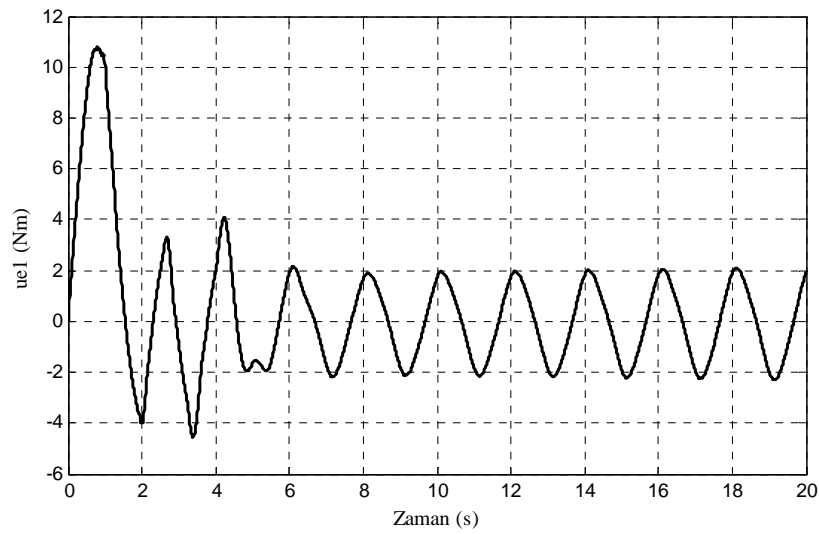
(c) 1. eksenin kontrol işareti



(d) 1. eksenin kayma işareti



(e) 1. eksenin kayma yüzeyi eğimi

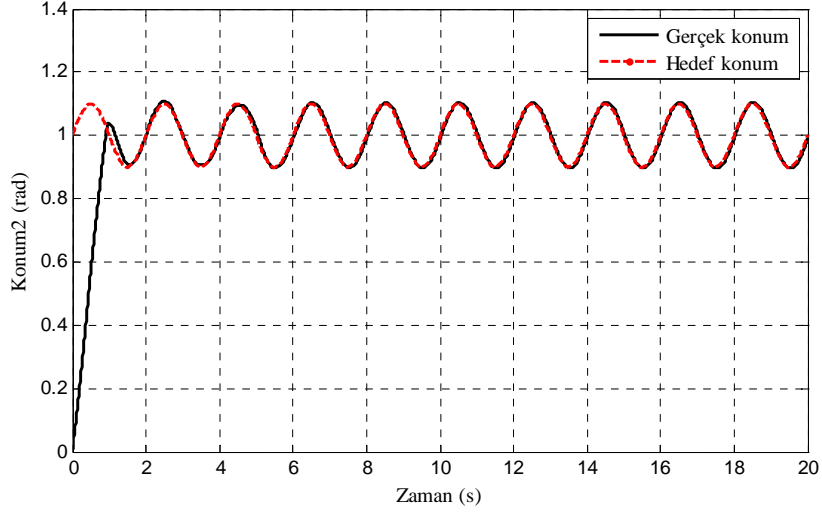


(f) 1. eksenin eşdeğer kontrolü

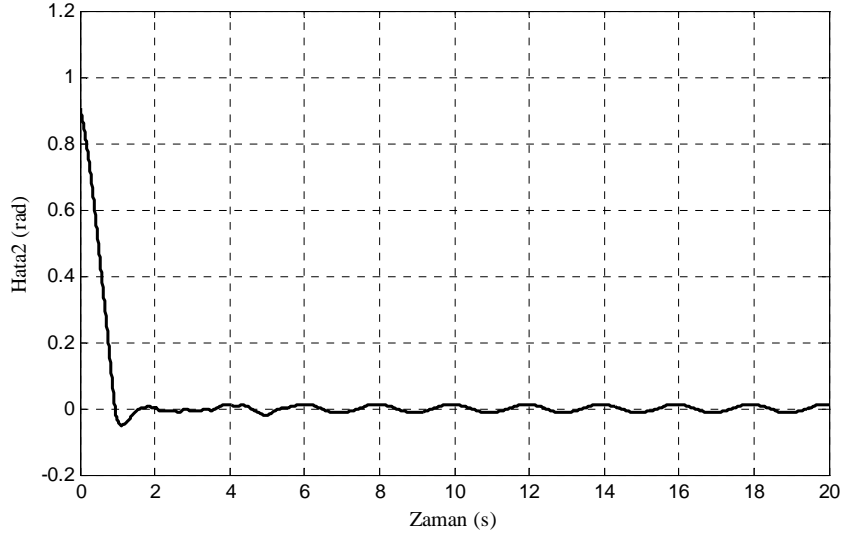
Şekil 6.10 Kayma yüzeyi eğiminin bulanık adaptasyon ile ayarlanmasında sinüzoidal yörünge takibinde 1. eksen için simülasyon sonuçları

Şekil 6.11a 2. eksenin hedefi ve konumunu, Şekil 6.11b 2. eksenin hatasını, Şekil 6.11c kontrol işaretini göstermektedir.

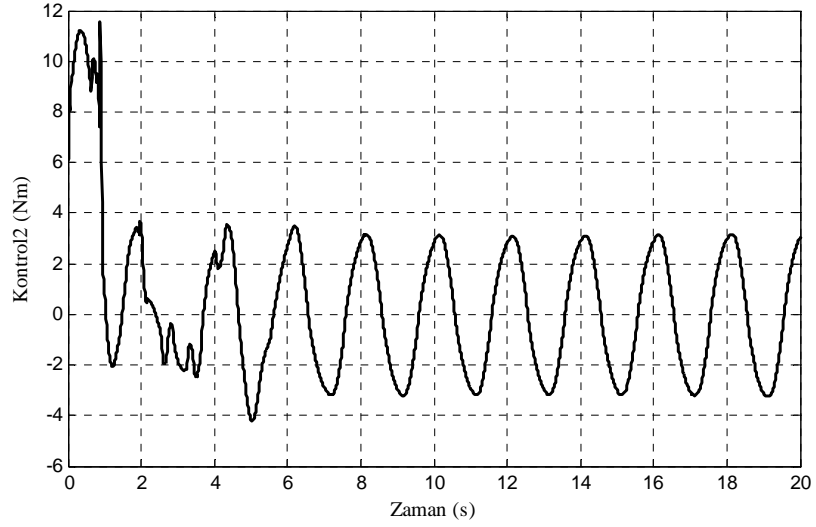
Şekil 6.12a'da 3. eksenin hedefi ve konumu, Şekil 6.12b'de 3. eksenin hatası, Şekil 6.12c'de kontrol işareti sunulmuştur.



a) 2. eksenin hedef ve gerçek konumu

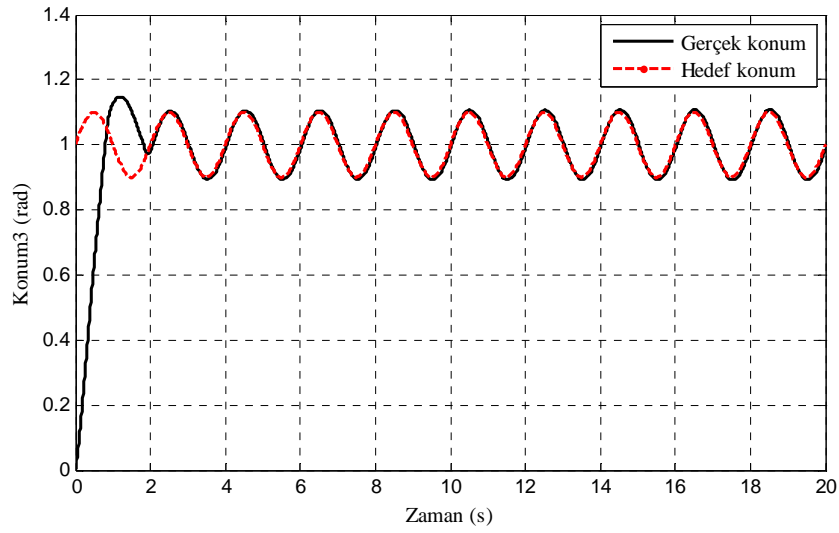


(b) 2. eksenin konum hatası

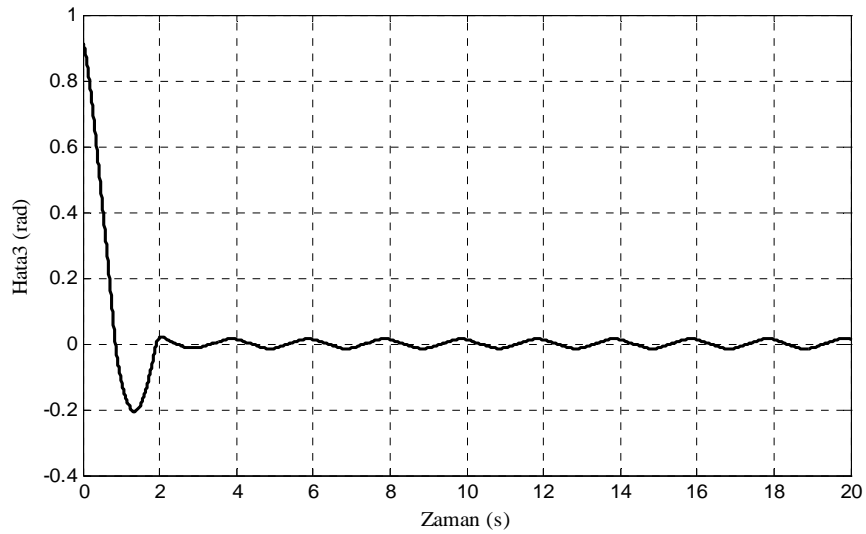


(c) 2. eksenin kontrol işareti

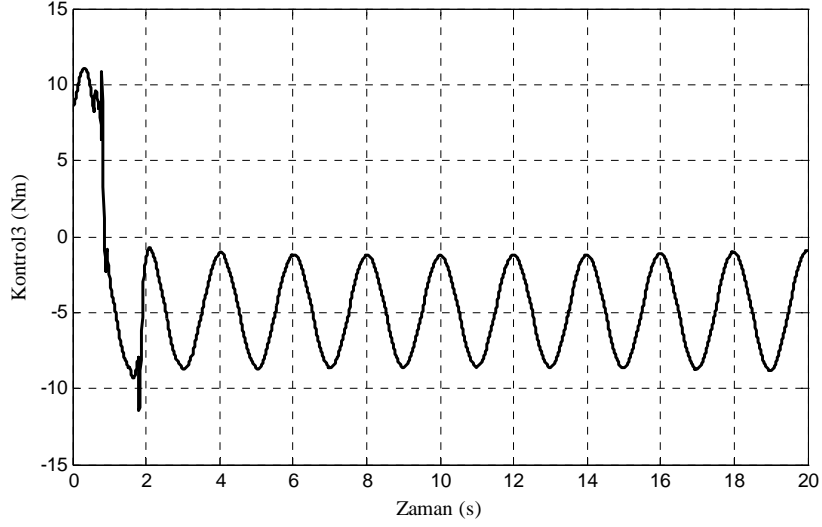
Şekil 6.11 Kayma yüzeyi eğiminin bulanık adaptasyon ile ayarlanmasında sinüzoidal yörünge takibinde 2. eksen için simülasyon sonuçları



a) 3. eksenin hedef ve gerçek konumu



(b) 3. eksenin konum hatası



(c) 3. eksenin kontrol işareti

Şekil 6.12 Kayma yüzeyi eğiminin bulanık adaptasyon ile ayarlanmasında sinüzoidal yörünge takibinde 3. eksen için simülasyon sonuçları

6.3.4 Simülasyon sonuçlarının yorumlanması

Sinüzoidal yörünge izlenmesi durumunda 1. eksen 3.8, 2. eksen 1, 3. eksen ise 1.9 saniyede hedeflenen yörüngeye oturmaktadır. Gerek hata gerekse aşma miktarları düzeltici kontrol kazancının bulanık mantık ile ayarlanması durumunda göre düşüktür. Ancak buradaki en önemli dezavantaj kontrol işaretlerinde var olan az miktardaki çattırdamalardır. Bu çattırdamalar sürekli duruma ulaşma anına kadar sürmektedir.

7. ROBOT MANİPULATOR

7.1 Manutec-r15

Manutec-r15 dönel eklemlili altı serbestlik dereceli endüstriyel bir robottur. Yapısı Şekil 7.1’de gösterilmiştir.



Şekil 7.1 Manutec-r15

7.2 Manutec-r15 Robotun Dinamik Modelinin Belirlenmesi

Robot kollarının dinamik denklemlerinin bulunması için literatürde en çok kullanılan yöntemler Lagrange-Euler ve Newton-Euler yöntemleridir.

Adaptif, dayanıklı, dayanıklı adaptif ve adaptif kayan kipli robot kontrol sistemlerinin geliştirilmesinde kullanılan en popüler yöntemlerden birisi de doğrusallaştırılmış parametreler ile robot modellemesidir (Spong ve Vidyasagar, 1989).

Endüstriyel robotlar için bilinen belirleme metotları minimal derecedeki doğrusal parametre vektörü cinsinden hareket denkleminin açıklamasına ve en küçük kareler (Least Square-LS) hata minimizasyon kriterinin kullanımına dayanır. Robot bütün taban parametrelerinin maksimum çıkarımını sağlamak için bir optimizasyon yöntemi kullanılarak oluşturulan bir yörünge boyunca hareket eder. Eklem hareketi ve eklem torku ölçülür ve sürtünmeden ortaya çıkan ölçülmüş sürtünme modeli kullanılarak kompanse edilir. Ardından taban parametre vektörünün hesaplanması için bir dizi LS algoritması kullanılır (Grotjahn vd., 2001).

7.2.1 Dişli sürtünmesinin modellenmesi ve belirlenmesi

Endüstriyel robotikte küçük tepkili çok katlı dişliler kullanılır. Bundan dolayı dişli elastikliği ve tepkisi kontrollü sistem dinamikleri üzerinde küçük etkiye sahiptir. Bu etki belirleme ölçümlerinin uygun seçilmesi ile önlenir.

Rijid yapı dinamikleri hariç sürtünme modellerinde sadece dişli ve yataklardaki kayıplar hesaba katılır. Sadece bir eksenin hareket ettiği yörüngeler kullanılarak ve sabit hızlı ölçüm parçalarının seçilmesiyle ivmenin, merkezkaç ve coriolis kuvvetlerinin etkileri elimine edilir. Tek robot eksen i 'deki sürtünme kayıpları kendi dönel eklem hızı \dot{q}_i 'nin fonksiyonu olan $Q_{i,f1}$ torku olarak modellenebilir. Bu doğrusal olmayan fonksiyon genelde yapışkan sönüm ve kuru sürtünme terimlerinin toplamıyla açıklanabilir:

$$Q_{i,f1} = a_{i,1}\dot{q}_i + a_{i,2}\text{sign}(\dot{q}_i) \quad (7.1)$$

Bu basit modelin daha kesin modelleme için düzenlenmesi gerekir. Ölçülmüş sürtünme karakteristiklerinin daha iyi bir ifadesi aşağıdaki denklemlerden biri kullanılarak bulunabilir:

$$Q_{i,f2} = a_{i,1}\dot{q}_i + a_{i,2}\text{sign}(\dot{q}_i) + a_{i,3}\dot{q}_i^{1/3} \quad (7.2)$$

$$Q_{i,f3} = a_{i,1}\dot{q}_i + a_{i,2}\text{sign}(\dot{q}_i) + a_{i,3}\text{atan}(a_{i,4}\dot{q}_i) \quad (7.3)$$

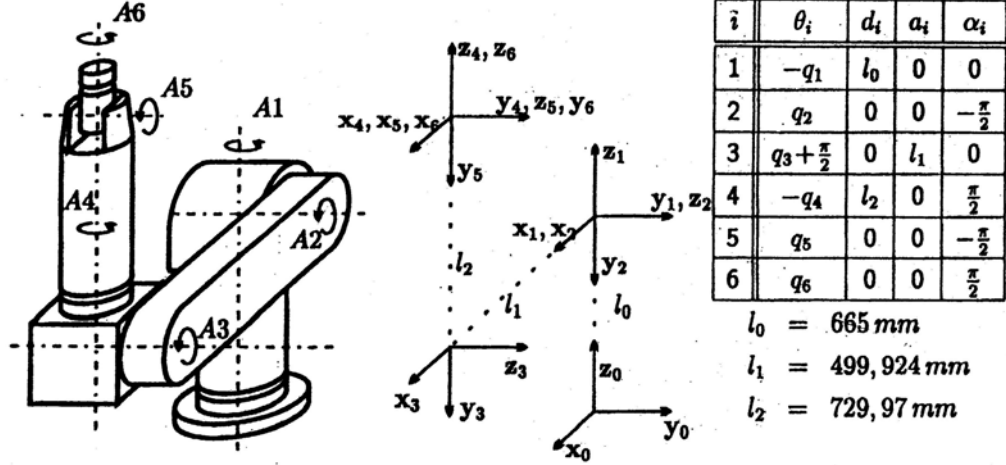
Manutec-r15 için Daemi tarafından yüksek lisans tezinde hesaplanmış sürtünme katsayıları Çizelge 5.1' de verilmiştir (Daemi, 1998):

Çizelge 7.1 Manutec-r15'in üç eksen için sürtünme katsayıları

Eksen	1 (Soğuk)				2 (Soğuk)				3 (Soğuk)			
	a_1	a_2	a_3	Hata (%)	a_1	a_2	a_3	Hata (%)	a_1	a_2	a_3	Hata (%)
Q_{f1} için	61.1	133.3	-	17.3	275.8	305.6	-	24.1	15.7	104	-	13.4
Q_{f2} için	-18.4	11.6	228.2	2.3	-162.6	-122.7	917	3.2	-16.2	55.3	92.6	7.2
Q_{f3} için	17	87.7	102.9	2.7	53.6	143.2	325.2	3.9	6.4	48.3	49.2	5.0
	1 (Sıcak)				2 (Sıcak)				3 (Sıcak)			
Q_{f1} için	39.3	73.6	-	13.9	174.2	130.2	-	20.0	17.8	52.7	-	13.8
Q_{f2} için	0.3	13.8	112.2	2.9	-4.4	-44.3	373.5	5.0	-3.1	20.9	60.4	8.4
Q_{f3} için	12.9	53.6	60.5	2.0	62.1	72.4	155.6	4.5	7.4	39.8	25.6	8.2

7.2.2 Rijid yapı dinamiklerinin doğrusal parametre formunda modellenmesi

Belirleme için bilinmeyen atalet ve yerçekimi parametrelerine göre doğrusal olan robot dinamik gösterimi tanımlanmalıdır. Bu, robot kinematiği için değiştirilmiş Denavit-Hartenberg notasyonu kullanılarak türetilebilir. Şekil 7.2' de Manutec-r15 için değiştirilmiş Denavit-Hartenberg koordinat çatısı ve parametreleri verilmiştir (Daemi, 1998).



Şekil 7.2 Manutec-r15 için değiştirilmiş Den.-Har. koordinat çatısı ve parametreleri

7.2.2.1 Dinamik parametreler

Her i linkinin dinamik parametreleri kütlesi m_i ' den; ilk momenti $s_i := [s_{xi} \ s_{yi} \ s_{zi}]^T = m_i r_{Ci}^i$ (r_{Ci} linkin koordinat çatısından kütlelerin merkezine olan vektördür) ve ona karşılık gelen koordinat çatısına dair atalet tensörü $I_i^{(i)}$ ' den oluşur. s_i ve $I_i^{(i)}$ 'nin bağımsız skaler elemanlarının toplanmasıyla parametre vektörü elde edilir:

$$p_{link,i} = [I_{xxi} \ I_{xyi} \ I_{xzi} \ I_{yyi} \ I_{yzi} \ I_{zzi} \ s_{xi} \ s_{yi} \ s_{zi} \ m_i]^T \quad (7.4)$$

Parametre vektörünün tamamı aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$p = [p_{link,1} \ p_{link,2} \ \dots \ p_{link,n}]^T \quad (7.5)$$

Pratik robot uygulamalarında hem koordinat çatısının dönme ve pozisyonundan hem de yapının simetrik biçiminden dolayı parametrelerin çoğu sıfırdır. Ayrıca çok sayıda parametre yerine doğrusal kombinasyonları yerleştirilebilir (Grotjahn vd., 2001).

7.2.2.2 Doğrusallaştırılmış parametre formundaki hareket denklemleri

Robotların hareket denklemleri Newton-Euler yaklaşımı veya ikinci tipte Lagrange denklemleri ile doğrusallaştırılmış parametre yapısında türetilebilir.

$$u = M(q)\ddot{q} + c(q, \dot{q}) + g(q) \Leftrightarrow u = A(q, \dot{q}, \ddot{q})p \quad (7.6)$$

Denklemin sol yanı dinamik denklemin geleneksel yapısını gösterir, sağ taraf ise doğrusallaştırılmış parametre yapısını verir. $A(q, \dot{q}, \ddot{q})$ matrisi uygun parametre vektörü p ile çarpılan robotun bilinen kinematik niteliklerini içerir. Motorun atalet momentleri (I_{mi}) genellikle üretici firma tarafından verilir (Grotjahn vd., 2001).

7.2.2.3 Taban parametrelerinin ve dinamik denklemlerin gruplandırılması

Taban parametreleri üç vektöre ayrılır:

- 1) Yerçekimsel P_g parametreleri $g(q)$ 'da bulunur.
- 2) Köşegen P_{Md} parametreleri $M(q)$ 'nin köşegeninde olur ama $g(q)$ 'da olmaz.
- 3) Köşegen olmayan P_{Mod} parametreleri sadece $M(q)$ 'nin köşegen olmayan elemanlarında olur.

Manutec-r15 için P_{Mod} sadece bir elemana sahiptir. Gruplandırma (7.6) denklemindeki $A(q, \dot{q}, \ddot{q})$ matrisinin ayrılmasını sağlar:

$$\tau = \underbrace{A_{Md}(q, \dot{q})P_{Md} + A_{Mod}(q, \dot{q})P_{Mod} + A_{Mg}(q, \dot{q})P_g}_{M(q)\ddot{q}} + \underbrace{A_c(q, \dot{q})p}_{c(q, \dot{q})} + \underbrace{A_g(q)P_g}_{g(q)} \quad (7.7)$$

İlk adımda $g(q)$ ve $M(q)$ 'nin elemanları bir kaç farklı eklem yapılandırmasında ölçülür. İkinci adımda ayrı ölçümlerin birleştirilmiş değerlendirilmesiyle parametreler tahmin edilir.

$c(q, \dot{q})$ ile gösterilen coriolis ifadesinin yerçekimsel torqların ve kütle matrisinin köşegen elemanlarının ölçümünde etkisi yoktur. Ölçülen torqlara karşılık gelen $c(q, \dot{q})$ elemanları, sadece bu tek eksen hareket ettiğinden sıfır olur. Ancak, kütle matrisinin köşegen olmayan elemanlarının ölçümünde $c(q, \dot{q})$ 'nin etkisi genellikle sıfır değildir. Ama genellikle eksenler düşük hızlarda hareket ettiği için ihmal edilebilir.

Manutec-r15 için değiştirilmiş Denavit-Hartenberg koordinat çatısı ve parametreleri pek çok parametre dinamikler üzerinde etkisi olmadığı için sıfır alınabilir. Çizelge 7.1 her link için

$p_{link,i}$ 'nin kalan elemanlarını gösterir. Gautier ve Khalil'nin algoritmalarının bu tanımlamalara uygulamasıyla taban parametre vektörü elde edilir (Grotjahn vd., 2001):

$$p = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \\ p_5 \\ p_6 \\ p_7 \\ p_8 \\ p_9 \\ p_{10} \\ p_{11} \\ p_{12} \\ p_{13} \\ p_{14} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{zz1} + I_{yy2} + I_{yy3} + l_1^2(m_3 + m_4 + m_5 + m_6) \\ I_{xx2} - I_{yy2} - l_1^2(m_3 + m_4 + m_5 + m_6) \\ I_{xz2} \\ I_{zz2} + l_1^2(m_3 + m_4 + m_5 + m_6) \\ s_{x2} + l_1(m_3 + m_4 + m_5 + m_6) \\ I_{xx3} - I_{yy3} + I_{yy4} + 2l_2s_{z4} + l_2^2(m_4 + m_5 + m_6) \\ I_{zz3} + I_{yy4} + 2l_2s_{z4} + l_2^2(m_4 + m_5 + m_6) \\ s_{y3} - s_{z4} - l_2(m_4 + m_5 + m_6) \\ I_{xx4} + I_{yy5} - I_{yy4} \\ I_{zz4} + I_{yy5} \\ I_{xx5} + I_{xx6} - I_{yy5} \\ I_{zz5} + I_{xx6} \\ s_{y5} - s_{z6} \\ I_{zz6} \end{bmatrix} \quad (7.8)$$

Çizelge 7.1 Her link için $p_{link,i}$ 'nin kalan elemanları (Grotjahn vd., 2001)

$P_{link,1}$	$P_{link,2}$	$P_{link,3}$	$P_{link,4}$	$P_{link,5}$	$P_{link,6}$
I_{zz1}	$I_{xx2}, I_{xz2}, I_{yy2}, I_{zz2}, s_{x2}$	$I_{xx3}, I_{yy3}, I_{zz3}, s_{y3}, m_3$	$I_{xx4}, I_{yy4}, I_{zz4}, s_{z4}, m_4$	$I_{xx5}, I_{yy5}, I_{zz5}, s_{z5}, m_5$	$I_{xx6}, I_{yy6}, I_{zz6}, s_{z6}, m_6$

Taban parametrelerinin $q(q)$ ve $M(q)$ üzerindeki etkileri Çizelge 7.2'de verilmiştir. Burada taban parametrelerinin (7.7) denklemindeki gibi üç gruba ayrılabilir:

- p_5, p_8, p_{13} sadece $q(q)$ 'da vardır. Bunlar p_g 'de birleştirilir.
- p_3 hariç diğer parametrelerin hepsi $M(q)$ 'nun köşegen elemanlarında bulunur. Bunlar P_{Md} 'de birleştirilir.
- $p_3, M(q)$ 'nun köşegen olmayan elemanlarında bulunan tek parametredir (Grotjahn vd., 2001).

Çizelge 7.2 Taban parametrelerinin $q(q)$ ve $M(q)$ üzerindeki etkileri (Grotjahn vd., 2001)

$M_{ij}(q)$	$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$	$j = 4$	$j = 5$	$j = 6$	$g_i(q)$
$i = 1$	$p_1, p_2, p_6, p_8, p_9, p_{10}, p_{11}, p_{12}, p_{13}, p_{14}$	$p_3, p_9, p_{11}, p_{12}, p_{13}, p_{14}$	$p_9, p_{11}, p_{12}, p_{13}, p_{14}$	$p_{10}, p_{11}, p_{13}, p_{14}$	p_{12}, p_{13}	p_{14}	0
$i = 2$	Sym.	$p_4, p_7, p_8, p_9, p_{11}, p_{12}, p_{13}, p_{14}$	$p_7, p_8, p_9, p_{11}, p_{12}, p_{13}, p_{14}$	p_{11}, p_{13}, p_{14}	p_{12}, p_{13}	p_{14}	p_5, p_8, p_{13}
$i = 3$	Sym.	Sym.	$p_7, p_9, p_{11}, p_{12}, p_{13}, p_{14}$	p_{11}, p_{13}, p_{14}	p_{12}, p_{13}	p_{14}	p_8, p_{13}
$i = 4$	Sym.	Sym.	Sym.	p_{10}, p_{11}, p_{14}	0	p_{14}	p_{13}
$i = 5$	Sym.	Sym.	Sym.	Sym.	p_{12}	0	p_{13}
$i = 6$	Sym.	Sym.	Sym.	Sym.	Sym.	p_{14}	0

$M(q)$ ve $q(q)$ aşağıdaki gibi yazılabilir (Daemi, 1998):

$$M(q) = \begin{bmatrix} M_{1,1} & M_{1,2} & M_{1,3} & M_{1,4} & M_{1,5} & M_{1,6} \\ M_{1,2} & M_{2,2} & M_{2,3} & M_{2,4} & M_{2,5} & M_{2,6} \\ M_{1,3} & M_{2,3} & M_{3,3} & M_{3,4} & M_{3,5} & M_{3,6} \\ M_{1,4} & M_{2,4} & M_{3,4} & M_{4,4} & 0 & M_{4,6} \\ M_{1,5} & M_{2,5} & M_{3,5} & 0 & M_{5,5} & 0 \\ M_{1,6} & M_{2,6} & M_{3,6} & M_{4,6} & 0 & M_{6,6} \end{bmatrix}, g(q) = \begin{bmatrix} 0 \\ g_2 \\ g_3 \\ g_4 \\ g_5 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7.9)$$

$M(q)$ ve $g(q)$ 'nin elemanları aşağıdaki gibidir:

$$M_{11} = p_1 + s_2^2 p_2 + c_2^2 p_6 - 2l_1 c_2 c_{23} p_6 + c_4^2 c_{23}^2 p_9 + s_{23}^2 p_{10} + (-2s_5 c_5 c_4 s_{23} c_{23} + s_5^2 s_{23}^2 + c_5^2 c_4^2 c_{23}^2) p_{11} + s_4^2 c_{23}^2 p_{12} + (-2c_5 l_2 c_{23}^2 + 2s_5 c_4 l_1 c_2 s_{23} - 2c_5 l_1 c_2 c_{23} + 2s_5 c_4 l_1 c_2 c_{23} + 2s_5 c_4 l_2 s_{23} c_{23}) p_{13} + (s_5^2 c_4^2 c_{23}^2 + c_5^2 s_{23}^2 + 2s_5 c_5 s_{23} c_{23}) p_{14}$$

$$M_{12} = s_2 p_3 - s_4 c_4 c_{23} p_3 + c_5 s_4 (-c_5 c_4 c_{23} + s_5 s_{23}) p_{11} + s_4 c_4 c_{23} p_{12} - s_4 s_5 (l_2 s_{23} + l_1 s_2) p_{13} - s_5 s_4 (c_5 s_{23} + s_5 c_4 c_{23}) p_{14}$$

$$M_{13} = -s_4 c_4 c_{23} p_9 + c_5 s_4 (-c_5 c_4 c_{23} + s_5 s_{23}) p_{11} + s_4 c_4 c_{23} p_{12} - s_5 l_2 s_4 s_{23} p_{13} - s_5 s_4 (c_5 s_{23} + s_5 c_4 c_{23}) p_{14}$$

$$M_{14} = -s_{23} p_{10} + (s_5 c_5 c_4 c_{23} - s_5^2 s_{23}^2) p_{11} - s_5 c_4 (l_2 c_{23} + c_2 l_1) p_{13} - c_5 (c_5 s_{23} + s_5 c_4 c_{23}) p_{14}$$

$$M_{15} = s_4 c_{23} p_{12} - (c_5 s_4 l_2 c_{23} + c_5 s_4 c_2 l_1) p_{13} \quad M_{16} = (c_5 s_{23} + s_5 c_4 c_{23}) p_{14}$$

$$M_{22} = p_4 + p_7 - 2c_3 l_1 p_8 + s_4^2 p_9 + c_5^2 s_4^2 p_{11} + c_4^2 p_{12} - (2c_5 l_2 - 2s_5 c_4 s_3 l_1 + 2c_5 c_3 l_1) p_{13} + s_5^2 s_4^2 p_{14}$$

$$M_{23} = p_7 - c_3 l_1 p_8 + s_4^2 p_9 + c_5^2 s_4^2 p_{11} + c_4^2 p_{12} - (-s_5 c_4 s_3 l_1 + 2c_5 l_2 + c_5 c_3 l_1) p_{13} + s_5^2 s_4^2 p_{14}$$

$$M_{24} = -s_5 c_5 s_4 p_{11} + s_5 s_4 (c_3 l_1 + l_2) p_{13} + s_5 c_5 s_4 p_{14}$$

$$M_{25} = c_4 p_{12} - (c_5 c_4 c_3 l_1 + c_5 c_4 l_2 - s_5 s_3 l_1) p_{13}$$

$$M_{26} = -s_5 s_4 p_{14}$$

$$M_{33} = p_7 + s_4^2 p_9 + c_5^2 s_4^2 p_{11} + c_4^2 p_{12} - 2c_5 l_2 p_{13} + s_5^2 s_4^2 p_{14}$$

$$M_{34} = -s_5 c_5 s_4 p_{11} + s_5 s_4 l_2 p_{13} + s_5 c_5 s_4 p_{14}$$

$$M_{35} = c_4 p_{12} - c_5 c_4 l_2 p_{13}$$

$$M_{36} = -s_5 s_4 p_{14}$$

$$M_{44} = p_{10} + s_5^2 p_{11} + c$$

$$M_{46} = -c_5 p_{14}$$

$$M_{55} = p_{12}$$

$$M_{66} = p_{14}$$

$$g_2 = -g_0 c_2 p_5 + g_0 c_{23} p_8 + g_0 (-s_5 c_4 s_{23} + c_5 c_{23}) p_{13}$$

$$g_3 = g_0 c_{23} p_8 + g_0 (-s_5 c_4 s_{23} + c_5 c_{23}) p_{13}$$

$$g_4 = -g_0 s_5 s_4 c_{23} p_{13}$$

$$g_5 = g_0 (-s_5 s_{23} + c_5 c_4 c_{23}) p_{13}$$

Burada $s_i := \sin(q_i)$, $c_i := \cos(q_i)$, $s_{ij} := \sin(q_i + q_j)$, $c_{ij} := \cos(q_i + q_j)$ dir.

Taban parametreleri (yükli A ve yüksüz B) için nümerik sonuçlar Çizelge 7.3' de verilmiştir:

Çizelge 7.3 Taban parametreleri (yükli A ve yüksüz B) (Grotjahn vd., 2001)

i	1	2	3	4	5	6	7
$p_i(A)$	32.015	-28.058	-2.187	19.905	48.491	9.602	13.313
$p_i(B)$	36.907	-33.782	-2.435	22.565	51.896	16.331	18.562
Δp_i	4.892	-5.724	-0.247	2.6597	3.405	6.7296	5.2493
$\Delta p_i(\text{exp.})$	2.713	-2.713	0	2.713	5.409	5.786	5.786
i	8	9	10	11	12	13	14
$p_i(A)$	-15.836	0.0000	0.0443	0.2883	0.1554	-0.1885	0.3760
$p_i(B)$	-23.244	-0.0895	0.2198	0.2274	0.4381	-1.9983	0.3980
Δp_i	-7.408	-0.0895	0.1755	-0.0609	0.2826	-1.8097	0.0220
$\Delta p_i(\text{exp.})$	-7.885	0.0	0.0	0.0	0.0	-1.518	0.0470

7.3 Manutec-r15 İçin Simülasyon Sonuçları

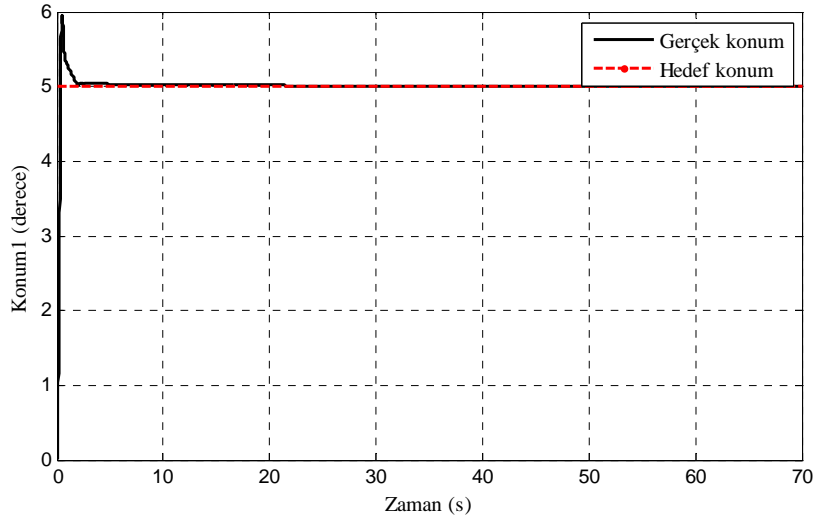
Simülasyonlar yapılırken deney sonuçları ile karşılaştırılabilmesi için deneylerin yapıldığı manutec-r15'in referans konumları (1. eksen için 0, 2. eksen için 157 ve 3. eksen için ise -125°) kullanılmıştır. Yine deney ve simülasyon sonuçlarını karşılaştırabilmek için simülasyon süresi

70s. olarak alınmıştır. Sürtünme modeli olarak Q_{f1} ve Q_{f3} denenmiş, Q_{f3} daha iyi sonuç verdiği için dolay bu model ile elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

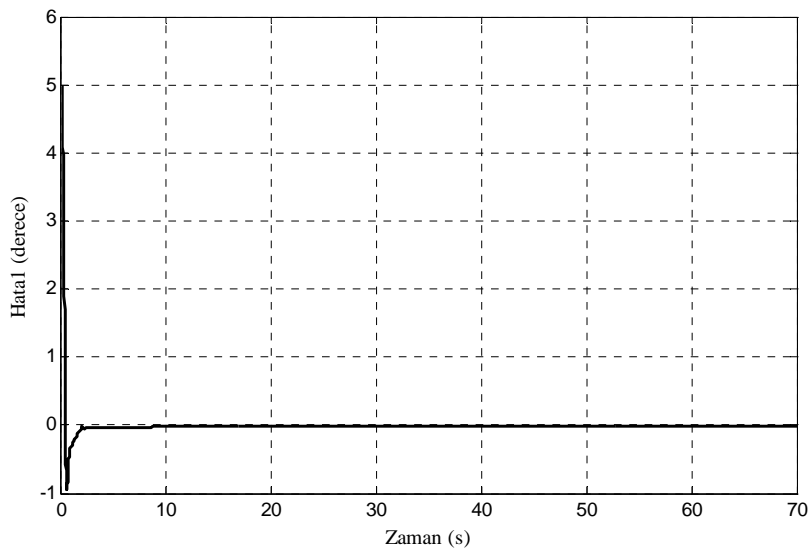
7.3.1 Düzeltici kontrol kazancının bulanık mantık ile ayarlanması durumunda simülasyon sonuçları

7.3.1.1 Eksenler 5° döndürüldüğünde simülasyon sonuçları

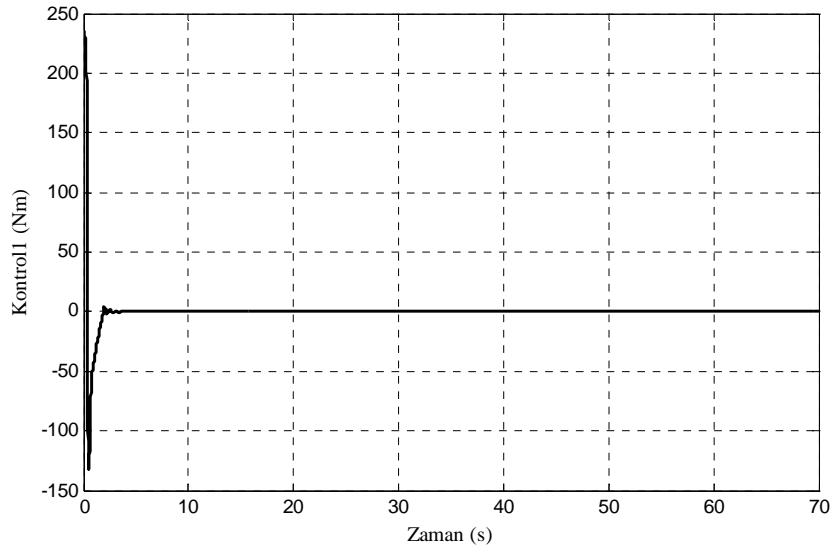
Şekil 7.3a 1. eksen 5° döndürüldüğünde hedefi ve eksenin konumunu, Şekil 7.3b hatayı, Şekil 7.3c kontrol işaretini, Şekil 7.3d kayma işaretini, Şekil 7.3e bulanık mantık ile elde edilen kazancı, Şekil 7.3f ise eşdeğer kontrolü göstermektedir.



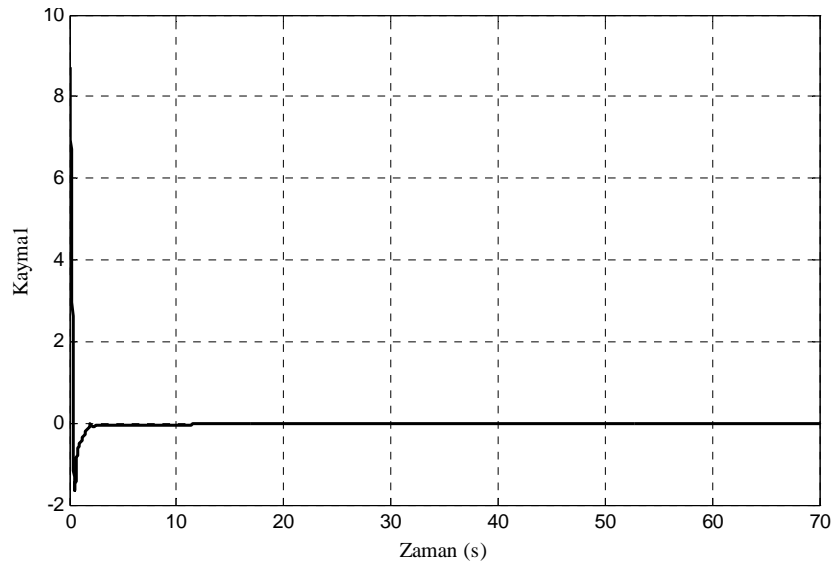
(a) 1. eksenin hedef ve gerçek konumu



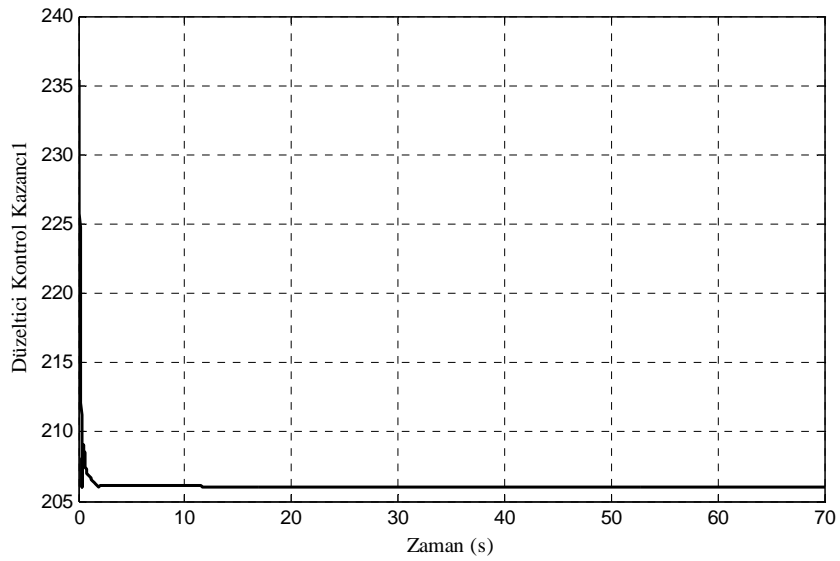
(b) 1. eksenin konum hatası



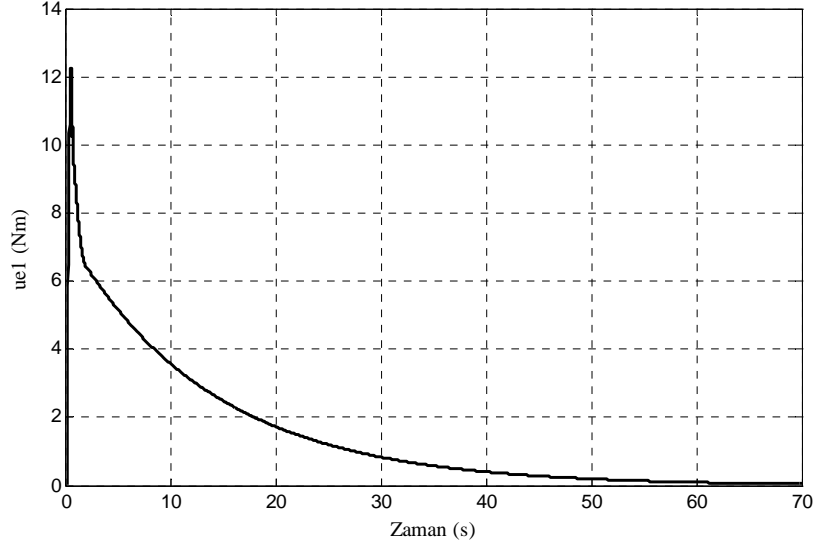
(c) 1. eksenin kontrol işareti



(d) 1. eksenin kayma işareti



(e) 1. eksenin düzeltilici kontrol kazancı

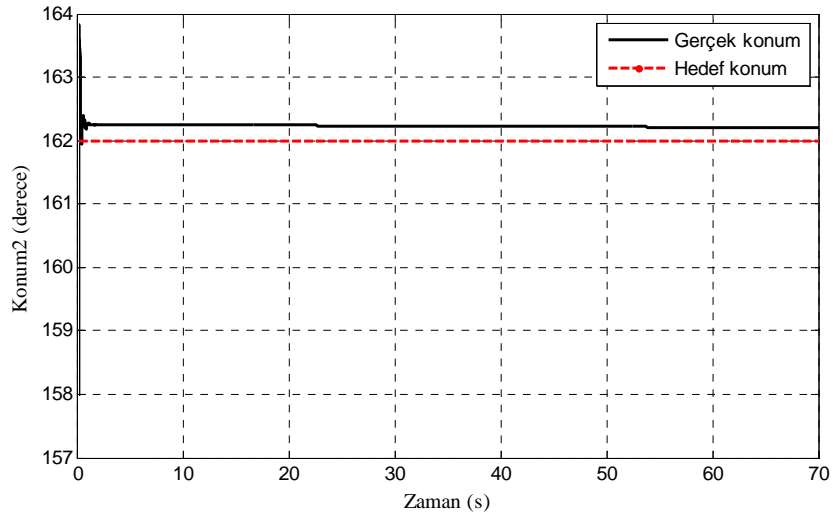


(f) 1. eksenin eşdeğer kontrolü

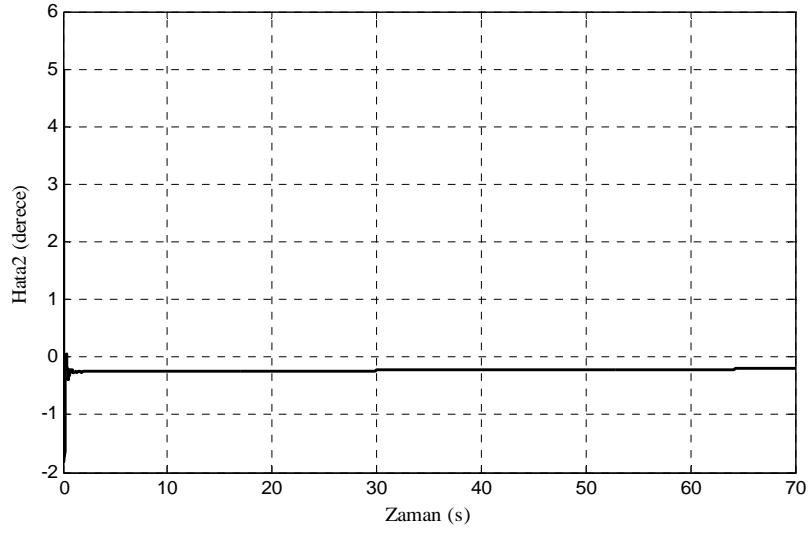
Şekil 7.3 Düzeltici kontrol kazancının bulanık adaptasyon ile ayarlanmasında 5° lik dönme durumunda 1. eksen için simülasyon sonuçları

Şekil 7.4a 2. eksen 5° döndürüldüğünde hedefi ve eksenin konumunu, Şekil 7.4b hatayı, Şekil 7.4c kontrol işaretini göstermektedir.

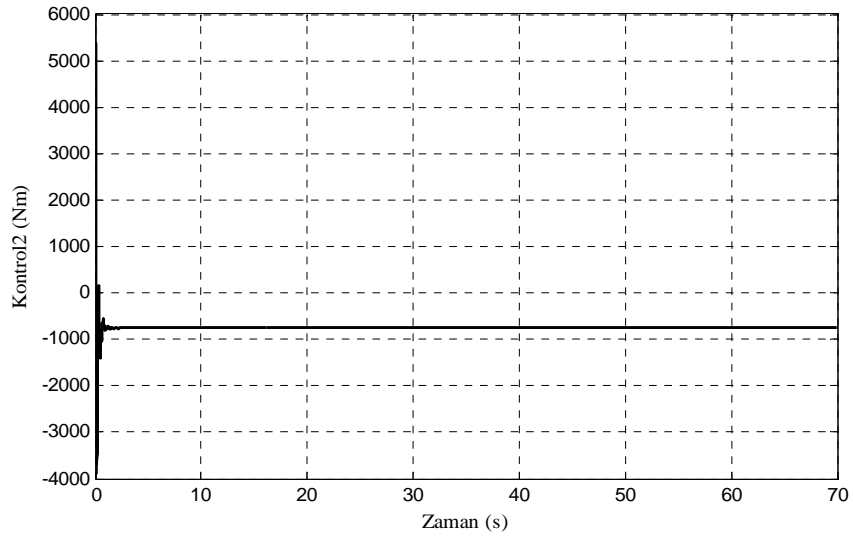
Şekil 7.5a 3. eksen 5° döndürüldüğünde hedefi ve eksenin konumunu, Şekil 7.5b hatayı, Şekil 7.5c kontrol işaretini göstermektedir.



(a) 2. eksenin hedef ve gerçek konumu

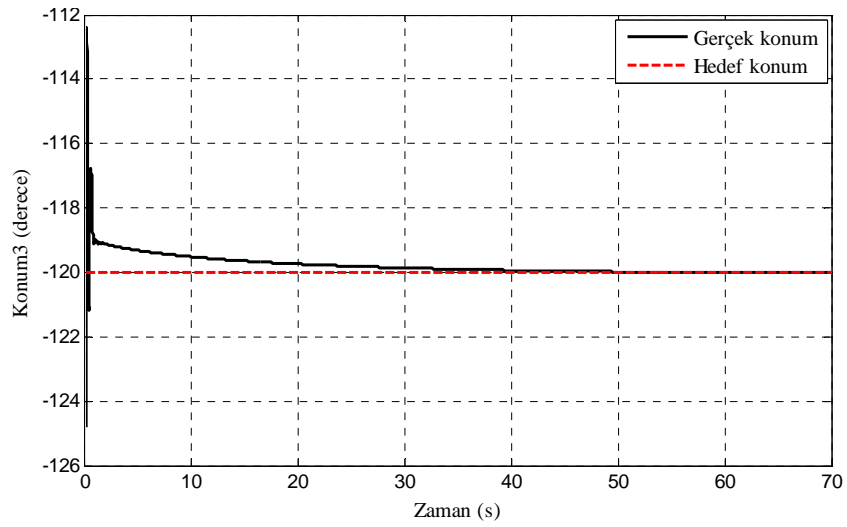


(b) 2. eksenin konum hatası

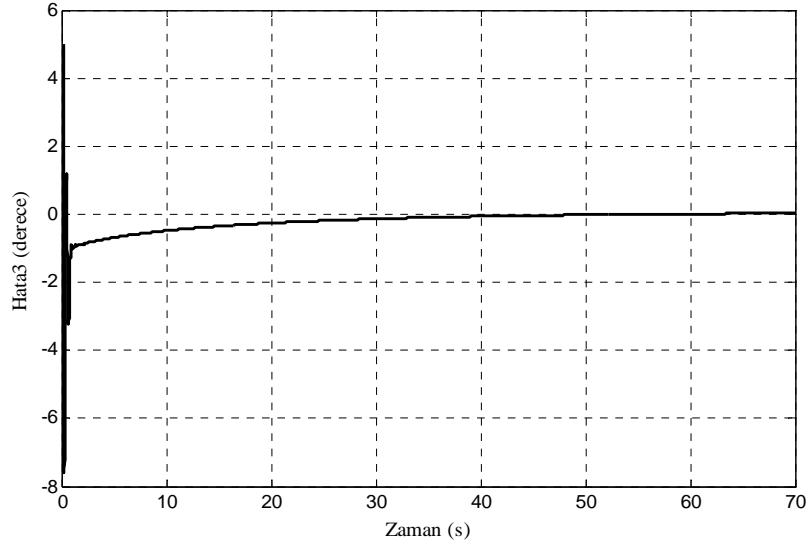


(c) 2. eksenin kontrol işareti

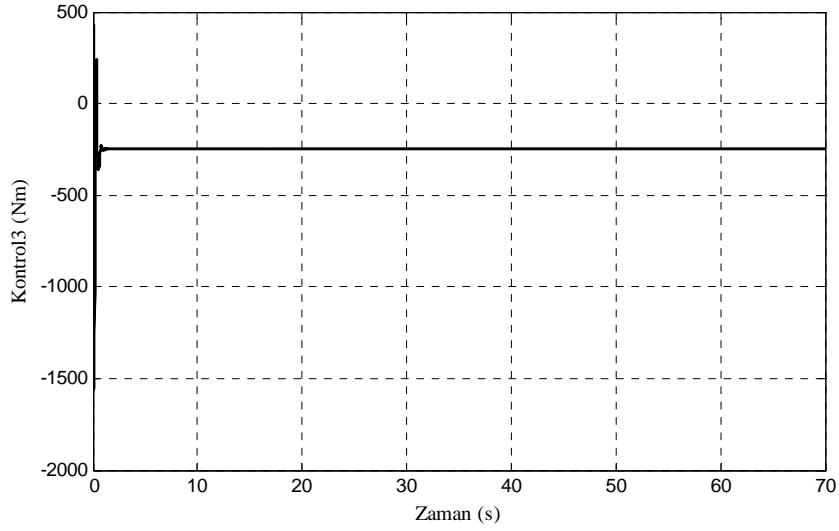
Şekil 7.4 Düzeltici kontrol kazancının bulanık adaptasyon ile ayarlanmasında 5° 'lik dönme durumunda 2. eksen için simülasyon sonuçları



(a) 3. eksenin hedef ve gerçek konumu



(b) 3. eksenin konum hatası



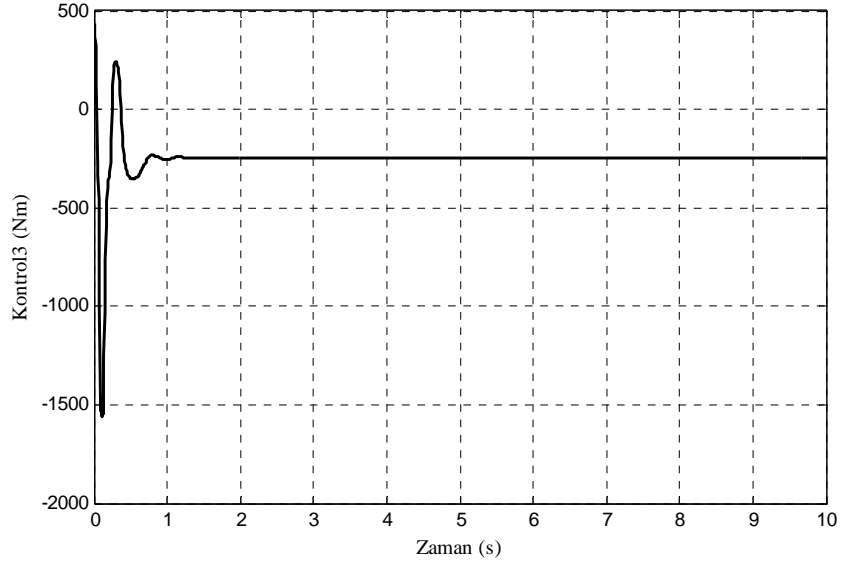
(c) 3. eksenin kontrol işareti

Şekil 7.5 Düzeltici kontrol kazancının bulanık adaptasyon ile ayarlanmasında 5° 'lik dönme durumunda 3. eksen için simülasyon sonuçları

7.3.1.2 Simülasyon sonuçlarının yorumlanması

Şekil 7.3'den görüleceği gibi 1. eksen 5s civarında hedefe ulaşmaktadır. 1. eksen az miktarda bir aşma söz konusudur. Kontrol işaretinde çatlama yoktur. 2. eksen 2s.'de yörüngeye oturmaktadır. Aşma miktarının daha fazla olduğu görülmektedir (Şekil 7.4). En yüksek aşma 3. eksende görülmektedir. 20. saniyeden sonra yörüngeye oturmaktadır. (Şekil 7.5). 1 ve 3. eksenlerde yokken 2. eksende 0.27° 'lik bir sürekli durum hatası kalmaktadır. Kayma yüzeyi eğimi ve düzeltici kontrol katsayıları daha uygun belirlenerek bu problem ortadan kaldırılabılır. 2 ve 3. eksenlerde çok kısa süreli çatlama vardır. Ancak grafiklerdeki çatlama görüntüsü aslında simülasyon süresinin oldukça uzun tutulmasından ve grafiklerin

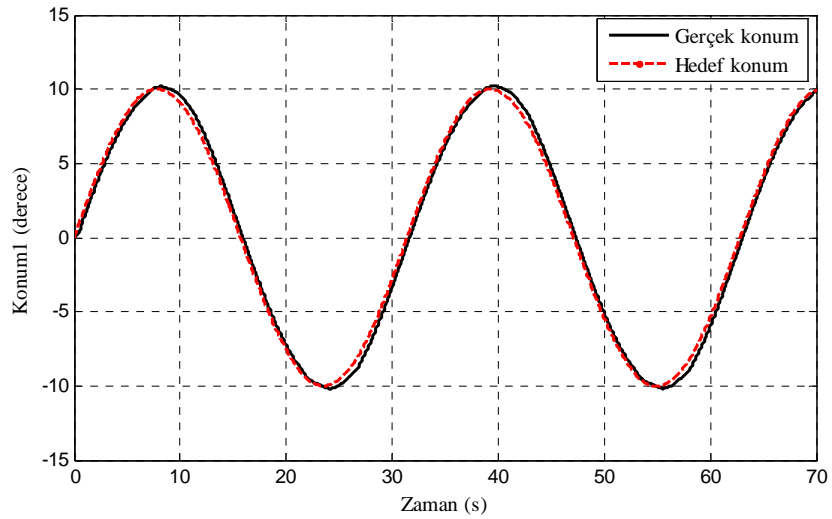
küçük görüntüsünden kaynaklıdır. Simülasyon süresi 10s. olarak alındığında 3. eksenin kontrol işareti Şekil 7.6'daki gibi çatırtısız görünmektedir.



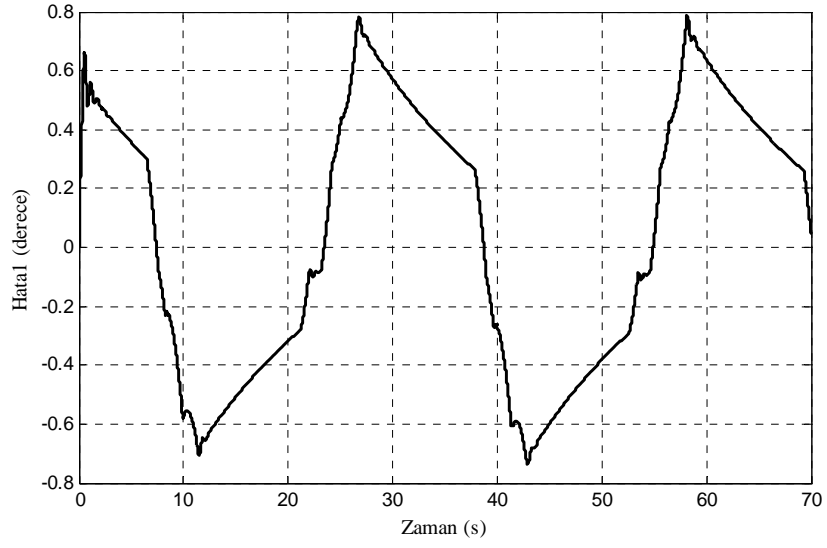
Şekil 7.6 3. eksenin kontrol işareti

7.3.1.3 Sinüzoidal yörünge takibi için simülasyon sonuçları

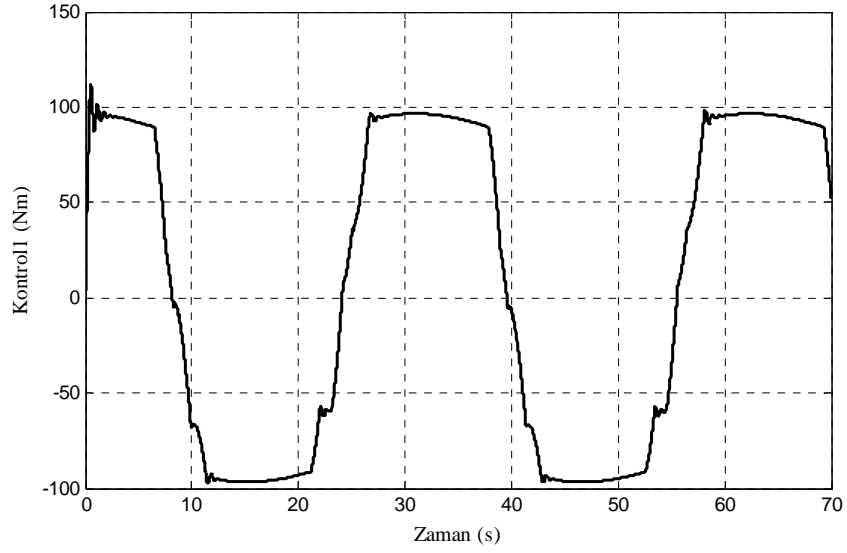
Şekil 7.7a 1. eksen $10\sin(0.2t)$ (derece) sinüs işareti izlettirildiğinde hedefi ve eksenin konumları, Şekil 7.7b hatayı, Şekil 7.7c kontrol işaretini, Şekil 7.7d kayma işaretini, Şekil 7.7e bulanık mantık ile elde edilen kazancı, Şekil 7.7f ise eşdeğer kontrolü göstermektedir.



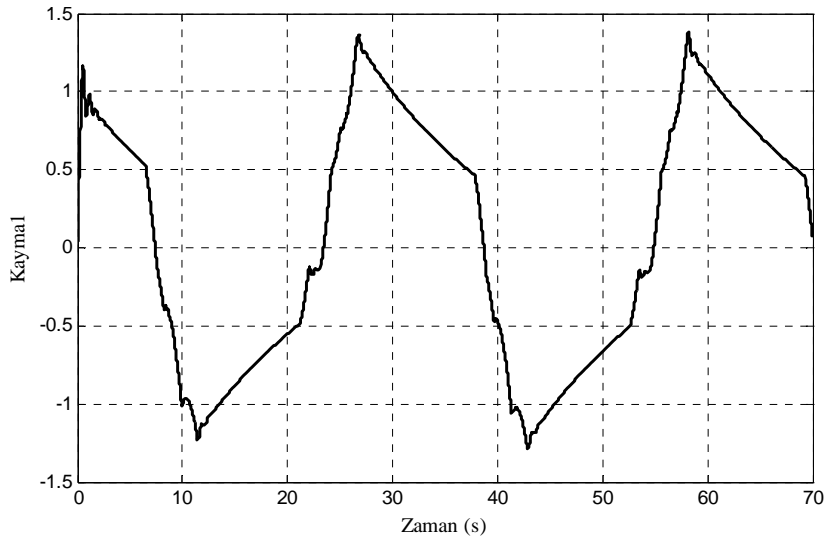
(a) 1. eksenin hedef ve gerçek konumu



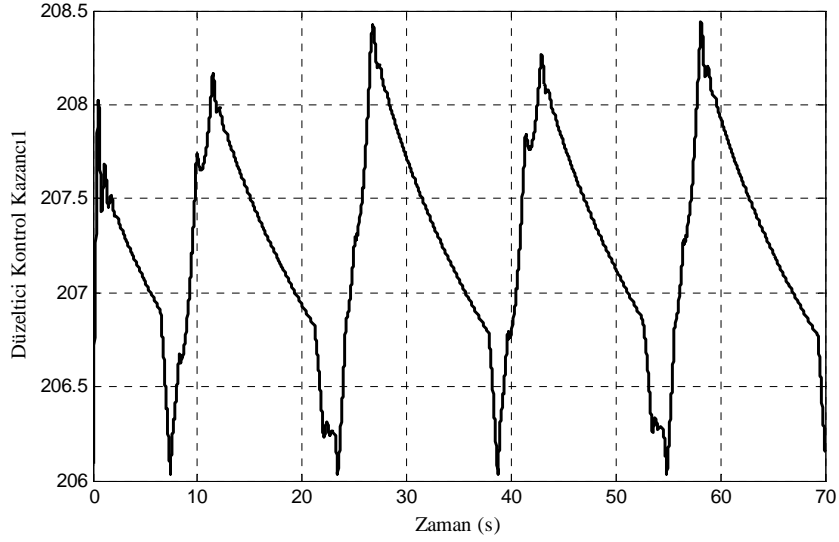
(b) 1. eksenin konum hatası



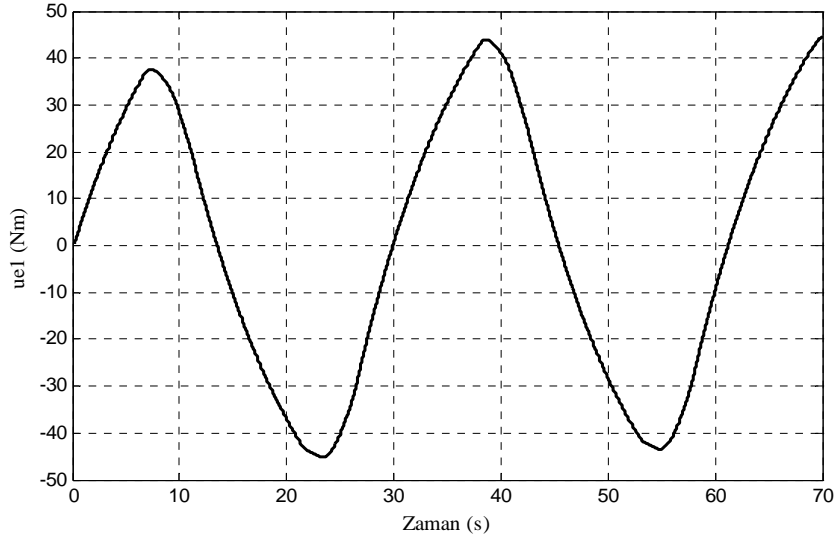
(c) 1. eksenin kontrol işareti



(d) 1. eksenin kayma işareti



(e) 1. eksenin düzeltici kontrol kazancı

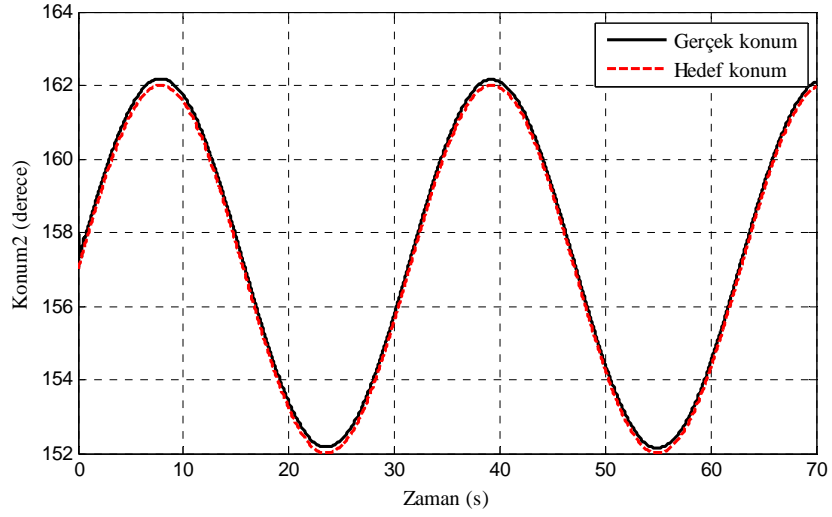


(f) 1. eksenin eşdeğer kontrolü

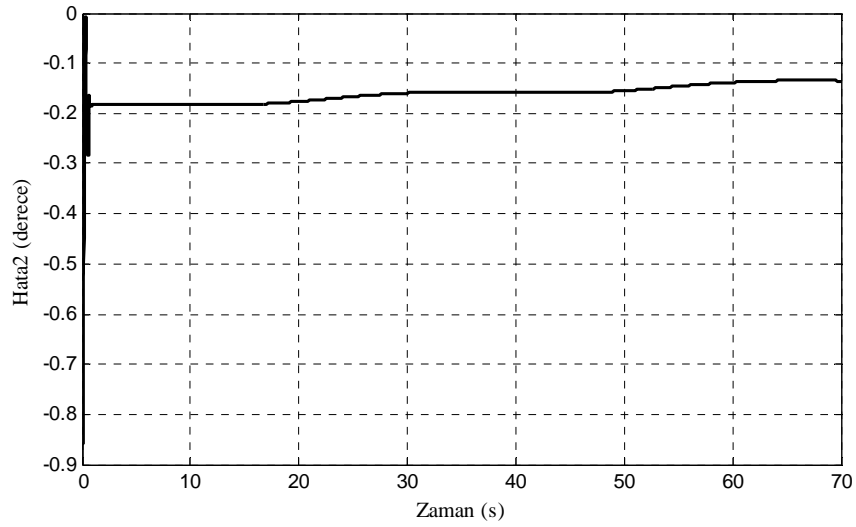
Şekil 7.7 Düzeltilici kontrol kazancının bulanık adaptasyon ile ayarlanması durumunda sinüsoidal yörünge takibinde 1. eksen için simülasyon sonuçları

Şekil 7.8a 2. eksen $5 \sin(0.2t)$ (derece) sinüs işareti izlettiğinde hedefi ve eksenin konumları, Şekil 7.8b hatayı, Şekil 7.8c kontrol işaretini göstermektedir.

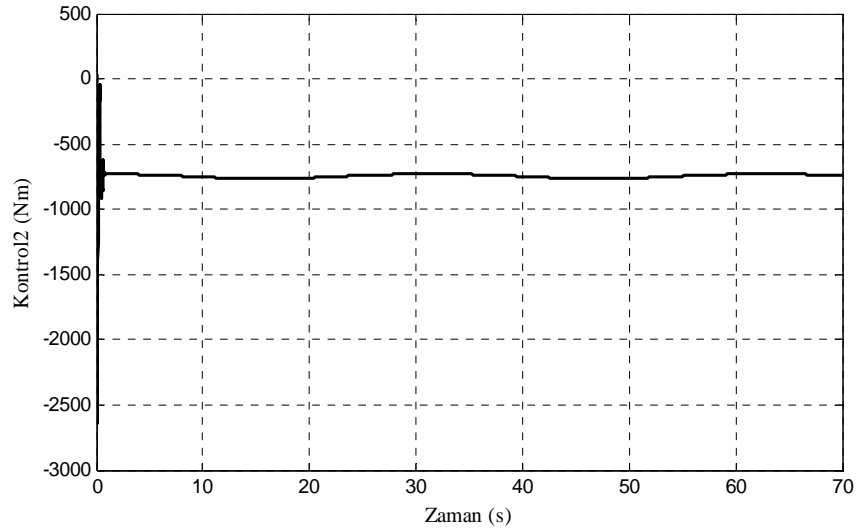
Şekil 7.9a'da 3. eksen $5 \sin(0.2t)$ (derece) sinüs işareti izlettiğinde hedef ve eksenin konumları, Şekil 7.9b hata, Şekil 7.9c kontrol işaretin verilmiştir.



(a) 2. eksenin hedef ve gerçek konumu

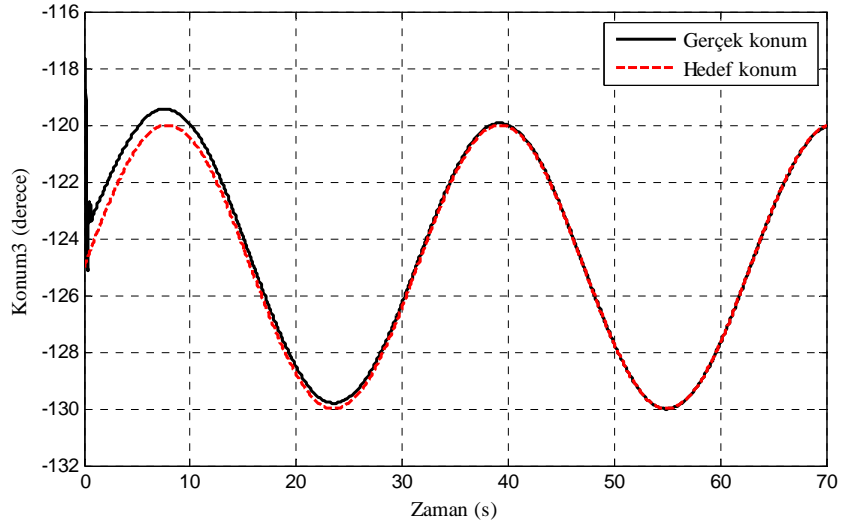


(b) 2. eksenin konum hatası

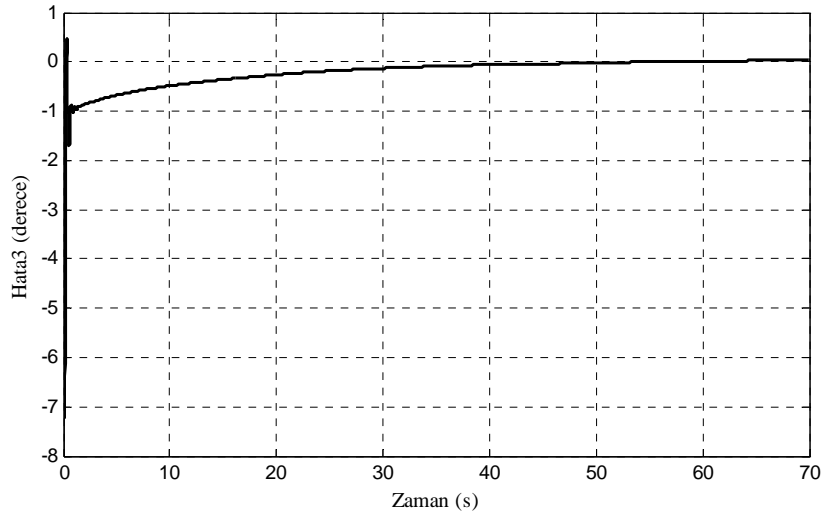


(c) 2. eksenin kontrol işareti

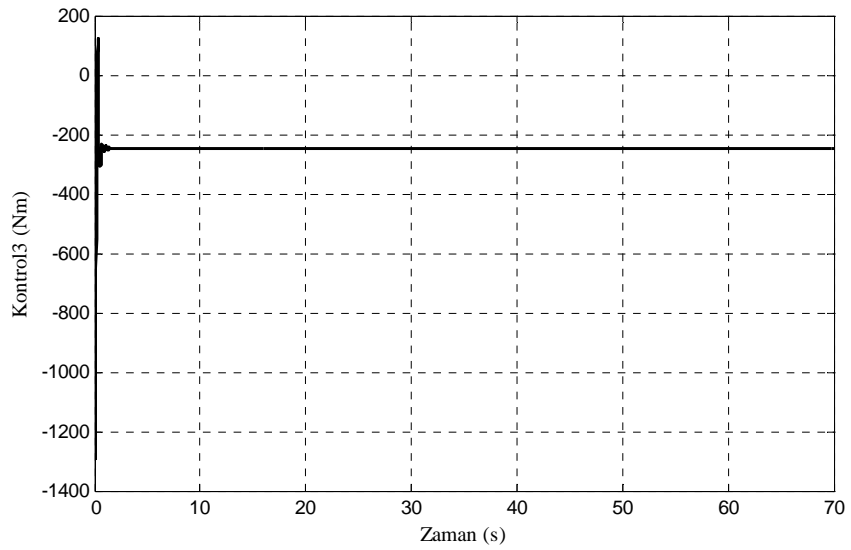
Şekil 7.8 Düzeltici kontrol kazancının bulanık adaptasyonu ile ayarlanması durumunda sinüzoidal yörünge takibinde 2. eksen için simülasyon sonuçları



(a) 3. eksenin hedef ve gerçek konumları



(b) 3. eksenin konum hatası



(c) 3. eksenin kontrol işareti

Şekil 7.9 Düzeltici kontrol kazancının bulanık adaptasyon ile ayarlanması durumunda sinüsoidal yörünge takibinde 3. eksen için simülasyon sonuçları

7.3.1.4 Simülasyon sonuçlarının yorumlanması

Şekil 7.7'den görüleceği gibi 1. eksen istenen yörüngeye çok kısa sürede oturmaktadır. Çok az miktarda çadır damalar söz konusudur. En yüksek hata sinüs işaretlerinin maksimum ve minimum noktalarında meydana gelmektedir. 2. eksen için sonuçların verildiği Şekil 7.8 incelendiğinde ise bu eksenin 0.3 s. de hedef yörüngeye ulaştığı gözlenmektedir. Grafikler incelendiğinde ilk iki saniyede kontrol işaretlerinde kısa süreli bir çadır damaya görüntüsü vardır. Ancak simülasyon süresi 10s. olarak alınarak incelendiğinde bu görüntü oluşmamaktadır.

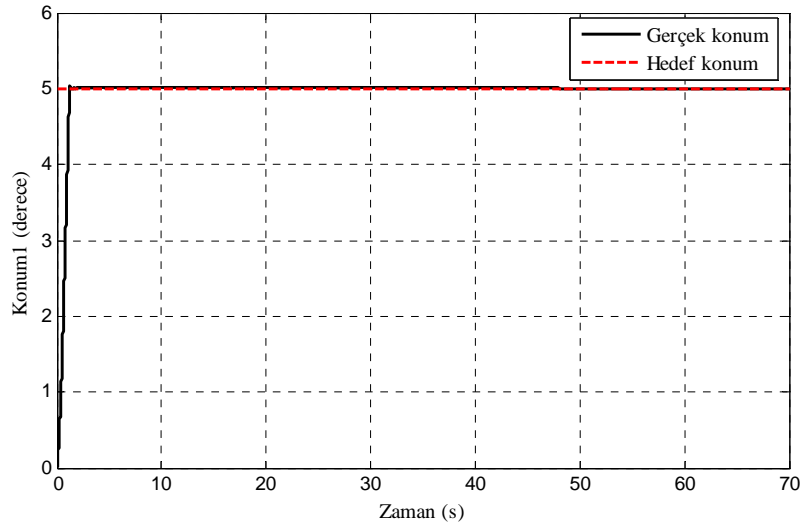
7.3.2 Kayma yüzeyi eğiminin bulanık mantık ile ayarlanması durumunda simülasyon sonuçları

7.3.2.1 Eksenler 5° döndürüldüğünde simülasyon sonuçları

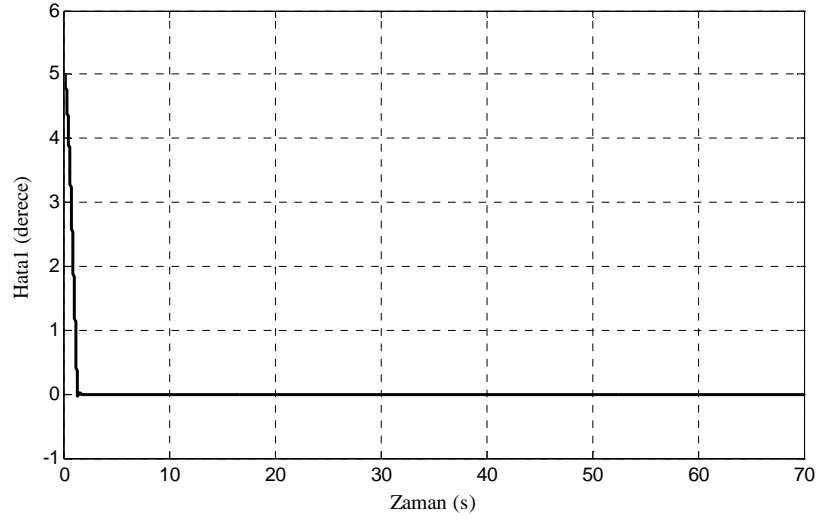
Şekil 7.10a 1. eksen 5° döndürüldüğünde hedefi ve eksenin konumunu, Şekil 7.10b hatayı, Şekil 7.10c kontrol işaretini, Şekil 7.10d kayma işaretini, Şekil 7.10e bulanık mantık ile elde edilen kayma yüzeyi eğiminin, Şekil 7.10f ise eşdeğer kontrolü göstermektedir.

Şekil 7.11a 2. eksen 5° döndürüldüğünde hedefi ve eksenin konumunu, Şekil 7.11b hatayı, Şekil 7.11c kontrol işaretini göstermektedir.

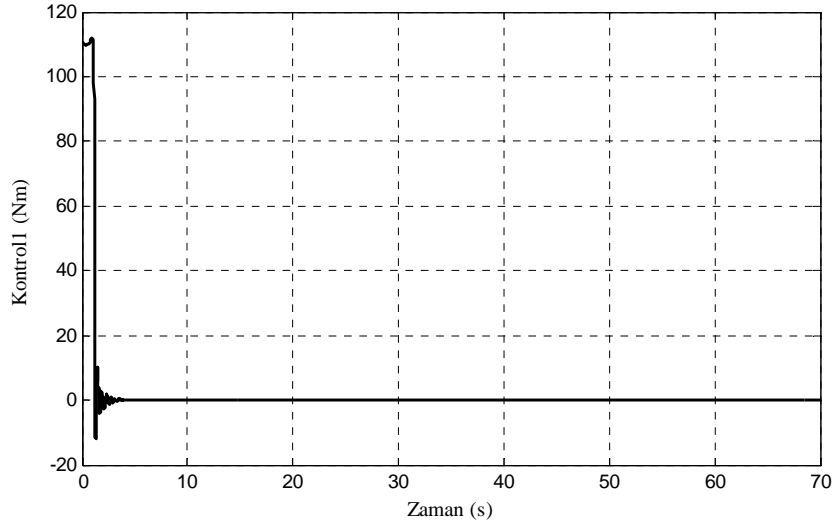
Şekil 7.12a'da 3. eksen 5° döndürüldüğünde hedef ve eksen konumu, Şekil 7.12b'de hata, Şekil 7.12c'de ise kontrol işareti sunulmuştur.



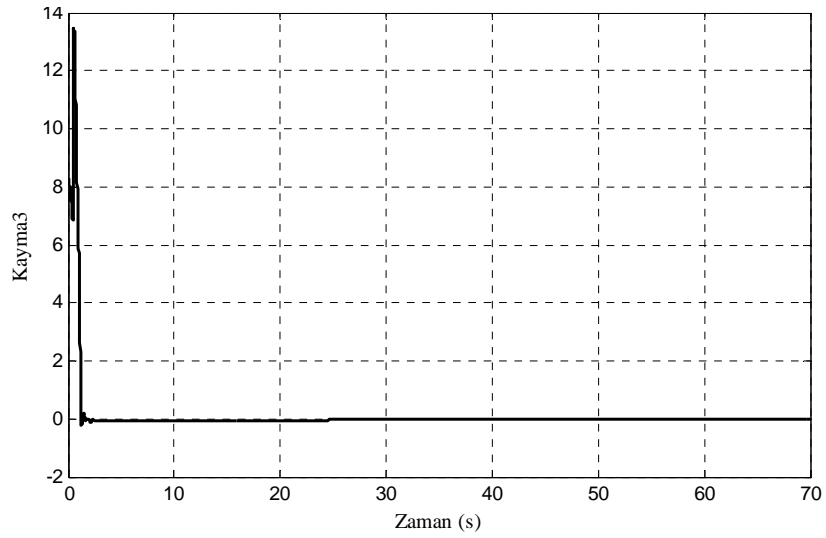
(a) 1. eksenin hedef ve gerçek konumları



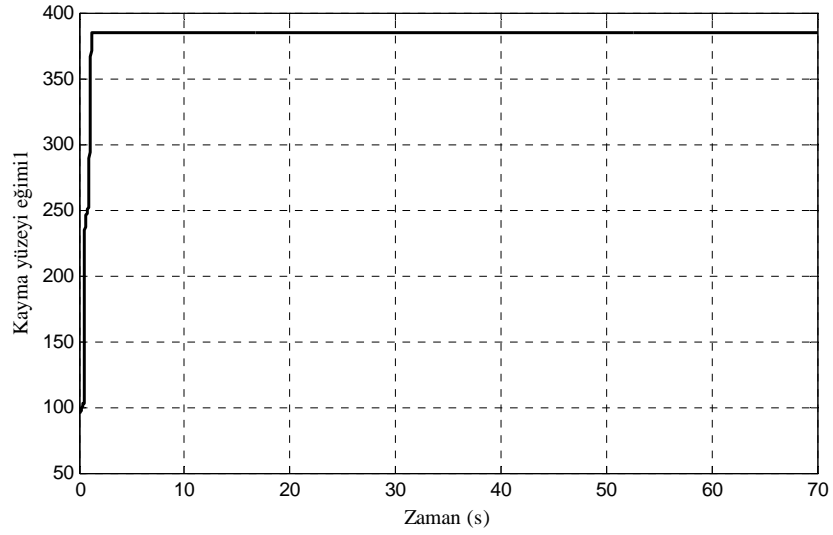
(b) 1. eksenin konum hatası



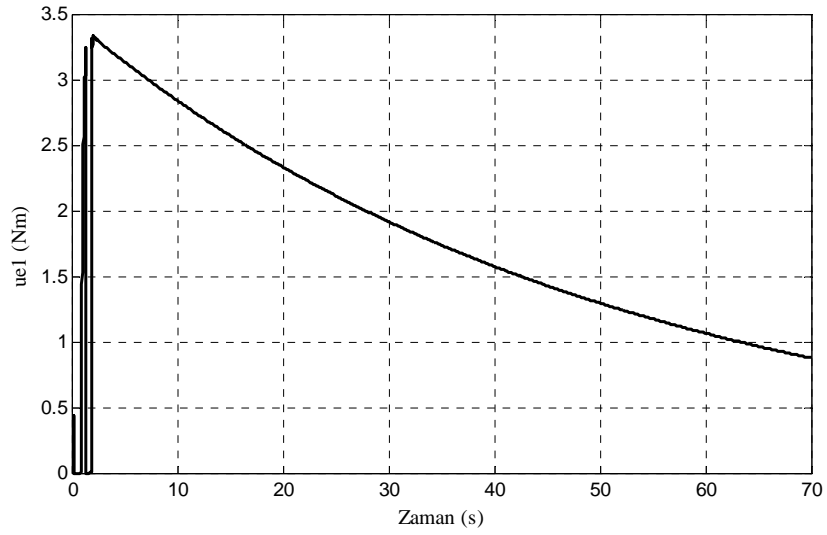
(c) 1. eksenin kontrol işareti



(d) 1. eksenin kayma işareti

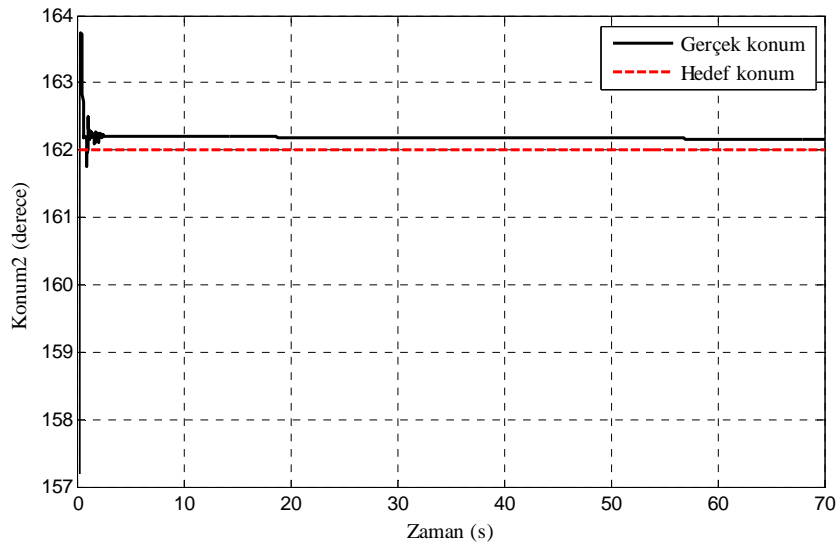


(e) 1. eksenin kayma yüzeyi eğimi

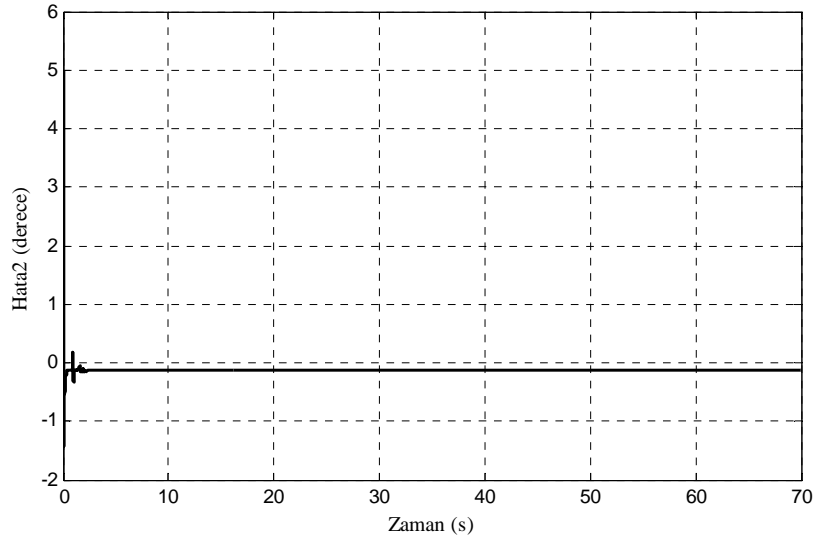


(f) 1. eksenin eşdeğer kontrolü

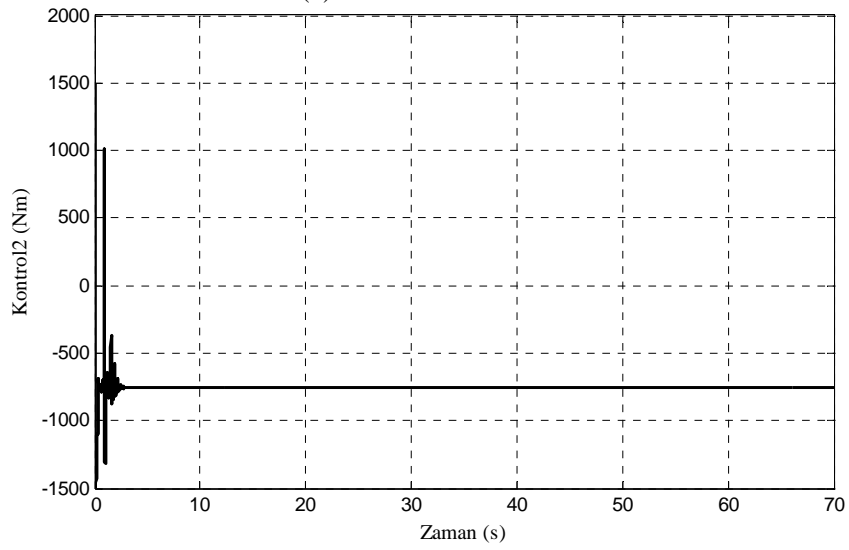
Şekil 7.10 Kayma yüzeyi eğiminin bulanık mantık ile ayarlanmasında 5° 'lik dönme durumunda 1. eksen için simülasyon sonuçları



(a) 2. eksenin hedef ve gerçek konumları

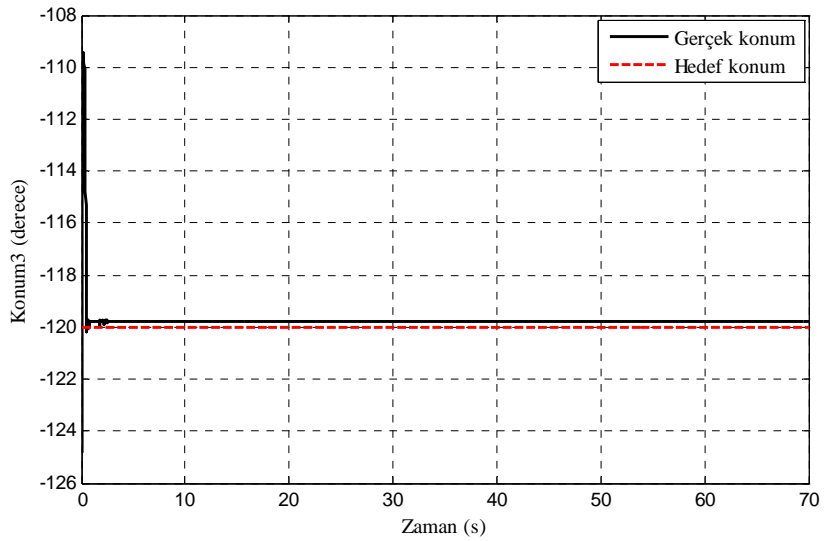


(b) 2. eksenin konum hatası

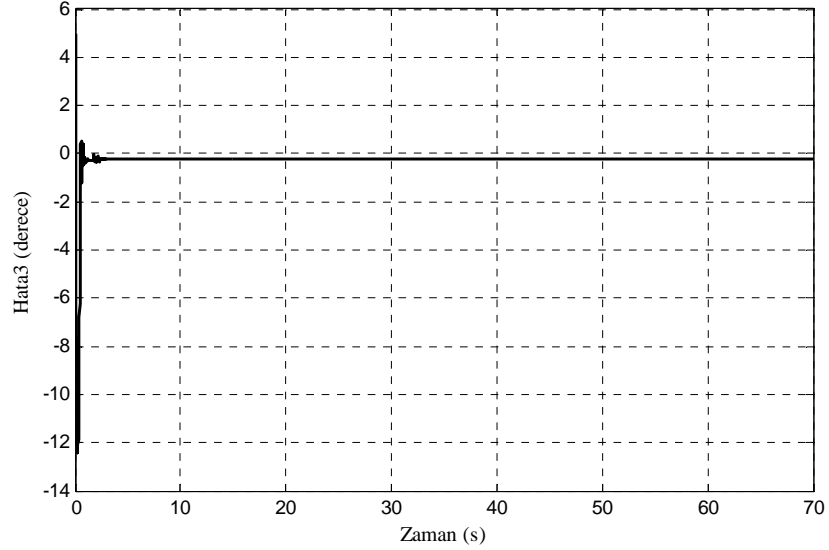


(c) 2. eksenin kontrol işareti

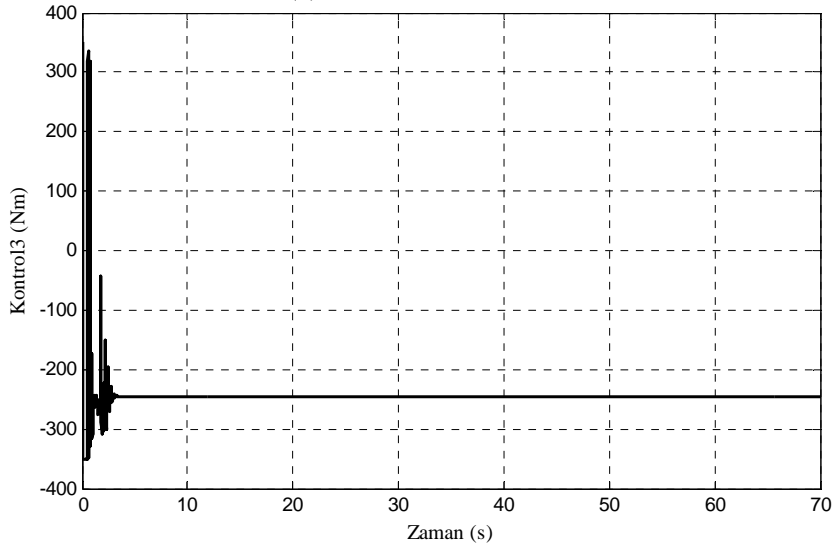
Şekil 7.11 Kayma yüzeyi eğiminin bulanık mantık ile ayarlanmasında 5° 'lik dönme durumunda 2. eksen için simülasyon sonuçları



(a) 3. eksenin hedef ve gerçek konumları



(b) 3. eksenin konum hatası



(c) 3. eksenin kontrol işareti

Şekil 7.12 Kayma yüzeyi eğiminin bulanık mantık ile ayarlanmasında 5° 'lik dönme durumunda 3. eksen için simülasyon sonuçları

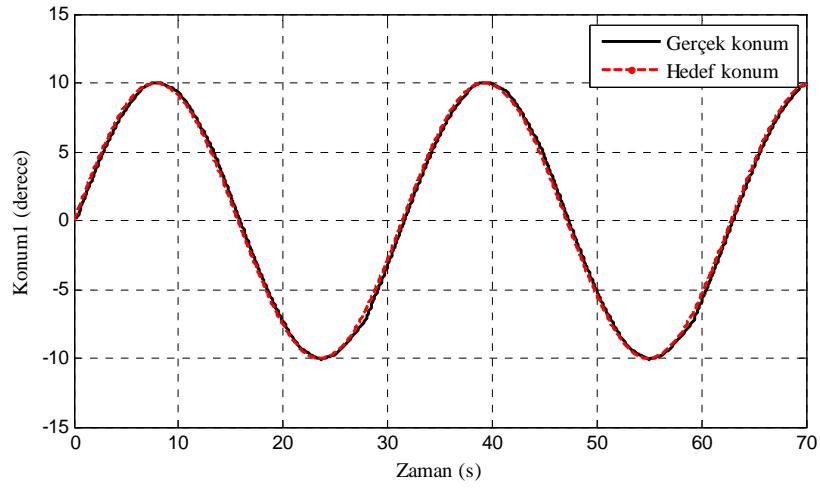
7.3.2.2 Simülasyon sonuçlarının yorumlanması

Şekil 7.10'den görüleceği gibi 1. eksen 1s 'de hedefe ulaşmaktadır. Kontrol işaretinde çattırdama yoktur. 2. eksen de 1s.'de yörüngeye oturmaktadır. Aşma miktarının daha fazla olduğu görülmektedir (Şekil 7.11). En yüksek aşma 3. eksende görülmektedir. 1. saniyeden sonra yörüngeye oturmaktadır. (Şekil 7.12). 2 ve 3. eksenlerde çok kısa süreli çattırdama görüntüsü vardır. Ancak grafiklerdeki çattırdama görüntüsü aslında simülasyon süresinin oldukça uzun tutulmasından ve grafiklerin küçük görüntüsünden kaynaklıdır. 1. eksende yokken, 2. ekseninde 0.4° 'lik ve 3. ekseninde 0.2° 'lik sürekli durum hatası kalmaktadır. 2 ve 3.

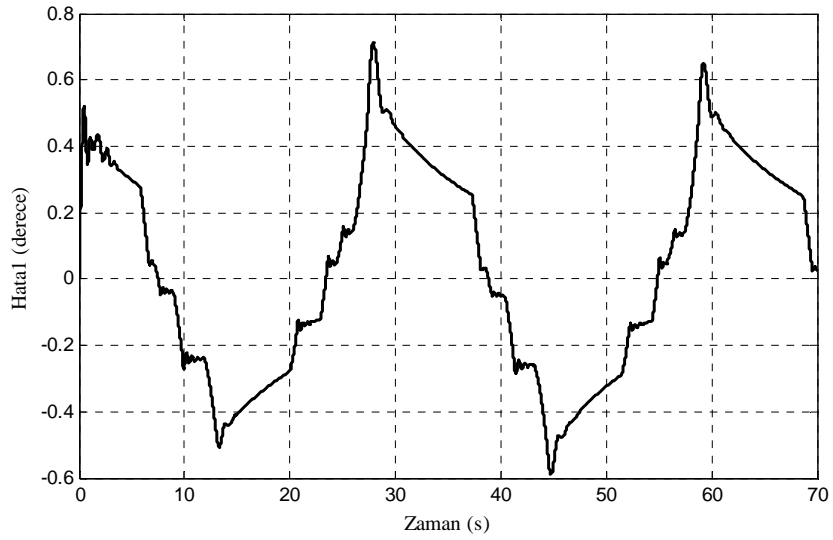
eksende 1. eksene göre hata oranlarının yüksek olması bu eksenlerde yerçekimi etkilerinin olmasıdır.

7.3.2.3 Sinüzoidal yörünge takibi için simülasyon sonuçları

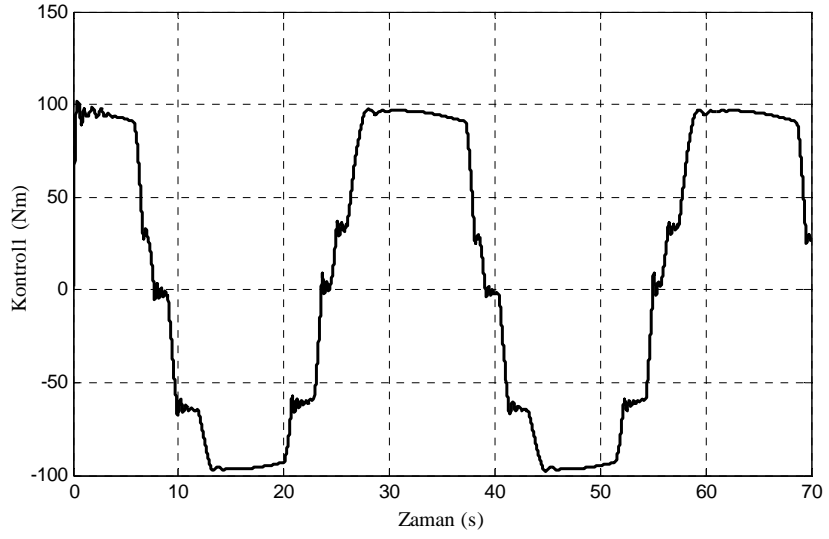
Şekil 7.13a 1. eksen $10\sin(0.2t)$ (derece) sinüs işareti izlettirildiğinde hedefi ve eksenin konumlarını, Şekil 7.13b hatayı, Şekil 7.13c kontrol işaretini, Şekil 7.13d kayma işaretini, Şekil 7.13e bulanık mantık ile hesaplanan kayma yüzeyi eğimini, Şekil 7.13f ise eşdeğer kontrolü göstermektedir.



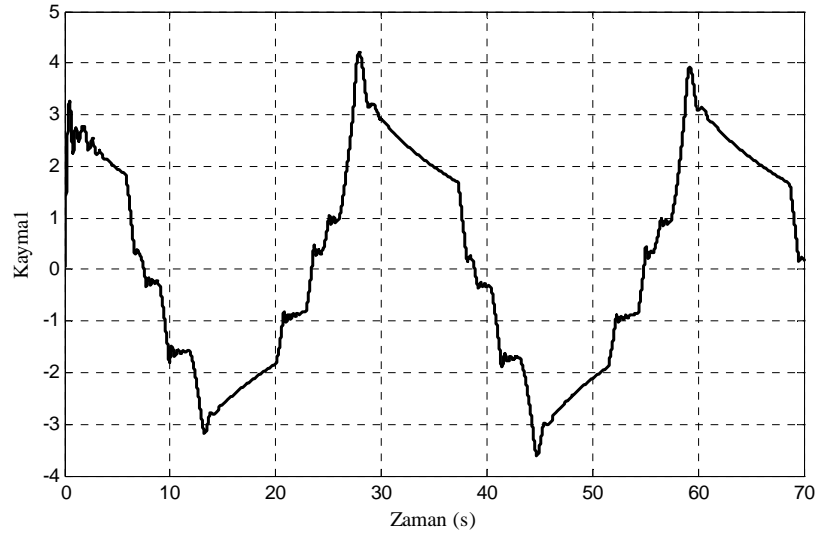
(a) 1. eksenin hedef ve gerçek konumları



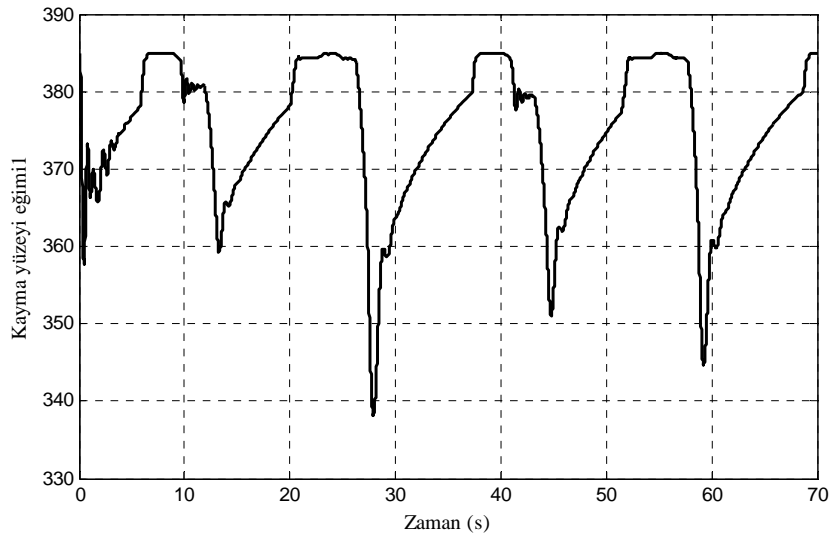
(b) 1. eksenin konum hatası



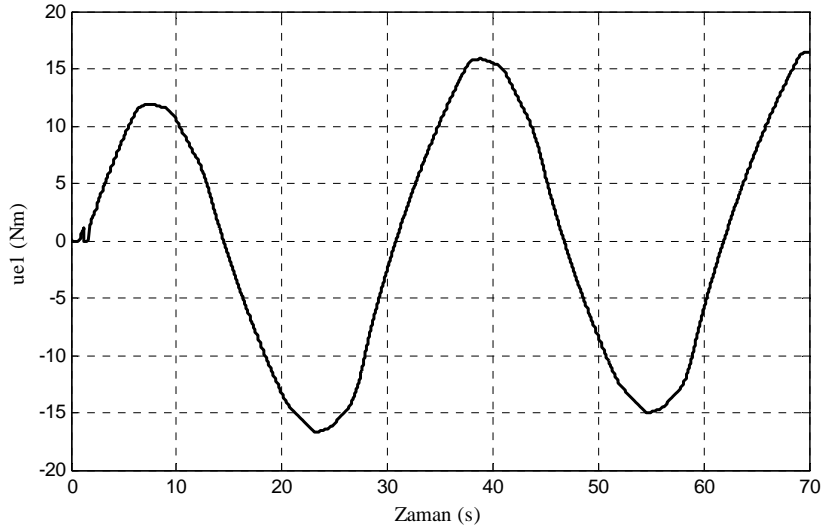
(d) 1. eksenin kayma işareti



(c) 1. eksenin kontrol işareti



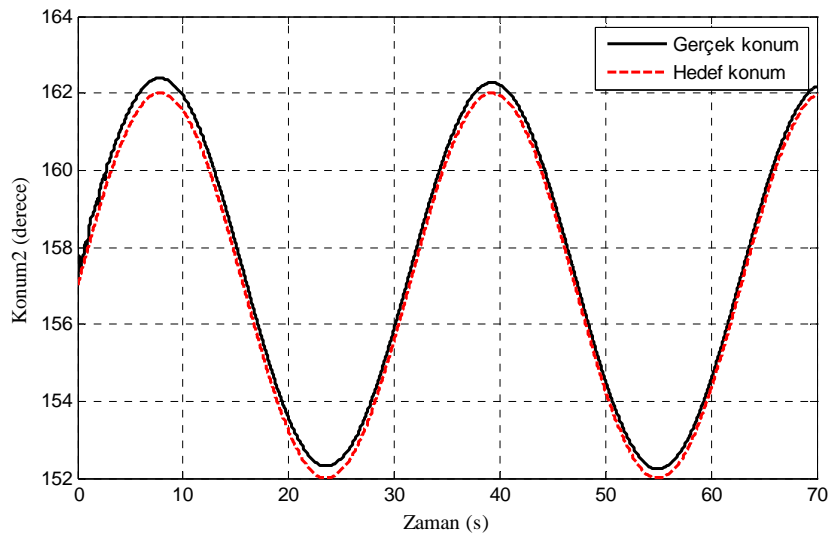
(e) 1. eksenin kayma yüzeyi eğimi



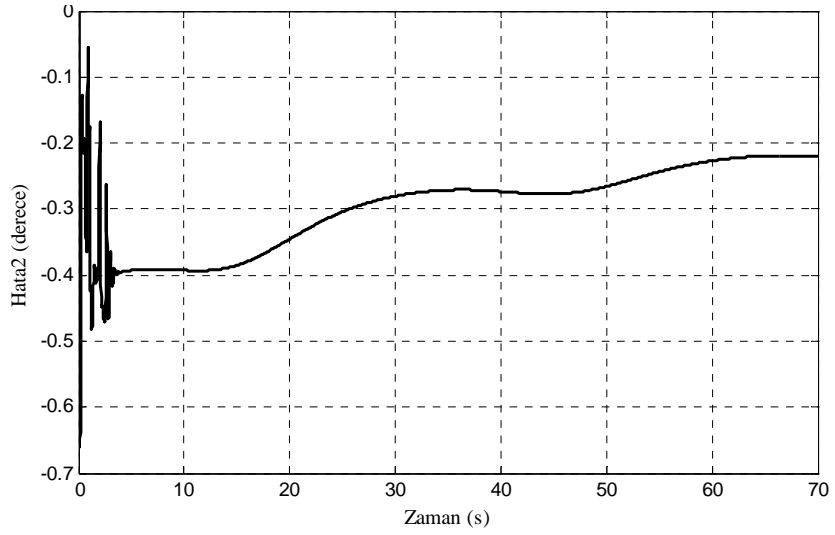
(f) 1. eksen için eşdeğer kontrolü

Şekil 7.13 Kayma yüzeyi eğiminin bulanık mantık ile ayarlanmasında sinüzoidal yörünge takibinde 1. eksen için simülasyon sonuçları

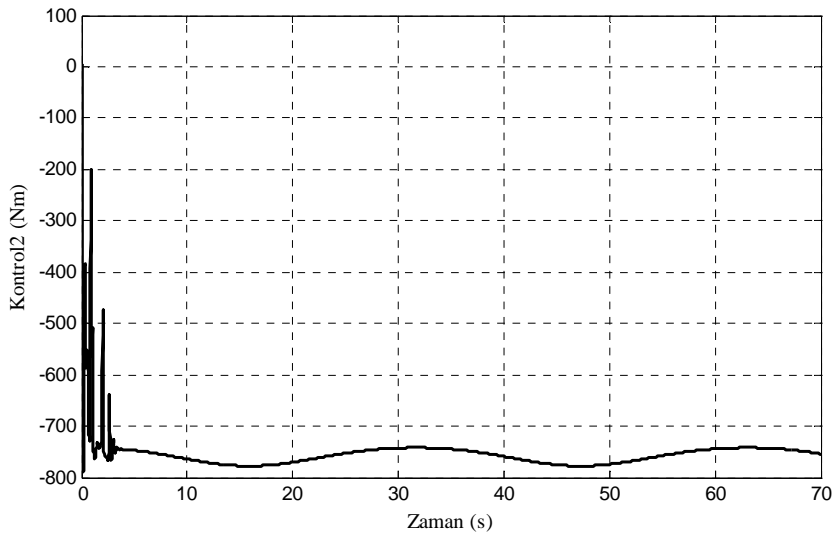
Şekil 7.14a 2. eksen $5 \sin(0.2t)$ (derece) sinüs işaretini izlettirildiğinde hedefi ve eksenin konumları, Şekil 7.14b hatayı, Şekil 7.14c kontrol işaretini göstermektedir. Şekil 7.15'de 3. eksen $5 \sin(0.2t)$ (derece) sinüs işaretini izlettirildiğinde hedef ve eksenin konumu, Şekil 7.15b'de hata, Şekil 7.15c'de kontrol işaretini verilmiştir.



(a) 2. eksenin hedef ve gerçek konumları

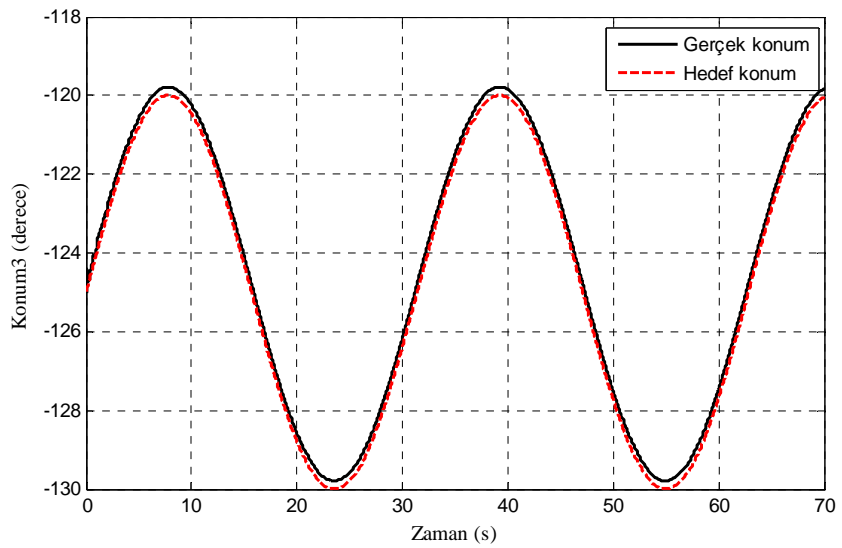


(b) 2. eksenin konum hatası

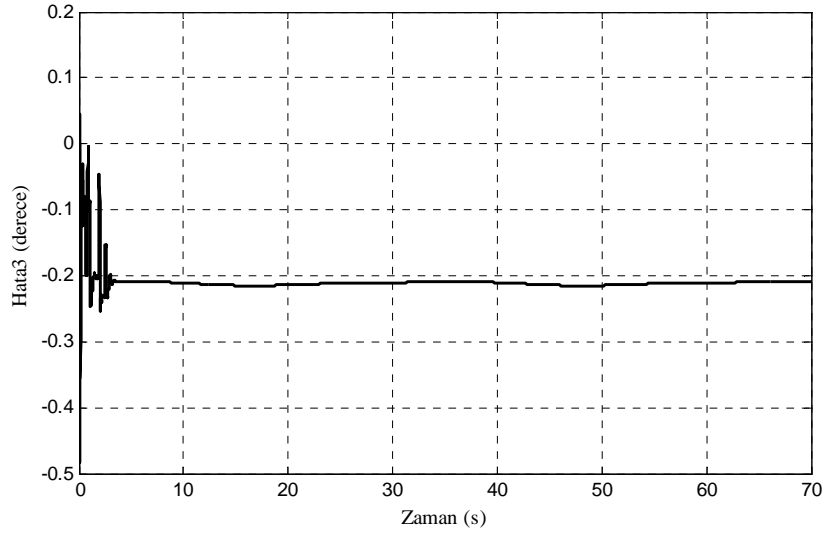


(c) 2. eksenin kontrol işareti

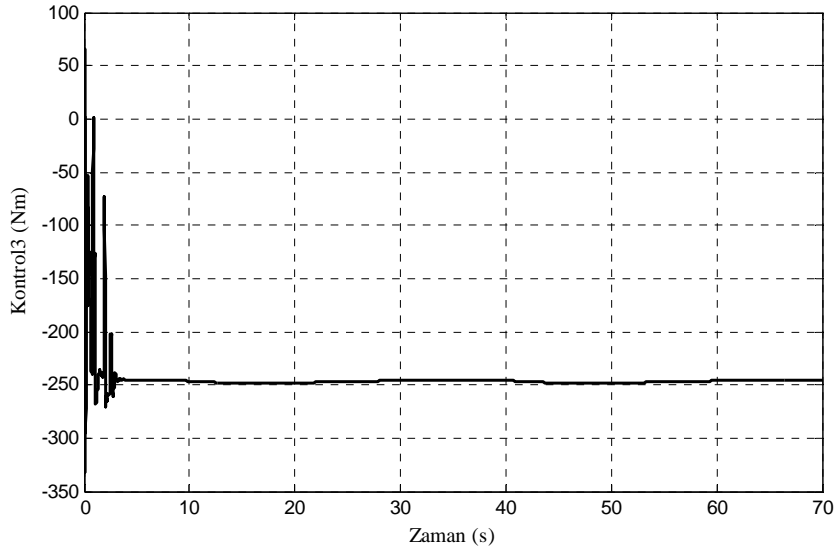
Şekil 7.14 Kayma yüzeyi eğiminin bulanık mantık ile ayarlanmasında sinüzoidal yörünge takibinde 2. eksen için simülasyon sonuçları



(a) 3. eksenin hedef ve gerçek konumları



(b) 3. eksenin konum hatası



(c) 3. eksenin kontrol işareti

Şekil 7.15 Kayma yüzeyi eğiminin bulanık mantık ile ayarlanmasında sinüzoidal yörünge takibinde 3. eksen için simülasyon sonuçları

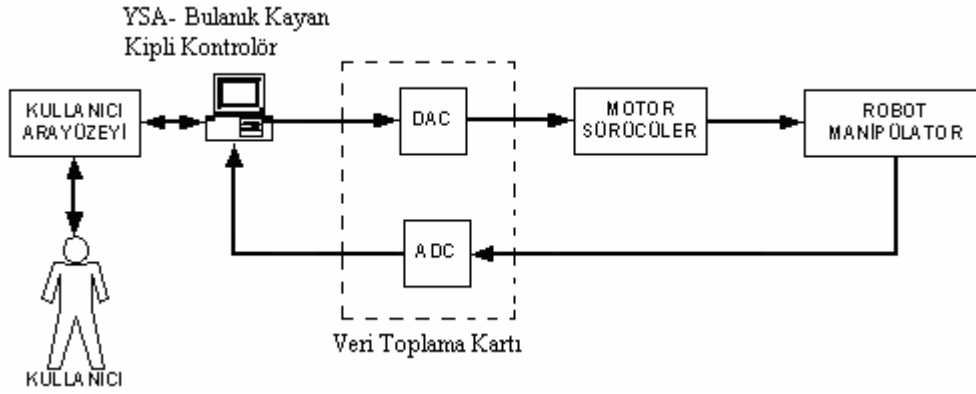
7.3.2.4 Simülasyon sonuçlarının yorumlanması

Şekil 7.13'den görüleceği gibi 1. eksen istenen yörüngeye çok kısa sürede oturmaktadır. Çok az miktarda çatırdamalar söz konusudur. 2. eksen için sonuçların verildiği Şekil 7.14 ve 7.15 incelendiğinde ise bu iki eksenin de hedef yörüngeye hemen ulaştığı gözlenmektedir. Kontrol işaretlerinde kısa süreli bir çatırdama görüntüsü vardır. Hata oranları sinüslerin minimum ve maksimum geçişlerinde en yüksek düzeye ulaşmaktadır.

8. KONTROL SİSTEMİ

Hedeflenen kontrol yöntemlerinin robot üzerinde denenebilmesi için Manutec-r15' in çalışmayan kontrol ünitesi ve sürücü sistemi devre dışı bırakılmıştır. Servo motorların akımları, encoder tipleri belirlenerek motorları çalıştıracak bir trafo imal ettirilmiş, yeni bir sürücü sistemi ve kontrol ünitesi hazırlanmıştır. Robottaki servo motorların özelliklerine dair bilgi pek fazla bilgi bulunmadığından Manutec ve Danaher firmaları ile iletişim kurularak servo motorların uygun şekilde çalıştırabilmesi için motorlar hakkında gerekli bilgilere ulaşılmıştır.

Çeşitli denemelerden sonra sürücü değerlerinin uygun olarak ayarlanmış ve motorlar çalışır hale getirilmiştir. Motorların çalışır hale gelmesinin ardından veri toplama kartı (Q8 DAQ kart) aracılığıyla kontrol ünitesinin sürücülerle entegrasyon çalışmaları tamamlanmıştır. Sistemin blok diyagramı Şekil 8.1' de gösterilmiştir:

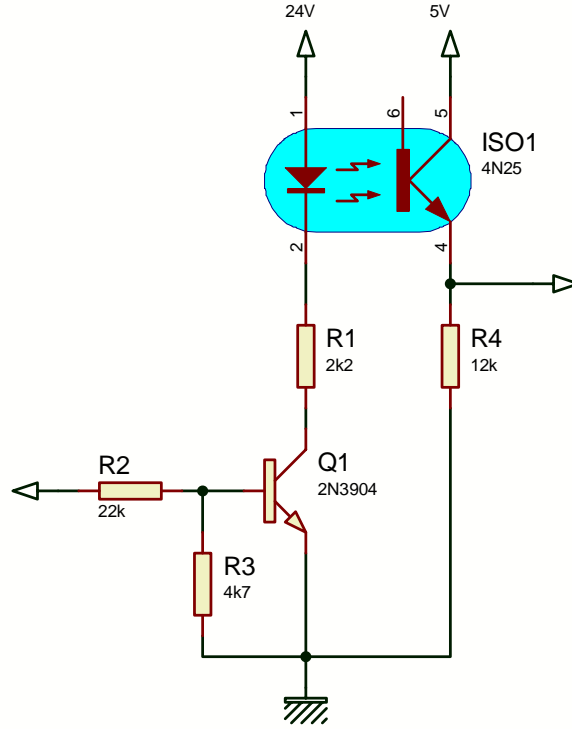


Şekil 8.1 Sistemin blok diyagramı

Dijital giriş-çıkışların izole edilmesi amacıyla her bir eksen için Şekil 8.2'de verilen devre tasarlanmıştır. Sistemleri birbirine bağlayan kabloların uzunluğundan dolayı meydana gelen yanlış ölçümleri elimine etmek için dirençlerden basit filtreler yerleştirilmiştir. Sistem çalışır hale getirildikten sonra encoder bilgileri incelenmiş, açısal değerlere karşılık gelecek şekilde belirlenmiştir. Robot artımlı (incremental) encoderlara sahiptir. Yani enerjilendikleri anda buldukları konumu 0 kabul etmekte ve ona göre işlem yapmaktadırlar. Her bir eksenin çözünürlüğü şöyledir: 1.eksen: 600, 2.eksen: 1200, 3.eksen: 600, 4.eksen: 360, 5.eksen: 320, 6.eksen: 500.

Sistemde kullanılan bilgisayar Pentium 4, CPU 3.2 GHz'dir ve 512 MB RAM'e sahiptir.

Kodlayıcıların doğru okuyup okumadığı test etmek amacıyla her eksene sinüs işareti uygulanmıştır. Pozisyon sonunda hep aynı noktada durup durmadığı incelenmiştir.



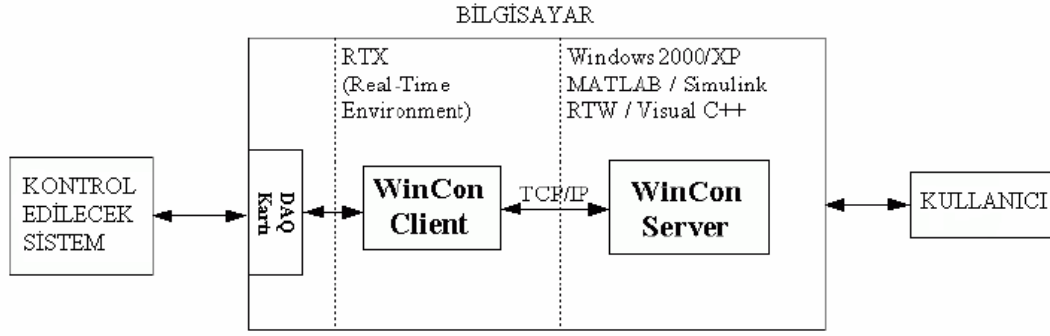
Şekil 8.2 İzolasyon devresi

8.1 Veri Toplama Kartı

Sistemdeki analog ve dijital bilgilerin değerlendirilmesi ve uygun işaretlere dönüştürülmesi için kontrolör ile sürücüler arasında bir veri toplama kartı (Data Acquisition Card- DAQ Card) kullanılmıştır. Bu kart 16 Bits, 299kS/s, 8 Dijital I/O, 2 Analog Çıkış 2,24 bit counter/timers' a sahiptir.

Modellenen kontrol yöntemleri veri toplama kartından elde edilen bilgiler ile Matlab Simülink ortamında Wincon yazılımı üzerinden robotu kontrol etmek için kullanılmıştır.

Wincon gerçek zamanlı Windows 2000/XP uygulamasıdır. Çalışılan bilgisayar veya uzaktaki bir bilgisayar da gerçek zamanda bir Simulink diyagramından üretilen kodu çalıştırmayı sağlar. Gerçek zamanlı çalışan koddan veriler on-line olarak Wincon Scopelarında çizdirilebilir ve model parametreleri Simulinkte yapılabildiği gibi Wincon kontrol paneli üzerinden de değiştirilebilir. Otomatik olarak üretilen gerçek zamanlı Simulinkten bağımsız kod kontrolör oluşturur. Wincon'un tek bir bilgisayar üzerinde çalışma yapısı Şekil 8.3' de gösterilmiştir (Wincon 5.0 User Guide, 2005).



Şekil 8.3 Wincon uygulamasının yapısı

Wincon'un grafiksel kullanıcı arayüzü Şekil 8.4' de verilmiştir:



Şekil 8.4 Wincon kullanıcı arayüzü

8.2 Robot Manipulator

Deneylerde kullanılacak robot Manutec-r15 Şekil 8.5' de gösterilmiştir.

8.3 Motor Sürücüleri

Manutec-r15'in bütün motorları fırçasız üç-fazlı senkron servo sürücülere sahiptir. Özellikleri Çizelge 8.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 8.1 Manutec-r15 motor özellikleri

EKSEN	1	2	3	4	5	6
Tork (Nm)	4.5	4.5	4.5	1.5	0.7	0.3
Maksimum Tork (Nm)	9	9	9	3.2	1.45	0.5
Rpm (1/dak)	3000	3000	3000	3200	3200	3500
Akım (A)	25	25	25	8	4.5	2.1
Gerilim (V)	240	240	240	240	240	240

Danaher Motion servo motor sürücüler kullanılmıştır.



Şekil 8.5 Deneylerde kullanılan Manutec-r15

Sürücü ünitesinin resmi Şekil 8.6 'de verilmiştir. Servo sürücülerin dahili parametreleri (akım, gerilim) robot koluna uygun olarak ayarlanmıştır. Servo sürücülerin pozisyon, hız ve tork modları denenmiş ve bizim çalışmalarımıza daha uygun olacağı düşünülen tork modu tercih edilmiştir. Tork modunda sürücü sisteminin kontrol üzerinde herhangi bir etkisi yoktur.



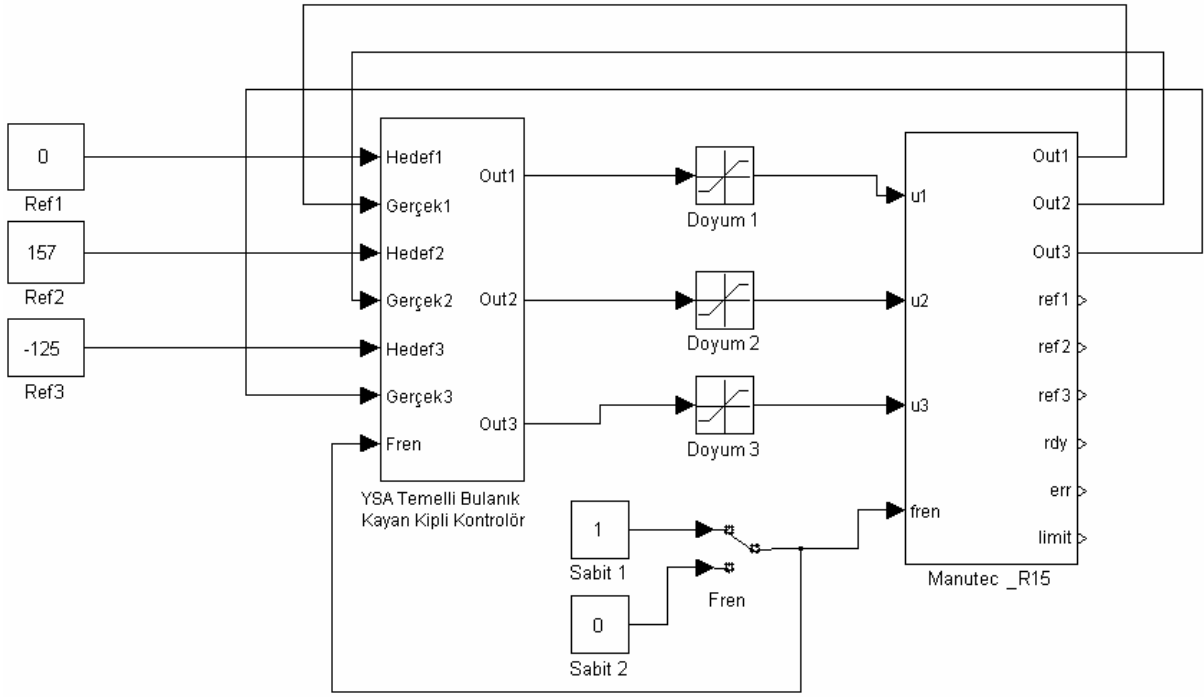
Şekil 8.6 Sürücü sistemi

8.4 Temel Kontrol Yapısı

Kontrol sistemlerini robot üzerinde deneyebilmek için Simulink’de hazırlanan kontrol sistemi Şekil 8.7’ deki gibidir.

Şekil 8.7’ den de görüldüğü gibi 1. eksen için referans değer 0, 2. eksen için 157 ve 3. eksen için ise -125° dir.

Yazılım ile robotu durdurabilmek amacıyla fren için bir anahtar bulunmaktadır. Anahtar “1” konumundayken robot hareket etmemekte, “0” konumundayken robot hareket etmektedir.

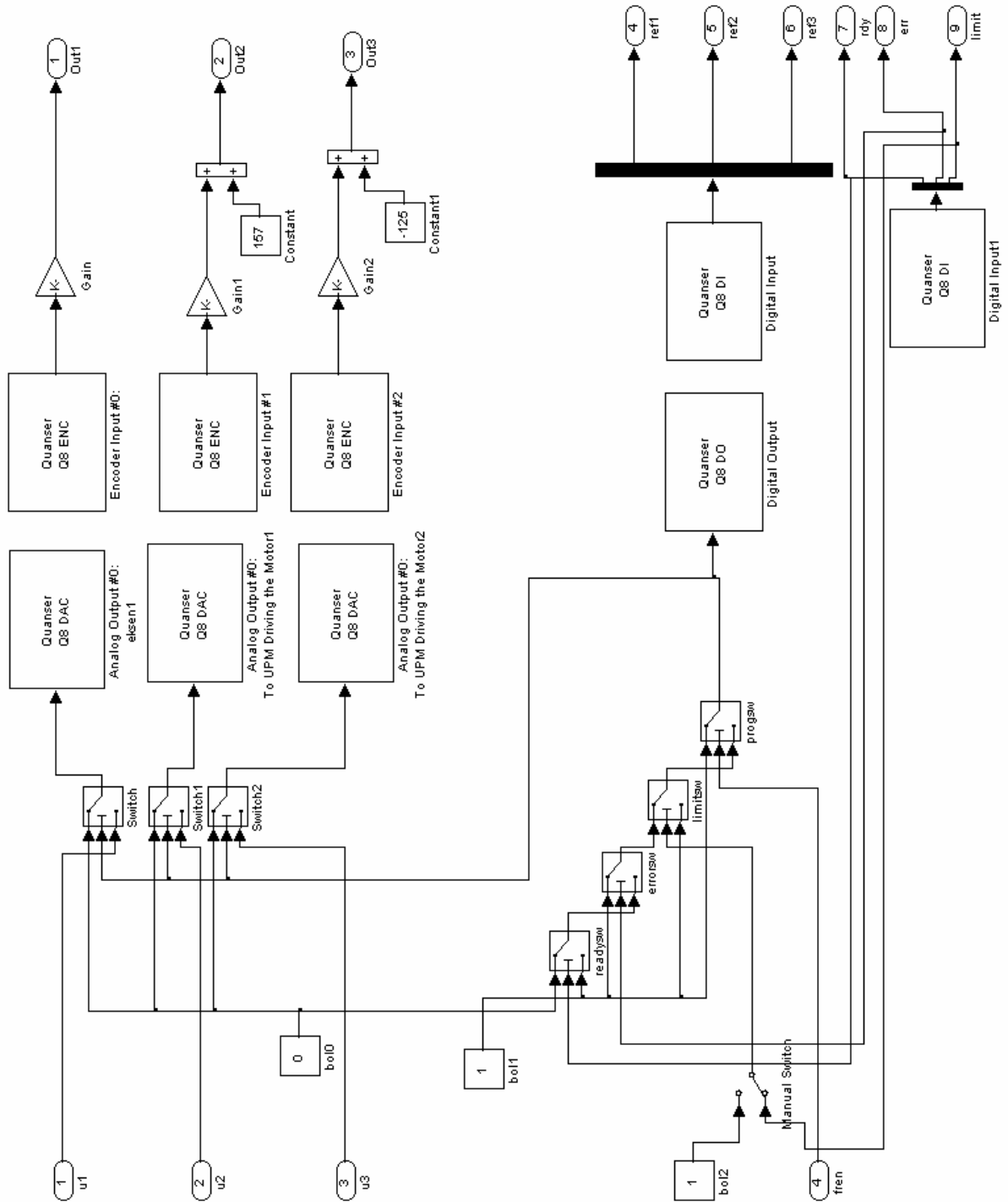


Şekil 8.7 Kontrol sistemi

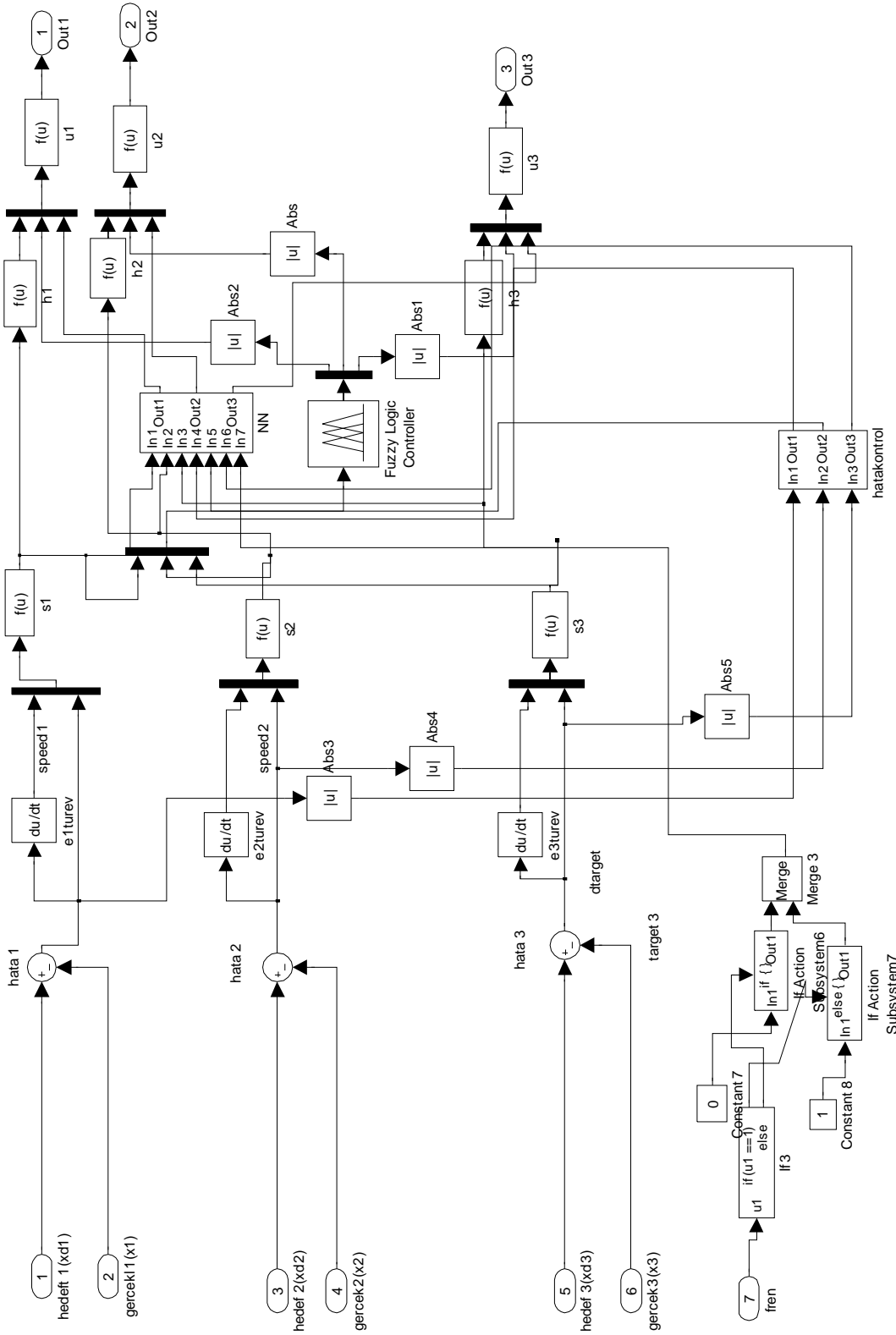
Manutec-r15 bloğunun iç yapısı Şekil 8.8' de gösterilmiştir.

YSA Temelli Bulanık Kayan Kipli Kontrolör bloğunun iç yapısı Şekil 8.9' da verilmiştir. YSA Temelli Bulanık Kayan Kipli Kontrolörün girişleri hedeflenen konumlar, robotun o an ki konumları ve fren bilgisidir. Çıkışları kontrol sisteminin beklenenden yüksek çıkışlar vermesi durumunda robotun ani hareketler yapmasını önlemek amacıyla doyum fonksiyonlarından geçirilerek robota uygulanmaktadır.

Sürücü hazır sinyali alındıktan (hata yoksa), robot eksenleri limit anahtarlarında değilse ve program çalışıyorsa fren kaldırılabilir.



Şekil 8.8 Manutec-r15 bloğu



Şekil 8.9 YSA Temelli Bulanık Kayan Kipli Kontrolör bloğu

9. DENEY SONUÇLARI

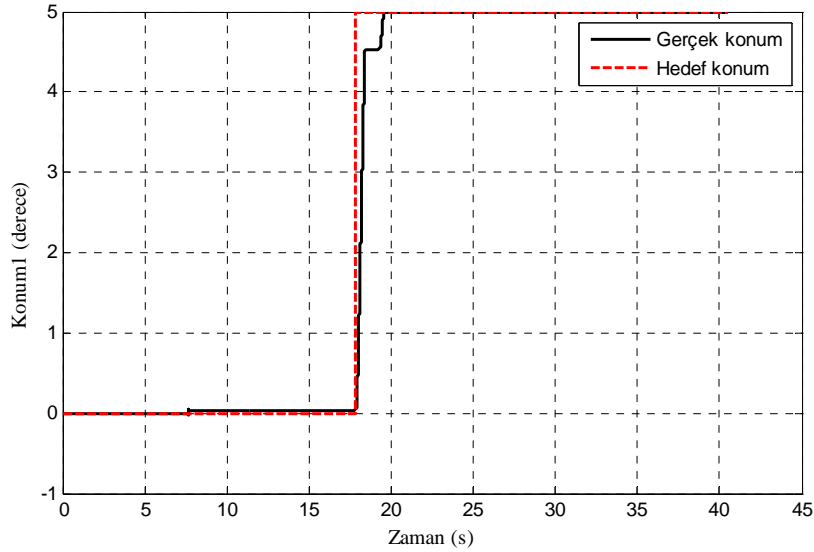
Deneyleer iki farklı durum için yapılmıştır. İlk durumda eksenler 5° döndürülmüştür. İkinci durumda ise taban eksen genliği 10, frekansı 0.2rad/sn olan diğer eksenler ise genliği 5 frekansı yine 0.2rad/sn olan bir sinüs işareti izlettirilmiştir.

Sonuçlar incelenirken eklemlerin çevrim oranları göz önüne alınmalıdır. 1. eklemin çevrim oranı 90, 2. eklemin 180, 3. eklemin ise yine 90'dır.

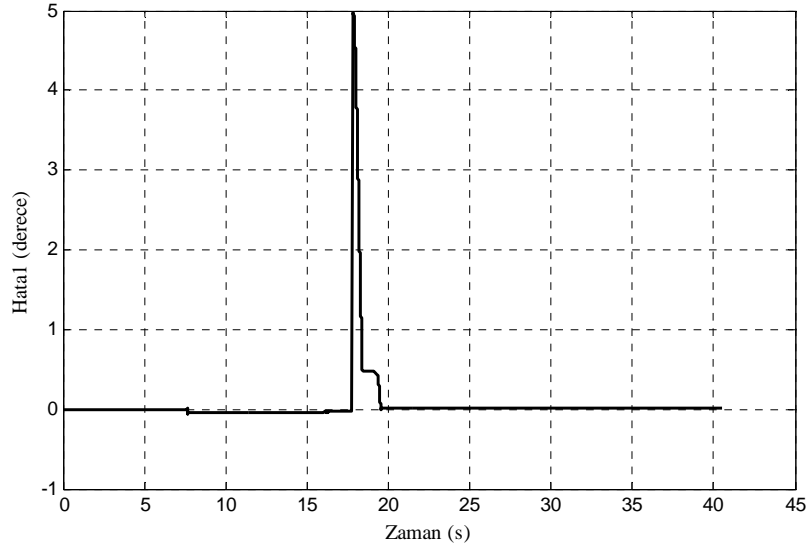
9.1 Düzeltici Kontrol Kazancının Bulanık Adaptasyon ile Ayarlanması Durumunda Deneyleer Sonuçları

9.1.1 Eksenler 5° döndürüldüğünde deneyleer sonuçları

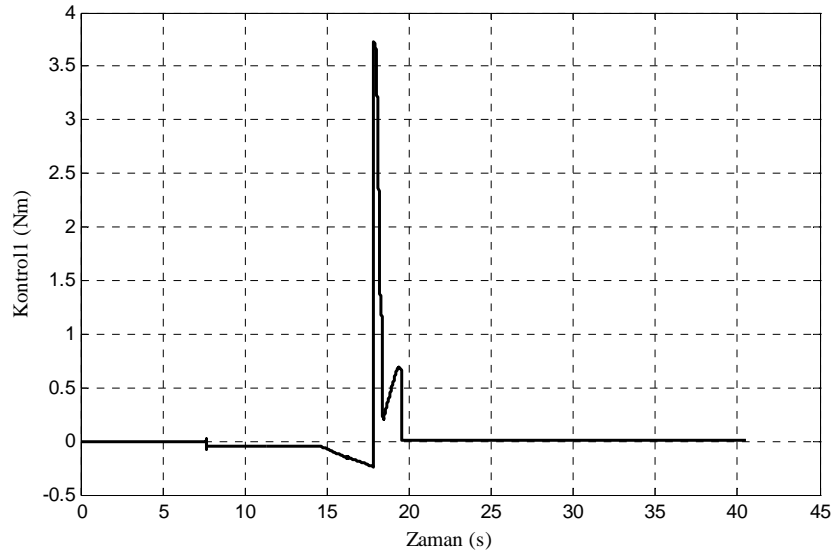
Şekil 9.1a 1. eksen 5° döndürüldüğünde hedefi ve eksenin konumunu, Şekil 9.1b hatayı, Şekil 9.1c kontrol işaretini, Şekil 9.1d kayma işaretini, Şekil 9.1e bulanık mantık ile elde edilen düzeltici kontrol kazancını Şekil 9.1f ise eşdeğer kontrolü göstermektedir.



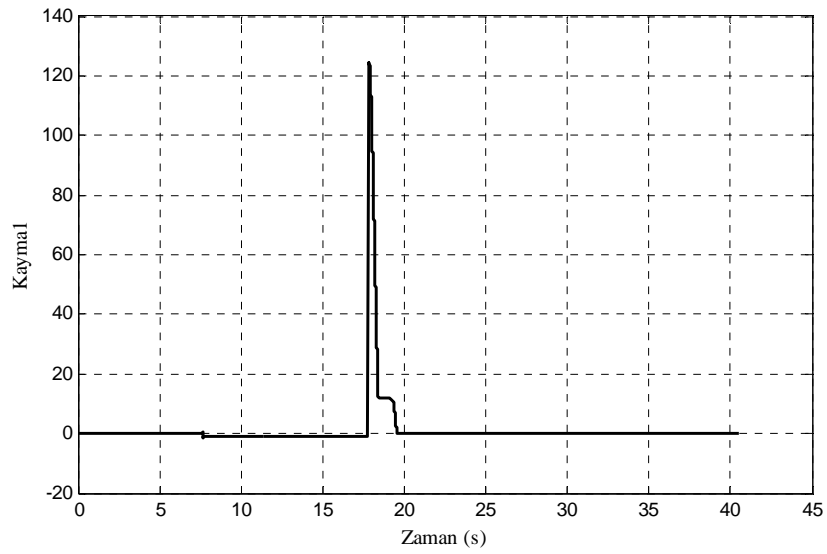
(a) 1. eksenin hedef ve gerçek konumu



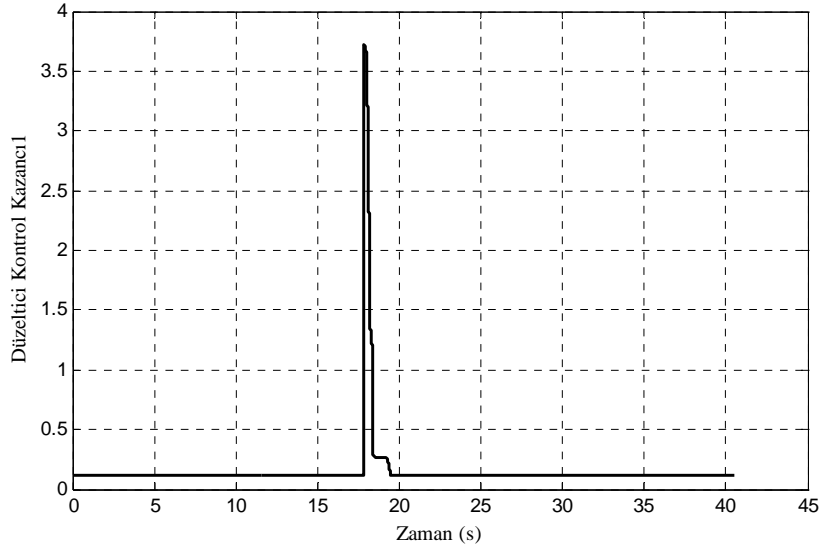
(b) 1. eksenin konum hatası



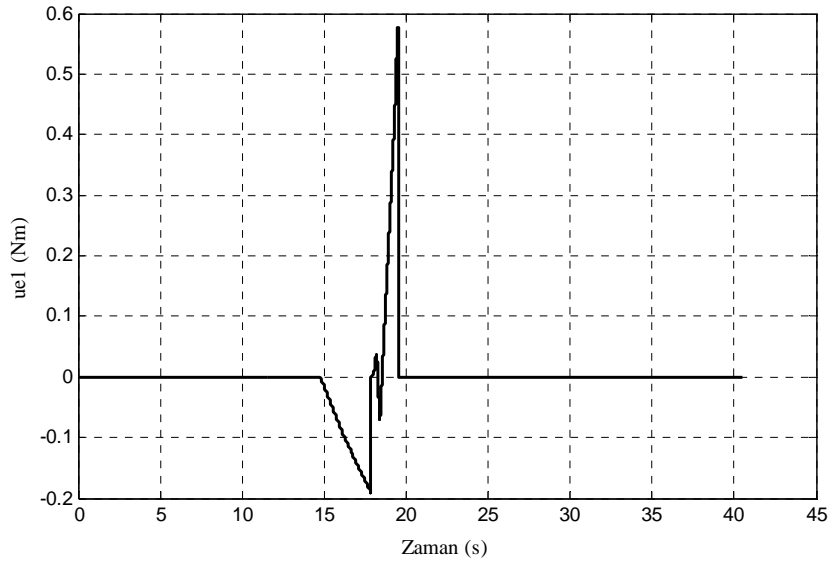
(c) 1. eksenin kontrol işareti



(d) 1. eksenin kayma işareti



(e) 1. eksen düzeltilici kontrol kazancı

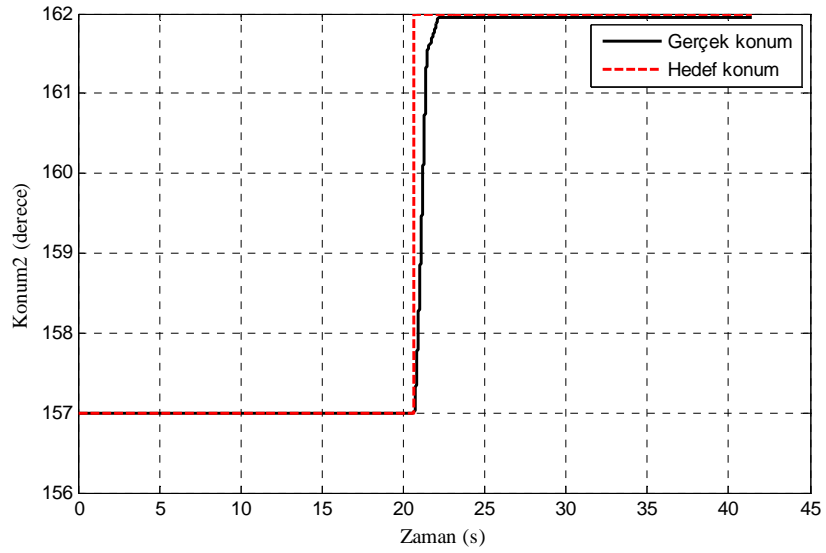


(f) 1. eksen eşdeğer kontrolü

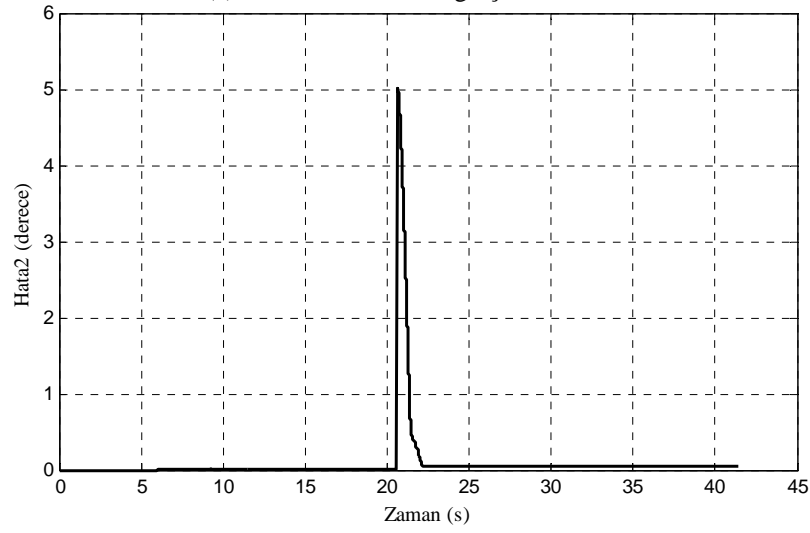
Şekil 9.1 Düzeltilici kontrol kazancının bulanık adaptasyon ile ayarlanmasında 5° 'lik dönme durumunda 1. eksen için deney sonuçları

Şekil 9.2a 2. eksen 5° döndürüldüğünde hedefi ve eksenin konumunu, Şekil 9.2b hatayı, Şekil 9.2c kontrol işaretini göstermektedir.

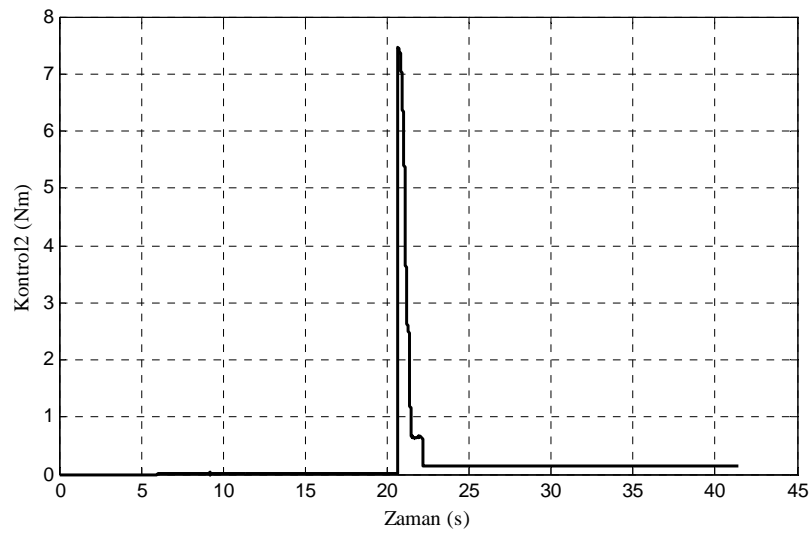
Şekil 9.3a'da 3. eksen 5° döndürüldüğünde hedef ve eksen konumu, Şekil 9.3b'de hata, Şekil 9.3c'de kontrol işareti verilmiştir.



(a) 2. eksenin hedef ve gerçek konumu

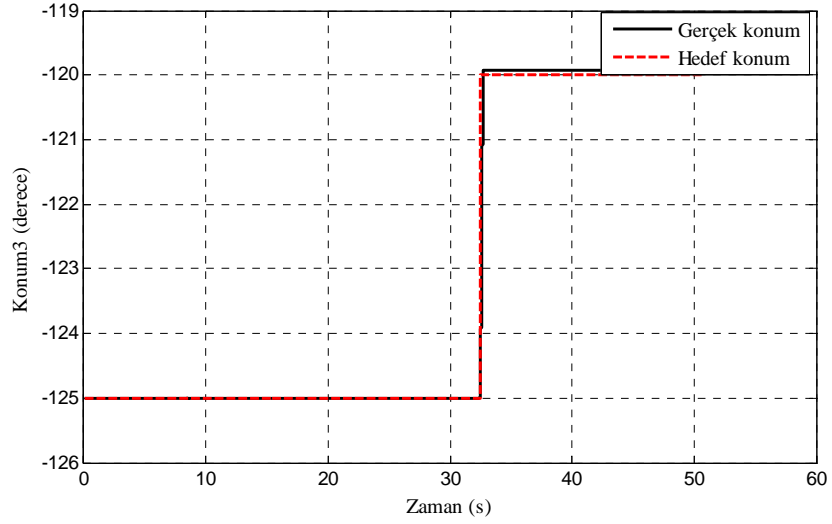


(b) 2. eksenin konum hatası

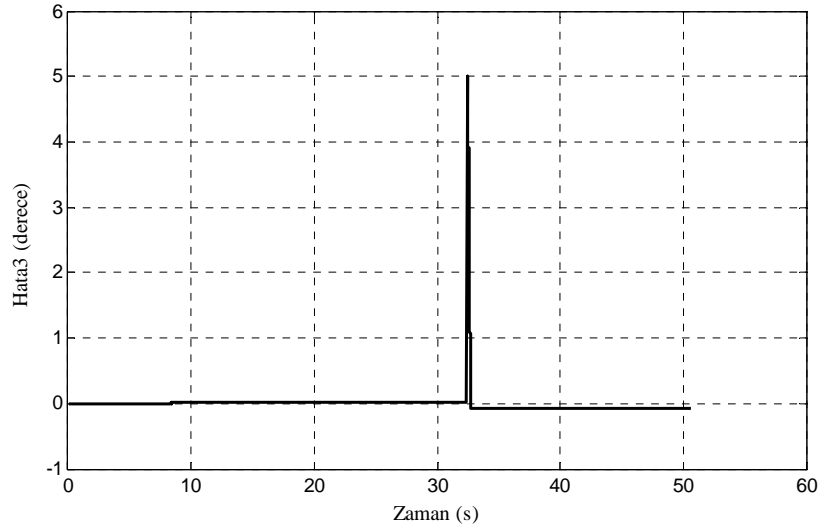


(c) 2. eksenin kontrol işareti

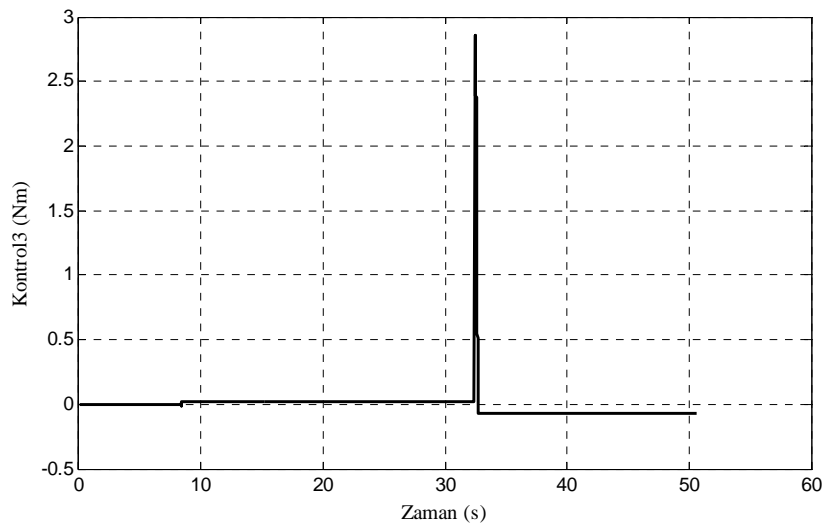
Şekil 9.2 Düzeltici kontrol kazancının bulanık adaptasyon ile ayarlanmasında 5° 'lik dönme durumunda 2. eksen için deney sonuçları



(a) 3. eksenin hedef ve gerçek konumu



(b) 3. eksenin konum hatası



(c) 3. eksenin kontrol işareti

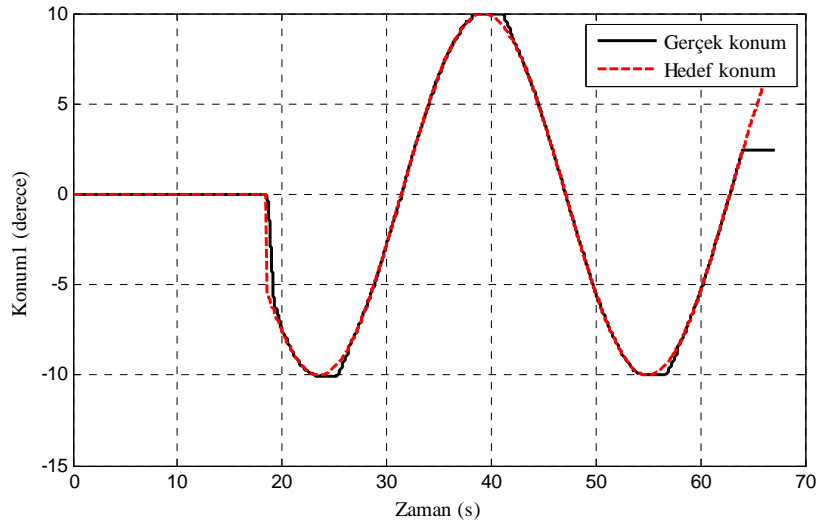
Şekil 9.3 Düzeltici kontrol kazancının bulanık adaptasyon ile ayarlanmasında 5° 'lik dönme durumunda 3. eksen için deney sonuçları

9.1.2 Deney sonuçlarının yorumlanması

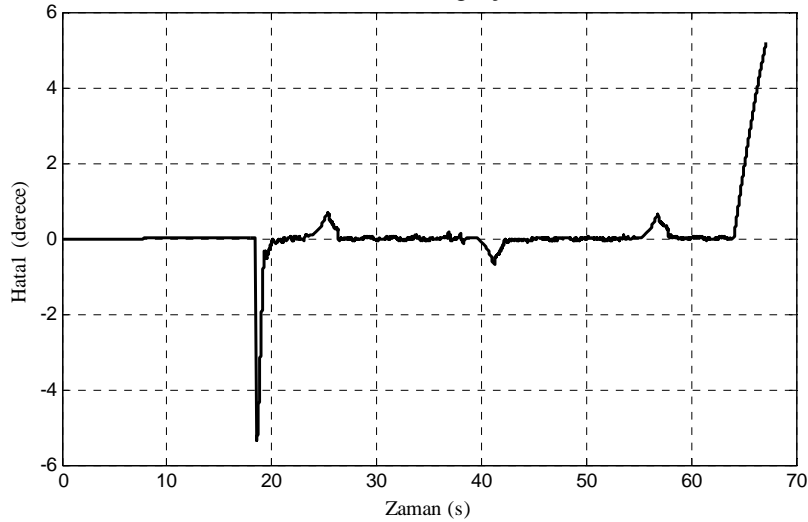
1. eksen için fren 7.6s.'de kaldırılmakta ve hedef 17.9s. de verilmektedir. 1. eksen 1.6s.'de hedefe ulaşmaktadır. 0.0085° lik sürekli durum hatası kalmaktadır. 2. eksen için fren 6s.'de kaldırılmakta ve hedef 20.67s. de verilmektedir. 2. eksen 1.53s.'de hedefe ulaşmaktadır. 0.04° lik sürekli durum hatası kalmaktadır. 3. eksen için ise fren 5s.'de kaldırılmakta ve hedef 19.72s. de verilmektedir. 3. eksen 0.28s.'de hedefe ulaşmaktadır. 0.057° lik sürekli durum hatası kalmaktadır. Kontrol işaretlerinde çatlama görülmemektedir.

9.1.3 Sinüoidal yörünge takibi için deney sonuçları

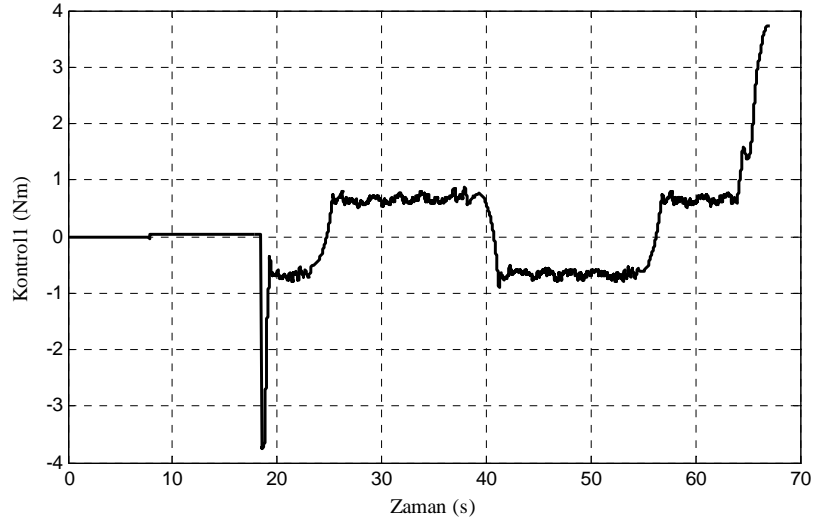
Şekil 9.4a 1. eksen genliği 10, frekansı 0.2rad/sn olan bir sinüs işareti izlettirildiğinde hedefi ve eksenin konumlarını, Şekil 9.4b hatayı, Şekil 9.4c kontrol işaretini, Şekil 9.4d kayma işaretini, Şekil 9.4e bulanık mantık ile elde edilen düzeltici kontrol kazancını, Şekil 9.4f ise eşdeğer kontrolü göstermektedir.



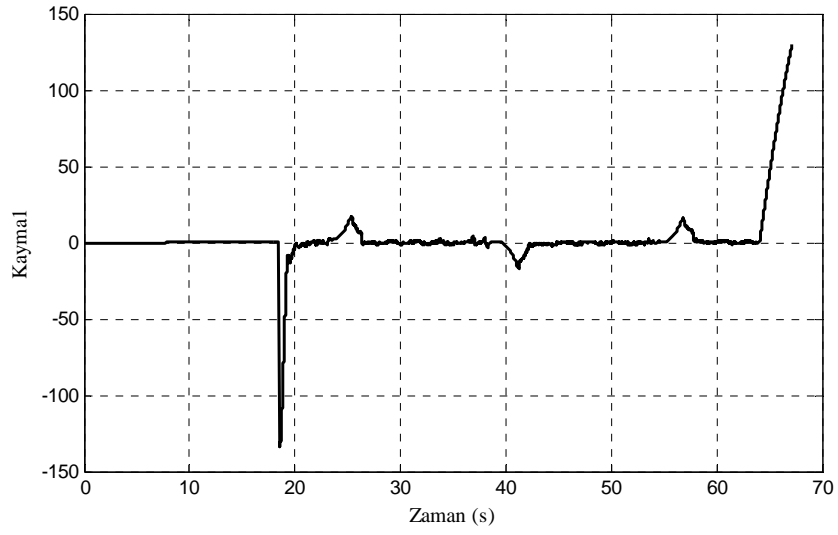
(a) 1. eksenin hedef ve gerçek konumu



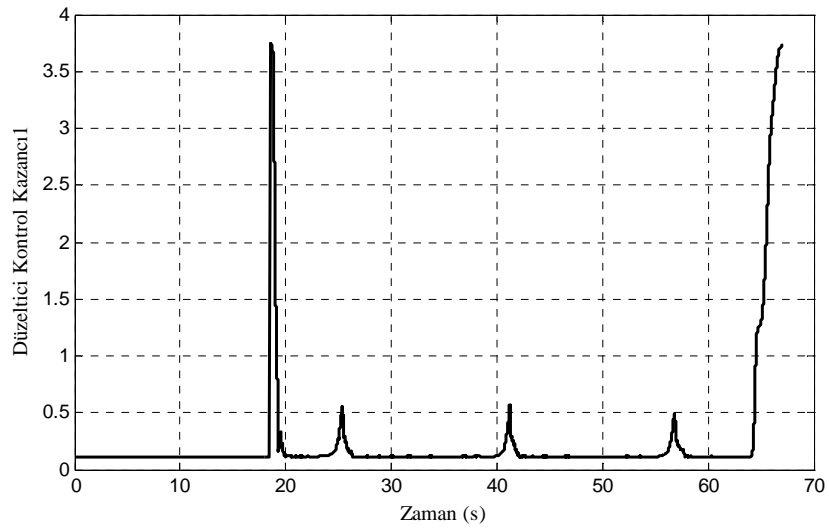
(b) 1. eksenin konum hatası



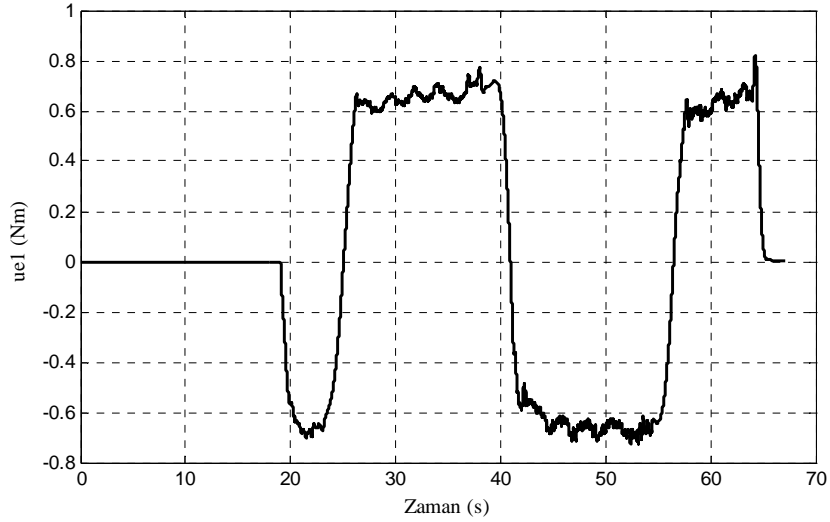
(c) 1. eksen kontrol işareti



(d) 1. eksen kayma işareti



(e) 1. eksen düzeltilici kontrol kazancı

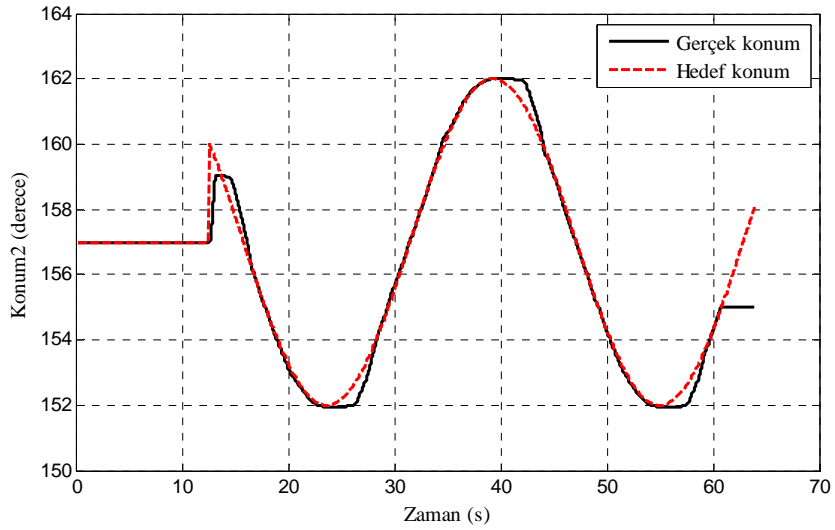


(f) 1. eksenin eşdeğer kontrolü

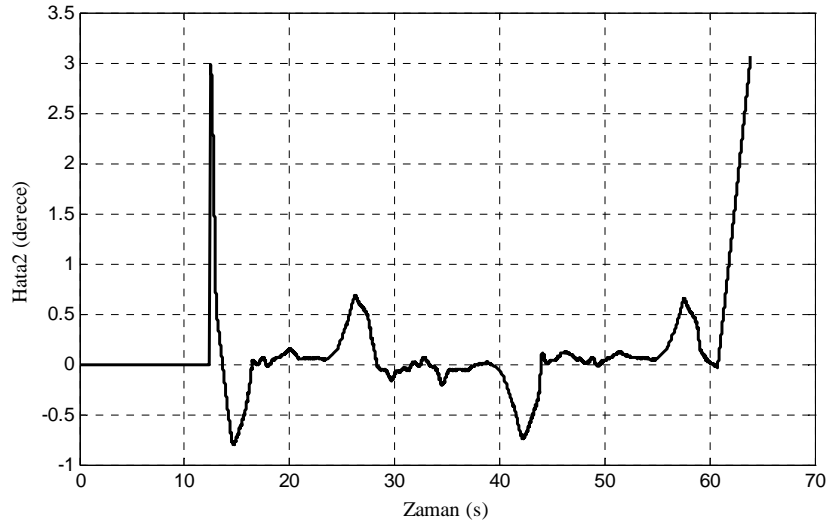
Şekil 9.4 Düzeltici kontrol kazancının bulanık adaptasyon ile ayarlanması durumunda sinüsoidal yörünge takibinde 1. eksen için deney sonuçları

Şekil 9.5a 2. eksen genliği 5, frekansı 0.2rad/sn olan bir sinüs işareti izlettirildiğinde hedefi ve eksenin konumlarını, Şekil 9.5b hatayı, Şekil 9.5c kontrol işaretini göstermektedir.

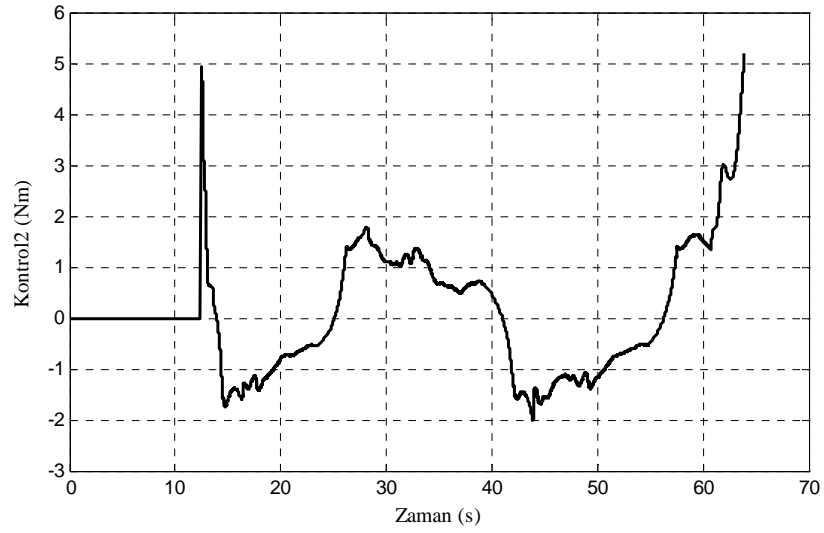
Şekil 9.6a'da 3. eksen genliği 5, frekansı 0.2rad/sn olan bir sinüs işareti izlettirildiğinde hedef ve eksen konumları, Şekil 9.6b'de hata, Şekil 9.6c'de kontrol işareti gösterilmiştir.



(a) 2. eksenin hedef ve gerçek konumu

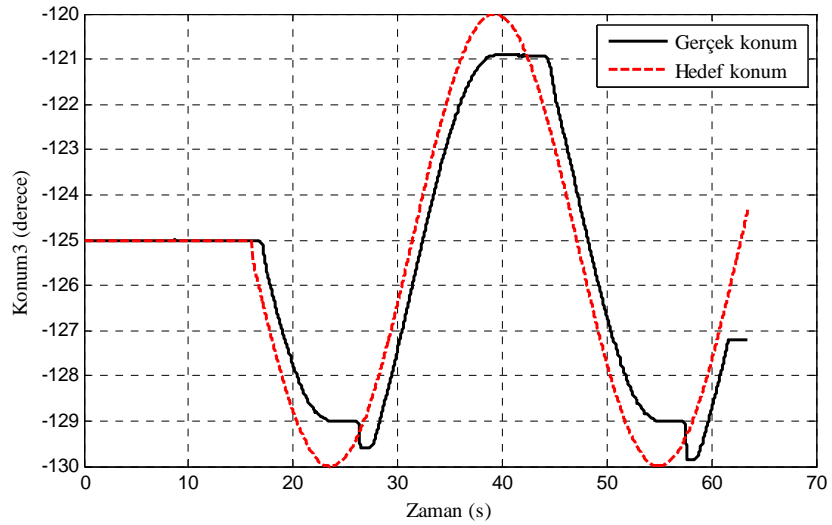


(b) 2. eksenin konum hatası

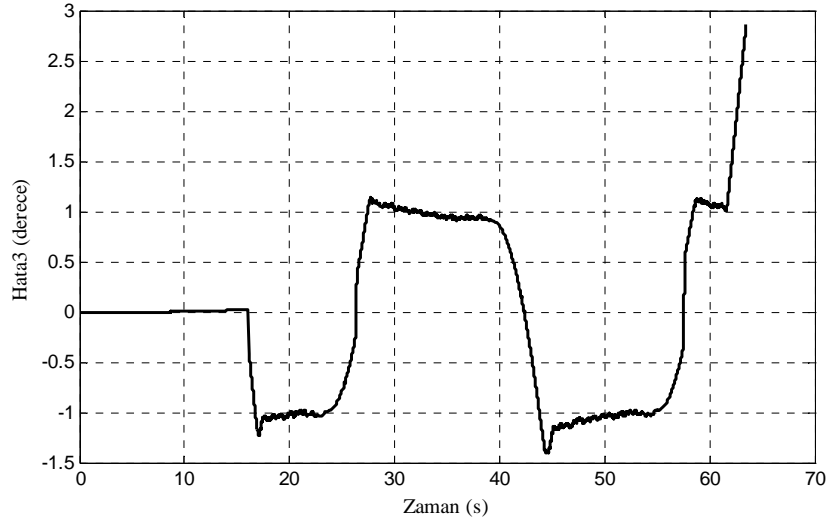


(c) 2. eksenin kontrol işareti

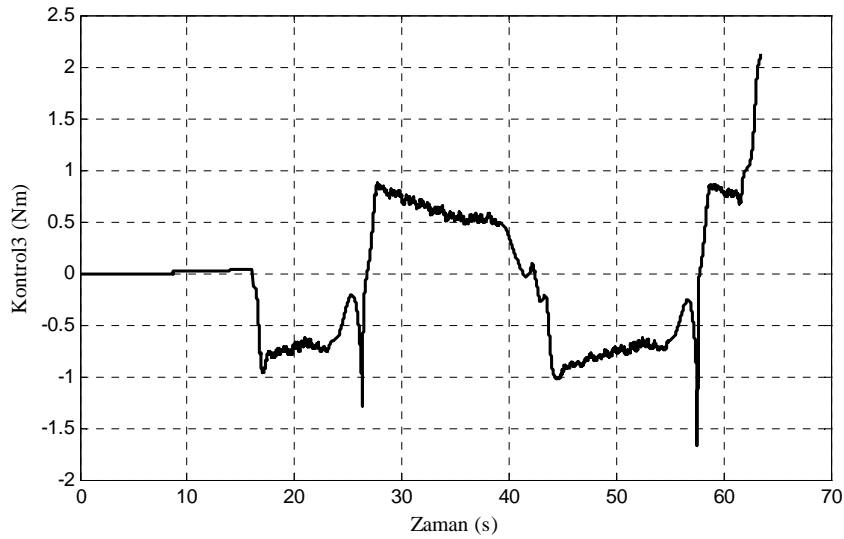
Şekil 9.5 Düzeltici kontrol kazancının bulanık adaptasyon ile ayarlanması durumunda sinüzoidal yörünge takibinde 2. eksen için deney sonuçları



(a) 3. eksenin hedef ve gerçek konumu



(b) 3. eksenin konum hatası



(c) 3. eksenin kontrol işareti

Şekil 9.6 Düzeltici kontrol kazancının bulanık adaptasyon ile ayarlanması durumunda sinüsoidal yörünge takibinde 3. eksen için deney sonuçları

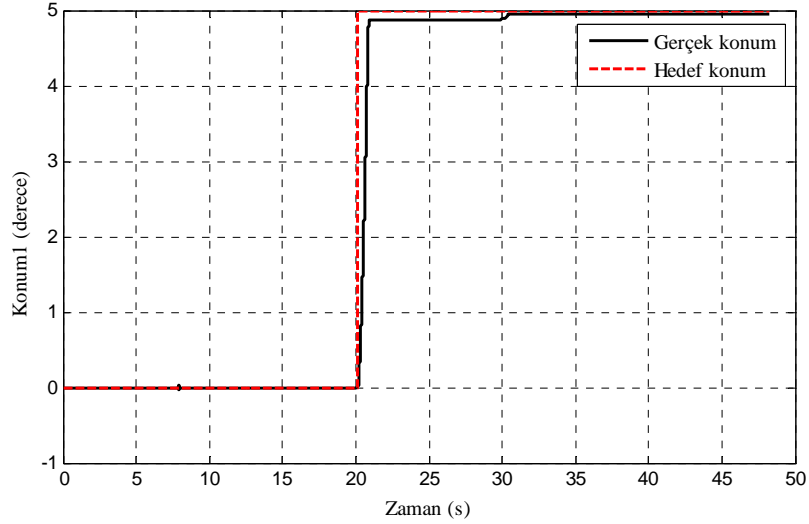
9.1.4 Deney sonuçlarının yorumlanması

1. eksen için fren 8s.'de kaldırılmakta ve hedef 18.5s. de verilmektedir. 2. eksen için fren de 8s.'de kaldırılmakta ve hedef 12.5s.' de verilmektedir. Her 3 eksen de çok kısa sürede hedefe ulaşmaktadır. Hata sinüslerin maksimum ve minimum geçişlerinde en yüksek değere ulaşmaktadır. Yerçekimi etkisini olduğu 2 ve 3. eksenlerde kontrol işaretlerinde bu tepe geçişlerinde çatırdama görülmektedir.

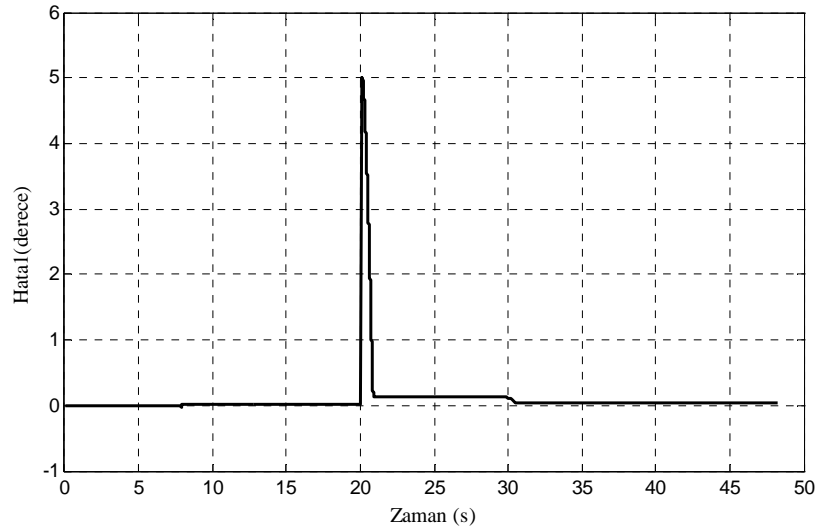
9.2 Kayma Yüzeyinin Eğiminin Bulanık Mantık ile Hesaplanması Durumunda Deney Sonuçları

9.2.1 Eksenler 5° döndürüldüğünde deney sonuçları

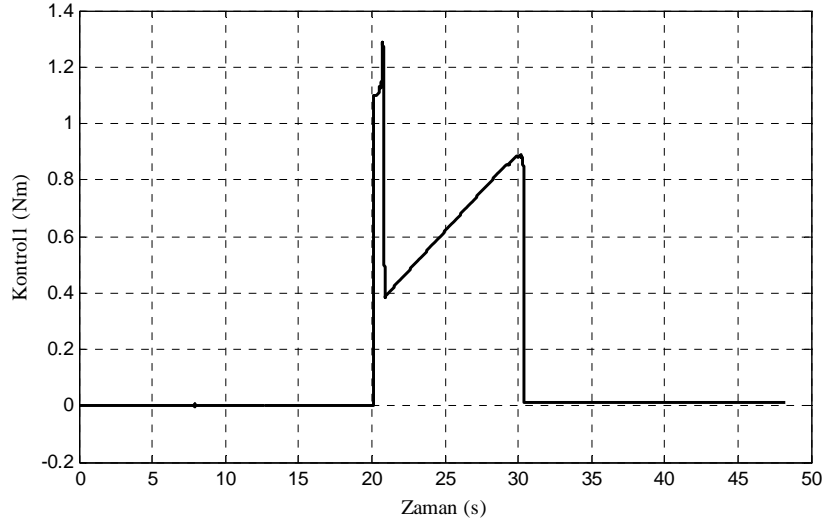
Şekil 9.7a 1. eksen 5° döndürüldüğünde hedefi ve eksenin konumunu, Şekil 9.7b hatayı, Şekil 9.7c kontrol işaretini, Şekil 9.7d kayma işaretini, Şekil 9.7e bulanık mantık ile elde edilen kayma yüzeyi eğimini, Şekil 9.7f ise eşdeğer kontrolü göstermektedir.



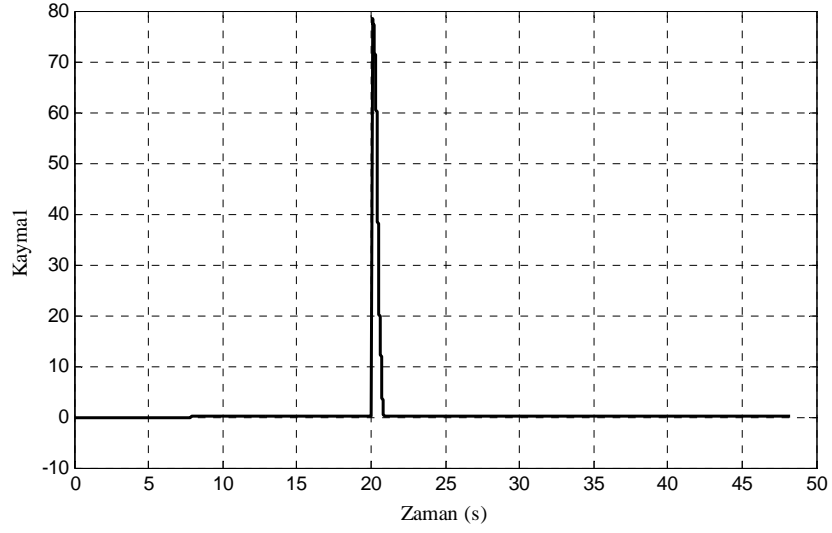
(a) 1. eksenin hedef ve gerçek konumu



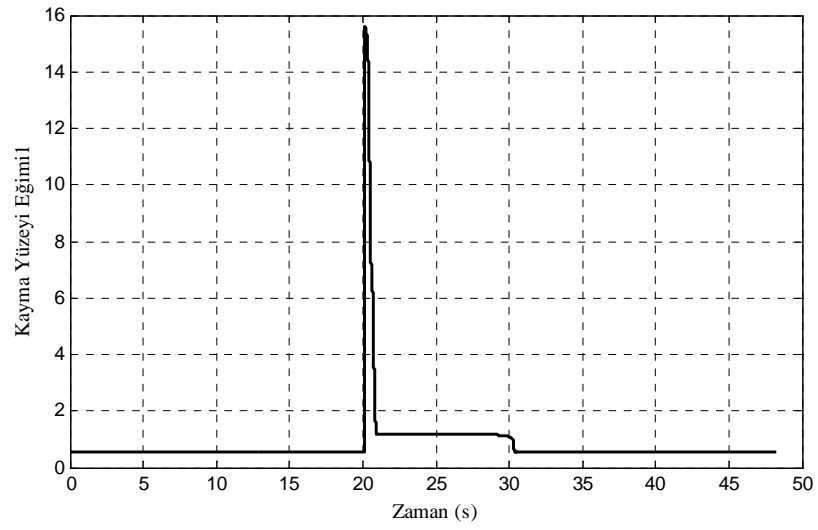
(b) 1. eksenin konum hatası



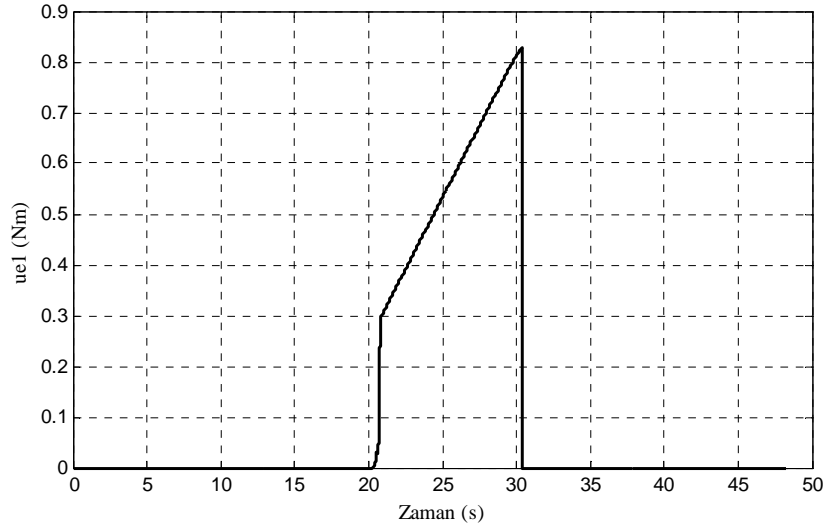
(c) 1. eksen kontrol işareti



(d) 1. eksen kayma işareti



(e) 1. eksen kayma yüzeyi eğimi

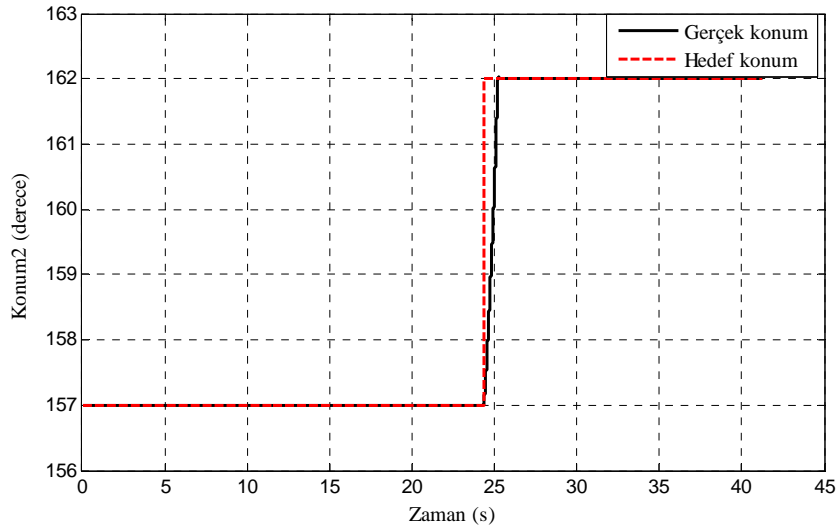


(f) 1. eksenin eşdeğer kontrolü

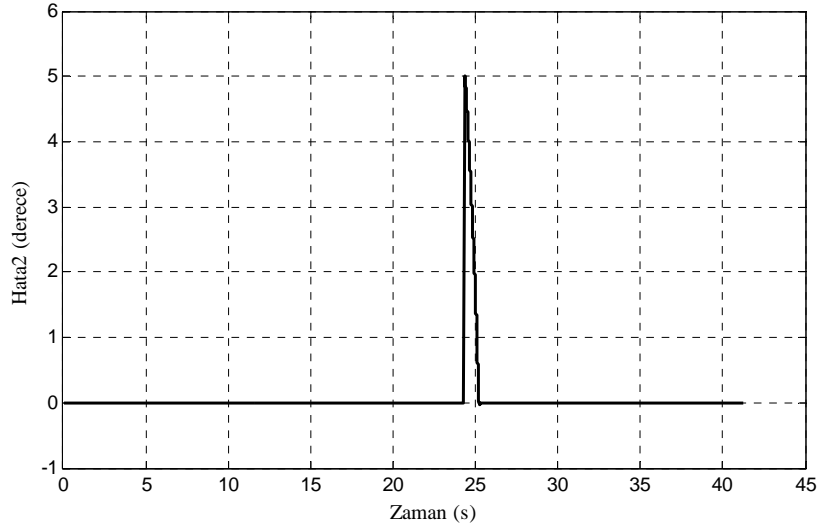
Şekil 9.7 Kayma yüzeyinin eğiminin bulanık mantık ile hesaplanmasında 5° 'lik dönme durumunda 1. eksen için deney sonuçları

Şekil 9.8a 2. eksen 5° döndürüldüğünde hedefi ve eksenin konumunu, Şekil 9.8b hatayı, Şekil 9.8c kontrol işaretini göstermektedir.

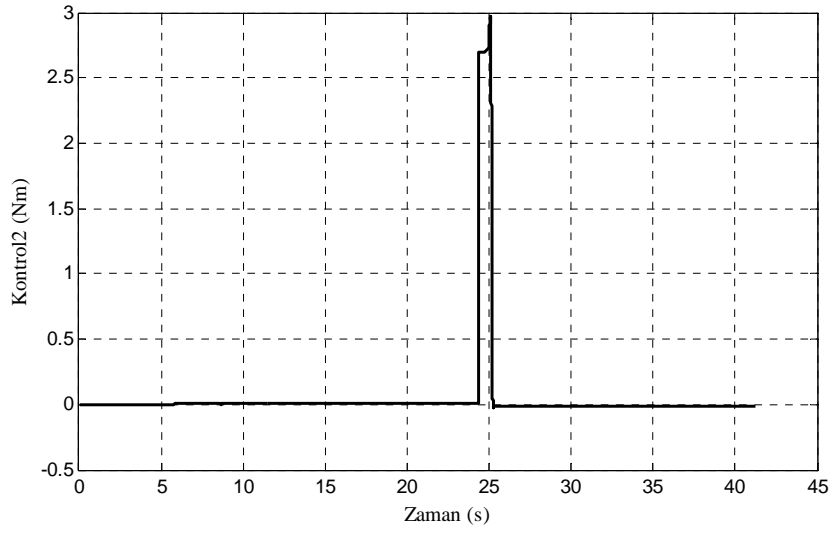
Şekil 9.9a'da 3. eksen 5° döndürüldüğünde hedef ve eksenin konum, Şekil 9.9b hata, Şekil 9.9c kontrol işareti sunulmuştur.



(a) 2. eksenin hedef ve gerçek konumu

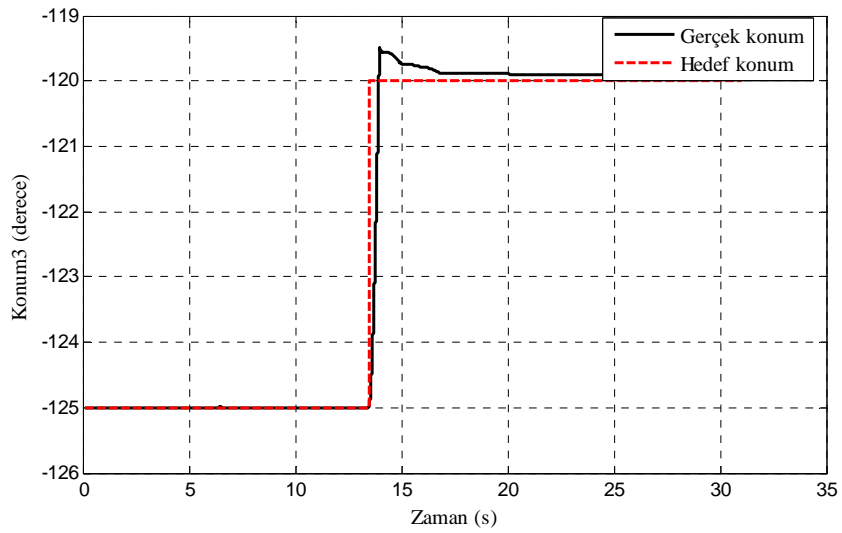


(b) 2. eksenin konum hatası

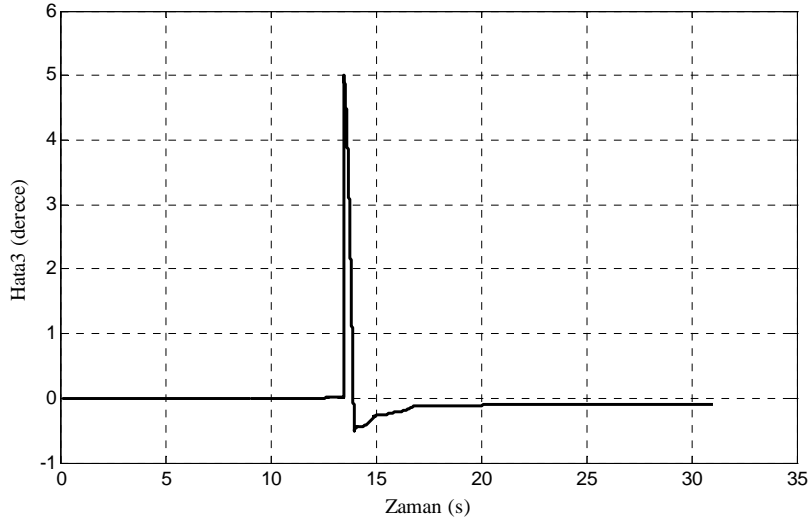


(c) 2. eksenin kontrol işareti

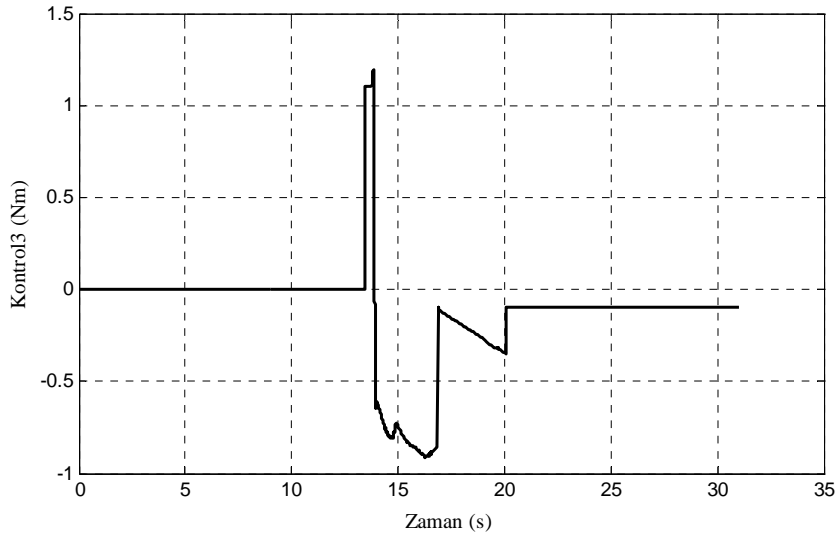
Şekil 9.8 Kayma yüzeyinin eğiminin bulanık mantık ile hesaplanmasında 5° 'lik dönme durumunda 2. eksen için deney sonuçları



(a) 3. eksenin hedef ve gerçek konumu



(b) 3. eksenin konum hatası



(c) 3. eksenin kontrol işareti

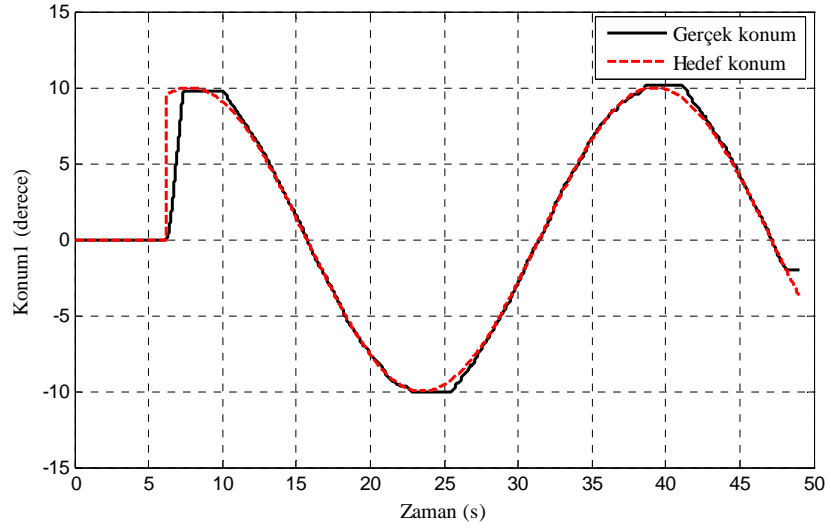
Şekil 9.9 Kayma yüzeyinin eğiminin bulanık mantık ile hesaplanmasında 5° 'lik dönme durumunda 3. eksen için deney sonuçları

9.2.2 Deney sonuçlarının yorumlanması

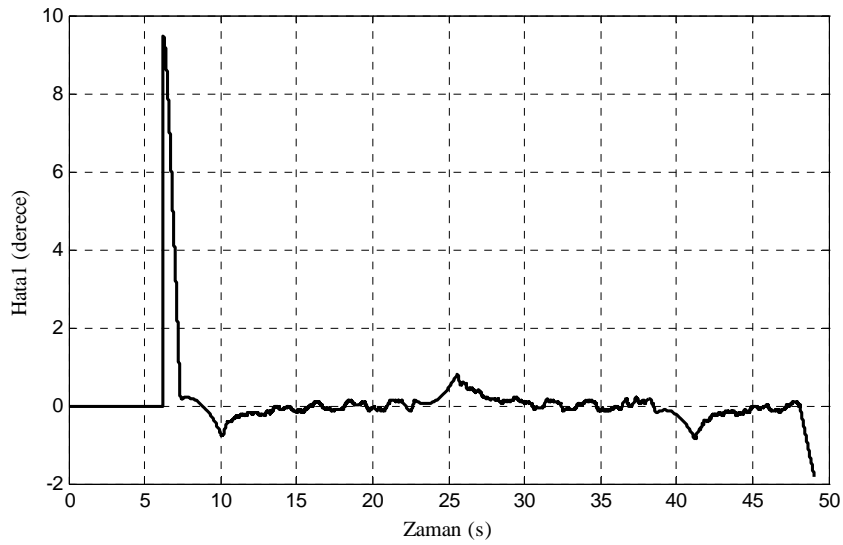
1. eksen için fren 8s.'de kaldırılmakta ve hedef 20s. de verilmektedir. 1. eksen 1s.'de hedefe ulaşmaktadır. 0.05° lik sürekli durum hatası kalmaktadır. 2. eksen için fren 6s.'de kaldırılmakta ve hedef 24.35s. de verilmektedir. 2. eksen 0.65s.'de hedefe ulaşmaktadır. 0.015° lik sürekli durum hatası kalmaktadır. 3. eksen için ise fren 12.5s.'de kaldırılmakta ve hedef 13.425s. de verilmektedir. 3. eksen 3.6s.'de hedefe ulaşmaktadır. 0.1° lik sürekli durum hatası kalmaktadır. Kontrol işaretlerinde çarptırma görülmemektedir.

9.2.3 Sinüzoidal yörünge takibi için deney sonuçları

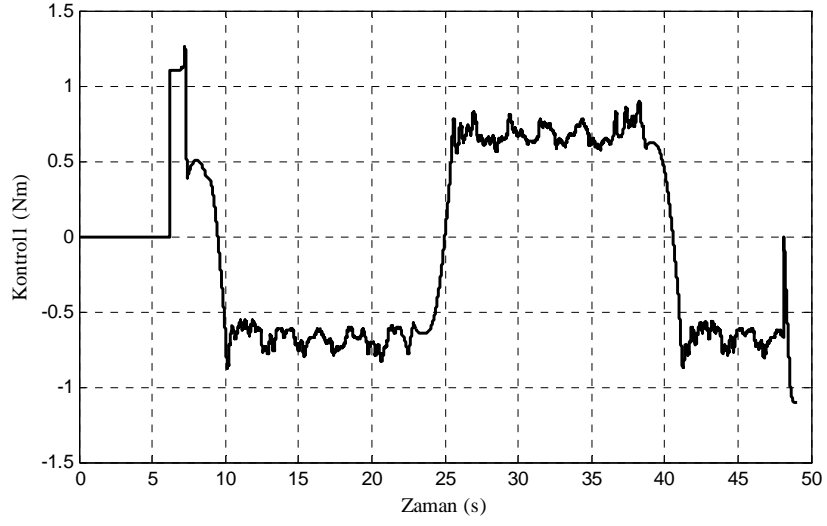
Şekil 9.10a 1. eksen genliği 10, frekansı 0.2rad/sn olan bir sinüs işaretini izlettirildiğinde hedefi ve eksenin konumları, Şekil 9.10b hatayı, Şekil 9.10c kontrol işaretini, Şekil 9.10d kayma işaretini, Şekil 9.10e bulanık mantık ile elde edilen kayma yüzeyi eğimini, Şekil 9.10f ise eşdeğer kontrolü göstermektedir.



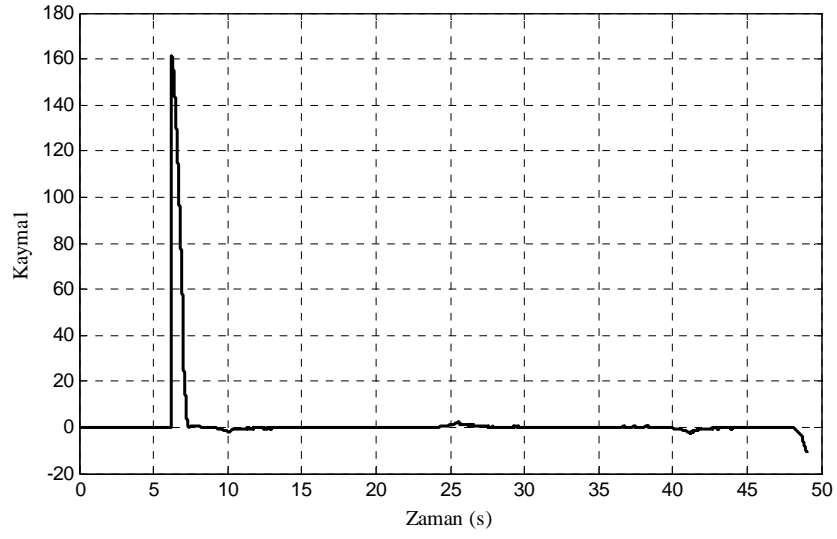
(a) 1. eksenin hedef ve gerçek konumu



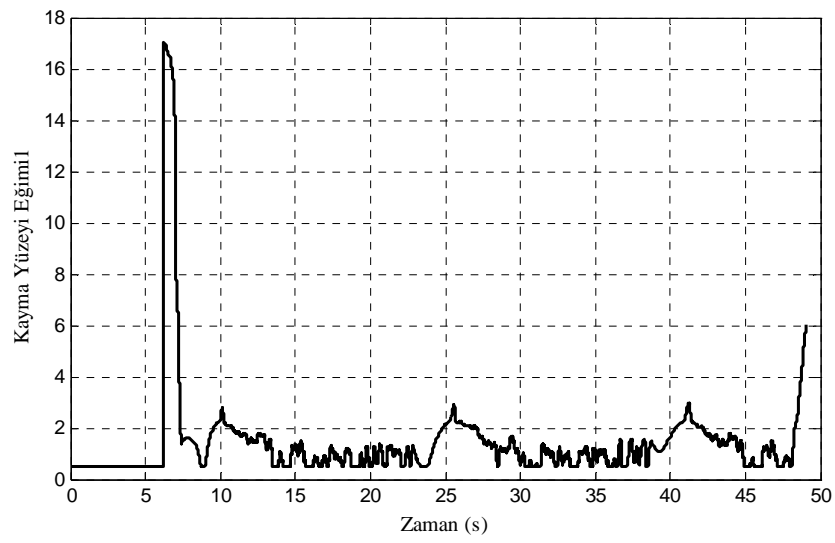
(b) 1. eksenin konum hatası



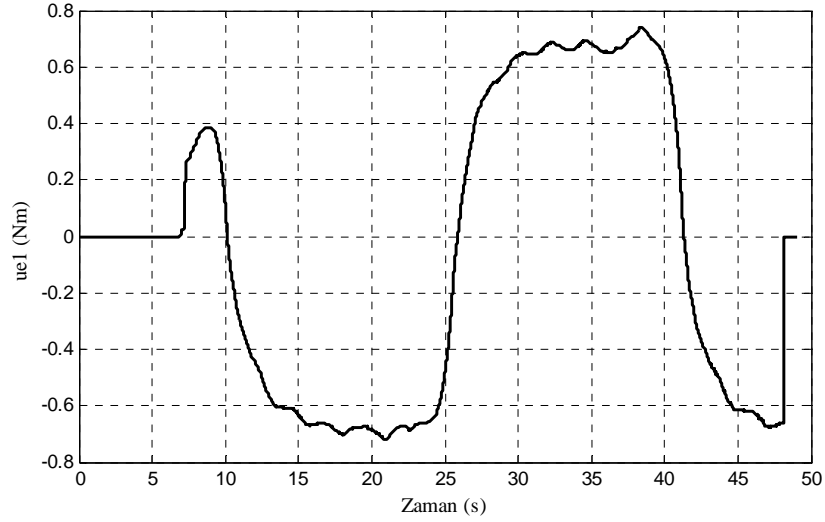
(c) 1. eksenin kontrol işareti



(d) 1. eksenin kayma işareti



(e) 1. eksenin kayma yüzeyi eğimi

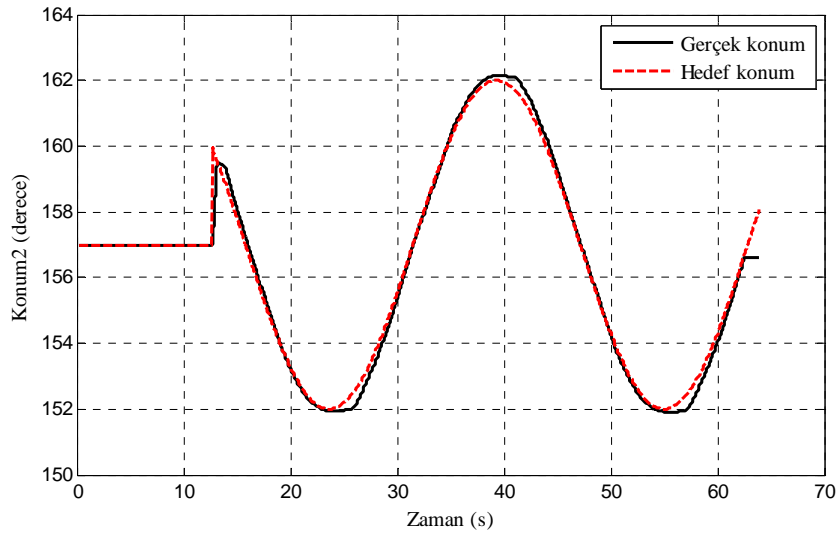


(f) 1. eksen için eşdeğer kontrolü

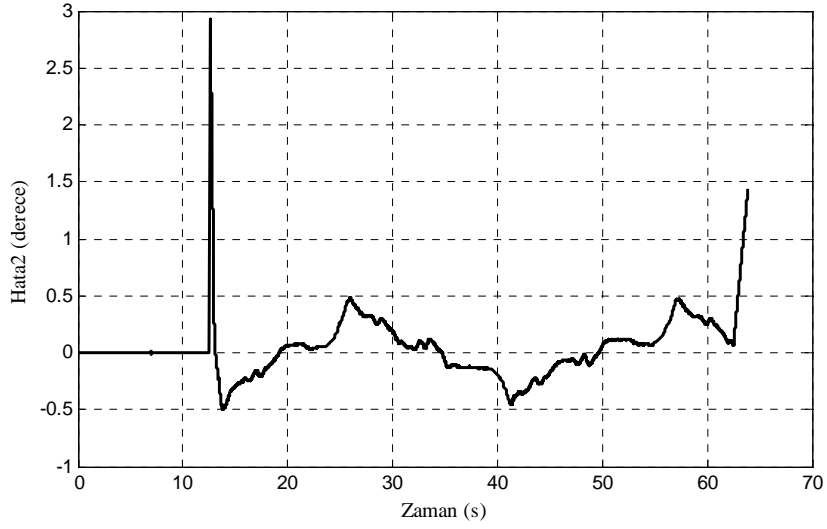
Şekil 9.10 Kayma yüzeyi eğiminin bulanık mantık ile ayarlanması durumunda sinüzoidal yörünge takibinde 1. eksen için deney sonuçları

Şekil 9.11a 2. eksen genliği 5, frekansı 0.2rad/sn olan bir sinüs işareti izlettiğinde hedefi ve eksenin konumları, Şekil 9.11b hatayı, Şekil 9.11c kontrol işaretini göstermektedir.

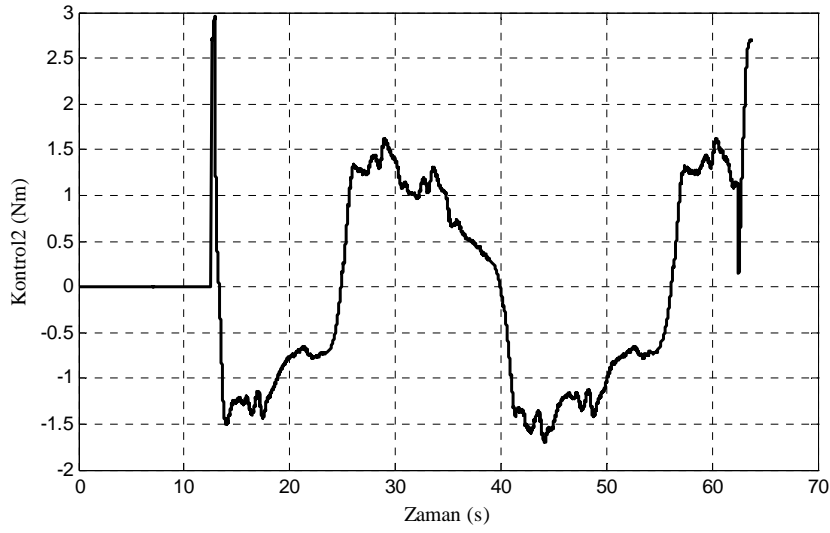
Şekil 9.12a'da 3. eksen genliği 5, frekansı 0.2rad/sn olan bir sinüs işareti izlettiğinde hedef ve eksenin konumu, Şekil 9.12b'de hata, Şekil 9.12c'de kontrol işareti verilmiştir.



(a) 2. eksen için hedef ve gerçek konumu

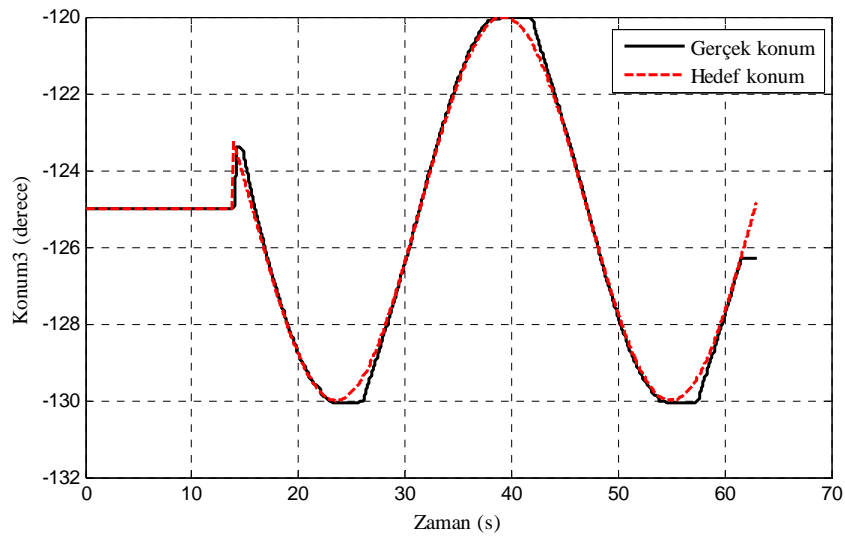


(b) 2. eksenin konum hatası

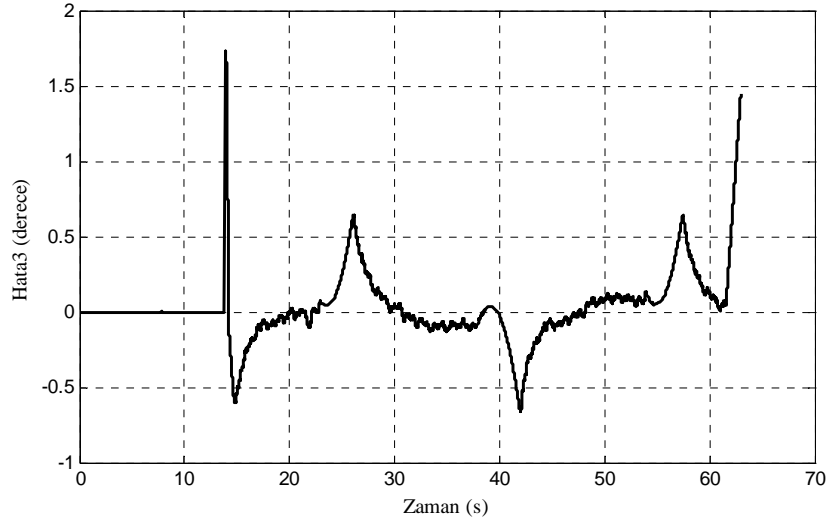


(d) 2. eksenin kontrol işareti

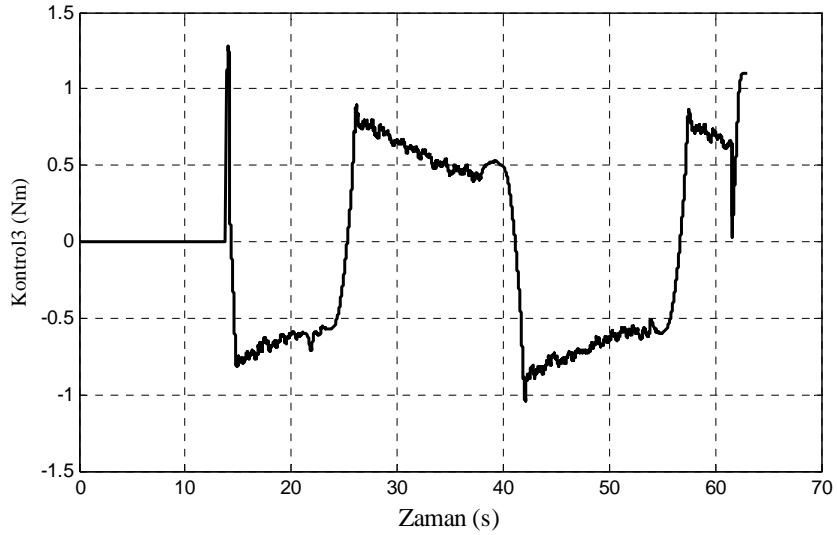
Şekil 9.11 Kayma yüzeyi eğiminin bulanık mantık ile ayarlanması durumunda sinüzoidal yörünge takibinde 2. eksen için deney sonuçları



(a) 3. eksenin hedef ve gerçek konumu



(b) 3. eksenin konum hatası



(c) 3. eksenin kontrol işareti

Şekil 9.12 Kayma yüzeyi eğiminin bulanık mantık ile ayarlanması durumunda sinüzoidal yörünge takibinde 3. eksen için deney sonuçları

9.2.4 Deney sonuçlarının yorumlanması

1. eksen için hedef 6s.' de verilmektedir. 2. eksen için hedef 12.5s.' de verilmektedir. 3. eksen için hedef 14s.' de verilmektedir. Her üç eksen de kısa sürede yörüngeye oturmaktadır. Hata sinüslerin maksimum ve minimum geçişlerinde en yüksek değere ulaşmaktadır. Yerçekimi etkisini olduğu 2 ve 3. eksenlerde kontrol işaretlerinde bu tepe geçişlerinde çatırdama görülmektedir.

9.3 Deney ve Simülasyon Sonuçlarının Karşılaştırılması

Robot, yazılım çalıştırılıp sürücü sistemi devreye alındıktan ve fren kaldırıldıktan sonra devreye alınmaktadır. Dolayısıyla hedef yörüngenin robota verilmesi bir süre almaktadır. Bu nedenle sabit bir yörüngenin (5^o gibi) izlenmesi durumunda deney ve simülasyon sonuçlarının üst üste çizdirilmesi ile karşılaştırılması mümkün olmayacaktır. Grafikler tek tek incelendiğinde şu sonuçlar elde edilmektedir:

Çizelge 9.1 Düzeltici kontrol kazancının bulanık mantık ile ayarlanması durumunda Simülasyon ve deney sonuçlarının karşılaştırılması

Eksen	Düzeltici kontrol kazancının bulanık mantık ile ayarlanması durumunda simülasyon sonuçları			Düzeltici kontrol kazancının bulanık mantık ile ayarlanması durumunda deney sonuçları		
	1	2	3	1	2	3
e_s	0.02	0.25	0.0745	0.009	0.043	0.07
Aşma	0.5	1	5	-	-	-
t_s (s)	3	2	0.5	1.5	0.3	0.3

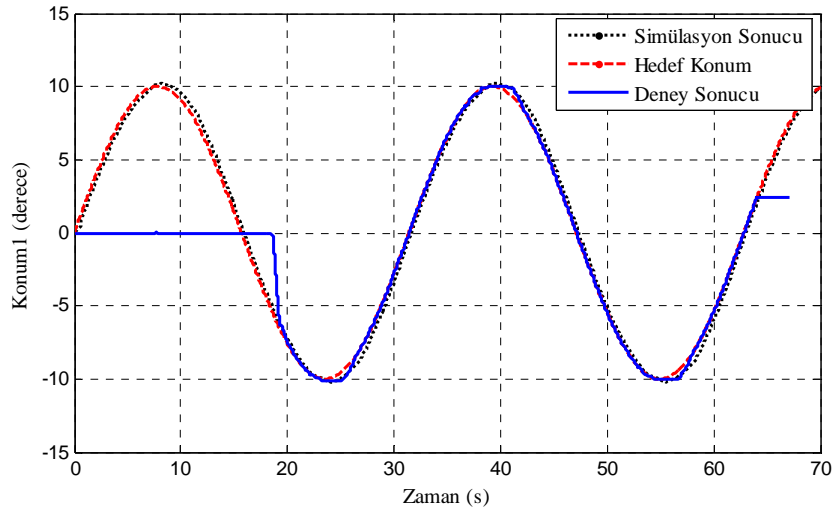
Çizelge 9.2 Kayma yüzeyi eğiminin bulanık mantık ile ayarlanması durumunda Simülasyon ve deney sonuçlarının karşılaştırılması

Eksen	Kayma yüzeyi eğiminin bulanık mantık ile ayarlanması durumunda simülasyon sonuçları			Kayma yüzeyi eğiminin bulanık mantık ile ayarlanması durumunda deney sonuçları		
	1	2	3	1	2	3
e_s	0.01	0.45	0.2	0.05	0.015	0.11
Aşma	-	1.5	14	-	-	-
t_s (s)	1.2	3.5	1	1	0.6	3.6

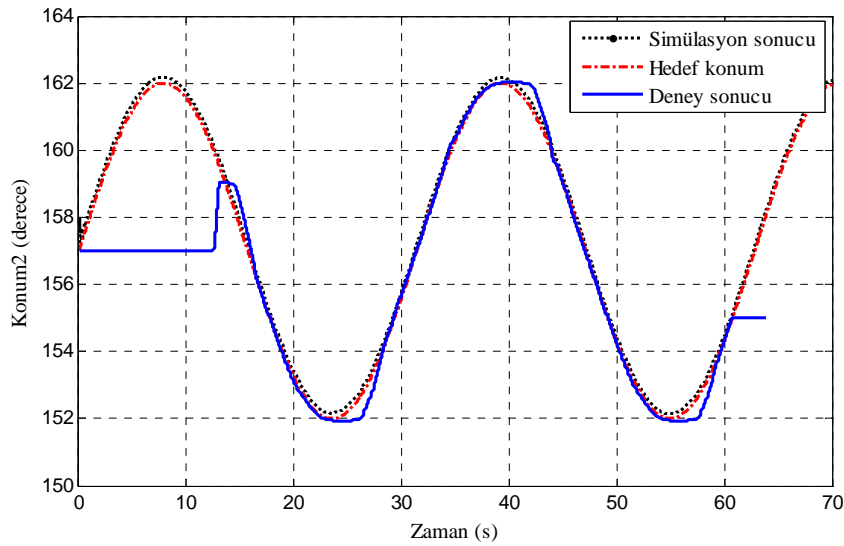
Simülasyonlarda az da olsa aşma varken deney sonuçlarında yoktur. Hatalar genellikle deney sonuçlarında daha düşüktür. Sürekli duruma ulaşma zamanları da deney sonuçlarında daha düşüktür. Bunların sebebi simülasyonlarda kullanılan modelde ihmal edilen (modellenmemiş) dinamiklerdir. Kontrol değerleri birbirine yakındır.

Sinüzoidal yörünge takibinde simülasyon ve deney sonuçları üst üste çizdirilerek Düzeltici kontrol kazancının bulanık mantık ile ayarlanması durumunda Şekil 9.13’de, kayma yüzeyi eğiminin bulanık mantık ile ayarlanması durumunda Şekil 9.14’de gösterilmiştir.

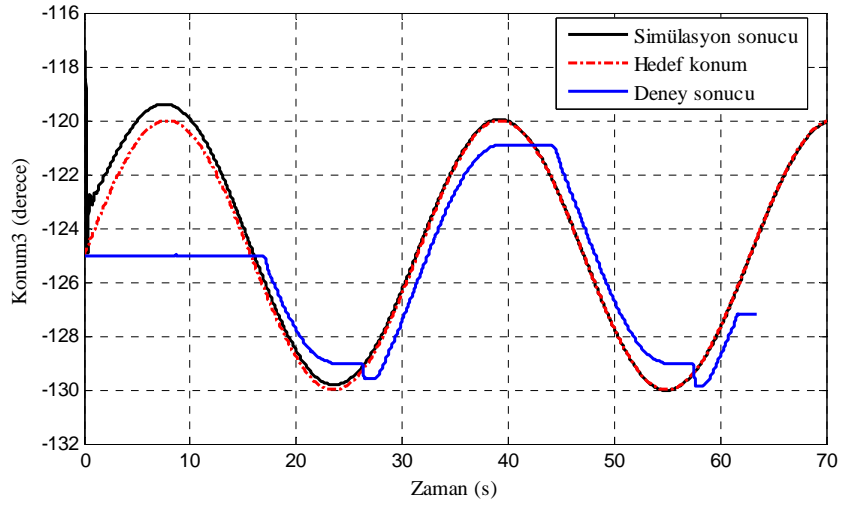
En bariz fark 3. ekseninde görünmektedir. Deney sonuçlarında hata oranı sinüslerin tepe geçişlerinde maksimuma ulaşmaktadır. -130° ’ye doğru giderken belirlenen yörünge içerisinde yerçekiminin en etkin olduğu bölgeye ulaşmaktadır. Dolayısıyla en yüksek yörünge hatası bu bölgede görülmektedir.



(a) 1. eksen için hedef konum, simülasyon ve deney sonucu

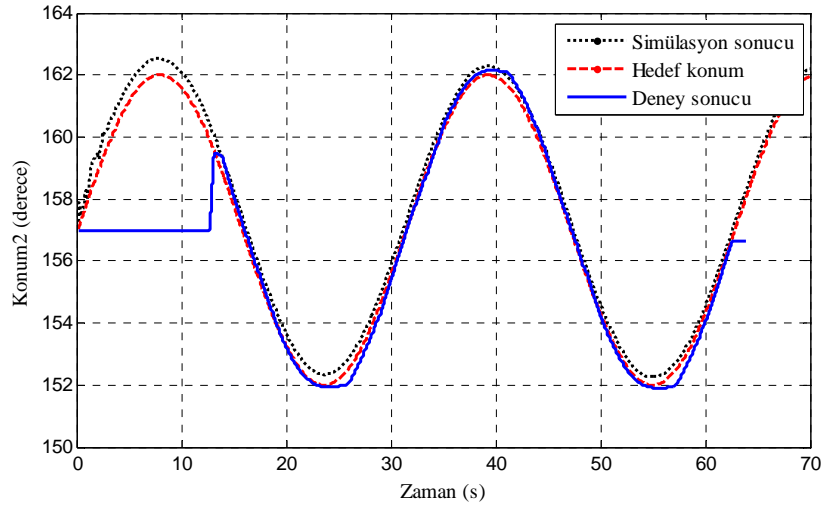


(b) 2. eksen için hedef konum, simülasyon ve deney sonucu

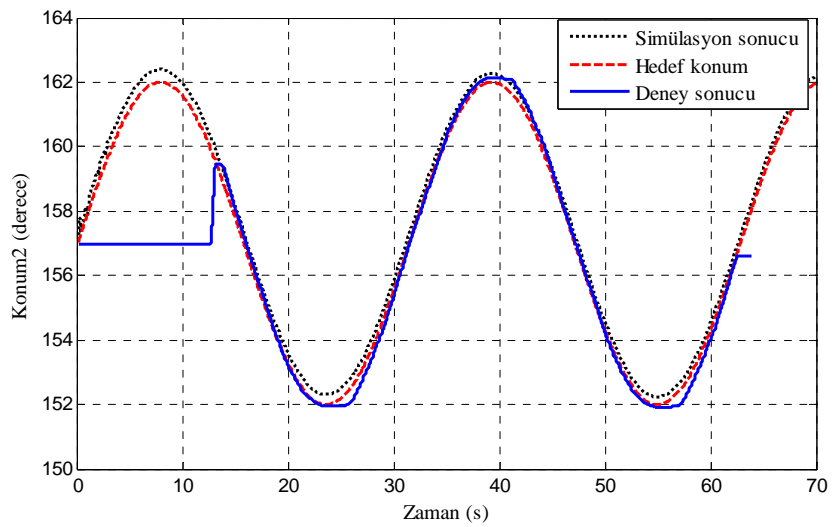


(c) 3. eksen için hedef konum, simülasyon ve deney sonucu

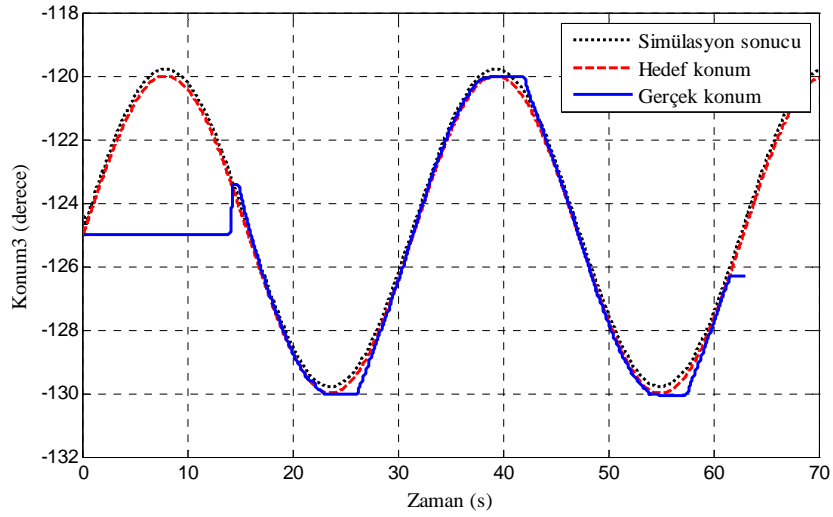
Şekil 9.13 Düzeltici kontrol kazancının bulanık mantık ile ayarlanması durumunda sinüzoidal yörünge takibinde simülasyon ve deney sonuçları



(a) 1. eksen için hedef konum, simülasyon ve deney sonucu



(b) 2. eksen için hedef konum, simülasyon ve deney sonucu

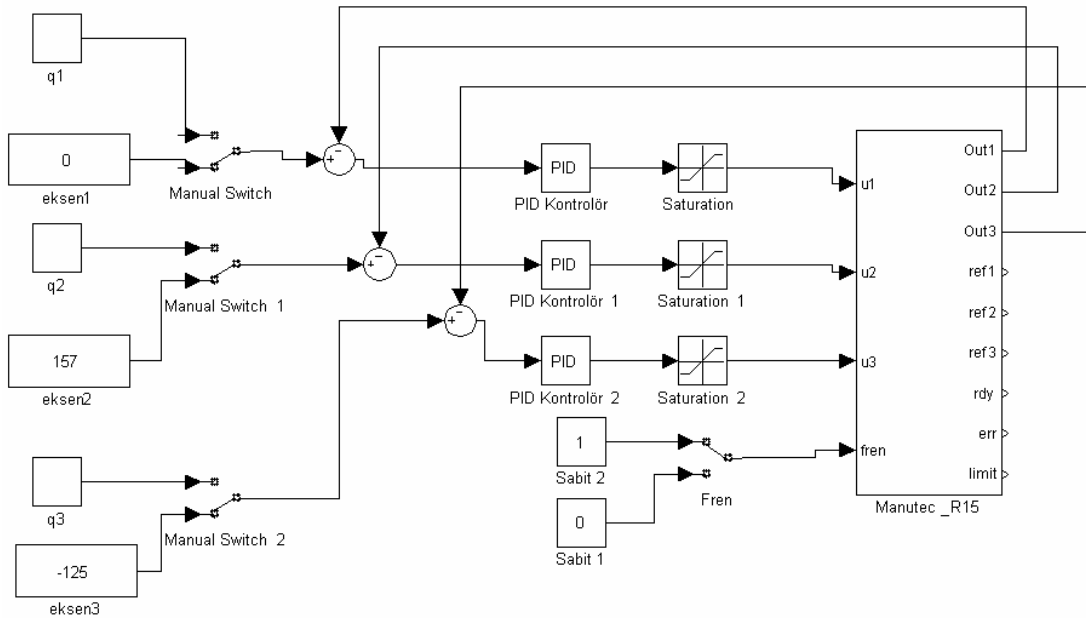


(c) 3. eksen için hedef konum, simülasyon sonucu ve deney sonucu

Şekil 9.14 Kayma yüzeyi eğiminin bulanık mantık ile ayarlanması durumunda sinüzoidal yörünge takibinde simülasyon ve deney sonuçları

9.4 PD Kontrol ile Deney Sonuçları

PD kontrolör için hazırlanan şema Şekil 9.15’de gösterilmiştir. İntegratör için katsayı sıfır alınmıştır.



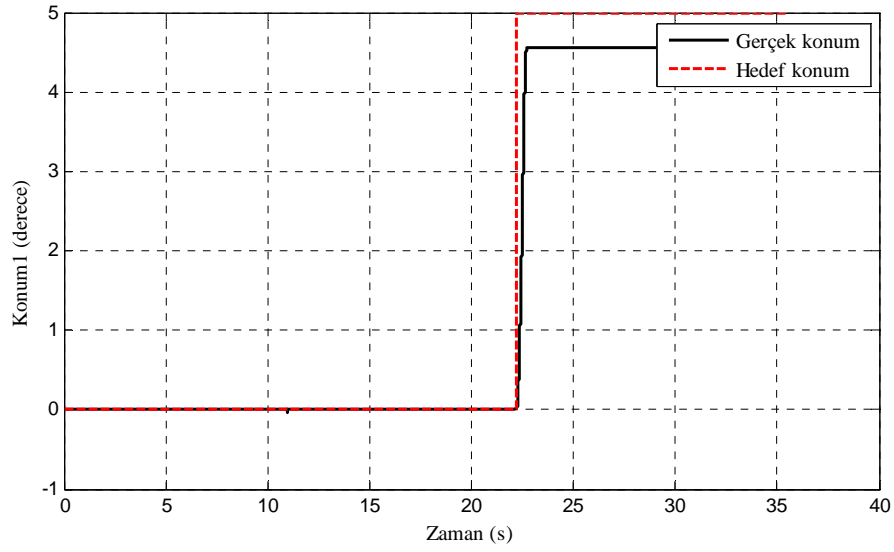
Şekil 9.15 PD kontrolör

9.4.1 Eksenler 5° döndürüldüğünde deney sonuçları

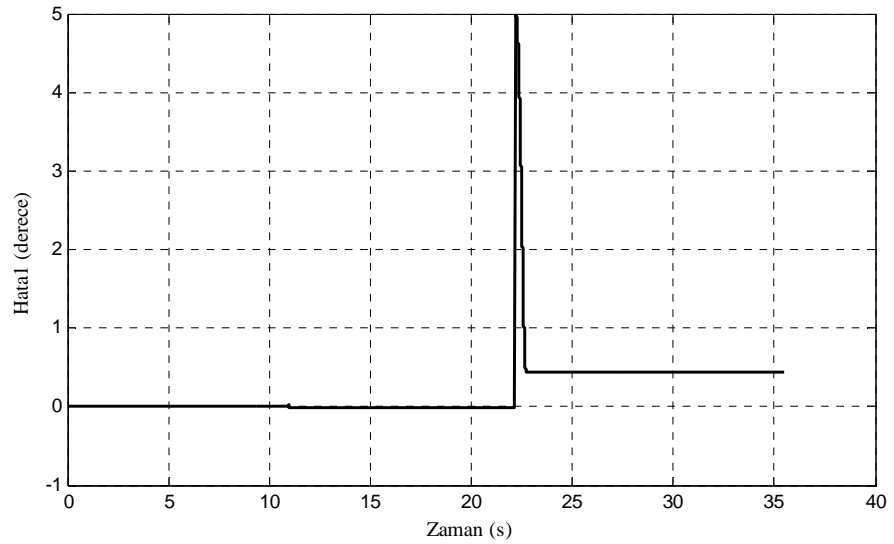
Şekil 9.16a 1. eksen 5° döndürüldüğünde hedefi ve eksenin konumunu, Şekil 9.16b hatayı, Şekil 9.16c kontrol işaretini göstermektedir.

Şekil 9.17a'da 2. eksen 5° döndürüldüğünde hedef ve eksenin konumu, Şekil 9.17b'de hata, Şekil 9.17c'de kontrol işareti verilmiştir.

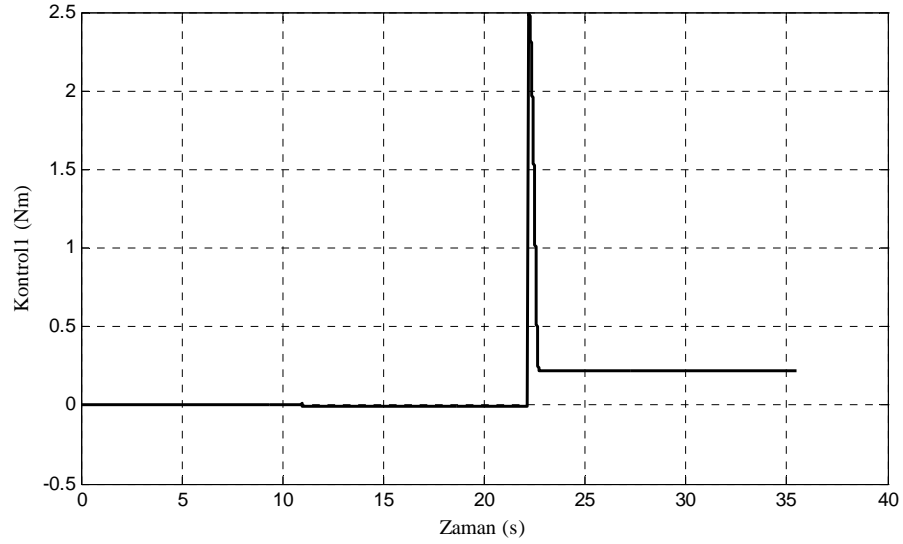
Şekil 9.18a ise 3. eksen 5° döndürüldüğünde hedefi ve eksenin konumunu, Şekil 9.18b hatayı, Şekil 9.18c kontrol işaretini göstermektedir.



(a) 1. eksenin hedef ve gerçek konumu

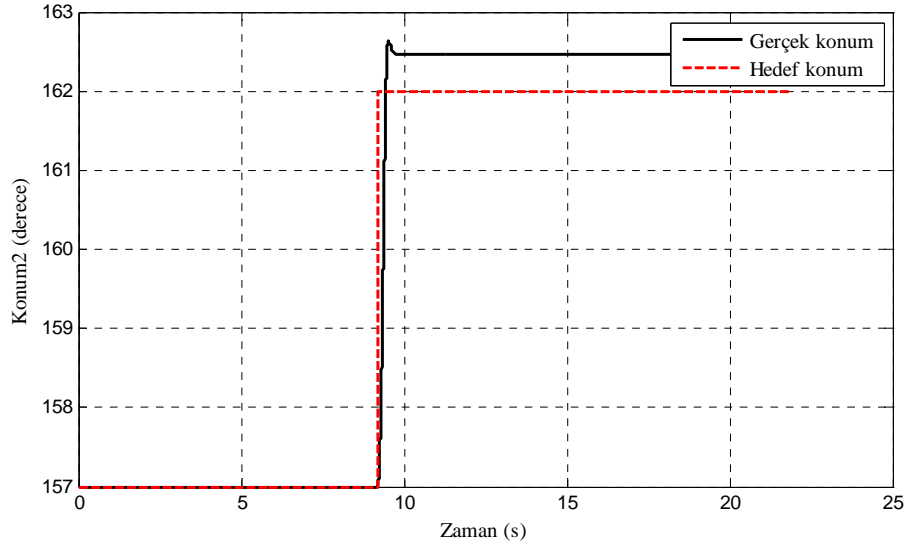


(b) 1. eksenin konum hatası

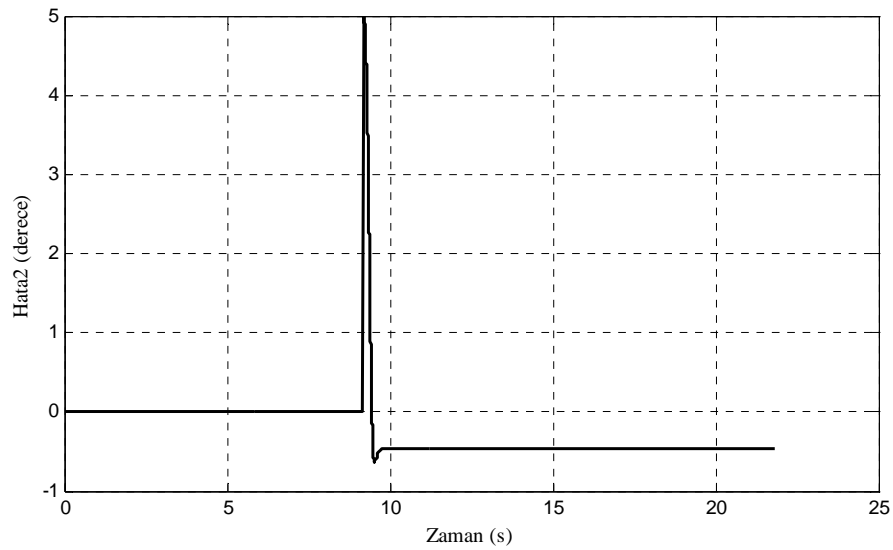


(d) 1. eksenin kontrol işareti

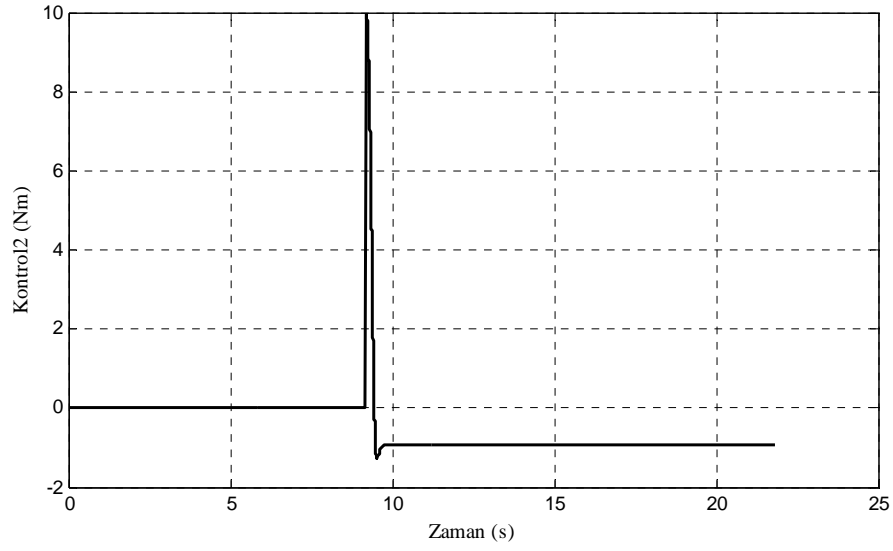
Şekil 9.16 PD kontrolör ile 5°'lik dönme durumunda 1. eksen için deney sonuçları



(a) 2. eksenin hedef ve gerçek konumu

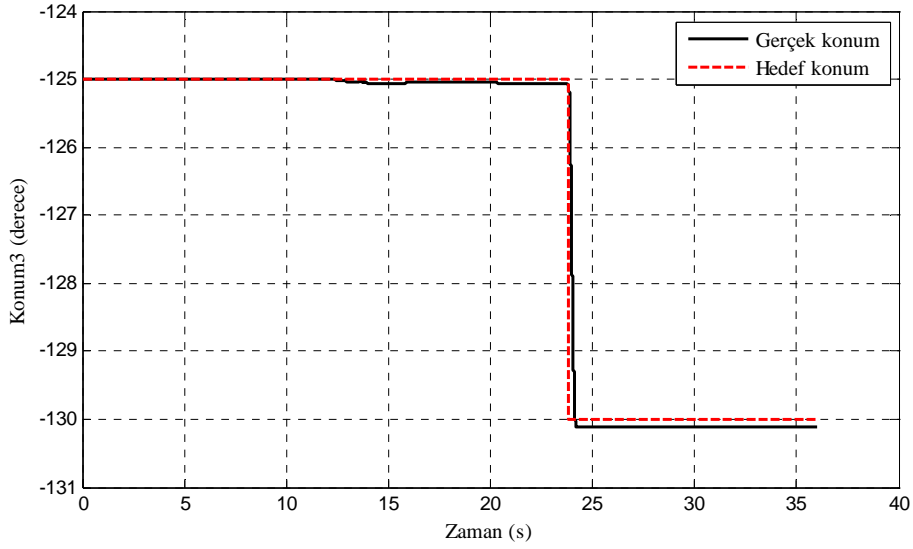


(b) 2. eksenin konum hatası

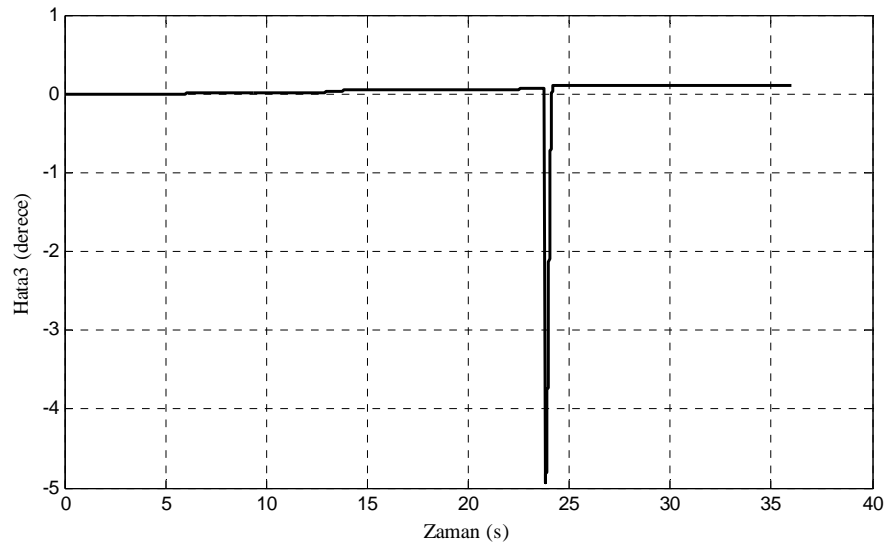


(c) 2. eksenin kontrol işareti

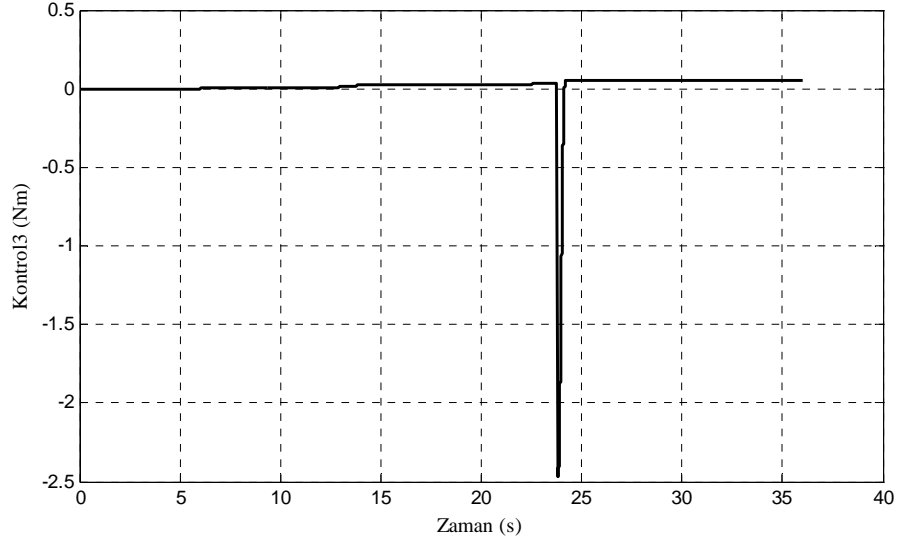
Şekil 9.17 PD kontrolör ile 5° 'lik dönme durumunda 2. eksen için deney sonuçları



(a) 3. eksenin hedef ve gerçek konumu



(b) 3. eksenin konum hatası



(c) 3. eksenin kontrol işareti

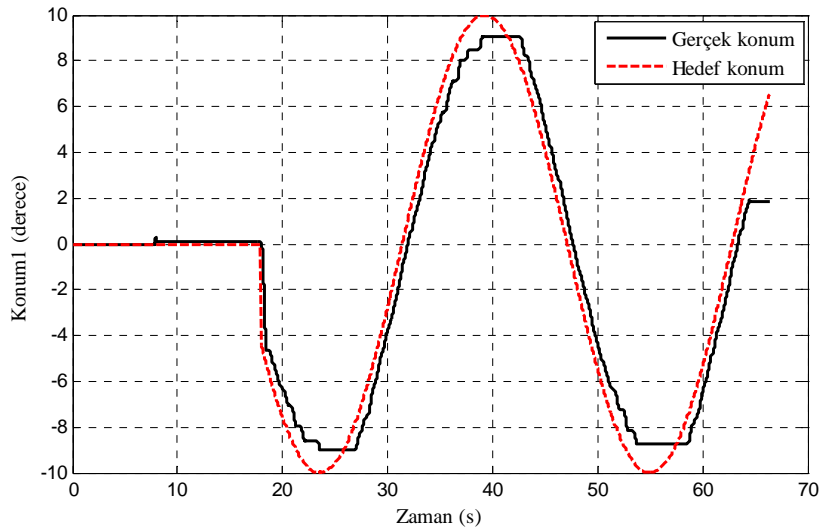
Şekil 9.18 PD kontrolör ile 5° 'lik dönme durumunda 3. eksen için deney sonuçları

9.4.2 Deney sonuçlarının yorumlanması

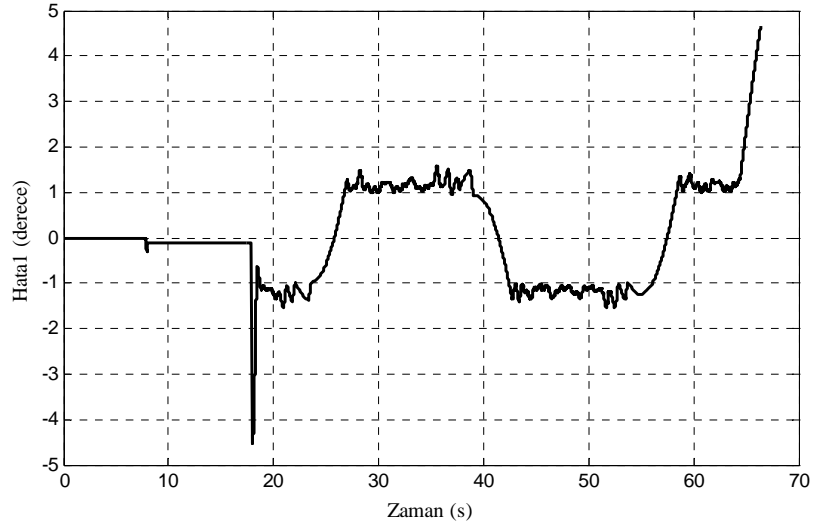
1.eksen için fren 11s.'de kaldırılmakta ve hedef 22.2s. de verilmektedir. 1.eksen 0.5s.'de hedefe ulaşmaktadır. 0.5° lik sürekli durum hatası kalmaktadır. 2.eksen için hedef 9.2s. de verilmektedir. 2.eksen 0.8s.'de hedefe ulaşmaktadır. 0.5° lik sürekli durum hatası kalmaktadır. 3.eksen için ise hedef 23.8s. de verilmektedir. 3.eksen 0.4s.'de hedefe ulaşmaktadır. 0.1° lik sürekli durum hatası kalmaktadır. Kontrol işaretlerinde çatlama görülmemektedir.

9.4.3 Sinüzoidal yörünge takibi için deney sonuçları

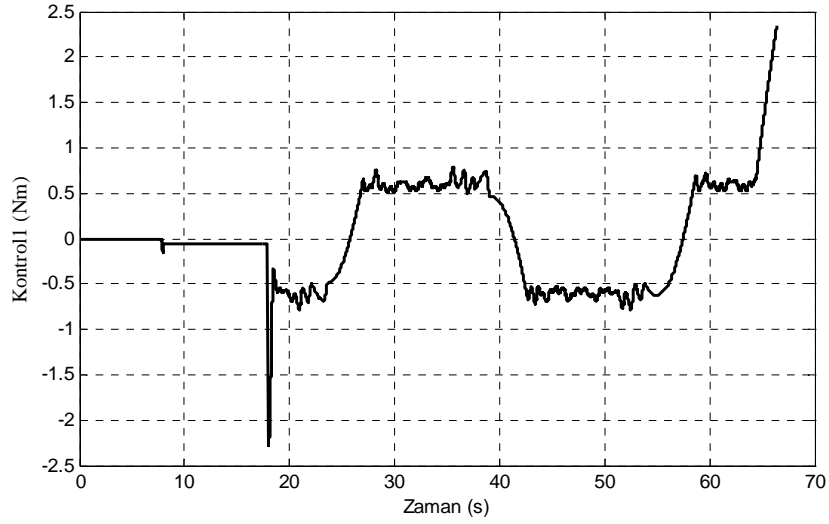
Şekil 9.19a 1. eksen genliği 10, frekansı 0.2rad/sn olan bir sinüs işareti izlettirildiğinde hedefi ve eksenin konumunu, Şekil 9.19b hatayı, Şekil 9.19c kontrol işaretini göstermektedir.



(a) 1. eksenin hedef ve gerçek konumu



(b) 1. eksenin konum hatası

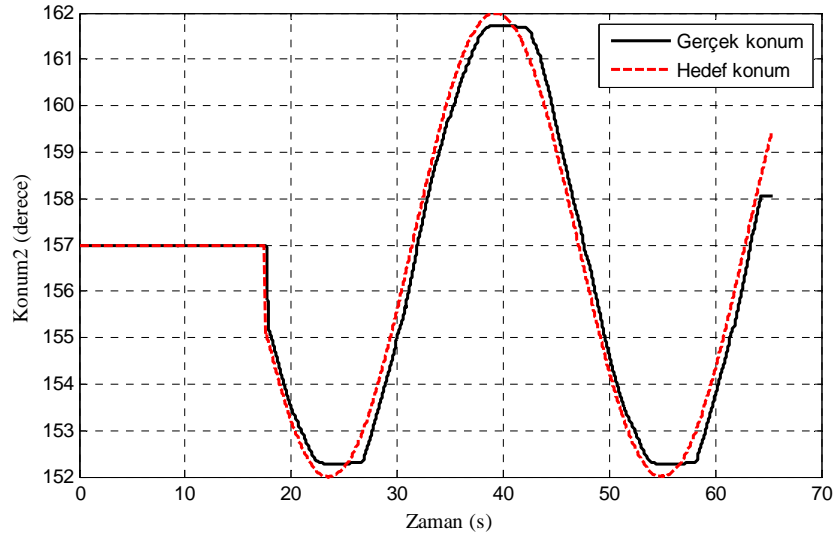


(c) 1. eksenin kontrol işareti

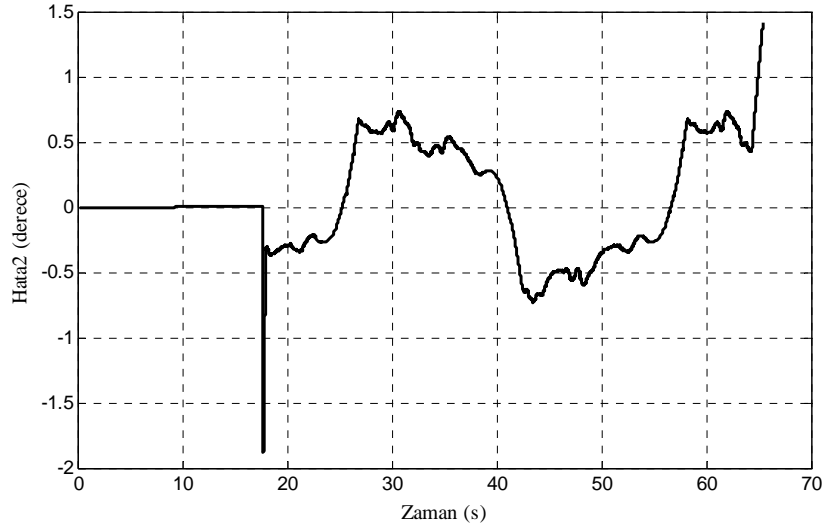
Şekil 9.19 PD kontrolör ile sinüzoidal yörünge takibinde 1. eksen için deney sonuçları

Şekil 9.20a 2. eksen genliği 5, frekansı 0.2rad/sn olan bir sinüs işareti izlettirildiğinde hedefi ve eksenin konumunu, Şekil 9.20b hatayı, Şekil 9.20c kontrol işaretini göstermektedir.

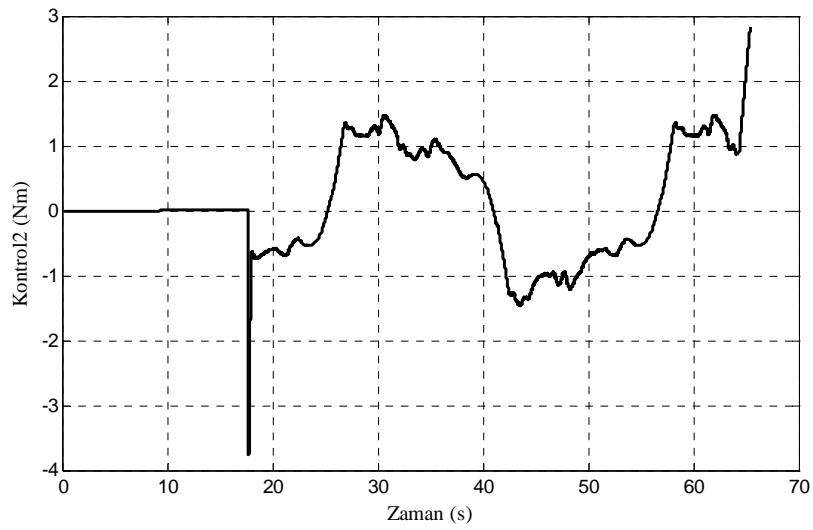
Şekil 9.21a'da ise 3. eksen genliği 5, frekansı 0.2rad/sn olan bir sinüs işareti izlettirildiğinde hedef ve eksenin konumu, Şekil 9.21b'de hata, Şekil 9.21c'de kontrol işareti verilmiştir.



(a) 2. eksenin hedef ve gerçek konumu

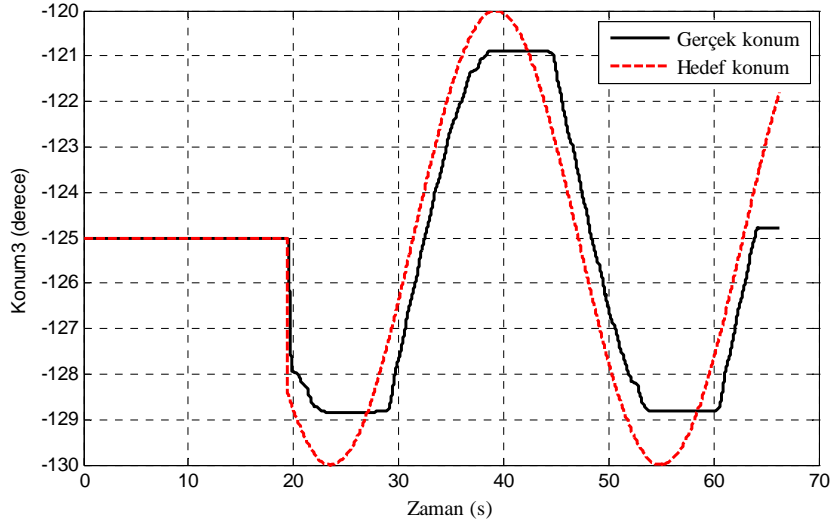


(b) 2. eksenin konum hatası

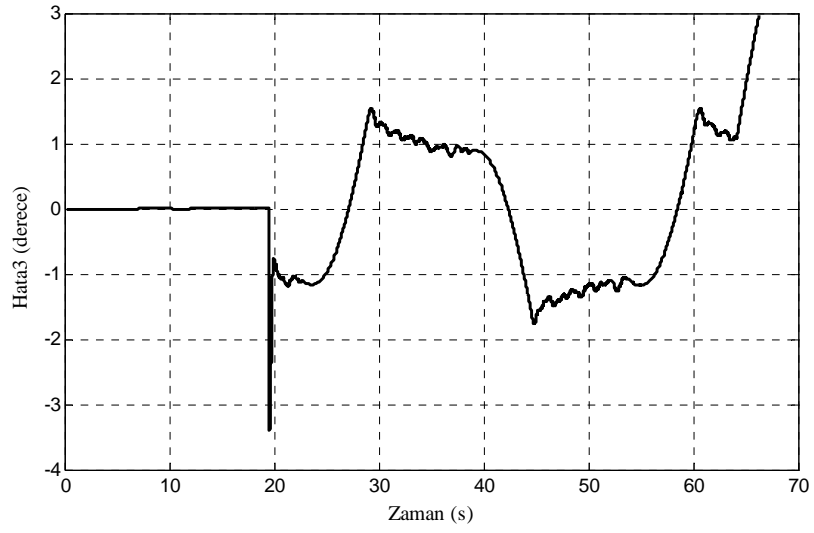


(c) 2. eksenin kontrol işareti

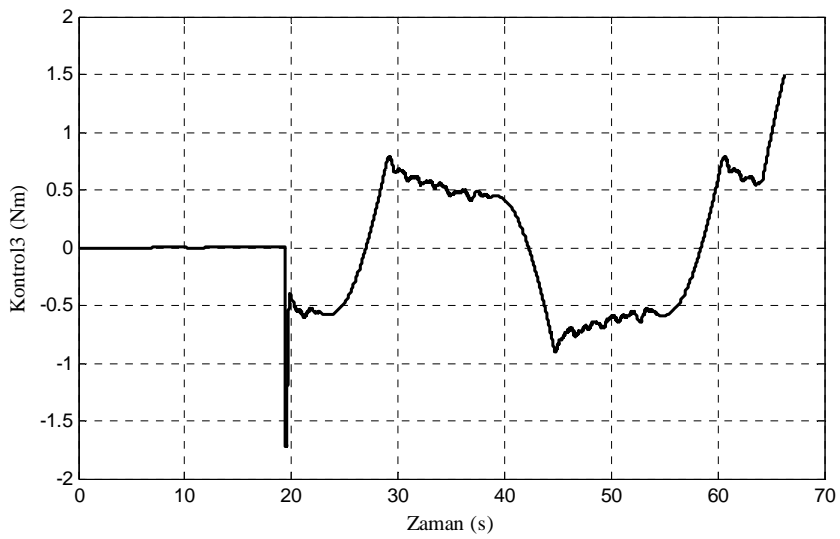
Şekil 9.20 PD kontrolör ile sinüzoidal yörünge takibinde 2. eksen için deney sonuçları



(a) 3. eksenin hedef ve gerçek konumu



(b) 3. eksenin konum hatası



(c) 3. eksenin kontrol işareti

Şekil 9.21 PD kontrolör ile sinüzoidal yörünge takibinde 3. eksen için deney sonuçları

9.4.4 Deney sonuçlarının yorumlanması

1. eksen için hedef 18s.' de verilmektedir. 2. eksen için hedef 17.6s.' de verilmektedir. 3. eksen için hedef 19.5s.' de verilmektedir. Her üç eksen de kısa sürede yörüngeye oturmaktadır. Hata sinüslerin maksimum ve minimum geçişlerinde en yüksek değere ulaşmaktadır. Yerçekimi etkisini olduğu 2 ve 3. eksenlerde kontrol işaretlerinde bu tepe geçişlerinde çatırdama görülmektedir.

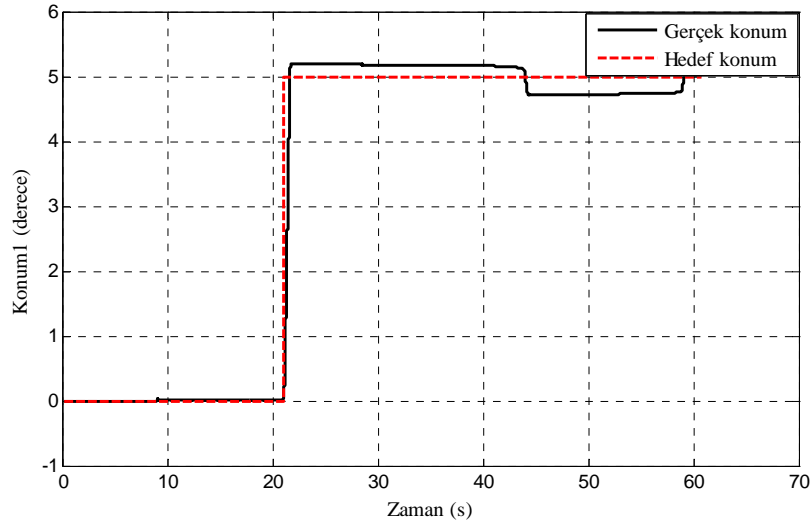
9.5 PID Kontrol ile Deney Sonuçları

Şekil 9.13'de verilen şema kullanılarak PID kontrol gerçekleştirilmiştir.

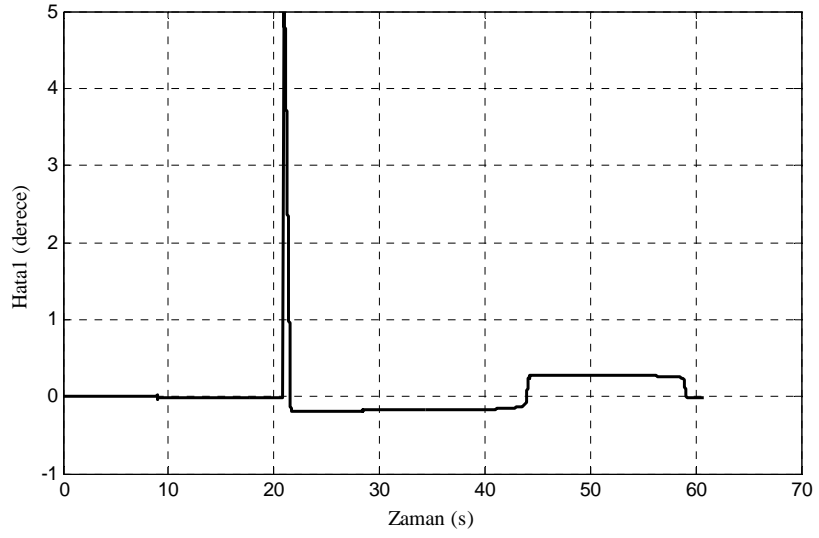
9.5.1 Eksenler 5° döndürüldüğünde deney sonuçları

Şekil 9.22a 1. eksen 5° döndürüldüğünde hedefi ve eksenin konumunu, Şekil 9.22b hatayı, Şekil 9.22c kontrol işaretini göstermektedir.

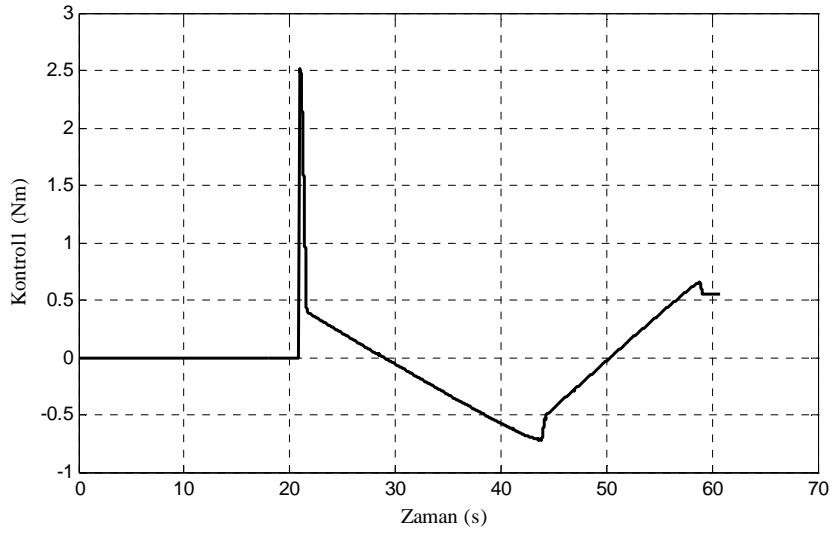
Şekil 9.23a'da 2. eksen 5° döndürüldüğünde hedef ve eksenin konumu, Şekil 9.23b hata, Şekil 9.23c kontrol işareti verilmiştir. Şekil 9.24a ise 3. eksen 5° döndürüldüğünde hedefi ve eksenin konumunu, Şekil 9.24b hatayı, Şekil 9.24c kontrol işaretini göstermektedir.



(a) 1. eksenin hedef ve gerçek konumu

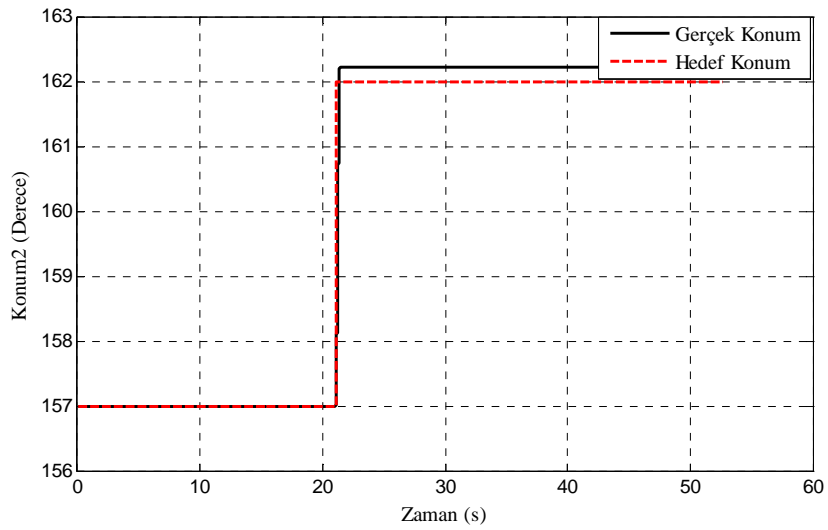


(b) 1. eksenin konum hatası

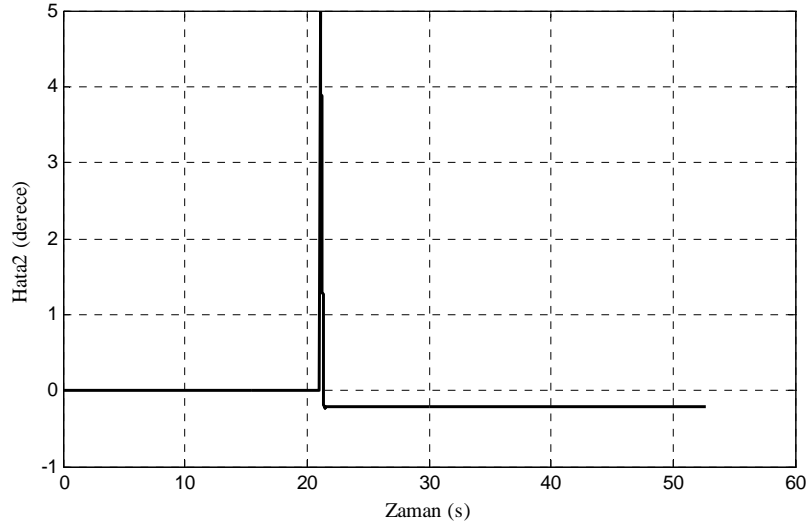


(c) 1. eksenin kontrol işareti

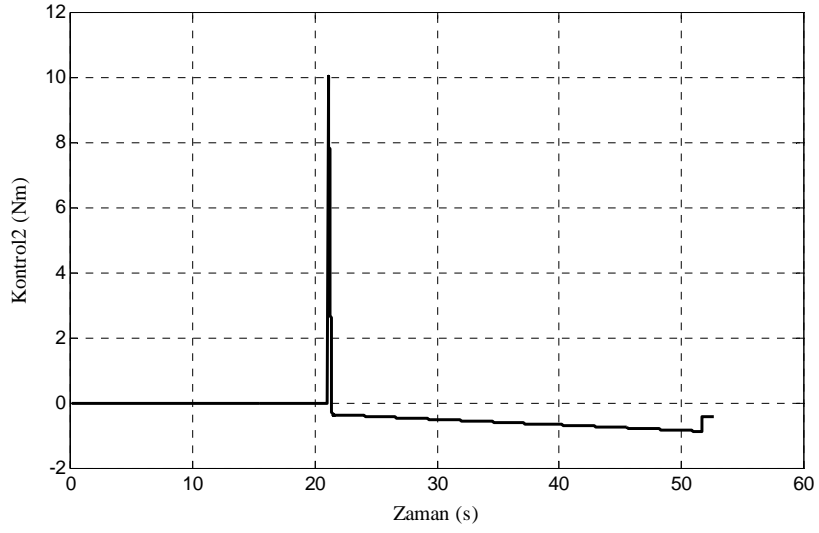
Şekil 9.22 PID kontrolör ile 5° 'lik dönme durumunda 1. eksen için deney sonuçları



(a) 2. eksenin hedef ve gerçek konumu

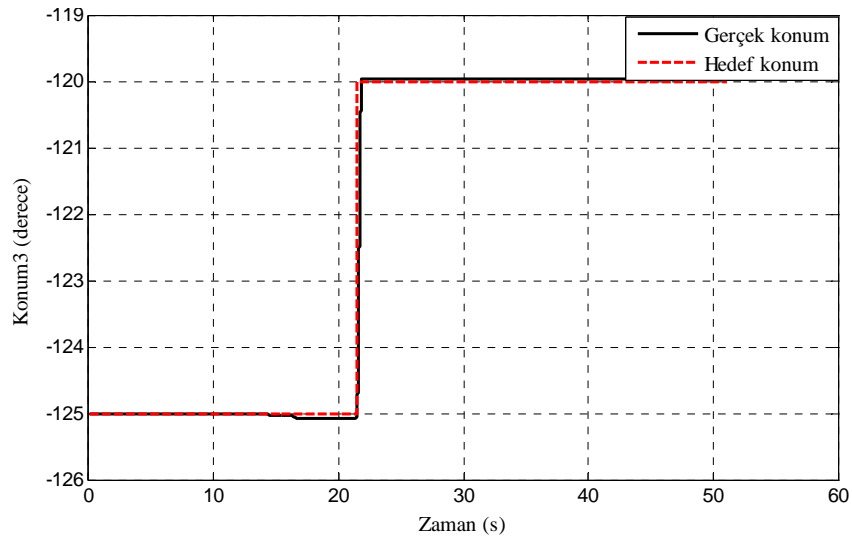


(b) 2. eksenin konum hatası

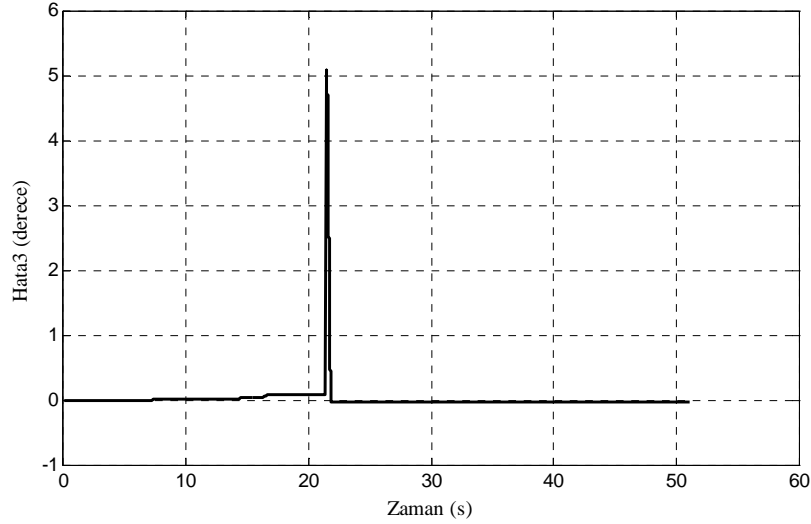


(c) 2. eksenin kontrol işareti

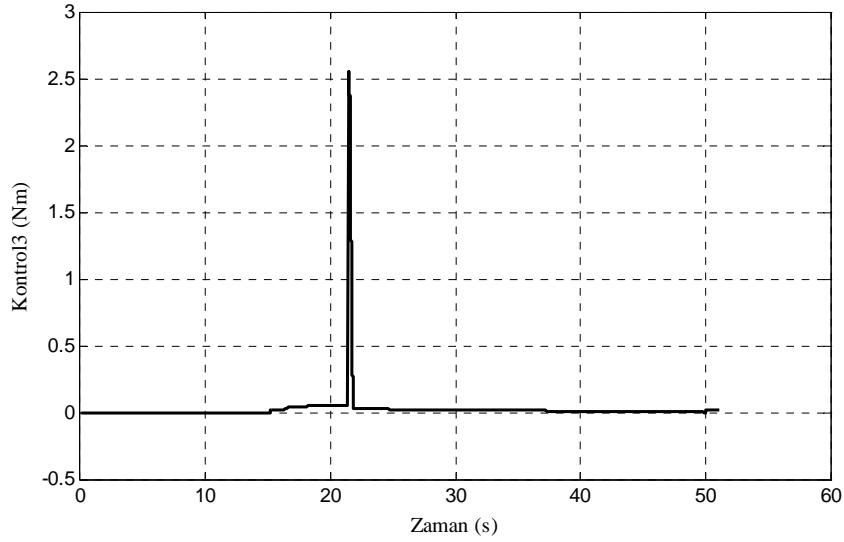
Şekil 9.23 PID kontrolör ile 5° 'lik dönme durumunda 2. eksen için deney sonuçları



(a) 3. eksenin hedef ve gerçek konumu



(b) 3. eksenin konum hatası



(c) 3. eksenin kontrol işareti

Şekil 9.24 PID kontrolör ile 5°'lik dönme durumunda 3. eksen için deney sonuçları

9.5.2 Deney sonuçlarının yorumlanması

1. eksen için fren 10s.'de kaldırılmakta ve hedef 22s.' de verilmektedir. 1. eksen 26.5s.'de hedefe 0.3 hata ile ulaşmakta, integratörün etkisiyle hata 41s.' de 0.075'e düşmektedir. 0.075°'lik sürekli durum hatası kalmaktadır. 2. eksen için hedef 19s.' de verilmektedir. 2. eksen 0.3s.'de hedefe ulaşmaktadır. 0.236°'lik sürekli durum hatası kalmaktadır. 3. eksen için ise hedef 21.5s.' de verilmektedir. 3. eksen 0.33s.'de hedefe ulaşmaktadır. 0.03°'lik sürekli durum hatası kalmaktadır. Kontrol işaretlerinde çatlama görülmemektedir.

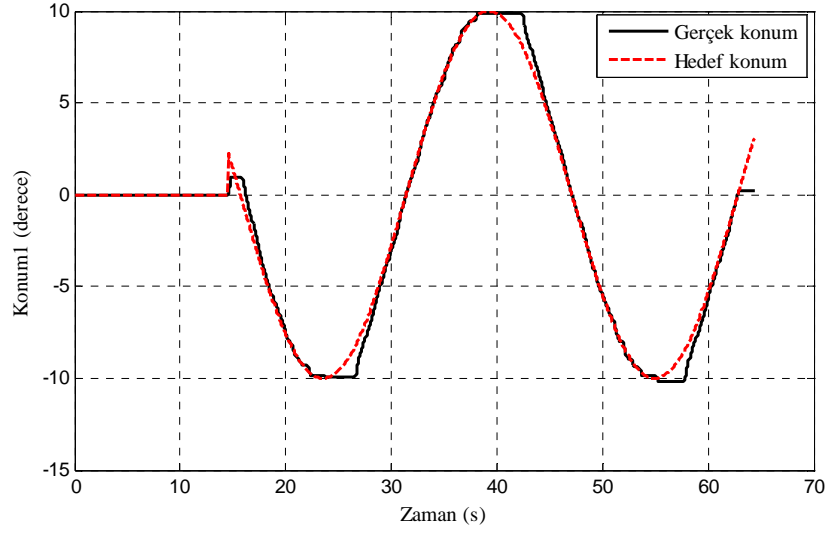
9.5.3 Sinüzoidal yörünge takibi için deney sonuçları

Şekil 9.25a 1. eksen genliği 10, frekansı 0.2rad/sn olan bir sinüs işareti izlettiğinde hedefi

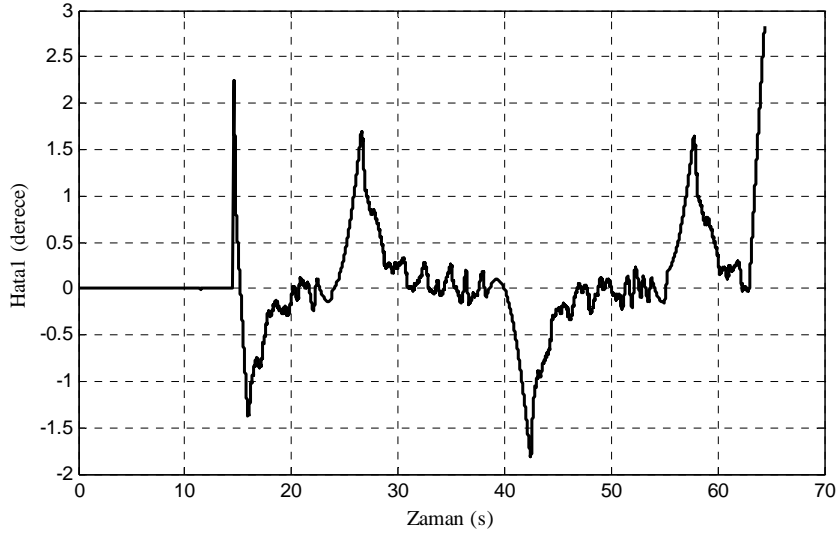
ve eksenin konumunu, Şekil 9.25b hatayı, Şekil 9.25c kontrol işaretini göstermektedir.

Şekil 9.26a'da 2. eksen genliği 5, frekansı 0.2rad/sn olan bir sinüs işareti izlettirildiğinde hedef ve eksenin konumu, Şekil 9.26b'de hata, Şekil 9.26c'de kontrol işareti sunulmuştur.

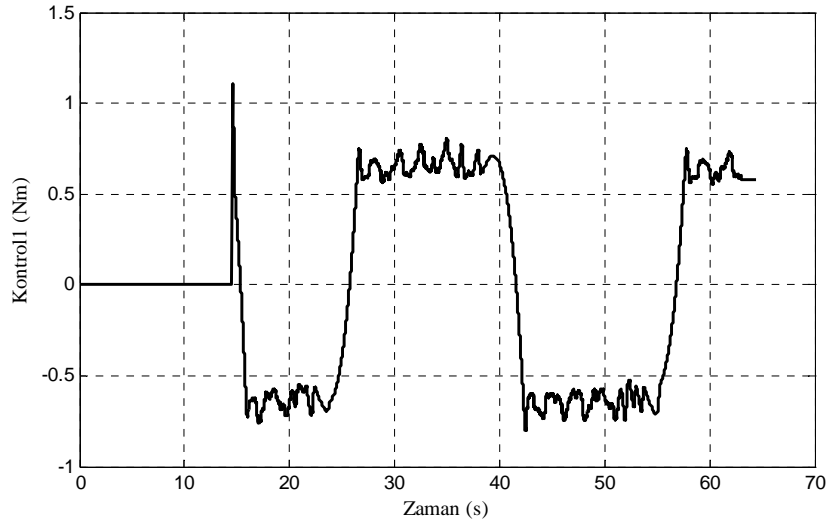
Şekil 9.27a 3. eksen genliği 5, frekansı 0.2rad/sn olan bir sinüs işareti izlettirildiğinde hedefi ve eksenin konumunu, Şekil 9.27b hatayı, Şekil 9.27c kontrol işaretini göstermektedir.



(a) 1. eksenin hedef ve gerçek konumu

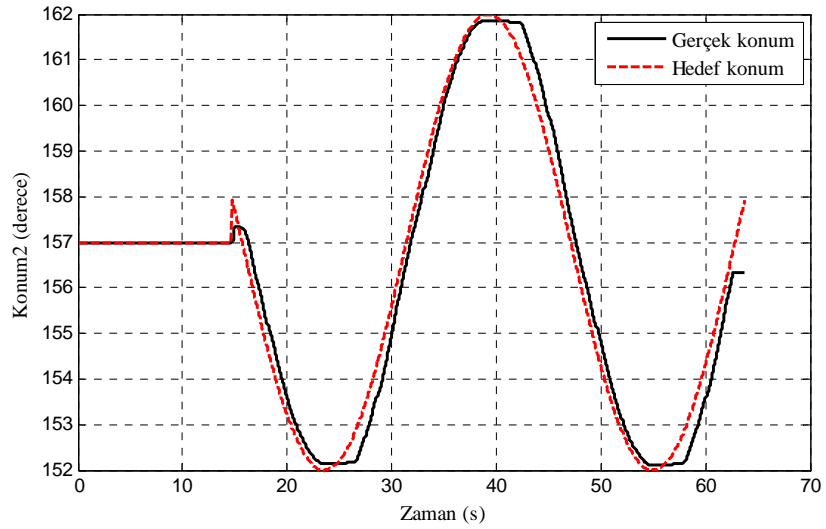


(b) 1. eksenin konum hatası

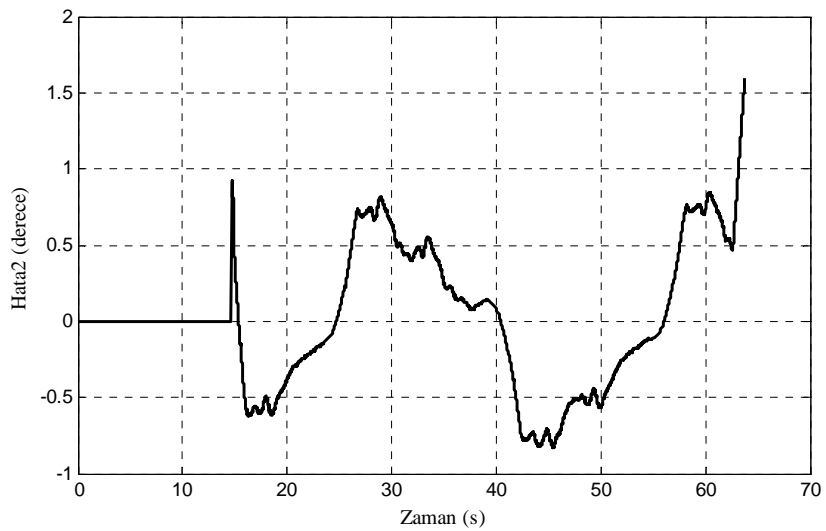


(c) 1. eksenin kontrol işareti

Şekil 9.25 PID kontrolör ile sinüzoidal yörünge takibinde 1. eksen için deney sonuçları



(a) 2. eksenin hedef ve gerçek konumu

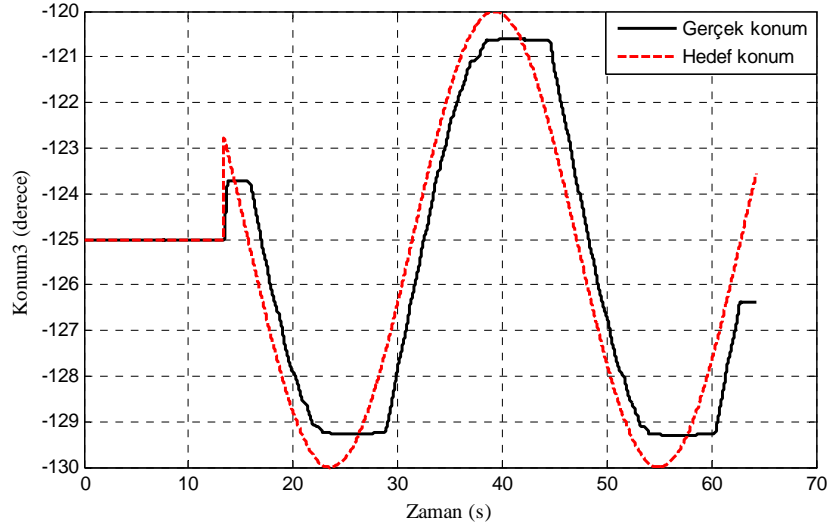


(b) 2. eksenin konum hatası

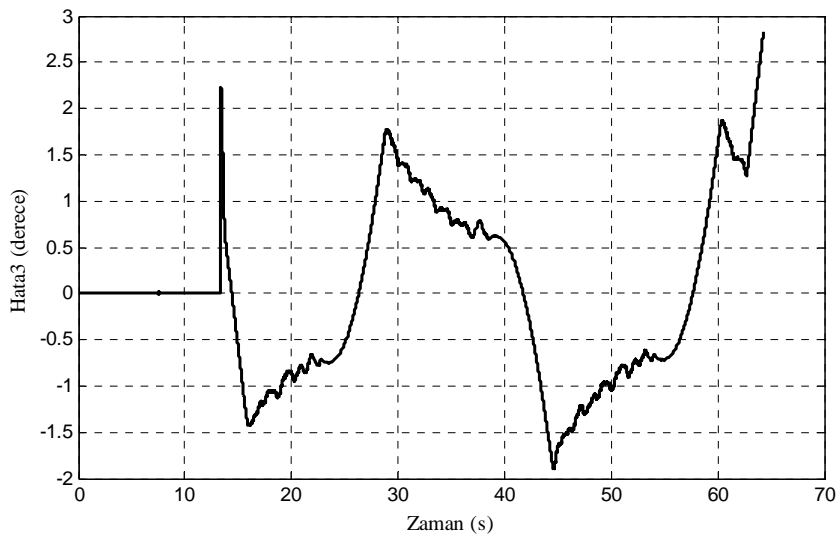


(c) 2. eksenin kontrol işareti

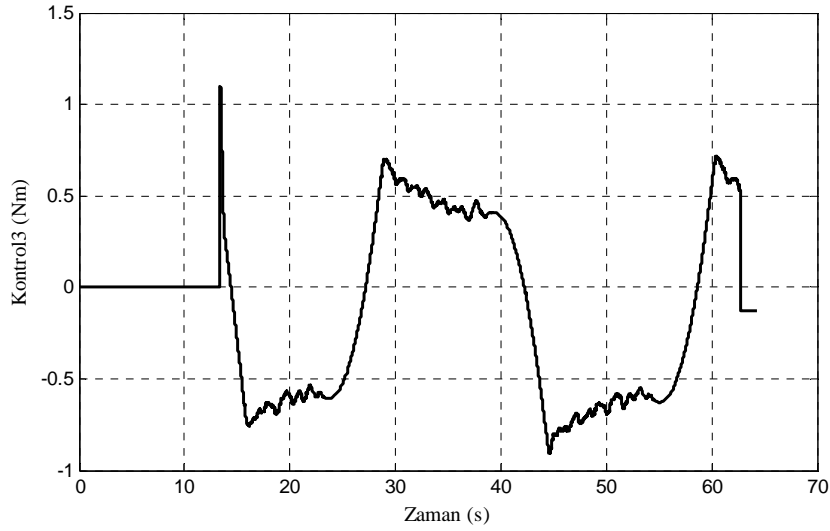
Şekil 9.26 PID kontrolör ile sinüzoidal yörünge takibinde 2. eksen için deney sonuçları



(a) 3. eksenin hedef ve gerçek konumu



(b) 3. eksenin konum hatası



(c) 3. eksen kontrol işareti

Şekil 9.27 PID kontrolör ile sinüzoidal yörünge takibinde 3. eksen için deney sonuçları

9.5.4 Deney sonuçlarının yorumlanması

1. eksen için hedef 14.5s.' de verilmektedir. 2. eksen için hedef 14.8s.' de verilmektedir. 3. eksen için hedef 13.5s.' de verilmektedir. Her üç eksen de kısa sürede yörüngeye oturmaktadır. 1. ekseninde 2.5° 'lik aşım meydana gelmektedir. Hata sinüslerin maksimum ve minimum geçişlerinde en yüksek değere ulaşmaktadır. Yerçekimi etkisini olduğu 2 ve 3. eksenlerde kontrol işaretlerinde bu tepe geçişlerinde çatırdama görülmektedir.

9.6 Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

5° 'lik dönme hareketi için elde edilen deney sonuçlarından elde edilen grafikler incelendiğinde şu sonuçlar elde edilmektedir:

Çizelge 9.3 Deney sonuçlarının karşılaştırılması

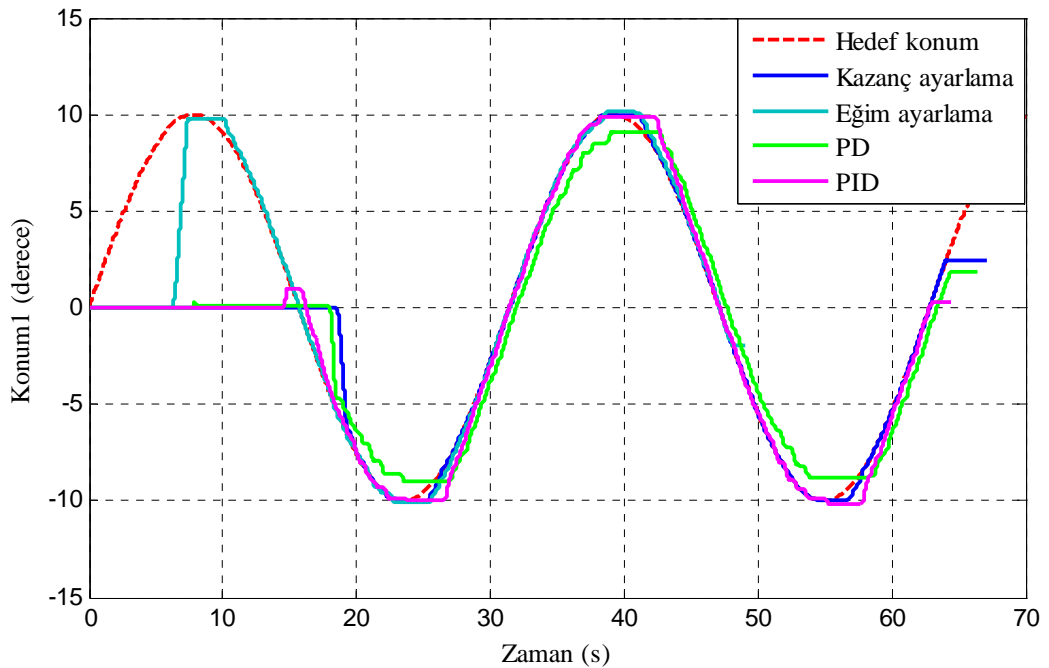
Eksen	Düzeltilici kontrol kazancının bulanık mantık ile ayarlanması			Kayma yüzeyi eğiminin bulanık mantık ile ayarlanması			PD Kontrol			PID Kontrol		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
e_s	0.0085	0.043	0.057	0.05	0.015	0.1	0.5	0.5	0.1	0.075	0.236	0.03
Aşma	-	-	-	-	-	0.5	-	0.5	0.2	0.18	0.2	0.1
t_s (s)	1.6	1.53	0.28	1	0.65	3.6	0.5	0.5	0.4	19	0.3	0.33

Bu sonuçlara göre hata oranları önerilen ilk yöntem olan düzeltici kontrol kazancının bulanık mantık ile ayarlanması durumunda diğer yöntemlerden daha düşüktür. Hata oranının düşük olmasının yanı sıra aşma meydana gelmemesi de bu yöntemin artısıdır. Kayma yüzeyi eğiminin bulanık mantık ile ayarlanması durumundaki hata oranları da 3. eksen dışında PD ve PID kontrolden daha düşüktür. Düzeltici kontrol kazancının bulanık mantık ile ayarlanması durumunda sürekli duruma ulaşma zamanı diğerlerinden biraz daha uzundur.

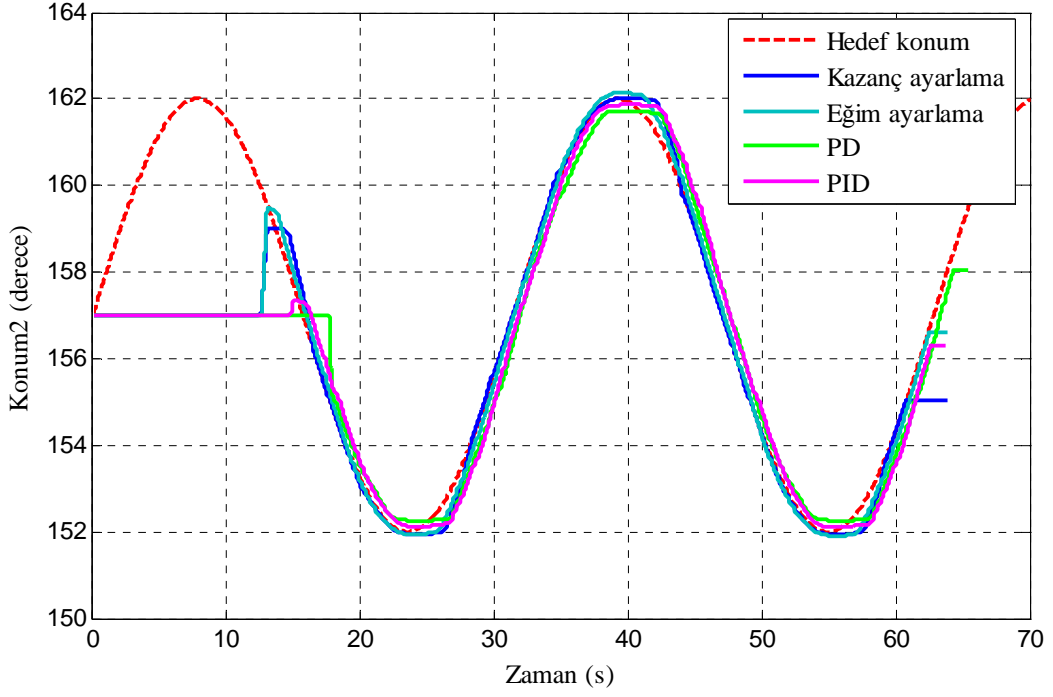
Sinüzoidal yörünge takibi için dört yöntemden elde edilen sonuçlar incelendiğinde (Şekil 9.28a) 1. eksen için en kötü yörünge takibinin PD ile gerçekleştiği, önerilen iki yöntemin yakın sonuçlar verdiği gözlenmektedir. Grafikler incelenirken frenin hep aynı anda kaldırılmadığı göz önünde bulundurulmalıdır.

2. eksen için ise Şekil 9.28b incelendiğinde en kötü yörünge takibinin PD ile gerçekleştiği, önerilen iki yöntemin yakın sonuçlar verdiği ancak kazanç ayarlamada daha az aşım olduğu fark edilmektedir.

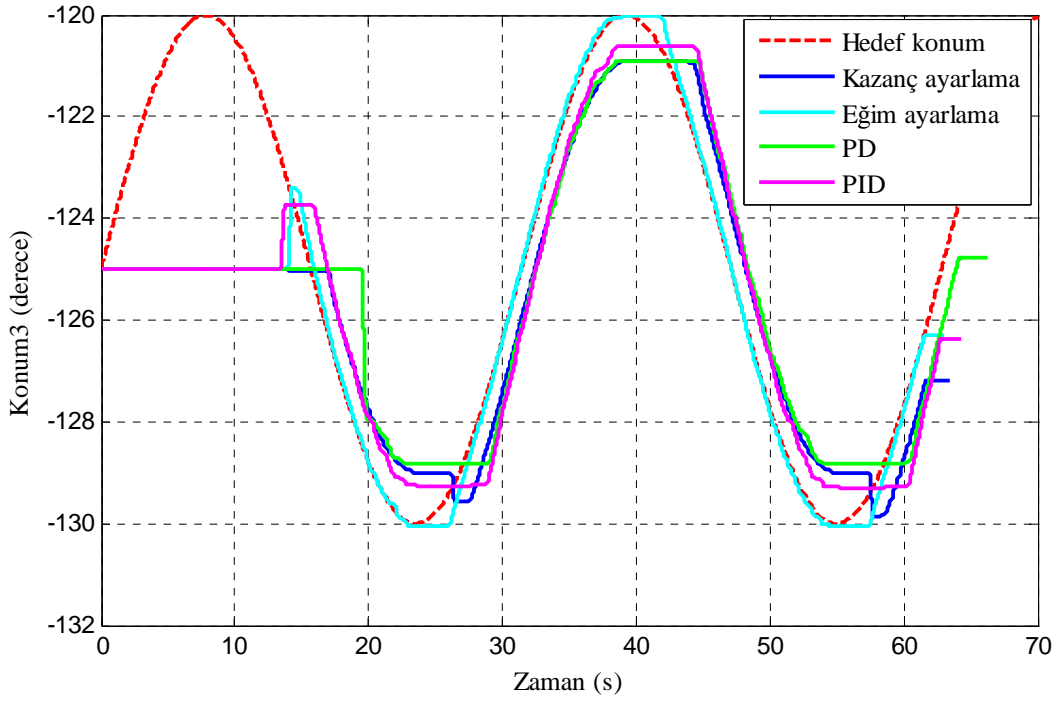
3. eksen için sonuçlar Şekil 9.28c’de verilmiştir ve yine en kötü sonuçlar PD kontrol ile elde edilmiştir. En iyi sonuç ise kayma yüzeyi eğiminin bulanık mantık ile ayarlanması durumunda sağlanmıştır.



(a) 1. eksen için



(b) 2. eksen için



(c) 3. eksen için

Şekil 9.28 Deney sonuçlarının karşılaştırılması

SONUÇ

Kayan kipli kontrolün bulanık mantık veya Yapay Sinir Ağları ile birleştirilerek kullanılması hala literatürde üzerinde çok çalışılan konulardan biridir.

Bu tez çalışmasında, akıllı kontrol yöntemleri olarak nitelendirilen Yapay Sinir Ağları, bulanık mantık ve kayan kipli kontrol kullanılarak robotikte en çok çalışılan konulardan biri olan yörünge takibini etkin olarak gerçekleştirmek için iki yeni dayanıklı kontrol yöntemi geliştirilmiştir.

Öncelikle robot yörünge takibi konusunda literatürde yapılmış çalışmalar hakkında bilgi verilmiş ve bu tezde kullanılan yöntemleri ele alan çalışmalar incelenmiştir. Ardından hedeflenen yöntemlerin geliştirilmesinde kullanılacak olan kayan kipli kontrol, bulanık mantık ve Yapay Sinir Ağları açıklanmıştır.

Dayanıklı kontrolör oluşturabilmek için belirsizlik sınırını bilmek gerekir. Bu sınırı pratik uygulamalarda belirlemek zordur ve genellikle belirsizlik sınırı dayanıklı kararlılığı sağlamak için yeterince büyük seçilir. Ancak büyük kazanç, kontrolde önemli bir çatlama neden olacaktır. Öte yandan, eğer sınır çok küçük seçilirse dayanıklı kararlılık garanti edilemez.

Geliştirilen yöntemlerin ilkinde düzeltici kontrol kazancı bulanık mantık ile hesaplanmıştır. İkinci olarak bulanık mantık kayma yüzeyi eğimini ayarlamak için kullanılmıştır. Her iki yöntem için hazırlanan programların akış diyagramları sunulmuştur.

Önerilen yöntemin en önemli avantajı sistem modeline ihtiyaç duymamasıdır.

Her iki kontrol yönteminde de eşdeğer kontrolü hesaplamak için radyal temelli fonksiyonlu yapay sinir ağı kullanılmıştır. Radyal temelli ağın ağırlıkları sistem durumları kayma yüzeyini kesip üzerinde salınacak şekilde adaptif bir algoritma ile değiştirilmektedir. Adaptif eğitim algoritması Lyapunov kararlılık analizine dayalı olarak oluşturulmuştur. Böylece belirsizliklerin var olması durumunda da kapalı çevrim sisteminin kararlılığı garanti edilmiştir.

Kontrol yöntemleri öncelikle 3 eksenli scara robot üzerinde simüle edilmiştir. Simülasyonlar hem sabit bir yörünge hem de sinüzoidal yörüngelerde gerçekleştirilmiştir. Sürtünme ve bozucu kuvvetlerin varlığında robotun istenen yörüngeyi etkin bir şekilde takip ettiği görülmüştür. Radyal temelli ağın eşdeğer kontrolü hesaplamada ne derece etkin olduğunu test etmek amacıyla aynı simülasyonlar hata geriye yayılım algoritması ile eğitilen çok katmanlı bir algılayıcı ile yapılmıştır. Ayrıca eşdeğer kontrol klasik olarak hesaplanarak simülasyonlar

yapılmıştır.

Sürekli durum hatasının bu çalışmada önerilen yöntemde diğer yöntemlere göre çok düşük olduğu görülmüştür. Aşma eşdeğer kontrolün klasik olarak hesaplanmasından daha yüksek olmasına rağmen çok katmanlı algılayıcı kullanıldığı durumdan daha düşüktür. Sürekli duruma ulaşma süresinin önerilen yöntemde az da olsa yüksek olduğu görülmektedir.

Önerilen yöntem ile elde edilen eşdeğer kontrol ile klasik yöntemle elde edilen eşdeğer kontrolün şekilleri oldukça yakındır. Tek bir eşdeğer kontrol çözümü olmadığı da göz önüne alınırsa önerilen yöntemin etkin bir kontrolör olacağı sonucuna varılabilir.

Ayrıca önerilen iki yöntem de karşılaştırılmış, iki yöntem arasındaki en önemli farkın kontrol işaretlerinde olduğu görülmüştür. Kayma yüzeyinin eğiminin bulanık mantık ile ayarlanması durumunda kontrol değeri çok daha düşüktür. Ancak kontrol işaretleri düşük olmasına rağmen çatırdama bulunmaktadır.

Kontrol yöntemlerinin endüstriyel tipte bir robot üzerinde test edilebilmesi için manutec-r15 robotun dinamik modeli hazırlanmıştır. Robotun parametreleri, sürtünme katsayıları çizelgelerde sunulmuştur. İki farklı sürtünme modeli denenmiş ve daha iyi sonuç veren model ile elde edilen simülasyon sonuçları verilmiştir. Yöntemler, robotun 5° lik bir dönme hareketi yapması ve sinüzoidal bir yörüngeyi izlemesi olmak üzere iki farklı hareket yapması durumunda simüle edilmiştir.

Geliştirilen kontrol yöntemlerinin test edilebilmesi için 6 eksenli endüstriyel bir robot olan manutec-r15'in sürücü ve kontrol sistemi yeniden oluşturulmuştur, robot çalışır hale getirilmiştir.

Hem geliştirilen kontrol yöntemleri hem de klasik PD ve PID kontrolör robot üzerinde test edilmiştir. Bu testler yine robotun 5° lik bir dönme hareketi yapması ve sinüzoidal bir yörüngeyi izlemesi olmak üzere iki farklı hareket yapması durumunda gerçekleştirilmiştir.

Robot gerçekleştirilen kontrol yöntemleri ile hedeflenen yörüngeyi etkin bir şekilde izlemiştir.

Her iki yönteminde klasik PD ve PID kontrole göre daha düşük hata oranları verdiği görülmüştür. Kontrol işaretlerinde çatırdama yoktur. PD kontrol ile önerilen kontrol yöntemleri arasında 1. linkte çok büyük fark gözlenmemekle beraber yerçekimi etkisi ile çalışma zamanı boyunca sistemde oluşan değişimlerle önerilen yöntemin daha etkili bir çözüm ürettiği deney sonuçları ile izlenmiştir. PID kontrolde integratör etkisi ile bir süre sonra hata azalmakla birlikte bu sonuç bile önerilen yöntemlerdeki düzeye inmemektedir.

Hedeflenen kontrol yöntemlerinin robotların yörünge takip görevini etkin bir şekilde gerçekleştirmesini sağladığı, endüstriyel robotlar için de uygulanabilir olduğu hem simülasyon hem de deney sonuçları ile görülmüştür.

Önerilen sistemin dezavantajı klasik yöntemlerden biraz daha karmaşık olmasıdır. Ancak daha hassas yörünge takibi gerçekleştirmek için akıllı kontrol yöntemleri ile çalışmak gerektiği açıktır.

Kullanılan robot oldukça eskidir. Uzun süre kullanılmadan kalmış ve bu tez çalışması sırasında çalışır hale getirilmiştir. Robot her devreye alındığında eksenlerin başlangıç konumları farklı olmaktadır. Dolayısıyla daha yeni robot sistemlerinde önerilen yöntem çok daha iyi sonuçlar verebilir.

Bu çalışmada önerilen yöntemlerin kullanıldığı çalışmalar göz önüne alındığında önerilen kontrol yöntemlerinin orijinal olduğu açıktır. Ama benzer tarzdaki çalışmalar incelendiğinde kayan kipli kontrol ile bulanık Yapay Sinir Ağlarının birleştirildiği görülmektedir. Bu tez çalışmasının literatürdeki bu çalışmalardan diğer bir farkı ise endüstriyel tipte bir robota uygulanmasıdır.

Önerilen kontrol yöntemi sadece sürücünün tork modunda değil, PID etkileri minimum hale getirilerek hız modunda da denenmiştir. Hız modunda hata oranlarının daha düşük olduğu görülmüştür. Bu sonuç önerilen yöntemle PID ilavesinin çok daha iyi yörünge takibi sonuçları vereceğini göstermiştir.

Ayrıca önerilen iki yöntem birleştirilerek simülasyon çalışmaları yapılmış. Ancak her iki yöntemin tek tek kullanıldığı duruma göre iyi sonuçlar elde edilememiştir.

Kullanılan bulanık mantık adaptif hale getirmek, farklı tipte bulanık çıkarımlar kullanmak ve sisteme PID eklemek bu konuda yapılabilecek çalışmalardan bazılarıdır.

KAYNAKLAR

Abdelhameed, M.M., (2004), "Enhancement of Sliding Mode Controller by Fuzzy Logic with Application to Robotic Manipulators", *Mechatronics* 15, 439-458.

Acosta, L., Marichal, G.N., Moreno, L., Rodrigo, J.J., Hamilton, A., Mendez, J.A., (1999), "A Robotic System Based on Neural Network Controllers", *Artificial Intelligence in Engineering* 13, 393-398.

Başbuğ, M., (1995), *Bulanık Adaptif Kayan Kipli Robot Kontrolü*, Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.

Bekit, B.W., Whidborne J.F. ve Seneviratne L.D., (1997), "Fuzzy Sliding Mode Control for a Robot Manipulator". *IEEE Int. Symp. on Computational Intelligence in Robotics and Automation (CIRA'97)*, Monterey.

Bestaioui, Y. ve Benmerzouk, D., (1993), "Analysis of the Robotic Computed Torque Technique", *Systems, Man and Cybernetics, 'Systems Engineering in the Service of Humans' Conference Proceedings*.

Cervantes, I. ve Alvarez-Ramirez, J., (2001), "On the OID Tracking Control of Robot Manipulators", *Systems & Control Letters* 42, pages 37-46.

Chen, C. ve Lin, C., (2002), "A Sliding Mode Control Approach to Robotic Tracking Problem", *15th Triennial World Congress, Barcelona, Spain*.

Choi, S. ve Kim, J., (1997), "A Fuzzy-Sliding Mode Controller for Robust Tracking of Robotic Manipulators", *Mechatronics Vol.7 No:2*, 199-216.

Cleary, K., Uebel, M. ve Minis, J., (1992), "Improved Computed Torque Control for Industrial Robots", *Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Fransa*.

Craig, J. J., (1986), *Introduction to Robotics*. Addison-Wesley Publishing.

Daemi, M., (1998), *Modellierung und Identifikation der Dynamik von Industrierobotern für den Einsatz in Regelungen*. Fortschritt-Berichte VDI-Verlag, Duesseldorf, Germany.

Derbel, N. ve Alimi, A.M., (2006), "Design of a Sliding Mode Controller by Fuzzy Logic", *International Journal of Robotics and Automation*", Vol. 21, No.4.

Edwards, C., Spurgeon, K., (1998). *Sliding Mode Control*. Taylor&Fransis Ltd.

Eroğlu, E, Cansever, G., Küçükdemiral, L.B. ve Dalcı, B., (2004), "PD, PID and Fuzzy Logic Control of Three Link Planar Arm", *Proceedings of the Fourth International Workshop on Robot Motion and Control*.

Ertuğrul, M., ve Kaynak, O., (1997), "Neural Network Adaptive Sliding Mode Control and Its Application to Scara Type Robot Manipulator", *IEEE International Conference on Robotics and Automation, New Mexico*.

Ertuğrul, M.,ve Kaynak, O., (1998), "Neural Computation of the Equivalent Control in Sliding Mode for Robot Trajectory Control Applications", *IEEE International Conference on Robotics & Automation, Belgium*.

Ertuğrul, M.,ve Kaynak, O., (2000), "Neuro Sliding Mode Control of Robotic Manipulators",

Mechatronics 10, 239-263.

Gökhan Ak A., Cansever G., (2006), “İki Linkli Robot Manipülâtörün Yörünge Kontrolü İçin RTF Nöral Ağa Dayalı Bulanık Kayan Modlu Kontrolör”. Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı (TOK’06,) 6-8 Kasım, Ankara.

Gökhan Ak A., Cansever G., (2006), “İki linkli robot manipülâtörün adaptif radyal temelli fonksiyonlu nöral ağa dayalı kayan modlu kontrolü”. Akıllı Sistemlerde Yenilikler ve Uygulamaları Sempozyumu-YTÜ, 31 Mayıs–2 Haziran, İstanbul.

Gökhan Ak A., Cansever G., (2008), “Adaptive Neural Network Based Fuzzy Sliding Mode Control of Robot Manipulator”, Robot Manipulators, ISBN 978-953-7619-17-6, InTech Education and Publishing, 201-210.

Gökhan Ak A., Cansever G., (2006), “Fuzzy Sliding Mode Controller with RBF Neural Network for Robotic Manipulator Trajectory Tracking”, Lecture Notes in Control and Information Sciences. ISSN 0170-8643, Volume 344/2006, 527-532.

Gökhan Ak, A., Cansever, G., (2006), “Three Link Robot Control with Fuzzy Sliding Mode Controller Based on RBF Neural Network”, CCA/CACSD/ISIC Conference, 4-6 Ekim Münih, Almanya.

Grotjahn, M., Daemi, M. ve Heimann, B., (2001), “Friction and Rigid Body Identification of Robot Dynamics”, International Journal of Solids and Structures 38, 1889-1902.

Guo, Y. ve Woo, P., (2003), “An Adaptive Fuzzy Sliding Mode Controller for Robotic Manipulators”, IEEE Transaction on System, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans, Vol.33, No.2.

Gupta, M., Jin, L. ve Homma, N., (2003), Static and Dynamic Neural Networks. Wiley-Interscience. A John Wiley&Sons, Inc.

Ha, Q.P., Rye, D.C. ve Durrant-White, H.F., (1999), “Fuzzy Moving Sliding Mode Control with Application to Robotic Manipulators”, Automatica 35, 607-616.

Ha, Q.P., Nguyen, Q.H., Rye, D.C. ve Durrant-White, H.F., (2001), “Fuzzy Sliding Mode Controllers with Applications”, IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol.48, No.1.

Hardy, R., (1971), Multiquadratic Equations of Topography and Other Irregular Surfaces. J Geophys Res., 76:1905-15.

Ham, F.M. ve Kostanic, I., (2001), Neurocomputing for Science&Engineering. Mc Graw-Hill Inc.

Haykin, S., (1999), Neural Networks, Prentice Hall, New Jersey.

Huang, S., Huang, K. ve Chiou, K., (2001), “Development and Application of a Novel Radial Basis Function Sliding Mode Controller”, Mechatronics 13, 313-329.

Hung, J.Y., Gao, W. ve Hung, C., (1993), “Variable Structure Control: A Survey”, IEEE Transaction on Industrial Electronics, 40, No.1, 2-22.

Javaheri, H. ve Vossoughi, G.R., (2005), “Sliding Mode Control with Online Fuzzy Tuning Application to a Robot Manipulator”, IEEE International Conference on Mechatronics & Automation, Niagara Falls, Canada.

Katic, D. ve Vukobratovic, M., (2003), Intelligent Control of Robotic System, Kluwer

Academic Publishers, London.

Kecman, V., (2001), *Learning and Soft Computing, Support Vector Machines, Neural Network, and Fuzzy Logic Models*, MIT Press.

Kumbla, K.K., Moya, J. ve Baird, R., (1993), *Fuzzy Logic and Control*. Printice-Hall.

Lee, M. ve Choi, Y., (2004), "An Adaptive Neurocontroller Using RBFN for Robot Manipulators", *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, Vol.51, No.3.

Lee, M. ve Choi, Y., (2000), "A Robust Neural Controller for Underwater Robot Manipulators", *IEEE Transaction on Neural Networks*, Vol. 11, No:6.

Lewis, F., Yeşildirek, A. ve Liu, K., (1996), "Multilayer Neural-Net Robot Controller with Guaranteed Tracking Performance", *IEEE Transaction on Neural Networks*, Vol 7, No:2.

Li, Yimin, I-İo, Y. ve Chua, C., (2000), "Model-Based PID Control of Constrained Robot in a Dynamic Environment with Uncertainty", *IEEE International Conference on Control Applications*, Alaska.

Mkrttchian, V. ve Lazaryan, A., (2000), "Application of Neural Network in Sliding Mode Control", *International Conference on Control Applications*, Anchorage, Alaska, USA

Palaz, H., (2000), *Neuro-Fuzzy Variable Structure Control of Robotic Manipulators*, Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.

Park, J. ve Sandberg, I.O., (1991), "Universal Approximation Using Radial-Basis-Funtion Networks", *Neural Computation*, Vol.3, pp.246-257.

Patino, H.D., Carelli, R. ve Kuchen, B.R., (2002), "Neural Networks for Advanced Control of Robot Manipulators", *IEEE Transaction on Neural Networks*, Vol 13, No:2.

Poggio, T. ve Girosi, F., (1990), "Regularization Algorithms for Learning That are Equivalent to Multilayer Networks", *Science* 247, 978-982.

Powell M., (1987), "Radial Basis Functions for Multivariable Interpolation: A Review. In: Mason J.C. Cox M.G. editors, *Algorithms for Approximation*, Oxford, UK:Clarendon Press; 143-167.

Powell, M, (1992), *The Theory of Radial Functions for Multivariable Approximation in 1990*, In: Light W. editor. *Advances in Numerical Analysis*. Oxford, Oxford University Press 1992.

Praturu, S.P., (1996), *Fuzzy Logic Control for a Two Link Manipulator*, Alabama University, Huntsville.

Ross, T.J., (1995), *Fuzzy Logic With Engineering Applications*. McGraw-Hill Inc.

Özmeteler, E., (1989). *Yapay Nöral Ağlar*. Yüksek Lisans Tezi. İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul.

Saad, M., Bigras, P. ve Dessaint, L., (1994), "Adaptive Robot Control Using Neural Networks", *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, Vol.41, No:2.

Spong, M.W. ve Vidyasagar M., (1989), *Robot Dynamics and Control*, Wiley New York.

Stepanenko, Y. ve Su, C., (1993), "Variable Structure Control of Robot Manipulators with Nonlinear Sliding Manifolds", *International Journal of Control*, Volume 58, Issue 2 August

1993 , pages 285 – 300.

Sumathi, P., (2005), “Precise Tracking Control of Robot Manipulator using Fuzzy Logic”, Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Mechatronics July 10-12, Taipei, Taiwan.

Sun, W. ve Wang, Y., (2004), “An Adaptive Fuzzy Control for Robotic Manipulators”, 8th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, Kuming, China.

Sun, F.C., Sun, Z.Q. ve Feng, G., (1999), “An Adaptive Fuzzy Controller Based on Sliding Mode for Robot Manipulators”, IEEE Transaction on System, Man, and Cybernetics-Part B: Cybernetics, Vol.29.

Tsai, C., Chung, H. ve Yu, F., (2004), “Neuro-Sliding Mode Control with Its Applications to Seesaw Systems“, IEEE Transactions on Neural Networks, Vol. 15, No.1.

Utkin, V., (1977), “Variable Structure Systems with Sliding Modes”, IEEE Transaction on Automatic Control, ACC-22-2, 212-222.

Utkin, V., (1994), “Sliding Mode Control in Mechanical Systems”, Industrial Electronics, Control and Instrumentation. IECON '94.

Wai, R.J. ve Hsich, K.Y., (2002), “Tracking Control Design for Robot Manipulator via Fuzzy Neural Network”, Proceedings of the IEEE Int. Conference on Fuzzy Systems. Volume 2, pp 1422–1427.

Wincon 5.0 User Guide (2005), Document No. 1246

Ying, H., (2000), Fuzzy Control and Modeling. IEEE Press.

Zurada, J.M., (1992), Introduction to Artificial Neural Systems, West Publishing Company.

INTERNET KAYNAKLARI

[1] <http://www.turkmmo.com/felsefe-sosyoloji-psikoloji/853-3-bulanik-kontrol-sistemlerinin-flc-temel.html>

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	23.04.1972	
Doğum yeri	Elazığ	
Lise	1986-1989	Elazığ Atatürk Lisesi
Lisans	1989-1993	Fırat Üniversitesi Mühendislik Fak. Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	1994-1997	Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Müh. Anabilim Dalı

Çalıştığı kurum(lar)

1994-1995	ABH Mühendislik Ltd Şti.
1995-2000	Fırat Üniversitesi, Öğretim Görevlisi
2000-Devam ediyor	Marmara Üniversitesi, Araştırma Görevlisi