

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRONİK VE HABERLEŞME MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

DOKTORA TEZİ

**MEDİKAL AMAÇLI HAPTİK GÜDÜMLÜ EMPEDANS
KUVVET KONTROLLÜ STEWART PLATFORMU'NUN
GELİŞTİRİLMESİ VE KONTROLÜ**

Selçuk KIZIR

KOCAELİ 2012

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRONİK ve HABERLEŞME MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

MEDİKAL AMAÇLI HAPTİK GÜDÜMLÜ EMPEDANS
KUVVET KONTROLLÜ STEWART PLATFORMU'NUN
GELİŞTİRİLMESİ VE KONTROLÜ

Selçuk KİZİR

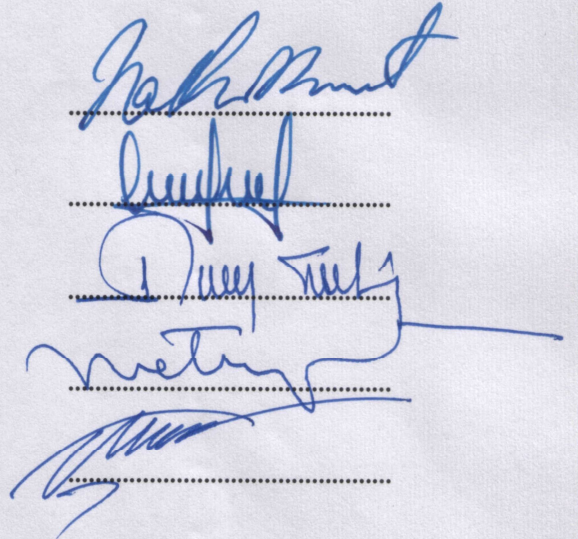
Prof.Dr. Zafer BİNGÜL
Danışman, Kocaeli Üniv.

Doç.Dr. Duygun EROL BARKANA
Jüri Üyesi, Yeditepe Üniv.

Doç.Dr. Serdar KÜÇÜK
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

Yrd.Doç.Dr. Metin AYDIN
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

Yrd.Doç.Dr. Mustafa ÇAKIR
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.



Tezin Savunulduğu Tarih: 03.12.2012

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Her alanda olduğu gibi tıp alanında da problemlerin çözümüne yönelik robotlar kullanılmaya başlanmış ve günümüzde konu üzerinde araştırmalar yoğun olarak devam etmektedir. Robotlar birçok tıbbi alanda cerrahın yeteneklerini arttırıcı, tamamlayıcı ya da cerraha yardımcı rollerde kullanılmaktadır.

Bu tez kapsamında altı serbestlik dereceli Stewart Platformu’nun robotik cerrahi alanında kullanılmak üzere haptik arayüzlü, kuvvet konum kontrollü ve kuvvet geri-beslemeli geliştirilmesi amaçlanmıştır.

Çalışmam süresince gösterdiği emek, destek ve ilgiyle çalışmanın gerçekleşmesi ve ilerlemesini sağlayan danışmanım Sayın Prof. Dr. Zafer BİNGÜL’e,

Çalışmam sırasında fikirleriyle bana yol gösteren ve destekleyen hocalarım Sayın Doç. Dr. Cüneyt OYSU, Doç. Dr. Hasan OCAK, Doç. Dr. Serdar KÜÇÜK ve Yrd. Doç. Dr. Mustafa ÇAKIR’a,

Medikal uygulamaların gerçekleştirilmesinde sağladıkları katkı ve desteklerinden dolayı üniversitemiz Beyin Cerrahisi Anabilim Dalı Başkanı Sayın Prof. Dr. Savaş CEYLAN’a ve öğretim üyelerine,

Çalışmam sırasında desteğini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili eşim Kevser KİZİR’e,

Hayatım boyunca maddi, manevi her türlü desteklerini her an bana hissettirmiş olan annem, babam ve kardeşlerime,

Sağladığı lisansüstü bursu ile çalışmalarına yaptığı katkıdan dolayı Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu – Bilim İnsanı Destekleme Birimine (TÜBİTAK-BİDEB),

“Yüksek Hassasiyetli 6 Serbestlik Dereceli Paralel Robot Uygulaması” isimli ve 107M148 numaralı projesinin çalışmama sağladığı katkıdan dolayı TÜBİTAK’a,

İçtenlikle teşekkür ederim.

Aralık - 2012

Selçuk KİZİR

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ	iv
TABLolar DİZİNİ	xi
SİMGELER DİZİNİ ve KISALTMALAR	xii
ÖZET	xv
ABSTRACT	xvi
GİRİŞ	1
1. MEDİKAL ROBOTİK	4
1.1. Robot Destekli Cerrahi	5
1.2. Tarihsel Gelişim	7
1.3. Tele-robotik Cerrahi	11
1.4. Minimal İnvaziv Cerrahi	11
1.5. Uygulama Alanları	13
1.6. Robotik Cerrahinin Sunduğu Avantaj ve Dezavantajlar	15
1.7. Haptik Sistemler	16
1.8. Özet Literatür Taraması	18
2. STEWART PLATFORM SİSTEMİ	29
2.1. Giriş	29
2.2. Sistem	32
2.2.1. Denetleyici	33
2.2.2. Eyleyiciler	34
2.2.3. Güç kaynağı	38
2.2.4. Lojik koruma devre tasarımı	39
2.2.5. Denetleyici - robot ara kartı devre tasarımı	40
2.2.6. 6 DOF USB fare	41
2.2.7. Phantom omni haptik	42
2.2.8. Kuvvet tork ölçüm sistemi	44
2.2.9. Cerrahi ekipman tutucu	45
3. ROBOT KİNEMATİĞİ VE DİNAMİĞİ	47
3.1. Giriş	47
3.2. Stewart Platformu'nun Ters Kinematik Analizi	48
3.3. İleri Kinematik	50
3.4. Jakobiyen	58
3.5. Robot Dinamiği	67
3.6. Robotun Simulink'te Modellenmesi	73
4. KONUM VE YÖRÜNGE KONTROLÜ	76
4.1. Uygulanan Kontrol Yöntemleri	76
4.1.1. PID kontrol	76
4.1.2. Kayma kipli denetim	77
4.1.3. Akıllı PID denetim	82
4.2. Robot Denetim Sisteminin Geliştirilmesi	83

4.2.1. Bacakların sıfır pozisyonuna getirilmesi ve tek bacağın konum kontrolünün gerçekleştirilmesi	83
4.2.2. Tek Eyleyici için Yapılan Çalışmaların Tüm Bacaklara Aktarılması..	87
4.3. Üst Platformun Konum ve Yönelim Kontrolü	93
4.3.1. PID denetim - deneysel Sonuçlar	95
4.3.2. Kayma kipli denetim - deneysel sonuçlar	107
4.3.3. Akıllı PI denetim - deneysel sonuçlar	113
5. KUVVET KONTROLÜ	119
5.1. Empedans Kontrol	120
5.2. Denetleyici Tasarımı	123
6. ENDOSKOP KONUMLAMA	162
6.1. Endoskopik Transsfenoidal Cerrahi	162
6.2. Stewart Platformu ile Endoskop Konumlama ve Tutma	165
6.3. Geliştirilen Sistemin Delici ve Kesici Olarak Kullanımı	171
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	173
KAYNAKLAR	177
EKLER	184
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER	203
ÖZGEÇMİŞ	204

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	İlk geliştirilen robot, “unimate”	4
Şekil 1.2.	Genel bir robot destekli cerrahi girişim	6
Şekil 1.3.	AESOP cerrahi sistemi.....	8
Şekil 1.4.	HERMES kontrol birimi	9
Şekil 1.5.	Zeus cerrahi sistemi.....	9
Şekil 1.6.	da Vinci robotik cerrahi sistemi	10
Şekil 1.7.	Minimal invaziv cerrahi ve endoskop	12
Şekil 1.8.	Medikal robotlar.....	13
Şekil 1.9.	a) Seri mekanizmalı, b) ve c) paralel mekanizmalı, d) elektro-manyetik prensiplerinde çeşitli haptik sistemler	17
Şekil 1.10.	Mikro cerrahi amaçlı tele-robotik sistem	19
Şekil 1.11.	Geliştirilen paralel cerrahi robot ve kontrolör yapısı	19
Şekil 1.12.	HIT-RAOS sistem yapısı	20
Şekil 1.13.	Diz cerrahisi amaçlı geliştirilen KPM robot	20
Şekil 1.14.	Kalça artroplastı	21
Şekil 1.15.	Rutgers Ankle rehabilitasyon amaçlı sistem yapısı	22
Şekil 1.16.	Robot destekli kırık tedavi sistemi.....	22
Şekil 1.17.	Geliştirilen robot ve uygulaması	23
Şekil 1.18.	Ana ve izleyici robot sistemi.....	24
Şekil 1.19.	Minyatür paralel robot, MARS	24
Şekil 1.20.	CRIGOS laboratuvar prototipi	25
Şekil 1.21.	Genel sistem yapısı ve geliştirilen robot	26
Şekil 1.22.	Önerilen medikal robotun genel tasarımı	27
Şekil 1.23.	OrthoRoby tasarımı ve genel sistem görünümü.....	27
Şekil 2.1.	Stewart Platformu’nun uygulama alanları: medikal, üretim ve uçuş simülatörü.....	29
Şekil 2.2.	(a) Stewart ve (b) Gough ilk tasarımları.....	30
Şekil 2.3.	Deney düzeneği	32
Şekil 2.4.	SP’nin çalışma uzayı	32
Şekil 2.5.	DS1103 sistemi bileşenleri.....	34
Şekil 2.6.	Stewart Platformu’nun bir doğrusal eyleyicisi ve içyapısı.....	34
Şekil 2.7.	DC motor modeli.....	36
Şekil 2.8.	Eyleyici ana modeli.....	37
Şekil 2.9.	DC motor alt modeli.....	37
Şekil 2.10.	Parametre kestirimi öncesi ve sonrasındaki motor yanıtı (deney-1)	37
Şekil 2.11.	Parametre kestirimi öncesi ve sonrasındaki motor yanıtı (deney-2)	37
Şekil 2.12.	Parametre kestirimi öncesi ve sonrasındaki motor yanıtı (deney-3)	38
Şekil 2.13.	Parametre kestirimi öncesi ve sonrasındaki motor yanıtı (deney-4)	38
Şekil 2.14.	Astec LPS-155 güç kaynağı	39
Şekil 2.15.	Lojik koruma devresine ait baskı devre şeması ve üç boyutlu tasarım görüntüsü	39
Şekil 2.16.	Lojik koruma devresi	40
Şekil 2.17.	Tasarlanan kartın görünümü	40

Şekil 2.18. 6 DOF fare ve hareket komutları	41
Şekil 2.19. 6 DOF hareket üreten fare arayüzü	41
Şekil 2.20. Phantom Omni haptik	42
Şekil 2.21. Phantom Omni çalışma uzayı.....	42
Şekil 2.22. Haptik yazılımının arayüzü	44
Şekil 2.23. Kuvvet/tork sensörü ve denetleyicisi	45
Şekil 2.24. Endoskop ve cerrahi ekipman tutucu	46
Şekil 3.1. SP sistemine koordinat sistemlerinin yerleşimi	48
Şekil 3.2. Sabit açı seti sistemiyle dönme işlemi	49
Şekil 3.3. Newton-Raphson nümerik iterasyon yönteminde yakınsama.....	51
Şekil 3.4. İleri kinematik testi için oluşturulan Simulink benzetim modeli	53
Şekil 3.5. Uygulanan ve ileri kinematik algoritmasıyla elde edilen yörüngelerin karşılaştırılması (deney-1).....	54
Şekil 3.6. Deney 1’deki konum hataları	54
Şekil 3.7. Uygulanan ve ileri kinematik algoritmasıyla elde edilen yörüngelerin karşılaştırılması (deney-2).....	55
Şekil 3.8. Deney 2’deki konum hataları	55
Şekil 3.9. Uygulanan ve ileri kinematik algoritmasıyla elde edilen yörüngeler - gerçek zamanlı deney 1	56
Şekil 3.10. Uygulanan ve ileri kinematik algoritmasıyla elde edilen yörüngeler - gerçek zamanlı deney 2.....	57
Şekil 3.11. Uygulanan ve ileri kinematik algoritmasıyla elde edilen yörüngeler - gerçek zamanlı deney 3.....	57
Şekil 3.12. Jakobiyen doğruluk testi için oluşturulan benzetim modeli.....	63
Şekil 3.13. Uygulanan referans yörünge (deney-1).....	63
Şekil 3.14. Uygulanan yörüngeye bağlı olarak elde edilen referans ve Jakobiyen bacak hızları (deney-1).....	64
Şekil 3.15. Referans ve Jakobiyen bacak hızlarına ait hatalar (deney-1).....	64
Şekil 3.16. Uygulanan yörüngeye bağlı olarak elde edilen referans ve Jakobiyen bacak hızları (deney-2).....	65
Şekil 3.17. Uygulanan referans yörünge – gerçek zamanlı deney 1	65
Şekil 3.18. Uygulanan yörüngeye bağlı olarak elde edilen referans ve Jakobiyen bacak hızları – gerçek zamanlı deney 1	66
Şekil 3.19. Referans ve Jakobiyen bacak hızlarına ait hatalar – gerçek zamanlı deney 1	66
Şekil 3.20. Stewart Platformu’nun bir bacağına ait kinematik ve dinamik model....	68
Şekil 3.21. Tüm sistemin dinamiğini ifade eden blok diyagramı.....	74
Şekil 3.22. Robotun Simulink benzetim modeli.....	75
Şekil 4.1. PID kontrol yapısı	77
Şekil 4.2. Kayma yüzeyi.....	78
Şekil 4.3. Kayma kipli denetimde kayma yüzeyinin yakalanması ve çatırdama	79
Şekil 4.4. DC motor alt modeli.....	80
Şekil 4.5. Tek bir bacağın kontrolü – ana simulink modeli.....	83
Şekil 4.6. Kodlayıcı alt modeli	84
Şekil 4.7. Başlangıç alt modeli	84
Şekil 4.8. Enabled subsystem alt modeli	84
Şekil 4.9. PID alt modeli	85
Şekil 4.10. PWM alt modeli	85
Şekil 4.11. Sign alt modeli	86

Şekil 4.12. DSPACE Control Desk yazılımı deney arayüzü.....	86
Şekil 4.13. Eyleyicinin sıfır pozisyonun üzerinde bulunması durumunda sıfır noktasına getirilmesi	87
Şekil 4.14. Eyleyicinin sıfır pozisyonun altında bulunması durumunda sıfır noktasına getirilmesi	87
Şekil 4.15. Ters kinematik – PID kontrollü ana model	88
Şekil 4.16. Ters kinematik çözümünü gerçekleyen model.....	88
Şekil 4.17. Üst platform konum ve yönelim değer girişi	89
Şekil 4.18. Encoder alt modeli	89
Şekil 4.19. Round alt blok yapıları.....	90
Şekil 4.20. PID alt modeli	90
Şekil 4.21. initial alt modeli	90
Şekil 4.22. Subsystem alt modeli	91
Şekil 4.23. PWM alt modeli	91
Şekil 4.24. Sign alt modeli	92
Şekil 4.25. Sistem parametrelerinin kontrolü için geliştirilen Control Desk arayüz tasarımı	92
Şekil 4.26. Denklem (4.18)'i gerçekleyen Simulink modeli.....	94
Şekil 4.27. Path alt modeli.....	94
Şekil 4.28. 5 sn süreli yörünge planı	95
Şekil 4.29. 2 sn süreli yörünge planı	95
Şekil 4.30. Basamak giriş yanıtı – z eksen 1mm.....	96
Şekil 4.31. Basamak giriş yanıtı – z eksen 1mm.....	96
Şekil 4.32. Basamak giriş yanıtı – x eksen 1°.....	97
Şekil 4.33. Basamak giriş yanıtı – z eksen 500 nm.....	97
Şekil 4.34. Kartezyen uzayında haptik tarafından uygulanan konum referans girişi.....	98
Şekil 4.35. Eklem uzayında giriş ve çıkış - sistem yanıtı.....	98
Şekil 4.36. Bacaklarda oluşan hatalar.....	99
Şekil 4.37. Ölçülen ve yansıtılan kuvvetler.....	99
Şekil 4.38. PID çıkışları	99
Şekil 4.39. Kartezyen uzayında haptik tarafından uygulanan konum referans girişi.....	100
Şekil 4.40. Eklem uzayında giriş ve çıkış - sistem yanıtı.....	100
Şekil 4.41. Ölçülen ve yansıtılan kuvvetler.....	100
Şekil 4.42. Kartezyen uzayında haptik ile elde edilen giriş ve çıkış – sistem yanıtı.....	101
Şekil 4.43. 6 DOF fare ile uygulanan konum referans girişi.....	101
Şekil 4.44. 6 DOF fare ile verilen robot hareketi sırasında oluşan bacak hataları.....	102
Şekil 4.45. 6 DOF fare ile uygulanan konum referans girişi (deney-2)	102
Şekil 4.46. Yörünge takibi (deney-1)	103
Şekil 4.47. Bacak hataları (deney-1)	103
Şekil 4.48. Yörünge takibi (deney-2)	104
Şekil 4.49. Bacak hataları (deney-2)	104
Şekil 4.50. Yörünge takibi (deney-3)	105
Şekil 4.51. Yörünge takibi (deney-4)	105
Şekil 4.52. Yörünge takibi (deney-5)	106
Şekil 4.53. Yörünge takibi (deney-6)	106

Şekil 4.54. Yörünge takibi (deney-7)	107
Şekil 4.55. KKD ana Simulink modeli	108
Şekil 4.56. KKD alt modeli	108
Şekil 4.57. KKD ve KKD+integratör motor cevabı	109
Şekil 4.58. 5 mm'lik basamak girişi sonucunda elde edilen faz diyagramı	109
Şekil 4.59. x yönünde 15 mm'lik doğrusal hareket	110
Şekil 4.60. z yönünde 20°'lik dönme	110
Şekil 4.61. 6 DOF fare ile referans girişi	111
Şekil 4.62. Yukarıda verilen referans girişi sonucunda elde edilen bacak hataları	111
Şekil 4.63. x yönünde dönme	112
Şekil 4.64. Üstte verilen yörünge için bacaklarda oluşan hatalar	112
Şekil 4.65. y yönünde dönme	113
Şekil 4.66. z yönünde doğrusal hareket	113
Şekil 4.67. Akıllı PI denetim ana modeli	114
Şekil 4.68. iPID alt modeli	114
Şekil 4.69. Akıllı PI denetim (deney-1)	115
Şekil 4.70. Deney-1 sırasında oluşan bacak hataları	115
Şekil 4.71. Akıllı PI denetim (deney-2)	116
Şekil 4.72. Deney-2 sırasında oluşan bacak hataları	116
Şekil 4.73. Akıllı PI denetim (deney-3)	117
Şekil 4.74. Deney-3 sırasında oluşan bacak hataları	117
Şekil 5.1. Robot ile nesne arasındaki sanal kütle-yay-damper sistemi	121
Şekil 5.2. Bulanık empedans / kuvvet denetleyici blok diyagramı	123
Şekil 5.3. Empedans filtresinin birim basamak ve dürtü yanıtları	124
Şekil 5.4. Bulanık denetleyici iç yapısı	125
Şekil 5.5. Kuvvet hatası girişi için üyelik fonksiyonları	125
Şekil 5.6. Kuvvet değişimi girişi için üyelik fonksiyonları	125
Şekil 5.7. Çıkış üyelik fonksiyonları	126
Şekil 5.8. Tasarlanan bulanık denetleyicinin yüzeyi	126
Şekil 5.9. Bulanık empedans / kuvvet kontrolü benzetim modeli	127
Şekil 5.10. Bulanık / empedans alt modeli	127
Şekil 5.11. 5 N'lik kuvvet ve $+z$ ekseninde 11 mm'lik referans girişi altında elde edilen benzetim yanıtları	128
Şekil 5.12. 10 N'lik kuvvet ve $+z$ ekseninde 15 mm'lik referans girişi altında elde edilen benzetim yanıtları	128
Şekil 5.13. Bulanık empedans / kuvvet kontrolü DS1103 modeli	129
Şekil 5.14. Leg Trajectory alt modeli	130
Şekil 5.15. Bulanık empedans / kuvvet denetleyici alt modeli	130
Şekil 5.16. Kuvvet ölçüm alt modeli	130
Şekil 5.17. Haptik alt modeli	131
Şekil 5.18. Empedans / kuvvet kontrolü deney düzeneği	131
Şekil 5.19. Kullanılan cisimler ve özellikleri	131
Şekil 5.20. 5 N'lik kuvvet ve $+z$ ekseninde 11 mm'lik referans girişi altında elde edilen empedans / kuvvet ve platform konum yanıtları	132
Şekil 5.21. $+z$ ekseninde 3 N ve 11 mm referans girişi altında elde edilen empedans / kuvvet yanıtları	133
Şekil 5.22. $+z$ ekseninde 3 N ve 11 mm referans girişi altında elde edilen konum ve değişimleri	133

Şekil 5.23. +z ekseninde 3 N ve 12 mm referans girişi altında elde edilen empedans / kuvvet yanıtları.....	134
Şekil 5.24. +z ekseninde 3 N ve 12 mm referans girişi altında elde edilen konum ve değişimleri.....	135
Şekil 5.25. +z ekseninde 5 N ve 11 mm referans girişi altında elde edilen empedans / kuvvet yanıtları.....	135
Şekil 5.26. +z ekseninde 5 N ve 11 mm referans girişi altında elde edilen konum ve değişimleri.....	136
Şekil 5.27. +z ekseninde 5 N ve 12 mm referans girişi altında elde edilen empedans / kuvvet yanıtları.....	137
Şekil 5.28. +z ekseninde 5 N ve 12 mm referans girişi altında elde edilen konum ve değişimleri.....	137
Şekil 5.29. +z ekseninde 5 N ve 14 mm referans girişi altında elde edilen empedans / kuvvet yanıtları.....	138
Şekil 5.30. +z ekseninde 5 N ve 14 mm referans girişi altında elde edilen konum ve değişimleri.....	138
Şekil 5.31. +z ekseninde 5 N kuvvet uygulanırken ileri yönlü konum girişi altında elde edilen empedans / kuvvet yanıtları	139
Şekil 5.32. +z ekseninde 5 N kuvvet uygulanırken ileri yönlü konum girişi altında elde edilen konum ve değişimleri.....	140
Şekil 5.33. +z ekseninde 5 N kuvvet uygulanırken robotun sıfır konumuna alınması	140
Şekil 5.34. +z ekseninde 5 N kuvvet uygulanırken robotun sıfır konumuna alınması	141
Şekil 5.35. +z ekseninde 15 N ve 15 mm referans girişi altında elde edilen empedans / kuvvet yanıtları.....	142
Şekil 5.36. +z ekseninde 15 N ve 15 mm referans girişi altında elde edilen konum ve değişimleri.....	142
Şekil 5.37. +z ekseninde 15 N, 15 mm ve x ekseninde 5° dönme referans girişi altında elde edilen empedans / kuvvet yanıtları.....	143
Şekil 5.38. +z ekseninde 15 N, 15 mm ve x ekseninde 5° dönme referans girişi altında elde edilen konum ve değişimleri	143
Şekil 5.39. +z ekseninde 15 N uygulanırken y ekseninde konum değişimi girişi altında elde edilen empedans / kuvvet yanıtları.....	144
Şekil 5.40. +z ekseninde 15 N uygulanırken y ekseninde konum değişimi girişi altında elde edilen konum ve değişimleri	145
Şekil 5.41. +z'de 15 N kuvvet uygulanırken ileri yönlü konum girişi altında elde edilen empedans / kuvvet yanıtları	145
Şekil 5.42. +z ekseninde 15 N kuvvet uygulanırken ileri yönlü konum girişi altında elde edilen konum ve değişimleri.....	146
Şekil 5.43. +y ekseninde 5 N ve 20 mm referans girişi altında elde edilen empedans / kuvvet yanıtları.....	147
Şekil 5.44. +y ekseninde 5 N ve 20 mm referans girişi altında elde edilen konum ve değişimleri.....	147
Şekil 5.45. -x ekseninde -5 N ve -20 mm referans girişi altında elde edilen empedans / kuvvet yanıtları.....	148
Şekil 5.46. -x ekseninde -5 N ve -20 mm referans girişi altında elde edilen konum ve değişimleri.....	148

Şekil 5.47. -x ekseninde -5 N ve -22 mm referans girişi altında elde edilen empedans / kuvvet yanıtları.....	149
Şekil 5.48. -x ekseninde -5 N ve -22 mm referans girişi altında elde edilen konum ve değişimleri.....	149
Şekil 5.49. -x ekseninde -5 N ve -25 mm referans girişi altında elde edilen empedans / kuvvet yanıtları.....	150
Şekil 5.50. -x ekseninde -5 N ve -25 mm referans girişi altında elde edilen konum ve değişimleri.....	151
Şekil 5.51. +z ekseninde 5 N ve 15 mm referans girişi altında elde edilen empedans / kuvvet yanıtları (yay-1).....	151
Şekil 5.52. +z ekseninde 5 N ve 15 mm referans girişi altında elde edilen konum ve değişimleri (yay-1).....	152
Şekil 5.53. +z ekseninde 5 N ve 17 mm referans girişi altında elde edilen empedans / kuvvet yanıtları (yay-1).....	153
Şekil 5.54. +z ekseninde 5 N ve 17 mm referans girişi altında elde edilen konum ve değişimleri (yay-1).....	153
Şekil 5.55. +z'de 10 N kuvvet uygulanırken 15 N'lik girişi altında elde edilen empedans / kuvvet yanıtları (yay-1).....	154
Şekil 5.56. +z ekseninde 10 N kuvvet uygulanırken 15 N'lik referans girişi altında elde edilen konum ve değişimleri (yay-1).....	154
Şekil 5.57. +z ekseninde 10 N ve 17 mm referans girişi altında elde edilen empedans / kuvvet yanıtları (yay-1).....	155
Şekil 5.58. +z ekseninde 10 N ve 17 mm referans girişi altında elde edilen konum ve değişimleri (yay-1).....	156
Şekil 5.59. +z ekseninde 10 N ve 20 mm referans girişi altında elde edilen empedans / kuvvet yanıtları (yay-1).....	156
Şekil 5.60. +z ekseninde 10 N ve 20 mm referans girişi altında elde edilen konum ve değişimleri (yay-1).....	157
Şekil 5.61. +z ekseninde 15 N ve 20 mm referans girişi altında elde edilen empedans / kuvvet yanıtları (yay-1).....	157
Şekil 5.62. +z ekseninde 15 N ve 20 mm referans girişi altında elde edilen konum ve değişimleri (yay-1).....	158
Şekil 5.63. +z ekseninde 10 N ve 15 mm referans girişi altında elde edilen empedans / kuvvet yanıtları (yay-2).....	159
Şekil 5.64. +z ekseninde 10 N ve 15 mm referans girişi altında elde edilen konum ve değişimleri (yay-2).....	159
Şekil 5.65. +z ekseninde 5 N ve 20 mm referans girişi altında elde edilen empedans / kuvvet yanıtları (yay-3).....	160
Şekil 5.66. +z ekseninde 5 N ve 20 mm referans girişi altında elde edilen konum ve değişimleri (yay-3).....	160
Şekil 5.67. +z ekseninde 5 N ve 22 mm referans girişi altında elde edilen empedans / kuvvet yanıtları (yay-4).....	161
Şekil 5.68. +z ekseninde 5 N ve 22 mm referans girişi altında elde edilen konum ve değişimleri (yay-4).....	161
Şekil 6.1. Hipofiz bezi, sella bölgesi ve sfenoid sinüs tümörleri	163
Şekil 6.2. Ameliyat sırasında görüntü yönlendirme sisteminin kullanımı	164
Şekil 6.3. Tümörün alınması	164
Şekil 6.4. Endoskop konumlama sisteminin genel blok diyagramı	165
Şekil 6.5. Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen örnek uygulama.....	166

Şekil 6.6.	Kadavra üzerinde yapılan deneme görüntüsü 1	167
Şekil 6.7.	Kadavra üzerinde yapılan deneme görüntüsü 2	167
Şekil 6.8.	Operasyon bölgesi	168
Şekil 6.9.	Robotun ameliyathanede önerilen yerleşim planı-1	169
Şekil 6.10.	Robotun ameliyathanede önerilen yerleşim planı-1 (farklı açı).....	169
Şekil 6.11.	Robotun ameliyathanede önerilen yerleşim planı-2.....	170
Şekil 6.12.	Robotun ameliyathanede önerilen yerleşim planı-2 (farklı açı).....	170
Şekil 6.13.	Robotun ameliyathanede önerilen yerleşim planı-3.....	171
Şekil 6.14.	Robotun ameliyathanede önerilen yerleşim planı-3 (farklı açı).....	171
Şekil 6.15.	Stewart Platformu'nun delici ve kesici olarak kullanımı	172
Şekil 6.16.	Delme deneyinde oluşan kuvvetler	172

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1.1. İnsan ve robotların genel özelliklerinin karşılaştırılması.....	16
Tablo 1.2. SP'nin farklı tasarımı için elde edilen özellikleri	23
Tablo 1.3. İlk prototip ve geliştirilmesi amaçlanan robot özellikleri	26
Tablo 1.4. Kırık tedavisi için gerekli özellikler	28
Tablo 2.1. Robotun genel özellikleri.....	33
Tablo 2.2. Eyleyici sub-D15 pin diyagramı	35
Tablo 2.3. DC motor parametreleri	38
Tablo 2.4. Phantom Omni haptik özellikleri	43
Tablo 2.5. Ürün özellikleri	44
Tablo 3.1. İleri kinematik deneylerinde oluşan hataların karşılaştırılması	58
Tablo 3.2. Benzetim ve deneysel Jakobiye doğruluk test karşılaştırmaları	67
Tablo 3.3. Robot parametreleri	74
Tablo 4.1. Akıllı PI denetim deney parametreleri ve maliyetleri.....	118
Tablo 5.1. Bulanık denetleyici kural tablosu	126
Tablo 6.1. Önerilen konfigürasyonların çalışma uzaylarının karşılaştırılması	168
Tablo 7.1. Hesaplanan ve ölçülen değerler	174

SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR

B	: Sabit platformun merkezinin koordinat sistemi
B_m	: Motor milinin viskoz sürtünme katsayısı
B_s	: Vidalı bilye viskoz sürtünme katsayısı
$C(x, \dot{x})$	: Coriolis ve merkezkaç (centrifugal) kuvvet matrisi
D	: Sönüm katsayısı
e	: Hata
$\dot{e}$	: Hatanın türevi
E_m	: Zıt EMK
$f(x)$	: Herhangi bir fonksiyon
f_i	: Eklem kuvveti
F	: Ortaya çıkan kuvvet
F_e	: Harici kuvvet
$G(x)$	: Yerçekimi ivme vektörü
i_a	: Endüvi akımı
I	: Atalet tensörü
$I_{(mf)}$	: Hareketli platformun atalet tensörü
J	: Jacobiye matrisi
J_{ij}	: Newton-Raphson nümerik iterasyon fonksiyonu
J_m	: Motor mili atalet momenti
K	: Yay sabiti
K_b	: Elektromotor kuvvet sabiti
K_d	: Türev kazancı
K_i	: İntegral kazancı
K_m	: Moment sabiti
K_p	: Oransal kazanç
K_t	: Motor tork sabiti
l_1	: Bacağın sabit parçasının uzunluğu
l_2	: Bacağın hareketli parçasının uzunluğu
l_i	: Bacak uzunluğu
$l_{nominal}$	: Robotun sıfır konumundaki bacak uzunluğu
$\dot{L}$	: Eklem hızları
L_a	: Endüvi endüktansı
L_i	: Bacağın konum vektörü
m_1	: Bacağın sabit parçasının kütlesi
m_2	: Bacağın hareketli parçasının kütlesi
m_i	: Bağın kütlesi
M_{leg}	: Bacakların kütle matrisi
M_{up}	: Hareketli platformun kütle matrisi
M	: Kütle
$M(x)$	: Dinamik denklem kütle matrisi
P	: Konum vektörü

P_{leg}	: Bacakların toplam potansiyel enerjisi
P_{up}	: Hareketli platformun toplam potansiyel enerjisi
R	: Dönme matrisi
R_a	: Endüvi direnci
r_b	: Sabit platformun yarıçapı
r_t	: Hareketli platformun yarıçapı
S	: Eksi bakışimli matris
T	: Hareketli platformun merkezinin koordinat sistemi
T_i	: Hareketli platform üzerindeki bağlantı noktasının konumu
u	: Kontrol çıkış sinyali
u_i	: Bacağın doğrultusunu gösteren birim vektör
V	: Aday Lyapunov fonksiyonu
V_a	: Endüvi gerilimi
v_i	: Alt platformdaki eklem noktalarının açıları
$\vec{V}_{Ti}$	: Bacakların uç hızlarını gösteren vektör
w_n	: Doğal frekans
y^*	: Referans yörünge
α	: x eksenini boyunca dönme
β	: y eksenini boyunca dönme
γ	: z eksenini boyunca dönme
ε	: Newton-Raphson nümerik iterasyon yönteminde yakınsama ölçeği
θ	: Motor milinin açısal konumu
$\dot{\theta}$	: Motor milinin açısal hızı
$\ddot{\theta}$	: Motor milinin açısal ivmesi
θ_b	: Alt platformdaki eklem konumları arasındaki açı
θ_t	: Üst platformdaki eklem konumları arasındaki açı
λ_i	: Üst platformdaki eklem noktalarının açıları
ξ	: Sönüm oranı
ρ	: Vidalı bilye dönüş adımı sayısı
σ	: Durum vektörü
τ	: Genelleştirilmiş kuvvet ya da tork
τ_l	: Yük momenti
τ_m	: Motorda üretilen moment

Kısaltmalar

AC	: Alternative Current (Alternatif Akım)
CAD	: Computer Aided Design (Bilgisayar Destekli Tasarım)
CRIGOS	: Compact Robot for Image-Guided Orthopedic Surgery (İmge Güdümlü Ortopedik Cerrahi için Kompakt Robot)
CT	: Computed Tomography (Tomografi)
DARPA	: Defense Advanced Research Projects Agency (İleri Savunma Araştırma Projeleri Ajansı)
DC	: Direct Current (Doğru Akım)
DOF	: Degree of Freedom (Serbestlik Derecesi)
EMK	: Elektromotor Kuvveti
FDA	: Food and Drug Administration (Yiyecek ve İlaç İdaresi)

GPS	: Global Positioning System (Küresel Konumlandırma Sistemi)
iPID	: Intelligent PID (Akıllı PID)
ISS	: Integrated Surgical Systems (Entegre Cerrahi Sistemleri)
KKD	: Kayma Kipli Denetim
KPM	: Kartezyen Paralel Mekanizma
MARS	: Miniature Robot for Surgical Procedures (Minyatür Paralel Robot)
MRI	: Magnetic Resonance Imaging (Manyetik Rezonans Görüntüleme)
NL	: Negative Large (Negatif Büyük)
NM	: Negative Medium (Negatif Orta)
NS	: Negative Small (Negatif Küçük)
PET	: Positron Emission Tomography (Pozitron Yayınımı Tomografi)
PID	: Proportional–Integral–Derivative (Oransal + İntegral + Türev)
PL	: Positive Large (Pozitif Büyük)
PM	: Positive Medium (Pozitif Orta)
PS	: Positive Small (Pozitif Küçük)
PWM	: Pulse-Width Modulation (Darbe Genişlik Modülasyonu)
RMS	: Root Mean Square (Etkin Değer)
RTI	: Real Time Interface (Gerçek Zamanlı Arayüz)
SP	: Stewart Platformu
TTL	: Transistor-Transistor-Lojik
Z	: Zero (Sıfır)

MEDİKAL AMAÇLI HAPTİK GÜDÜMLÜ EMPEDANS KUVVET KONTROLLÜ STEWART PLATFORMU'NUN GELİŞTİRİLMESİ VE KONTROLÜ

ÖZET

Bu tez kapsamında, robotik cerrahi alanında kullanılmak üzere 6 serbestlik dereceli haptik ve fare güdümlü, kuvvet-konum kontrollü Stewart Platformu (SP) geliştirilmiştir.

Geliştirilen SP'nin ileri ve ters kinematiği, dinamik modeli ve Jakobiyen matrisi elde edilmiştir. Bu modellerin bilgisayar benzetimleri ve deneysel testleri yapılarak doğrulanmıştır. SP'nin konum ve yörünge kontrolü için gerekli denetim yapısı geliştirilerek çeşitli deneylerle desteklenmiştir. SP, basamak ve noktadan-noktaya yörünge girişlerine izin veren kullanıcı arayüzü, 6 serbestlik dereceli fare ve haptik aygıtı aracılığıyla yönlendirilebilmektedir. SP'nin konum ve yörünge kontrolü PID, akıllı PID ve kayma kipli denetim yöntemleri kullanılarak eklem uzayında gerçekleştirilmiştir. SP'nin denetim yapısı Simulink ortamında tasarlanarak gerçek zamanlı DSPACE DS1103 denetleyicisi ile kontrol edilmiştir. Deneysel sonuçlar incelendiğinde SP'nin 0.5 μ m hassasiyete kadar konum kontrolünün sağlandığı görülmüştür. Ayrıca, yörünge takibinde akıllı PID denetleyicisinin diğerlerine göre daha iyi cevap verdiği görülmüştür.

SP'nin Kartezyen uzayında üç eksen kuvvet ve etkileşim kontrolü için yeni, basit ve efektif bir yöntem sunulmaktadır. Buna göre, robot kontrolü üç kısma ayrılabilir: serbest uzayda konum kontrolü, temas halinde empedans kontrolü ve kuvvet kontrolü. Robot konumu ile kuvvet arasındaki arzu edilen davranışın gösterilebilmesi için empedans filtresi tasarlanmıştır. Bu filtrenin kazancı bir bulanık PID denetleyici tarafından ayarlanmaktadır. Kuvvet kalıcı durum hatasının giderilebilmesi için akıllı bir integratör kullanılmıştır. Önerilen yöntem benzetim ortamında ve deneysel olarak yapılan birçok deneyle doğrulanmıştır. Benzetim ve deneysel sonuçlar incelendiğinde kuvvet denetiminin 1 N çözünürlüğünde 50 N'ye kadar başarılı şekilde gerçekleştirildiği görülmüştür.

Geliştirilen SP sisteminin kullanılabileceği medikal uygulama alanları irdelenerek, ülkemizde beyin cerrahisinde uzun, yorucu ve karmaşık hipofiz bezi ameliyatlarında cerraha yardımcı olmak üzere robotun endoskop konumlayıcı ve tutucu olarak kullanımı ele alınmıştır. Geliştirilen SP sistemiyle kadavralar üzerinde gerçekleştirilen deneylerle SP'nin endoskopik transsfenoidal cerrahisinde kullanılabilirliği ispatlanmıştır. SP'nin bu cerrahide daha etkin kullanılabilmesi için çeşitli yerleşim planları önerilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Akıllı PID Denetim, Bulanık Kontrol, Dinamik, Empedans Kontrol, Endoskop Konumlama, Haptik, Kayma Kipli Denetim, Kinematik, Kuvvet Geri Besleme, Kuvvet Kontrol, PID Denetim, Robotik Cerrahi, Stewart Platformu.

THE DEVELOPMENT AND CONTROL OF A HAPTIC-GUIDED IMPEDANCE FORCE CONTROLLED STEWART PLATFORM FOR MEDICAL PURPOSES

ABSTRACT

In this thesis, a force-position controlled Stewart Platform (SP) system guided by 6 degree of freedom (DOF) haptic and mouse was developed to be used in the field of robotic surgery.

Forward and inverse kinematics, dynamics and Jacobian matrix of the SP were obtained. Verifications of these models were tested using computer simulations and experiments. Required control structure was developed for the position and trajectory control of the SP and supported by the experiments. The SP can be guided by a user interface which accepts step and point-to-point trajectory inputs, 6 DOF mouse and haptic device. Position and trajectory control of the SP was achieved using PID, intelligent PID and sliding mode control methods in the joint space. The controllers were designed in Simulink environment and embedded in DSPACE DS1103 real-time controller. It can be seen from the results that position control of the SP was achieved up to 0,5 μm precision. Also, the intelligent PID controller showed better performance compared to others in the trajectory tracking.

A new, simple and effective method was proposed for the three-axis impedance and force control of the SP in Cartesian space. The control approach can be divided into three parts namely: position control in free space, impedance control in contact and force control. An impedance filter was developed to achieve desired behavior between position and force. The gain of the filter was modified by a fuzzy logic PID controller. Steady state force error was also eliminated with an intelligent integrator. The proposed method was verified by many simulations and experiments. The experimental and simulation results show that force control of the SP was achieved up to 50 N with 1 N resolution, successfully.

Application areas of the developed SP system in the robotic surgery were examined. This system can be used in the endoscopic transsphenoidal surgery as an endoscope positioner and holder. Usage of this system helps the surgeons in long, fatiguing and complex operations. The validity of the SP was proven in the endoscopic transsphenoidal surgery performed on cadavers. In order to use this SP system more effectively in this surgery, different layout plans were proposed.

Keywords: Intelligent PID Control, Fuzzy Control, Dynamics, Impedance Control, Endoscope Positioner, Haptic, Sliding Mode Control, Kinematics, Force Feedback, Force Control, PID Control, Robotic Surgery, Stewart Platform.

GİRİŞ

Son yıllarda robotik ve mekatronik alanları medikal uygulamalarla ilgilenmektedirler. Özellikle cerrahi, robotik sistemlerin kullanılabileceği yüksek potansiyele sahip alanlardan biridir. Medikal robotiğin amacı cerrahi bir robotla yer değiştirmek yerine cerraha hastanın yararına yeni tedavi seçenekleri sağlamaktır.

Bu tez kapsamında altı serbestlik dereceli 6-6 bağlantılı bir paralel manipülatörün (Stewart Platformu) robotik cerrahi alanında kullanılmak üzere haptik arayüzlü, kuvvet konum kontrollü ve kuvvet geri-beslemeli geliştirilmesi amaçlanmıştır. Buna göre elde edilen başlıca katkılar aşağıda sıralanmıştır.

- i. Robot sistemi için ihtiyaç duyulan yazılım ve donanımlar geliştirilerek sistem altyapısı tamamlanmıştır. Bu bileşenler eyleyiciler, güç kaynağı, lojik koruma devresi, ara geçiş kartı, 6 DOF USB fare, Phantom Omni haptik, kuvvet / tork ölçüm sistemi, cerrahi ekipman tutucu, kuvvet test düzeneği ve gerçek zamanlı denetleyici olarak sıralanabilir. Her bileşen ayrı ayrı test edilerek sisteme entegre edilmiştir.
- ii. Stewart Platformu'nun kinematik (ileri ve ters kinematiği), Jakobiyen matrisi ve dinamik (katı gövde dinamiği ve eyleyici dinamiği) özellikleri incelenerek benzetim ve gerçek zamanlı modelleri geliştirilmiştir.
- iii. Stewart Platformu'nun konum ve yörünge kontrolü uzaysal fare ve haptik kullanılarak yapılmıştır. PID, kayma kipli denetim ve akıllı PID denetleyici yapıları geliştirilmiştir.
- iv. Kuvvet ve etkileşim kontrolü için yeni, basit ve efektif bir yöntem sunulmaktadır. Buna göre, robot kontrolü üç kısma ayrılabilir: i) serbest uzayda konum kontrolü, ii) temas halinde empedans kontrolü ve iii) kuvvet kontrolü. Yöntem arzu edilen davranışı gösterecek olan empedans filtresi ve bu filtrenin kazancının bir bulanık denetleyici tarafından ayarlanmasına dayanmaktadır.

v. Stewart Platformu'nun kullanım alanları irdelenmiş ve ülkemizde beyin cerrahisinde ihtiyaç duyulan alanlardan biri olan hipofiz bezi ameliyatlarında kullanılabileceği önerilmektedir. Bu ameliyatlar hipofiz bezinde bulunan tümörün boşaltılmasını amaçlamaktadır ve görüntüleme için yüksek çözünürlüklü endoskoplar kullanılmaktadır. Buna göre, Stewart Platformu'nun haptik ve fare güdümlü endoskop konumlayıcı ve tutucu olarak kullanımı ele alınmıştır. Kafatası maket modeli ve İstanbul Adli Tıp Kurumunda kadavralar üzerinde denemeler gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışma yedi bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde, medikal robotik kavramı ele alınarak tarihsel gelişimi, çeşitli ticari sistemler, uygulama alanları, avantaj ve dezavantajları, haptik sistemler ve literatür taraması sunulmuştur.

İkinci bölümde, Stewart Platformu tanıtılarak kullanım alanları ve tarihsel gelişimi ele alınmıştır. Sistem tanıtılarak her bir bileşeni hakkında bilgi verilmektedir. Ayrıca, geliştirilen donanım ve yazılımlara ait bilgiler sunulmuştur.

Üçüncü bölümde, Stewart Platformu'nun ters kinematik analizi, ileri kinematik analizi, Jakobiyen matrisi ve dinamik modeli ele alınmıştır. Kinematik ve Jakobiyen benzetim test modelleri oluşturularak geçerlilikleri gösterilmiştir. Ayrıca gerçek zamanlı test sonuçları da sunulmuştur. Eyleyici dinamiğini içeren robot tam modeli Matlab-Simulink'te tasarlanmıştır.

Dördüncü bölümde, Stewart Platformu'nun konum ve yörünge kontrolü için gerekli denetim yapısı ve sonuçları sunulmuştur. Robot, basamak girişleriyle, bir noktadan diğer bir noktaya yörünge girişiyle, 6 DOF fare ve haptik aygıtı aracılığıyla yönlendirilebilmektedir. Robot konum kontrolü ters kinematiği kullanılarak eklem uzayında gerçekleştirilmiştir. Konum denetimi için PID, kayma kipli denetim ve akıllı PID denetleyici yapıları geliştirilmiştir.

Beşinci bölümde, Stewart Platformu'nun empedans / kuvvet kontrolü için yeni, basit ve efektif bir yöntem sunulmaktadır. Robot kontrolü üç kısma ayrılabilir: i) serbest uzayda konum kontrolü, ii) etkileşim kontrolü ve iii) kuvvet kontrolü. Yöntem arzu edilen davranışı gösterecek olan empedans filtresi ve bu filtrenin kazancının bir bulanık denetleyici tarafından ayarlanmasına dayanmaktadır. Önerilen yöntem

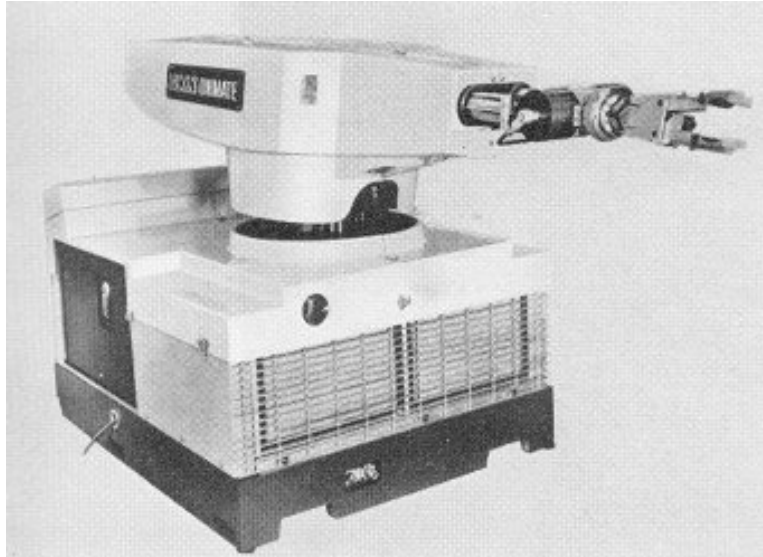
benzetim ortamında ve deneysel olarak geliştirilerek sonuçlar sunulmuştur. Benzetim ve deneysel sonuçlar incelendiğinde arzu edilen sistem performansının gerçekleştirildiği görülmüştür.

Altıncı bölümde, geliştirilen sistemin kullanılabileceği medikal uygulama alanları irdelenerek, ülkemizde beyin cerrahisinde hipofiz bezi ameliyatlarında cerraha yardımcı olmak üzere robotun endoskop konumlayıcı ve tutucu olarak kullanımı ele alınmıştır. Endoskopik transsfenoidal cerrahisi hakkında genel bilgiler verilerek laboratuvar ortamında ve kadavralar üzerinde yapılan deneyler sunulmuştur. Robotun daha etkin kullanılabilmesi için çeşitli yerleşim planları önerilmiştir.

1. MEDİKAL ROBOTİK

Programlanabilen ve insanların yaptıkları karmaşık görevleri gerçekleştirebilen mekanik bir aygıt olarak tanımlanan robot terimi çek dilindeki “robota” kelimesinden türemiştir ve köle, işçi anlamlarına gelmektedir. İlk olarak 1921 yılında Avrupa’nın endüstrileşmesini protesto etmek için Karel Capek tarafından yazılan “Rossum’s Univeral Robots” isimli piyeste kullanılmıştır. Robotik terimi ise 1938 yılında “Runaround” isimli kısa bir hikâyede Isaac Asimov tarafından kullanılmıştır ve devam eden hikâyeler 1942 yılında “I Robot” ismi altında derlenip basılmıştır [1].

İlk robot ise 1958 yılında General Motors firması tarafından kalıp makineleri ve kaynak işlemleri için geliştirilen “unimate” isimli robottur (Şekil 1.1). Unimate’in mucitleri Asimov’un bilim kurgu hikâyelerinden esinlenerek tehlikeli işlerde işçilerin yerini alabilecek makineler üretmeyi amaçlamışlardır. Firma 1961 yılında fabrikalarından birinde robotu sisteme dâhil ederek kullanmışlardır ve robotun başarılı olmasıyla yaygınlaşmıştır [1].



Şekil 1.1. İlk geliştirilen robot, “unimate” [2]

Robotlar o zamandan günümüze kadar büyük aşama kaydederek endüstriyel, askeri, araştırma ve tıp gibi birçok alanda çok amaçlı olarak kullanılmaktadır. Genel olarak

robotlar kinematik ve dinamik açıdan seri, paralel, mobil ve insansı robot kategorileri altında incelenebilir.

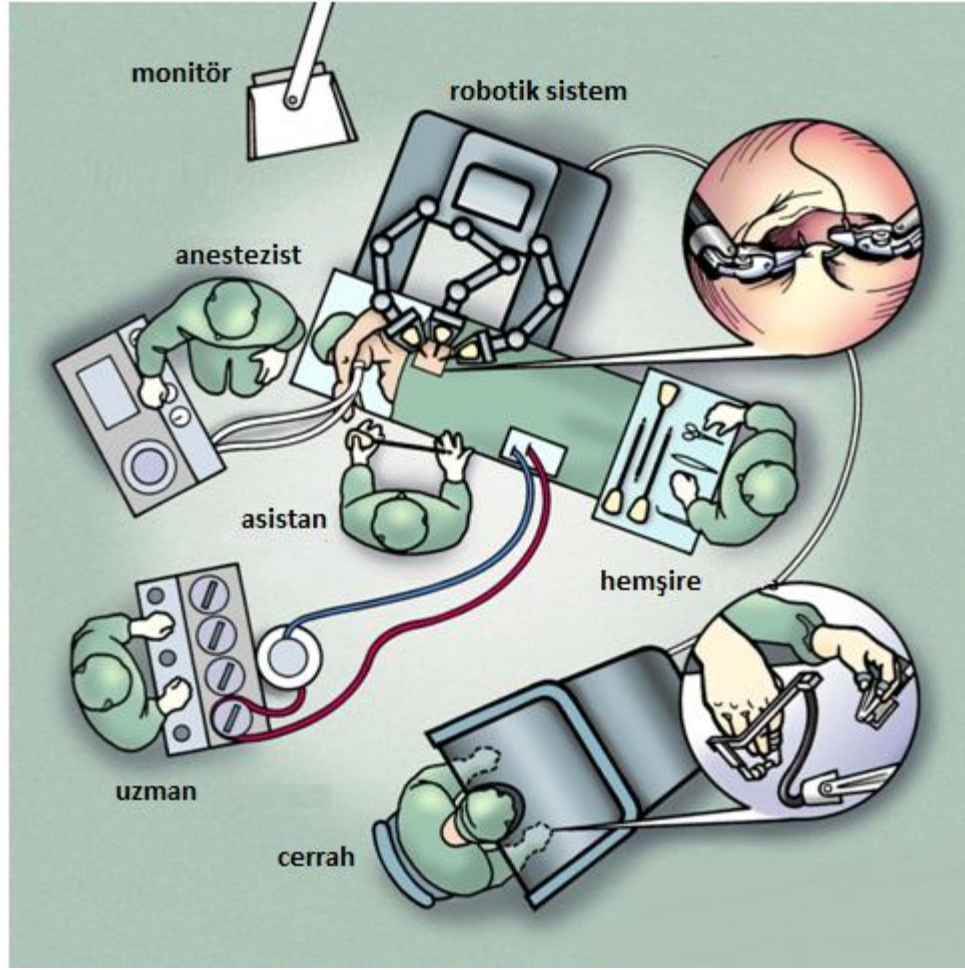
Robotlar insanlara göre rutin manipölasyon görevleri gerçekleştirme hususunda birçok avantaja sahiptir. Robotların hassasiyet ve tekrarlanabilirlik özellikleri birçok uygulama alanının yanında medikal ve cerrahi alanlarında da kullanılmalarına imkân tanımıştır. Son 20-30 yıldır robotların medikal uygulamalarına olan ilgi hızla artmaktadır. Robot teknolojisinin düşük maliyet, yüksek performans ve kolaylıklar sunması gibi nedenler bunda etkin olmuştur. Bunun yanında robotlar güvenlik, kısıtlı hareket ve bakım gibi bazı dezavantaja sahiptir. Şu an otomatik olarak cerrahi bir müdahaleyi gerçekleştirebilen bir robotik sistem mevcut değildir. Bu eksikliklerin bazıları robotların yararlı olduğu gerçeğini değiştiremez. Cerrahi robotlar endüstride olduğu gibi insanların yerini alan robotlar gibi değil cerrahın yeteneklerini arttıran, genişleten, tamamlayan ya da cerraha yardımcı olan sistemlerdir [3].

1.1. Robot Destekli Cerrahi

Robotik cerrahi, bilgisayar destekli cerrahi ve robot destekli cerrahi terimleri gelişen teknolojiyle beraber bir dizi cerrahi prosedürleri desteklemek için geliştirilmiştir ve gelişim süreci devam etmektedir. Robot destekli cerrahi, cerrahın cerrahi ekipmanları doğrudan kullanması yerine çoklu robot kollarına bağlanmış ekipmanları bir bilgisayar konsolu aracılığıyla kontrol ederek geleneksel cerrahinin kısıtlamalarının üstesinden gelmek için geliştirilmiştir. Bilgisayar konsolu cerrahın hareketlerini algılamaktadır ve operasyon robot aracılığıyla hasta üzerinde gerçekleştirilir. Robotik bir sistem cerrahın el titremelerini önleyen bir filtre ve cerrahın hareketlerini ölçekleme özelliklerine sahip olabilmektedir [4]. Böylece, cerrahi aletlerin çok iyi ve hassas bir şekilde hareketleri sağlanmaktadır. Robotik araçlar çok eklemlili ve bir dizi hareket yeteneğine sahip olduğu için karmaşık manevralara imkân tanımıştır. Böylece insanın kol ve el hareketlerine benzer hareketler sağlanır [5].

Genel bir robot destekli cerrahi müdahale Şekil 1.2 ile resmedilebilir. Geleneksel yöntemle göre ameliyathaneye robotik sistem, cerrah konsolu, kontrol ünitesi ve görüntüleme gibi diğer bileşenler dâhil edilmiştir. Genellikle cerrah konsolu hastayla aynı operasyon odasında bulunmaktadır. Buna karşın, cerrahın hastaya doğrudan müdahale etmesine gerek olmaması sebebiyle hızlı ve güvenli bir ağ üzerinden

uygulanabilen uzaktan cerrahi (tele-robotik cerrahi) bir diğerk robot destekli cerrahi türü olarak karşımıza çıkmaktadır [4].



Şekil 1.2. Genel bir robot destekli cerrahi girişim [6]

Robot destekli cerrahide robot teknolojisine ek olarak ön-planlama, kayıt ve cerrahi cihazların navigasyonu amaçlarıyla çeşitli görüntüleme ve imge işleme teknikleri kullanılarak cerraha yardımcı fonksiyonlar arttırılabilir. Bu amaçla, tomografi (CT), manyetik rezonans görüntüleme (MRI) ve fonksiyonel MRI, pozitron yayınlı tomografi (PET) ve ultrasonografi vb. gibi görüntüleme teknikleri, hastalıklı alanların konumu ve işlevi için hassas dijital görüntüler sağlayabilir. Robot desteği cerrahi aletlerin konumlandırılmasında ve kontrollü yörüngelerin manevrasında yüksek doğruluk, kesinlik ve tekrarlanabilirlik gibi birçok faydalar sağlar [7].

Yine robot teknolojisine ek olarak üç boyutlu karşılıklı etkileşime izin veren ve dinamik ortamlar sunan sanal gerçeklik tıp alanında yerini almıştır. Böylelikle,

cerrah adaylarına sanal kadvralar üzerinde sınırsız denemeler yapılmasına izin vermekte, hastalar için terapi aracı olarak hizmet etmekte ve uzaktan cerrahide kullanılmaktadır [1].

1.2. Tarihsel Gelişim

Çeşitli kaynaklarda ilk cerrahi robotik uygulama konusunda farklılık bulunmaktadır. Bazı kaynaklar 1985 yılında beyin biyopsisi alanında kullanılan puma robotunun ilk uygulama olduğunu öne sürmektedirler [1]. Bazı kaynaklarda ise dünyanın ilk cerrahi robotunun 1983 yılında Kanada’da geliştirilen ve kullanılan Arthrobot olduğu belirtilmektedir [8].

1985 yılında PUMA560 robotu tomografi görüntüleri altında beyin biyopsisinde 0.05 mm hassasiyetle iğne yerleştirmek için kullanılmıştır. Daha sonra aynı robot prostat cerrahisinde kullanılmış ancak takibinde bu cerrahiye özgü PROBOT 1988 yılında Londra’da Imperial Kolege’de geliştirilmiştir [9].

Beyin biyopsisinde kullanılan PUMA560 robotunun temel oluşturmasıyla beraber 1999 yılında Yiyecek ve İlaç İdaresi (FDA) onayını alan Neuromate (Integrated Surgical Systems, ISS) cerrahi sistemi beyin cerrahisinde kullanılmak üzere 1987 yılında geliştirilmiştir.

Integrated Surgical Systems firması 1992 yılında ROBODOC isimli ürünlerini ortopedi de kalça protezi (femur başı) cerrahisinde kullanılmak üzere geliştirmişlerdir. Geleneksel yöntemle karşılaştırıldığında yüksek doğruluğa sahip olan ROBODOC Avrupa’da binlerce hasta tedavisinde kullanılmıştır ancak Amerika’da FDA onayını alamamıştır.

Robotik sistemlerin gelişimi Intutive Surgical firmasının da Vinci cerrahi sistemiyle ve Computer Motion firmasının AESOP ve ZEUS robotik cerrahi sistemleriyle sürmüştür.

1994 yılında, AESOP sistemi klinik kullanım için FDA tarafından onaylanan ilk robotik cihaz olmuştur. AESOP ifadesi “Optimal Konumlandırma için Otomatik Endoskopik Sistemi” ifadesinin İngilizce karşılığının baş harflerinden oluşmuştur. Bu cihaz Pentagon'un ileri savunma araştırma projeleri ajansı (DARPA) programı

kapsamında desteklenerek geliştirilmiştir. AESOP bir otomatik laparoskop tutucudur ve yorulmadan, dağılmadan ya da dikkat dağıtmadan sürekli görevini gerçekleştirir. Laparoskop ve AESOP cerrah tarafından el ile yeniden yönlendirilebilir. Başlangıçta AESOP ayak anahtarı veya el kontrolü üzerinden çalışırken sonradan sesle manipülasyon standart haline gelmiştir. AESOP herhangi bir standart operasyon masasının kenarına bağlanır ve herhangi bir laparoskopu tutabilir. Bu sistem ile cerrah işlemleri kolaylaştırılmış olsa da AESOP deneyimli bir asistandan çok daha yavaş hareket etmektedir ve bu nedenle cerrahlar tarafından sınırlı olarak kullanılmaktadır. AESOP cerrahi sistemi Şekil 1.3'te görülmektedir.



Şekil 1.3. AESOP cerrahi sistemi [10]

Şekil 1.4'te verilen “HERMES Control Center” isimli sistem aynı firma tarafından geliştirilmiştir ve konuşma tanıma özelliğiyle sesli kontrole imkân tanımıştır.

Zeus robotik cerrahi sistemi karın operasyonlarında kullanılmak üzere FDA tarafından 2001 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nde onaylanmıştır. Zeus AESOP sisteminden faydalanılarak iki ek robot kolu boyunca kamera navigasyonu için geliştirilmiştir. 2001 yılında aralarında 3800 mil mesafe bulunan Strasbourg ile New York kentleri arasında fiber optik altyapı ve Zeus sistemi kullanılarak ilk tele-robotik ameliyat başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Zeus artık ticari olarak mevcut değildir. Zeus cerrahi sistemi Şekil 1.5'te görülmektedir.



Şekil 1.4. HERMES kontrol birimi [11]



Şekil 1.5. Zeus cerrahi sistemi [11]

2001 yılında Computer Motion firması FDA onaylı gerçek zamanlı Socrates isimli ilk uzaktan cerrahi sistemini geliştirmiştir.

Şuan FDA onaylı ticari tek robotik sistem da Vinci robotik cerrahi sistemidir (Şekil 1.6). Da Vinci kalp, göğüs, jinekolojik, ürolojik ve karın prosedürleri gibi geniş bir uygulama yelpazesi için FDA onayı almıştır. İlk olarak Belçika’da kullanılan da Vinci sistemi Amerika ve Avrupa’da 800’den fazla hastanede kullanılmaktadır. Bu sistem bir cerrah konsolundan, tekerlekli üç ya da 4 kollu robot sisteminden (biri kamera diğerleri cerrahi ekipmanlar için), endowrist (7 serbestlik dereceli tutucu) gibi cerrahi araç gereçler ve yüksek çözünürlüklü üç boyutlu görüntüleme sisteminden meydana gelir. Cerrah genellikle aynı oda içinde, hastanın uzağında konsol başındadır. Konsol da yüksek çözünürlüklü, üç boyutlu stereoskopik görüntü görüntülenir. Cerrah standart laparoskopi uygulamasına göre daha doğal ve ergonomik bir konumdan kamera ve iki veya üç robot kolunu yönlendirerek kontrol edebilir. Da Vinci’nin cerrahi araçları yedi serbestlik derecesiyle insan bilek

fonksiyonlarını taklit etmek için tasarlanmıştır. Böylece, standart rijit bir laparoskopik enstrümana göre ince doku diseksiyonu (parçalara ayırma) veya karmaşık teknik prosedürleri için daha fazla kontrol sağlar. Cihaz cerrahın hareketlerini algılar ve ölçeklendirerek mikro hareketlere dönüştürerek özel küçük ekipmanları maniple eder. Aynı zamanda, cerrahın el titremeleri belirlenerek filtrelenir ve böylece robot bu istenmeyen hareketleri tekrarlamaz. Sistemde kullanılan kamera cerrah konsolunda gerçek bir stereoskopik görüntü sağlamaktadır. Da Vinci cerrahi sistemi için çeşitli sınırlamalar bulunmaktadır. Cerrah aslında hiçbir haptik veya dokunsal geribildirime sahip değildir. Diseksiyon veya dikiş sırasında doku gerginliği değerlendirebilmek için görsel ipuçları gereklidir. Da Vinci sistemi yüksek miktarda kuvvet üretme kapasitesine sahiptir ve bu yüzden özellikle görme alanı dışında yapılan hareketler tehlikeli olabilir. Sistem bileşenleri çok yer kaplamaktadır ve ameliyat sırasında yardımcı personelin erişimini kısıtlamaktadır. Ayrıca, da Vinci sistemi oldukça pahalıdır ve özel aletler gerektirir. Sistem 2006 yılında 48000 prosedürde kullanılmıştır ve yaklaşık 1.2 milyon \$'a satılmaktadır. 2009 yılında sürülen HD Si serisi 1.75 milyon \$'dır. Bu dünya çapında ameliyathanelerde bu teknolojinin yaygınlaşmasını engelleme hususunda önemli bir faktör olmuştur [5].



Şekil 1.6. da Vinci robotik cerrahi sistemi [12]

Bahsedilen sistemler dışında ticari ve araştırma amaçlı çok sayıda robotik sistem geliştirilmiştir. Bunlardan bir kısmı genel amaçlı programlanabilir robotların kullanılmasıyla gerçekleştirilmişken önemli bir kısmıysa özel tasarıma sahiptir. Staubli rx130 robotu şakak kemiği boşluklarında delme işlemleri için kullanılmıştır. Acrobot (Acrobot şirketi) diz protezi cerrahisinde kullanılmak üzere geliştirilmiştir. Programlanabilir robotik cerrahi sistemleri ümit verici olsa da büyük gelişmeler ve kabul görme tele-robotik cerrahi alanında olmuştur.

Eindhoven teknoloji üniversitesi Eylül 2010'da kuvvet geribesleme özelliği bulunan ilk cerrahi robot Sofie cerrahi robot sistemini geliştirdiklerini duyurmuşlardır.

Sanal gerçeklikle ilgili ilk çalışmalar ise 1980'li yıllarda Nasa'dan araştırmacılar tarafından başlatılmış ve araştırmacılar bu teknolojinin mikro-cerrahide cerrahın becerisini geliştirmeye yönelik potansiyelinin farkına varmışlardır. Ayrıca uzak robotik sistemlerin cerrah tarafından kontrol edilebilmesiyle tele-robotik cerrahi sistemi ortaya çıkmıştır. Sanal gerçeklik arayüzüne sahip bir tele-robotik sistem geliştirilmiştir. Ayrıca bu yöntemin yeni bir teknik olan laparoskopik cerrahi alanında da kullanılabileceği keşfedilmiştir [1].

1.3. Tele-robotik Cerrahi

Uzaktan cerrahi sistemleri cerrahın hastaya doğrudan ya da uzaktan müdahale edebilmesini sağlayan bir medikal uygulamadır. Uzaktan cerrahi çeşitli durumlar için kullanışlı olmaktadır. Bu durumlar; uzay aracı, denizaltı ya da ambulans gibi acilen hastaya müdahale gerektirebilecek yerlerde ve müdahaleyi yapabilecek uzman bir cerrahın bulunmaması gibi durumlarda ya da bulaşıcı hastalık riski ya da cerrahın x-ray ışınları altında uzun süre bulunamayacağı gibi güvenlik amacıyla olabilir.

1.4. Minimal İnvaziv Cerrahi

Minimal invaziv endoskopik cerrahi, karın cerrahisi alanında yeni bir cerrahi teknik olarak uygulanmak üzere 1980'li yılların sonlarında ortaya çıkmıştır. Geliştirilen bu yöntemle cerrahların artık bir operasyonu gerçekleştirebilmek için hasta vücudunun içinde ellerini kullanmalarına ihtiyaçları kalmamıştır. Bu cerrahi türünde cerrahi ve görüntüleme amaçlı aletler vücuda küçük kesikler aracılığıyla yerleştirilmektedir.

Böylece bu yöntem, ameliyat yaralarını minimize ettiği gibi daha çabuk iyileşme sağlamaktadır ve daha kısa hastane yatışı gerektirir. Bunların yanında, monitöre bakarak cerrahi aletleri kullanma zorunluluğu, ekrana göre ters hareket etme ve el-göz koordinasyonu, hareket kısıtlılığı ve istenmeyen el hareketlerine bağlı olan riskler gibi güçlükler de vardır [3].

Anahtar deliği cerrahisi olarak da bilinen minimal invaziv cerrahi yönteminde etkilenen bölge görsel yönlendirmeye endoskopik ya da laparoskopik olarak kesilir. Laparoskop, standart açık prosedürlerinde görülmesi daha zor olan bölgelerin görüntülenmesine imkân tanımıştır. Bu uygulamalarda özel araçlar ve cihazlar kullanılır. Minimal invaziv prosedürleri açık, konvansiyonel cerrahiye göre özellikle daha kısa hastane yatışı, daha kısa iyileşme süresi, analjezik gereksinimi azaltmasıyla, ameliyat sonrası komplikasyonların azaltılmasıyla ve bazı durumlarda daha düşük hastalık oranı gibi birçok avantaj sunmaktadır. Açık ya da anahtar deliği türündeki bir cerrahi girişim genellikle radyoterapi ve kemoterapi gibi destekleyici prosedürlerle devam eder [7].

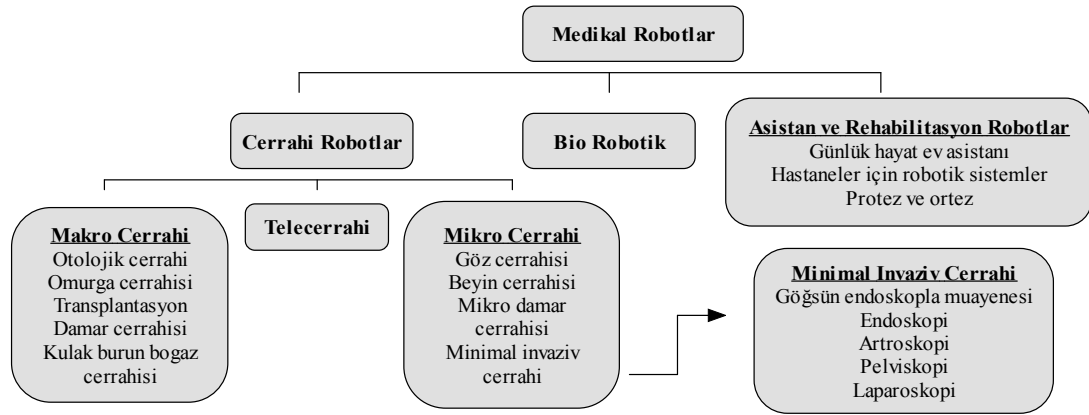


Şekil 1.7. Minimal invaziv cerrahi ve endoskop

Laparoskopik yaklaşımın doğasında bulunan çeşitli sınırlamalar genel cerrahinin bazı alanlarında yaygın olarak kullanımını engellemiştir. Laparoskopik cerrahi sırasındaki görselleştirme genel olarak iki boyutludur ve kamera operatörünün hareket kabiliyeti ve yorulmasıyla sınırlıdır. Ayrıca, araçların uzun olması operatörün doğal olan sarsıntısını cihazın ucunda artırır. Standart bir laparoskopik prosedür sırasında, cerrahların uzun bir süre ergonomik olarak biçimsiz pozisyonlarda durmaları gerekmektedir [5].

1.5. Uygulama Alanları

Robot tabanlı medikal uygulamalar üç kategori altında sınıflandırılabilir. Bunlar, cerrahi robotlar, asistan robotlar ve bio-robotlar olarak sıralanabilir. Bu sınıflandırma Şekil 1.8 ile özetlenebilir [13].



Şekil 1.8. Medikal robotlar

Bunun dışında medikal amaçlı robotlar yarı otonom, güdümlü ve tele-cerrahi olmak üzere üç farklı kategori altında toplanabilir. Yarı otonom bir cerrahi robotik sisteminin yörünge planı endüstriyel robotlara benzer olarak tomografi ya da manyetik rezonans gibi görüntüleme sistemleri kullanılarak oluşturulan görsel anatomi yapısına bağlı olarak önceden tanımlanmaktadır. Yörünge tanımlandığında anatomik yapıya göre göreceli noktalar tanımlanarak robot ile eşleştirilir. Sonrasında robot, cerrahın herhangi bir müdahalesine ihtiyaç duymadan görevini yerine getirecektir. Güvenlik nedeniyle cerrah operasyonu durdurabilirken yörüngeyi değiştirilmesi için yeniden planlamaya ihtiyaç vardır. Bu robotlar, ortopedik ve beyin cerrahisi için uygundur. Güdümlü robotik sistemler mikro-cerrahi, mikro damar, göz ve üroloji gibi yüksek hassasiyet gerektiren ameliyatlarda kullanılabilir. Cerrah robotla doğrudan etkileşim kurarak robotu yönlendirir. Robot empedans kontrolü altında kararlı, sabit ve hassas hareketler sağlamaktadır. Kuvvet / tork sensörü, haptik ya da çeşitli joystickler kullanılarak robota hareket komutları iletilmektedir [14].

Mikro cerrahi, klasik açık cerrahiden ya da makro cerrahiden farklıdır. Aralarındaki fark sadece boyutsal değildir. Bunun yanında özel tasarlanmış cerrahi araçlara ve operasyon yöntemlerine ihtiyaç duyulur. Mikro cerrahi bir cerrah tarafından çeşitli minyatür cerrahi araçlarla (kıskaç, makas, iğne, bıçak vb.) ameliyat mikroskobuyla

yapılan son derece karmaşık operasyonlar içeren bir ameliyat şeklidir. Ortopedi ve travmatoloji, genel cerrahi, kulak burun boğaz, göz, jinekoloji, üroloji, plastik cerrahi, beyin, nöroşirurji (sinir sistemi cerrahisi), pediatri, radyo-cerrahi ve kalp damar cerrahisi gibi branşlarda uygulama alanı bulmaktadır. Mikro cerrahi daha küçük kesiklere imkân tanıyarak doku zedelenmesini minimize etmek için bir manipülatörün kullanılabileceği uygun alanlardan biridir.

Nöroşirurji robotik cerrahi sistemleri minimal invaziv cerrahisi içinde doğal alanlardan biridir. Robotların endüstriyel uygulamalardaki ekonomik avantajlar, artan hassaslık ve gelişmiş kalite nöroşirurjide robotik uygulamaları teşvik etmiştir. Beyin cerrahisi robotlarının beyin cerrahlarına göre önemli manipülatif avantajları vardır. Nöro-robotlar, tekrar tekrar aynı işlemi gerçekleştirmek için güvenilirdir. Bu robotlar mutlağa yakın geometrik doğruluğa sahiptirler ve biyolojik tehlikelere ve tehlikeli ortamlara dayanıklıdır. Ayrıca, çok dar ve uzun cerrahi koridorlarda çalışabilirler ve böylece beyin cerrahisi için çok uygundurlar. Beyin, kafatası içinde simetrik olarak hapsedilmiştir ve cerrahi aletlerin en küçük sapmalarında bile kolaylıkla zarar görebilir [15].

Son yirmi yılda çeşitli sistemler nöroşirurji alanında kullanılmak üzere geliştirilmiş olup, bunlardan bazıları klinik uygulamalarda kullanılmış, diğerleri ise güvenlik ve etik nedenleriyle kullanılmamıştır. Kullanılan bu robotlar arasında PUMA 200, Lozan Üniversitesi'nden Minerva robotu, NeuroMate, Japonya'da geliştirilen MR uyumlu robot, Evolution1, CyberKnife, RoboSim nöroşirurji simülatörü, Neuroarm, Pathfinder ve son olarak SpineAssist sistemleri sıralanabilir [15].

Medikal robotik alanı içinde en yaygın kullanım oranı rehabilitasyon amaçlı olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu robotlar, bazı güçlük çeken insanların günlük yaşamlarını devam ettirebilmeleri için kullanılan yardımcı ve destekleyici sistemlerdir. El, kol ve bacak gibi eksik uzuvları ya da zayıf uzuvları bulunan kişilerin eksikliklerini giderici robotik protez ve ortezleri ya da felçli bireylerin rehabilitasyonu amaçlı kullanılmaktadır. Robot destekli rehabilitasyon terapisi özellikle çok tekrarlı hareketlerde tedaviyi geliştirmektedir ve hastaya destek olabildiği gibi direnç te gösterebilen, veri toplanmasına imkan tanıyarak tedavi sürecinin takibine ve uygulanan tekniklerin optimize edilmesine izin vermektedir. Ayrıca bu sistemler

terapi sırasında uzman yükünü azaltarak maliyetlerin düşmesine ve tedaviye alınabilecek hasta sayısının arttırılmasına büyük katkı sağlamaktadır [14].

1.6. Robotik Cerrahinin Sunduğu Avantaj ve Dezavantajlar

Cerrahin yeteneklerini arttırmaya yönelik gelişim gösteren robotik cerrahi sistemleri özellikle minimal invaziv cerrahi teknikleriyle beraber birçok avantaj sunmuştur. Kısaca bu sistemlerin avantaj ve dezavantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

Robotik cerrahinin bazı önemli avantajları:

- Hassasiyet
- Minyatürleşme
- Küçük kesikler
- Az kan kaybı
- Az ağrı
- Az ağrı ilacı
- Hızlı iyileşme
- Üç boyutlu büyütme
- Geliştirilmiş ergonomi
- Hastanede kalma süresinde azalma
- Kan naklinde azalma
- Enfeksiyon riskinin azalması

Robotik cerrahinin bazı önemli dezavantajları:

- Maliyet
- Sistem boyutu
- Ek cerrahi eğitim
- Güvenlik ve hata riski

Robotik cerrahinin sunduğu avantaj ve dezavantajlara ek olarak insanların ve robotların genel özellikler açısından karşılaştırması yapılabilir (Tablo 1.1). İnsan kendi doğasından kaynaklanan sebepler doğrultusunda düşünme ve karar verme özellikleriyle öne çıkarken robotlar mekaniksel ve elektriksel (sensör ve kontrol) yapısına bağlı olarak yüksek doğruluk, hassasiyet, tekrarlama ve insana zarar verebilecek ortamlarda çalışabilme gibi özellikleriyle ön plana çıkmaktadır.

Tablo 1.1'den insanların ve robotların pozitif özelliklerinin birleşimi sonucunda ameliyat sırasındaki sağlık hizmetlerinin daha iyi bir seviyeye çekilebileceği görülebilir. Bu sayede insan yüksek seviyeli stratejik düşünme ve karar verme yeteneklerini sağlarken robot yüksek hassasiyet ve doğruluk özellikleriyle gerçek alet / doku etkileşimine imkân tanımaktadır [14].

Tablo 1.1. İnsan ve robotların genel özelliklerinin karşılaştırılması [14]

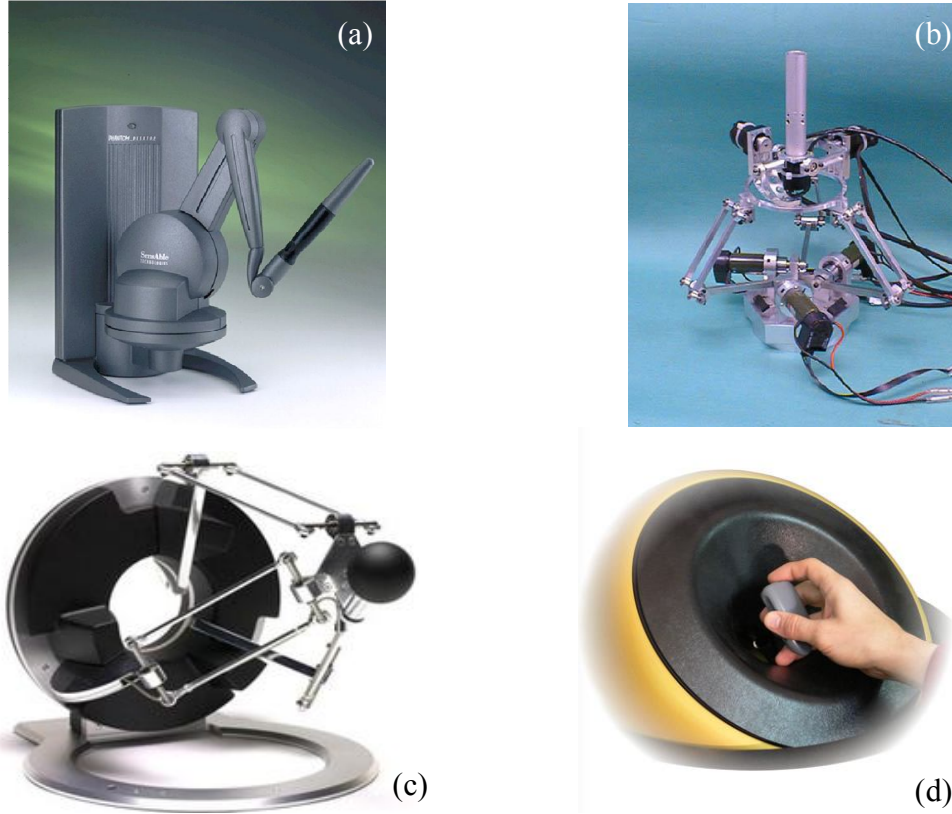
Karakteristik	İnsan			Robot
Koordinasyon	Görsel ve fiziksel / sınırlı	-	+	Geometrik / Yüksek doğruluk
Yetenek	Sensör bilgisine göre yüksek	+	+	Sensör çeşit ve sayısına bağlı / sınırlı
Bilgi entegrasyonu	Yüksek seviye / yüksek kapasite Düşük seviye / sınırlı	+	-	Yüksek seviye / sınırlı Düşük seviye / yüksek kapasite
Uyumluluk	Yüksek	+	-	Tasarımla sınırlı
Kararlı performans	Zamanla hızlı azalan	-	+	Zamanla yavaş azalan
Ölçeklenebilirlik	Yaradılıştan sınırlı	-	+	Tasarımla sınırlı
Sterilizasyon	Kabul edilebilir	+	+	Kabul edilebilir
Doğruluk	Yaradılıştan sınırlı	-	+	Yüksek
Yer gereksinimi	Vücut ile sınırlı	+	-	Fazla
Risk	Radyasyon ve enfeksiyon	-	+	Yok
Kullanım amacı	Genel	+	-	Özel

1.7. Haptik Sistemler

Haptik sistemler, kısaca, çeşitli serbestlik derecelerinde ve hassasiyette verilen hareketlerin konum ve oryantasyonun belirlenmesini sağlayan mekatronik yapılar olarak tanımlanabilir. Bu yapılar çeşitli çalışma uzaylarına sahip olacak biçimde elektro-mekanik ya da elektromanyetik prensiplerde tasarlanabilmektedirler. Çeşitli ticari ve araştırma amaçlı haptik sistemler Şekil 1.9 ile gösterilmiştir.

Özellikle kuvvet geri besleme özelliğiyle dokunma hissi veren haptikler robotik cerrahi alanında cerrah ve robot arasındaki etkileşimi sağlayarak önemli görev üstlenmektedir. Örneğin, düğüm atmayla ilgili deneylerde kuvvet geri beslemesinin uygulanan kuvvetin azalmasını sağladığı görülmüştür. Ayrıca, kuvvet geri beslemesinin stenoz (daralma) tespitindeki uygulanan kuvveti ve cerrah yorgunluğunu da azalttığı tespit edilmiştir [3]. Robotik cerrahinin ilk dönemlerinde eksik bir parça olan haptik sistemler 1990 yılında MIT üniversitesinde başlayan çalışmalarla ilk kuvvet geri beslemeli cerrahi ekipmanın 1995 yılında geliştirilmesiyle sonuçlanmıştır [4]. Bazı sistemlerde, cerrahin doku ve cerrahi alet arasındaki kuvvetleri hissedebilmesi için uygulanan kuvvet ölçülerek ana giriş

birimindeki eyleyiciler vasıtasıyla geri yansıtılmaktadır. Bileteral kontrolde kuvvet geri besleme komutu operatör tarafından verilen pozisyon komutu ile robot tarafından gerçekleştirilen gerçek pozisyon arasındaki fark olarak tanımlanmaktadır. Pozisyon hatası arttıkça geri beslenen kuvvet oransal olarak artmaktadır [14].



Şekil 1.9. a) Seri mekanizmalı [16], b) ve c) paralel mekanizmalı [17, 18], d) elektro-manyetik [19] prensiplerinde çeşitli haptik sistemler

Haptik sistemlerin bir diğer ve önemli kullanım alanı ise sanal ortamlar oluşturularak eğitim amaçlı benzetim imkânı sunan platformların oluşturulmasıdır. Stajyer cerrahların egzersizleri önemli maliyet getirmekle beraber ameliyathane ve ekipmanlarının zamansız ve verimsiz kullanılmasına neden olmaktadır. Stajyerler plastik modeller, canlı hayvan ve insan üzerinde eğitilmektedirler. Bir stajyer, uzman bir cerraha göre daha fazla hata yapma olasılığına sahiptir ve bu hatalar ekonomik, yasal ve sosyal etkilere sahip olabilir. Bu nedenlerden dolayı cerrahi amaçlı simülasyonlar uygun maliyet ve etkin bir metodoloji sunmasından dolayı, bir eğitim opsiyonu olarak karşımıza çıkmaktadırlar. Medikal simülasyonlar uçak simülasyonlarından esinlenerek geliştirilmiştir. Cerrahi amaçlı sanal gerçeklik simülasyonları hasta hayatlarını tehlikeye atmadan daha iyi bir eğitim ve egzersiz

imkânı sunmaktadır. Cerrah adayları zor ve farklı senaryoları için egzersizler yapabilirler. Ayrıca canlı hayvan ya da kadavra kullanımına olan ihtiyacı ortadan kaldırır.

1.8. Özet Literatür Taraması

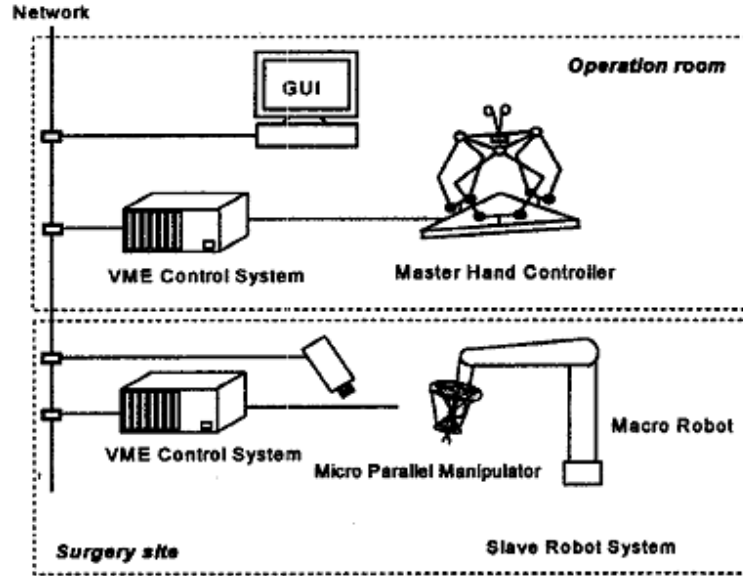
Tıp ve teknoloji birbirleriyle oldukça ilişkili bir süreç geçirmektedirler ve bu sürecin nereye kadar uzanabileceğini kestirmek güçtür. Tarihi gelişimleri incelendiğinde teknolojiyle beraber tıp alanındaki gelişmeler kendi devirleri açısından devrim niteliğindedir. Robotlar ve bilgisayar destekli robotik sistemlerin tıp alanında da kullanılmaya başlanması ve yenilikler getirmesi tıpta yeni çıgırlar açmıştır.

Literatürde medikal robotlar ve robotik cerrahi alanlarında çok sayıda çalışma vardır. Çalışmalar, endüstriyel seri robotların tıp alanında kullanımlarından paralel robotlara, seri ve paralel robotları birlikte kullanan çalışmalara ve seri ya da paralel özel tasarımlara kadar makro ve mikro boyutlu çeşitli robot yapılarını içermektedir. Uygulamalar tıbbın çeşitli alanlarında yoğunlaşmaktadır. Özellikle paralel robotların yoğunlaştığı alanlar şöyle sıralanabilir; kırık kemik yerleştirme ve sabitleme, omurga delme ve vidalama, diz değıştirme, kalça değıştirme, kafatası delme, rehabilitasyon.

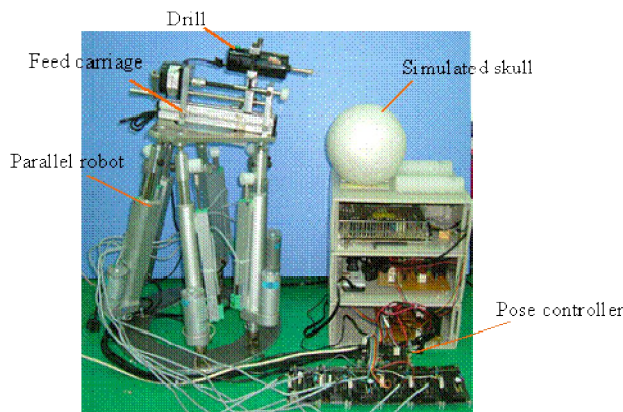
Kwon ve diğierleri [13] çalışmalarında, mikro cerrahi amaçlı bir tele-robot sisteminin (Şekil 1.10) öncelikle özelliklerini analiz etmişler ve analiz sonuçlarına göre ihtiyaç duyulan sistemi gerçekleştirmişlerdir. Makro hareketler için 6 serbestlik dereceli bir seri endüstriyel robot kullanılmış ve mikro hareketler için 6 serbestlik dereceli modifiye edilmiş Stewart Platformu kullanılmıştır. Harmonik DC motorlu 5 bar paralel mekanizma kullanılarak bir 6 serbestlik dereceli kuvvet aksettiren haptik geliştirilmiştir. Kuvvet-konum çevrimi tabanlı bilateral (çift yönlü, ikili) kontrol algoritması (PID) önerilmiştir. Haptik için yerçekimi, sürtünme ve atalet etkilerini minimize eden yerel konum kontrolcüsü geliştirilmiştir. Analizler sonucunda, 20x20x20 mm çalışma uzayına sahip 20 µm hassasiyetinde 6 serbestlik dereceli ve 100 gf (1 N) kuvvet uygulayabilme özelliklerine ihtiyaç duyulmuştur.

Tsai ve Hsu [20] çalışmalarında, stereotaktik nöro-cerrahi de hassas kafatası delinmesi için bir paralel cerrahi robot geliştirmişlerdir ve Şekil 1.11’de görölmektedir. Yeterli hassasiyette olduğunu belirttikleri Stewart Platformu tabanlı

robot 35x35x45 cm³ boyutlarında ve 6 serbestlik derecesindedir. Tek serbestlik dereceli doğrusal delici mekanizması üst platforma yerleştirilmiştir. Konum kontrolünde, ters kinematik analizini gerçekleştiren bir bilgisayar üst kontrolör olarak, bilgisayardan seri hattan aldığı komutları yerine getirmek için çoklu mikrodenetleyicili tabanlı bulanık kontrolör alt seviye kontrolör olarak tasarlanmıştır ve Şekil 1.11’de görülmektedir.



Şekil 1.10. Mikro cerrahi amaçlı tele-robotik sistem [13]

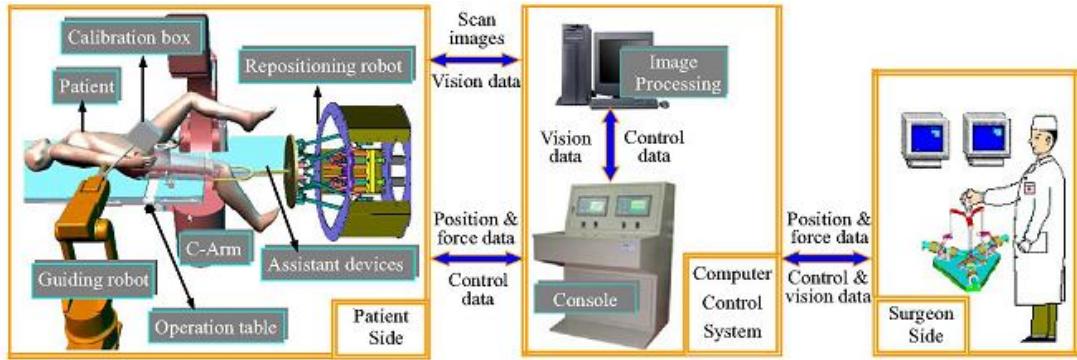


Şekil 1.11. Geliştirilen paralel cerrahi robot ve kontrolör yapısı [20]

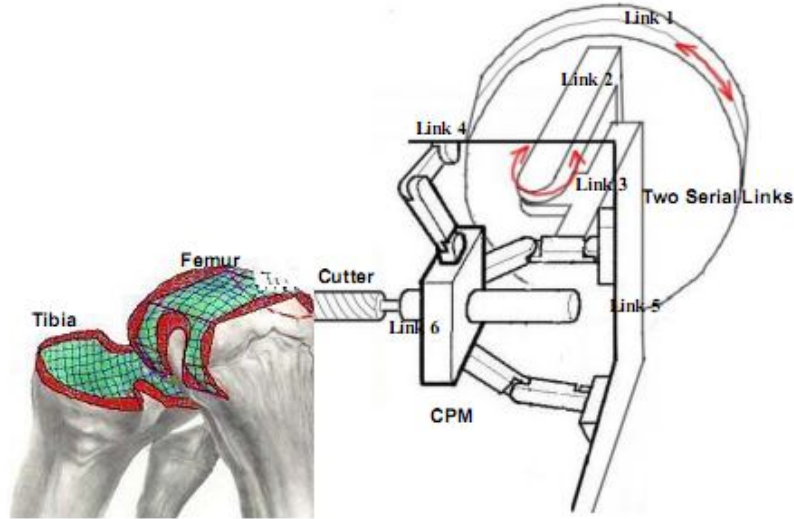
Du ve diğerleri [21] HIT-RAOS adındaki flüoraskopi güdümlü robot destekli bir ortopedik cerrahi sistem geliştirmişlerdir. Sistemde bir paralel ve bir seri robot kullanılmıştır. Paralel robot, uzun kemik kırık konumlandırılmasında geleneksel klinik tedavisini uygulamaktadır. Seri robot ise kemik iliği içi çivilerinin

sürgülenmesinde kullanılmaktadır. Tüm bunlar hassas c-arm x-ray cihazı tarafından sağlanan flüoroskopi imgelerinin yönlendirilmesi altında yapılmaktadır. Cerrah konsolu ve kontrol yazılımları da geliştirilmiştir. Çalışmanın amaçları:

- Kırık kemiklerin yeniden konumlandırılmasında cerraha yardımcı
- Çivilerin sürgülenmesine cerrahı yönlendiren
- X-ray altında cerrahın çalışma süresini azaltmak
- Hassas konumlandırma ve yüksek başarımlı oranı



Şekil 1.12. HIT-RAOS sistem yapısı [21]

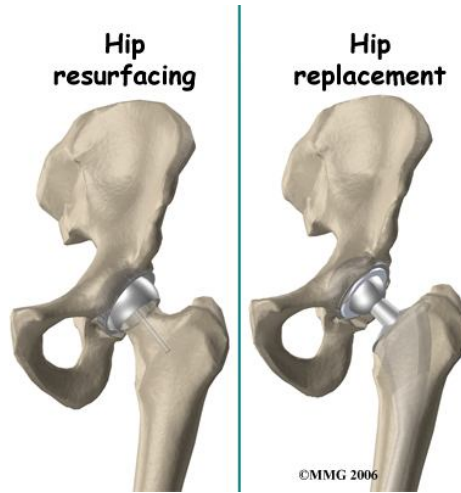


Şekil 1.13. Diz cerrahisi amaçlı geliştirilen KPM robot [22]

Yen ve Lai [22] Şekil 1.13'te görülen imal ettikleri diz cerrahisi robotu için kartezyen paralel mekanizma (KPM) özelliğini kullanmışlardır. Kartezyen paralel manipülatörün sınırlı çalışma uzayı ve yüksek katılığı, artırılmış güvenlik ve yüksek kesme hassaslığı sağlamaktadır. KPM'nin ayrılmış (decoupled) özelliği ile kompleks kinematik önlenmiştir. Lagrange-D'Alembert yöntemiyle dinamiği çıkarılmıştır.

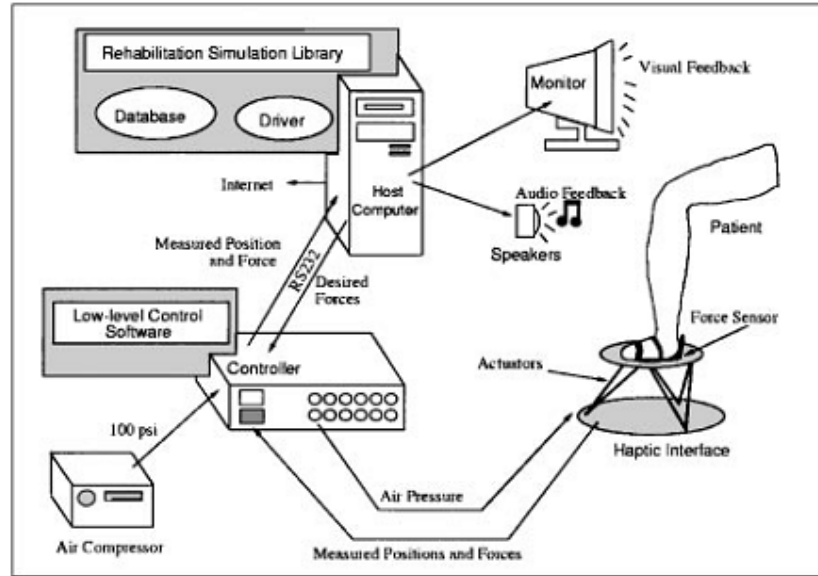
Konum kontrolü, dinamik model kullanılarak hesaplanan tork yöntemi kullanılarak geliştirilmiştir. Benzetim ve deneysel sonuçlar yüksek konumlama hassaslığı ve istenen konum profilinin sağlandığını göstermiştir. Güvenlik, kesme hassaslığı ve kinematik ve kontrol basitliği açısından önerilen mekanizmanın diğer cerrahi amaçlı paralel manipülatörlerden daha iyi mekanik yapıya sahip olduğu savunulmaktadır.

Kwon ve diğerleri [23] çalışmalarında, tüm kalça artroplastı (eklemler üzerinden yapılan plastik ameliyatlar, Şekil 1.14) için yeni cerrahi robota ait mekanizma ve kontrol yöntemlerini sunmuşlardır. Geleneksel kayıt (registration) işleminin dezavantajlarını minimize etmek için yeni bir ölçer (gauge) tabanlı yöntem sunmuşlardır. Kalça kemiğine monte edilebilen 3 serbestlik dereceli robot geliştirilmiştir. Robot cerrahın haptik ile doğrudan kontrolü dışında önceden programlanmış yörüngeyi otomatik olarak takip edebilmektedir.



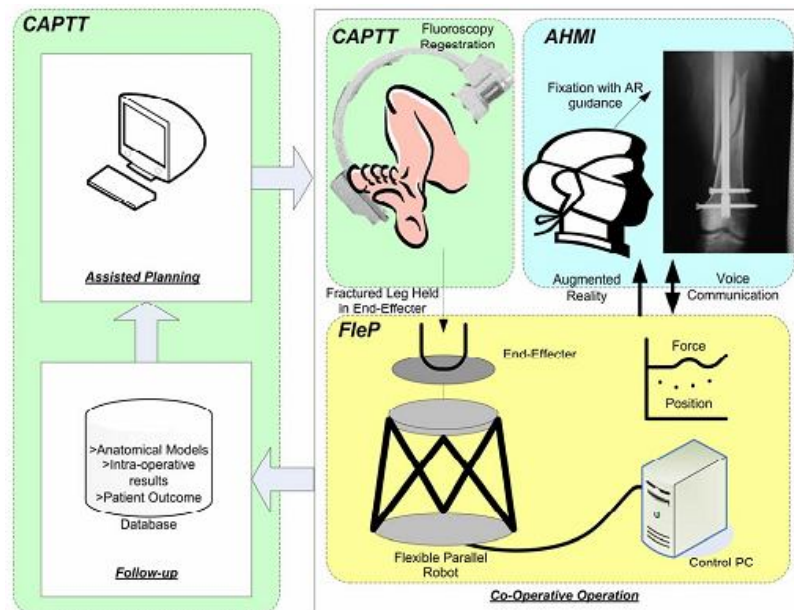
Şekil 1.14. Kalça artroplastı

Girone ve diğerleri [24] rehabilitasyon amaçlı Stewart Platformu tabanlı haptik arayüzden oluşan sistemlerine Rutgers Ankle ismini vermişlerdir. Sistem, sunucu pc de çalışan sanal gerçeklik tabanlı egzersizlere bağlı olarak 6 serbestlik dereceli karşıt kuvvetler sağlamaktadır. Platform hareketi ve çıkış kuvvetleri pc’de veritabanına kaydedilmektedir. Veritabanına internetten ulaşılabilir ve böylece sistem hastaların evde egzersiz yapmalarına imkân tanımaktadır. Robot pnömatik eyleyicilerle çalışmaktadır.



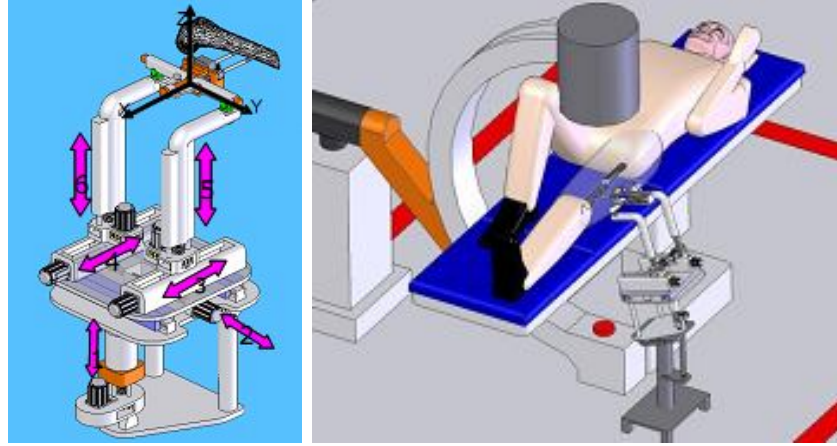
Şekil 1.15. Rutgers Ankle rehabilitasyon amaçlı sistem yapısı [24]

Graham ve diğerleri [25] uzun kemik kırıklarının konumlandırılmasında devam eden problemleri şöyle özetlemektedirler; flüroskopi dolayısı ile radyasyona maruz kalma, üç boyutlu görüntüleme zorlukları ve fiziksel yorgunluk. Bu problemleri gidermeye yönelik bir kırık yerleştirme robotu sunmuşlardır. Aktif konum / kuvvet kontrollü bir esnek paralel robot tasarlamışlardır. Bilgisayar destekli tedavi planlama aracı görüntü analizi, yörünge planlama ve benzetim sağlamaktadır. Gelişmiş bir insan-makine arayüzü ve sesli komut özellikleri mevcuttur. Sistem, uç işlevci değiştirebilen bir yapıdadır. Şekil 1.16 ile sisteme ait genel şema verilmiştir.



Şekil 1.16. Robot destekli kırık tedavi sistemi [25]

Ye ve Chen [26], çalışma uzayı ve hassasiyeti dengelemek için yeni bir hibrit 6 serbestlik dereceli robot geliştirmişlerdir. Şekil 1.17’de robot yapısı görülmektedir. Tüm eyleyiciler doğrusaldır, böylece düşük hızlarda kırık yerleştirme prosedüründe yumuşak hareket sağlanmaktadır.



Şekil 1.17. Geliştirilen robot ve uygulaması [26]

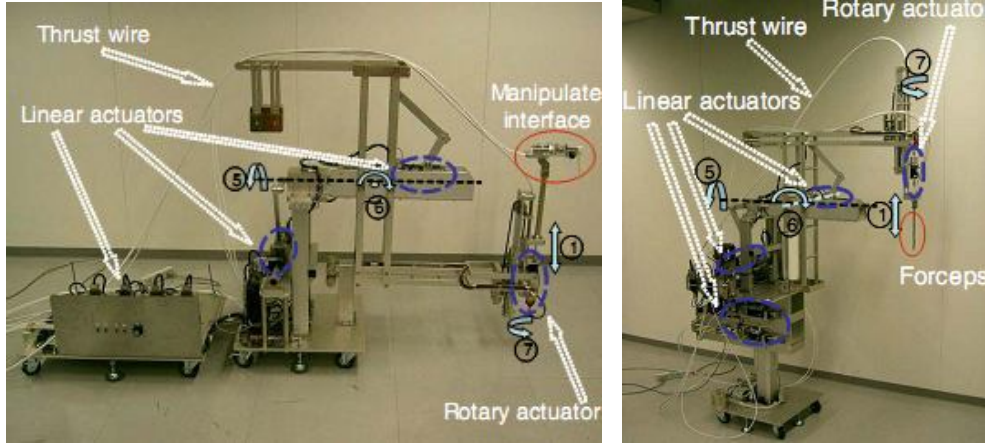
Paralel robotların ihtiyaç duyulduğu ve kullanıldığı alanların ön sıralarında ortopedide kırık kemiklerin yerine oturtulması yer almaktadır. Benzer bir çalışmada [27] cerrah kontrollü, görüntü güdümlü ve robot destekli uzun kemik kırık yerine oturtulmasına ilişkin bilgiler sunulmuştur. Stewart Platformu kullanılmıştır ve standart konfigürasyonun yanında farklı bir konfigürasyonu için çalışma uzayı incelenmiştir ve Tablo 1.2’de görülmektedir. PC tabanlı hareket kontrol kartı ile kontrol edilmiştir. Robotun yönlendirilmesi için x-ray imgeleri işlenerek CAD ortamında üç boyutlu modeller elde edilmektedir.

Tablo 1.2. SP’nin farklı tasarımı için elde edilen özellikleri [27]

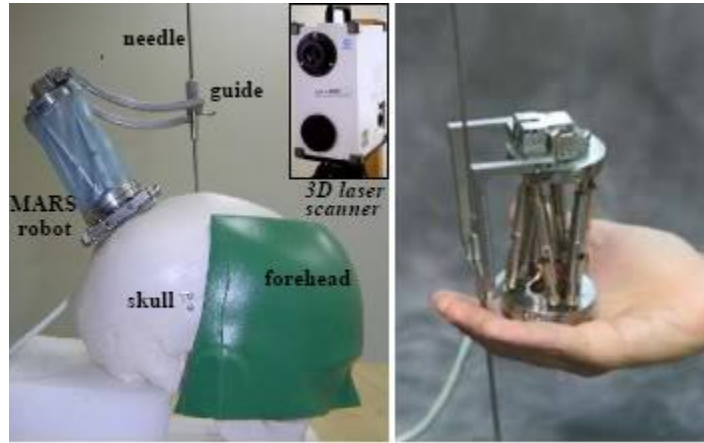
Çalışma uzayı	1. konfigürasyon	2. konfigürasyon	3. konfigürasyon
x yönünde dönme (α)	$\pm 10^\circ$	$\pm 5^\circ$	$\pm 10^\circ$
y yönünde dönme (β)	$\pm 25^\circ$	$\pm 25^\circ$	$\pm 35^\circ$
z yönünde dönme (γ)	$\pm 10^\circ$	$\pm 5^\circ$	$\pm 10^\circ$
x yönünde ilerleme	± 100 mm	± 50 mm	± 100 mm
y yönünde ilerleme	± 200 mm	± 200 mm	± 200 mm
z yönünde ilerleme	± 100 mm	± 50 mm	± 100 mm

Teknik ve aygıtlardaki gelişmelere rağmen endoskopik cerrahi halen cerrahlar için aşırı zorluklar kapsamaktadır. Tanaka ve diğerleri [28] çalışmalarında bu sorunu çözmek için robotik bir sistem geliştirilmiştir. Bunun için çoklu serbestlik dereceli ana-izleyici (master-slave) tipinde ivme kontrol tabanlı çift yönlü (bilateral) kontrol

sistemi FPGA kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlarla testler yapılmıştır. Geliştirilen sistem Şekil 1.18’de görülmektedir.



Şekil 1.18. Ana ve izleyici robot sistemi [28]



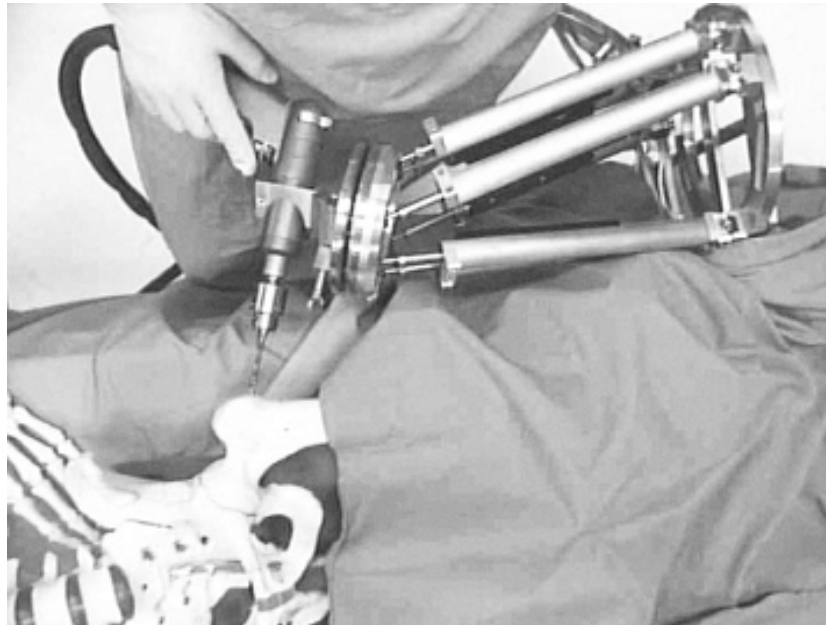
Şekil 1.19. Minyatür paralel robot, MARS [29]

Shoham ve diğerleri [29] çalışmalarında, cerrahi alan içinde direkt olarak hastanın kemiksi yapısına monte edilen omurga ve travma cerrahisi amaçlı minyatür bir robot geliştirmişlerdir. Robot, çeşitli cerrahi prosedürlerde kullanmak üzere delme amaçlı hassas konumlama ve yönelim özelliklerini sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Robot insan anatomisi ile beraber yek bir şekil aldığı için sabitleme ya da hareket takibini ortadan kaldırmakta ve böylece robotun hedef anatomik yapıya kaydını (registration) kolaylaştırmaktadır. Geliştirilen robot MARS olarak isimlendirilmiş ve 200 gr ağırlığında 6 serbestlik dereceli $5 \times 7 \text{ cm}^3$ boyutlarında oldukça minyatür bir paralel manipulatördür. Robot, omurgaya vida yerleştirme için cerrahi araç gereç konumlandırma ve kemik iliği içi çivileme için delme gibi iki klinik amaç için geliştirilmiştir. Robot x-ray imgeleri kullanılarak planlanarak hastaya monte

edilmektedir. Ön deneysel çalışmalarla yapının uygulanabilirliği gösterilmiştir. Şekil 1.19’da robot ve kafatası operasyonuna ait resimler verilmiştir.

Brandt ve diğerleri [30] CRIGOS (Compact Robot for Image-Guided Orthopedic Surgery) projesiyle kullanıcı gereksinimlerine bağlı olarak görüntü güdümlü ortopedik cerrahi için kompakt bir cerrahi robot sistem geliştirmişlerdir. Sistem kompakt bir paralel robot ve yazılım sisteminden oluşmaktadır. Öncelikle ihtiyaçlar; literatürden, sorunlardan ve uzman kişilerle yapılan çalıştaylardan analiz edilmiştir. Buna bağlı olarak Şekil 1.20’de görülen laboratuvar tipi robot geliştirilmiştir. Ancak Tablo 1.3’te görüldüğü gibi robotun özelliklerinin geliştirilmesi planlanmıştır. Robotun uygulama senaryoları ve görev tanımları şu şekilde yapılmıştır:

- Sistemin çeşitli cerrahi müdahalelere kolay adaptasyonu
- Farklı bölgelerde farklı ortaklıklar arasındaki kalıcı bilgi değişimini teşvik etmesi için tıbbi ve teknik olanakların ve kooperatif gelişim çalışmalarının desteklenmesi
- Endüstriyel ortaklıklar tarafından yönetilen erken kalite güvence uygulamasını kolaylaştırmak

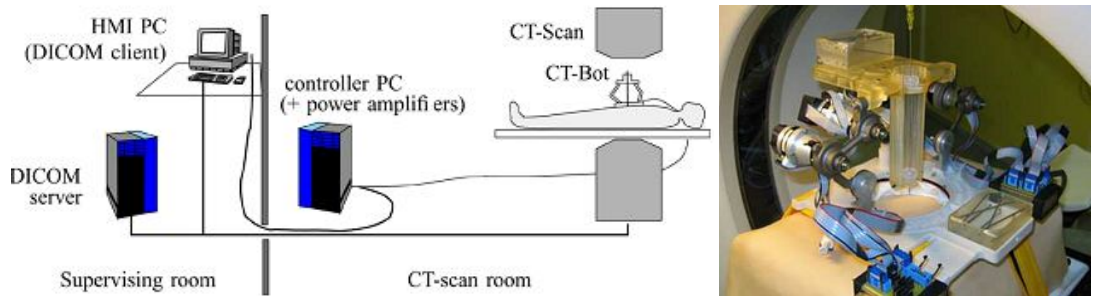


Şekil 1.20. CRIGOS laboratuvar prototipi [30]

Tablo 1.3. İlk prototip ve geliştirilmesi amaçlanan robot özellikleri [30]

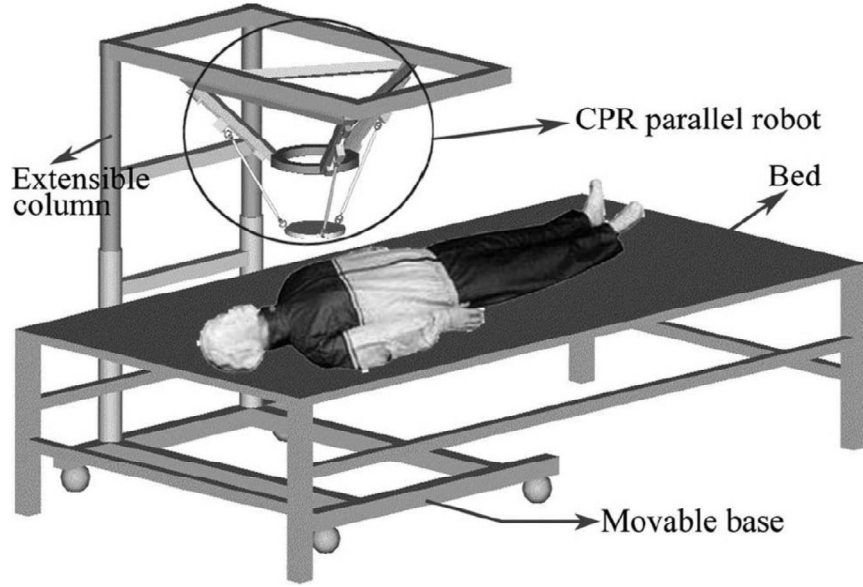
Özellik	İlk prototip	Geliştirilen prototip
Sabit platform çapı	230 mm	260 mm
Üst platform çapı	125 mm	130 mm
Yükseklik	330-385 mm	440-540 mm
Çalışma uzayı	100x100x50 mm ³	200x200x40 mm ³ ya da 100x100x80 mm ³
Yük kapasitesi	3 kg	10 kg
Ağırlık	4 kg	10 kg
Konumlama hassasiyeti	±2 mm	±0.1 mm
Maksimum hız	10 mm/sn	20 mm/sn

Maurin ve diğerleri [31] çalışmalarında, tomografi taraması altındaki tıbbi müdahaleler için yeni bir robot asistanı geliştirmişlerdir. Radyoloji prosedürleriyle ilgili müdahalelerin gereklerini yerine getirmek için küçük ve hafif hastaya monte edilen robot tasarlanmıştır. Robot, yarı küresel çalışma uzayına sahip 5 serbestlik dereceli paralel bir yapıdadır. Tomografi taraması içinde klinik öncesi uygulamalar yapılmıştır. Genel sistem yapısı ve robot resmi Şekil 1.21’de verilmiştir.



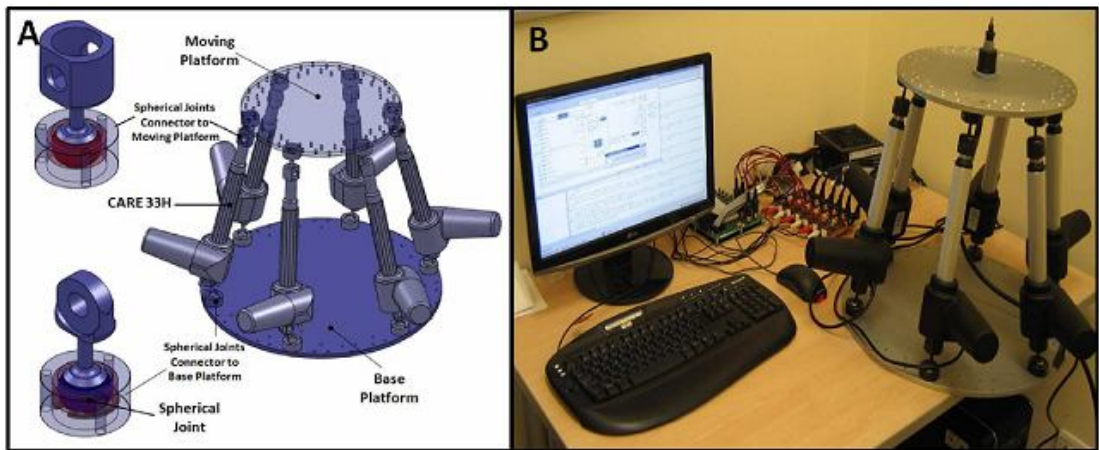
Şekil 1.21. Genel sistem yapısı ve geliştirilen robot [31]

Li ve Xu [32] çalışmalarında, kardiyopulmoner resüsitasyon sürecinde göğüs sıkıştırma amacına uygun tıbbi bir paralel robot önermişlerdir. Bunun için üçlü prizmatik universal-universal bağlantılı doğrusal paralel manipülatör tasarlamışlar ve yapının kinematiği, dinamiği ve kontrol konularını içeren ayrıntılı bir analiz yapmışlardır. Tekillik analizi screw teorisi üzerinden yapılmıştır ve çalışma uzayı incelenerek daha geniş kullanılabilir çalışma alanı elde etmek için robot optimize edilmiştir. Sanal iş prensibine dayanarak sistem dinamik modeli elde edilmiştir ve dinamik kontrol hesaplanan tork yönteminden faydalanarak uygulanmıştır. Deney sonuçları prototip için yapılan kontrol algoritmasının performansının iyi olduğunu göstermektedir.



Şekil 1.22. Önerilen medikal robotun genel tasarımı [32]

Barkana [33] çalışmasında, OrthoRoby olarak adlandırılan ve ortopedik cerrahi de kemik kesme yörüngesinin izlenmesi için hesaplanan-tork kontrol ve bozucu-gözlemleyici tabanlı kontrol yöntemlerini kullanan bir robotik sistem geliştirmiştir. Model belirsizlikleri ve bozucuların olduğu bir ortamda, tıbbi bir robot sisteminin kontrolü için gürbüz hareket kontrolü gereklidir. Kesme yörüngesinin takibine ilişkin performansı göstermek için deneyler yapılmıştır ve hesaplanan-tork kontrolünün parametre belirsizlikleri ve modellenemeyen dinamikler nedeniyle kararsız olabileceği gözlemlenmiştir [34]. Bu nedenle, kararlılığı sağlamak için bozucu-gözlemleyici tabanlı kontrol yöntemi kontrol yapısına dâhil edilmiştir. Geliştirilen sistemin tasarım aşaması ve son haline ait görüntüler aşağıda görülmektedir.



Şekil 1.23. OrthoRoby tasarımı ve genel sistem görünümü [33]

Kırıklar genel yaralanmalardan biridir ve örneğin 65 yaş üstü erişkinlerde düşme sonucunda % 87 oranında kemik kırılmaları yaşanmaktadır. Bu yüksek oran uygun tedavi eylem ve uzmanlığı ile hizmet veren ve hızlı teşhis yeteneği olan merkezlerin gelişmesine yol açmıştır. Ancak, ortopedi alanı göreceli olarak gelişmeye çok açık değildir. Kullanılan teknikler çoğu zaman tartışmalıdır ve eğitim zor olduğu için cerrahın deneyimi sınırlıdır. Mümkün olan en iyi kemik kaynaşmasını sağlayarak yumuşak doku zedelenmesini önlemek için paralel robot düşük kuvvet ve hassas konumlamayla hareketleri gerçekleştirmelidir. Bunun için kuvvet ve pozisyon kontrolü beraber yapılmalıdır [35]. Belirlenen robot özellikleri Tablo 1.4’te görülmektedir. Geliştirilen sistemde;

- Veri tabanı desteği vardır
- Modelleme ve görselleştirme vardır (kemik)
- 3 boyutlu kemik şekillendirme vardır

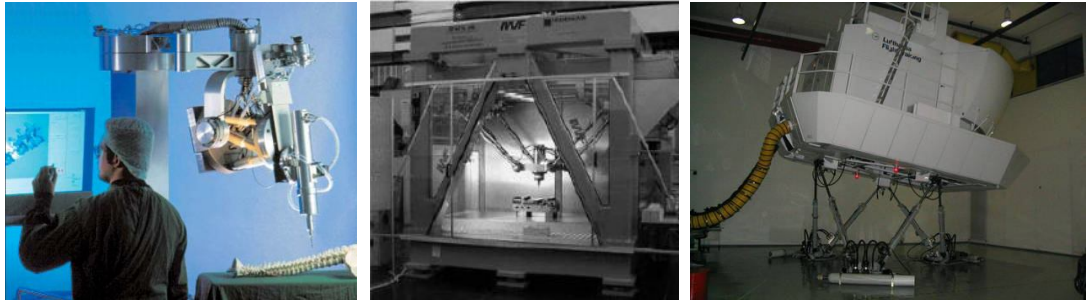
Tablo 1.4. Kırık tedavisi için gerekli özellikler [35]

Hareket	Çalışma uzayı	Hassasiyet
x yönünde dönme (α)	$\pm 10^\circ$	$< 1^\circ$
y yönünde dönme (β)	$\pm 10^\circ$	$< 1^\circ$
z yönünde dönme (γ)	$\pm 30^\circ$	$< 1^\circ$
x yönünde ilerleme	± 100 mm	< 1 mm
y yönünde ilerleme	± 100 mm	< 1 mm
z yönünde ilerleme	± 150 mm	< 1 mm

2. STEWART PLATFORMU

2.1. Giriş

Son yıllarda, yüksek hassasiyetli uzaysal hareketli sistemlere olan talep hızla artmaktadır. Bugünkü birçok mekanik sistemin performansı yüksek katılık ve hassas konumlandırma gerektirdiğinden paralel manipülatörler önem kazanmışlardır. Bu yüzden son yıllarda paralel robotlar birçok endüstride, tıp alanında ve savunma sanayinde geniş çalışma alanı bulmuştur. Bu çalışma alanlarından bazıları lazerle hassas kesme kafası, mikro işleme, takım tezgâhı teknolojisi, uçuş simülatörleri, helikopter inme pisti, füze atma platformu ve cerrahi operasyonlar olarak ifade edilebilir. Bazı uygulama örnekleri Şekil 2.1’de görülmektedir.

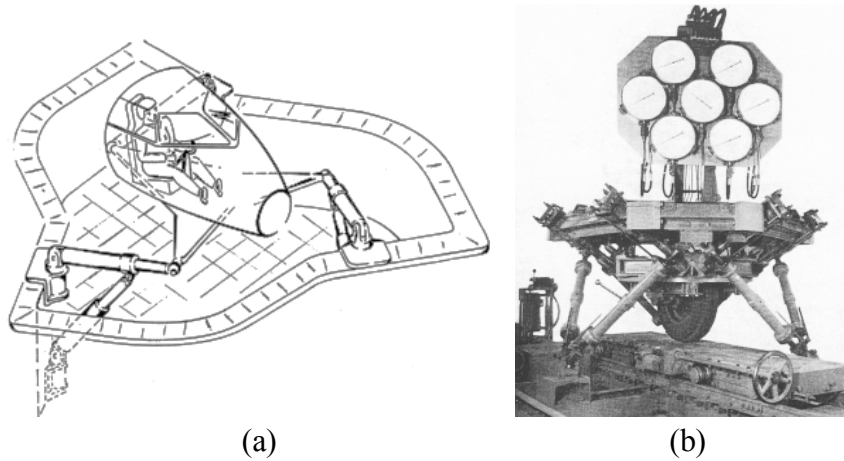


Şekil 2.1. Stewart Platformu’nun uygulama alanları: medikal [36], üretim [37] ve uçuş simülatörü [38]

Paralel robotlar uç işlevcisinin sabit plakaya birbirinden bağımsız kinematik zincirlerle paralel olarak bağlanmasıyla oluşmuş kapalı çevrim mekanizmalardır. Seri robotlar ise kinematik zincirlerin birbirlerine ardışık olarak bağlandığı mekanizmalardır. Dolayısıyla seri robotlarda uç işlevcisinin taşıyabileceği yük bütün kolları ve eklemlere ayrı ayrı etkimektedir. Ayrıca her bir eklemden oluşan konum hataları birikerek uç işlevcisinin hatalı yer değiştirmesine sebep olmaktadır. Paralel robotlarda ise her bir koldaki hata uç işlevciye ayrı aktarıldığı için hataların eklenmesi söz konusu değildir. Ayrıca robotun taşıyabileceği yük her kolda paylaşıldığı için yük taşıma kapasitesi de çok yüksektir.

Seri mekanizmalar, kinematik yapısı açık döngülü zincir şeklinde olan mekanizmalardır. Çalışma etkinlikleri ve çalışma uzayları oldukça büyük olmasına rağmen, ağır yükler altında çalışma esnasında burulma ve yüksek hızlarda titreşimler meydana gelmektedir. Eklenen her bağın ve eklem ağrlığını önceki bağlar ve eklemler taşımaktadır. Ayrıca kontrolleri esnasında aynı hareketi tekrarlama kabiliyetleri de göreceli olarak düşüktür. Hassas konumlamada da sorunlar yaşatmaktadırlar.

Paralel mekanizmalar, çalışma uzayları seri mekanizmalara kıyasla sınırlı olmasına rağmen, daha hassas konumlama ve aynı hareketi tekrarlama kabiliyetlerinin yüksekliği ve daha fazla yük taşıma özellikleri ile seri mekanizmalardan daha üstündür. Paralel mekanizmalar, mimarilerinden dolayı, seri mekanizmalardan daha yüksek doğal frekansa, katılığa, çalışma hızına, nominal yüklemeye ve hassasiyete sahiptirler. Yüksek dinamik özellikler, yüksek kuvvet / ağırlık oranı ve küçük çalışma uzayı gereksinimleri için paralel mekanizmalar tercih sebebidir. Bunlara karşın paralel mekanizmaların seri mekanizmalara nispeten kinematiği, dinamiği ve kontrolü daha zordur.



Şekil 2.2. (a) Stewart ve (b) Gough ilk tasarımları [40]

6 serbestlik dereceli paralel robotların en çok kullanılanı Stewart Platformu'dur (SP). Bu platform hareket kontrol aracı olarak en çok kullanılan tasarımdır çünkü yüksek sağlamlık, yüksek taşıma kapasitesi ve yüksek hassasiyetli pozisyon yeteneğine sahiptir. Genel olarak Stewart ya da Stewart-Gough Platformu olarak adlandırılan paralel robot yapıları ilk olarak Stewart ve Gough [39, 40] tarafından uçak simülatörü ve lastik test mekanizması olarak tasarlanmıştır (Şekil 2.2). Günümüzde

kullanılan SP mekanizması, boyları prizmatik eklemler vasıtasıyla değişebilen 6 bacak ile birbirine bağlı altıgen biçimli, biri sabit ve diğeri hareketli, iki platformdan oluşmaktadır.

İlk bulunuşundan itibaren 15 yıl boyunca bu mekanizmayla hiç ilgilenilmemiştir. Daha sonra Hunt [41] paralel robotların kullanımının getirdiği avantajları belirtmiştir. 1983 yılından sonra araştırmacılar bu yapının yüksek taşıma kapasitesini ve yüksek konumlama kabiliyetini algılamışlardır ve bu yapının ayrıntılı analizlerine yer vermeye başlamışlardır. Günümüzün yaygın paralel robotu SP 6 doğrusal eyleyicinin küresel veya kardan mafsallarla taban tablaya ve küresel mafsallarla hareketli tavan tablaya bağlanmasıyla elde edilen yapısı genel halini almıştır.

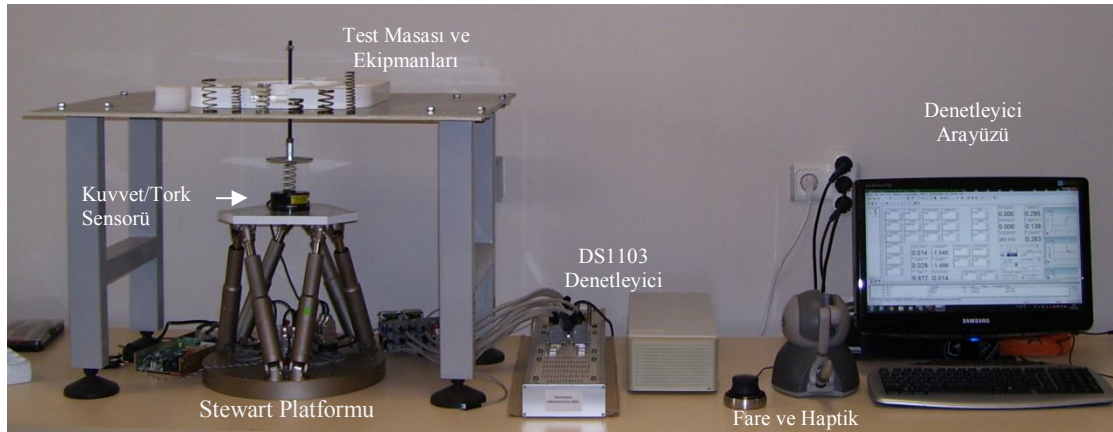
Robot mekanizmaları için ileri ve ters kinematik çözülmesi gereken iki temel problemidir. İleri kinematik problemi, dönel ve prizmatik eklem değişkenlerinin verilmesiyle uç işlevcisinin temel çerçeveye göre konum ve yöneliminin bulunmasına denir. Ters kinematik problemi ise, uç işlevcisinin konum ve yönelimi verildiğinde eklem değişkenlerinin bulunması şeklinde ifade edilebilir. Seri robotların robot topluluğu tarafından sıklıkla kullanılan D-H [42] yöntemiyle ileri kinematiğinin çıkarılması oldukça kolaydır. Diğer taraftan ters kinematiğinin çözülmesi kinematik yapıya bağlı olarak bazen zorluklar içerebilir. Buna karşılık paralel robotlarda durum tam tersinedir. SP'nin ileri kinematiği birçok doğrusal olmayan denklem sisteminin çözülmesi gerektiğinden oldukça zor bir problemidir. Literatürde SP'nin ileri [43-46] ve ters kinematik [47-49] çözümleri detaylı olarak verilmiştir.

Tüm bacaklar tarafından yükün taşınması sebebiyle paralel robotlar yüksek taşıma kapasitesine ve yüksek rijitliğe sahiptirler. Yük sadece eksenel yönde olduğundan dolayı bacaklarda eğilme gerilmesi oluşmamaktadır. Platformun konum hatası bacakların konum hatasının ortalamasını geçemediğinden dolayı konumlama doğruluğu yüksektir. Bu platform nanometre düzeyinde hareket performansı sağlayabilmektedir. Fakat küçük çalışma uzayına ve çalışma uzayı içinde tekil noktalara sahiptir. SP tasarımında yapının bu dezavantajları göz önünde bulundurulmalıdır. Kısa bağ uzunlukları rijitlik sağlar ve küçük konumlama hatası üretir. Fakat büyük çalışma uzayı uzun bağlar gerektirir. Kararlılığı sağlayabilmek

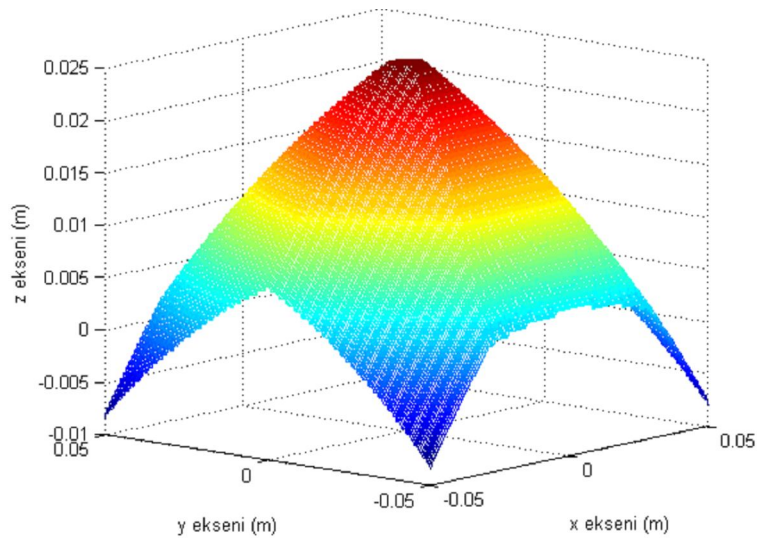
için geniş taban plakasına ihtiyaç duyulur. Buna karşın yatay eksen boyunca dönmeden dolayı oluşan tekil noktalardan kaçınmak için dar taban plakasına ihtiyaç vardır.

2.2. Sistem

SP sistemi iki ana gövde (üst ve taban plakalar), altı doğrusal motor, gerçek zamanlı denetleyici, 6 DOF fare, 6 DOF haptik, 6 DOF kuvvet-tork sensörü, cerrahi ekipman tutucu, güç kaynağı, acil durdurma devresi ve denetleyici-robot ara geçiş kartından oluşmaktadır. Şekil 2.3'te sistem görülmektedir. Kontrol algoritmalarının uygulanması için DSPACE DS1103 gerçek zamanlı kontrolör kullanılmıştır. Robotun genel özellikleri Tablo 2.1'de ve hesaplanan yaklaşık çalışma uzayı Şekil 2.4'te verilmiştir.



Şekil 2.3. Deney düzeneği



Şekil 2.4. SP'nin çalışma uzayı

Tablo 2.1. Robotun genel özellikleri

Hareket Kabiliyetleri	
Aktif Eksenler	$x, y, z, \theta_x, \theta_y, \theta_z$
x, y Eksenlerindeki Hareket Miktarı	± 50 mm
z Eksenindeki Hareket Miktarı	± 25 mm
θ_x, θ_y Eksenlerindeki Dönme Miktarı	$\pm 15^\circ$
θ_z Eksenindeki Dönme Miktarı	$\pm 30^\circ$
x, y Eksenlerindeki Minimum Hareket Miktarı	3 μ m
z Eksenindeki Minimum Hareket Miktarı	1 μ m
$\theta_x, \theta_y, \theta_z$ Eksenlerindeki Minimum Dönme Miktarı	5 μ rad
x, y Eksenlerinde Tekrarlanabilirlik	± 2 μ m
z Ekseninde Tekrarlanabilirlik	± 1 μ m
$\theta_x, \theta_y, \theta_z$ Eksenlerinde Tekrarlanabilirlik	± 20 μ rad
x, y, z Eksenlerinde Maksimum Hız	50 mm/s
$\theta_x, \theta_y, \theta_z$ Eksenlerinde Maksimum Hız	600 mrad/s
x, y, z Eksenlerinde Genel Hız	30 mm/s
$\theta_x, \theta_y, \theta_z$ Eksenlerinde Genel Hız	300 mrad/s

2.2.1. Denetleyici

Kontrol algoritmalarının uygulanması için DSPACE DS1103 gerçek zamanlı denetleyici kullanılmaktadır. DS1103, karmaşık ve zor kontrol uygulamalarının tasarımını ve analizlerini yapabilmek için geliştirilen hızlı prototip denetleyicisidir. Sensör ve eyleyiciler gibi birçok çevresel birimle beraber kullanmak üzere dijital I/O, analog dijital çevirici, dijital analog dönüştürücü, seri arabirim, CAN veri yolu, darbe genişlik modülasyonu (PWM) kanalları ve artımlı kodlayıcılar gibi çeşitli giriş ve çıkışlara sahiptir.

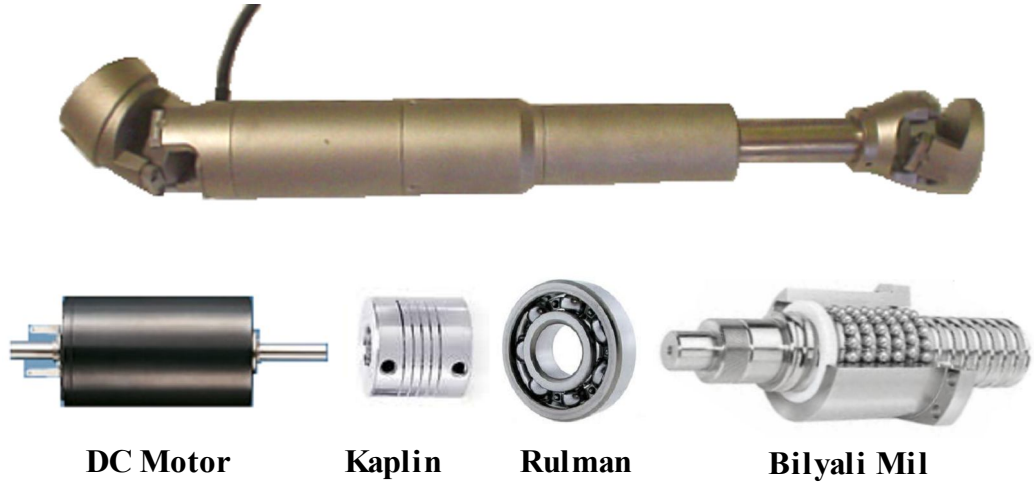
DS1103, blok diyagram ortamı Simulink'ten programlanabilen gerçek zamanlı bir arayüze (RTI) sahiptir. Bu arayüz yüklendikten sonra bir DSPACE araç kutusu Simulink'e eklenerek grafiksel olarak tüm I/O yapılandırılabilir. Kontrol ve sinyal işleme algoritmaları böylece hızlı ve kolayca DS1103 üzerinde uygulanabilmektedir. Genel bir DS1103 kontrol paneli sistemi Şekil 2.5'te gösterilmiştir. Sistem, bir genişleme kutusu, CLP1103 giriş-çıkış konektörü ve led paneli, DS817 bağlantı kartı, DS1103 denetleyici kartı ve bir bilgisayardan oluşmaktadır.



Şekil 2.5. DS1103 sistemi bileşenleri

2.2.2. Eyleyiciler

Robot sistemi altı hassas doğrusal eyleyiciye sahiptir. Şekil 2.6’da bir eyleyici ve içyapısı resmedilmiştir. Eyleyici vidalı mil sistemine dayanmaktadır. Her bir eyleyici birer DC motor, artımlı kodlayıcı, kaplin, rulman ve vidalı mil bileşenlerinden oluşmaktadır. Ayrıca, eyleyicilerin içinde kontaklız Hall Effect limit sensörleri vardır. Eyleyici içindeki tüm giriş ve çıkış sinyalleri 15-pin D-sub konnektör ile taşınır.



Şekil 2.6. Stewart Platformu’nun bir doğrusal eyleyicisi ve içyapısı

Tablo 2.2 ile verilen eyleyici giriş-çıkış birimlerinden bazılarının görevleri aşağıda açıklanmıştır.

Tablo 2.2. Eyleyici sub-D15 pin diyagramı

Pin	Fonksiyonu
1	Bağlantı yok
9	Motor girişi (-)
2	Motor girişi (+)
10	Besleme - GND
3	PWM girişi
11	Dönüş yönü girişi
4	+5V giriş
12	Alt sınır anahtar çıkışı
5	Üst sınır anahtar çıkışı
13	Referans çıkışı
6	Sınır anahtarı - GND
14	Artımlı kodlayıcı A+ çıkışı
7	Artımlı kodlayıcı A- çıkışı
15	Artımlı kodlayıcı B+ çıkışı
8	Artımlı kodlayıcı B- çıkışı

3 numaralı pin, motor PWM:

Bu bağlantı birimiyle motora hareket komutu gönderilmektedir. 25 KHz'lik frekansa sahip bir darbe genişlik modülasyonu (PWM) sinyali hareket komutunu motora iletir. Değişen doluluk oranına göre (duty ratio) eyleyici doğrusal olarak hareket etmektedir.

11 numaralı pin, motor hareket yönü:

Bu bağlantı birimiyle motora hangi yöne doğru hareket edeceği belirtilmektedir. Sinyal seviyesi TTL lojik seviyesindedir ve lojik 0 pozitif yönü temsil ederken lojik 1 komutu negatif yönü temsil etmektedir.

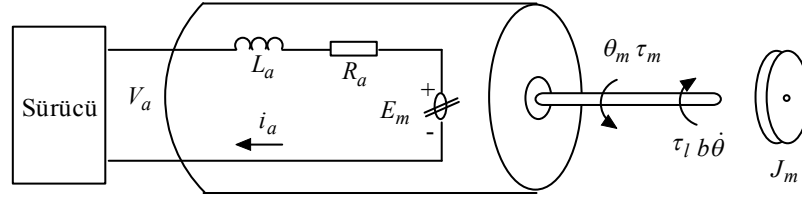
5 ve 12 numaralı pinler, limit sensör çıkışları:

Bu bağlantı birimleriyle motor içerisinde dahili bulunan Hall Efect limit sensör çıkışlarına ulaşılmaktadır. Çıkış değerleri TTL lojik seviyesindedir ve normalde lojik 0 değeri verilirken sınırlara ulaşma durumlarında lojik 1 değeri üretilmektedir.

7, 8, 14, 15 numaralı pinler, artımlı kodlayıcı çıkışları:

Bu bağlantı birimlerinden motor içinde bulunan artımlı kodlayıcı (encoder) çıkışları elde edilmektedir. Kodlayıcı 512 darbe/tur özelliği ile yüksek çözünürlük sağlamaktadır.

Eyleyici dinamiğini elde etmek için aşağıda verilen DC motor modeli incelenebilir.



Şekil 2.7. DC motor modeli

Burada, θ_m motorun konumu (rad), τ_m motorda üretilen moment (Nm), τ_l yük moment, V_a endüvi gerilimi (V), L_a endüvi endüktansı (H), R_a endüvi direnci (Ω), E_m zıt EMK (V), i_a endüvi akımı (A), K_b zıt EMK sabiti (V/rpm), K_m moment sabiti (Nm/A), J_m toplam ataleti (Kgm²) ve B_m (Nms/rad) toplam sürtünme bilgilerini temsil etmektedir.

$$L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a = V_a - E_m \quad (2.1)$$

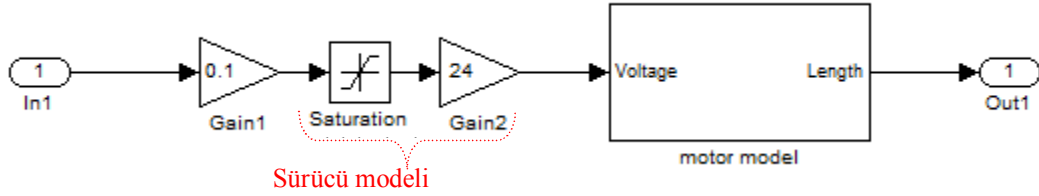
$$E_m = K_b \frac{d\theta_m}{dt} \quad (2.2)$$

$$\tau_m = K_m i_a \quad (2.3)$$

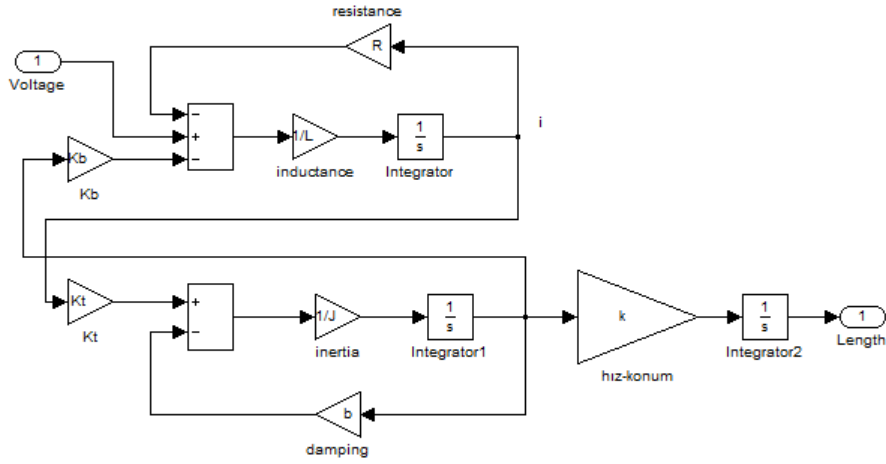
$$\tau_m - \tau_l = J_m \frac{d^2\theta_m}{dt^2} + B_m \frac{d\theta_m}{dt} \quad (2.4)$$

Kullanılan DC motor Faulhaber marka ve 2342CR024 modelidir. Motorun veri kataloğundan bilinen parametreleri elde edilmiştir. Ancak Denklem (2.4)'te görüldüğü gibi atalet ve sürtünme değerleri bilinmemektedir. Bunun için motor modeli Simulink'te oluşturulmuştur (Şekil 2.8 ve 2.9) ve bilinmeyen parametreler için parametre kestirim aracı kullanılarak gerçek veriler ile benzetim verileri karşılaştırılarak parametreler bulunmuştur. Parametre kestirim yöntemi olarak

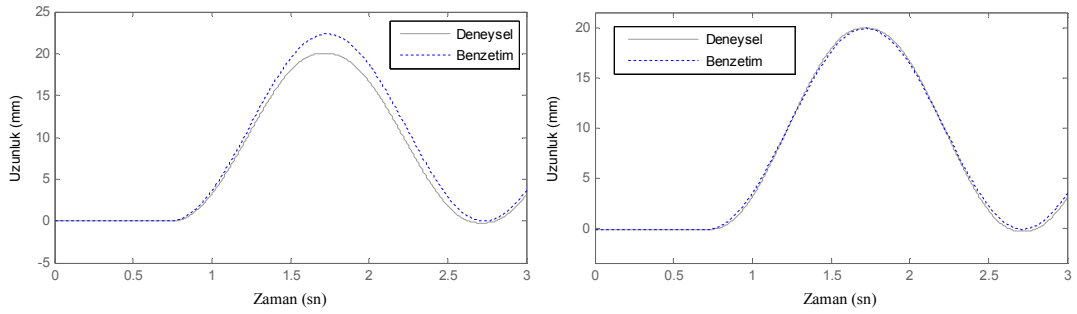
doğrusal olmayan en küçük kareler yöntemi ve Levenberg-Marquardt algoritması kullanılmıştır. Aşağıdaki şekillerde, oluşturulan model ve parametre kestiriminden önceki ve sonraki sistem cevapları görülmektedir.



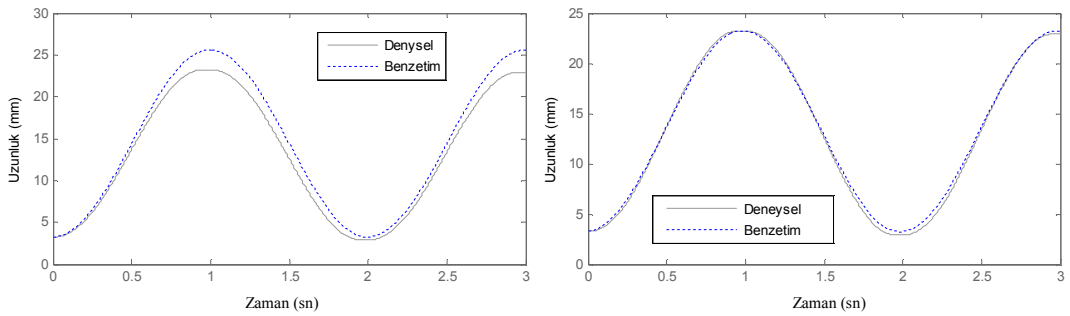
Şekil 2.8. Eyleyici ana modeli



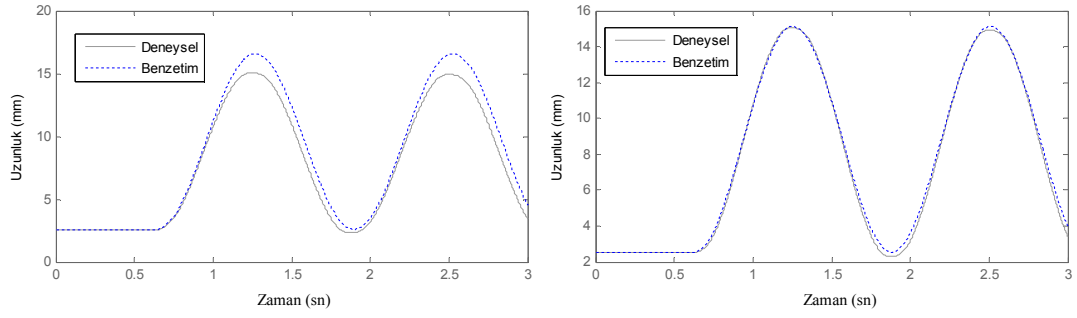
Şekil 2.9. DC motor alt modeli



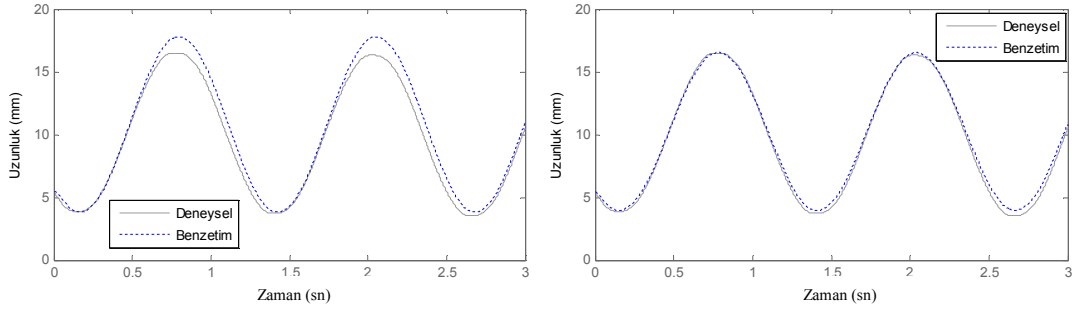
Şekil 2.10. Parametre kestirimi öncesi ve sonrasındaki motor yanıtı (deney-1)



Şekil 2.11. Parametre kestirimi öncesi ve sonrasındaki motor yanıtı (deney-2)



Şekil 2.12. Parametre kestirimi öncesi ve sonrasındaki motor yanıtı (deney-3)



Şekil 2.13. Parametre kestirimi öncesi ve sonrasındaki motor yanıtı (deney-4)

Motor katalogundan ve parametre kestirimi sonucunda elde edilen değerler Tablo 2.3'te verilmiştir.

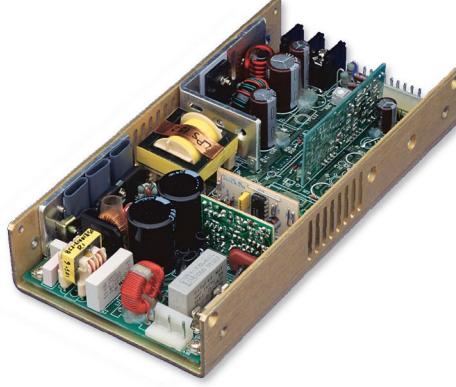
Tablo 2.3. DC motor parametreleri

Parametre	Birimi	Değeri
Armatür Direnci R	ohm	7.1
Armatür Endüktansı L	H	265e-4
Elektromotor Kuvvet Sabiti K_b	V/rpm	2.730e-3
Tork Sabiti K_m	Nm/A	26.10e-3
Motor Mili Atalet Momenti J_m	Kg.m ²	1.1736e-006
Motor Milinin Viskoz Sürtünme Katsayısı B_m	N.s/rad	1.7155e-004
Bilyalı mil adım katsayısı k	mm/rad	1/2 π

2.2.3. Güç kaynağı

Nominal gücü 17 W olan her bir eyleyici için gerekli gücü sağlayabilmek amacıyla Astec LPS155 anahtarlama gücü kaynağı kullanılmıştır. 24 V regüleli, filtreli, aşırı akım ve gerilim kontrollü ve kısa devre koruma özelliklerine sahip olması, geniş AC ve DC giriş gerilimi çalışma aralığına sahip olması, çıkış yetkilendirme girişine sahip olması ve 110-150W güç sağlayabilmesi tercih edilen güç kaynağının bazı önemli

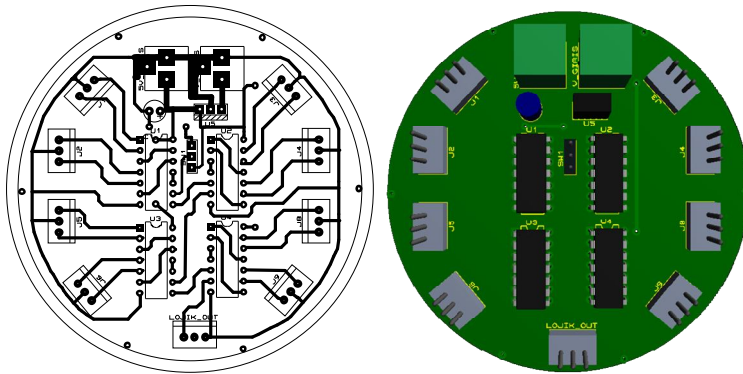
özellikleridir. Ayrıca sistemde 5V'luk gerilim ihtiyacını karşılamak için ayrı bir güç kaynağı daha kullanılmıştır.



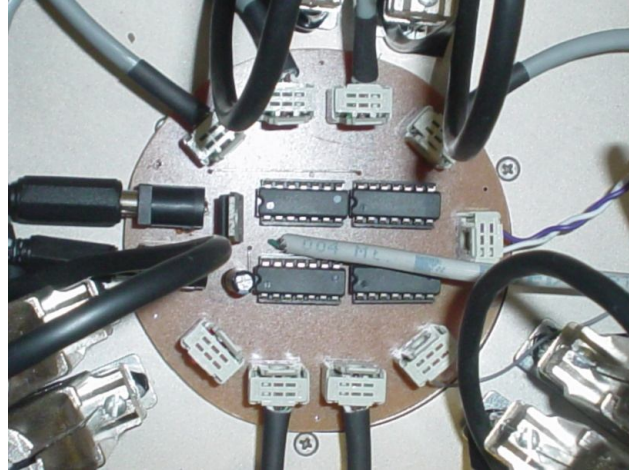
Şekil 2.14. Astec LPS-155 güç kaynağı

2.2.4. Lojik koruma devre tasarımı

Geliştirilen sistem maliyetli, önemli ve hassas bir yapıya sahip olduğundan dolayı sistemin zarar görmesini engellemek için eyleyicilerin istenen sınırların dışına çıkmasını ve yanlış kontrol sinyalleri altında eyleyicilerin zorlanmalarını engellemek için basit bir sayısal mantık devresi geliştirilmiştir. Bu devre ile limit sensörlerinden gelen sınır sinyallerine veya dışarıdan kullanıcının müdahale etmesi ile elde edilen sinyale bağlı olarak paralel robota uygulanan enerjinin kesilmesi sağlanmıştır. Bu koruma devresi her bir motora ait limit sensör ve harici bir anahtar bilgisiyle, ana denetleyiciye bağlı olacak şekilde tasarlanmıştır. EK-A'da tasarlanan devre şeması verilmiştir. Şekil 2.15'te tasarlanan devrenin baskı devre şeması ve üç boyutlu tasarım görüntüleri verilmiştir. Şekil 2.16'da ise devrenin robot üzerindeki fotoğrafı görülmektedir.



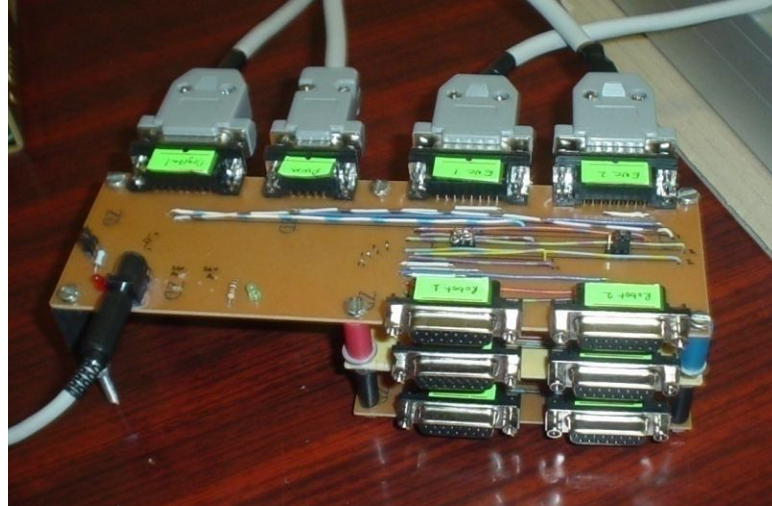
Şekil 2.15. Lojik koruma devresine ait baskı devre şeması ve üç boyutlu tasarım görüntüsü



Şekil 2.16. Lojik koruma devresi

2.2.5. Denetleyici - robot ara kartı devre tasarımı

DSPACE DS1103 ana kontrolcüsü ile her bir motor arasındaki gerekli bağlantının yapılabilmesi için ara bir geçiş kartına ihtiyaç vardır. Daha önce belirtildiği gibi motorların artımlı kodlayıcı çıkışları, referans sinyal çıkışı, güç girişleri, motor PWM girişleri ve motor hareket yönü girişi gibi gerekli bağlantıların yapılabilmesi için aşağıda resmi görülen üç parçalı devre tasarlanmıştır. Devreye ait şema ve baskı devre çizimleri EK-B’de sunulmuştur.



Şekil 2.17. Tasarlanan kartın görünümü

2.2.6. 6 DOF USB fare

Robotun 6 serbestlik dereceli bir joystick aracılığıyla kontrolünün yapılabilmesi için Şekil 2.18’de görülen 3 boyutta hareket sağlayan fare [50] Matlab yazılımı kullanılarak çalıştırılmıştır. Usb birimine sahip olan joystick Matlab üzerinden haberleşme sağlanarak okunmuştur. RS-232 seri port üzerinden DSPACE kontrol kartına hareket komutları aktarılmıştır.



Şekil 2.18. 6 DOF fare ve hareket komutları

Şekil 2.19’da ise bilgisayar tarafında elde edilen hareketlerin görüntülendiği arayüz görülmektedir. Nick Clark’ın [51] geliştirdiği Matlab eklentisi incelenmiştir ve sistem için gerekli olacak şekilde modifiye edilmiştir. İlgili yazılımlar EK-C’de verilmiştir.



Şekil 2.19. 6 DOF hareket üreten fare arayüzü

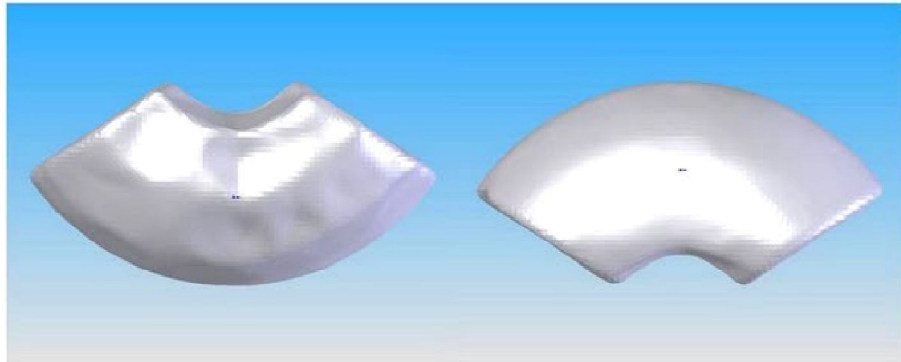
2.2.7. Phantom omni haptik

Phantom omni haptik sistemi Sensable [52] firması tarafından geliştirilmiştir. Altı serbestlik dereceli konum bilgisi üreten sistem üç serbestlik derecesinde kuvvet geri besleme özelliğine sahiptir. Haptik ve özellikleri Şekil 2.20’de ve Tablo 2.4’te görülmektedir. Haptik sisteminin çalışma uzayı Şekil 2.21 ile verilmiştir.



Şekil 2.20. Phantom Omni haptik

Üstten ve Altan Görünüş



Şekil 2.21. Phantom Omni çalışma uzayı

Tablo 2.4. Phantom Omni haptik özellikleri [52]

Kuvvet Geri Besleme Uzayı	~ 6.4 W x 4.8 H x 2.8 D in	> 160 W x 120 H x 70 d mm
Boyut	~ 6 5/8 W x 8 D in	~ 168 W x 203 D mm
Ağırlık	3 lbs 15 oz	~1.47 kg
Konum Çözünürlüğü	> 450 dpi	~0.055 mm
Sürtünme	< 1 oz	< 0.26 N
Maksimum Uygulanabilir Kuvvet	0.75 lbf	3.3 N
Sürekli Uygulanabilir Kuvvet	> 0.2 lbf	> 0.88 N
Sertlik	X axis > 7.3 lbs./in Y axis > 13.4 lbs./in Z axis > 5.9 lbs./in	X axis > 1.26 N/mm Y axis > 2.31 N/mm Z axis > 1.02 N/mm
Atalet	~ 0.101 lbm	~ 45 g
Kuvvet Geri Besleme	x, y, z	
Konum Ölçümü	x, y, z (Artımlı kodlayıcı) Pitch, roll, yaw (Potansiyometre)	
Arabirim	IEEE-1394 FireWire® port 6-pin to 6-pin*	
Desteklenen Platformlar	Intel or AMD-based PCs	
OpenHaptics Uyumluluğu	Evet	

OpenHaptics kütüphanesi kullanılarak C++ ile programlanabilen haptik sistemi sanal gerçeklik ve robot kontrolü gibi birçok uygulamada kullanılmaktadır. Haptiğin sisteme entegre edilmesi ve SP'yi kontrol edebilmesi için VisualStudio 2008 ortamında C++ projesi geliştirilmiştir ve ilgili kodlar EK-D'de sunulmuştur. Geliştirilen konsol uygulamasının arayüzü Şekil 2.22'de görülmektedir. Bir sonraki bölümde özellikleri verilen kuvvet sensöründen ölçülen kuvvet bilgileri haptik sistemine gönderilerek kuvvet yansıması sağlanmıştır. Haptik sisteminin DS1103 denetleyicisi ile haberleşebilmesi için 19200 baudrate hızında seri iletişim kullanılmıştır. Kuvvet geri beslemesi ve yönelim için 3 byte yeterli olurken konum bilgisi için 6 byte veri hesaplanmaktadır ve gönderilmektedir.



Şekil 2.22. Haptik yazılımının arayüzü

2.2.8. Kuvvet tork ölçüm sistemi

Kuvvet ve tork ölçümleri için Ati-Gamma-SI-65-5 altı eksenli kuvvet / tork sensörü kullanılmıştır [53]. Sistem bir sensör ve kontrolcüsünden oluşmaktadır ve Şekil 2.23'te görülmektedir. Kontrolör sensöre bağlanarak üzerindeki yük hücrelerini okuyarak kuvvet ve tork değerlerini hesaplamaktadır. Hesaplanan değerler hem analog olarak hem de seri port aracılığıyla kullanıcıya sunulmaktadır. Bilgisayar üzerinden de bir arayüz aracılığıyla anlık ölçüm değerleri görüntülenmekte, veri toplanabilmekte, komutlar gönderilebilmekte ve sensörle ilgili ayarlamalar yapılabilmektedir. Ürün özellikleri Tablo 2.5'te verilmiştir.

Tablo 2.5. Ürün özellikleri [53]

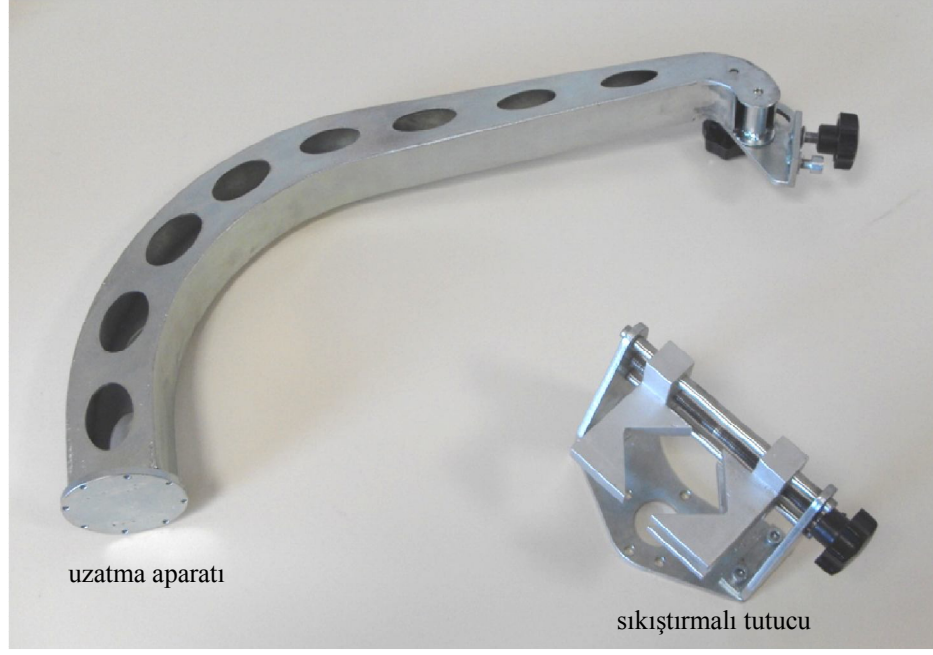
Kalibrasyon	Ölçüm aralığı				Çözünürlük			
	Fx, Fy	Fz	Tx, Ty	Tz	Fx, Fy	Fz	Tx, Ty	Tz
SI-65-5	65 N	200 N	5 N-m	5 N-m	1/80 N	1/40 N	10/13333 N-m	10/13333 N-m



Şekil 2.23. Kuvvet/tork sensörü ve denetleyicisi

2.2.9. Cerrahi ekipman tutucu

Medikal uygulamalar için gerekli olabilecek çeşitli delici, kesici ve endoskop gibi cerrahi ekipmanları robota monte edebilmek için Şekil 2.24'te görüldüğü gibi iki parça tasarlanarak üretilmiştir. Şekilde görülen soldaki parça robotun ameliyat masası yakınında konumlandırılmasında gerekli olabilecek uzatma aparatıdır. Bu aparatın ucunda iki serbestlik dereceli bir bilek bulunmaktadır ve bilek yönelimi ayarlanabilmektedir. Sağdaki aparat ise ortasına yerleştirilen ekipmanı sıkıştırarak sabitleme görevini yerine getirmektedir. Kuvvet sensörü her parça önüne monte edilebilmektedir.



Şekil 2.24. Endoskop ve cerrahi ekipman tutucu

3. ROBOT KİNEMATİĞİ VE DİNAMİĞİ

3.1. Giriş

Bir robot modeli, kinematik (ileri ve ters), Jakobiyen ve robot dinamiği gibi matematiksel ifadelerden oluşmaktadır. Bölümün devamında SP'nin tüm bu matematiksel özellikleri açıklanmaktadır. Tüm modeller benzetim ve gerçek zamanlı kontrol için elde edilmiştir.

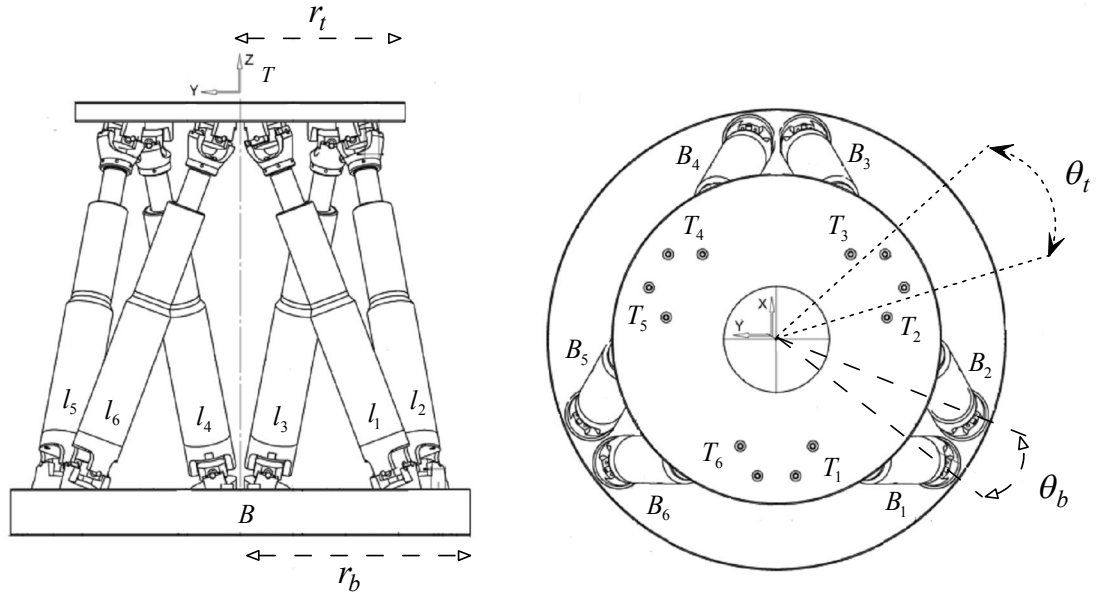
Kinematik bilimi nesneler arasındaki konum ve hız gibi geometrik yapıdan kaynaklanan fiziksel özellikleri inceler. Robotlar açınsından robot uç işlevcisi ile eklemleri arasındaki ilişki olarak tanımlanabilir. Robot kinematiki ileri ve ters olmak üzere ikiye ayrılır. Robotların uzayda herhangi bir noktaya ulaşabilmesi için eklemlerinin alması gereken değerlerin hesaplanması ters kinematik çözümü olarak adlandırılmaktadır. Robot eklemlerinin değerlerinin kullanılarak uzayda ulaşacağı noktanın hesaplanması ise ileri kinematik olarak isimlendirilir. Tüm robot yapılarında kinematik hesaplama gereklidir. Seri robotların aksine paralel manipülatörler için ters kinematik hesabı kolay, ileri kinematik hesabıysa zor bir problemidir.

Robotun dinamik modeli matematiksel olarak robotun nasıl davranış gösterdiğini belirten denklem takımıdır. İleri ve ters olmak üzere iki kısımda incelenebilir. Eklem tork / kuvvetlerinden üst platformun zamana bağlı olarak nasıl hareket edeceğini belirleyen denklem takımı ileri dinamik model olarak adlandırılır. Diğer taraftan robotun referans bir yörüngeyi takip edebilmesi için gerekli eklem tork ya da kuvvetlerin hesaplanması ise ters dinamik model olarak isimlendirilir. İleri dinamik model genellikle robotun bilgisayar benzetimleri için kullanılırken ters dinamik modelse gerçek zamanlı model tabanlı kontrol yöntemlerinde kullanılmaktadır. Bu yüzden ters dinamik modelin doğruluğu son derece önemlidir.

3.2. Stewart Platformu'nun Ters Kinematik Analizi

SP'nin ters kinematik çözümü robot manipülatörler içinde nispeten kolay olarak nitelendirilebilir. SP hareketli ve sabit olmak üzere iki plakadan oluşmaktadır ve altı prizmatik eklem ile birbirine bağlıdır. Robotun hedeflenen konumu konum vektörüyle ve yönelimi ise üç eksendeki dönme miktarları verilerek arzu edilen bir açı setiyle hesaplanarak elde edilir. Hareketli platformun eklem bağlantı konumları yönelim matrisiyle çarpılarak yönelim sonucundaki konumu elde edilir. Bu konumlara hedeflenen konum vektörü eklenerek sabit platform bağlantı noktaları çıkarılırsa her bir eklem için birer vektör elde edilmiş olunur. Son olarak eklem boyları basitçe bu vektörlerin normu alınarak bulunur.

Sözel olarak ifade edilen çözüm yöntemini matematiksel olarak inceleyelim. Şekil 3.1'de SP'nin yapısından görüldüğü gibi alttaki sabit platformun merkezine $B=\{X,Y,Z\}$ ve üstteki hareketli platformun merkezine $T=\{x,y,z\}$ koordinat sistemleri yerleştirilmiştir. Sabit platformdaki eklemlere B_i ($i=1, 2, \dots, 6$) ve hareketli platformdaki eklemlere T_i ($i=1, 2, \dots, 6$) koordinat sistemleri yerleştirilmiştir.



Şekil 3.1. SP sistemine koordinat sistemlerinin yerleşimi

Hedeflenen konum vektörü $[p_x p_y p_z]^T$ ile, yönelimi ise $[\alpha \beta \gamma]^T$ ile gösterilir. Hareketli ve sabit platformdaki her bir ekleme yerleştirilen koordinat sistemleri vektörel olarak gösterilir. Bu koordinat sistemleri sabit ve hareketli platform üzerinde iki farklı açı

kullanılarak simetrik şekilde dağılmıştır ve konumları basitçe platformların yarıçapı ile yaptıkları açının sinüsü ve kosinüsü alınarak hesaplanır. Bu bilgiler aşağıdaki denklemlerde verilmiştir.

$$\mathbf{T}_i = \begin{bmatrix} T_{ix} \\ T_{iy} \\ T_{iz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_t \cos(\lambda_i) \\ r_t \sin(\lambda_i) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$$\lambda_i = \frac{i\pi}{3} - \frac{\theta_t}{2} \quad i = 1, 3, 5 \quad (3.2)$$

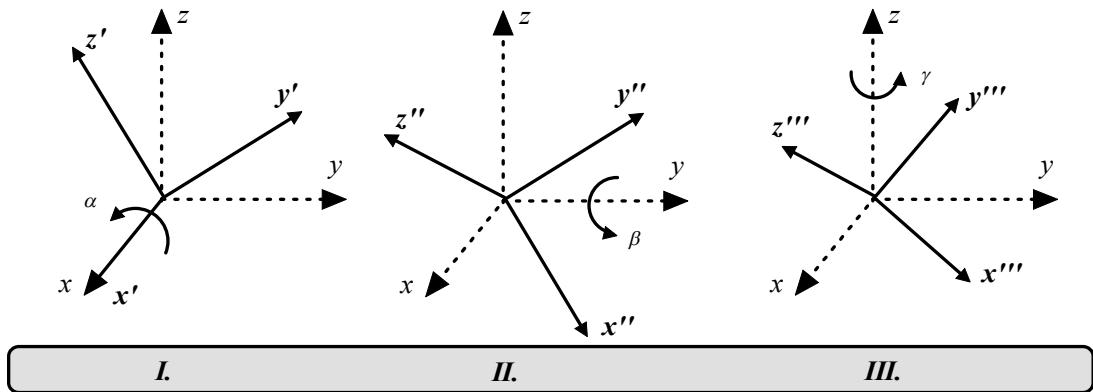
$$\lambda_i = \lambda_{i-1} + \theta_t \quad i = 2, 4, 6 \quad (3.3)$$

$$\mathbf{B}_i = \begin{bmatrix} B_{ix} \\ B_{iy} \\ B_{iz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_b \cos(v_i) \\ r_b \sin(v_i) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$v_i = \frac{i\pi}{3} - \frac{\theta_b}{2} \quad i = 1, 3, 5 \quad (3.5)$$

$$v_i = v_{i-1} + \theta_b \quad i = 2, 4, 6 \quad (3.6)$$

Burada, r_t ve r_b üst ve alt platformun yarı çaplarını, θ_t ve θ_b üst ve alt platformdaki eklem konumları arasındaki açıyı ve λ_i ve v_i ise üst ve alt platformdaki eklem noktalarının açılarını ifade etmektedir.



Şekil 3.2. Sabit açı seti sistemiyle dönme işlemi

Hareketli ve sabit platform üzerinde bulunan noktaların konumlarının bulunmasından sonra sabit açı seti kullanılarak yönelim matrisi hesaplanabilir. Buna göre, Şekil 3.2'den görülebileceği gibi üst platform önce x eksenini boyunca α , sonra y eksenini boyunca β ve son olarak z eksenini boyunca γ açısıyla döndürülürse:

$$\mathbf{R}_{XYZ}(\alpha, \beta, \gamma) = \mathbf{R}_Z(\gamma)\mathbf{R}_Y(\beta)\mathbf{R}_X(\alpha) \quad (3.7)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos(\gamma) & -\sin(\gamma) & 0 \\ \sin(\gamma) & \cos(\gamma) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\beta) & 0 & \sin(\beta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\beta) & 0 & \cos(\beta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos(\gamma)\cos(\beta) & \cos(\gamma)\sin(\beta)\sin(\alpha) - \sin(\gamma)\cos(\alpha) & \cos(\gamma)\sin(\beta)\cos(\alpha) + \sin(\gamma)\sin(\alpha) \\ \sin(\gamma)\cos(\beta) & \sin(\gamma)\sin(\beta)\sin(\alpha) + \cos(\gamma)\cos(\alpha) & \sin(\gamma)\sin(\beta)\cos(\alpha) - \cos(\gamma)\sin(\alpha) \\ -\sin(\beta) & \cos(\beta)\sin(\alpha) & \cos(\beta)\cos(\alpha) \end{bmatrix}$$

elde edilir. Ulaşılması amaçlanan hareketli platformun sabit platforma göre yönelim matrisi $\mathbf{R}$ ve konum vektörü $\mathbf{P}$ verildiğinde bacakların uzunluklarının (l_i) bulunmasına ters kinematik problem denir ve bacak vektörleri aşağıdaki denklemden yararlanarak elde edilir [54-56].

$$\mathbf{L}_i = \mathbf{R}_{XYZ}\mathbf{T}_i + \mathbf{P} - \mathbf{B}_i \quad i = 1, 2, \dots, 6 \quad (3.8)$$

Sonuç olarak bacak uzunluğu bacak vektörünün normudur ($l_i = \|\mathbf{L}_i\|$). Denklemden $\mathbf{P} = [P_X \ P_Y \ P_Z]$ alt sabit platformun merkezine yerleştirilen $B = \{X, Y, Z\}$ koordinat sistemine göre üç boyutlu uzaydaki gidilmesi istenen konum vektörünü göstermektedir.

3.3. İleri Kinematik

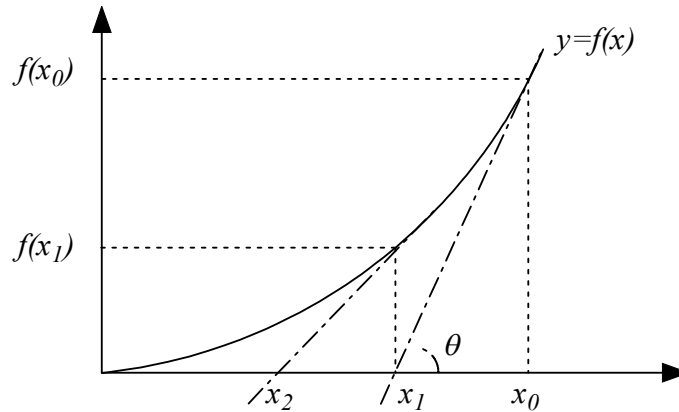
SP gibi paralel manipülatörlerin Kartezyen uzayındaki konum ve yönelimini ivmeölçer ya da jayraskop gibi ataletsel ölçüm sistemleriyle belirlemek oldukça güçtür. Kartezyen uzayındaki robotun konum bilgisine ise Kartezyen uzayı tabanlı konum kontrolü, kuvvet kontrolü, model tabanlı kontrol yöntemlerinde, üç boyutlu robot hareket görüntülemeye ya da Kartezyen uzayındaki konum hatalarını hesaplamak için ihtiyaç duyulmaktadır. Üst platformun konumunu doğrudan ölçmek yerine, artımlı kodlayıcılarla kolayca ölçülen bacak boylarından yola çıkarak robotun

ileri kinematiği çözülebilir. Ancak, paralel manipülatörlerde seri robotların tersine ileri kinematik problemi birden fazla ve sanal çözümler ürettiğinden zor bir problemidir. Bunun için literatürde birçok yöntem ve algoritma geliştirilmiştir. Bunlardan bazıları şöyle sıralanabilir; Jakobiyen tabanlı, Bezout yöntemi, Sylvester yöntemi, yapay sinir ağları, Newton-Raphson nümerik çözüm yöntemi.

İleri kinematik probleminin çözümünde karşılaşılan diğer bir zorluk ise gerçek zamanlı uygulamalarda ortaya çıkmaktadır. Buna göre çözüm denetleyicinin örnekleme periyodu içerisinde gerçekleştirilmelidir. Bu çalışmada kullanılan denetleyici sisteminin örnekleme periyodu 1 ms'dir ve bu süre içinde çözüme ulaşmak oldukça zordur. Ancak, bu çalışmada robotun konum kontrolünün tam doğrulukla gerçekleştirileceği varsayımı altında robotun verilen referans konum civarında olacağı açıktır. Diğer bir ifadeyle ileri kinematik algoritmasına o andaki referans konum bilgisi başlangıç değeri olarak verilecektir. Böylece çözüme kısa bir süre içinde ulaşılabilecektir.

Bu çalışmada Newton-Raphson nümerik iterasyon yöntemi kullanılarak SP'nin ileri kinematiği çevirimiçi ve çevirimdışı çözülmüştür. Öncelikle Newton-Raphson yönteminin temel prensibine değinilecektir.

Newton-Raphson algoritması basit ve hızlı olması nedeniyle kök bulma için bilinen en iyi yöntemlerden biridir. Yöntemin tek dezavantajı $f(x)$ fonksiyonunun kendisi yerine türevi $f'(x)$ 'i kullanmasıdır. Bu nedenle, Newton-Raphson yöntemi sadece türevin kolayca hesaplanabileceği problemlerde kullanılabilir.



Şekil 3.3. Newton-Raphson nümerik iterasyon yönteminde yakınsama

Yöntem kısaca tek bilinmeyenli bir fonksiyonu sıfır yapan kökün bir başlangıç değerinden yola çıkarak doğru çözüme yakınsamasıdır. Şekil 3.3 üzerinden açıklanacak olursa, x_0 başlangıç noktasındaki fonksiyonun türevinden (eğimi) x_1 noktası hesaplanacaktır ve çözüme bir adım yakınsanacaktır. Belirlenen tolerans değerine bağlı olarak iterasyon devam ettirildiğinde istenilen çözüme ulaşılmış olur.

$$f'(x_0) = \tan(\theta) = \frac{f(x_0)}{x_0 - x_1} \Rightarrow x_1 = x_0 - \frac{f(x_0)}{f'(x_0)} \quad (3.9)$$

Genelleştirilirse,

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (3.10)$$

n bilinmeyenli bir denklem takımı için algoritma [57],

$$J_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial x_j} \quad (3.11)$$

$$x^{(n+1)} = x^{(n)} - J^{-1(n)} f^n \quad (3.12)$$

olacaktır. Her bir bilinmeyen için, yakınsama adımı seçilen bir ε değerinin altına düştüğünde iterasyon sonlandırılır.

$$i = 1, 2, \dots, n \text{ için } |f_i| < \varepsilon \quad (3.13)$$

SP'nin ileri kinematiğini Newton-Raphson yöntemiyle bulabilmek için çözülmesi gereken denklem ters kinematikten elde edilir. Buna göre,

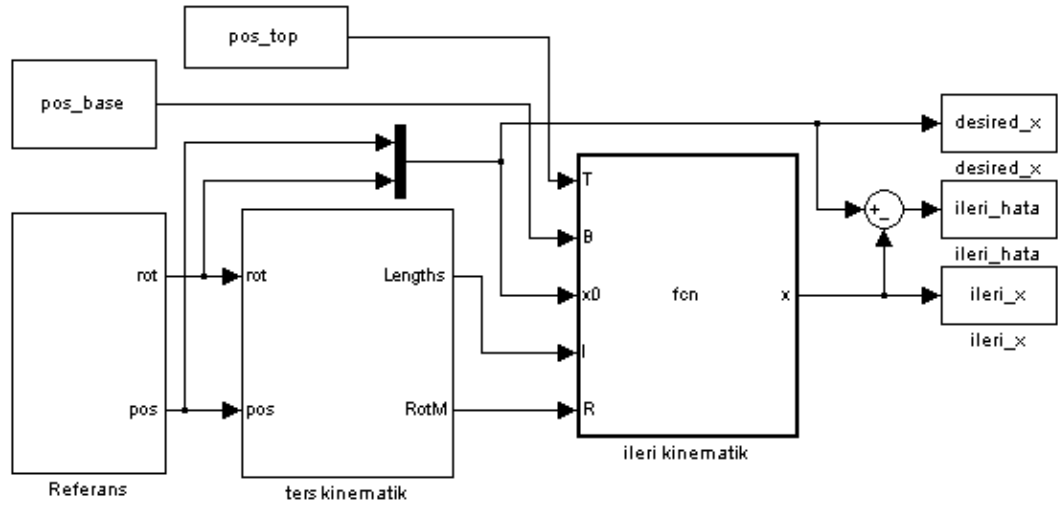
$$\mathbf{L}_i = \mathbf{R}_{XYZ} \mathbf{T}_i + \mathbf{P} - \mathbf{B}_i \quad i = 1, 2, \dots, 6 \quad (3.14)$$

idi ve,

$$f(i) = \left(R_{11}T_{ix} + R_{12}T_{iy} + p_x - B_{ix} \right)^2 + \left(R_{21}T_{ix} + R_{22}T_{iy} + p_y - B_{iy} \right)^2 + \left(R_{31}T_{ix} + R_{32}T_{iy} + p_z \right)^2 - \left(l(i) + l_{\text{nominal}} \right)^2 \quad (3.15)$$

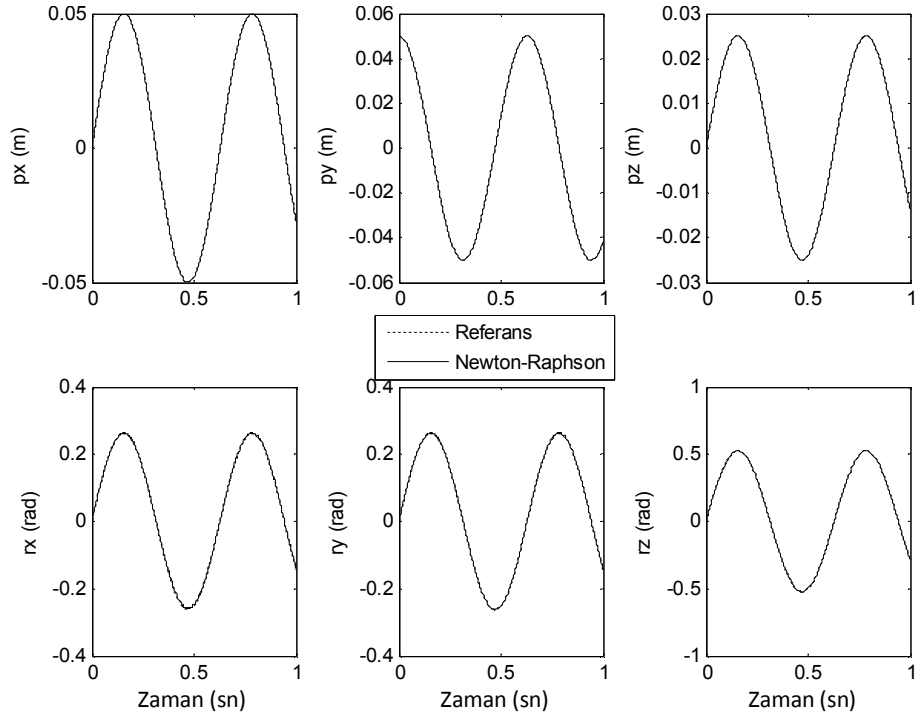
çözülmesi gereken denklem takımıdır. İlgili J_{ij} bulmak için kısmi türevler alınarak J matrisinin satır denklemleri elde edilebilir. Sonuç olarak bu çözümü veren kod parçası gömülü Matlab fonksiyonu olarak yazılmıştır ve Ek-E’de sunulmuştur.

Algoritmanın doğruluğunu test etmek için öncelikle benzetimi gerçekleştirilmiştir. Bunun için Kartezyen uzayında tanımlı yörüngeler ters kinematik algoritmasına verilerek eklem uzayına geçilmiştir. Eklem uzayındaki bacak boylarından yola çıkarak tekrar ileri kinematiği hesaplanarak karşılaştırma yapılmıştır. Aşağıdaki şekilde Simulink benzetim modeli görülmektedir.

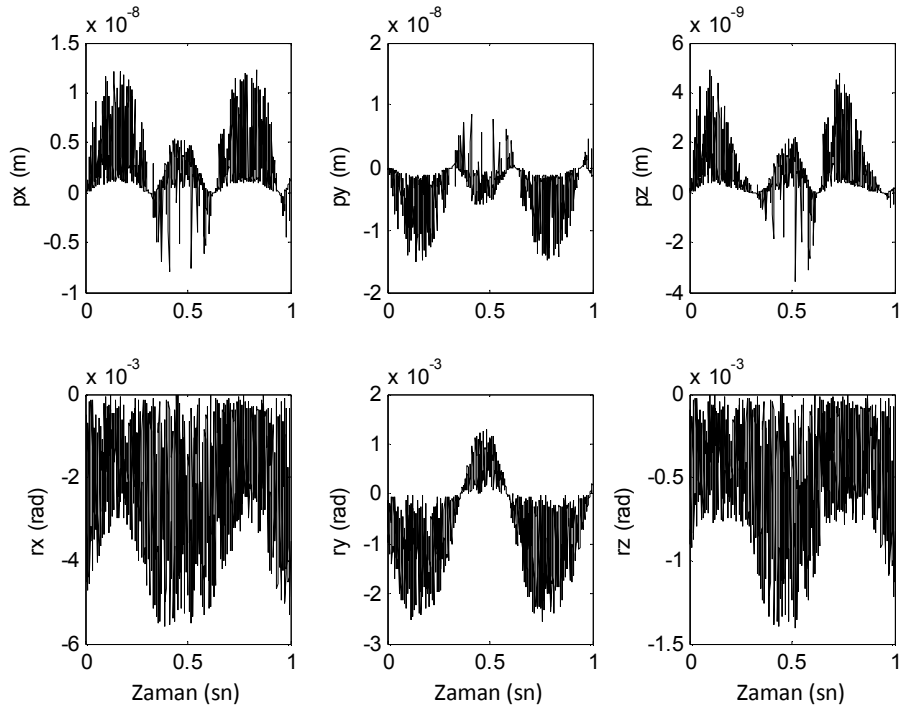


Şekil 3.4. İleri kinematik testi için oluşturulan Simulink benzetim modeli

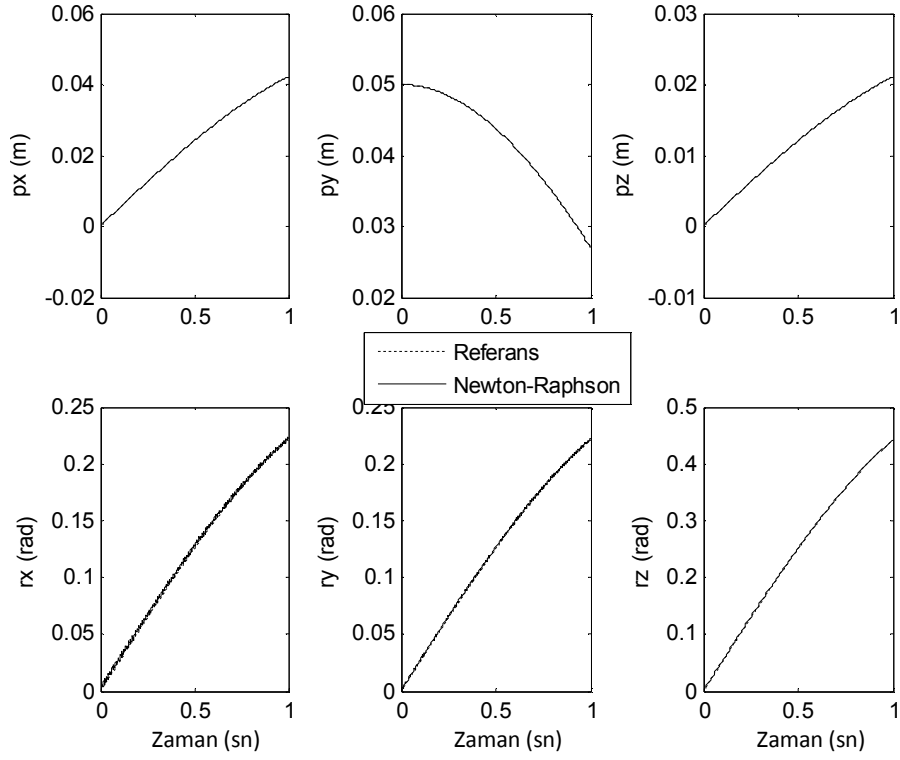
Yapılan doğruluk testlerinden bazıları aşağıdaki şekillerde görülmektedir. Buna göre ileri kinematik algoritması sağlıklı bir şekilde çözüm üretmektedir.



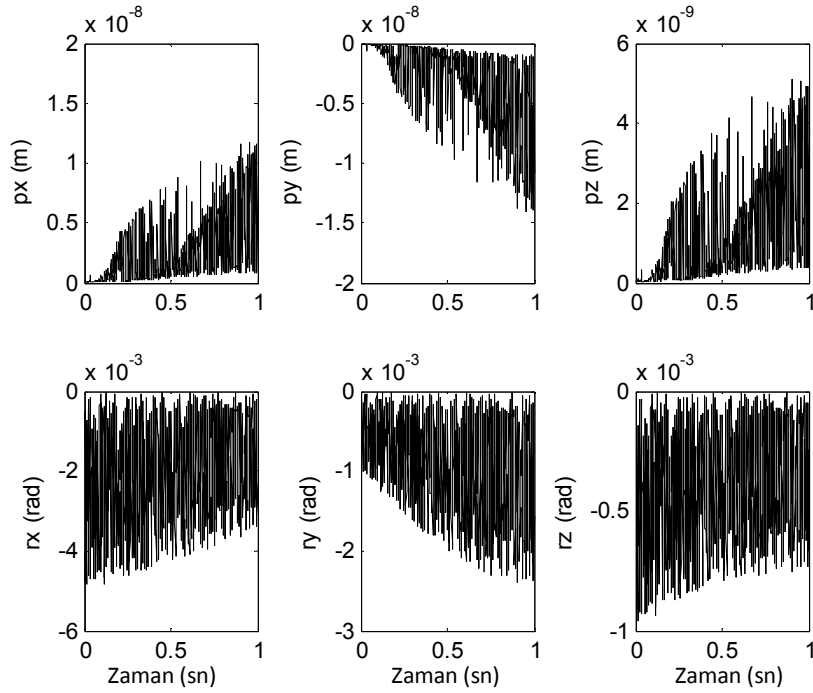
Şekil 3.5. Uygulanan ve ileri kinematik algoritmasıyla elde edilen yörüngelerin karşılaştırılması (deney-1)



Şekil 3.6. Deney 1'deki konum hataları



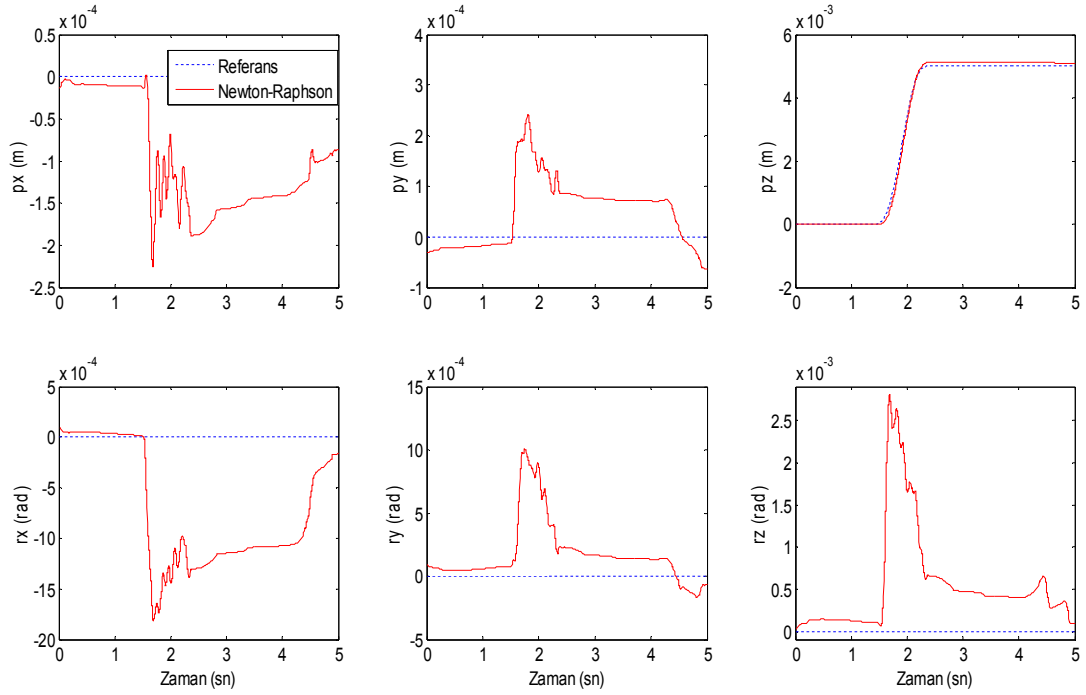
Şekil 3.7. Uygulanan ve ileri kinematik algoritmasıyla elde edilen yörüngelerin karşılaştırılması (deney-2)



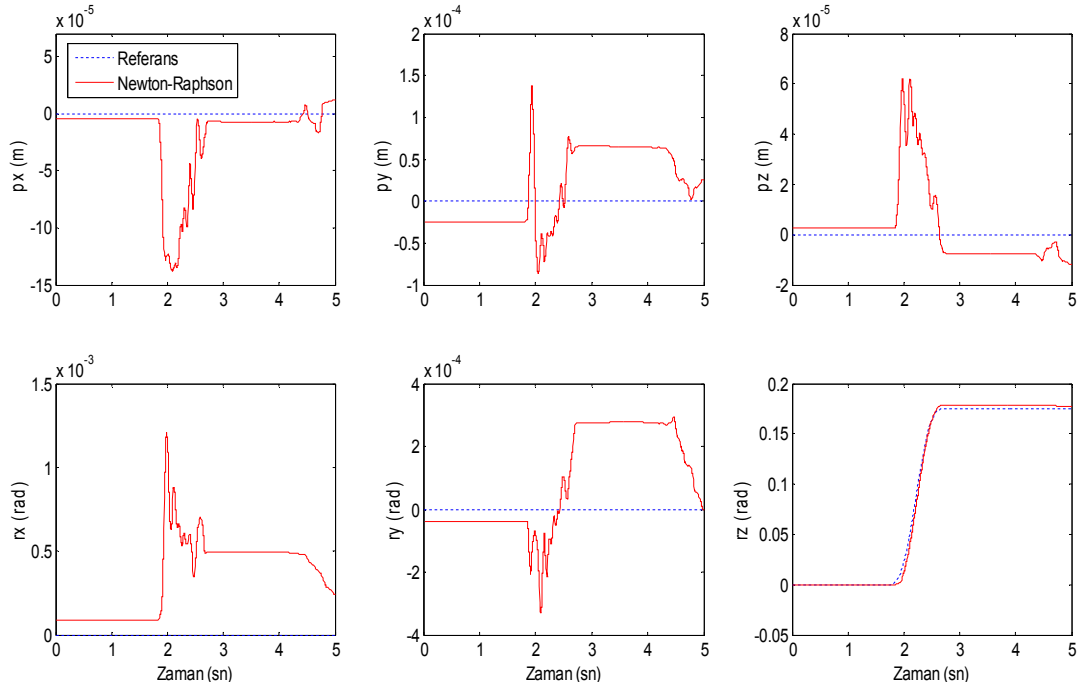
Şekil 3.8. Deney 2’deki konum hataları

Robotun verilen referansı takip edeceği varsayımından yola çıkılarak gerçek zamanlı ileri kinematik çözümü yapılabilir. Bunun için yapılan gerçek zamanlı testlerden

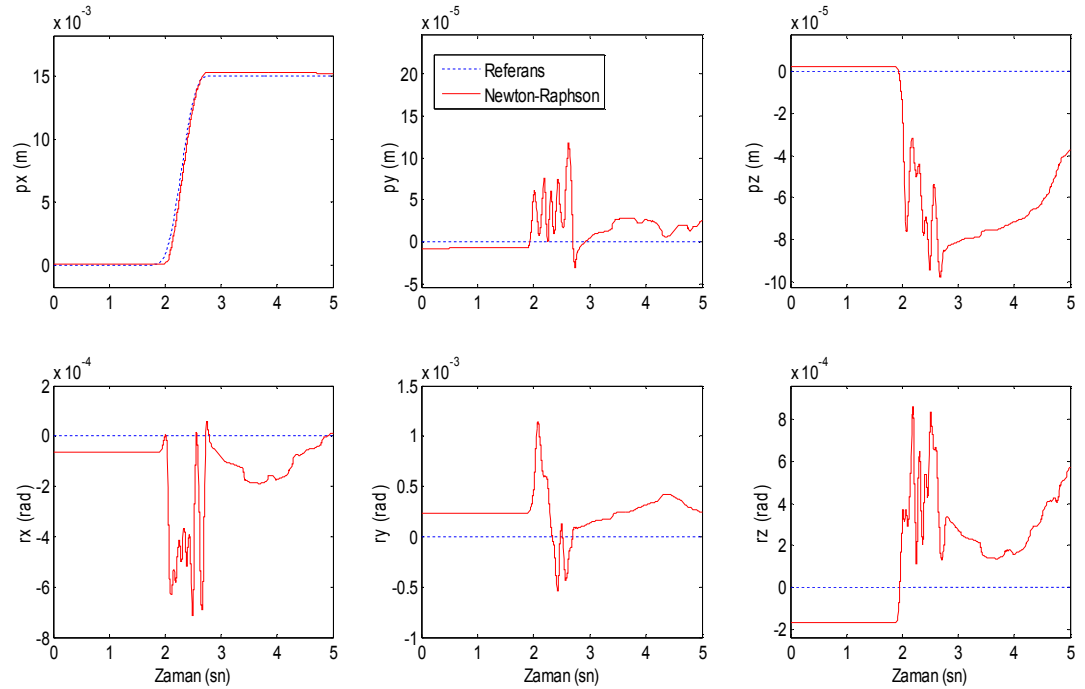
bazıları aşağıda verilmiştir. Görüldüğü gibi varsayım geçerli olduğu sürece yani Newton-Raphson algoritmasına verilen başlangıç değerleri gerçek değerlere yakın olduğu sürece ileri kinematik çözüme 10 ms içinde ulaşılabilir. Ancak herhangi bir nedenle fark büyük olursa algoritma daha fazla süre gerektireceğinden işlemci gerçek zaman hatası verecektir.



Şekil 3.9. Uygulanan ve ileri kinematik algoritmasıyla elde edilen yörüngeler - gerçek zamanlı deney 1



Şekil 3.10. Uygulanan ve ileri kinematik algoritmasıyla elde edilen yörüngeler - gerçek zamanlı deney 2



Şekil 3.11. Uygulanan ve ileri kinematik algoritmasıyla elde edilen yörüngeler - gerçek zamanlı deney 3

Sayısal olarak karşılaştırma yapabilmek için bir maliyet fonksiyonu tanımlamak gereklidir. Bunun için en çok kullanılan yöntemlerden biri olan RMS (root-mean-square, etkin değer) fonksiyonu seçilmiştir. Bir değerler kümesinin RMS değeri

özgün değerlerinin karelerinin aritmetik ortalamasının karekökü olarak tanımlanabilir. n değerli bir değerler kümesinin RMS değeri,

$$x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \quad (3.16)$$

$$x_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n}(x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2)} \quad (3.17)$$

Buna göre yapılan benzetim ve gerçek zamanlı ileri kinematik testlerinin RMS hata oranları Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1. İleri kinematik deneylerinde oluşan hataların karşılaştırılması

Deney/RMS	x	y	z	α	β	γ
Deney1/Sim	3,846e-09	4,475e-09	1,272e-09	0.0026	0.0010	0.0006
Deney2/Sim	3,624e-09	4,179e-09	1,624e-09	0.0024	0.0011	0.0005
Deney3/Real	0.0001179	0.0000822	0.0001076	0.0009188	0.0003007	0.0008233
Deney4/Real	0.0000383	0.000048	0.0000155	0.000417	0.000182	0.003872
Deney5/Real	0.0003798	0.0000249	0.0000541	0.0001978	0.0003114	0.0002946

3.4. Jakobiyen

Robotlarda kinematik bağıntıdan sonra diğer önemli bir bağıntıysa Jakobiyen matrisidir. J ile ifade edilen bu bağıntı robot sistemlerinde eklem hızlarıyla üst platform hızı arasındaki ilişkiyi ve eklem torklarıyla üst platforma uygulanan kuvvet arasındaki ilişkiyi tanımlamaktadır. Bu tanımlamalar aşağıdaki denklemlerde görülebilir.

$$\dot{L} = J\dot{x} \quad (3.18)$$

$$\tau = J^T f \quad (3.19)$$

Burada $\dot{L}$ eklem hızlarını, $\dot{x}$ üst platform hızını, τ eklem torklarını ve f ise üst platforma uygulanan kuvveti temsil etmektedir. Jakobiyen matrisini iki kısma ayırabiliriz:

$$\dot{L} = J_1 J_2 \dot{x} \quad (3.20)$$

Denklem (3.20)'de ifade edilen Jacobian matrisleri aşağıdaki denklemlerde gösterildiği gibi ifade edilebilir [58, 59]. Diğer bir ifadeyle, ilk bileşen eklemler bacakların uç kısmı arasındaki hız ilişkisini, ikinci bileşen ise bacakların uç kısmı ile üst platform arasındaki hız ilişkisini tanımlamaktadır.

$$\dot{L} = J_1 \vec{V}_{Ti} \quad (3.21)$$

$$\vec{V}_{Ti} = J_2 \dot{x} \quad (3.22)$$

$\vec{V}_{Ti}$ bacakların uç hızlarını gösteren vektördür. J_1 ve J_2 matrisleri sırasıyla Denklem (3.23) ve (3.24)'te verilmiştir.

$$J_1 = \begin{bmatrix} \vec{u}_1 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \vec{u}_2 & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \vec{u}_3 & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \vec{u}_4 & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \vec{u}_5 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \vec{u}_6 \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

$$J_2 = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & J_{2_{14}} & J_{2_{15}} & J_{2_{16}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ I_{3 \times 3} & J_{2_{184}} & J_{2_{185}} & J_{2_{186}} \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

Matriste verilen $\vec{u}_i$, $i=1,2,\dots,6$ için bacakların doğrultusunu gösteren $\vec{u}_i = [u_{x_i} \ u_{y_i} \ u_{z_i}]$ birim vektörüdür. Matris içindeki diğer terimler ise $[0 \ 0 \ 0]$ 'dır. Bu vektör, Denklem (3.25) ile elde edilir.

$$u_i^{\rightarrow} = \frac{R_{XYZ}T_i + P - B_i}{|R_{XYZ}T_i + P - B|} \quad (3.25)$$

J_2 matrisinde yer alan birim matris dışındaki sütunlar aşağıda Denklem (3.26) ile (3.43) arasında verilmiştir.

4. Sütun için:

$$\begin{bmatrix} J_{14} \\ J_{24} \\ J_{34} \end{bmatrix} = R_Y(\beta)S(X)R_X(\alpha)R_Z(\gamma) \begin{bmatrix} T_{1x} \\ T_{1y} \\ T_{1z} \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

$$\begin{bmatrix} J_{44} \\ J_{54} \\ J_{64} \end{bmatrix} = R_Y(\beta)S(X)R_X(\alpha)R_Z(\gamma) \begin{bmatrix} T_{2x} \\ T_{2y} \\ T_{2z} \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

$$\begin{bmatrix} J_{74} \\ J_{84} \\ J_{94} \end{bmatrix} = R_Y(\beta)S(X)R_X(\alpha)R_Z(\gamma) \begin{bmatrix} T_{3x} \\ T_{3y} \\ T_{3z} \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

$$\begin{bmatrix} J_{104} \\ J_{114} \\ J_{124} \end{bmatrix} = R_Y(\beta)S(X)R_X(\alpha)R_Z(\gamma) \begin{bmatrix} T_{4x} \\ T_{4y} \\ T_{4z} \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

$$\begin{bmatrix} J_{134} \\ J_{144} \\ J_{154} \end{bmatrix} = R_Y(\beta)S(X)R_X(\alpha)R_Z(\gamma) \begin{bmatrix} T_{5x} \\ T_{5y} \\ T_{5z} \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

$$\begin{bmatrix} J_{164} \\ J_{174} \\ J_{184} \end{bmatrix} = R_Y(\beta)S(X)R_X(\alpha)R_Z(\gamma) \begin{bmatrix} T_{6x} \\ T_{6y} \\ T_{6z} \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

5. Sütun için:

$$\begin{bmatrix} J_{15} \\ J_{25} \\ J_{35} \end{bmatrix} = S(Y)R_Y(\beta)R_X(\alpha)R_Z(\gamma) \begin{bmatrix} T_{1x} \\ T_{1y} \\ T_{1z} \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

$$\begin{bmatrix} J_{45} \\ J_{55} \\ J_{65} \end{bmatrix} = S(Y)R_Y(\beta)R_X(\alpha)R_Z(\gamma) \begin{bmatrix} T_{2x} \\ T_{2y} \\ T_{2z} \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

$$\begin{bmatrix} J_{75} \\ J_{85} \\ J_{95} \end{bmatrix} = S(Y)R_Y(\beta)R_X(\alpha)R_Z(\gamma) \begin{bmatrix} T_{3x} \\ T_{3y} \\ T_{3z} \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

$$\begin{bmatrix} J_{105} \\ J_{115} \\ J_{125} \end{bmatrix} = S(Y)R_Y(\beta)R_X(\alpha)R_Z(\gamma) \begin{bmatrix} T_{4x} \\ T_{4y} \\ T_{4z} \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

$$\begin{bmatrix} J_{135} \\ J_{145} \\ J_{155} \end{bmatrix} = S(Y)R_Y(\beta)R_X(\alpha)R_Z(\gamma) \begin{bmatrix} T_{5x} \\ T_{5y} \\ T_{5z} \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

$$\begin{bmatrix} J_{165} \\ J_{175} \\ J_{185} \end{bmatrix} = S(Y)R_Y(\beta)R_X(\alpha)R_Z(\gamma) \begin{bmatrix} T_{6x} \\ T_{6y} \\ T_{6z} \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

6. Sütun için:

$$\begin{bmatrix} J_{16} \\ J_{26} \\ J_{36} \end{bmatrix} = R_Y(\beta)R_X(\alpha)S(Z)R_Z(\gamma) \begin{bmatrix} T_{1x} \\ T_{1y} \\ T_{1z} \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

$$\begin{bmatrix} J_{46} \\ J_{56} \\ J_{66} \end{bmatrix} = R_Y(\beta)R_X(\alpha)S(Z)R_Z(\gamma) \begin{bmatrix} T_{2x} \\ T_{2y} \\ T_{2z} \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

$$\begin{bmatrix} J_{76} \\ J_{86} \\ J_{96} \end{bmatrix} = R_Y(\beta)R_X(\alpha)S(Z)R_Z(\gamma) \begin{bmatrix} T_{3x} \\ T_{3y} \\ T_{3z} \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

$$\begin{bmatrix} J_{106} \\ J_{116} \\ J_{126} \end{bmatrix} = R_Y(\beta)R_X(\alpha)S(Z)R_Z(\gamma) \begin{bmatrix} T_{4x} \\ T_{4y} \\ T_{4z} \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

$$\begin{bmatrix} J_{136} \\ J_{146} \\ J_{156} \end{bmatrix} = R_Y(\beta)R_X(\alpha)S(Z)R_Z(\gamma) \begin{bmatrix} T_{5x} \\ T_{5y} \\ T_{5z} \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

$$\begin{bmatrix} J_{166} \\ J_{176} \\ J_{186} \end{bmatrix} = R_Y(\beta)R_X(\alpha)S(Z)R_Z(\gamma) \begin{bmatrix} T_{6x} \\ T_{6y} \\ T_{6z} \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

Denklemden S eksi bakışimli matristir ve $S(X)$, $S(Y)$ ve $S(Z)$ eksi bakışimli matrisleri aşağıdaki gibi elde edilir.

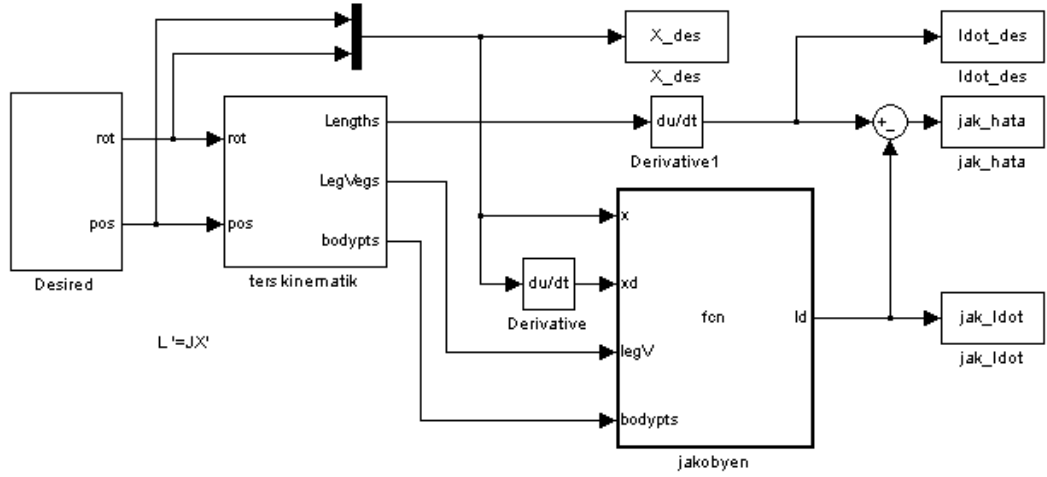
$$S(X) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.44)$$

$$S(Y) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.45)$$

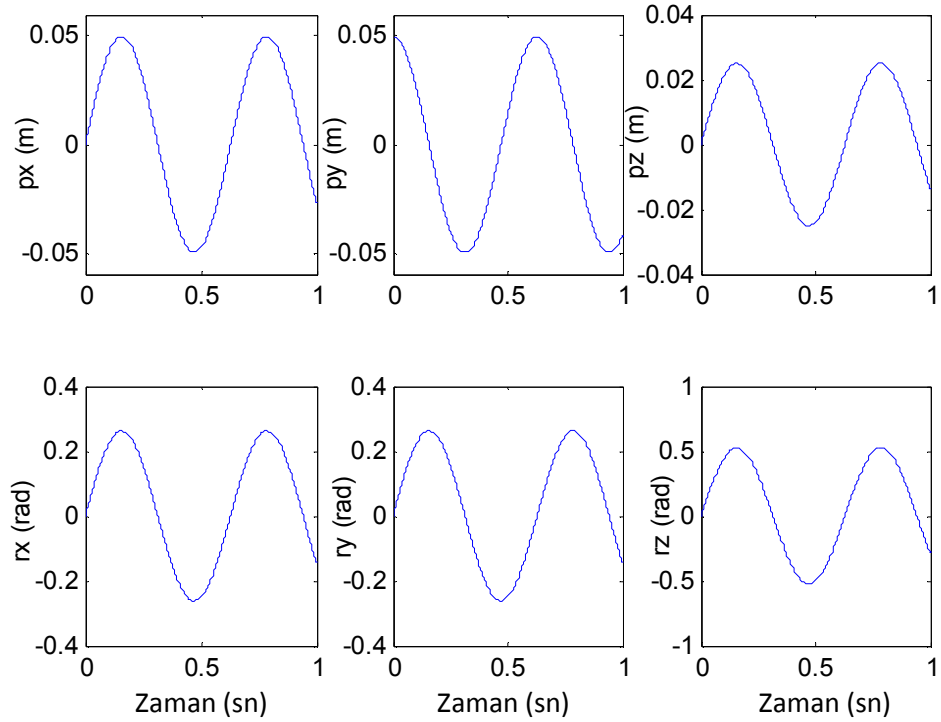
$$S(Z) = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.46)$$

Sonuç olarak Jakobiyeen matrisi benzetim ve gerçek zamanlı uygulamalarda kullanılmak üzere Matlab gömülü fonksiyonu olarak yazılmıştır. İlgili kod parçası EK-F’de sunulmuştur.

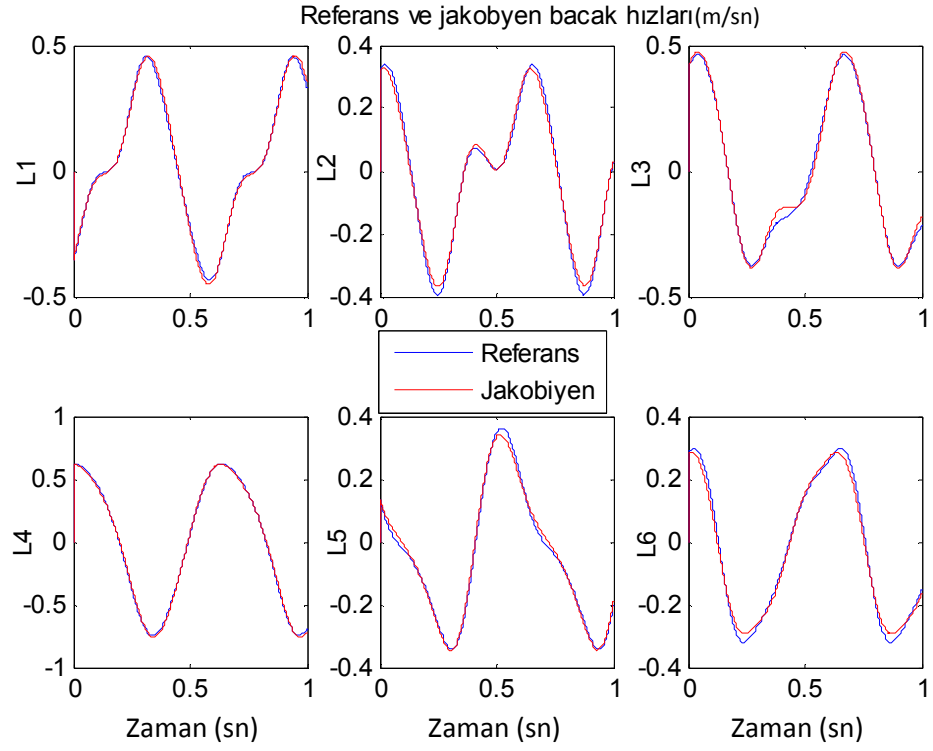
Elde edilen Jakobiyen matrisinin geçerliliğini göstermek için benzetim ve gerçek zamanlı deneyler yapılmıştır. Buna göre aşağıdaki şekillerde Simulink benzetim modeli ve elde edilen sonuçlar görülmektedir.



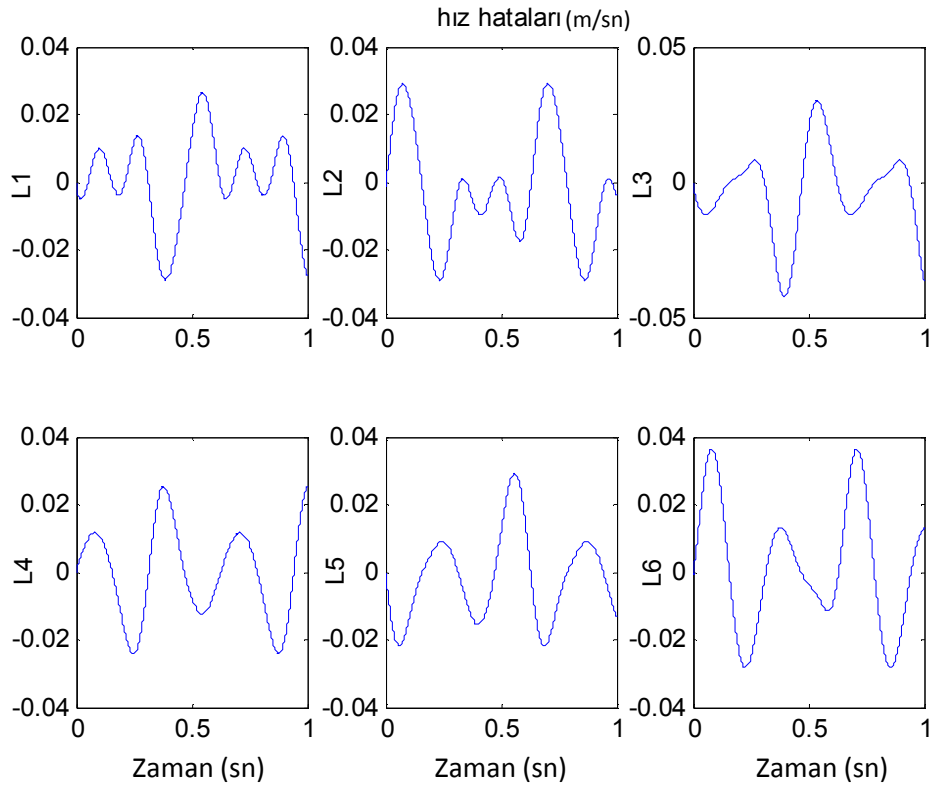
Şekil 3.12. Jakobiyen doğruluk testi için oluşturulan benzetim modeli



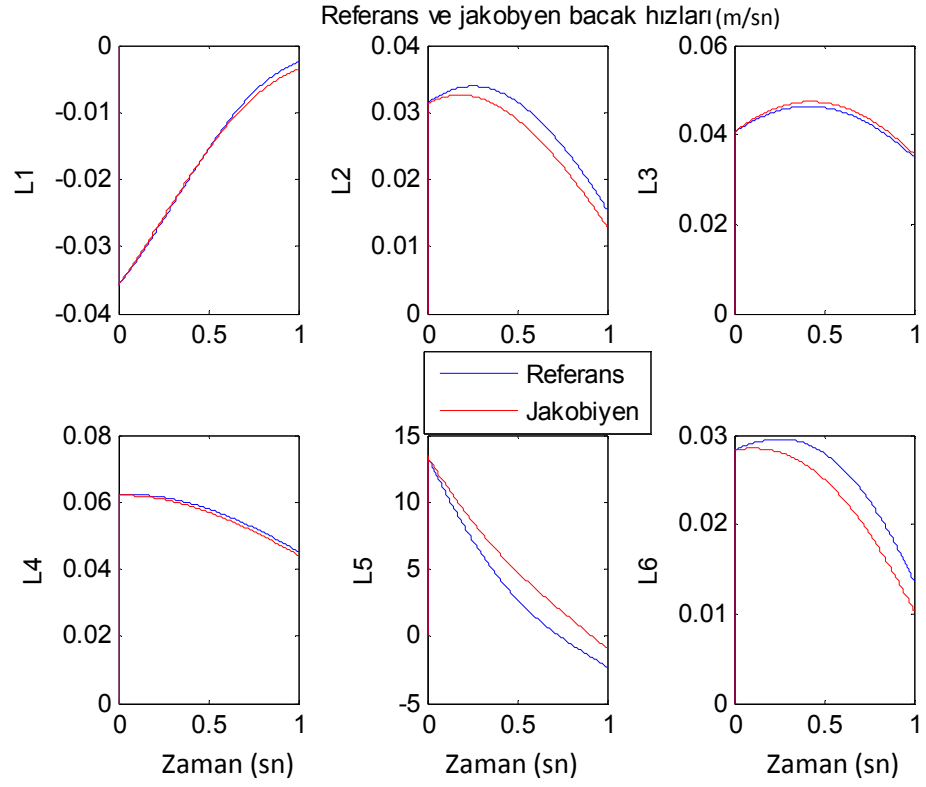
Şekil 3.13. Uygulanan referans yörünge (deney-1)



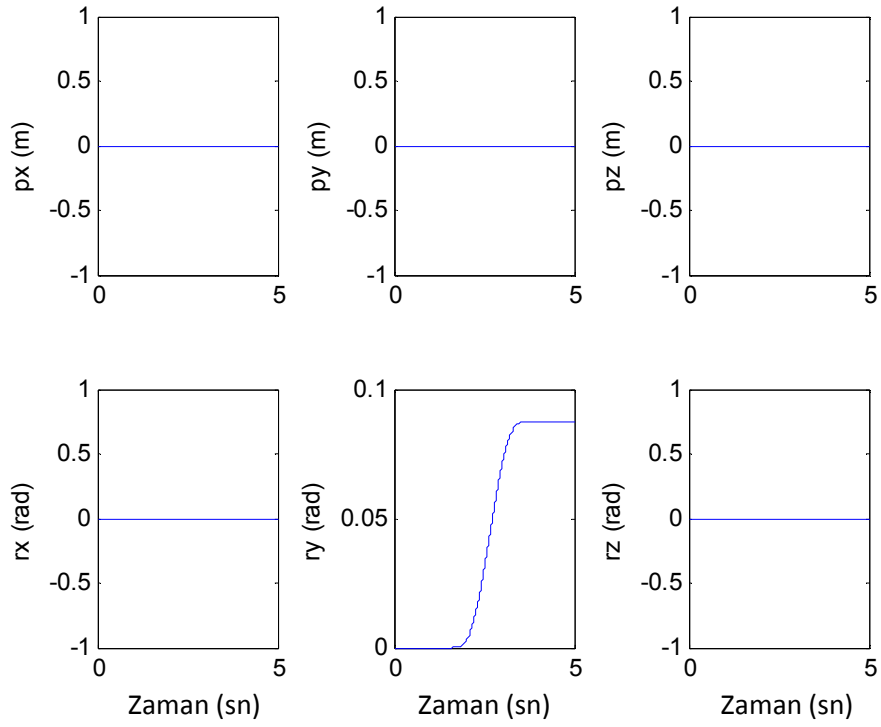
Şekil 3.14. Uygulanan yörüngeye bağlı olarak elde edilen referans ve Jakobiyen bacak hızları (deney-1)



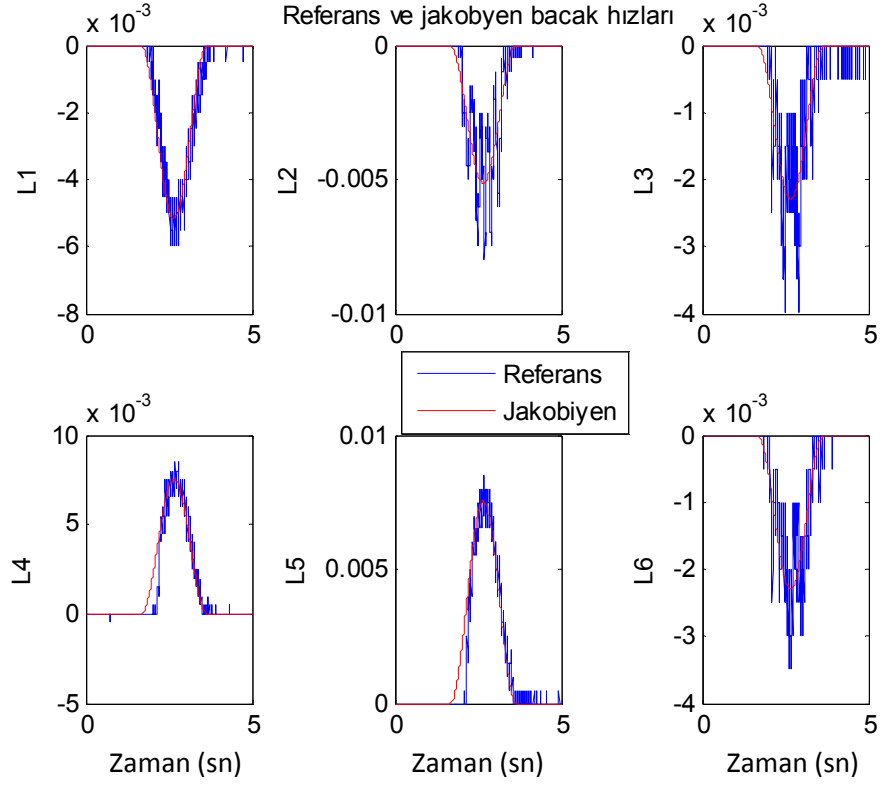
Şekil 3.15. Referans ve Jakobiyen bacak hızlarına ait hatalar (deney-1)



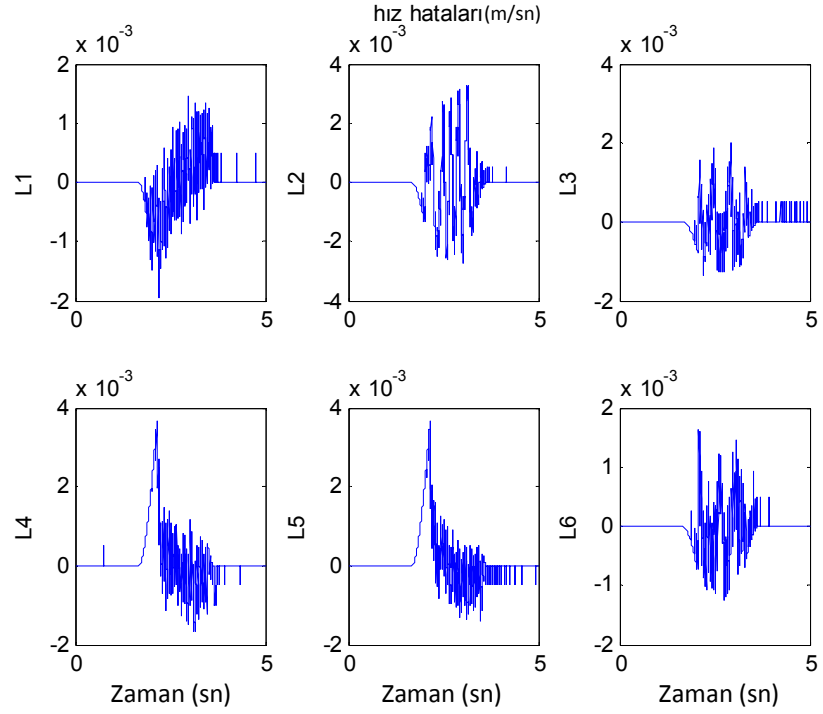
Şekil 3.16. Uygulanan yörüngeye bağlı olarak elde edilen referans ve Jakobyen bacak hızları (deney-2)



Şekil 3.17. Uygulanan referans yörünge – gerçek zamanlı deney 1



Şekil 3.18. Uygulanan yörüngeye bağlı olarak elde edilen referans ve Jakobiye bacak hızları – gerçek zamanlı deney 1



Şekil 3.19. Referans ve Jakobiye bacak hızlarına ait hatalar – gerçek zamanlı deney 1

Yapılan deneylerde oluşan RMS hata değerleri Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2. Benzetim ve deneysel Jakobiyen doğruluk test karşılaştırmaları

Deney/RMS	L1	L2	L3	L4	L5	L6
Deney1/Sim	0.0128	0.0167	0.0161	0.0135	0.0129	0.0185
Deney2/Sim	0.0006	0.0023	0.0009	0.0009	0.0017	0.0027
Deney3/Real	0.0003579	0.0007989	0.0003400	0.0006644	0.0006506	0.0003086

3.5. Robot Dinamiği

n . dereceden serbestliğe sahip bir manipülatörün Kartezyen uzayındaki dinamiği aşağıdaki denklemle ifade edilir [56, 58, 59].

$$M(x)\ddot{x} + C(x, \dot{x})\dot{x} + G(x) = J^{-T}\tau - F_e \quad (3.47)$$

Burada, M 6x6’lık simetrik ve pozitif kütle matrisini, C korolis ve merkezkaç (santrifuj) matrisini, G yerçekim vektörünü, τ uygulanan tork vektörünü, J Jakobiyen matrisini, F_e harici kuvveti ve x ise üst platformun konum ve yönelimini temsil etmektedir. Bazı önemli özellikleri şöyle sıralanabilir:

- Eğer x ve $\dot{x}$ sınırlıysa $\dot{M}(x)$ ve $C(x, \dot{x})$ fonksiyonları da sınırlıdır
- M simetrik ve pozitif tanımlı bir matristir. Ayrıca, uygun seçilen C için $\dot{M} - 2C$ eksi bakışlımlı bir matris olabilir. Yani, $x^T (\dot{M} - 2C)x = 0, \forall x \in R^n$ şeklinde ifade edilebilir

Robotun tam ve doğru bir dinamik modeli elde edilebilmesi için Kütle matrisi M üst platformdan ve bacaklardan kaynaklanan ataletler olmak üzere iki kısımda incelenir.

$$M = M_{up} + M_{leg} \quad (3.48)$$

Buna göre üst platformun kütle ve ataletinden kaynaklanan kütle matrisi aşağıdaki gibi elde edilmiştir. Burada m_{up} üst platformun kütlesini, I ataleti, c ve s ise cos ve sin fonksiyonlarını temsil etmektedir.

$$M_{up} = \begin{bmatrix} m_{up} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_{up} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{up} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_x c^2 \gamma + I_y s^2 \gamma & (I_x - I_y) c_\alpha c_\gamma s_\gamma & k_{13} \\ 0 & 0 & 0 & (I_x - I_y) c_\alpha c_\gamma s_\gamma & k_{22} & k_{23} \\ 0 & 0 & 0 & k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix} \quad (3.49)$$

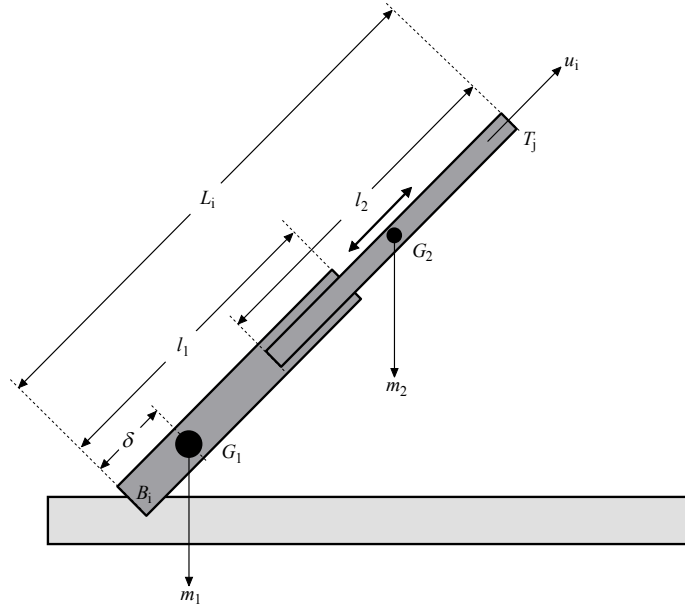
Burada, $k_{31} = k_{13}$, $k_{32} = k_{23}$ olmak üzere,

$$k_{13} = c_\gamma I_x (-s_\gamma c_\alpha s_\alpha - c_\gamma s_\beta c_\alpha + s_\gamma c_\alpha s_\alpha c_\beta) - s_\gamma I_y (-c_\alpha c_\gamma s_\alpha + s_\gamma s_\beta c_\alpha + c_\alpha c_\gamma s_\alpha c_\beta)$$

$$k_{22} = c_\alpha^2 (I_x s_\gamma^2 + I_y c_\gamma^2) + I_z s_\alpha^2$$

$$k_{23} = s_\gamma c_\alpha I_x (-s_\gamma c_\alpha s_\alpha - c_\gamma s_\beta c_\alpha + s_\gamma c_\alpha s_\alpha c_\beta) + c_\gamma c_\alpha I_y (-c_\alpha c_\gamma s_\alpha + s_\gamma s_\beta c_\alpha + c_\alpha c_\gamma s_\alpha c_\beta) - s_\alpha I_z (s_\alpha^2 + c_\alpha^2 c_\beta)$$

$$k_{33} = I_x (-s_\gamma c_\alpha s_\alpha - c_\gamma s_\beta c_\alpha + s_\gamma c_\alpha s_\alpha c_\beta)^2 + I_y (-c_\alpha c_\gamma s_\alpha + s_\gamma s_\beta c_\alpha + c_\alpha c_\gamma s_\alpha c_\beta)^2 + I_z (s_\alpha^2 + c_\alpha^2 c_\beta)$$



Şekil 3.20. Stewart Platformu'nun bir bacağına ait kinematik ve dinamik model [59]

Bacaklardan kaynaklanan kütle matrisi M_{leg} 'i elde etmek için Şekil 3.20 ile verilen model kullanılırsa,

$$M_{leg} = (m_1 + m_2) \left[(J_2)^T \left[H - (J_1)^T K J_1 \right] J_2 \right] \quad (3.50)$$

elde edilir ve H, K matrisleri ise aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$H = \begin{bmatrix} h_1 & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & h_1 & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & h_1 & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & \dots & \dots & \ddots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & \dots & \dots & \dots & \ddots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & \dots & \dots & \dots & \dots & \ddots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & h_6 & 0 & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & h_6 & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 & 0 & h_6 \end{bmatrix}_{18 \times 18} \quad (3.51)$$

$$K = \begin{bmatrix} k_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_6 \end{bmatrix}_{6 \times 6} \quad (3.52)$$

$$h_i = \left(\frac{\hat{I}}{L_i} + \frac{m_2}{m_1 + m_2} \right)^2 \quad (3.53)$$

$$k_i = \frac{\hat{I}}{L_i} \left(\frac{\hat{I}}{L_i} + \frac{m_2}{m_1 + m_2} \right) = h_i - \left(\frac{m_2}{m_1 + m_2} \right)^2 \quad (3.54)$$

$$\hat{I} = \frac{1}{m_1 + m_2} \left(\delta m_1 l_1 - \frac{1}{2} m_2 l_2 \right) \quad (3.55)$$

Korolis ve merkezkaç matrisi C 'de üst platform ve bacaklar olmak üzere iki kısımda incelenir.

$$C = C_{up} + C_{leg} \quad (3.56)$$

$$C_{up(i,j)} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^6 \left(\frac{\partial M_{up}(k,j)}{\partial X(i)} + \frac{\partial M_{up}(k,i)}{\partial X(j)} - \frac{\partial M_{up}(i,j)}{\partial X(k)} \right) \dot{X}(k) \quad (3.57)$$

$$C_{leg(i,j)} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^6 \left(\frac{\partial M_{leg}(k,j)}{\partial X(i)} + \frac{\partial M_{leg}(k,i)}{\partial X(j)} - \frac{\partial M_{leg}(i,j)}{\partial X(k)} \right) \dot{X}(k) \quad (3.58)$$

Son olarak yer çekim vektörü $G_{up} + G_{leg}$,

$$G_{up}(k) = \frac{\partial P_{up}(X)}{\partial X(k)} \quad (3.59)$$

$$G_{leg}(k) = \frac{\partial P_{leg}(X)}{\partial X(k)}$$

$$= (m_1 + m_2) g \sum_{i=1}^3 \left[\hat{I} \left[\frac{1}{L_{2i}^2} \left(\frac{\partial L_{2i}}{\partial X(k)} \right) + \frac{1}{L_{2i-1}^2} \left(\frac{\partial L_{2i-1}}{\partial X(k)} \right) \right] \right] (p_z + Z_{Tj}) \quad (3.60)$$

$$+ (m_1 + m_2) g \sum_{i=1}^3 \left[\hat{I} \left(\frac{1}{L_{2i}} + \frac{1}{L_{2i-1}} \right) + \left(\frac{2m_2}{(m_1 + m_2)} \right) \right] (p_z + Z_{Tj})$$

Burada,

$$P_{up} = m_{up} g P_z \dot{X} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & m_{up} g & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{P}_x \\ \dot{P}_y \\ \dot{P}_z \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} \quad (3.61)$$

$$P_{leg} = (m_1 + m_2) g \sum_{i=1}^3 \left[\hat{I} \left(\frac{1}{L_{2i}} + \frac{1}{L_{2i-1}} \right) + \frac{2m_2}{(m_1 + m_2)} \right] (p_z + Z_{Tj}) \quad (3.62)$$

$$Z_{T_j} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}^T R_z(\gamma)^T R_x(\alpha)^T R_y(\beta)^T T_j \quad (3.63)$$

Son olarak denklemlerde yer alan kısmi türevler Jakobiyeinden faydalanılarak hesaplanabilir.

$$\frac{\partial L_n}{\partial X(k)} = \sum_{m=1}^9 J_{1nm} J_{2mk} \quad (3.64)$$

Robot dinamik denklemleri elde edildikten sonra tüm sistemin dinamiğini elde etmek için eyleyici dinamiği ile robot dinamiği birleştirilmelidir. Buna göre eyleyici dinamiği tekrar yazılacak olursa,

$$L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a = V_a - K_b \dot{\theta} \quad (3.65)$$

$$\tau_m - \tau_1 = J_m \ddot{\theta} + B_m \dot{\theta} \quad (3.66)$$

Aşağıdaki gibi düzenlenirse,

$$\tau_m = J_m \ddot{\theta} + B_m \dot{\theta} + \tau_1 \quad (3.67)$$

$$\tau_m = m_a \ddot{l} + n_a \dot{l} + k_a f \quad (3.68)$$

olarak yazılabilir.

Yük torku ile kuvvet arasındaki ilişki aşağıdaki denklem ile ifade edilebilir. p , vidalı bilye adımını göstermektedir.

$$f = \frac{2\pi}{p} \tau_1 \quad (3.69)$$

Tek bir eyleyici için yazılan Denklem (3.66) matris formunda yazılırsa,

$$\tau_m = M_a \ddot{L} + N_a \dot{L} + K_a F \quad (3.70)$$

Burada,

$$M_a = m_a I_{6 \times 6} = \frac{2\pi}{p} (J_m) I_{6 \times 6} \quad (3.71)$$

$$N_a = n_a I_{6 \times 6} = \frac{p}{2\pi} (B_m) I_{6 \times 6} \quad (3.72)$$

$$K_a = k_a I_{6 \times 6} = \frac{p}{2\pi} I_{6 \times 6} \quad (3.73)$$

Robotun tam dinamik modelini elde etmek için robot dinamiğinden kuvvet eşitliği çekilerek, eyleyici dinamiğindeki kuvvete dönüştürülen yük torkunun yerine yazılmalıdır.

$$M(x)\ddot{x} + C(x, \dot{x})\dot{x} + G(x) = \tau = J^T F \quad (3.74)$$

$$\dot{L} = j\dot{x} \quad (3.75)$$

Eklem uzayına geçiş yapılırsa,

$$J^T F = M [J^{-1}\ddot{L} - J^{-1}JJ^{-1}\dot{L}] + CJ^{-1}\dot{L} + G \quad (3.76)$$

$$F = J^{-T}MJ^{-1}\ddot{L} + J^{-T}[C - MJ^{-1}J]J^{-1}\dot{L} + J^{-T}G \quad (3.77)$$

elde edilir ve aşağıdaki gibi yazılabilir,

$$F = M_e \ddot{L} + C_e \dot{L} + G_e \quad (3.78)$$

Burada,

$$M_e = J^{-T}MJ^{-1} \quad (3.79)$$

$$C_e = J^{-T}[C - MJ^{-1}J]J^{-1} \quad (3.80)$$

$$G_e = J^{-T}G \quad (3.81)$$

Son olarak Denklem (3.78), Denklem (3.70)'de yerine konursa,

$$\tau_m = M_a \ddot{L} + N_a \dot{L} + K_a (M_e \ddot{L} + C_e \dot{L} + G_e) \quad (3.82)$$

Denklem (3.82) basitleştirilirse,

$$\tau_m = \ddot{M}L + \dot{N}L + \ddot{G} \quad (3.83)$$

elde edilir. Burada,

$$\begin{aligned} \ddot{M} &= M_a + K_a M_e = M_a + K_a J^{-T} M J^{-1} \\ \dot{N} &= N_a + K_a C_e = N_a + K_a J^{-T} [C - M J^{-1} J] J^{-1} \end{aligned} \quad (3.84)$$

$$\ddot{G} = K_a G_e = K_a J^{-T} G$$

Denklem (3.83), eklem uzayında ifade edilmiş katı gövde ve eyleyici dinamiklerin birleşimini veren ifadedir. Eklem uzayından, Kartezyen uzayına geçiş yapılarak SP'nin ileri dinamik modeli elde edilmiş olur.

$$\tau_m = \ddot{M}_c \ddot{x} + \dot{N}_c \dot{x} + \ddot{G}_c \quad (3.85)$$

Burada,

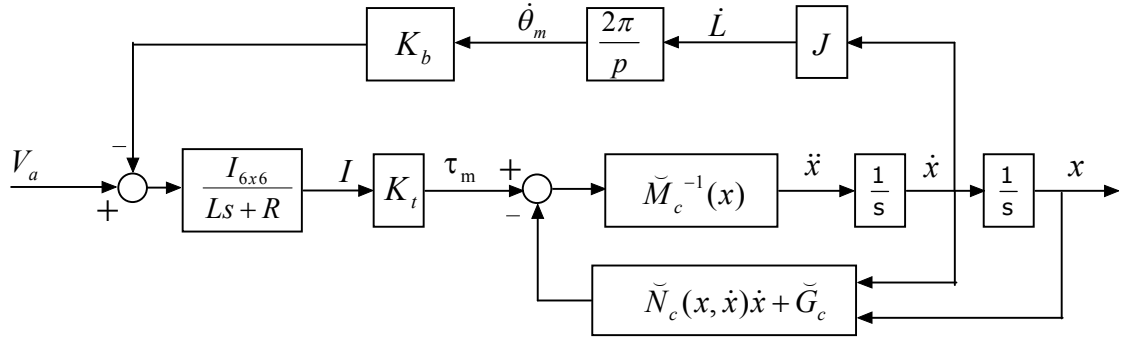
$$\begin{aligned} \ddot{M}_c &= M_a J + K_a J^{-T} M \\ \dot{N}_c &= N_a J + M_a J + K_a J^{-T} C \end{aligned} \quad (3.86)$$

$$\ddot{G}_c = K_a J^{-T} G$$

3.6. Robotun Simulink'te Modellenmesi

Denklem (3.87) ve Şekil 3.21 kullanılarak Simulink benzetim modeli oluşturulabilir.

$$\ddot{x} = \ddot{M}_c^{-1} [\tau_m - \dot{N}_c \dot{x} - \ddot{G}_c] \quad (3.87)$$

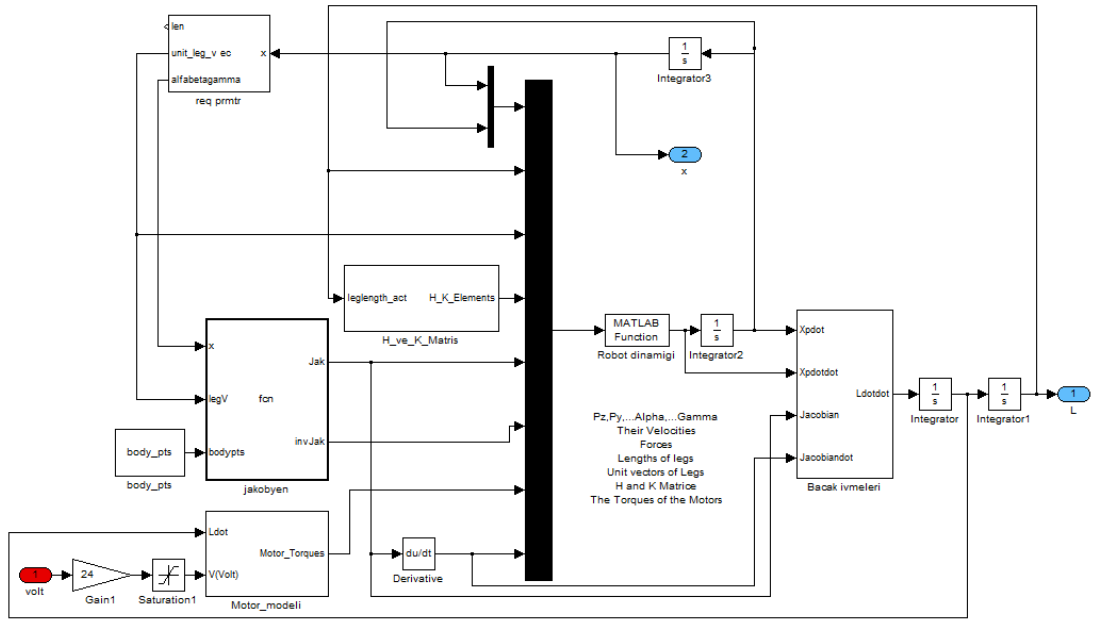


Şekil 3.21. Tüm sistemin dinamiğini ifade eden blok diyagramı

Tablo 3.3. Robot parametreleri [59]

Robot Parametreleri	Değer
m_{up}	1.1324 (Kg)
m_1	0.4279 (Kg)
m_2	0.1228 (Kg)
l_1	0.22 (m)
l_2	0.05 (m)
r_t	0.18867975191 (m)
r_b	0.29326616983 (m)
$I_{(mf)}$	$\begin{bmatrix} 0.0025 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0025 & 0 \\ 0 & 0 & 0.005 \end{bmatrix} Kg m^2$

Gerekli benzetim ve analizlerin yapılabilmesi ve denetleyici tasarımı için elde edilen robot dinamiği Simulink'te modellenmiştir. Model parametre ve değişkenlerini içeren program kodu EK-G'de verilmiştir.



Şekil 3.22. Robotun Simulink benzetim modeli

4. KONUM VE YÖRÜNGE KONTROLÜ

Stewart Platformu'nun konum ve yörünge kontrolü için gerekli denetim yapısı geliştirilerek kullanıcı arayüzü üzerinden manüel olarak komuta edilebileceği gibi uzaysal fare ve haptik üzerinden komutası da sağlanmıştır. Ters kinematik üzerinden kontrol edilen SP'nin bacaklarının konum denetimi için PID, kayma kipli denetim ve akıllı PID denetleyici yapıları geliştirilmiştir.

4.1. Uygulanan Kontrol Yöntemleri

4.1.1. PID kontrol

PID kontrol algoritması endüstride kullanılan en popüler kapalı çevrim denetleyicisidir. Basit ve etkin yapısıyla 50 yılı aşkın bir süredir başarıyla kullanılmaktadır. Birçok sistemin denetimi için yeterli bir performans sunan PID denetim sıcaklık, akış, basınç, konum, hız, seviye gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

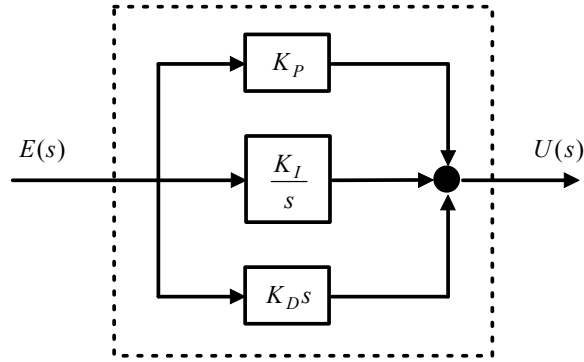
Denklem (4.1) ile ifade edilen PID denetim yönteminin temel yapısı Şekil 4.1'de görülmektedir

$$u(t) = K_p e(t) + K_I \int_0^t e(t)dt + K_D \frac{d}{dt} e(t) \quad (4.1)$$

Denklem (4.1)'in transfer fonksiyonu aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_I}{s} + K_D s = \frac{K_D s^2 + K_p s + K_I}{s} \quad (4.2)$$

Referans değeri ölçülen değerle karşılaştırılarak hata sinyali ($e(t)$) elde edilir. PID denetleyicisi hata sinyaline bağlı olarak kontrol çıkış sinyali ($u(t)$) üretir ve hatayı minimuma indirmeye çalışır.



Şekil 4.1. PID kontrol yapısı

4.1.2. Kayma kipli denetim

Kayma kipli denetim (KKD) ilk olarak değişken yapıli kontrol sistemlerinin bünyesinde ortaya çıkmıştır. Değişken yapıli denetleyicilerin kökleri bang-bang ve röle kayma teorilerine dayanmaktadır ve doğrusal olmayan sistemlerin kontrolü için etkili ve gürbüz bir yol sağlar. Değişken yapıli kontrol terimi, kontrol yapısının arzu edilen sistem davranışını elde etmek için bazı kurallara bağlı olarak değiştirilmesinden dolayı ortaya çıkmıştır. Bu değişen yapıya göre elde edilen kontrol yasası doğrusal değildir [60].

Denetleyici yapısını değiştiren kural, tasarımcı tarafından seçilen durum değişkenlerinin fonksiyonları şeklinde verilmektedir. Bu fonksiyonlar sıfıra eşitlendiklerinde, durum uzayında kayma yüzeyi olarak adlandırılan ve denetleyicinin anahtarlamasını idare eden bir yüzeyi tanımlamaktadırlar.

Bu kontrol yasası, parametrik belirsizliklerin ve bozucuların olması durumunda bile denge noktasına erişinceye kadar sistem durumunun bu yüzey üzerinde tutulmasını amaçlamaktadır. Sistem durumunun bu yüzey üzerinde “kaymaya” devam etmesi özelliğine kayma modu denilmektedir.

Bu kontrol stratejisi robotik manipülatörlerdeki uygulamalar için iki büyük avantaj sunmaktadır:

- Manipülatörün tam modeline ihtiyaç duyulmamaktadır
- Belirli şartlar altında, sistem performansı sınırlandırılmış harici bozuculardan etkilenmemektedir

Bu özellikler, manipölatör dinamiklerinin tam olarak elde edilmesinin güç olması nedeniyle önemlidir. Ayrıca, manipölatörün uç işlevcisine eklenen yük etkisi de denetleyici tasarımında harici bozucular olarak hesaba katılabilir.

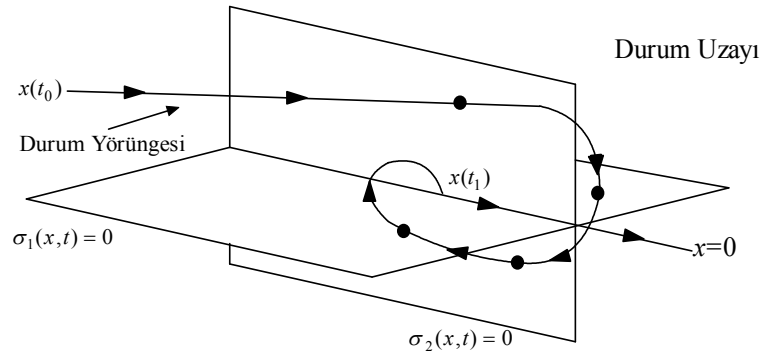
Değişken yapılı denetleyici tasarımında izlenecek ilk adım, m adet durum vektörü seçimidir:

$$\sigma_i(x, t) \quad ; \quad i = 1, \dots, m \quad (4.3)$$

Bu denklem takımı sıfıra eşitlendiğinde:

$$\sigma(x, t) = \begin{bmatrix} \sigma_1(x, t) \\ \sigma_2(x, t) \\ \vdots \\ \sigma_m(x, t) \end{bmatrix} = 0 \quad (4.4)$$

kayma yüzeyi elde edilmiş olur. Denklem (4.3) ile verilen durum vektörleri, yüzeylerin kesişimiyle sınırlandırılmış uzayda arzu edilen dinamik davranışı gösterecek şekilde tasarlanır. Şekil 4.2’de iki durum vektörü için örnek bir kayma yüzeyi verilmiştir. Şekildeki “yüzey” aslında anahtarlama fonksiyonları tarafından tanımlanan düzlemlerin kesişimiyle oluşan bir doğrudur.



Şekil 4.2. Kayma yüzeyi

Denetleyici tasarımının ikinci aşaması, sistem durumunun kayma yüzeyine çekilmesine sebep olan anahtarlama kontrol yasasının belirlenmesidir. Bu yüzeye ulaşıldığında, değişken yapılı kontrol sistem durumunu denge noktasına ulaşıncaya kadar orada tutmaktadır.

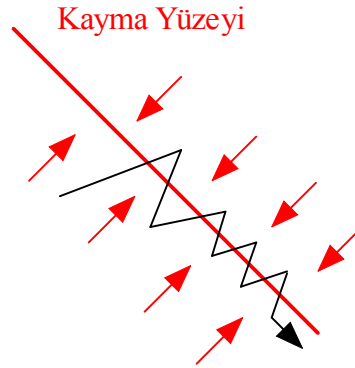
Bu durumda anahtarlama yasası:

$$u_i = -u_{0i} \operatorname{sgn}(\sigma_i(x, t)) = \begin{cases} -u_{0i} , & \text{if } \sigma_i(x, t) > 0 \\ 0 , & \text{if } \sigma_i(x, t) = 0 \\ +u_{0i} , & \text{if } \sigma_i(x, t) < 0 \end{cases} \quad (4.4)$$

burada u_{0i} , i girişi için maksimum kontrol sinyalinin mutlak değeridir.

Pratikte değişken yapılı kontrol bir sorun ortaya çıkartmaktadır. İdeal bir kayma modu sadece durum yörüngesi kayma yüzeyiyle sınırlandırıldığında var olabilir. Bununla birlikte örneğin gecikme, ölü bölge ve histerezis gibi eyleyicilerin fiziksel kısıtlamalarından dolayı çok hızlı bir anahtarlama elde etmek imkansızdır. Böylece ideal bir kayma moduna da erişilememektedir.

Bu sınırlandırmadan dolayı, sistem durumu kayma yüzeyine yakın olduğunda kontrol eyleminde yüksek frekansta bir gürültü oluşmaktadır. Bu olay çatırdama (chattering) olarak bilinmektedir.



Şekil 4.3. Kayma kipli denetimde kayma yüzeyinin yakalanması ve çatırdama

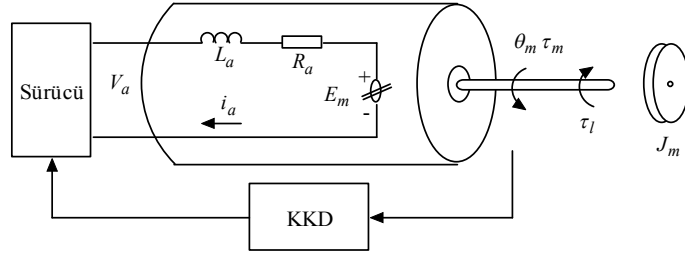
Çatırdama, sistem durumunun Şekil 4.3'teki gibi kayma yüzeyi etrafında salınım yapmasına neden olur. Çatırdama kontrol sistemlerinde iki sorun ortaya çıkartmaktadır:

- Modellenmemiş yüksek frekanslı dinamikler ortaya çıkabilir ve beklenmeyen kararsız davranışlarla sonuçlanabilmektedir

- Eyleyiciler aşırı zorlamalar altında çalışmaktadırlar, böylece kırılma durumları meydana gelebilmektedir veya çalışma ömürleri kısalmaktadır

KKD, modellenmeyen dinamik etkilerine karşı gösterdiği başarılı performans, parametre değişimlerine karşı duyarsız olması, harici bozululara karşı dayanıklı olması ve hızlı dinamik cevabı gibi özellikleriyle öne çıkmaktadır. KKD'nin bu avantajları DC motor hız ve konum kontrolünde kullanılabileceğini göstermektedir [61].

SP'nin konum ve yörünge kontrolü için eklem uzayında KKD tasarımı yapabilmek için eyleyici dinamiği tekrar incelenebilir. Sistem temel olarak DC motor, hassas bilyeli mil ve kaplin elemanlarından oluşmaktadır. Aşağıda DC motor modeli verilmiştir.



Şekil 4.4. DC motor modeli

Burada, θ_m motorun konumu (rad), τ_m motorda üretilen moment (Nm), τ_l yük moment, V_a endüvi gerilimi (V), L_a endüvi endüktansı (H), R_a endüvi direnci (Ω), E_m ters EMK (V), i_a endüvi akımı (A), K_b ters EMK sabiti, K_m moment sabiti bilgilerini temsil etmektedir.

$$L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a = V_a - E_m$$

$$E_m = K_b \frac{d\theta_m}{dt} \quad \tau_m = K_m i_a \quad (4.5)$$

$$\tau_m - \tau_l = J_m \frac{d^2\theta_m}{dt^2} + B_m \frac{d\theta_m}{dt}$$

Konum hatasının değişimi göz önünde bulundurulursa $x_1 = \dot{\theta}_r - \dot{\theta}_m$ durumuna göre ikinci dereceden hareket denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir [62].

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (4.6)$$

$$\dot{x}_2 = -a_1 x_1 - a_2 x_2 + f(t) - bu$$

Burada a_1 , a_2 , ve b pozitif parametreler ve $f(t)$ ise yük momenti, referans girişi ve türevlerine bağlı olan bir fonksiyondur.

Sürekli olmayan kontrol için:

$$u = u_0 \text{sign}(s), \quad s = cx_1 + x_2 \quad (4.7)$$

ve Denklem (4.8) ile verilen eşitlik doğrusal ve $f(t)$ 'ye bağlı olmamasından $s=0$ hattında meydana gelen kayma, x_1 hatasının üstel olarak azalmasını sağlar.

$$cx_1 + \dot{x}_1 = 0 \quad (4.8)$$

Kayma yüzeyinin türevi alınırsa:

$$\dot{s} = cx_2 - a_1 x_1 - a_2 x_2 + f(t) - bu_0 \text{sign}(s) \quad (4.9)$$

Denklemden,

$$bu_0 > |cx_2 - a_1 x_1 - a_2 x_2 + f(t)| \quad (4.10)$$

s ve $\dot{s}$ zıt işaretlere sahiptir ve durum $s = 0$ kayma hattına bir süre sonra ulaşacaktır. Denklem (4.10) ile verilen eşitsizlik ise sistemin kayma moduna zorlanması için gerekli gerilim değerini belirlemektedir [62].

Kararlılık analizi için aday Lyapunov fonksiyonu aşağıdaki gibi seçilebilir [61],

$$V = \frac{1}{2} s^2 \quad (4.11)$$

Kararlılık koşulu Lyapunov'un ikinci teoreminden,

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} s^2 = s\dot{s} \leq -K |s| \quad (4.12)$$

olarak bulunur. Burada K pozitif bir katsayıdır.

4.1.3. Akıllı PID denetim

Akıllı PID (iPID) denetleyicileri minimum uzman becerisi kullanarak model belirsizliği ve bozuklukları olan sistemlerin kontrolü için yüksek potansiyele sahip yeni ve gelişmekte olan bir kontrol yöntemidir [63-66]. iPID yüksek dereceli doğrusal olmayan sistemler ya da zamanla değişen sistemler için modellemeye gerek duyulmaksızın uygulanabilmektedir. iPID'nin temeli kolayca gerçekleştirilen hızlı kestirim ve tanımlama tekniklerine dayanan çevrimiçi nümerik ayrıştırıcı olarak tanımlanabilir. Tek girişli tek çıkışlı sistemler için,

$$y^{(n)} = F + \alpha u \quad (4.13)$$

burada α sabit bir katsayı ve $F = y^{(n)} - \alpha u$ n. dereceden çıkış türevine ve kontrol sinyaline bağlı bir fonksiyondur.

$n=1$ için akıllı PI denetleyici tasarımı,

$$\dot{y} = F(t) + \alpha u(t) \quad (4.14)$$

ve denetleyicinin genel yapısı Denklem (4.15) ile ifade edilir [65, 66].

$$u(t) = -\frac{F}{\alpha} + \frac{\dot{y}}{\alpha} + K_p e + K_i \int e dt, \quad e = y^*(t) - y(t) \quad (4.15)$$

Burada $y^*(t)$ referans yörüngeyi temsil etmektedir. Denetleyici tasarımı aşağıdaki gibi yapılabilir:

1. Sabit giriş parametresi α seçilir
2. Denetleyici parametreleri ayrık zamanda aşağıdaki gibi güncellenir

$$F_k = \dot{y}_k^* - \alpha u_k ; F_{k=0} = 0 \quad (4.16)$$

$$u_{k+1} = -\frac{F_k}{\alpha} + \frac{\dot{y}_k}{\alpha} + K_p(y_k^* - y_k) + K_i \int (y_k^* - y_k) dt$$

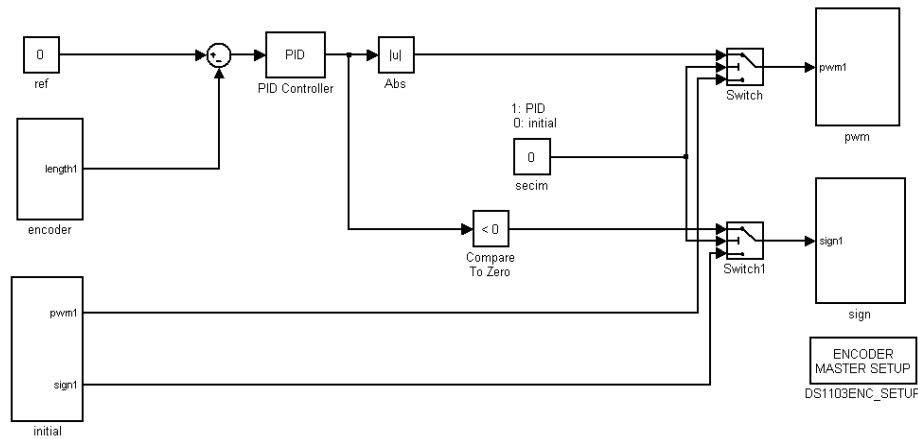
(4.17)

Burada asteriks (*) bulunan değişkenler referans yörüngeleri temsil etmektedir. K_p ve K_i ise deneme-yanılma tekniğiyle deneysel olarak saptanmıştır.

4.2. Robot Denetim Sisteminin Geliştirilmesi

4.2.1. Bacakların sıfır pozisyonuna getirilmesi ve tek bacağın konum kontrolünün gerçekleştirilmesi

Özellikleri ele alınan eyleyiciler mutlak kodlayıcılara (absolute encoder) sahip değildirler. Bu nedenle çalışmalara başlamadan önce sıfır pozisyonuna getirilmeleri gerekmektedir. Bunun için referans sinyali kullanılmıştır ve basit bir algoritma ile bu işlem gerçekleştirilmiştir. Konum kontrolünü yapabilmek için öncelikle eyleyici sıfır pozisyonu alınmalıdır. Aksi takdirde 6 bacak aynı referans noktasına sahip olmayacaktır ve hatalı işlem yapılacaktır. Ayrıca istenen bazı durumlarda ayrı ayrı her bir bacağın bulunduğu konuma göre göreceli olarak konum kontrolü gerçekleştirilebilir. Şekil 4.5 ile bu işlemlerin yapılabilmesi için oluşturulan ana Simulink modeli verilmiştir.

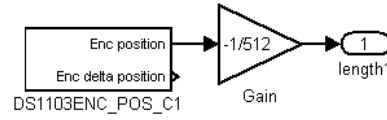


Şekil 4.5. Tek bir bacağın kontrolü – ana Simulink modeli

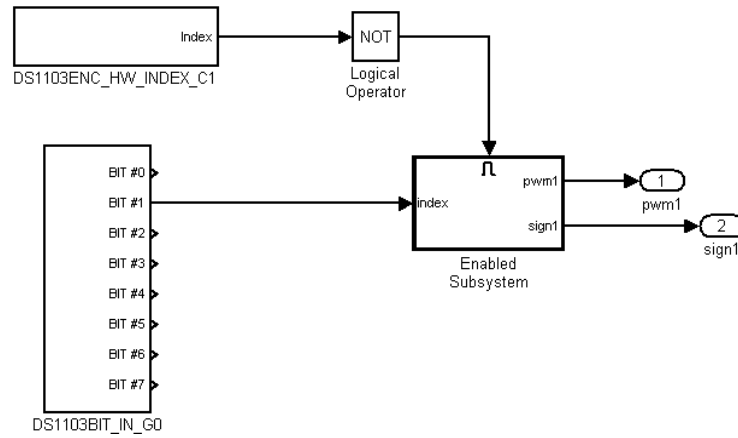
Ana model; kapalı çevrim PID kontrolör yapısı, encoder, initial, pwm ve sign alt blokları, anahtarlar, mantıksal işlem yapıları ve DSPACE ile ilgili bloklardan oluşmaktadır. Ref bloğu ile referans değer girilmektedir ve seçim bloğu ile

eyleyicinin sıfır pozisyonuna ulaştırılması ya da konum kontrolü altında çalıştırılması seçilmektedir. Anahtarlar bu seçim işlemine göre girişlerden birini seçerek çıkışa aktarırlar. Sıfır ile karşılaştırma mantıksal deyimi konum kontrolü modunda girilen referans değerine göre motorun hareket yönünü belirlemektedir. Abs bloğu PID çıkışında üretilen negatif değerleri PWM girişlerinin kabul ettiği pozitif değere dönüştürmektedir. DS1103ENC_SETUP bloğu DSPACE ile ilgili bir ayar bloğudur ve kullanılan kodlayıcılar için gerekli ayarlamaların yapılmasını sağlar.

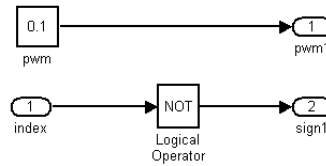
Şekil 4.6’da encoder alt modeli görülmektedir. Kodlayıcılardan darbe sayısına göre alınan konum bilgisi uygun katsayılarla çarpılarak milimetre cinsinden elde edilmiştir.



Şekil 4.6. Kodlayıcı alt modeli



Şekil 4.7. Başlangıç alt modeli

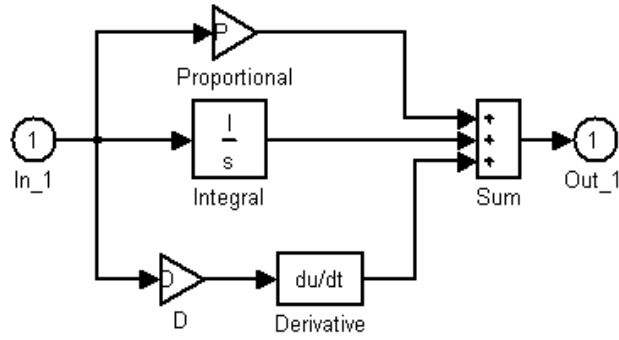


Şekil 4.8. Enabled subsystem alt modeli

Eyleyicinin sıfır pozisyonun tespit edilmesi için gerekli algoritmayı sağlayan alt model Şekil 4.7 ile verilmiştir. Bu modelde DS1103ENC_HW_INDEX_C1 bloğu

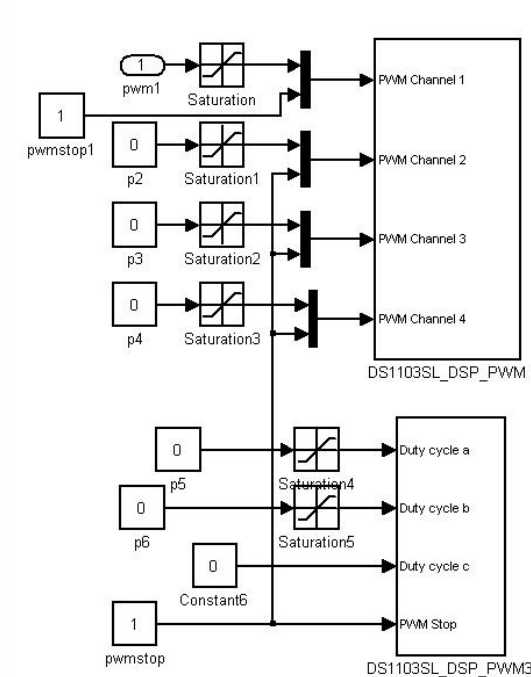
kodlayıcıdan referans sinyali arar ve yükselen kenar darbeyi yakaladığı anda otomatik şekilde kodlayıcı bilgisini sıfırlar ve çıkışında lojik 1 değerini üretir. DS1103_BIT_IN_GO bloğu denetleyiciye uygulanan dijital sinyal girişinin okunmasını sağlar. Şekil 4.8 ile verilen Enabled Subsystem bloğu ise basit algoritmayı içermektedir.

Denklem (4.1) ile verilen PID kontrol fonksiyonu PID alt modeli altında Şekil 4.9’da görüldüğü gibi uygulanabilir.



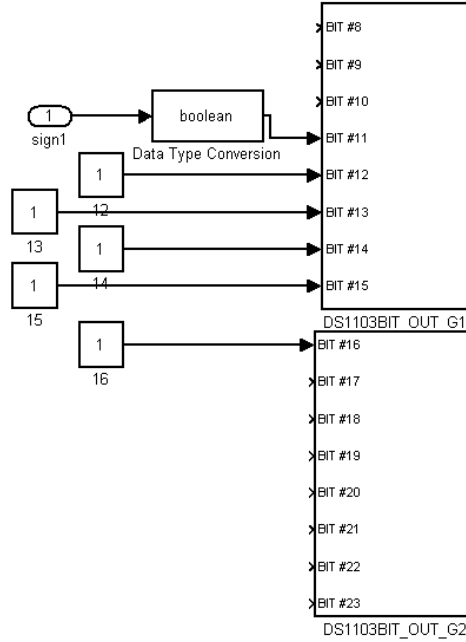
Şekil 4.9. PID alt modeli

PWM alt modeli ise DSPACE sisteminin PWM çıkışlarına üretilen komutları uygulayabilmek için gerekli blokları içermektedir.

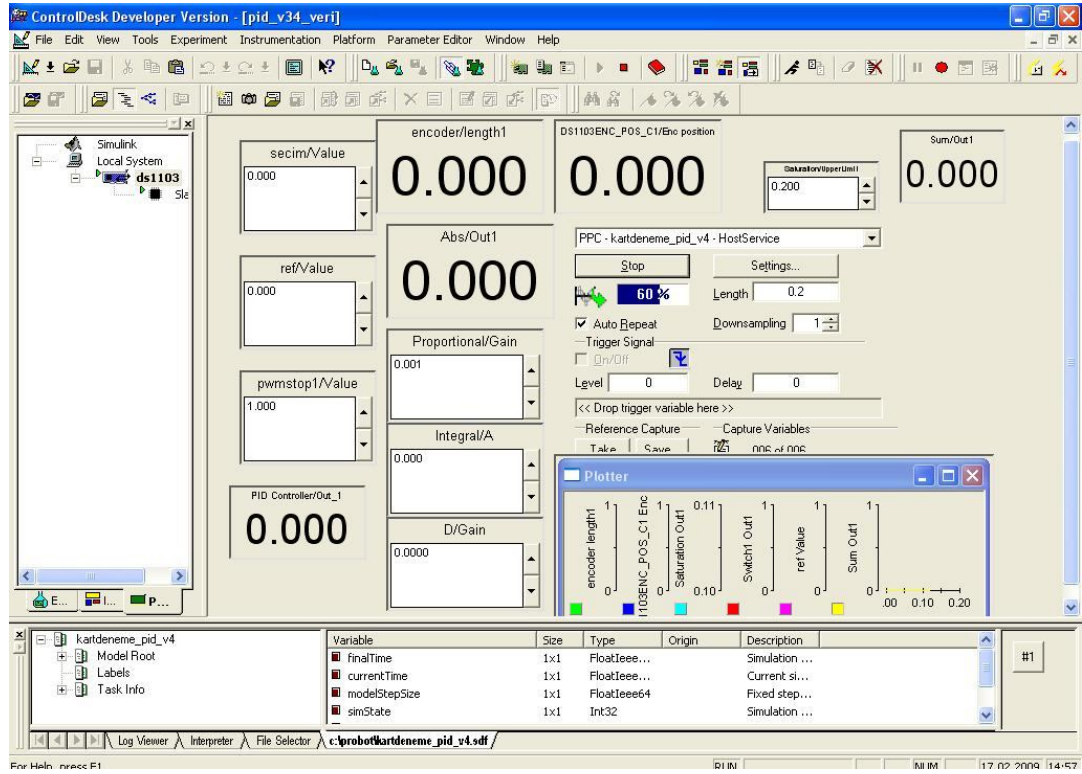


Şekil 4.10. PWM alt modeli

Motor hareket yönlerini uygulamak için dijital çıkışlar kullanılmıştır. Bu işlem sign alt modeli altında Şekil 4.11’de görüldüğü gibi yapılmaktadır.



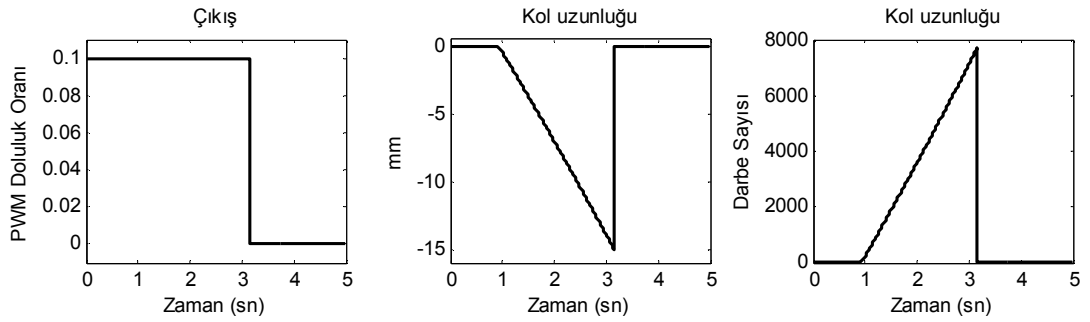
Şekil 4.11. Sign alt modeli



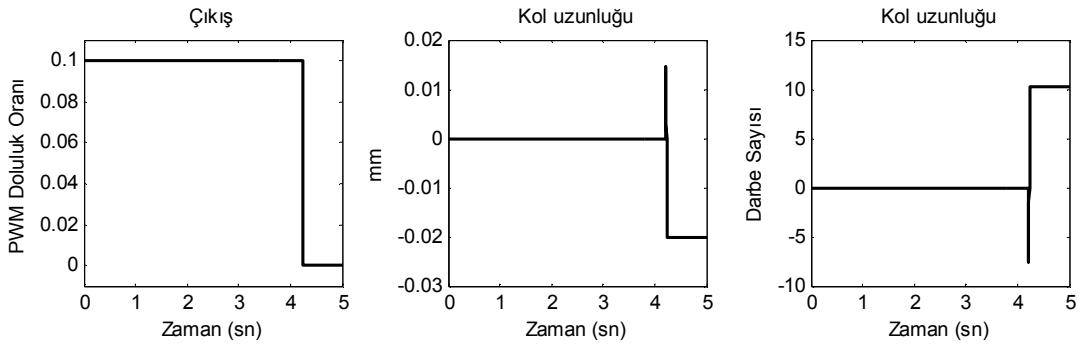
Şekil 4.12. DSPACE Control Desk yazılımı deney arayüzü

Buraya kadar açıklanan tasarım derlendikten sonra DSPACE Control Desk yazılımı aracılığıyla uygulamalar gerçekleştirilebilir. Yazılım aracılığıyla kullanılan model değişken ve parametrelerine ulaşılabilir, çevirim içi güncelleme yapılabilir ve veriler toplanabilir. Gerekli değişkenleri değiştirebilmek ve istenilen verileri toplamak için Şekil 4.12’de görülen arayüz ile sıfır pozisyonunun aranması ve konum kontrolü deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Şekil 4.13 ve 4.14’te başlangıçta eyleyicinin sıfır konumunun üstünde ya da altında olması durumlarında sıfır pozisyonunun tespit edilip konum kontrolü için sistemin hazır hale getirilmesine ait zaman cevapları görülmektedir. Eyleyicinin sıfır pozisyonunun altında bulunması durumunda kullanılan HW_index bloğundan ötürü eyleyicide meydana gelen yer değişimi görülmemektedir.



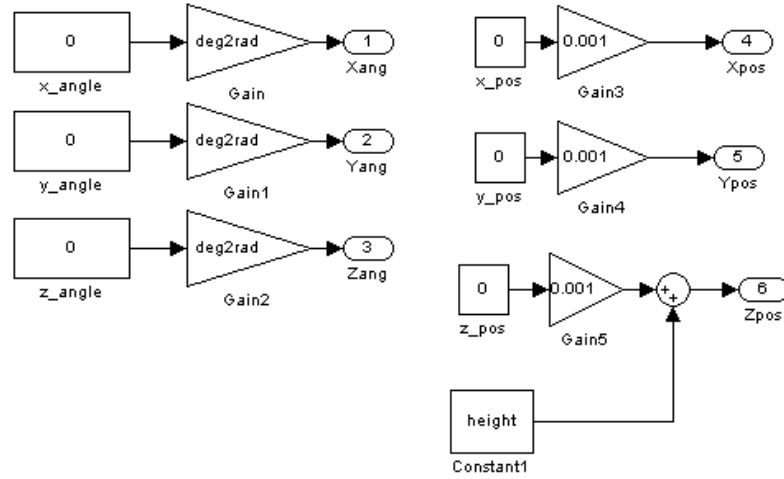
Şekil 4.13. Eyleyicinin sıfır pozisyonun üzerinde bulunması durumunda sıfır noktasına getirilmesi



Şekil 4.14. Eyleyicinin sıfır pozisyonun altında bulunması durumunda sıfır noktasına getirilmesi

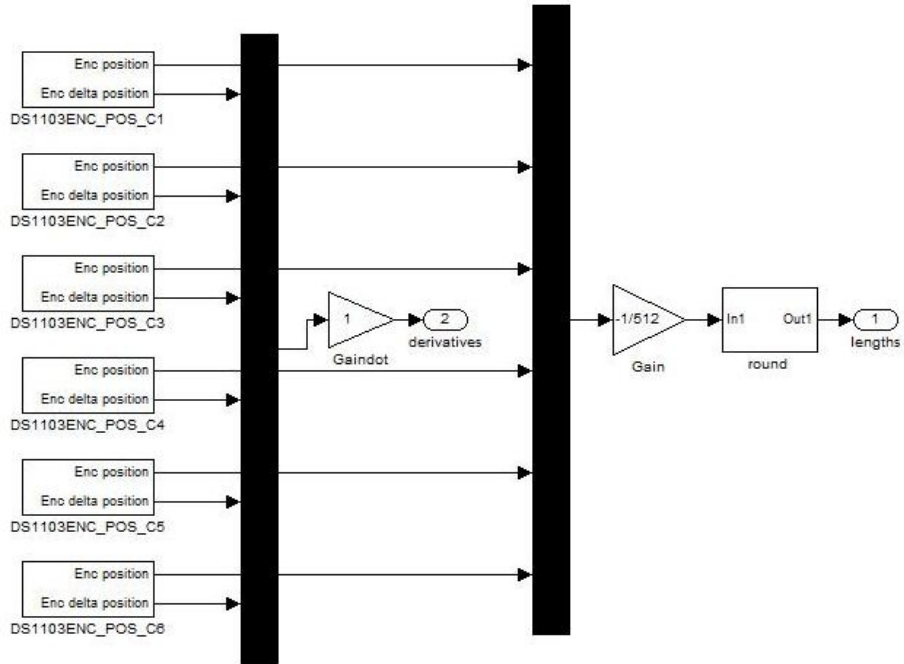
4.2.2. Tek eyleyici için yapılan çalışmaların tüm bacaklara aktarılması

Tek eyleyici için gerçekleştirilen işlemler diğer eyleyiciler için de uygulanarak ters kinematik tabanlı robotun konum ve yörünge denetim yapısı oluşturulmuştur. Seçim

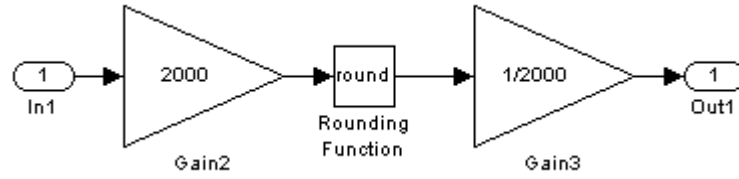


Şekil 4.17. Üst platform konum ve yönelim değer girişi

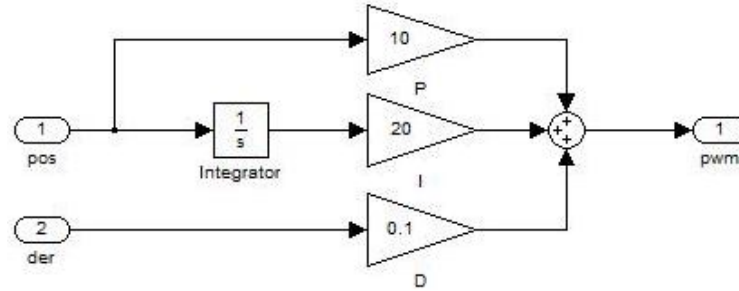
Konum değerlerinin mm cinsinden ve yönelim değerlerinin derece cinsinden girilmesini sağlayan alt model Şekil 4.17’de görülmektedir. Şekil 4.18’de 6 kodlayıcıdan alınan darbe sayıları mm’ye dönüştürülmektedir ve 500 nm çözünürlük sağlayacak şekilde yuvarlama (round) blokları (Şekil 4.19) ile ölçeklendirilerek çıkışa aktarılmaktadır.



Şekil 4.18. Encoder alt modeli

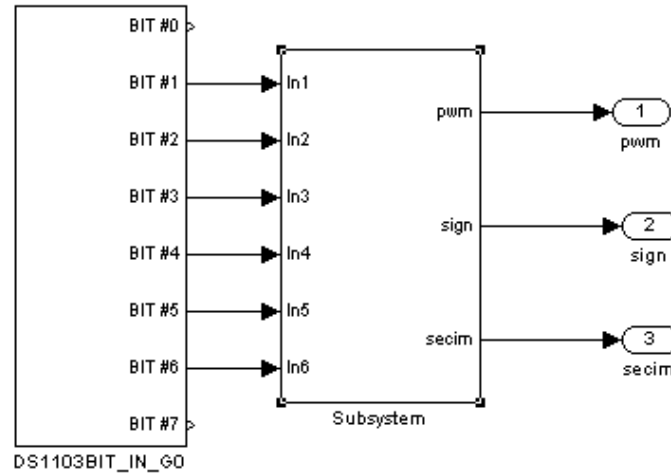


Şekil 4.19. Round alt blok yapısı



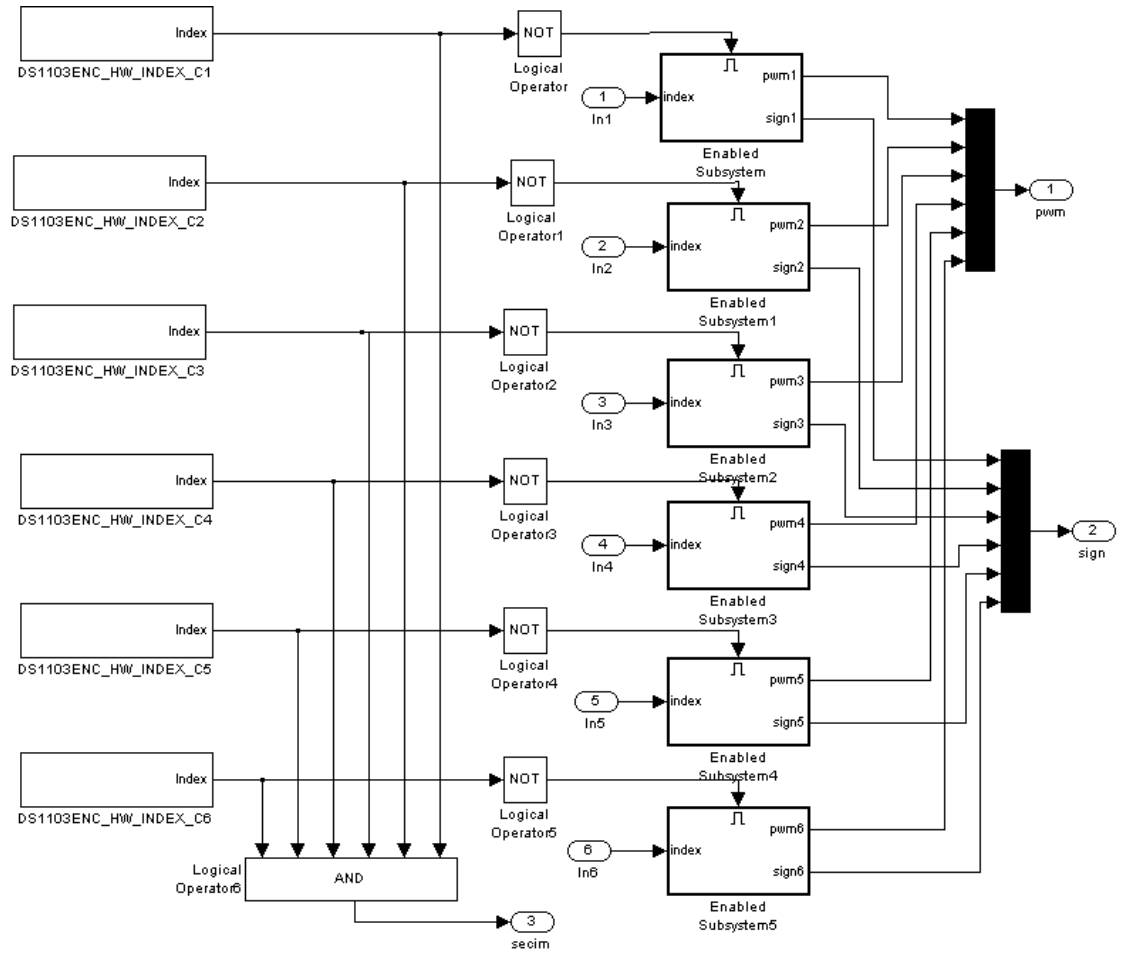
Şekil 4.20. PID alt modeli

Üstte verilen alt model her bir eyleyici için PID alt yapıları içermektedir. Şekil 4.21 ve Şekil 4.22 ise her bir eyleyicinin sıfır konumlarının aranması ve hepsinin tamamlanması sonucunda PID konum kontrolünün devreye sokulması için gerekli modeller görülmektedir.

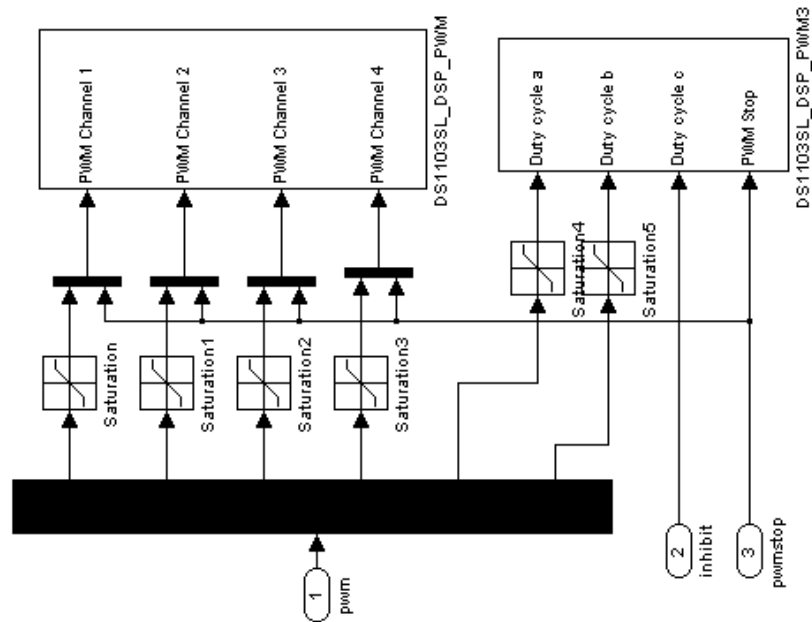


Şekil 4.21. initial alt modeli

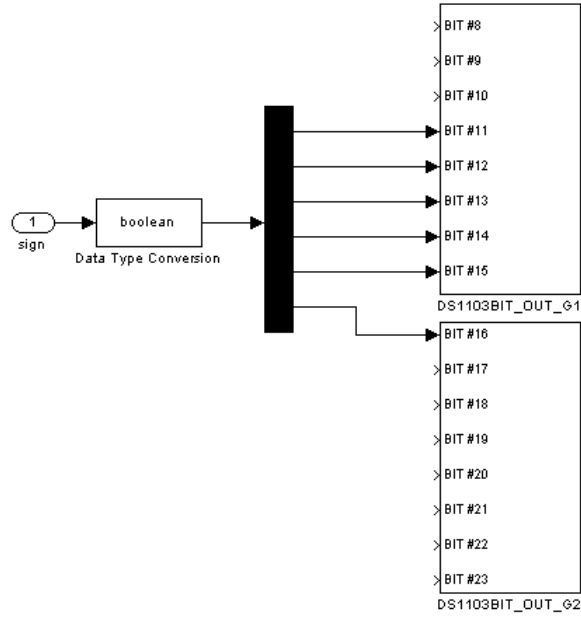
Şekil 4.23 ve 4.24'te üretilen çıkış değerlerinin eyleyicilere aktarılmasını sağlayan PWM alt modeli ve motorların hareket yönünü tayin eden sign alt modeli verilmiştir.



Şekil 4.22. Subsystem alt modeli

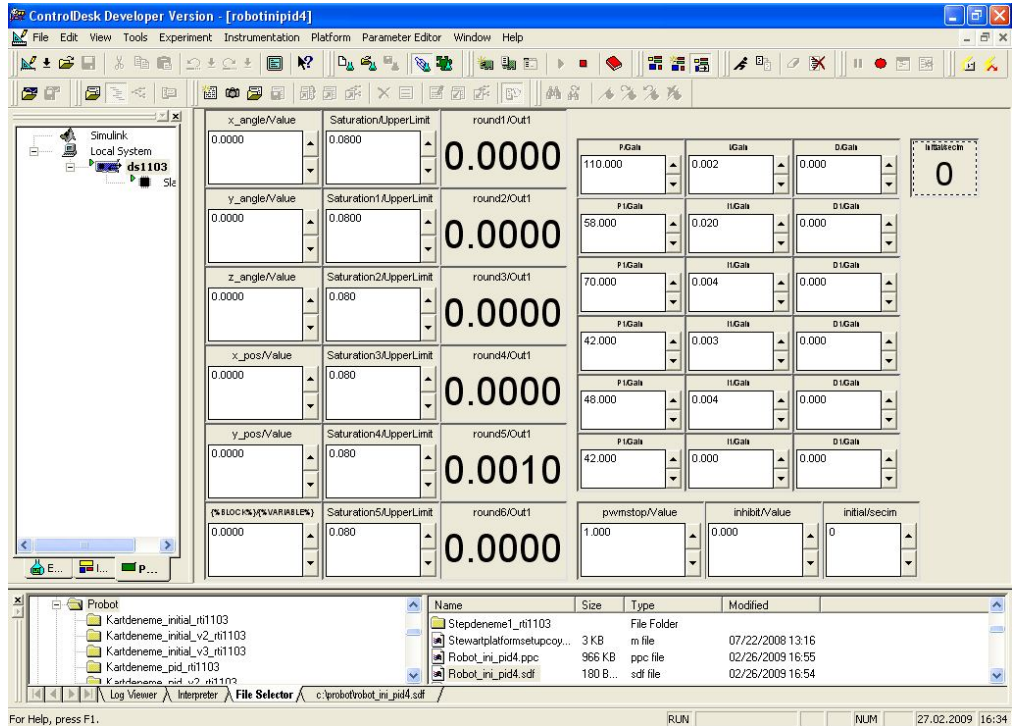


Şekil 4.23. PWM alt modeli



Şekil 4.24. Sign alt modeli

Aşağıdaki şekilde DSPACE ürününün yazılımı aracılığıyla oluşturulan arayüz görülmektedir. Tüm sistem bilgilerine arayüz vasıtasıyla ulaşılabilir. Geliştirme aşamasında kullanılabilecek değişkenleri içermektedir. Referans giriş değerleri kolayca arayüzden girilebilir.



Şekil 4.25. Sistem parametrelerinin kontrolü için geliştirilen Control Desk arayüz tasarımı

4.3. Üst Platformun Konum ve Yönelim Kontrolü

Konum kontrolü için uygulanabilecek basamak, sinüzoidal, 6 DOF fare ve haptik ile tek ya da çoklu eksenler için konum ve yönelim referans girişleri yapılmıştır. Özellikle basamak girişler için ters kinematik çözümünde elde edilen bacak boyları her bir motor için bağımsız konum kontrolüne dönüşmüştür. Bu hareket eklem uzayında tanımlanmıştır. Robotun bir doğru hat (straight line) boyunca ilerleyebilmesi ve hareketin başlangıç ve bitiş zamanlarının belirlenebildiği referans girişini sağlayabilmek için yörünge planlaması yapılmıştır. Aynı zamanda bu hareket sırasında motorlar eş zamanlı olarak çalışacaklardır. Polinom tabanlı yörünge denklemleri incelendiğinde aşağıdaki eksiklikler saptanmıştır: i) polinomun katsayılarının belirlenmesinde birçok başlangıç ve bitiş değerlerine ihtiyaç vardır ii) özellikle ivme değerleri başlangıçta yüksek değerlere ihtiyaç duymaktadır iii) koşullar değiştiğinde her seferinde katsayıların yeniden hesaplanması gerekmektedir. Bu eksiklikleri gidermek için Kane'nin geçiş fonksiyonu kullanılmıştır ve aşağıda denklemi verilmiştir [67].

$$y(t) = y_0 + (y_f - y_0) \frac{t - t_0}{t_f - t_0} - \frac{y_f - y_0}{2\pi} \sin\left(2\pi \frac{t - t_0}{t_f - t_0}\right) \quad (4.18)$$

$y(t)$: Konum fonksiyonu

y_0 : Başlangıç konumu

y_f : Bitiş konumu

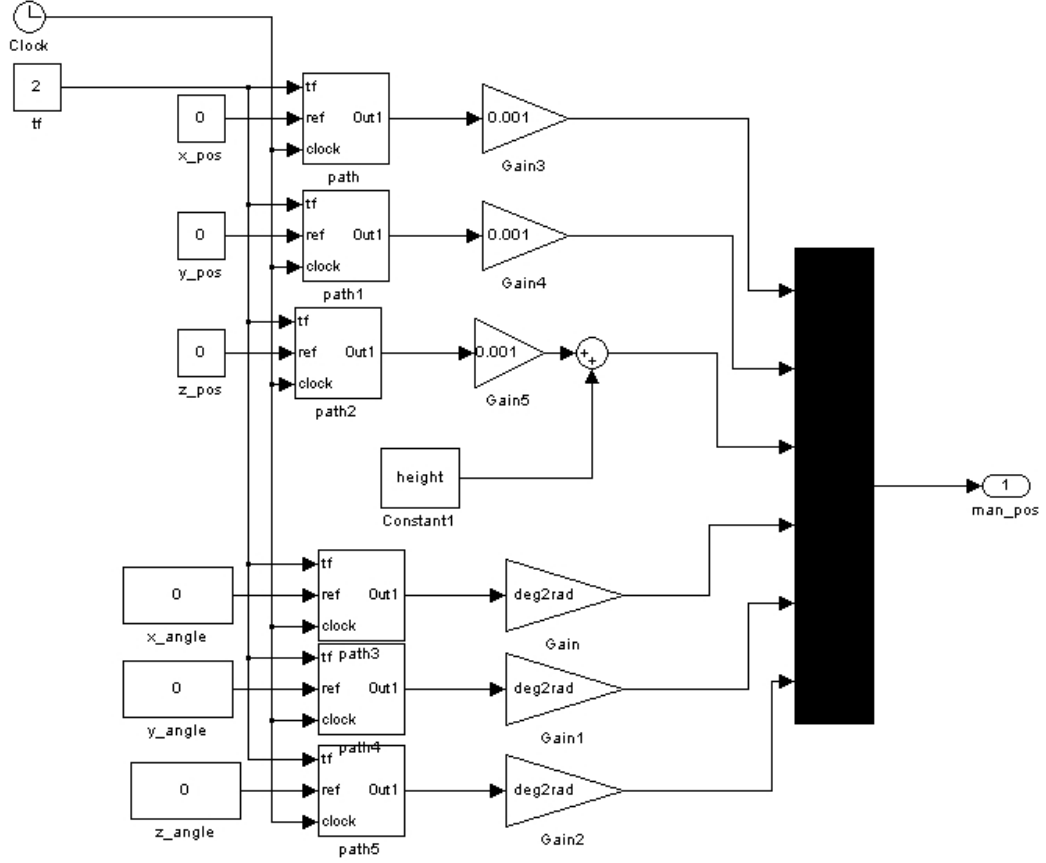
t : Zaman

t_0 : Başlangıç zamanı

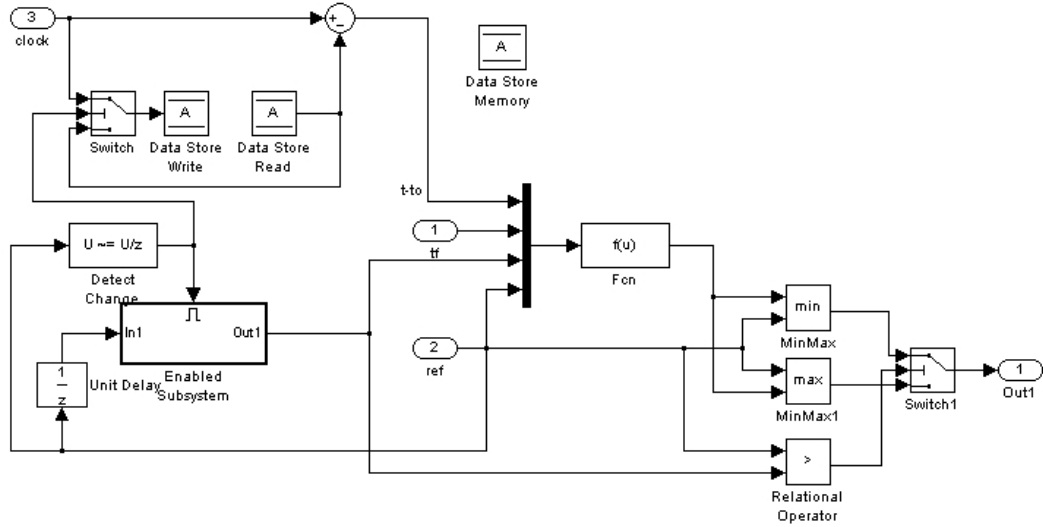
t_f : Bitiş zamanı

Simulink'te bu denklemi gerçekleyen blok yapı oluşturulmuştur ve Şekil 4.26 ve 27'de görülmektedir. Bu yapıya sadece bitiş konumu ile yörünge süresi girilmektedir ve otomatik olarak diğer parametreler alınarak yörünge hesaplanmaktadır. Şekil 4.28 ve 29'da farklı konum ve süre için hesaplanan konum, hız ve ivme değerleri görülmektedir. Dikkat edildiği gibi hareket sıfır hız ve sıfır ivme ile başlayıp

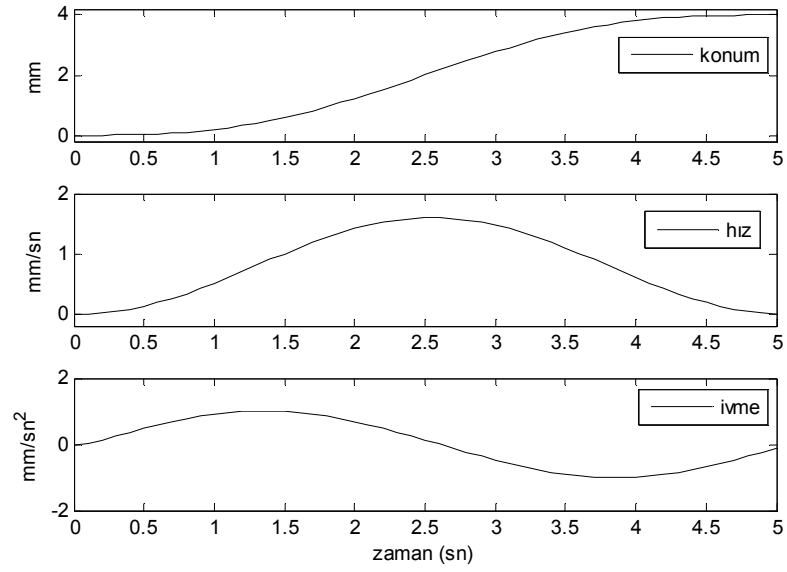
bitmektedir. Konum, hız ve ivme değerleri oldukça yumuşak değişimlere sahiptir. Bu, motorların daha yumuşak kalkış ve duruşu açısından oldukça önemlidir.



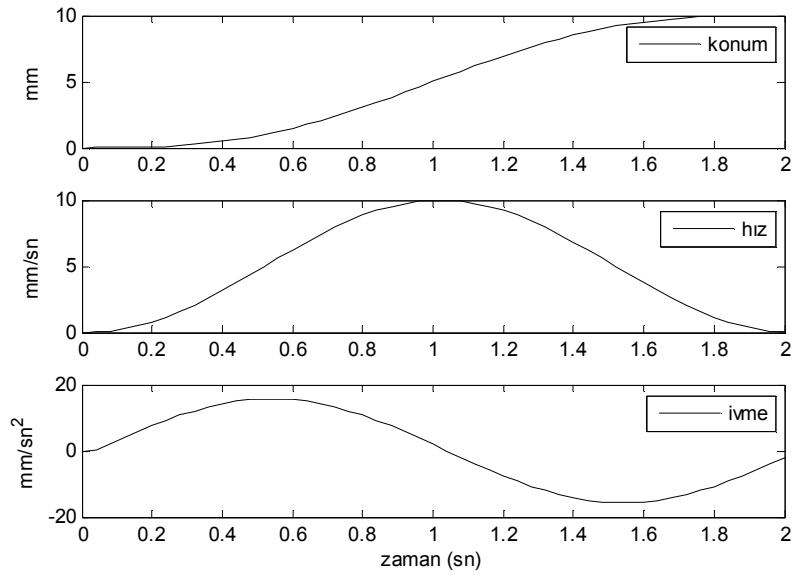
Şekil 4.26. Denklem (4.18)'i gerçekleyen Simulink modeli



Şekil 4.27. Path alt modeli



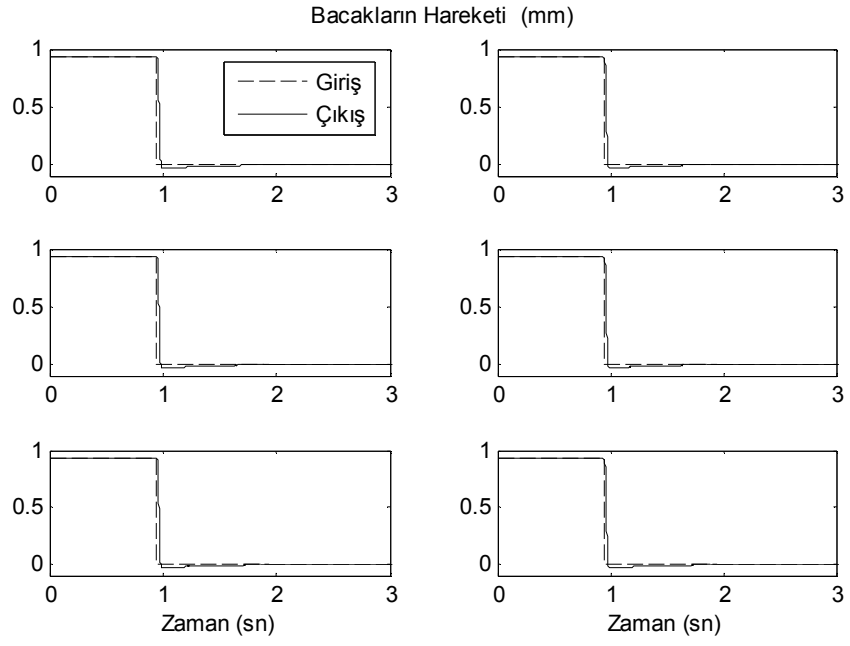
Şekil 4.28. 5 sn süreli yörünge planı



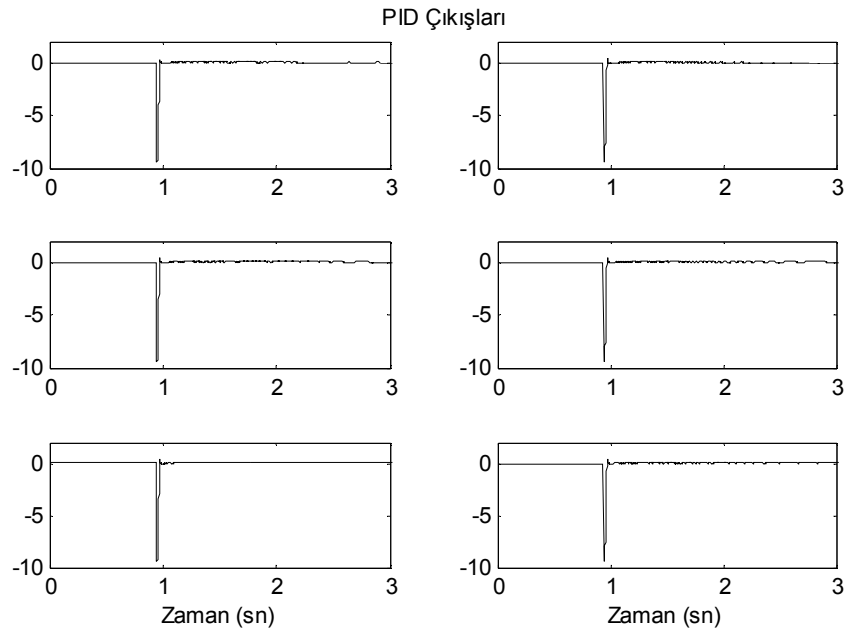
Şekil 4.29. 2 sn süreli yörünge planı

4.3.1. PID denetim - deneysel sonuçlar

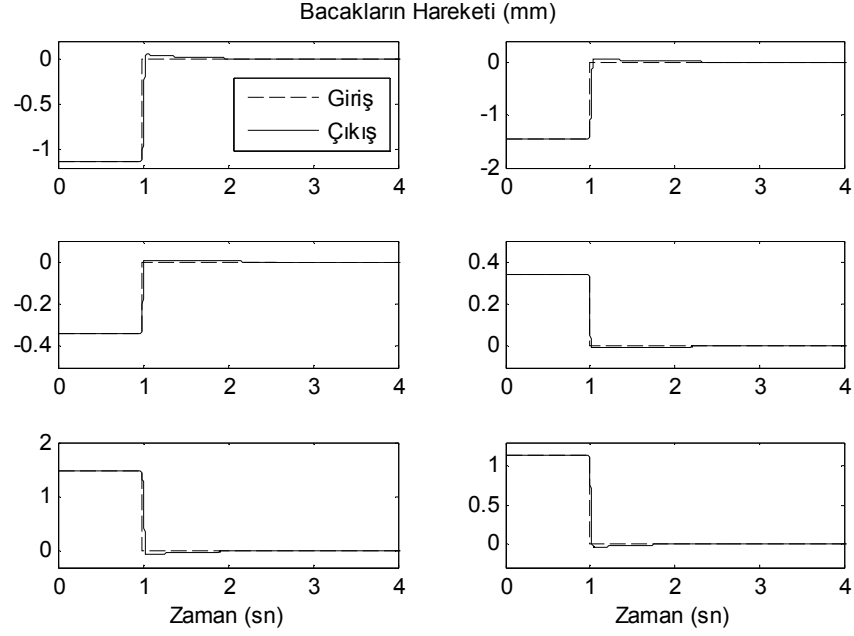
Yapılan birçok deneyden bir kısmı aşağıda sırasıyla verilmiştir. Konum kontrolüne yönelik olarak sisteme basamak, fare ve haptik girişleri uygulanmıştır. Şekil 4.30'da z ekseninde 1 mm'lik basamak girişi sonucunda oluşan sistem yanıtı görülmektedir. Görüldüğü gibi çıkışlar hızlı bir şekilde girişi takip etmiştir. Şekil 4.31'de ise bu hareket sonucunda hesaplanan denetleyici çıkışları verilmiştir.



Şekil 4.30. Basamak giriş yanıtı – z ekseni 1 mm

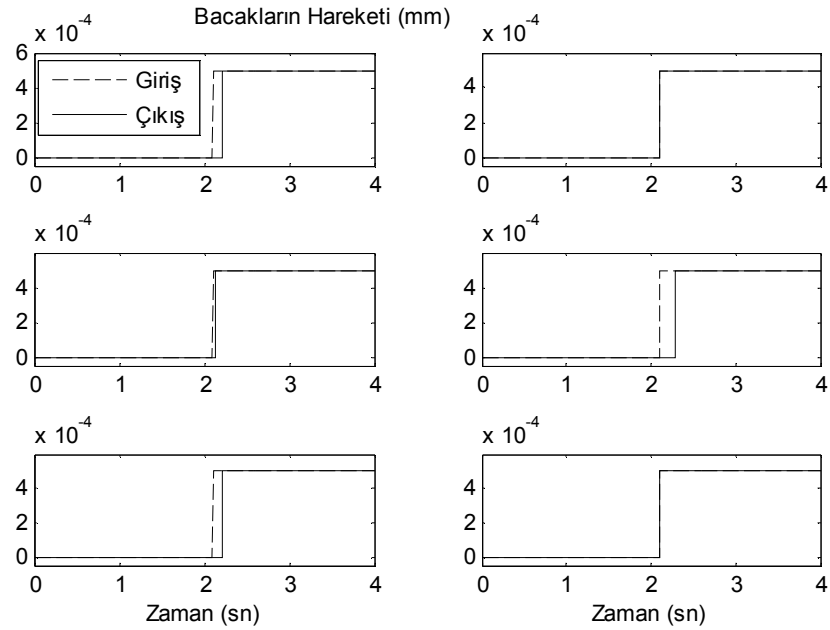


Şekil 4.31. Basamak giriş yanıtı – z ekseni 1 mm



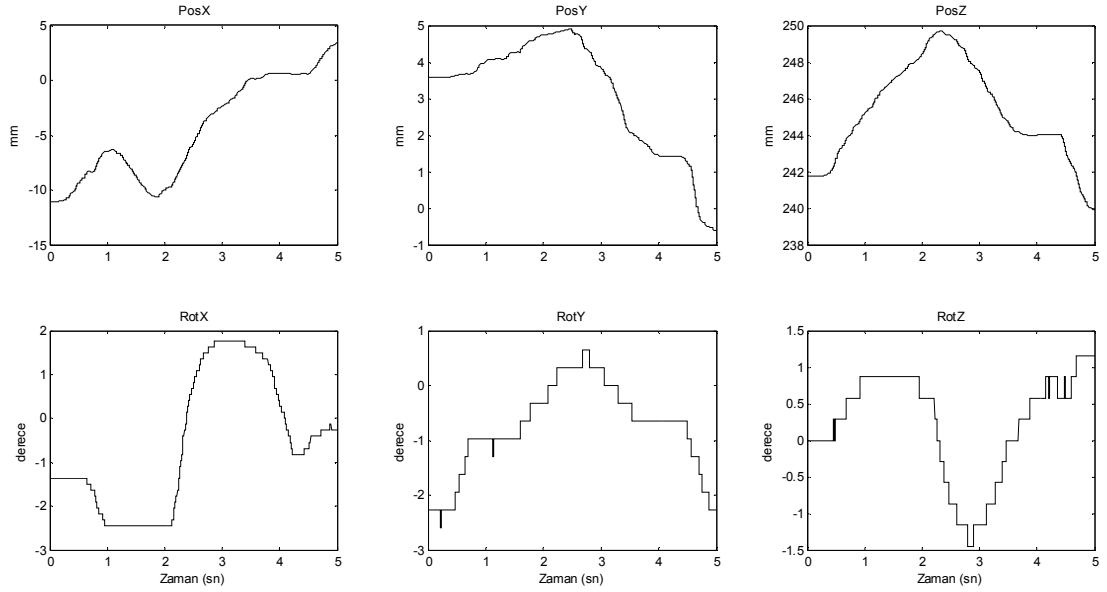
Şekil 4.32. Basamak giriş yanıtı – x eksen 1°

x eksenini boyunca 1° 'lik yönelim girişi ve z ekseninde 500 nm 'lik basamak girişleri sonucunda elde edilen sistem cevapları Şekil 4.32 ve 4.33 ile verilmiştir. Şekillerden görüleceği üzere PID parametreleri hızlı yükselme zamanı, düşük aşım miktarı ve sıfır kalıcı durum hatası elde edilecek biçimde belirlenmiştir. Robot en küçük hareketi olan 500 nm 'lik hareketi z ekseninde gerçekleştirebilmektedir. Denetleyici 500 nm ile 100 mm gibi geniş bir aralıkta çalışmaktadır.

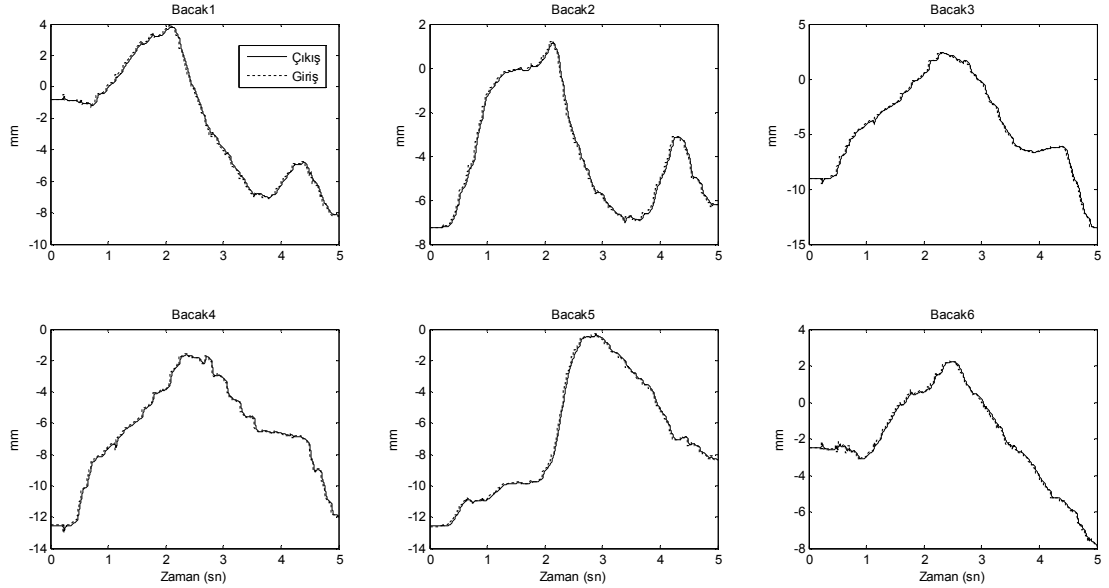


Şekil 4.33. Basamak giriş yanıtı – z eksen 500 nm

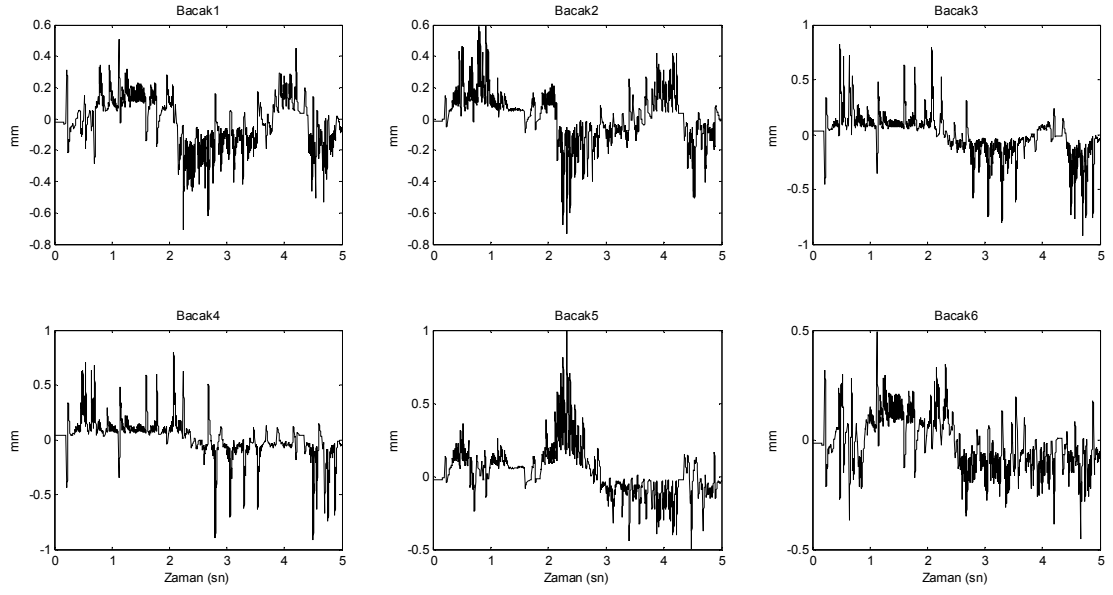
Şekil 4.34 ile Şekil 4.38 arasında sırasıyla, haptik aracılığıyla robota uygulanan altı eksen referans girişi, ters kinematik sonrasında her bir bacak için elde edilen referans girişleri ve kodlayıcılardan ölçülen bacak hareketleri, hareket sırasında oluşan bacak hataları, ölçülen ve haptik tarafından yansıtılan kuvvet değişimleri ve PID denetleyicisi çıkışlarında elde edilen kontrol sinyalleri görülmektedir.



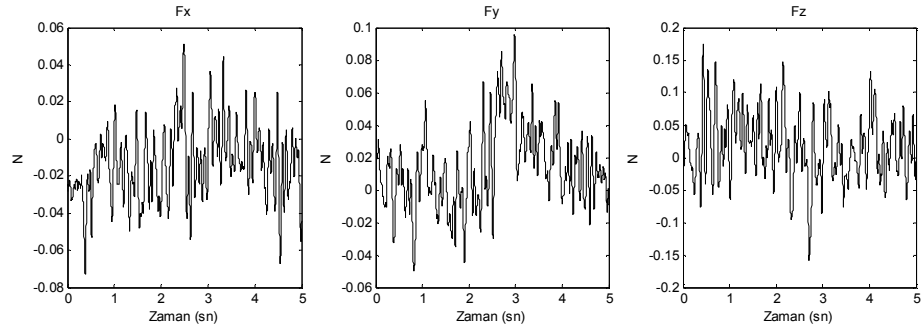
Şekil 4.34. Kartezyen uzayında haptik tarafından uygulanan konum referans girişi



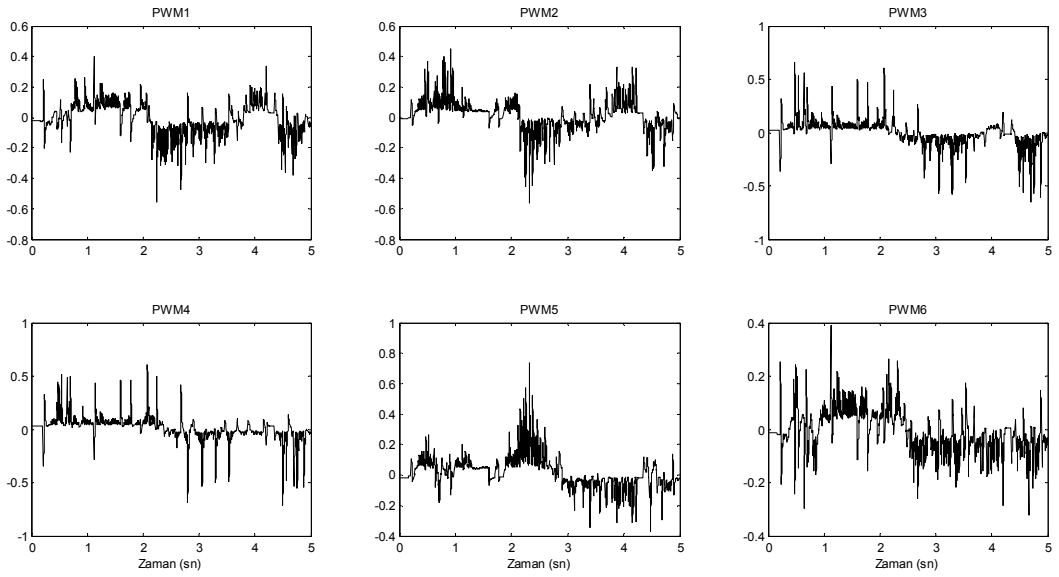
Şekil 4.35. Eklem uzayında giriş ve çıkış - sistem yanıtı



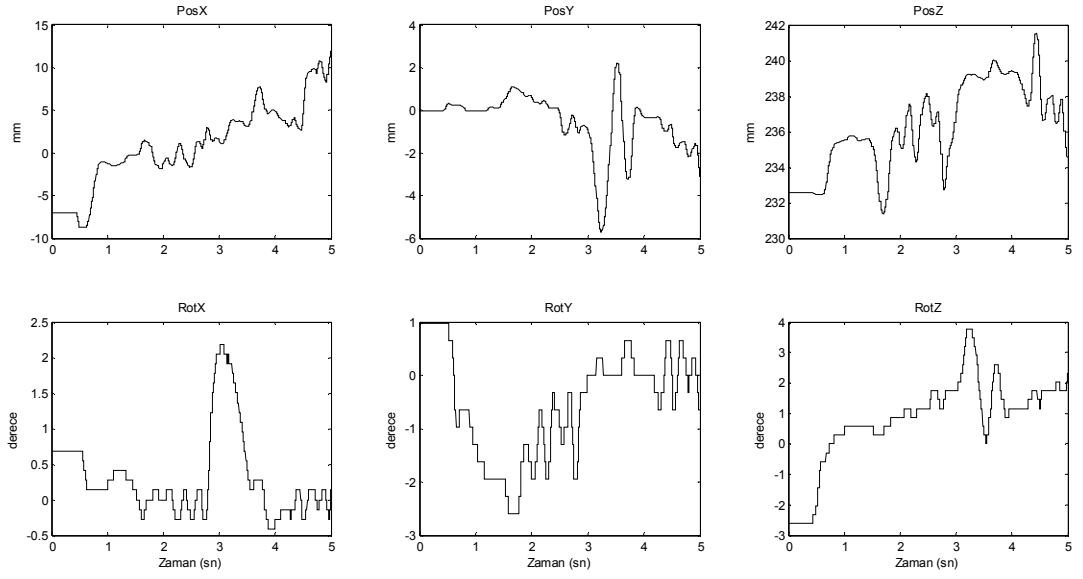
Şekil 4.36. Bacaklarda oluşan hatalar



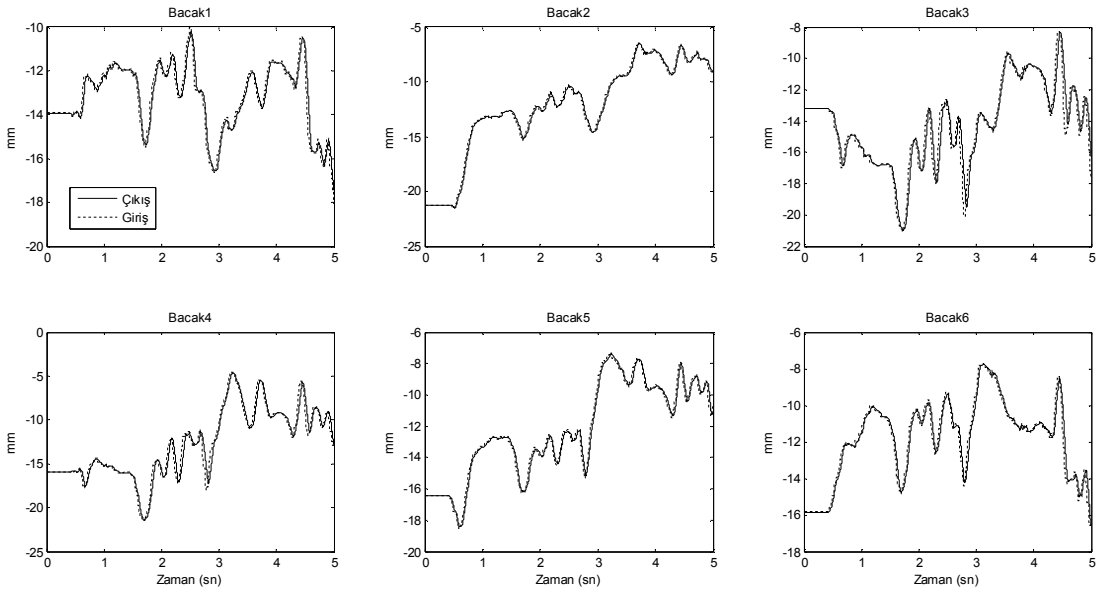
Şekil 4.37. Ölçülen ve yansıtılan kuvvetler



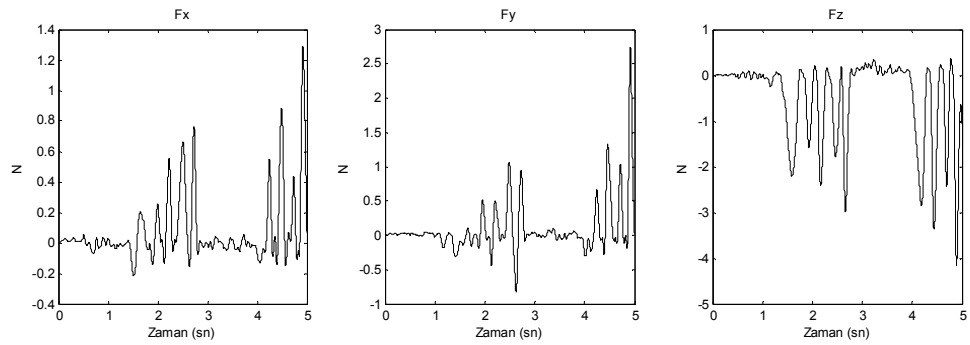
Şekil 4.38. PID çıkışları



Şekil 4.39. Kartezyen uzayında haptik tarafından uygulanan konum referans girişi

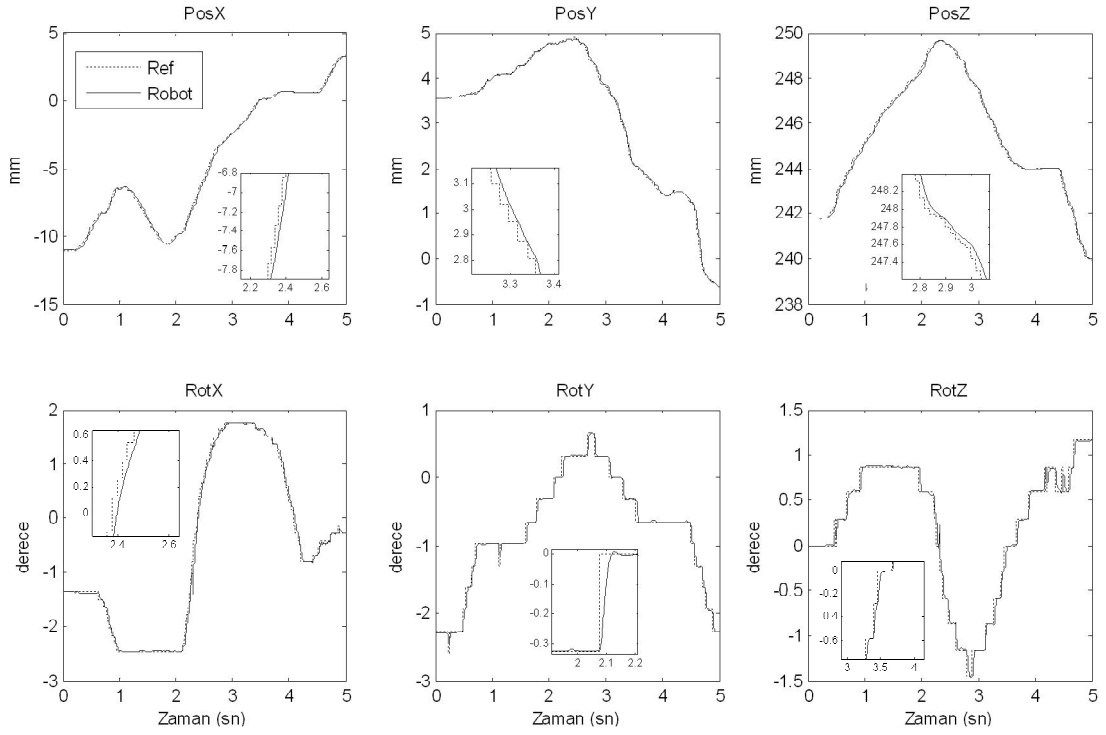


Şekil 4.40. Eklem uzayında giriş ve çıkış - sistem yanıtı

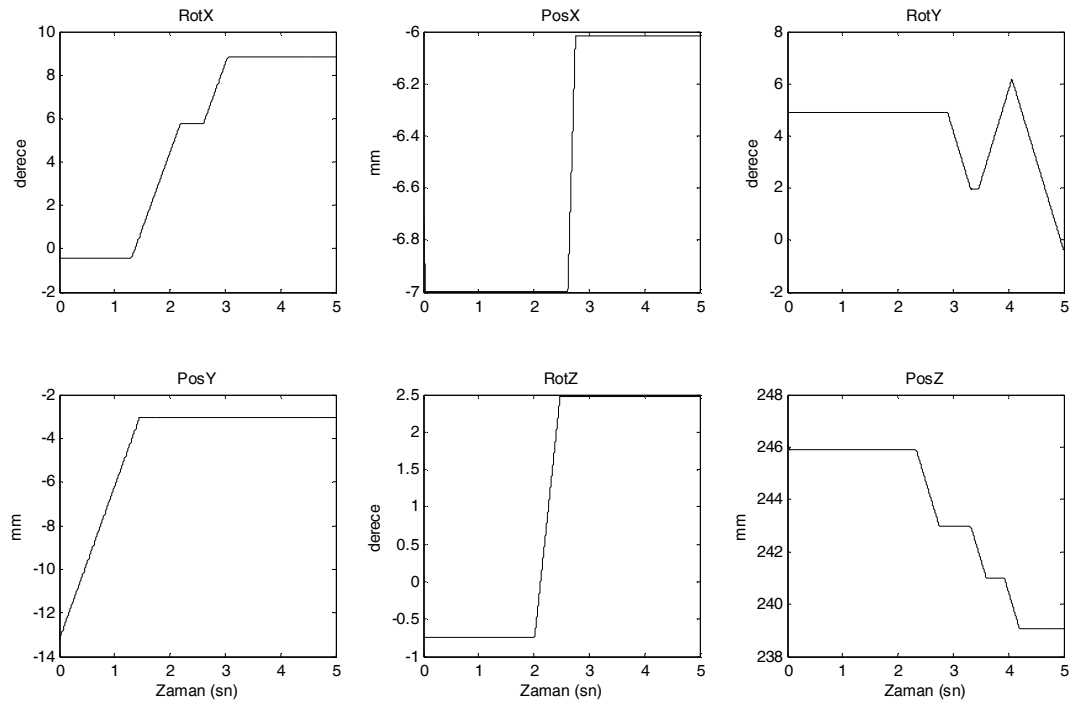


Şekil 4.41. Ölçülen ve yansıtılan kuvvetler

Yukarıda ifade edildiği gibi farklı bir haptik deneyinde elde edilen yanıtlar Şekil 4.39, 4.40 ve 4.41’de görülmektedir. Şekil 4.42’de ise Kartezyen uzayında haptikle uygulanan yörünge ve robot yanıtı verilmiştir.

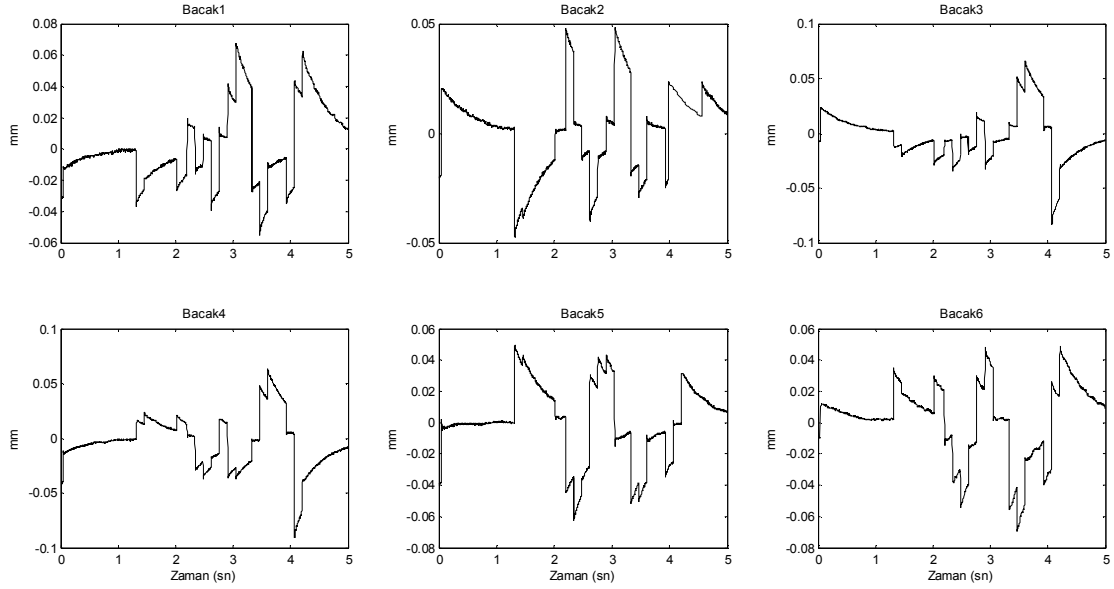


Şekil 4.42. Kartezyen uzayında haptik ile elde edilen giriş ve çıkış – sistem yanıtı

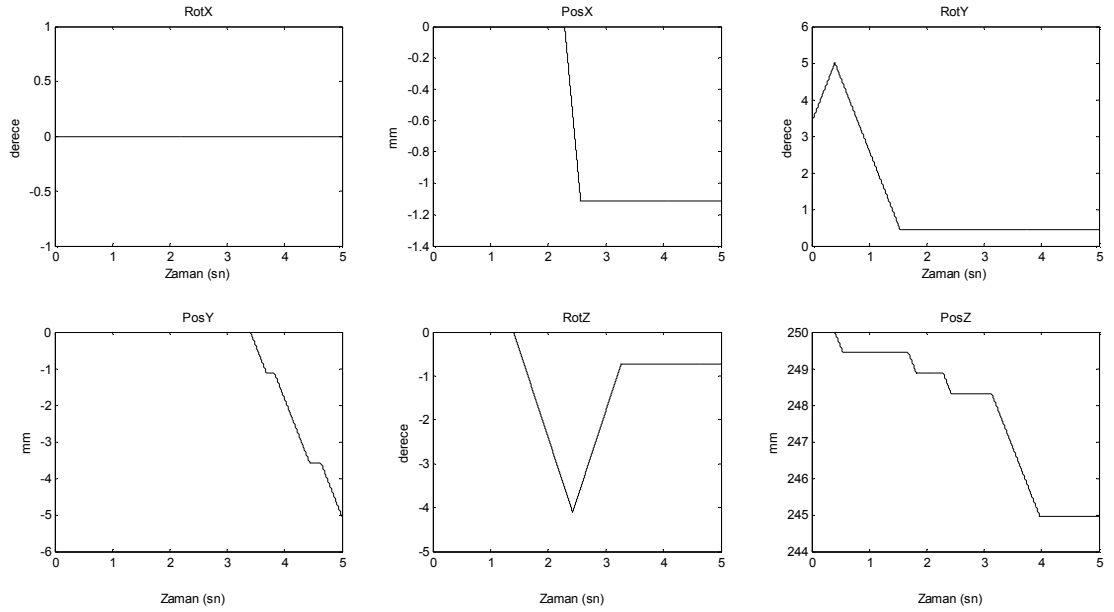


Şekil 4.43. 6 DOF fare ile uygulanan konum referans girişi

Son olarak 6 DOF fare ile robotun kontrolüne yönelik yapılan deneylerden sadece ikisi verilmiştir. Buna göre Şekil 4.43'te fare ile uygulanan referans giriş ve Şekil 4.44'te bacak hataları verilmiştir. Şekil 4.45'te ise fare ile uygulanan diğer referans giriş görülmektedir.



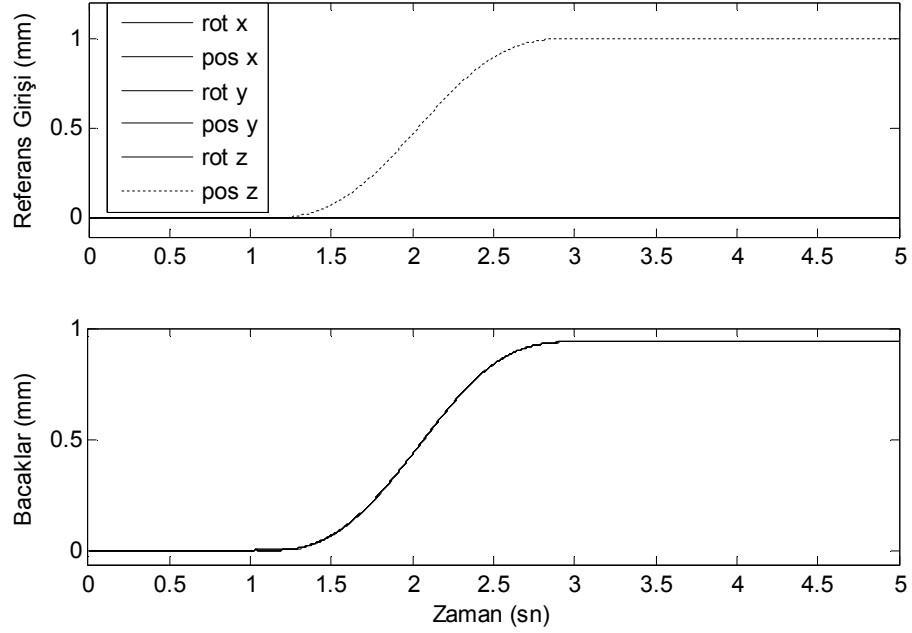
Şekil 4.44. 6 DOF fare ile verilen robot hareketi sırasında oluşan bacak hataları



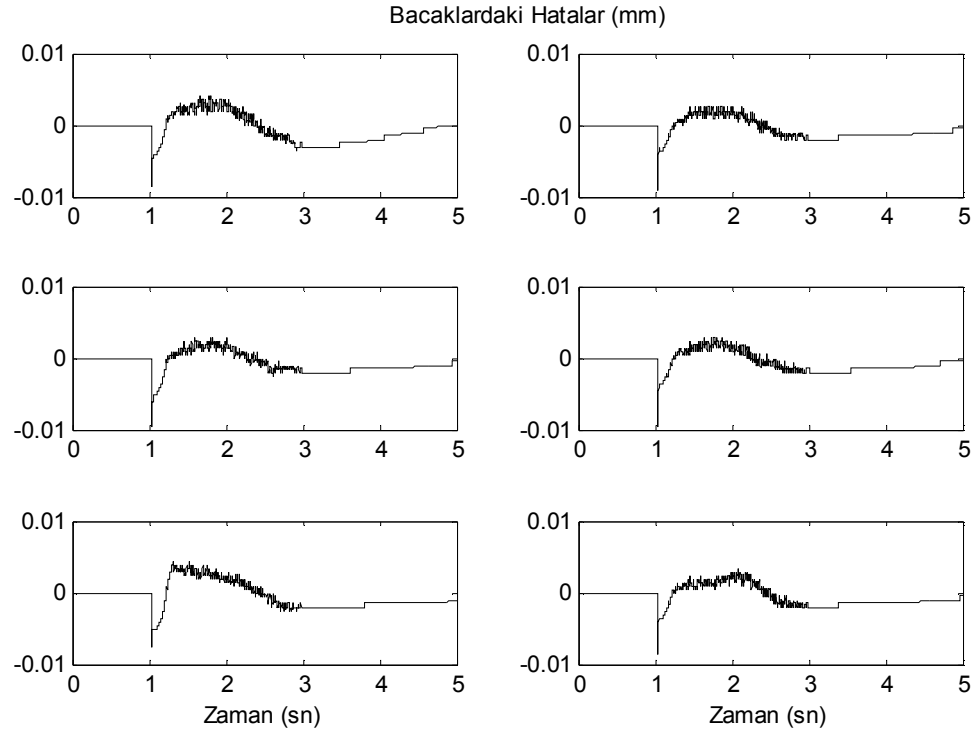
Şekil 4.45. 6 DOF fare ile uygulanan konum referans girişi (deney-2)

Kane geçiş fonksiyonuna bağlı olarak yapılan birçok deneyden bir kısmı aşağıda sırasıyla verilmiştir. Altı eksenle farklı zaman ve farklı genlik değerleri girişleri için

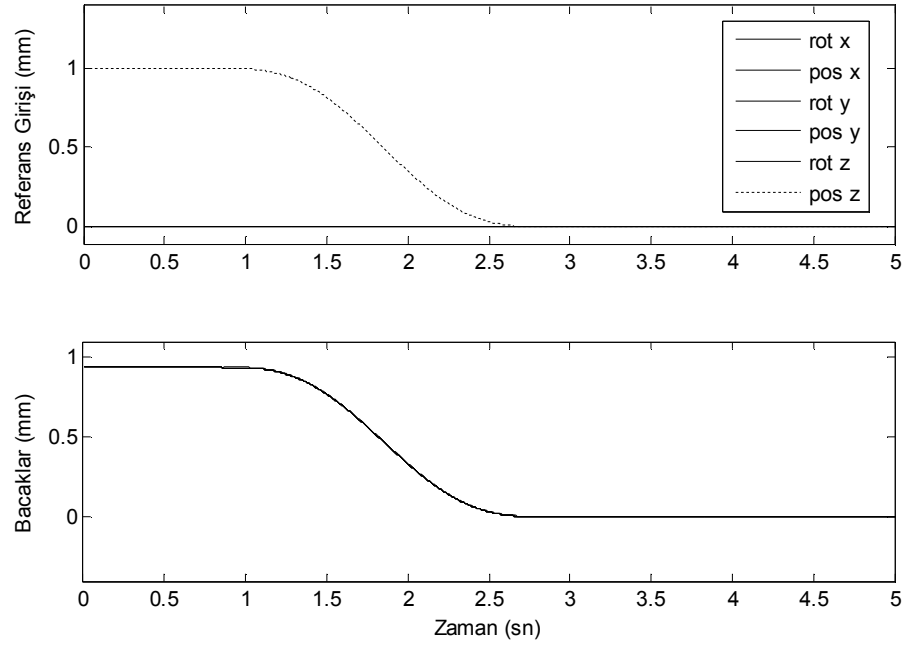
veri toplanmıştır. Aşağıdaki şekillerden görüldüğü gibi yedi deney sonuçlarına göre bacaklar senkron olacak şekilde kontrol edilmiştir.



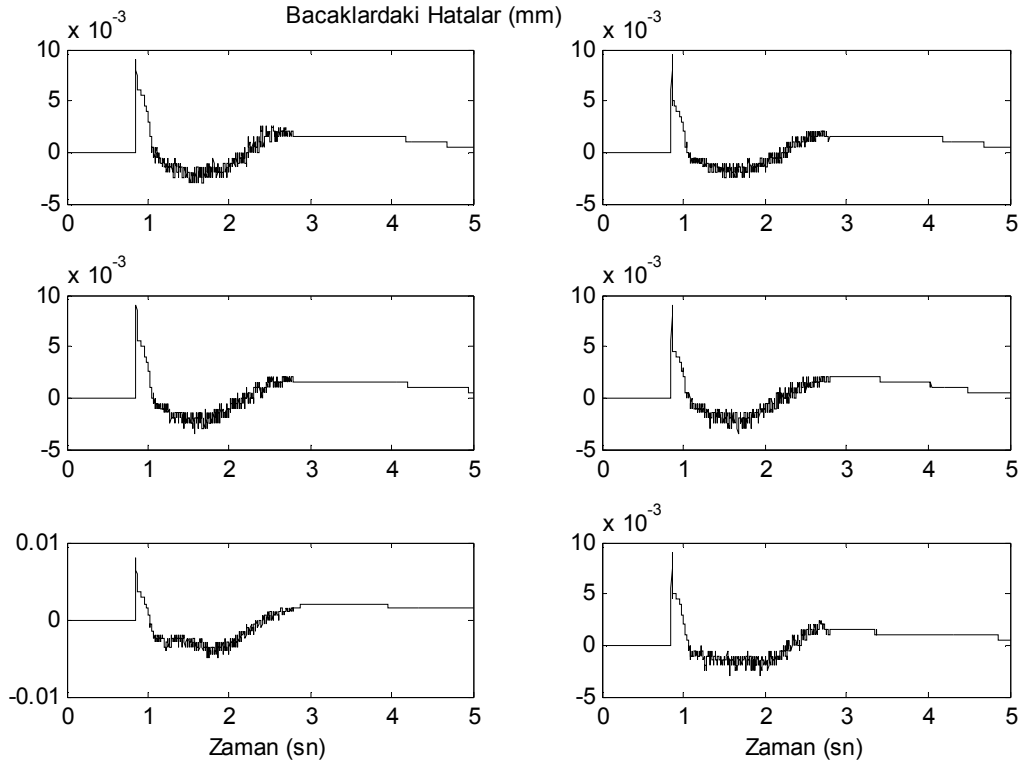
Şekil 4.46. Yörünge takibi (deney-1)



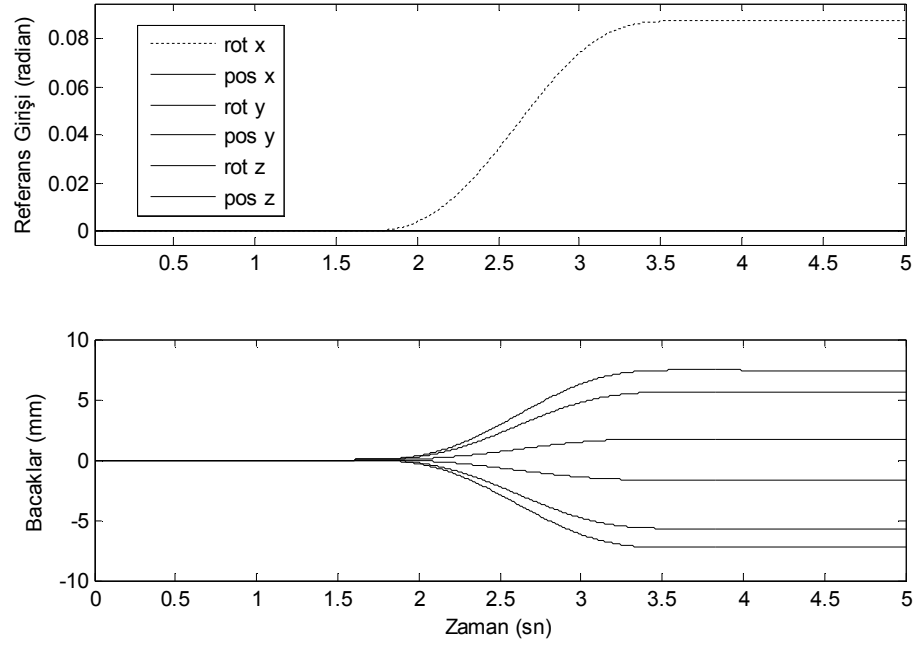
Şekil 4.47. Bacak hataları (deney-1)



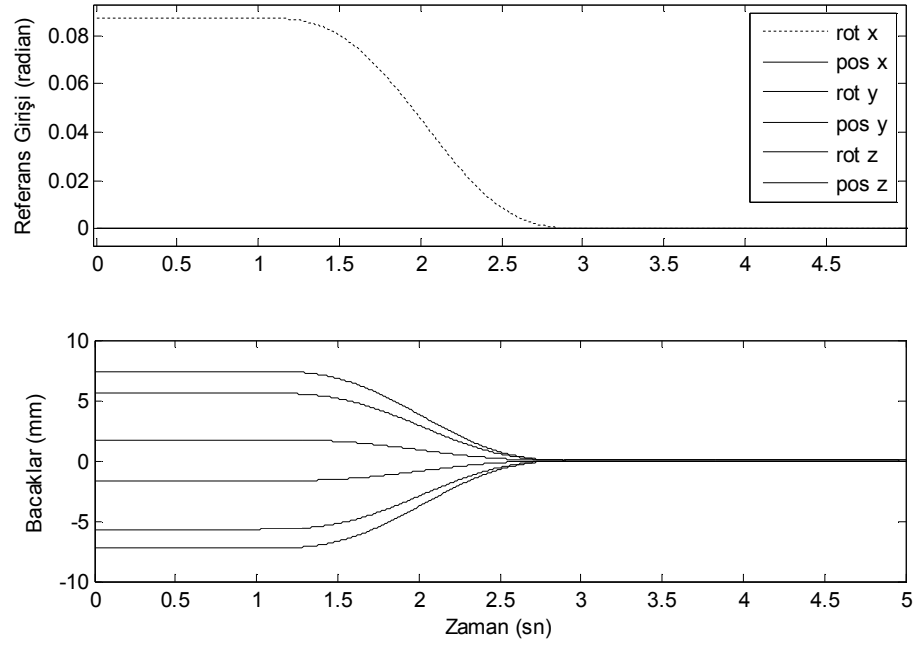
Şekil 4.48. Yörünge takibi (deney-2)



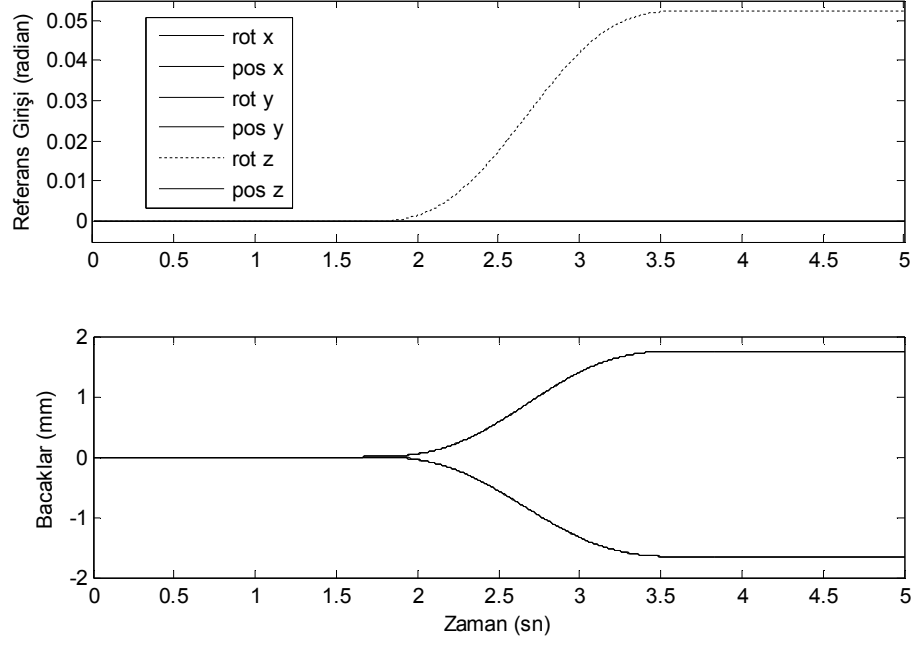
Şekil 4.49. Bacak hataları (deney-2)



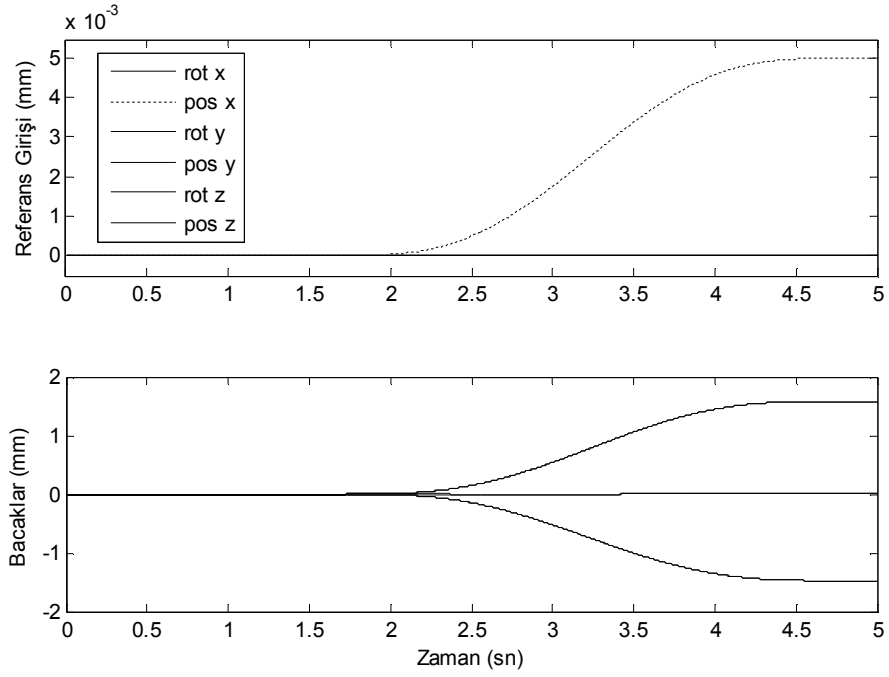
Şekil 4.50. Yörünge takibi (deney-3)



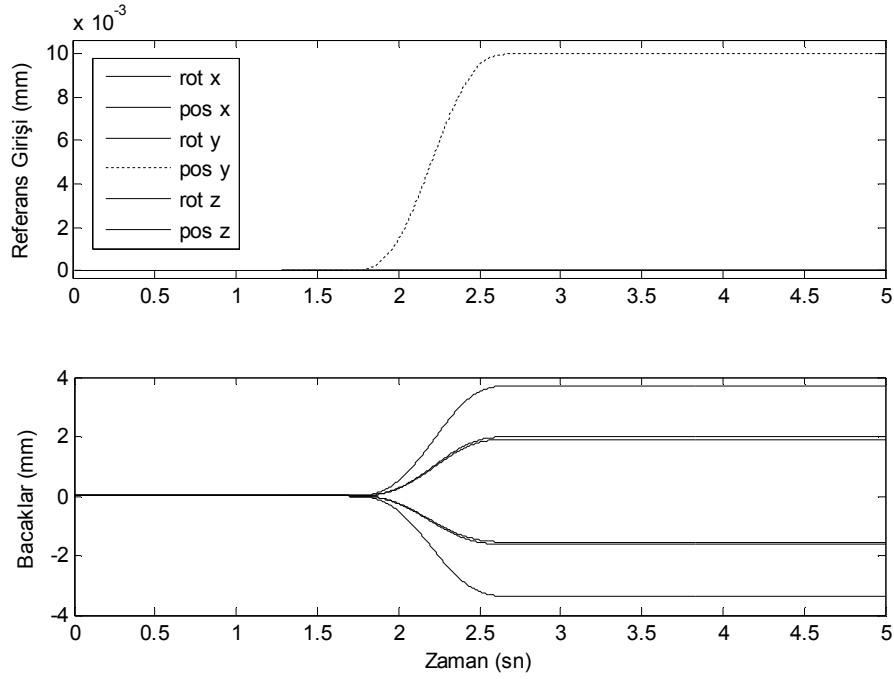
Şekil 4.51. Yörünge takibi (deney-4)



Şekil 4.52. Yörünge takibi (deney-5)



Şekil 4.53. Yörünge takibi (deney-6)

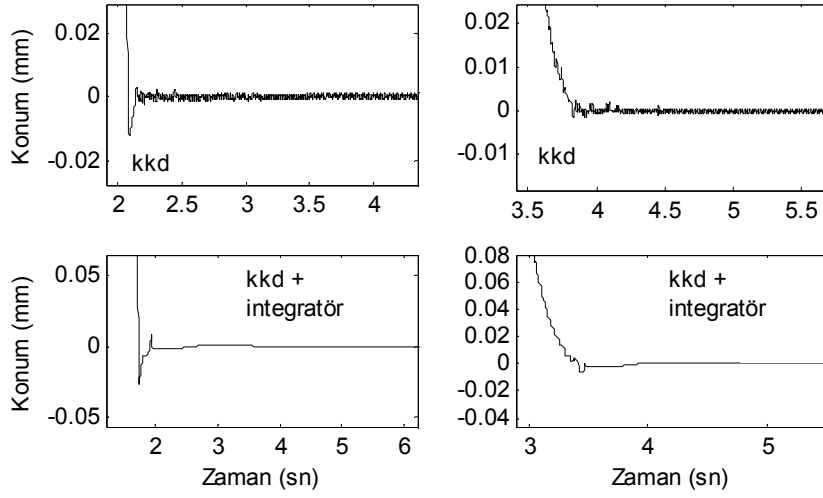


Şekil 4.54. Yörünge takibi (deney-7)

4.3.2. Kayma kipli denetim - deneysel sonuçlar

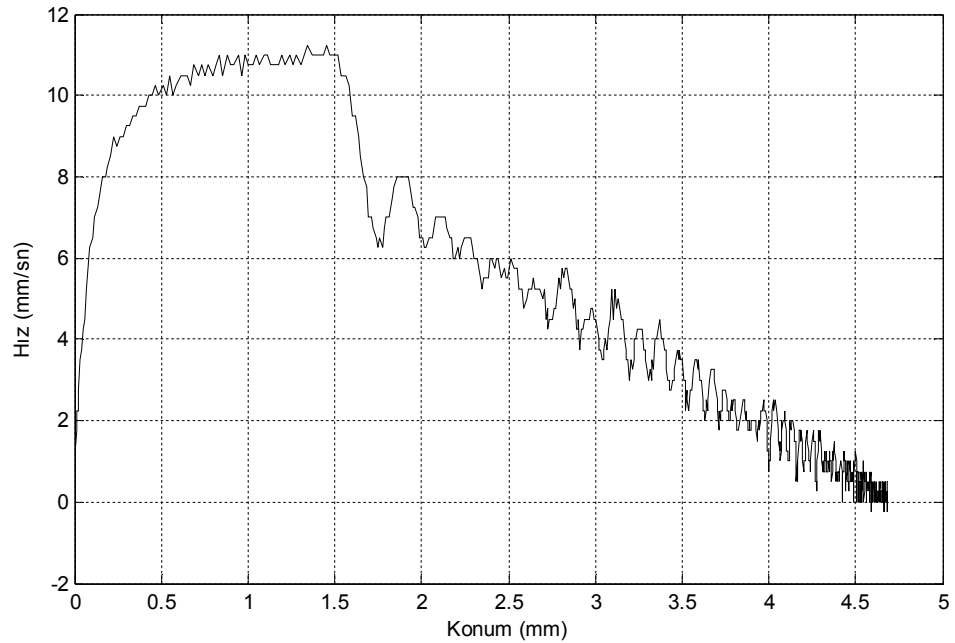
Tüm sistem için geliştirilen denetleyici ana modeli Simulink ortamında tasarlanmıştır. DSPACE DS1103 kartı ile sistemi birbirine entegre eden KKD ana Simulink modeli Şekil 4.55’te görülmektedir. Bu model bazı alt bloklar içermektedir: Leg trajectory, manual giriş, encoder, initial, smc, pwm and sign. Bu alt blokların görevleri sırasıyla: ters kinematik çözümü, düz kinematik girişi, bacak uzunluklarının ölçümü, başlatım yordamı, kayma kipli denetim, PWM ve yön çıkış sinyallerinin üretilmesidir.

Şekil 4.56’da ise ana modelde görülen “smc” alt modeli ile her bir bacağa uygulanan kayan kipli denetim ve integratör algoritması görülmektedir. Çatırdama düzeyini düşürmek için rate limiter bloğu eklenmiştir. Kalıcı durum hatasının yok edilmesi için ise şekilden görüldüğü gibi integratör eklenmiştir. Kayma kipli denetleyici performansını etkilememesi ve sistem cevabını yavaşlatmaması için integratör anahtarlanarak ± 0.008 mm aralığında devreye girmektedir. Ayrıca yörünge takibi sırasında integratör devre dışı bırakılmaktadır.



Şekil 4.57. KKD ve KKD+integratör motor cevabı

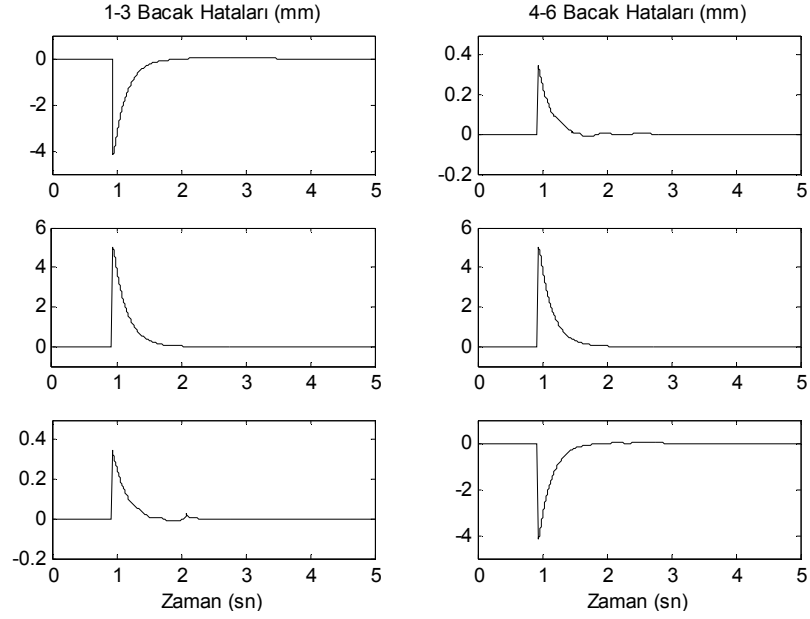
Aşağıda ise tasarlanan denetleyiciye ilişkin sistemden elde edilen sonuçlara bağlı olarak çizdirilen faz diyagramı gösterilmektedir. Sisteme z ekseninde 5 mm'lik basamak girişi uygulandığında, durumlar kayma hattını yakalamış ve kayma hattı boyunca istenen konumlarına gitmektedir.



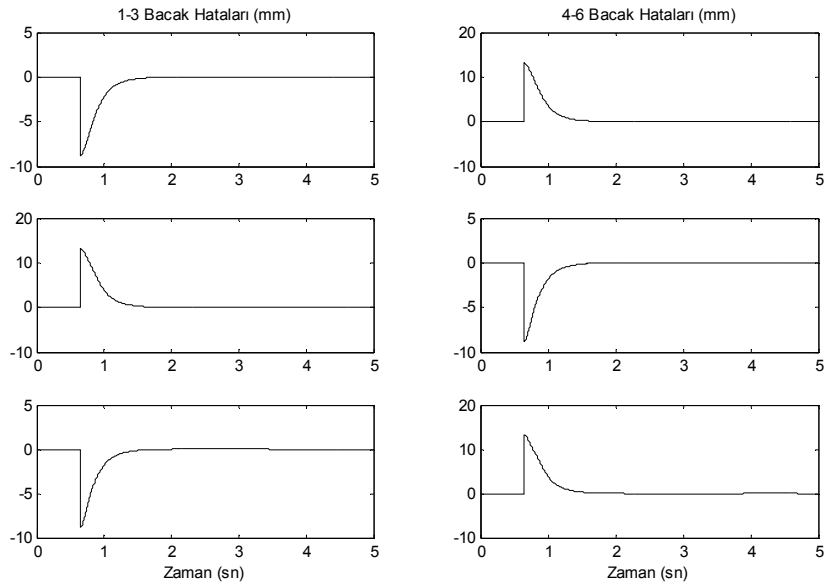
Şekil 4.58. 5 mm'lik basamak girişi sonucunda elde edilen faz diyagramı

Konum ve yönelim deneylerinden bazıları aşağıda verilmiştir. Buna göre Şekil 4.59'da üst platformun x ekseninde 15 mm'lik doğrusal ve Şekil 4.60'da z ekseninde

20°'lik dönme basamak girişlerine karşılık elde edilen bacak konum hataları görülmektedir.

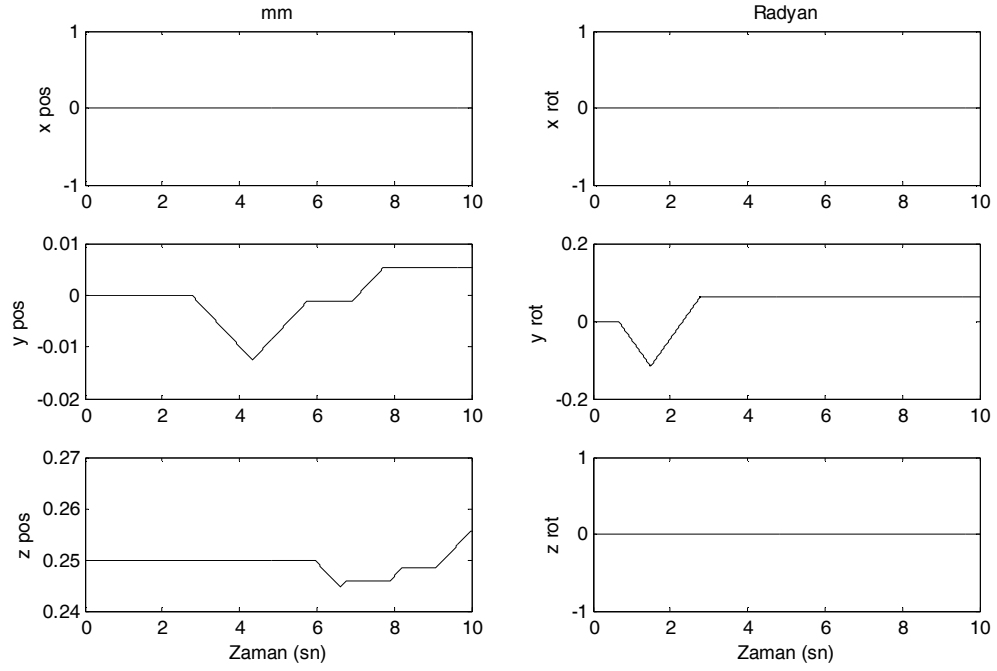


Şekil 4.59. x yönünde 15 mm'lik doğrusal hareket

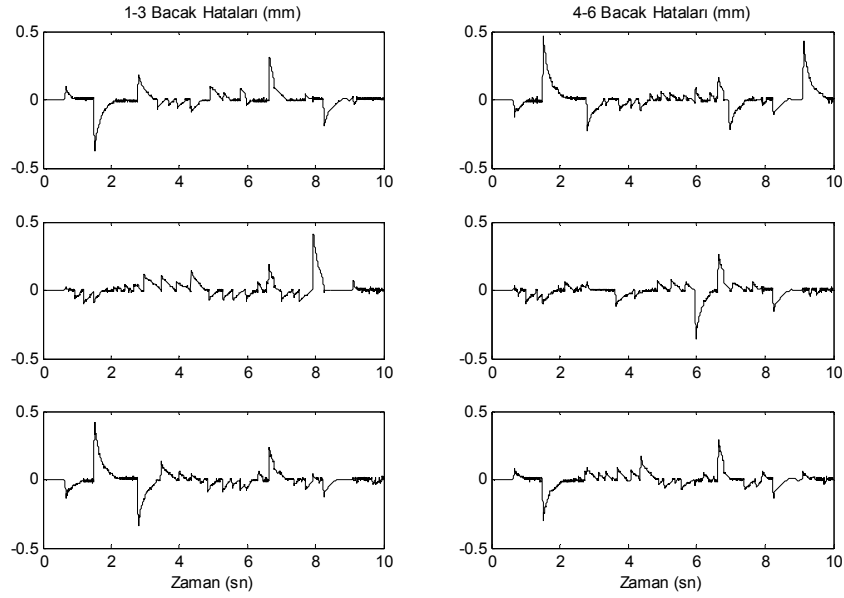


Şekil 4.60. z yönünde 20°'lik dönme

Robot 6 serbestlik dereceli bir uzaysal fare aracılığıyla da hareket ettirilebilmektedir. Şekil 4.61'de 10 sn boyunca fare ile uygulanan referans girişleri görülmektedir. Şekil 4.62'de ise bu girişe karşılık bacak konum hataları görülmektedir. SP, farenin hassasiyeti değiştirilerek μm ve mm 'lik aralıklarla hareket ettirilebilir.

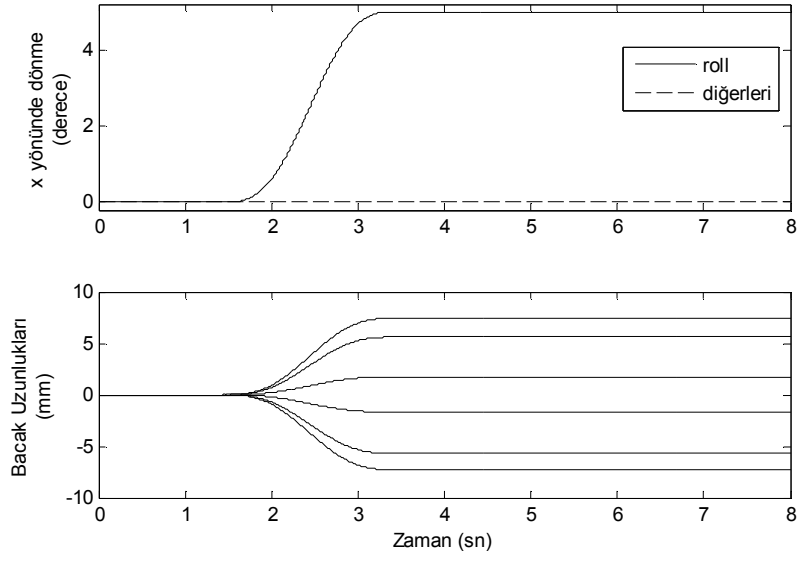


Şekil 4.61. 6 DOF fare ile referans girişi

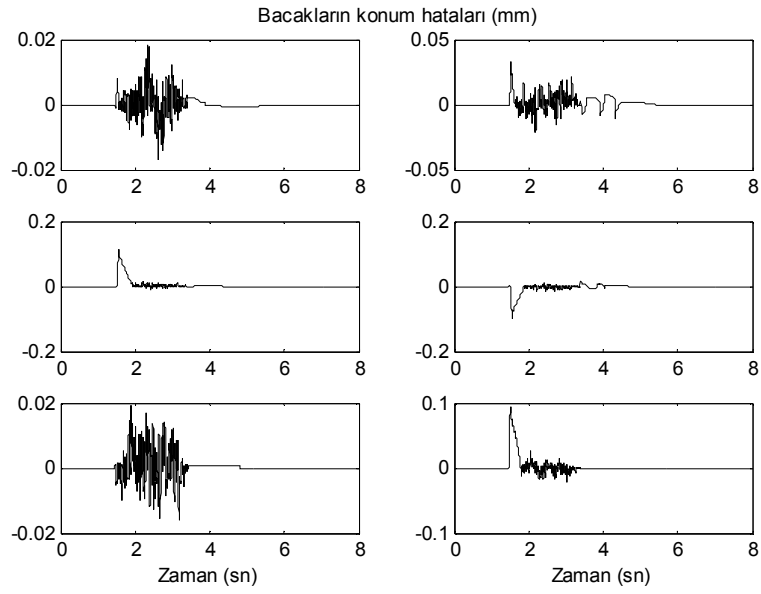


Şekil 62. Yukarıda verilen referans girişi sonucunda elde edilen bacak hataları

Kane geçiş fonksiyonuna göre robotun bulunduğu konumdan istenilen konum ve yönelime istenilen süre içerisinde ulaştırılmasını sağlayan yörünge üretilmektedir. Şekil 4.63'te x ekseninde 5° 'lik dönme için uygulanan yörünge ve bacakların eşzamanlı hareketleri görülmektedir. Şekil 4.64'te ise bu yörünge takibi sırasında bacaklarda oluşan hata miktarları görülmektedir.

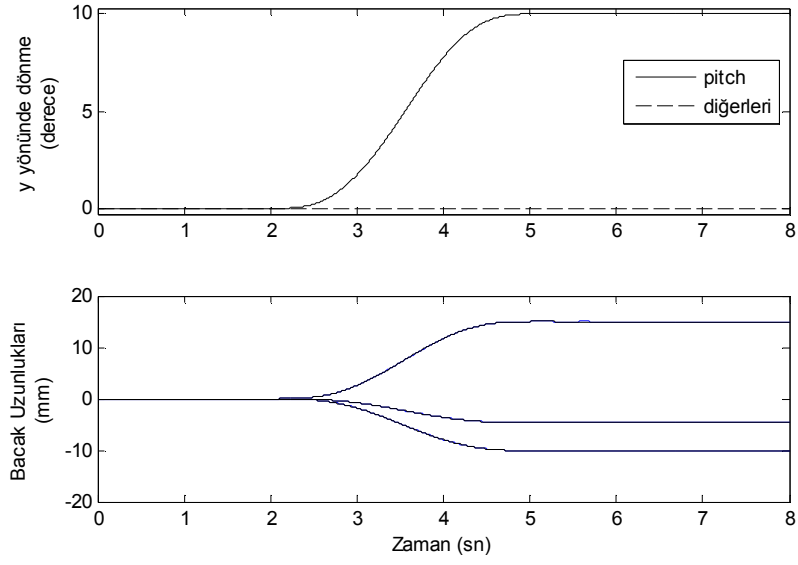


Şekil 4.63. x yönünde dönme

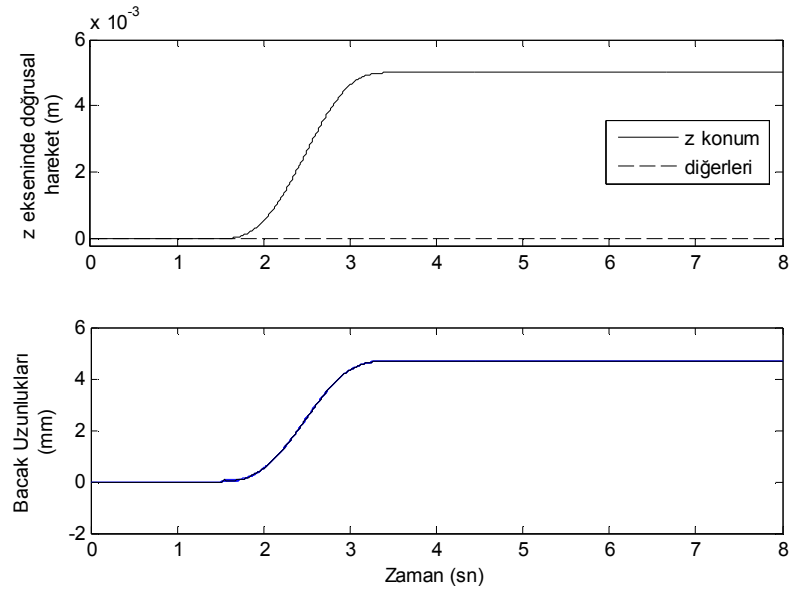


Şekil 4.64. Üstte verilen yörünge için bacaklarda oluşan hatalar

Şekil 4.65 ve 4.66’da y ekseninde 10° ’lik dönme ve z ekseninde 5 mm’lik doğrusal hareket için uygulanan yörüngeler ve bacakların eşzamanlı hareketleri görülmektedir.



Şekil 4.65. y yönünde dönme

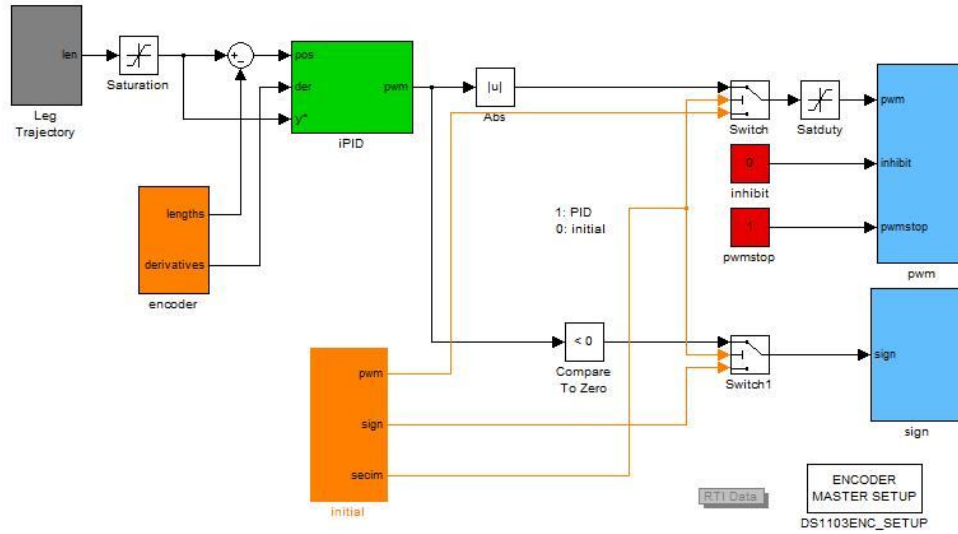


Şekil 4.66. z yönünde doğrusal hareket

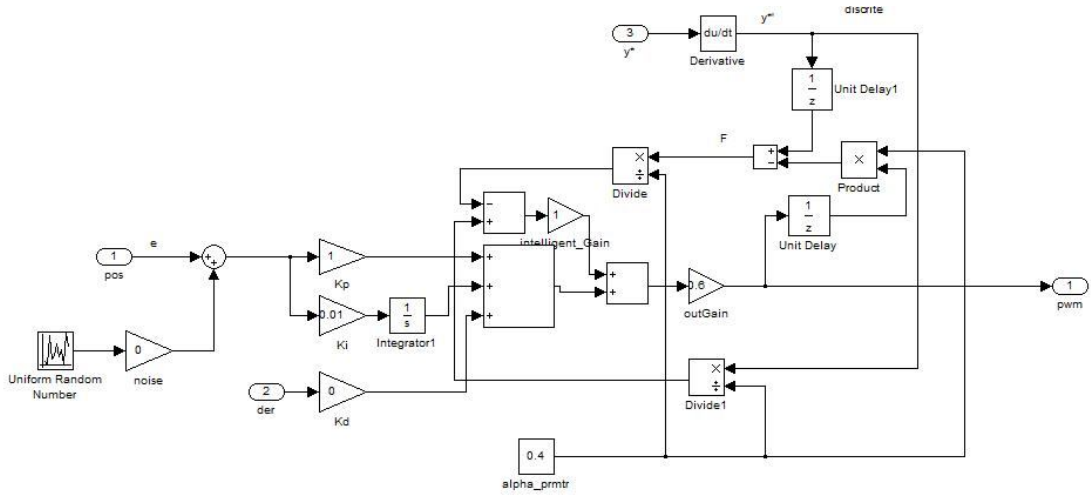
4.3.3. Akıllı PI denetim - deneysel sonuçlar

Akıllı PI denetimin doğası gereği yörünge takibinde daha iyi bir performans göstermesi açıktır. Bu nedenle akıllı PI denetleyicisi özellikle yörünge takibindeki hataları minimize etmek için uygulanmıştır. Bunun için, öncelikle Simulink ortamında denetleyici tasarımı yapılmıştır. Şekil 4.67’de akıllı PI denetleyici ana

modeli görülmektedir. Ana model daha önce açıklanan alt bloklardan oluşmaktadır. Modelde yalnızca denetleyici alt modeli değiştirilmiştir ve Şekil 4.68’de verilmiştir.

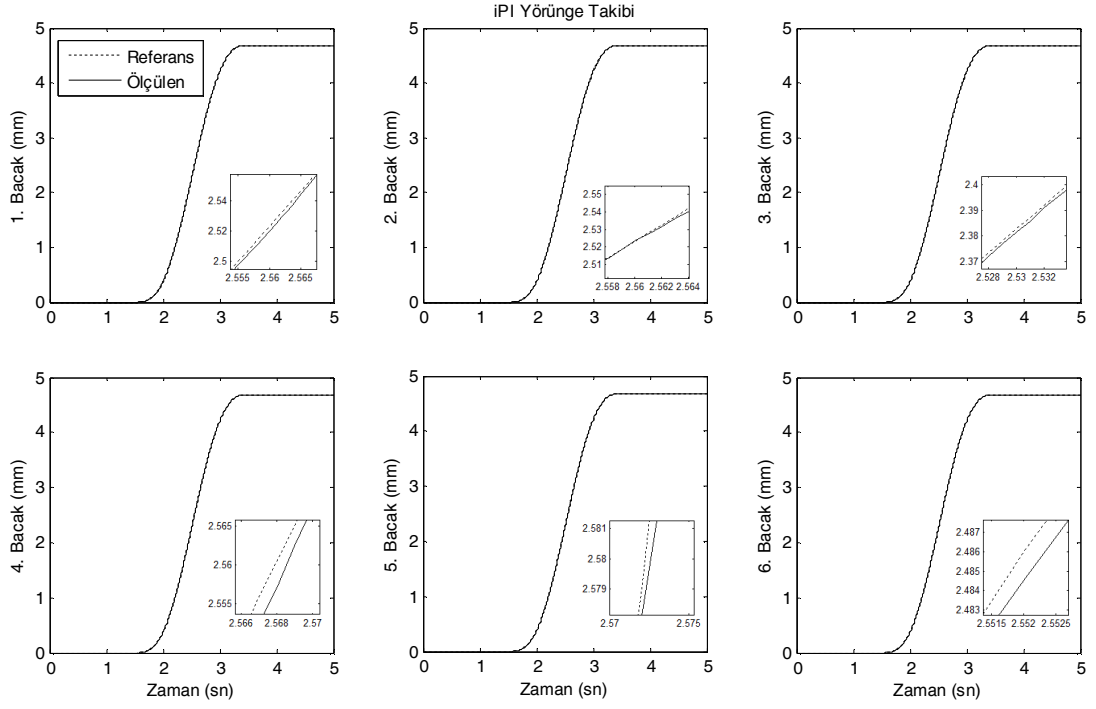


Şekil 4.67. Akıllı PI denetim ana modeli

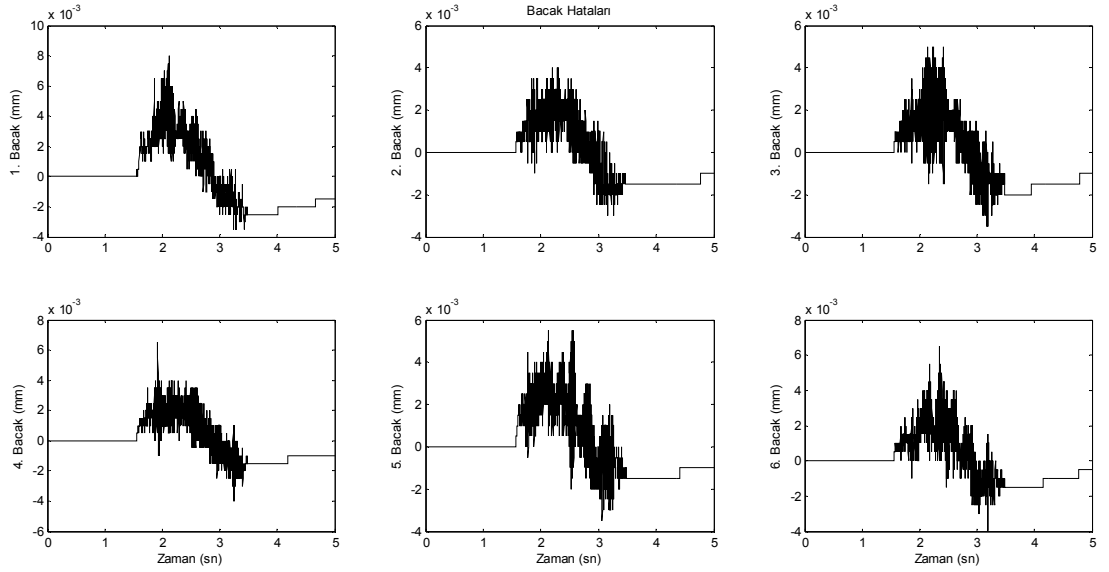


Şekil 4.68. iPID alt modeli

Şekil 4.69’da z ekseninde 5 mm’lik ve 2 sn süreli yörünge takibi deneyi için eklem uzayındaki referans ve elde edilen yanıtlar görülmektedir. Ayrıca, hataların daha net görülebilmesi için belli noktaların büyütülmüş durumları şekil üzerinde yer almaktadır. Şekil 4.70’de ise bu yörünge takibi sırasında oluşan bacak hataları görülmektedir. Şekil incelendiğinde, maksimum anlık hatanın bacak1 için 8 μm , diğer bacaklar içinse 6 μm olduğu görülmektedir. Bunun nedeniyse bacak1’deki arıza durumudur.

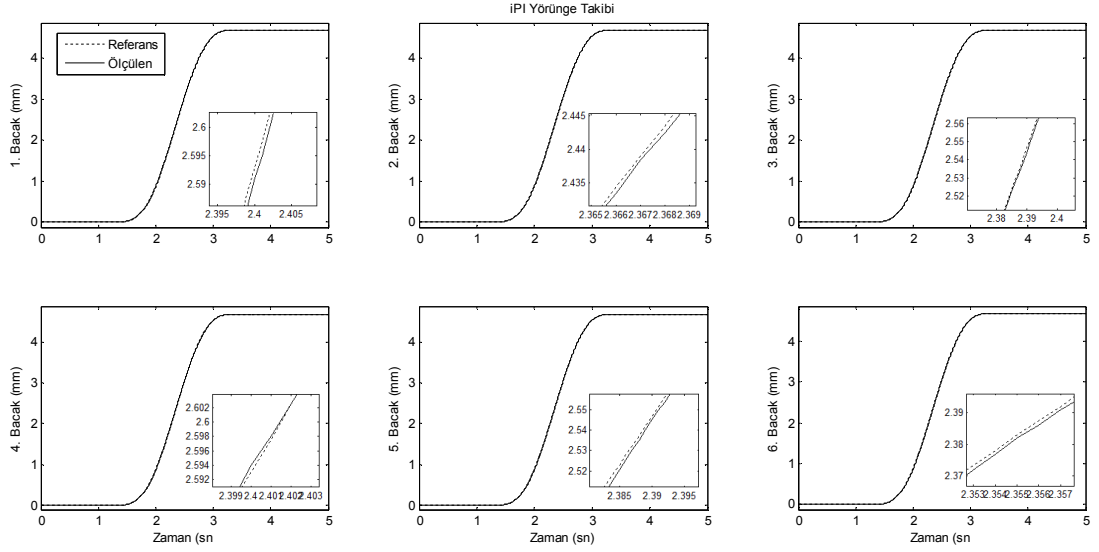


Şekil 4.69. Akıllı PI denetim (deney-1)

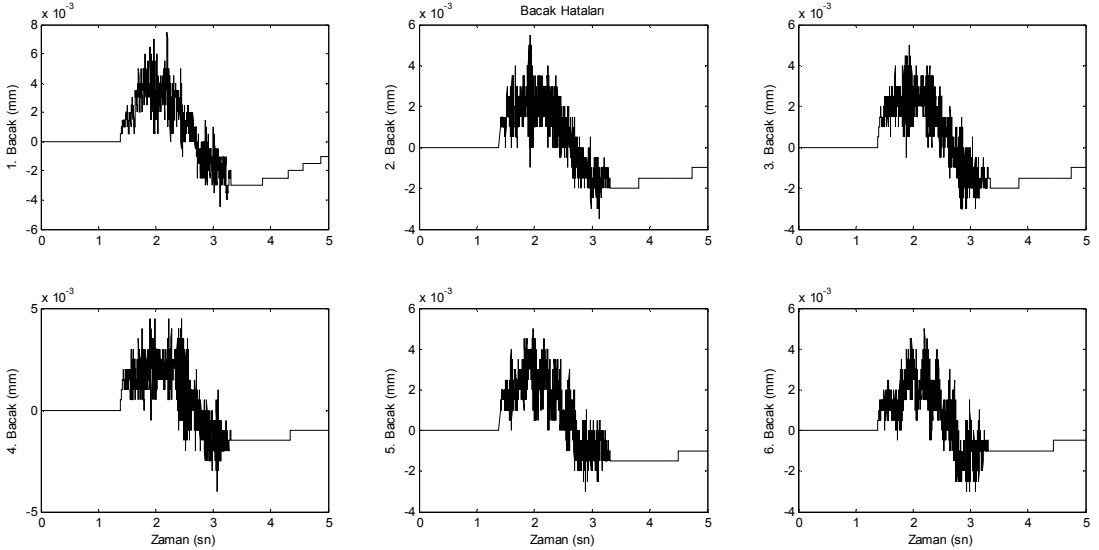


Şekil 4.70. Deney-1 sırasında oluşan bacak hataları

Şekil 4.71’de z ekseninde 5 mm’lik ve 2 sn süreli yörünge takibi deneyi ve farklı denetleyici parametreleri için eklem uzayındaki referans ve elde edilen yanıtlar görülmektedir. Şekil 4.72’de ise bu yörünge takibi sırasında oluşan bacak hataları görülmektedir. Şekil incelendiğinde, maksimum anlık hatanın bacak1 için 8 μm , diğer bacaklar içinse 6 μm olduğu görülmektedir.

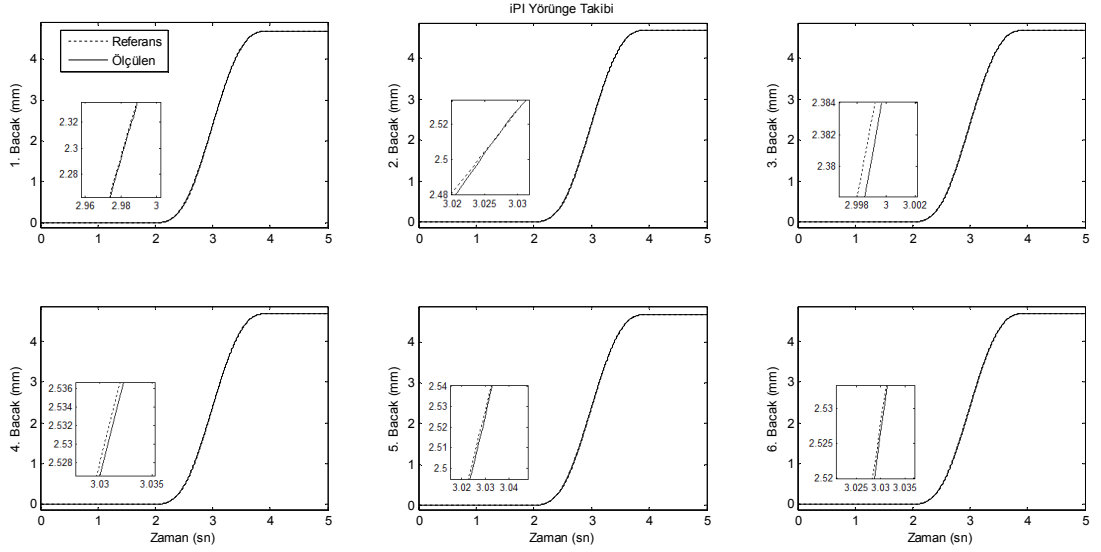


Şekil 4.71. Akıllı PI denetim (deney-2)

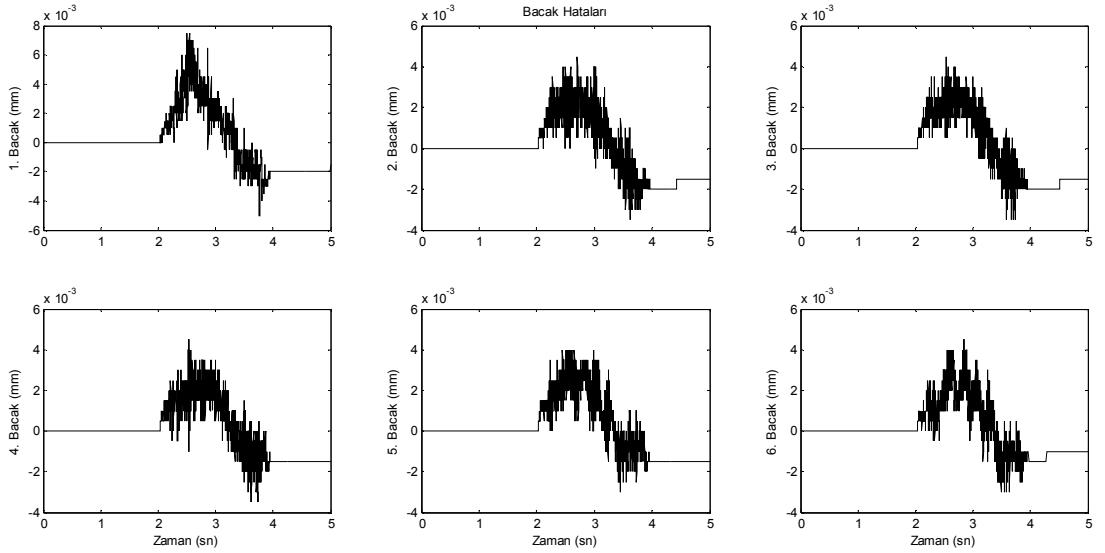


Şekil 4.72. Deney-2 sırasında oluşan bacak hataları

Şekil 4.73'te z ekseninde 5 mm'lik ve 2 sn süreli yörünge takibi deneyi ve farklı denetleyici parametreleri için eklem uzayındaki referans ve elde edilen yanıtlar görülmektedir. Ayrıca, hataların daha net görülebilmesi için belli noktaların büyütülmüş durumları şekil üzerinde yer almaktadır. Şekil 4.74'te ise bu yörünge takibi sırasında oluşan bacak hataları görülmektedir. Şekil incelendiğinde, maksimum anlık hatanın bacak1 için 8 μm , diğer bacaklar içinse 4 μm olduğu görülmektedir.



Şekil 4.73. Akıllı PI denetim (deney-3)



Şekil 4.74. Deney-3 sırasında oluşan bacak hataları

Tablo 4.1’de ise akıllı PI denetim deneylerinde kullanılan denetleyici parametreleri, toplam RMS hata, toplam kontrol eforu ve her bir bacak için hesaplanan RMS hata değerleri verilmiştir. Ayrıca, akıllı PI ile PID denetleyicilerini karşılaştırmak için aynı şartlar altında elde edilen PID sonucu da tabloda yer almaktadır. Buna göre, akıllı PI denetleyicisinin PID’ye göre seçilen tüm parametreler için daha iyi cevap verdiği görülmektedir.

Tablo 4.1. Akıllı PI denetim deney parametreleri ve maliyetleri

Deney No	Parametre	Toplam Hata	Kontrol	Bacak1	Bacak2	Bacak3	Bacak4	Bacak5	Bacak6
1	$\alpha:2$ Fkazancı: 0.1 Kp:10 Ki:20	0.0086	0.2722	0.0020	0.0013	0.0014	0.0013	0.0014	0.0013
2	$\alpha:2$ Fkazancı: 0.02 Kp:10 Ki:20	0.0091	0.2723	0.0021	0.0015	0.0015	0.0014	0.0015	0.0012
3	$\alpha:0.4$ Fkazancı: 0.02 Kp:10 Ki:20	0.0084	0.2822	0.0019	0.0014	0.0014	0.0012	0.0013	0.0012
4	Kp:10 Ki:20 Kd:0.006	0.0102	0.2799	0.0017	0.0017	0.0016	0.0023	0.0015	0.0013

5. KUVVET KONTROLÜ

Robot kontrolü genel olarak konum ve kuvvet olmak üzere ikiye ayrılabilir. Robotların konum kontrolü temel ve öncelikli olsa da kuvvet kontrolü ve robotun farklı ortamlarla yapacağı etkileşim (temas, çarpışma) kontrolünün önemi günümüzde giderek artmaktadır. Taşlama (grinding), çapak alma (deburring), parlatma (polishing), montaj, kontur-takibi ve cerrahi gibi robotik uygulamalarda bazı görevler için kuvvet kontrolüne ihtiyaç duyulmaktadır. Robot kuvvet kontrolü için bazı temel yöntemler geliştirilmiştir. Bunlar, sertlik (stiffness) [68], empedans [69], admitans, melez konum / kuvvet, melez empedans, paralel konum / kuvvet, saf kuvvet kontrolü [70, 71] ve hesaplanmış tork kontrol [33] yöntemleri olarak sıralanabilir. Bunların dışında, bulanık [72], uyarlamalı [73], gürbüz [74], görü tabanlı [75] ve öğrenen algoritma [76] yöntemleri de geliştirilmiştir.

Bulanık mantık eğer / öyleyse (if / then) kurallarına bağlı olarak insan karar verme ve muhakeme yeteneklerini taklit etmeye izin veren bir yöntemdir. Bulanık küme teorisi 1965 yılında ilk ortaya çıkışından bu yana kontrol mühendisliği alanında kullanılmaktadır. Bir çıkarsama sistemi, giriş ve çıkış üyelik fonksiyonları, bilgi bankası, bulandırma, çıkarsama motoru ve durulama kısımlarından oluşur. Böylece, bir bulanık çıkarsama sistemi girişiyle çıkışı arasında doğrusal olmayan bir eşleme sağlar [77].

Bu bölümde konum kontrollü bir Stewart Platformu'nun empedans / kuvvet kontrolü için yeni, basit ve efektif bir yöntem sunulmaktadır. SP kontrolü üç kısma ayrılabilir: i) serbest uzayda konum kontrolü, ii) etkileşim kontrolü ve iii) kuvvet kontrolü. SP'nin konum kontrolü ters kinematiki sonucunda elde edilen bacak boylarının denetlenmesiyle yapılmaktadır. Bacak boylarının kontrolü 4. bölümde ele alınmıştır. Robot uç işlevcisinin herhangi bir cisimle girdiği etkileşim kontrolü ise empedans yöntemiyle yapılmaktadır. Empedans yöntemi Hogan [69] tarafından geliştirilmiş bir yöntemdir ve robotla cisim arasındaki mekanik empedansın regüle edilmesini amaçlamaktadır. Robotla cisim arasındaki mekanik empedans ise ikinci dereceden

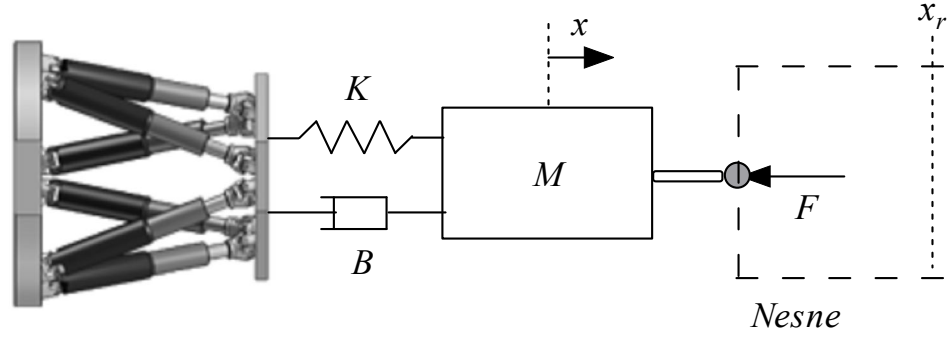
bir sistem olan kütle-yay-damper sistemiyle ifade edilmektedir. Bu ilişki kuvvet ile robot konumu arasında bir empedans filtresiyle ifade edilebilir. Bu filtrenin kazancıysa bir bulanık denetleyici tarafından ayarlanmaktadır. Son olarak robotun kuvvet kontrolü aynı bulanık denetleyiciyle kontrol edilmektedir.

Literatürde SP'nin empedans kontrolüyle ilgili çok fazla çalışma bulunmamaktadır. Çalışmalar daha ziyade seri robotlar üzerinde yoğunlaşmıştır. Ömürlü ve Yıldız [68] çalışmalarında 3x3 bağlantılı bir SP'nin kuvvet / tork geribeslemeli katılık kontrolüne dair çeşitli denetleyici yapılarını karşılaştırarak deneysel sonuçlar sunmuşlardır. Önerdikleri paralel bağlı PD ve kazanç ayarlamalı bulanık PD denetleyicisinin bulanık, PD, ve kazanç ayarlamalı bulanık PD denetleyicilerinden daha iyi performans sergilediğini göstermişlerdir. Davliakos ve Papadopoulos [78] elektro-hidrolik bir SP'nin model tabanlı empedans kontrolüyle ilgili çalışmalarında, tork tabanlı empedans kontrol yöntemini eklem uzayında gerçekleştirmişler ve etkileşim kontrolü için empedans kontrolün PD denetleyicilere göre çok daha iyi cevap verdiğini benzetimlerle göstermişlerdir. Empedans kontrol yöntemini eklem uzayına taşıyarak paralel manipülatörler için zor olan ileri kinematik probleminden kaçınmışlardır. Ancak çalışmaları kuvvet kontrolünden yoksun sadece etkileşim kontrolüne yöneliktir.

5.1. Empedans Kontrol

Hogan tarafından geliştirilen empedans kontrol yöntemi kuvvet kontrol yönteminden daha çok bir etkileşim (interaction) kontrol yöntemi olarak tanımlanabilir. Hogan'a göre empedans kontrolünün temel felsefesi manipülatör kontrol tasarımının yalnızca yörünge takibine göre değil, aynı zamanda manipülatörün mekanik empedansını regüle edecek şekilde tasarlanmasıdır. Robot hızı ile uygulanan kuvvet arasındaki ilişki mekanik empedans olarak tanımlanır. Empedans kontrolü, literatürde konum-tabanlı ve kuvvet-tabanlı olarak uygulanmaktadır. Konum-tabanlı empedans kontrol yöntemi geleneksel pozisyon denetleyicilerine sahip robotik sistemlerde kuvvet ve etkileşim kontrolü gereksinimini karşılayabilmek için uygun ve gerçekleştirilebilir bir seçenektir [79].

Empedans kontrol problemi, ortaya çıkan temas kuvvetlerinin hedef empedans kuralına göre robot referans konumuyla gerçek konumu arasında bir fark ortaya çıkaracak biçimde bir kontrol yöntemi tasarımı gerekliliği olarak tanımlanabilir. Eyleyiciler ve sistem dikkate alınarak empedans kontrol yöntemi konum ve kuvvet tabanlı olmak üzere tasarlanabilir. Ancak, empedans kontrolü esasen konum tabanlı bir kontrol yöntemidir ve SP'nin ileri kinematik problemi nedeniyle bu çalışmada konum tabanlı empedans kontrol uygulanmıştır.



Şekil 5.1. Robot ile nesne arasındaki sanal kütle-yay-damper sistemi

Kuvvet-hareket ilişkisine göre, empedans kontrol tasarımı sıfır, bir ve ikinci dereceden bir dinamik model kullanılarak yapılabilir. Şekil 5.1'de görüldüğü gibi ikinci dereceden kütle-yay-damper sistemiyle ifade edilen mekanik empedans aşağıda verilen denklemle tanımlanır. Sabit M , B , K matrisleri arzu edilen atalet, sönüm ve sertlik değerleridir.

$$M(\ddot{x} - \ddot{x}_r) + B(\dot{x} - \dot{x}_r) + K(x - x_r) = F \quad (5.1)$$

Burada sırasıyla, M kütle, B sönüm katsayısını, K yay sabitini, F ortaya çıkan kuvveti, x robotun gerçek konumunu ve x_r ise robotun referans konumunu temsil etmektedir. Denklem (5.1) frekans uzayında,

$$F(s) = Z(s)(X - X_r) = (Ms^2 + Bs + K)(X - X_r) \quad (5.2)$$

$$\Rightarrow X = X_r + \frac{F}{Ms^2 + Bs + K} \quad (5.3)$$

olarak ifade edilebilir. Denklem (5.3) ile robot konumunu güncelleyen eşitlik ve empedans filtresi görülmektedir. M , B ve K ile seçilen mekanik empedansa bağlı olarak robot bir cisimle etkileşime girdiğinde oluşan harici kuvvetlere bağlı olarak nasıl davranacağı ortaya çıkmaktadır. Empedans filtresi davranışı iyi bilinen ikinci dereceden bir sistemi ifade etmektedir. Buna göre sistemin doğal frekansı ve sönüm oranı:

$$w_n = \sqrt{\frac{K}{M}} \quad (5.4)$$

$$\xi = \frac{B}{2Mw_n} \quad (5.5)$$

Konum-tabanlı empedans kontrol yönteminin kararlılığı literatürde incelenmiştir ve buna göre kararlılık koşulları Denklem (5.6) ile ifade edilmiştir [72].

$$\xi \geq 0.5(\sqrt{1+2k}-1) \quad (5.6)$$

burada $k = K_e / K \gg 1$ ve K_e ise ortam veya nesnenin yay sabitidir. Buna göre, istenilen sertlik oranı K ortam sertliğinden çok daha küçük olmalı ve istenen sönüm oranı yeterince yüksek olmalıdır.

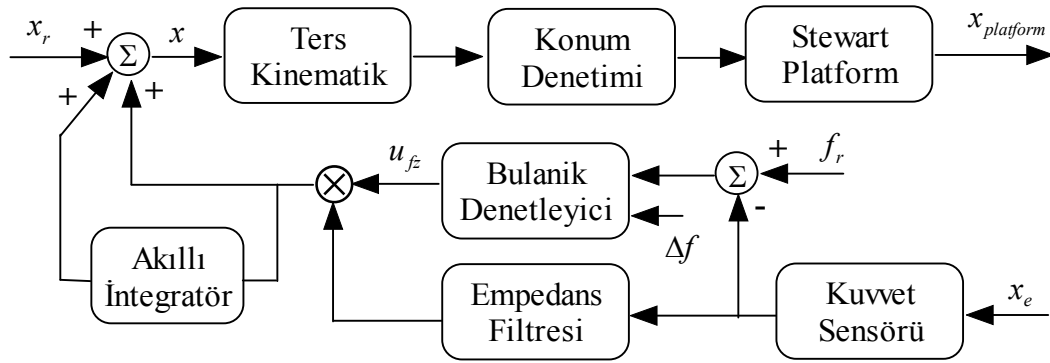
Literatürde, genellikle adaptif olmayan kontrol stratejilerinde sabit M , B , K seçilirken [78, 80], basit olarak iki parametre arasında anahtarlama da yapılabilmektedir [81, 82]. Adaptif ya da bulanık kontrol yapılarındaysa genellikle M , B , K parametreleri belirlenen kurala bağlı olarak değiştirilir [72, 83]. Yani diğer bir ifadeyle mekanik empedans zamanla değiştirilmektedir.

Bu çalışmadaysa konum, empedans ve kuvvet kontrolü hedeflendiği için sabit doğal frekans ve sönüm oranı seçilmiştir ve empedans filtresinin DC kazancı ayarlanmıştır. Sistemin hızlı ve az aşımli cevap vermesi için sönüm oranı 0.9 ve doğal frekans ise 500 rd/sn olarak seçilmiştir. Buna göre, kararlılık kriteri gereği nesnenin sertliği belirlenen değerden daha yüksek olmalıdır. Eğer farklı bir etkileşim davranışı gerekiyorsa, sadece bu iki parametre değiştirilebilir. Denetleyici tasarımında dikkate alınabilecek değişkenler mekanik empedansı veren M , B ve K ya da filtrenin diğer bir

değişkeni olan transfer fonksiyonun DC kazancı olabilir. Çünkü robotun harici kuvvete göre ne derece tepki vereceği kazanca da bağlıdır. Böylece robotun farklı cisimlerle her zaman aynı etkileşim davranışını göstermesi gerçekleştirilebilir.

5.2. Denetleyici Tasarımı

Denetleyici tasarımı üç kısma ayrılabilir; robot konum kontrolü, empedans filtresi ve bulanık empedans / kuvvet kontrolü. Denetleyici genel blok diyagramı Şekil 5.2’de görülmektedir.



Şekil 5.2. Bulanık empedans / kuvvet denetleyici blok diyagramı

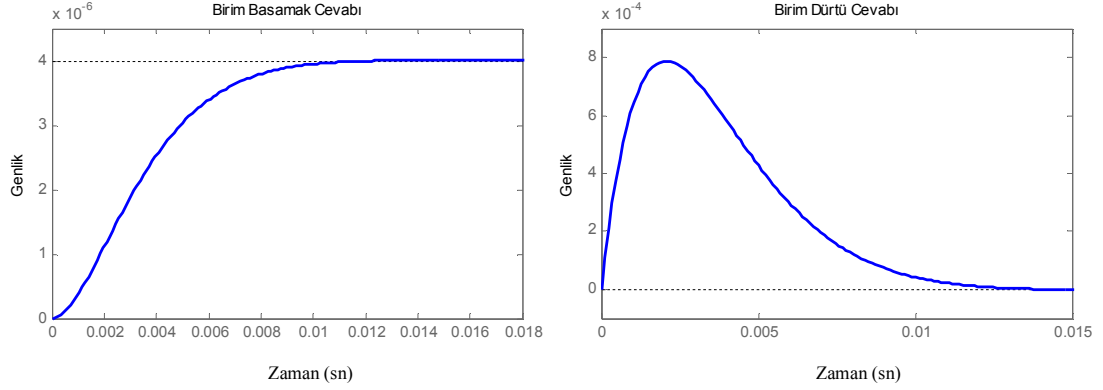
Bulanık empedans / kuvvet denetim yapısı aşağıdaki denklemle ifade edilebilir,

$$x = x_r + u_{fz}(f_r - f, \Delta f) \frac{F}{Ms^2 + Bs + K} K_f + K_{int} \int \left(u_{fz}(f_r - f, \Delta f) \frac{F}{Ms^2 + Bs + K} \right) dt \quad (5.7)$$

burada, x modifiye edilen robot konumunu, x_r referans robot konumunu, u_{fz} bulanık denetleyici çıkışını, K_f bulanık denetleyici çıkış kazancını ve K_{int} integratör kazancını temsil etmektedir. Ayrıca, integratör reset girişine sahiptir ve çıkışı sınırlandırılmıştır.

Kartezyen uzayındaki referans girişlere ve kuvvet / empedans denetleyici biriminden üretilen konum düzeltme girişlerine bağlı olarak ters kinematik sonucu üretilen bacak boyları 4. bölümde ele alınan denetleyiciler ile denetlenmektedir.

Bölüm 5.1’de belirtildiği gibi filtre aşağıdaki gibi (Denklem (5.8)) seçilmiştir. Şekil 5.3’te ise filtrenin birim basamak ve dürtü cevapları verilmiştir. Görüldüğü gibi filtre yanıtı hızlı seçilmiştir.



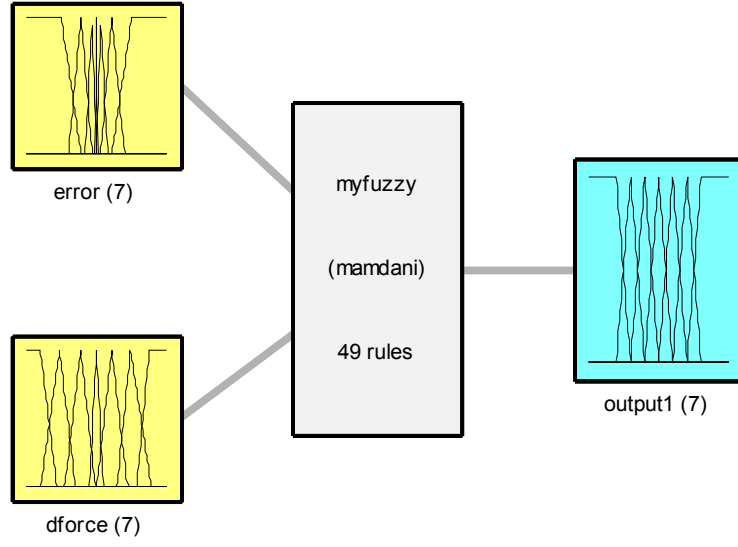
Şekil 5.3. Empedans filtresinin birim basamak ve dürtü yanıtları

$$X = X_r + \frac{F}{s^2 + 900s + 250000} \quad (5.8)$$

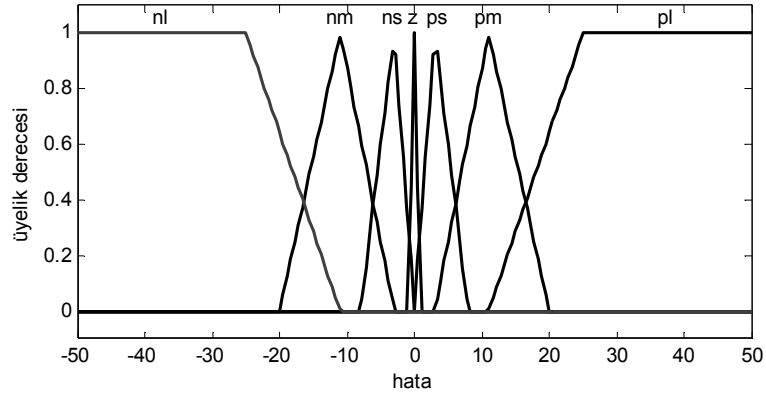
SP’nin kontrolü için üç görev tanımlanmıştır:

- 1- Serbest uzayda konum kontrolü
- 2- Temas halinde empedans kontrolü
- 3- Kuvvet kontrolü

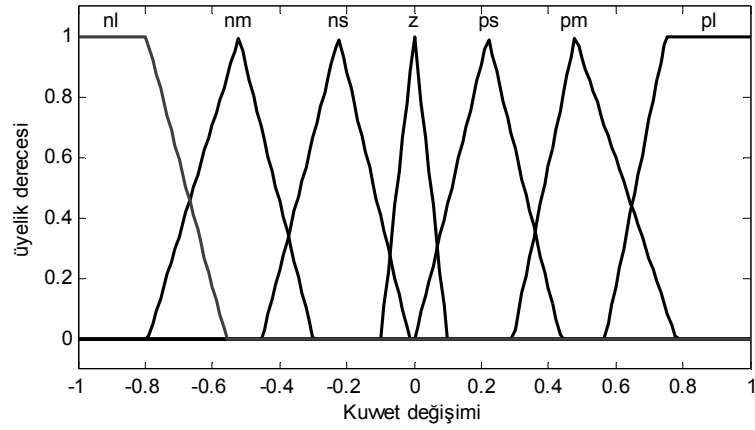
Şekil 5.2’deki genel kontrol tasarımından görüldüğü üzere, serbest uzayda $F=0$ olacağı için filtre çıkışı da sıfır olacaktır ve böylece konum kontrolü sağlanmış olacaktır. Robotun herhangi bir yüzeye temas etmesi durumunda ise bulanık denetleyici referans kuvvet civarında empedans filtresinin kazancını ayarlayacaktır. Daha sonra ise bulanık PID denetimi sayesinde istenilen kuvvetin uygulanması sağlanmaktadır. Bunun için yedişer üyelik fonksiyonu bulunan ve 49 kuralla tanımlanan iki girişli bir çıkışlı mamdani max-min tipinde bir bulanık denetleyici tasarlanmıştır. İlk giriş kuvvet hatası, ikinci giriş kuvvet değişimi ve çıkış ise filtre kazancıdır. Kural tablosu ve üyelik fonksiyonları aşağıda görülmektedir.



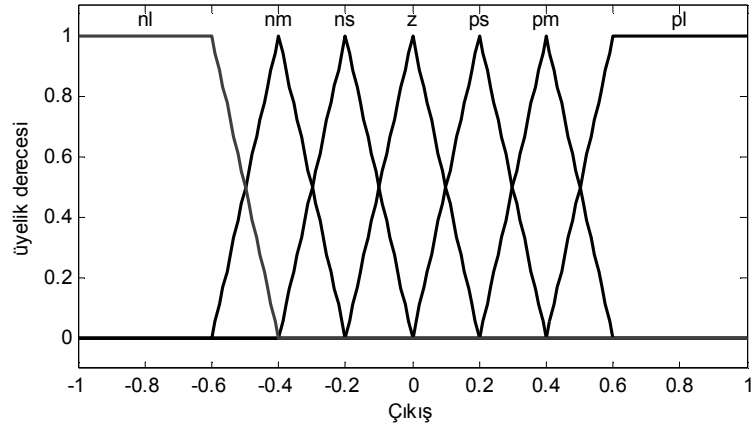
Şekil 5.4. Bulanık denetleyici iç yapısı



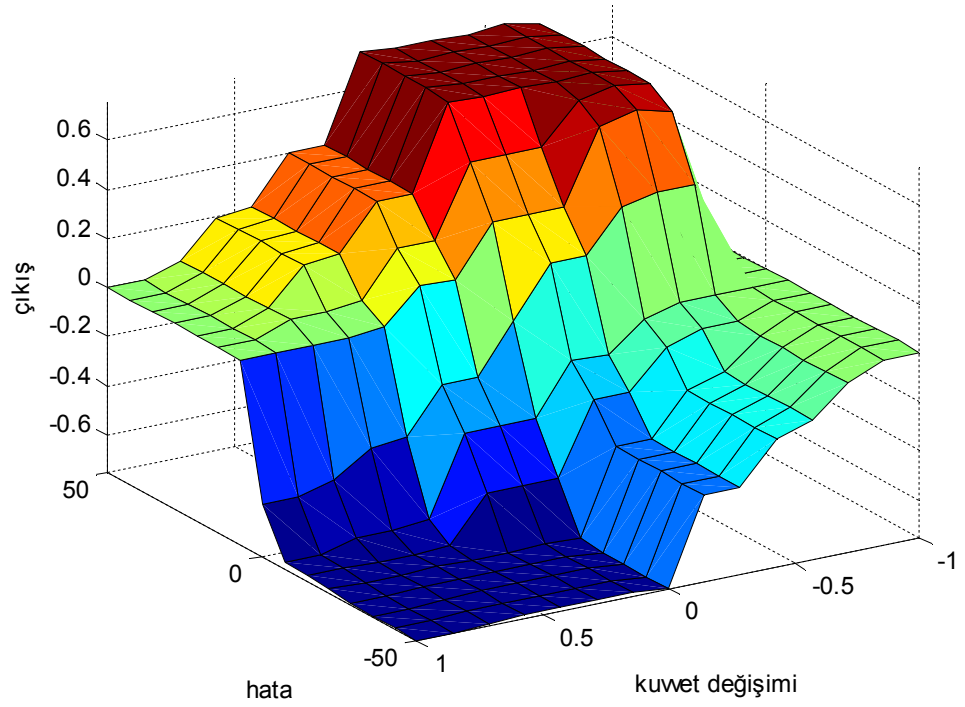
Şekil 5.5. Kuvvet hatası girişi için üyelik fonksiyonları



Şekil 5.6. Kuvvet değişimi girişi için üyelik fonksiyonları



Şekil 5.7. Çıkış üyelik fonksiyonları



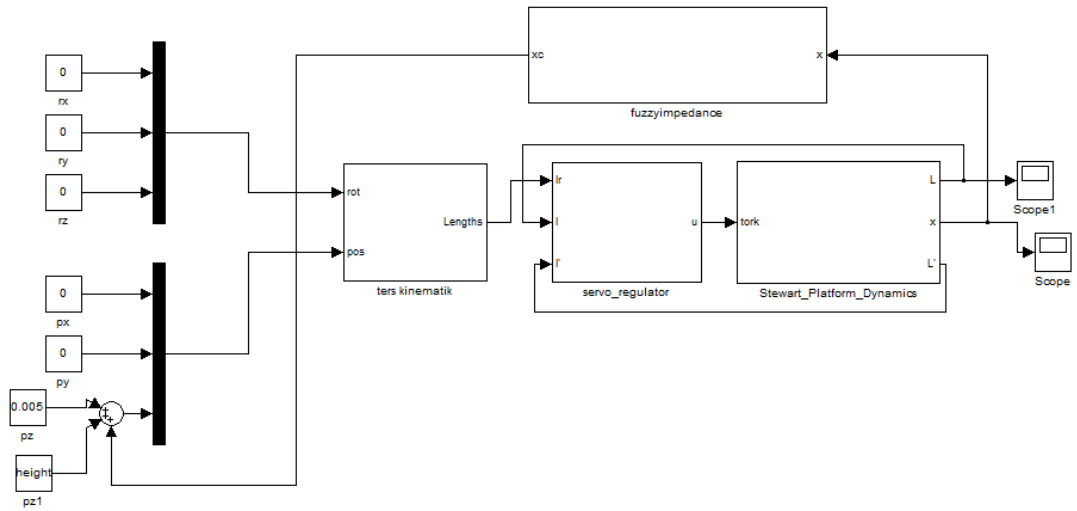
Şekil 5.8. Tasarlanan bulanık denetleyicinin yüzeyi

Tablo 5.1. Bulanık denetleyici kural tablosu

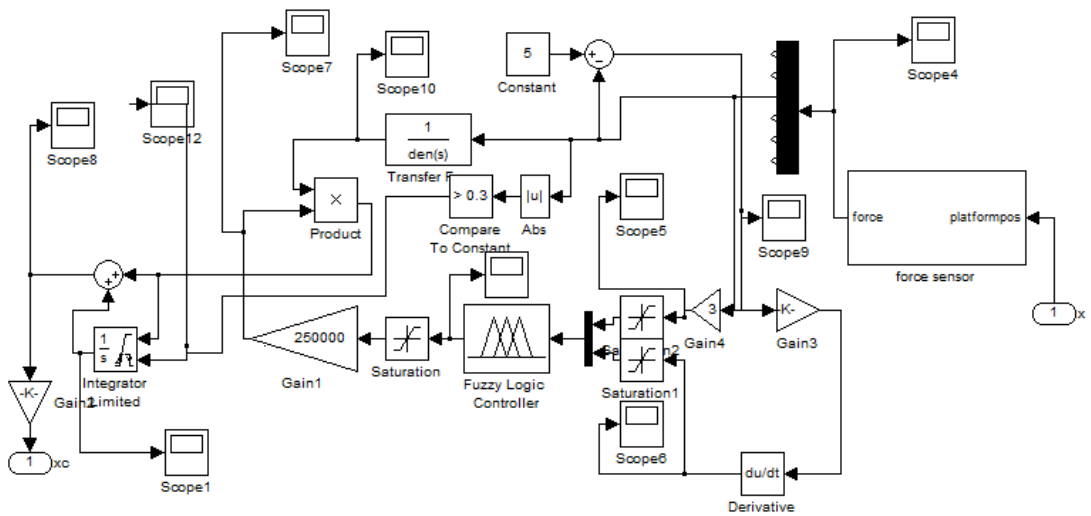
		Kuvvet Değişimi						
		NL	NM	NS	Z	PS	PM	PL
Hata	NL	z	ns	nm	nl	nl	nl	nl
	NM	z	z	ns	nm	nl	nl	nl
	NS	z	z	z	ns	ns	nm	nl
	Z	pl	pm	ps	z	ns	nm	nl
	PS	pl	pm	ps	ps	z	z	z
	PM	pl	pl	pm	pm	ps	z	z
	PL	pl	pl	pl	pl	pm	ps	z

Tasarlanan denetleyici öncelikli olarak Simulink üzerinde modellenerek deneyler yapılmıştır. Oluşturulan model aşağıdaki Şekil 5.9’da görülmektedir. Model bazı alt bloklar içermektedir. Bu blokların görevi sırasıyla: ters kinematik algoritması, bacak konum denetleyicisi, SP dinamik modeli, kuvvet sensör modeli ve bulanık empedans / kuvvet denetleyicisidir.

Şekil 5.10’da ise $F=kx$ temelindeki konum sensörü ve bulanık empedans / kuvvet kontrol yapısı görülmektedir. Kısaca, empedans filtre kazancı bulanık denetleyici ile ayarlanmaktadır ve kalıcı durum hatasının giderilmesi için belirli bir eşik üstünde aktif olan integratör yapısı denetleyiciye eklenmiştir.

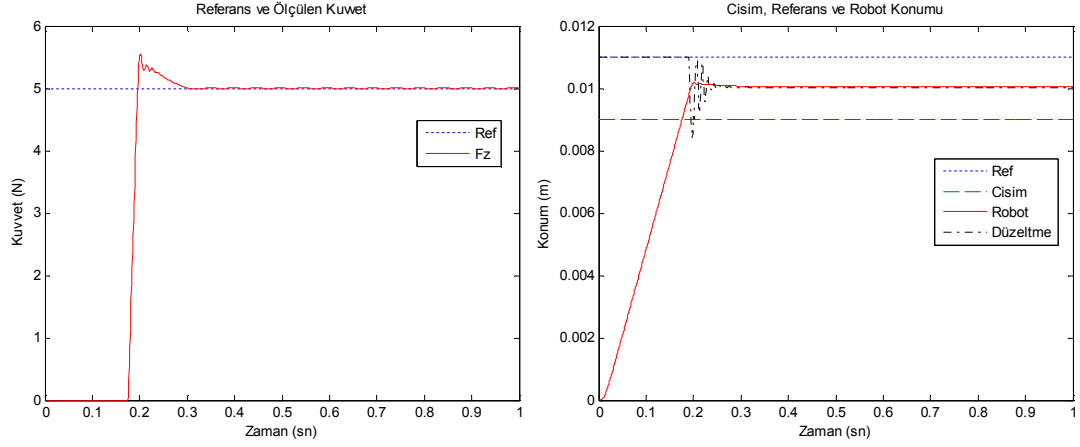


Şekil 5.9. Bulanık empedans / kuvvet kontrolü benzetim modeli



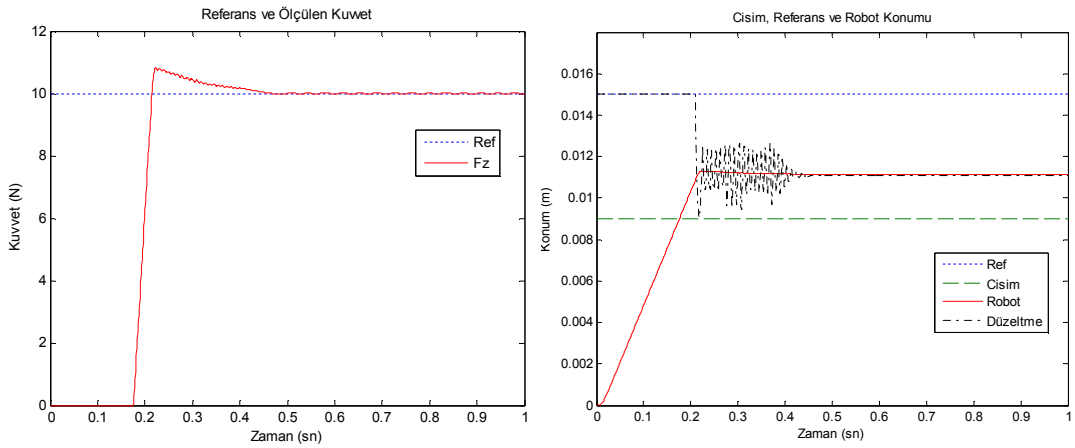
Şekil 5.10. Bulanık / empedans alt modeli

Tasarlanan denetleyici öncelikli olarak Simulink üzerinde modellenmiştir. Önerilen yöntemin geçerliliğini test etmek için çeşitli deneyler yapılmıştır. Buna göre, Şekil 5.11’de, z ekseninde 9 mm’de bulunan ve katılık değeri 4700 N/m olan bir cisim doğru 5 N’lık kuvvet girişi ve 11 mm’lik konum girişi altında kuvvet sensöründen elde edilen yanıt ve üst platformun konum değişimi görülmektedir. Hedeflenen empedans kuvvet kontrolünün sağlandığı görülmektedir.

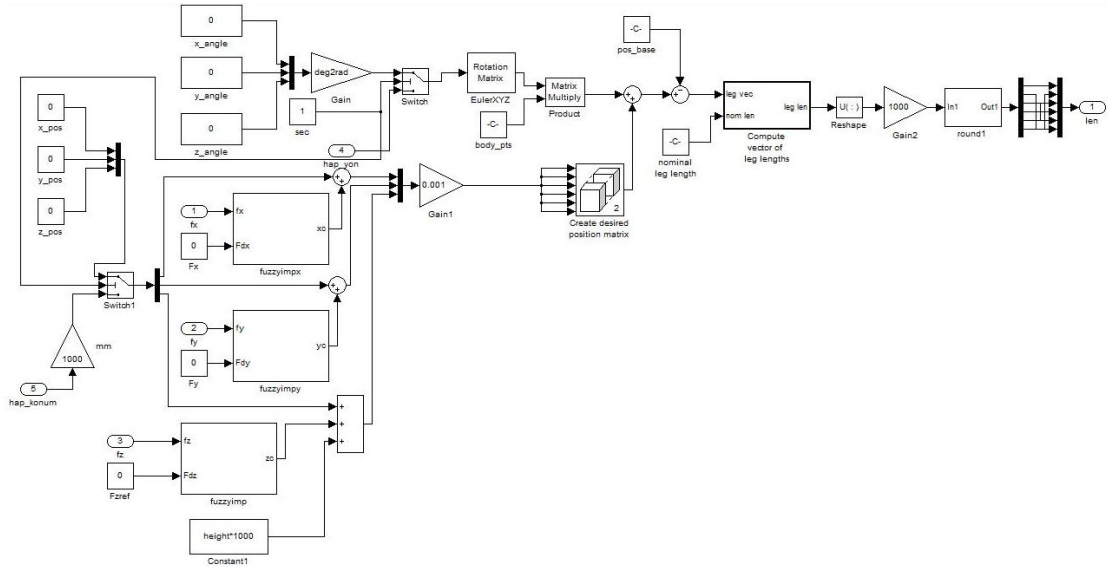


Şekil 5.11. 5 N’lık kuvvet ve $+z$ ekseninde 11 mm’lik referans girişi altında elde edilen benzetim yanıtları.

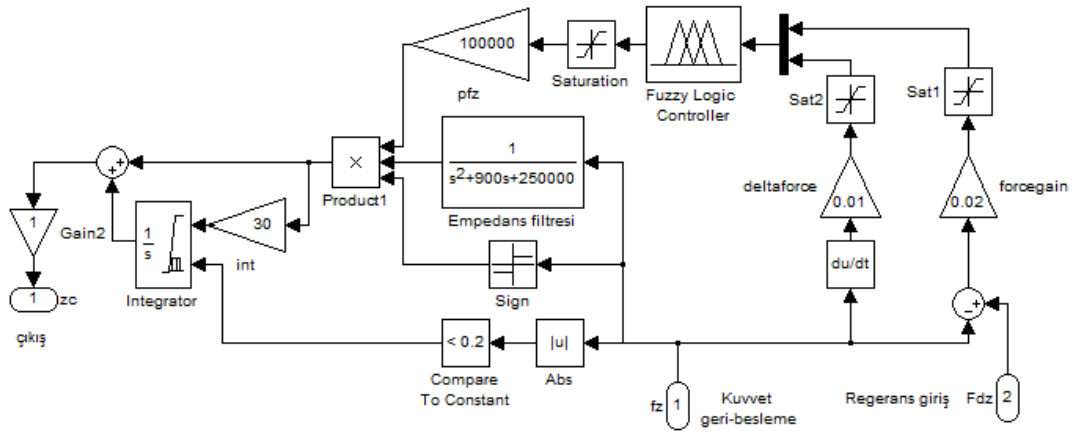
Şekil 5.12’deyse yukarıdaki aynı durum altında, 10 N’lık kuvvet girişi ve 15 mm’lik konum girişi sonucunda elde edilen sistem yanıtı görülmektedir. Robot ile cisim arasında arzu edilen etkileşim sağlanmış ve yüzeye arzu edilen kuvvet uygulanmıştır.



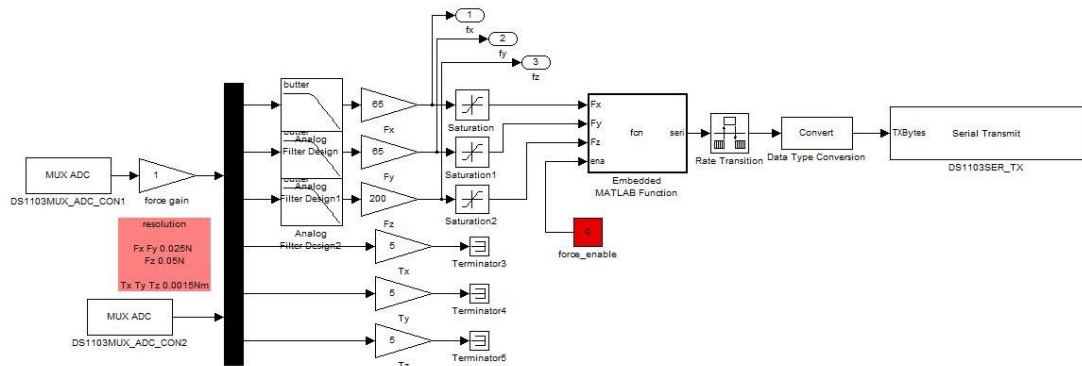
Şekil 5.12. 10 N’lık kuvvet ve $+z$ ekseninde 15 mm’lik referans girişi altında elde edilen benzetim yanıtları



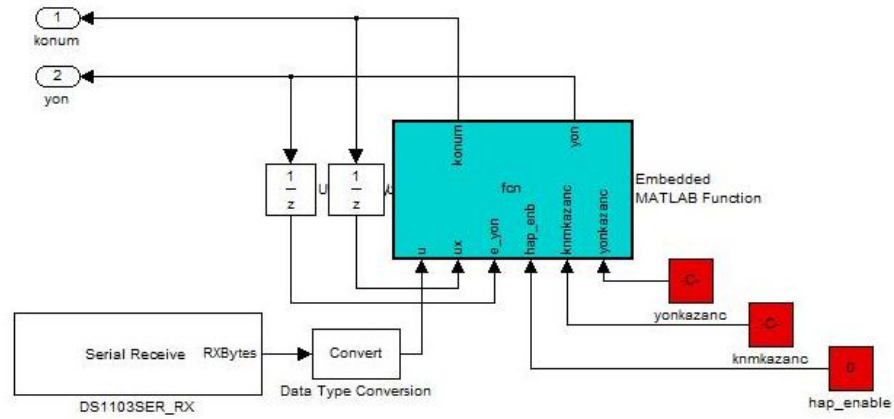
Şekil 5.14. Leg Trajectory alt modeli



Şekil 5.15. Bulanık empedans / kuvvet denetleyici alt modeli

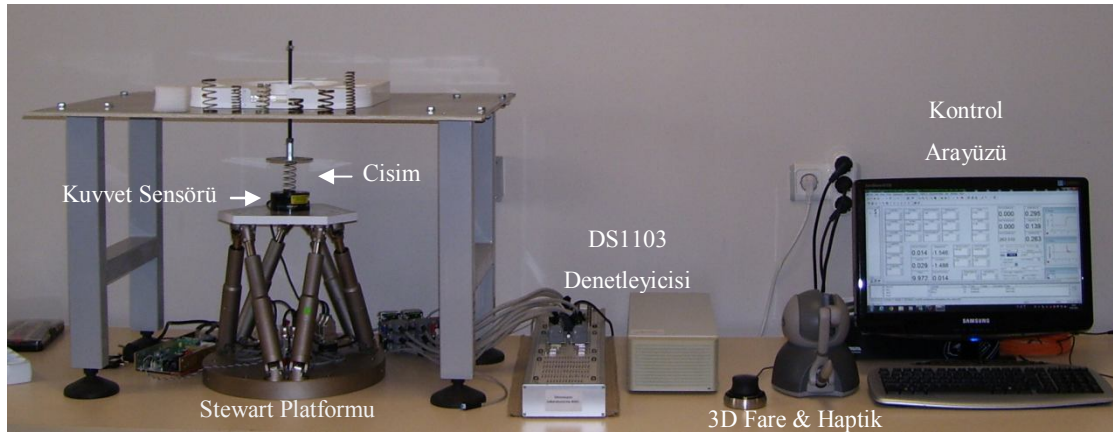


Şekil 5.16. Kuvvet ölçüm alt modeli

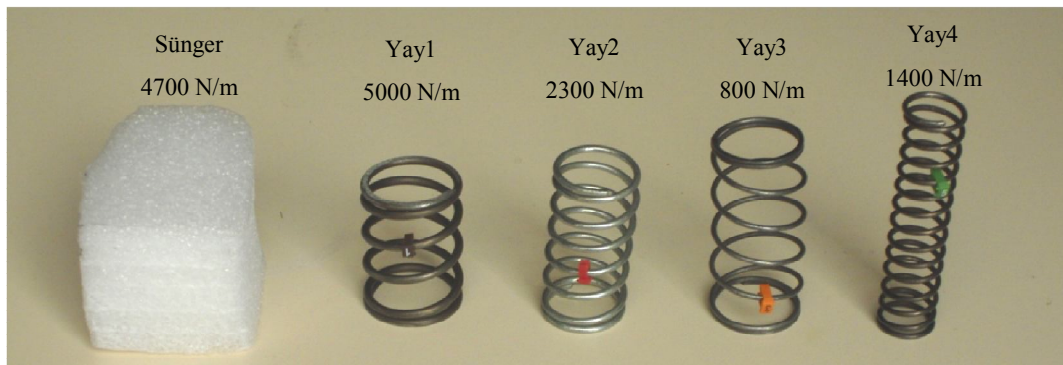


Şekil 5.17. Haptik alt modeli

Gerçek zamanlı deneyler yapabilmek için aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi robotun üstüne bir masa tasarlanmıştır. Farklı sertlikteki yaylar ve süngerler edinilerek masaya monte edilebilmektedir. Şekil 5.19’da kuvvet deneylerinde kullanılan cisimler ve özellikleri görülmektedir.

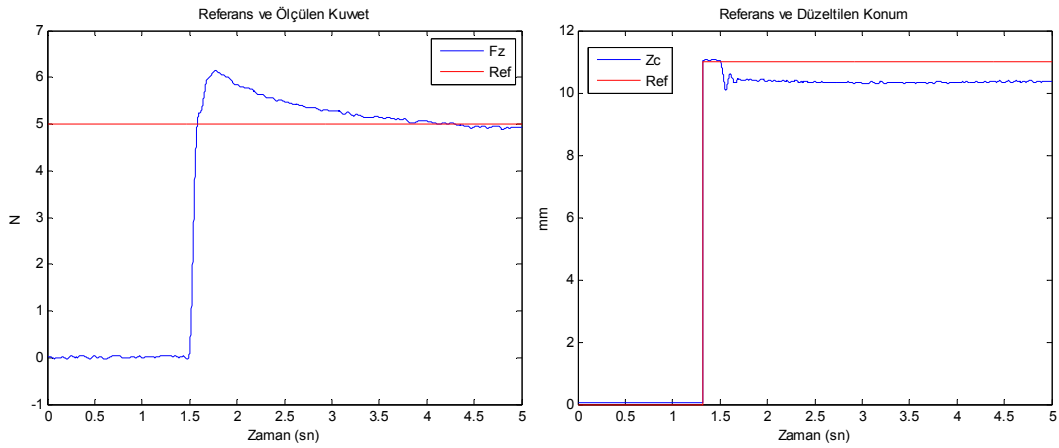


Şekil 5.18. Empedans / kuvvet kontrolü deney düzeneği



Şekil 5.19. Kullanılan cisimler ve özellikleri

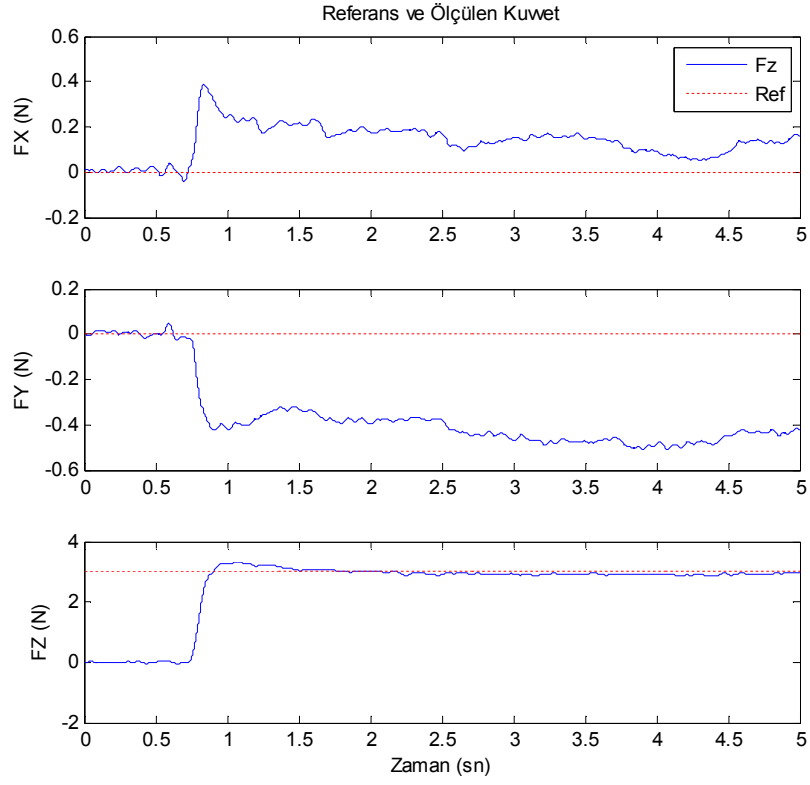
z ekseninde tasarlanan ve benzetimi yapılan empedans / kuvvet denetleyicisi aynı şekilde tek eksenle deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.20’de yapılan birçok deneyden biri verilmiştir. Buna göre, 5 N’lik kuvvet ve $+z$ ekseninde 11 mm’lik konum girişi sonucunda elde edilen yanıtlar görülmektedir. Grafiklerde, kuvvet referansı, ölçülen kuvvet, konum referansı ve bulanık empedans / kuvvet denetleyicisi tarafından düzeltilen konum bilgileri verilmiştir. Az aşımlı ve hızlı tasarlanan empedans filtresi ve kuvvet denetiminin gerçekleştirildiği görülmektedir.



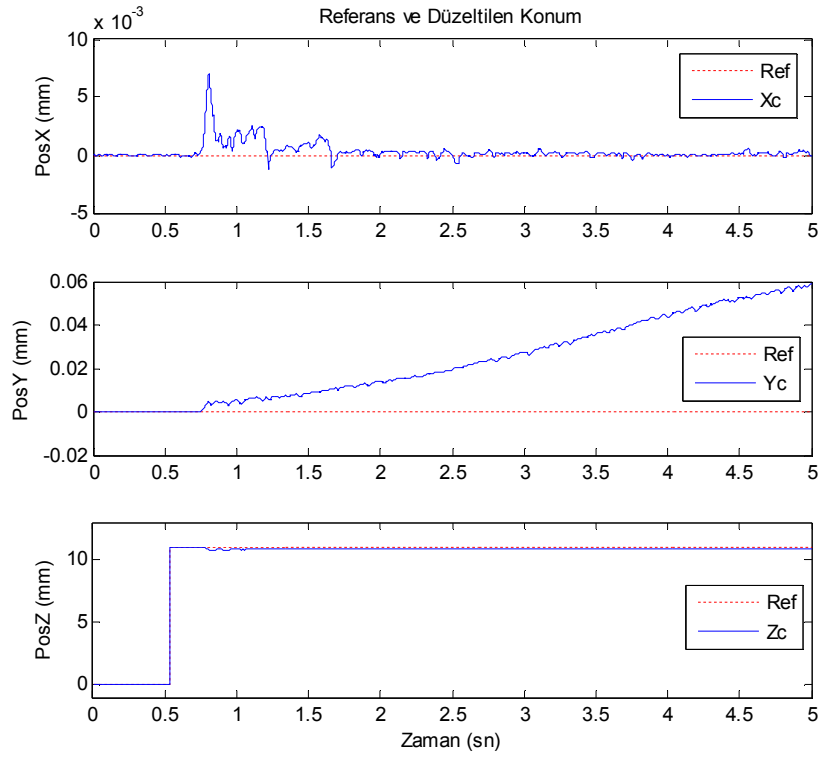
Şekil 5.20. 5 N’lik kuvvet ve $+z$ ekseninde 11 mm’lik referans girişi altında elde edilen empedans / kuvvet ve platform konum yanıtları

Tek eksenle gerçekleştirilen deneylerden sonra üç eksen empedans / kuvvet kontrolü için denetleyici yapısı modifiye edilmiştir. Yapılan birçok deneyden bazıları aşağıda sırasıyla verilmiştir. Her bir deney için iki şekil verilmiştir. Şekillerden ilki üç eksen kuvvet referans ve değişimlerini gösterirken, ikinci şekilde üç eksen referans konum girişleri ve empedans / kuvvet denetleyicisinin çıkışları sonucundaki robot konum modifiyeleri gösterilmiştir.

Şekil 5.21 ve 5.22’de, robota 10 mm uzaklıktaki 4700 N/m yay sabitine sahip bir süngere doğru 3 N’lik kuvvet ve $+z$ ekseninde 11 mm’lik konum girişi sonucunda elde edilen kuvvet ve konum yanıtları görülmektedir. Şekil 5.21’den görülebileceği gibi x ve y eksenlerinde yalnızca 0.4 N’lik kuvvet ortaya çıkarken z ekseninde arzu edilen empedans / kuvvet denetimi sağlanmıştır. Şekil 5.22’de ise robotun üç eksenindeki konum güncellemeleri görülmektedir.



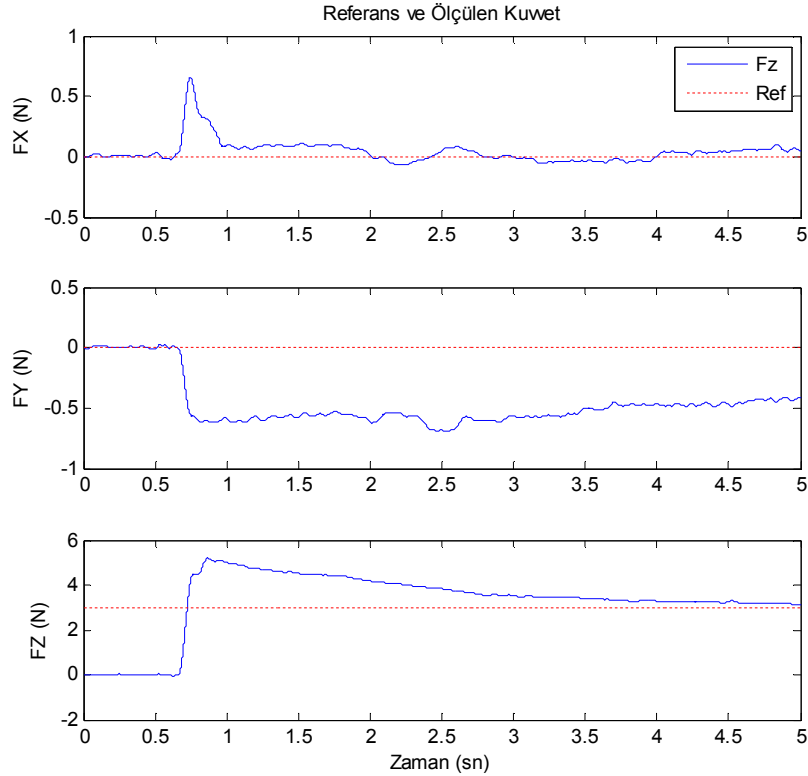
Şekil 5.21. +z ekseninde 3 N ve 11 mm referans girişi altında elde edilen empedans / kuvvet yanıtları



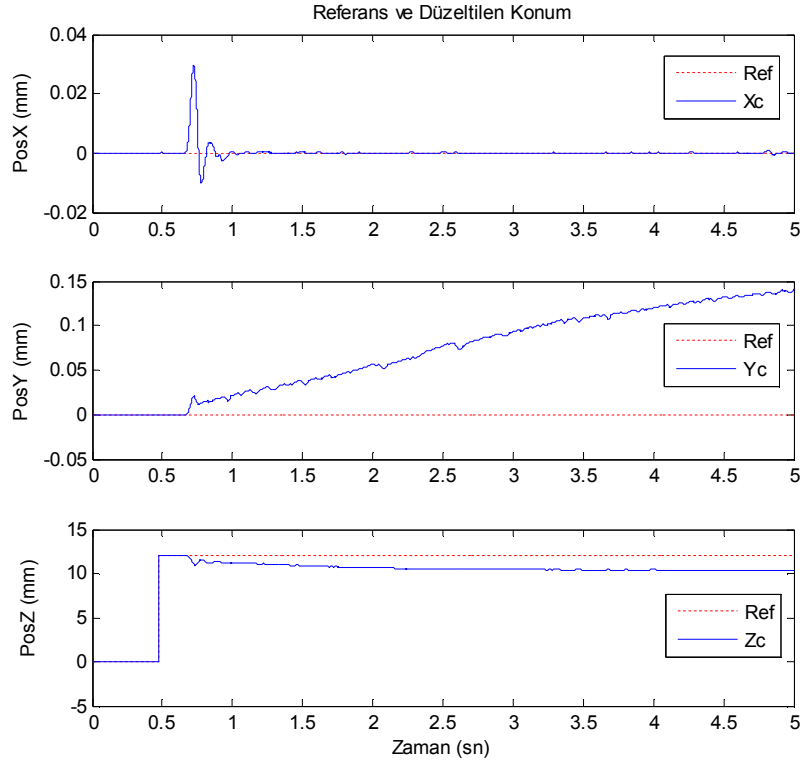
Şekil 5.22. +z ekseninde 3 N ve 11 mm referans girişi altında elde edilen konum ve değişimleri

Şekil 5.23 ve 5.24'te, robota 10 mm uzaklıktaki 4700 N/m yay sabitine sahip bir süngere doğru 3 N'lik kuvvet ve +z ekseninde 12 mm'lik konum girişi sonucunda elde edilen kuvvet ve konum yanıtları görülmektedir. Şekil 5.23'ten görülebileceği gibi x ve y eksenlerinde yalnızca 0.5 N'lik kuvvet ortaya çıkarken, konum referansı değişmesine rağmen z ekseninde arzu edilen empedans / kuvvet denetimi sağlanmıştır. Şekil 5.24'te ise robotun üç eksendeki konum güncellemeleri görülmektedir ve z ekseninde önceki deneye göre robotun daha fazla geriye çekildiği görülmektedir.

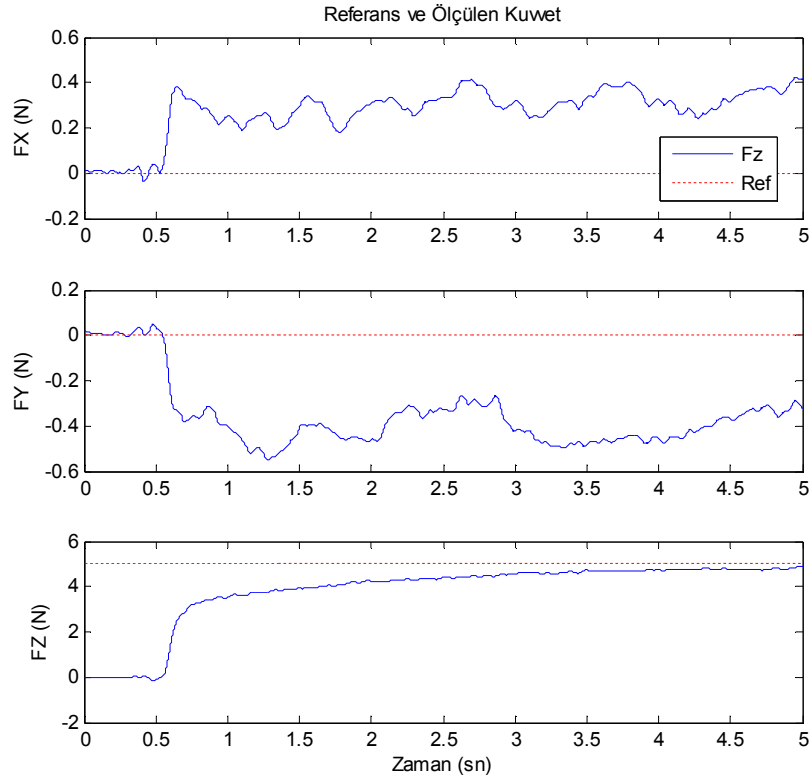
Şekil 5.25 ve 5.26'da, robota 10 mm uzaklıktaki 4700 N/m yay sabitine sahip bir süngere doğru 5 N'lik kuvvet ve +z ekseninde 11 mm'lik konum girişi sonucunda elde edilen kuvvet ve konum yanıtları görülmektedir. Şekil 5.25'ten görülebileceği gibi x ve y eksenlerinde yalnızca 0.4 N'lik kuvvet ortaya çıkarken, arzu edilen empedans / kuvvet denetimi sağlanmıştır ve kalıcı durum hatası giderilmiştir. Şekil 5.26'da ise robotun üç eksendeki konum güncellemeleri görülmektedir ve z ekseninde yeterli kuvvetin ortaya çıkmamasından dolayı robot ileri yönlü yönlendirilmiştir.



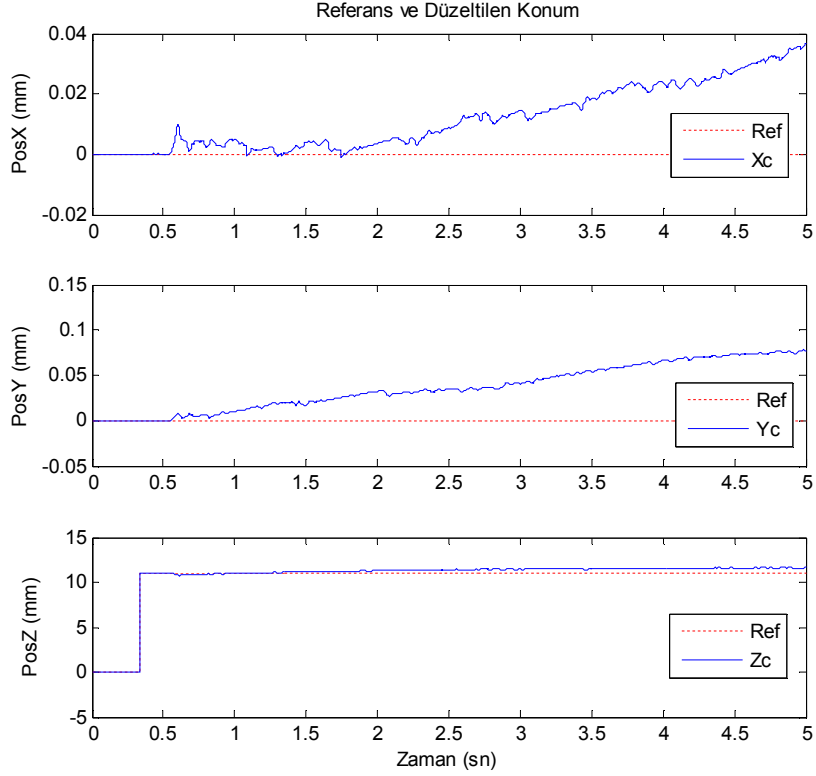
Şekil 5.23. +z ekseninde 3 N ve 12 mm referans girişi altında elde edilen empedans / kuvvet yanıtları



Şekil 5.24. +z ekseninde 3 N ve 12 mm referans girişi altında elde edilen konum ve değişimleri



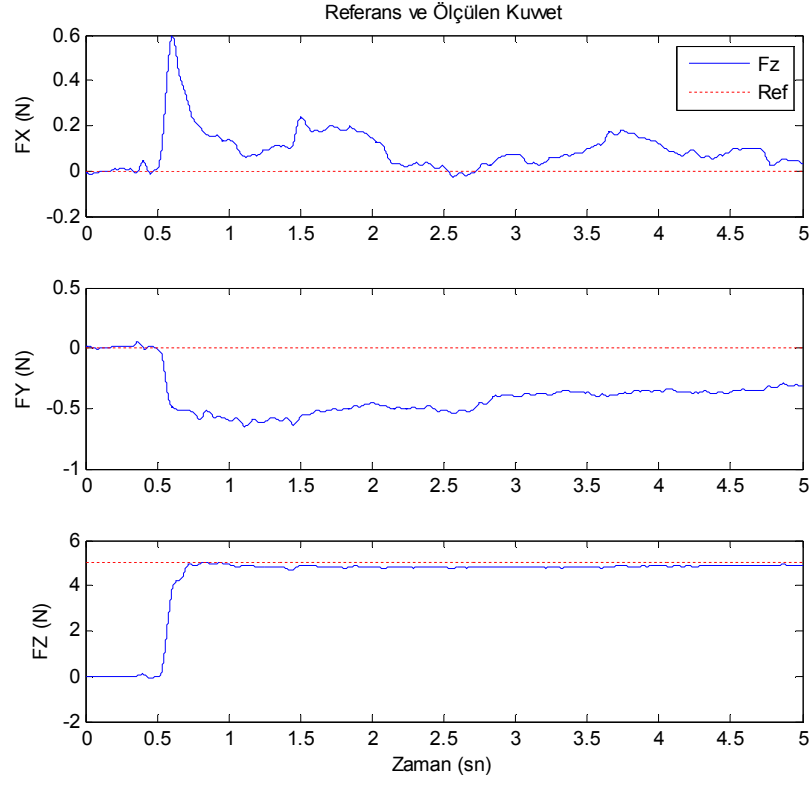
Şekil 5.25. +z ekseninde 5 N ve 11 mm referans girişi altında elde edilen empedans / kuvvet yanıtları



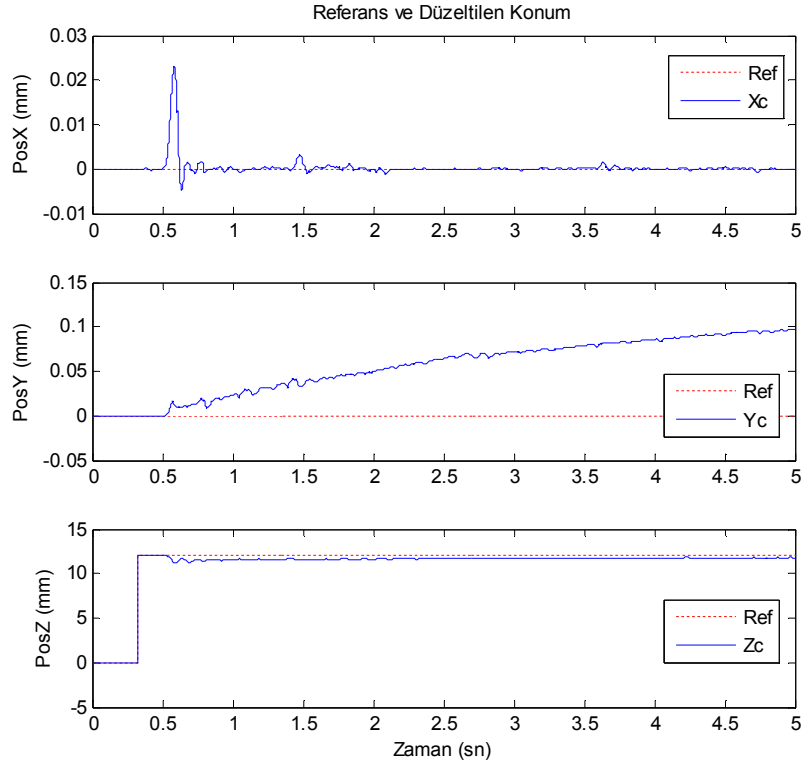
Şekil 5.26. +z ekseninde 5 N ve 11 mm referans girişi altında elde edilen konum ve değişimleri

Şekil 5.27 ve 5.28’de, robota 10 mm uzaklıktaki 4700 N/m yay sabitine sahip bir süngere doğru 5 N’lik kuvvet ve +z ekseninde 12 mm’lik konum girişi sonucunda elde edilen kuvvet ve konum yanıtları görülmektedir. Şekil 5.27’den görülebileceği gibi x ve y eksenlerinde yalnızca 0.6 N’lik kuvvet ortaya çıkarken, z ekseninde arzu edilen empedans / kuvvet denetimi sağlanmıştır. Şekil 5.28’de ise robotun üç eksenindeki konum güncellemeleri görülmektedir.

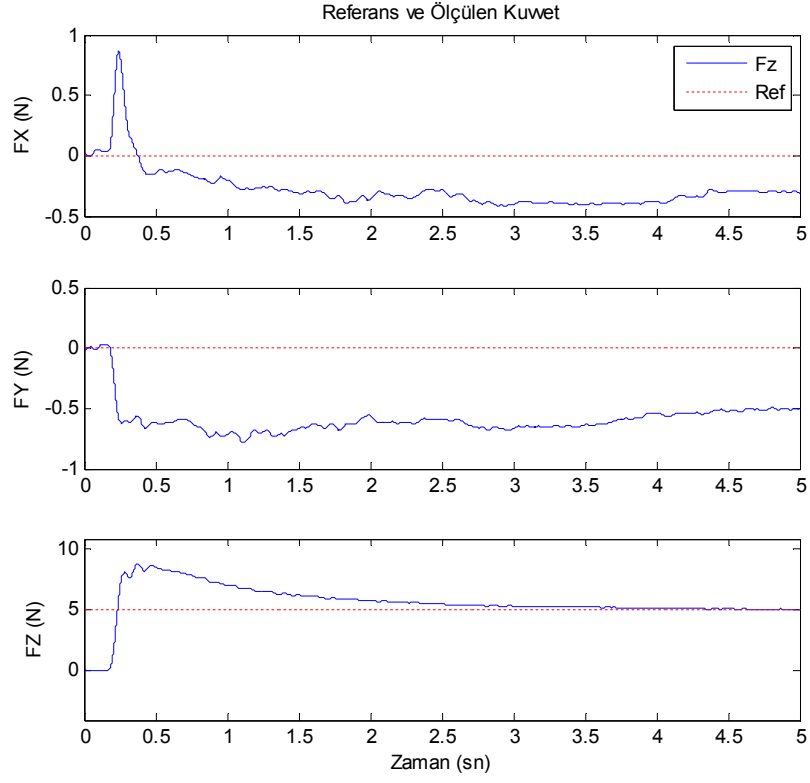
Şekil 5.29 ve 5.30’da, robota 10 mm uzaklıktaki 4700 N/m yay sabitine sahip bir süngere doğru 5 N’lik kuvvet ve +z ekseninde 14 mm’lik konum girişi sonucunda elde edilen kuvvet ve konum yanıtları görülmektedir. Şekil 5.29’dan görülebileceği gibi x ve y eksenlerinde yalnızca 0.5 N’lik kuvvet ortaya çıkarken, z ekseninde arzu edilen empedans / kuvvet denetimi sağlanmıştır ve kalıcı durum hatası giderilmiştir. Şekil 5.30’da ise robotun üç eksenindeki konum güncellemeleri görülmektedir ve z ekseninde ortaya çıkan yüksek kuvvetin giderilmesi için robot uygun konuma alınmıştır.



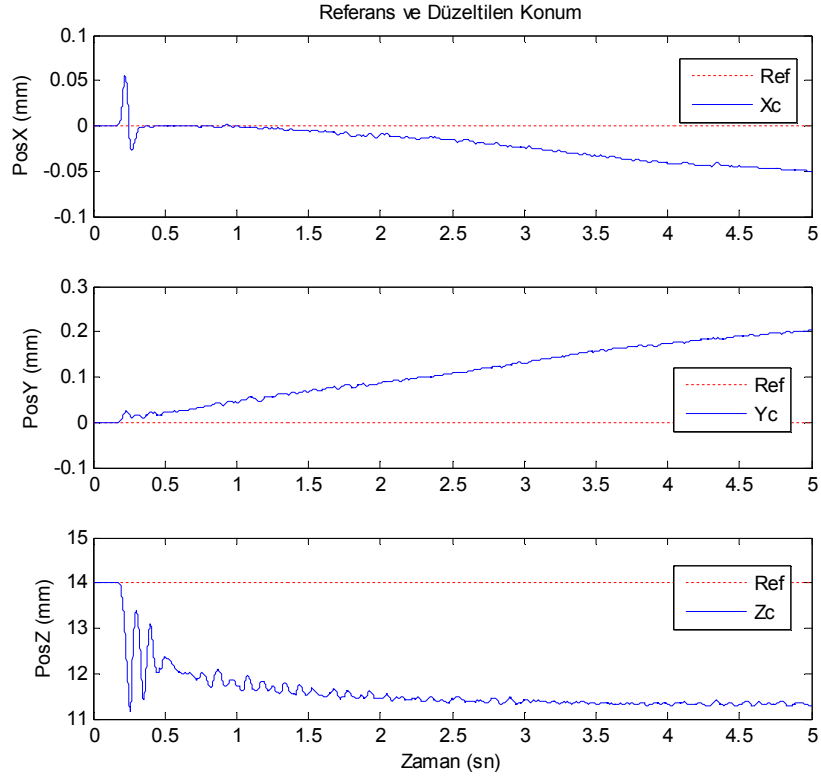
Şekil 5.27. +z ekseninde 5 N ve 12 mm referans girişi altında elde edilen empedans / kuvvet yanıtları



Şekil 5.28. +z ekseninde 5 N ve 12 mm referans girişi altında elde edilen konum ve değişimleri



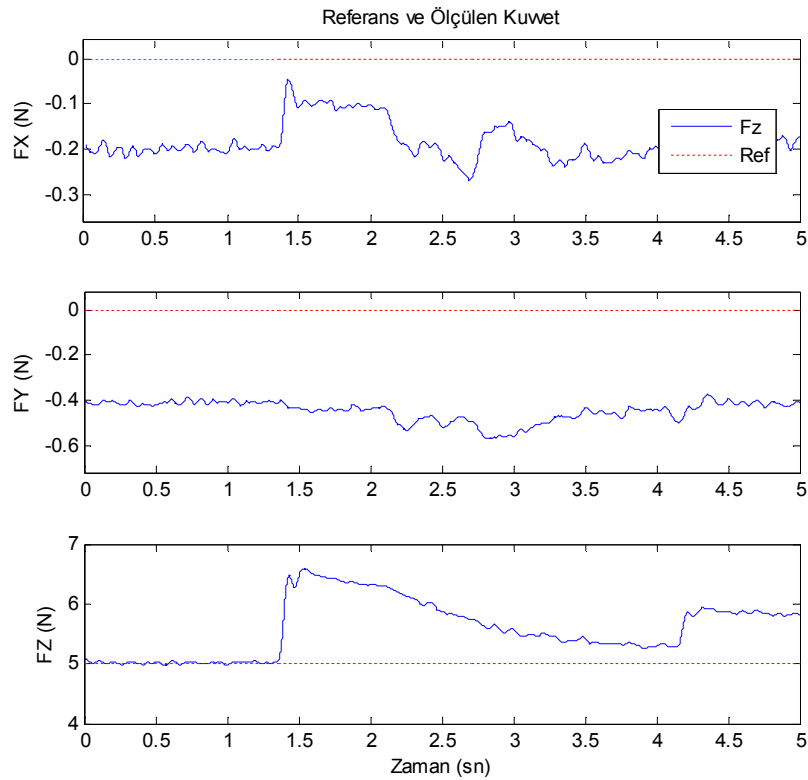
Şekil 5.29. +z ekseninde 5 N ve 14 mm referans girişi altında elde edilen empedans / kuvvet yanıtları



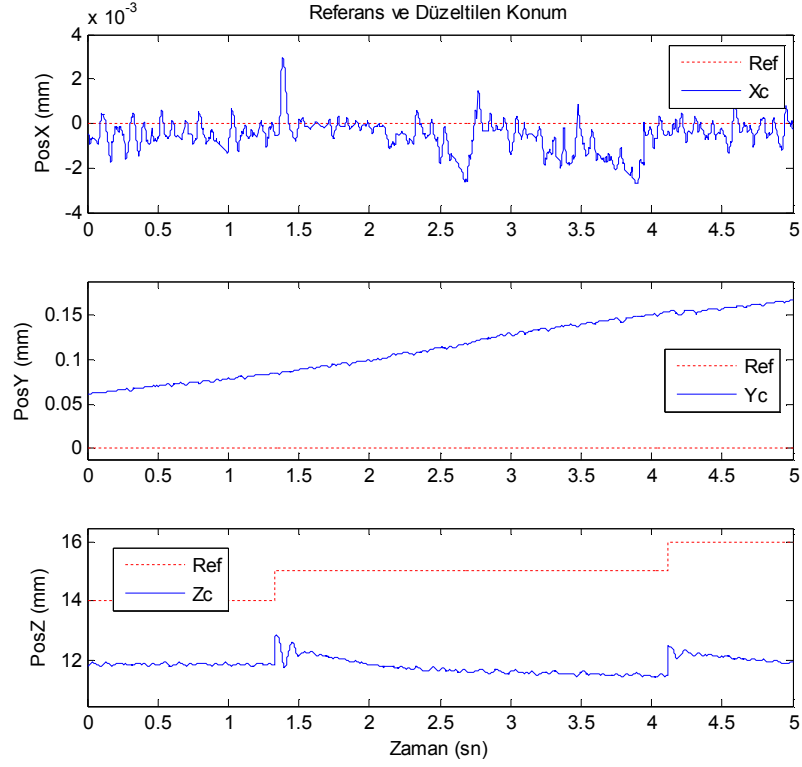
Şekil 5.30. +z ekseninde 5 N ve 14 mm referans girişi altında elde edilen konum ve değişimleri

Şekil 5.31’de ise robota 10 mm uzaklıktaki 4700 N/m yay sabitine sahip bir süngere z ekseninde 5 N kuvvet uygulanırken ileri yönlü konum girişi sonucunda elde edilen empedans / kuvvet yanıtları görülmektedir. Her bir mm’lik giriş için normalde 4.7 N kuvvet ortaya çıkması gerekirken, görüldüğü gibi sadece 1.5 N kuvvet değişimi görülmektedir ve integratör tarafından hata yok edilmektedir. Ayrıca, x ve y eksenlerinde yalnızca 0.4 N’lık kuvvet ortaya çıkarken, konum referansı değişmesine rağmen z ekseninde arzu edilen empedans / kuvvet denetimi sağlanmıştır. Şekil 5.32’de ise robotun üç eksendeki konum değişimleri görülmektedir ve z ekseninde 1 mm’lik iki basamak girişi uygulanmıştır.

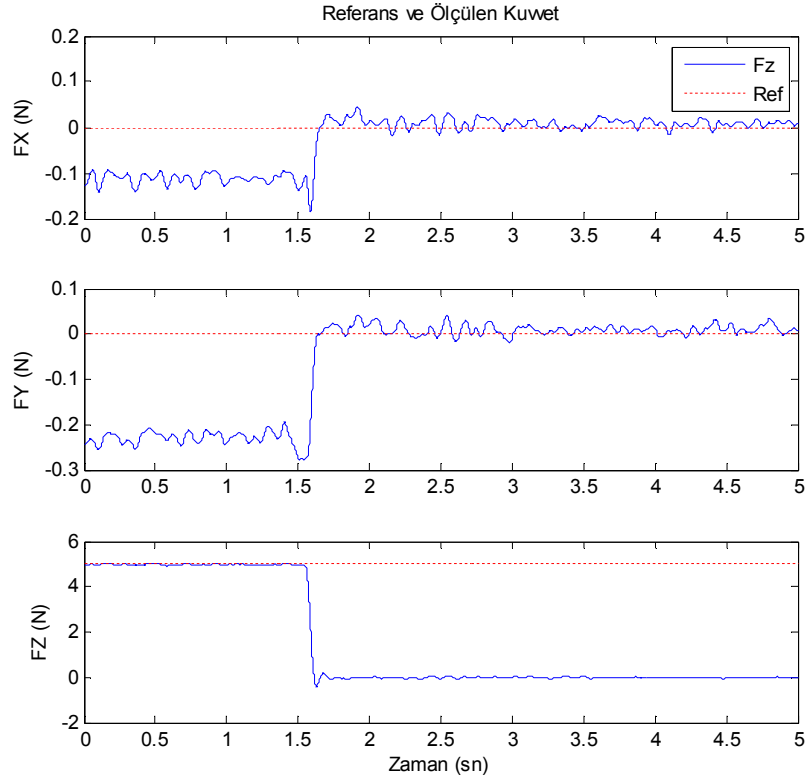
Yukarıdaki durumun tersine, robot cisimle temas halindeyken ve istenen kuvvet kontrolü sağlanırken serbest uzaya çekilebilir. Şekil 5.33 ve 34’te bu durum görülmektedir. 5 N’lık kuvvet cisme uygulanırken robot z ekseninde sıfır konumuna alınmıştır.



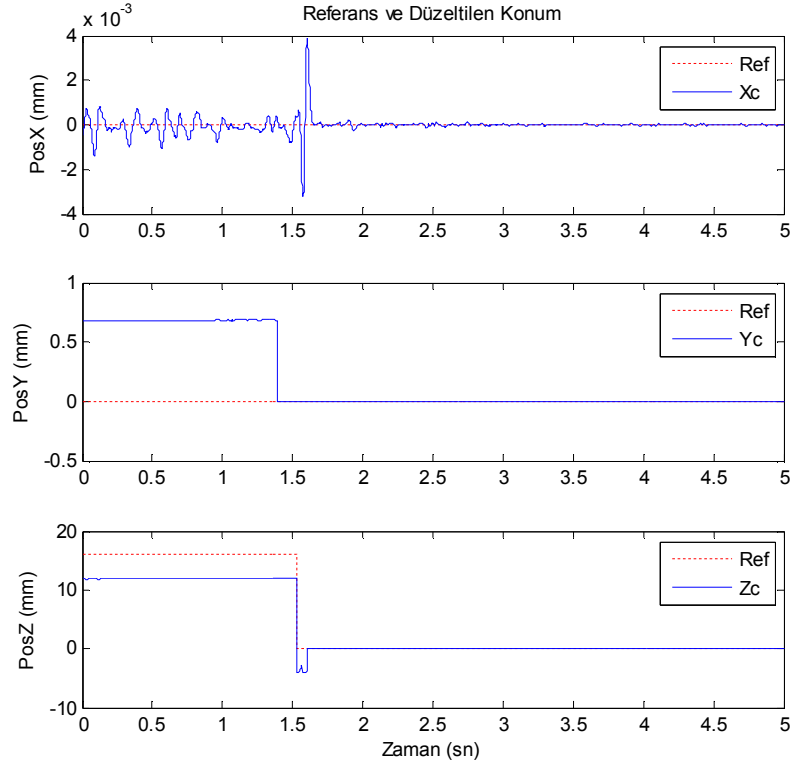
Şekil 5.31. $+z$ ekseninde 5 N kuvvet uygulanırken ileri yönlü konum girişi altında elde edilen empedans / kuvvet yanıtları



Şekil 5.32. +z ekseninde 5 N kuvvet uygulanırken ileri yönlü konum girişi altında elde edilen konum ve değişimleri



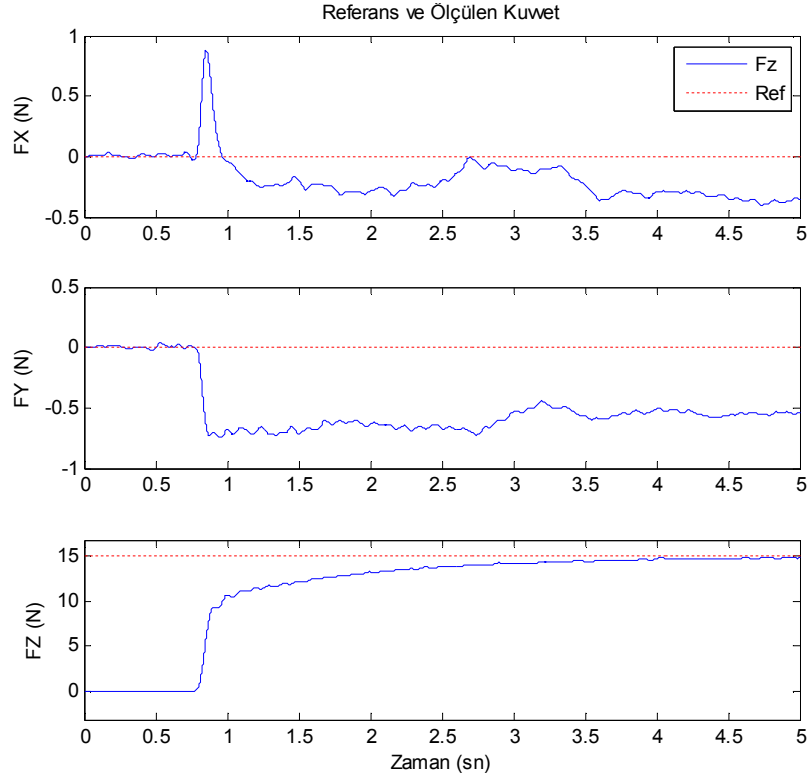
Şekil 5.33. +z ekseninde 5 N kuvvet uygulanırken robotun sıfır konumuna alınması



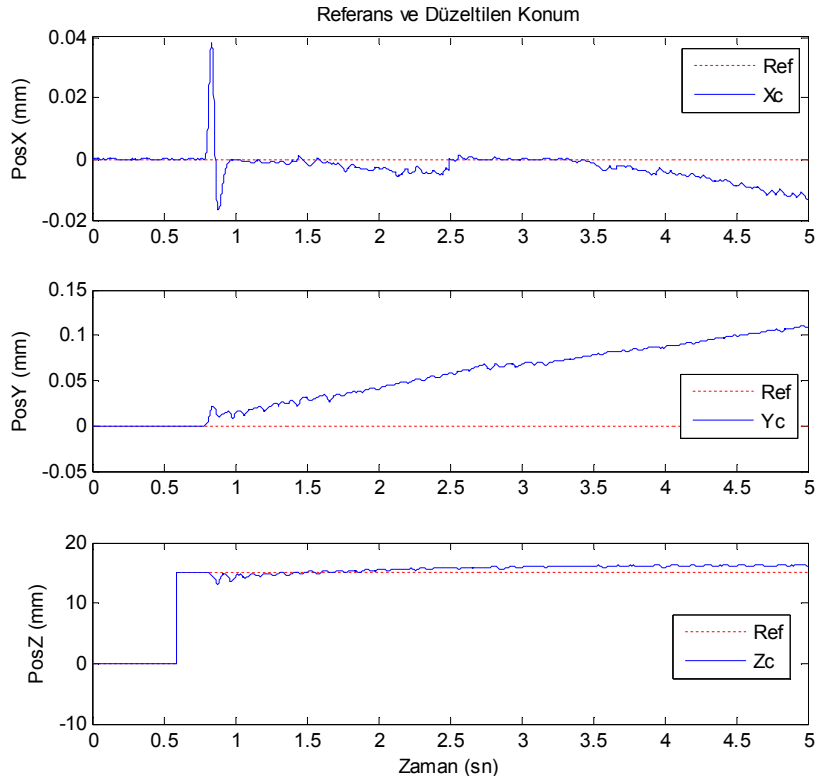
Şekil 5.34. +z ekseninde 5 N kuvvet uygulanırken robotun sıfır konumuna alınması

Şekil 5.35 ve 5.36’da, robota 10 mm uzaklıktaki 4700 N/m yay sabitine sahip bir süngere doğru 15 N’lik kuvvet ve +z ekseninde 15 mm’lik konum girişi sonucunda elde edilen kuvvet ve konum yanıtları görülmektedir. Şekil 5.35’ten görülebileceği gibi x ve y eksenlerinde yalnızca 0.5 N’lik kuvvet ortaya çıkarken, z ekseninde arzu edilen empedans / kuvvet denetimi sağlanmıştır. Şekil 5.36’da ise robotun üç eksenindeki konum güncellemeleri görülmektedir.

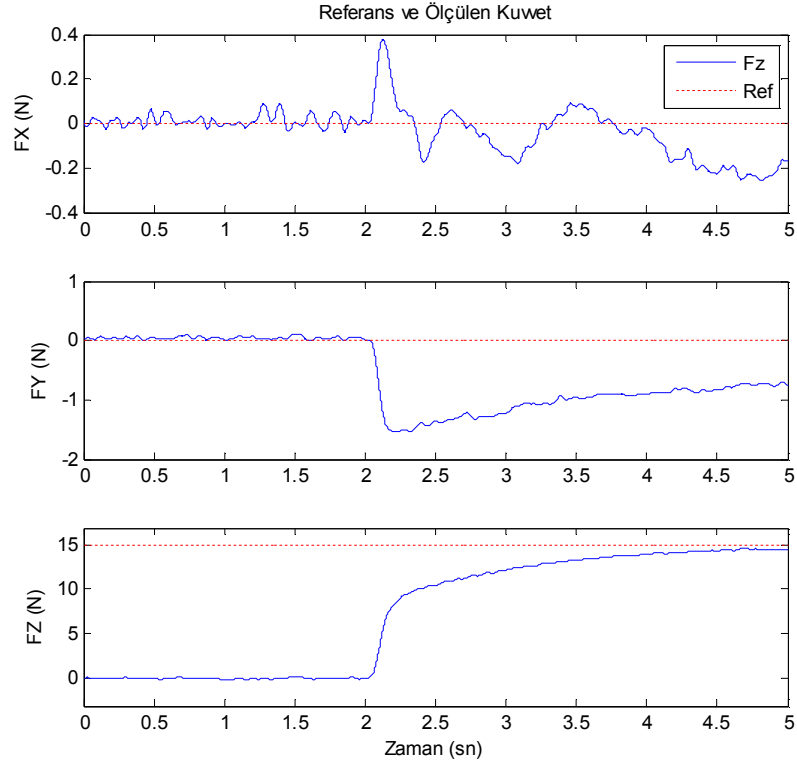
Şekil 5.37 ve 5.38’de, robota 10 mm uzaklıktaki 4700 N/m yay sabitine sahip bir süngere doğru 15 N’lik kuvvet ve +z ekseninde 15 mm’lik konum ve x ekseninde 5° ’lik dönme referans girişi sonucunda elde edilen kuvvet ve konum yanıtları görülmektedir. Şekil 5.37’den görülebileceği gibi x ekseninde hiç kuvvet ortaya çıkmazken y ekseninde ortaya çıkan 1.5 N’lik kuvvet elimine edilmiştir. z ekseninde arzu edilen empedans / kuvvet denetimi sağlanmıştır ve kalıcı durum hatası giderilmiştir. Şekil 5.38’de ise robotun üç eksenindeki konum güncellemeleri görülmektedir.



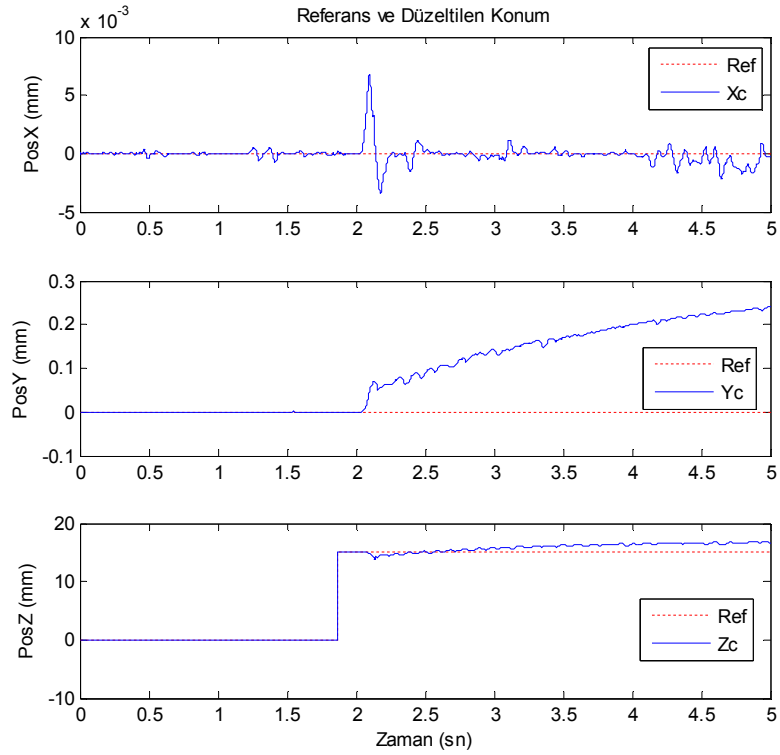
Şekil 5.35. +z ekseninde 15 N ve 15 mm referans girişi altında elde edilen empedans / kuvvet yanıtları



Şekil 5.36. +z ekseninde 15 N ve 15 mm referans girişi altında elde edilen konum ve değişimleri



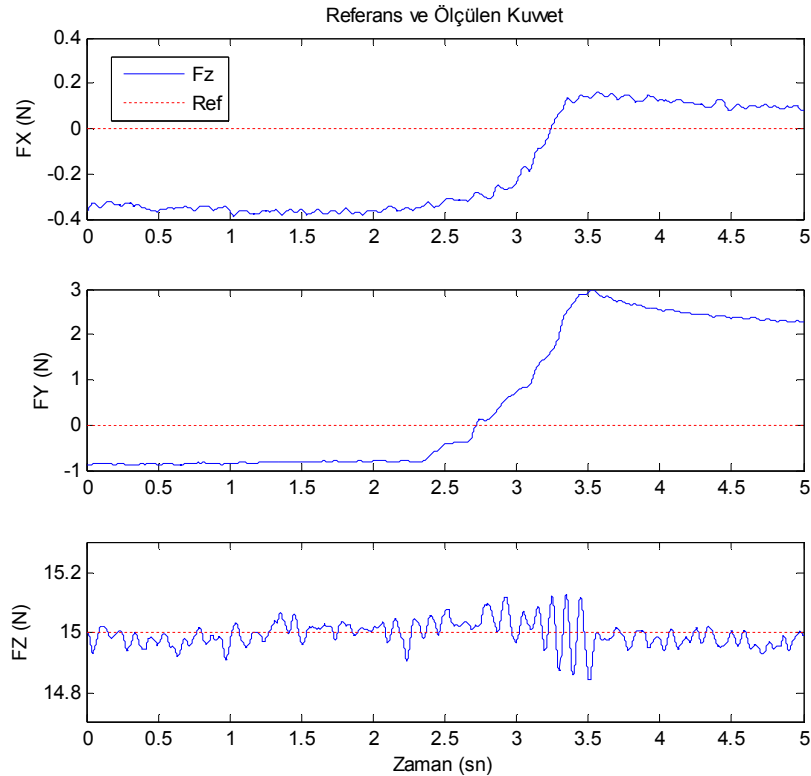
Şekil 5.37. +z ekseninde 15 N, 15 mm ve x ekseninde 5° dönme referans girişi altında elde edilen empedans / kuvvet yanıtları



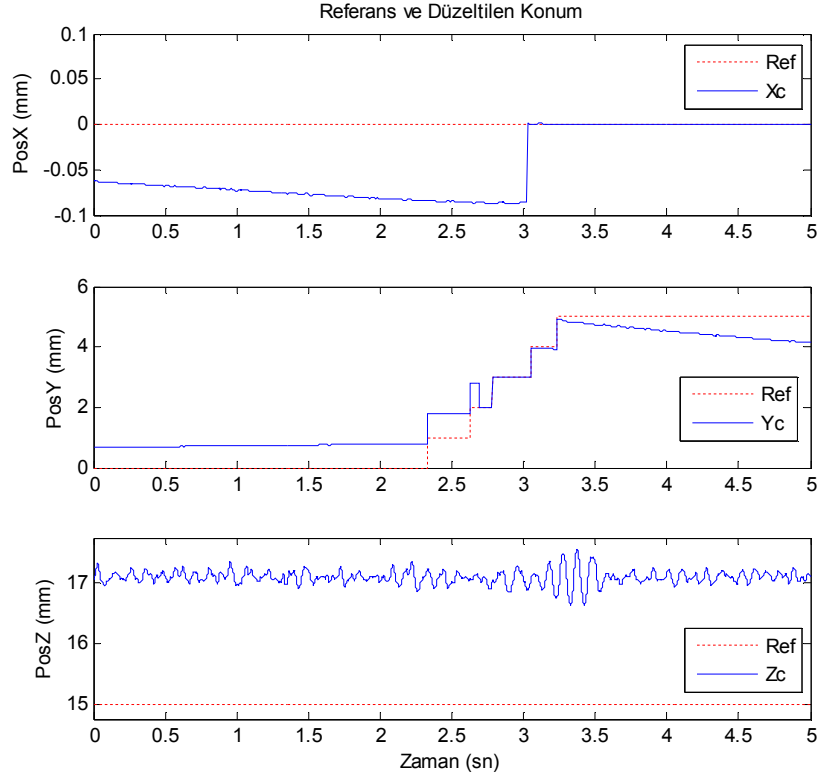
Şekil 5.38. +z'de 15 N, 15 mm ve x ekseninde 5° dönme referans girişi altında elde edilen konum ve değişimleri

Şekil 5.39 ve 5.40’da, robota 10 mm uzaklıktaki 4700 N/m yay sabitine sahip bir süngere z ekseninde 15 N’lık kuvvet uygulanırken, robotun y ekseninde hareket ettirilmesi sonucunda elde edilen kuvvet ve konum yanıtları görülmektedir. Şekil 5.39’dan görülebileceği gibi x ve y eksenlerinde ortaya çıkan kuvvetler regüle edilirken, z ekseninde referans kuvvet denetimi sağlanmıştır. Şekil 5.40’da ise robotun üç eksendeki konum güncellemeleri görülmektedir. y ekseninde 5 mm’lik hareket gerçekleştirilmiştir.

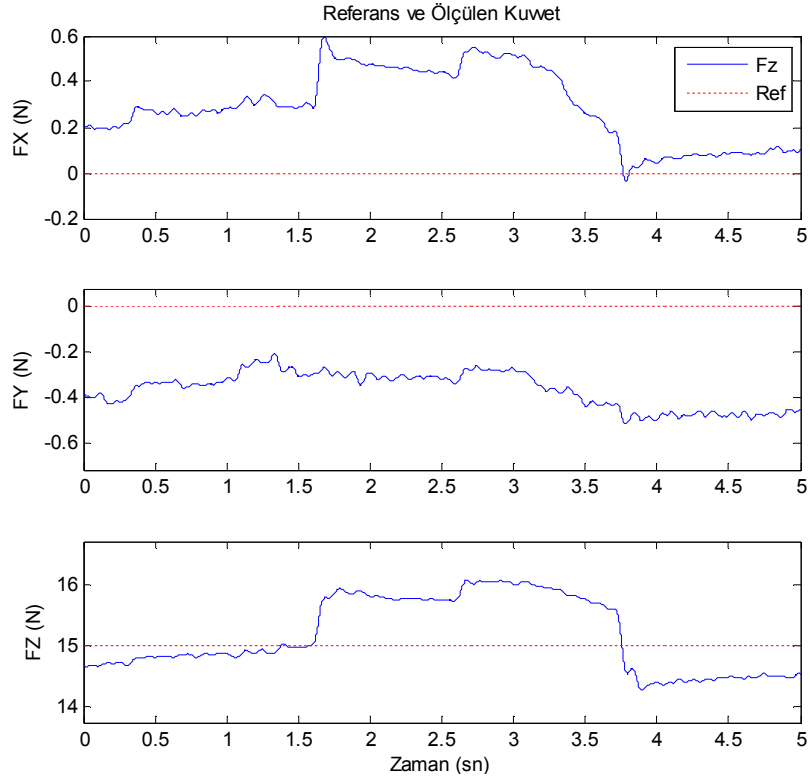
Şekil 5.41’de ise aynı cisme z ekseninde 15 N kuvvet uygulanırken z ekseninde 1 mm’lik ileri-geri yönlü konum girişleri sonucunda elde edilen empedans / kuvvet yanıtları görülmektedir. Her bir mm’lik giriş için normalde 4.7 N kuvvet ortaya çıkması gerekirken, görüldüğü gibi sadece 1 N kuvvet değişimi görülmektedir ve integratör tarafından hata yok edilmektedir. Konum referansı değişmesine rağmen z ekseninde arzu edilen empedans / kuvvet denetimi sağlanmıştır. Şekil 5.42’de ise robotun üç eksendeki konum değişimleri görülmektedir.



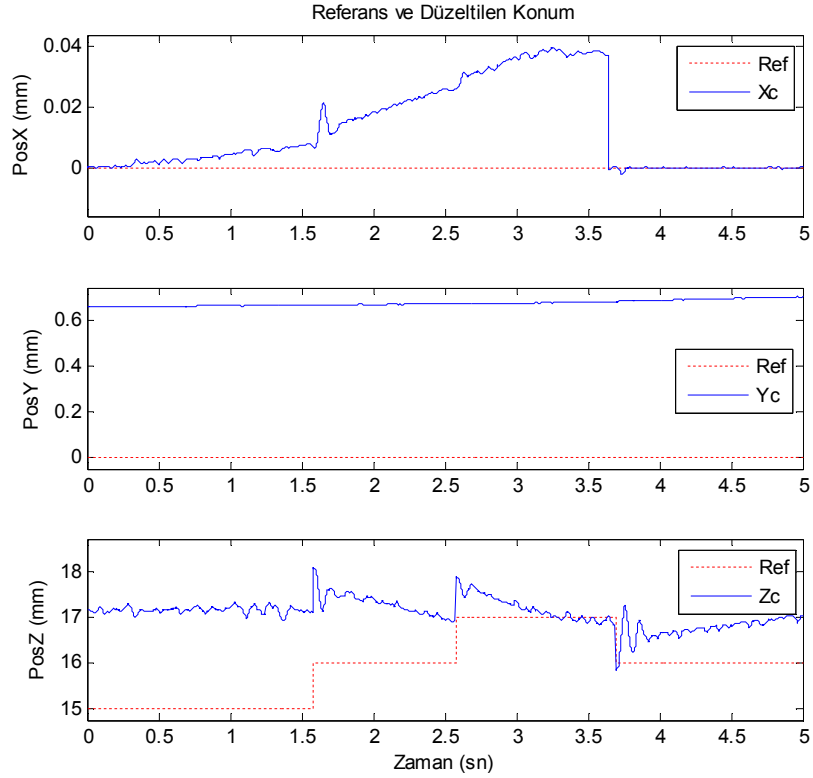
Şekil 5.39. + z ekseninde 15 N uygulanırken y ekseninde konum değişimi girişi altında elde edilen empedans / kuvvet yanıtları



Şekil 5.40. +z'de 15 N uygulanırken y ekseninde konum değişimi girişi altında elde edilen konum ve değişimleri



Şekil 5.41. +z'lü 15 N kuvvet uygulanırken ileri yönlü konum girişi altında elde edilen empedans / kuvvet yanıtları

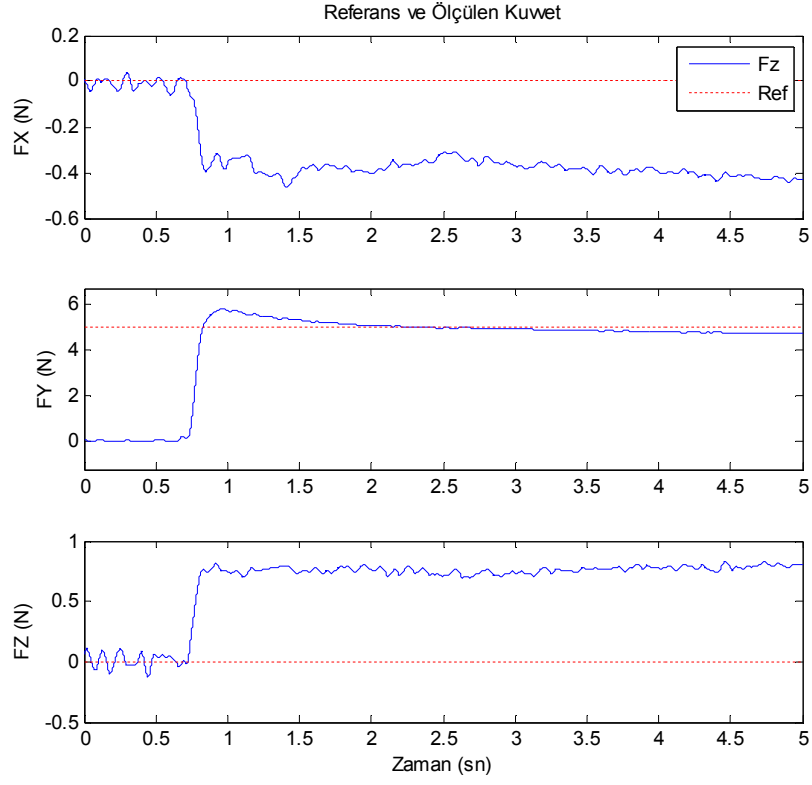


Şekil 5.42. +z ekseninde 15 N kuvvet uygulanırken ileri yönlü konum girişi altında elde edilen konum ve değişimleri

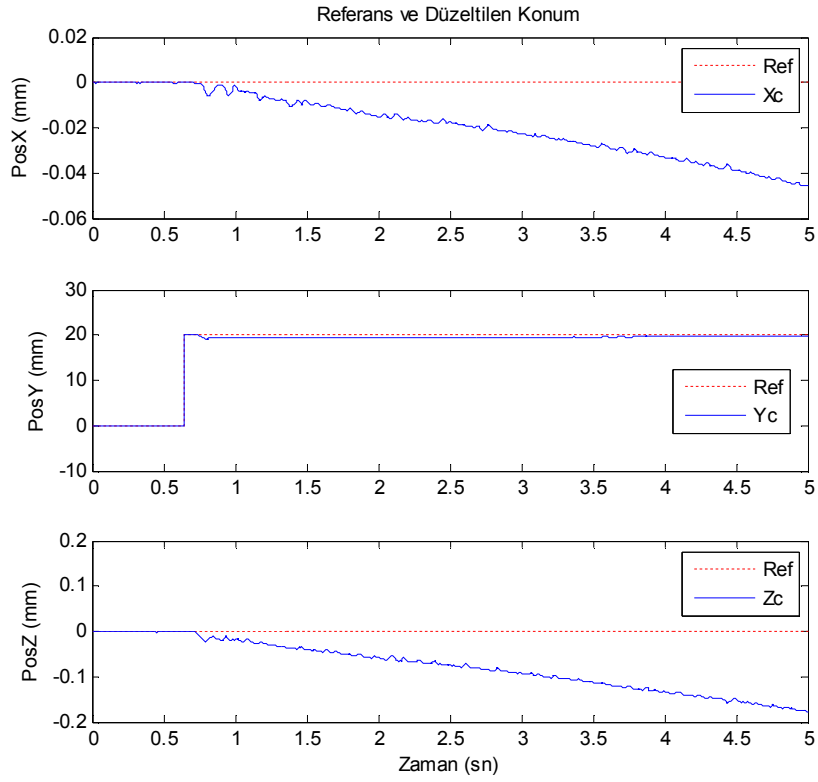
z ekseninde yapılan deneylerden sonra diğer eksenlerde de birçok deney gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.43 ve 5.44’te, robota 10 mm uzaklıktaki 4700 N/m yay sabitine sahip bir süngere doğru 5 N’lık kuvvet ve + y ekseninde 20 mm’lik konum girişi sonucunda elde edilen kuvvet ve konum yanıtları görülmektedir.

Şekil 5.45 ve 5.46’da, robota 15 mm uzaklıktaki 4700 N/m yay sabitine sahip bir süngere doğru -5 N’lık kuvvet ve - x ekseninde -20 mm’lik konum girişi sonucunda elde edilen kuvvet ve konum yanıtları görülmektedir.

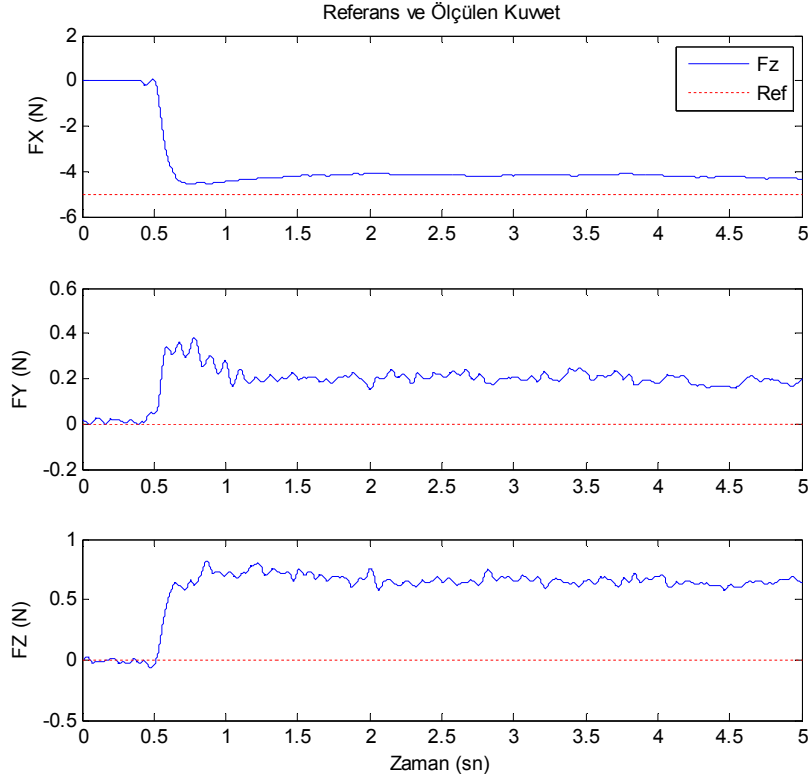
Şekil 5.47 ve 5.48’de ise, robota 15 mm uzaklıktaki 4700 N/m yay sabitine sahip bir süngere doğru -5 N’lık kuvvet ve - x ekseninde -22 mm’lik konum girişi sonucunda elde edilen kuvvet ve konum yanıtları görülmektedir.



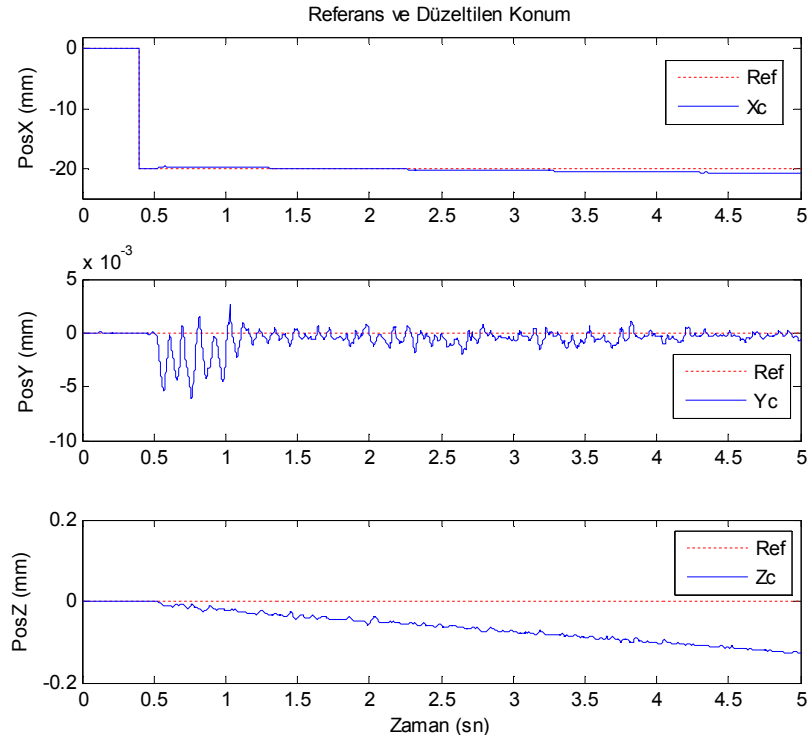
Şekil 5.43. +y ekseninde 5 N ve 20 mm referans girişi altında elde edilen empedans / kuvvet yanıtları



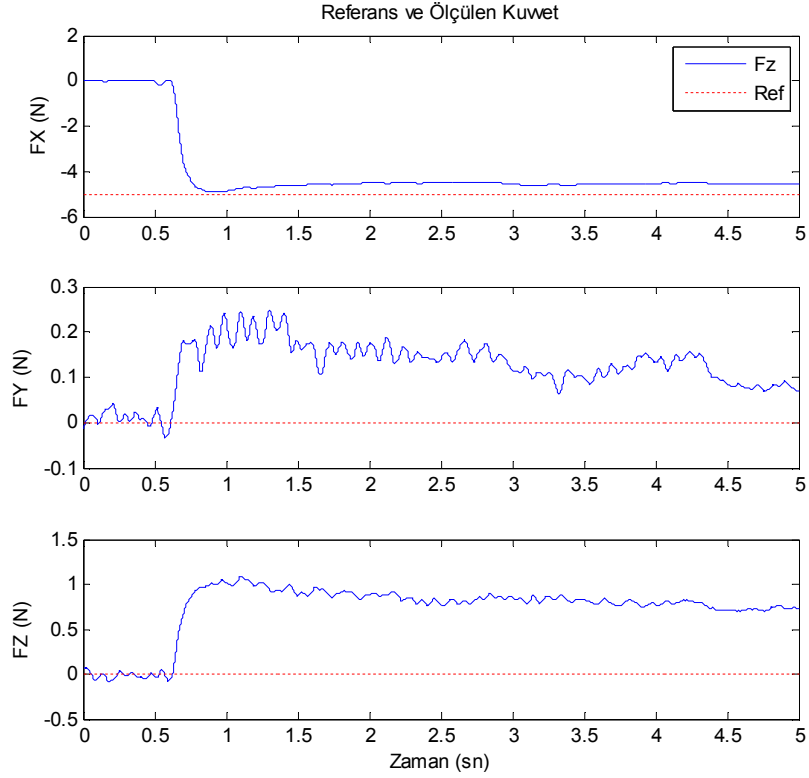
Şekil 5.44. +y ekseninde 5 N ve 20 mm referans girişi altında elde edilen konum ve değişimleri



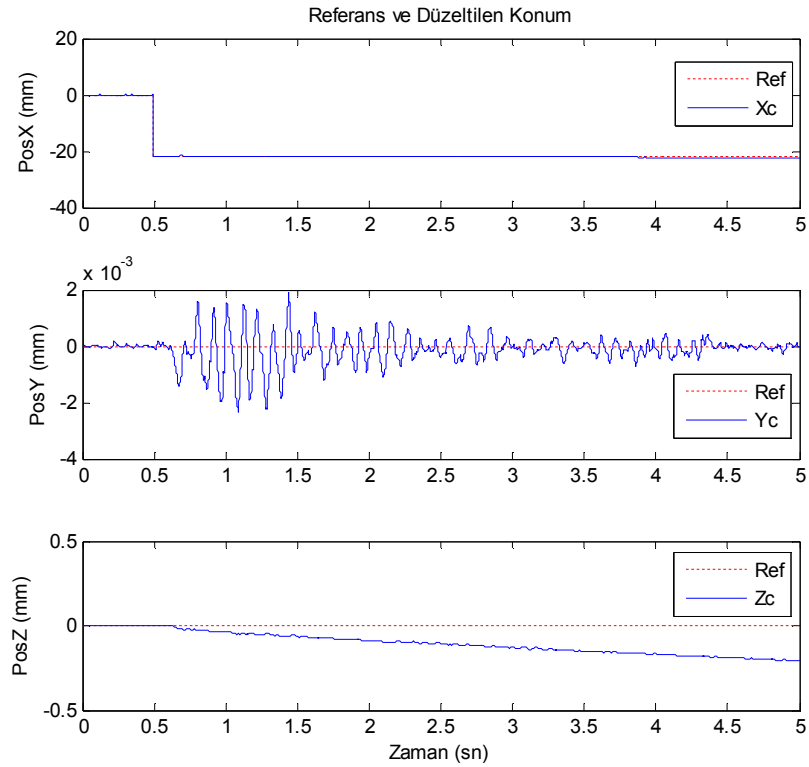
Şekil 5.45. -x ekseninde -5 N ve -20 mm referans girişi altında elde edilen empedans / kuvvet yanıtları



Şekil 5.46. -x ekseninde -5 N ve -20 mm referans girişi altında elde edilen konum ve değişimleri



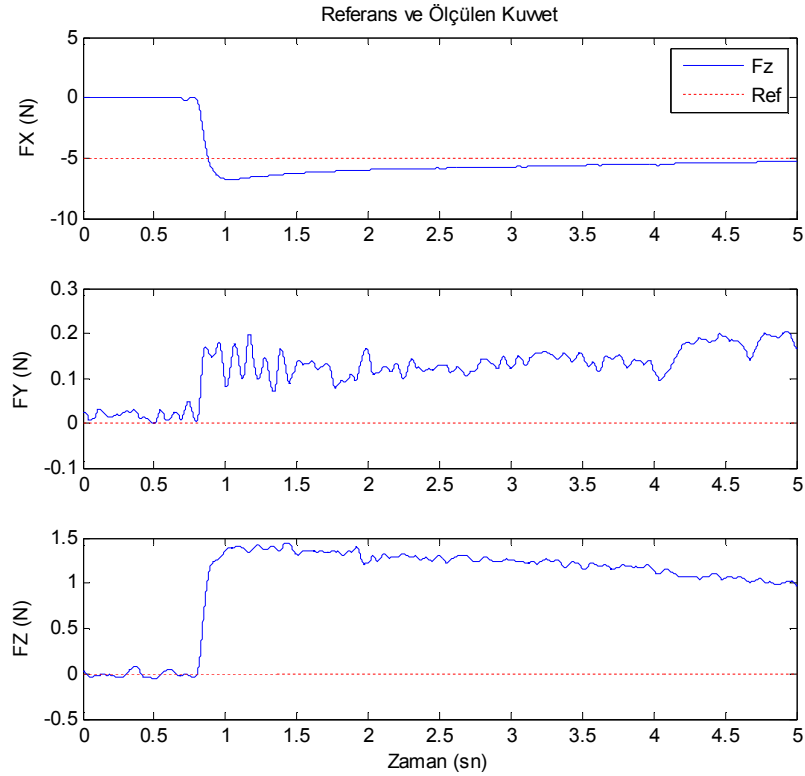
Şekil 5.47. -x ekseninde -5 N ve -22 mm referans girişi altında elde edilen empedans / kuvvet yanıtları



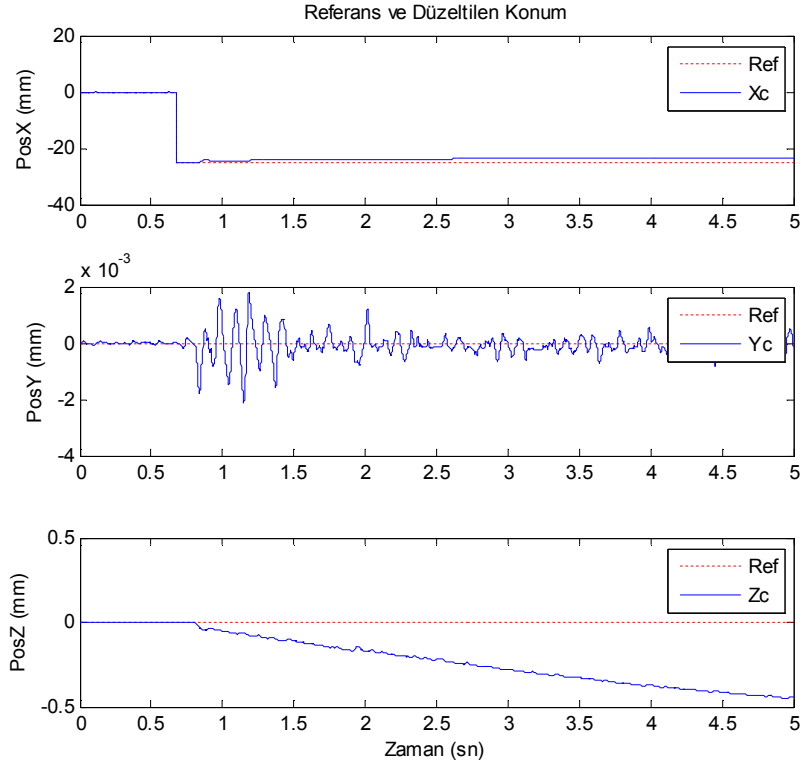
Şekil 5.48. -x ekseninde -5 N ve -22 mm referans girişi altında elde edilen konum ve değişimleri

Şekil 5.49 ve 5.50’de ise, robota 15 mm uzaklıktaki 4700 N/m yay sabitine sahip bir süngere doğru -5 N’lik kuvvet ve -x ekseninde -25 mm’lik konum girişi sonucunda elde edilen kuvvet ve konum yanıtları görülmektedir. Farklı konum referansları girişlerine rağmen benzer cevaplar alınmıştır.

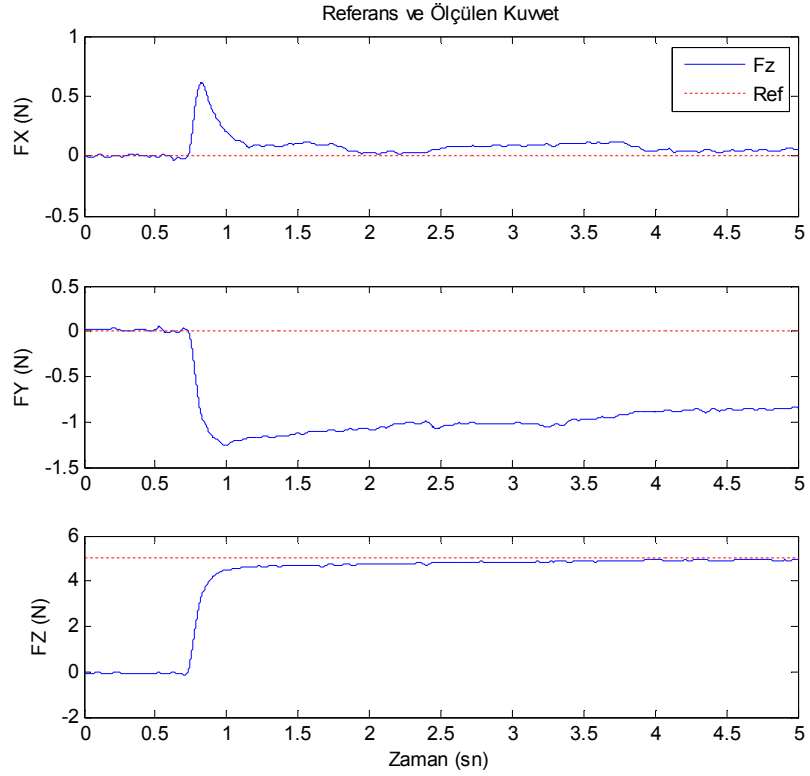
Yukarıda verilen aynı cisimle gerçekleştirilen deneyler dışında farklı sertlikteki yaylar kullanılarak deneyler yapılmıştır. Şekil 5.51 ve 5.52’de robota 13 mm uzaklıktaki 5000 N/m yay sabitine sahip bir yaya doğru 5 N’lik kuvvet ve +z ekseninde 15 mm’lik konum girişi sonucunda elde edilen yanıtlar görülmektedir. Denetleyici farklı cisimle temas halinde benzer performans sergilemiştir.



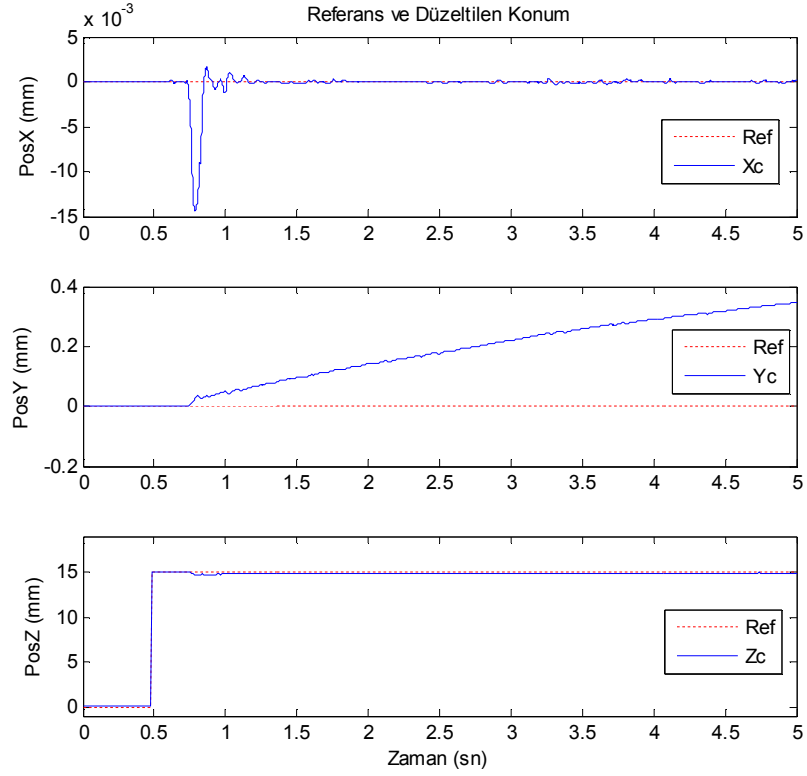
Şekil 5.49. -x ekseninde -5 N ve -25 mm referans girişi altında elde edilen empedans / kuvvet yanıtları



Şekil 5.50. -x ekseninde -5 N ve -25 mm referans girişi altında elde edilen konum ve değişimleri



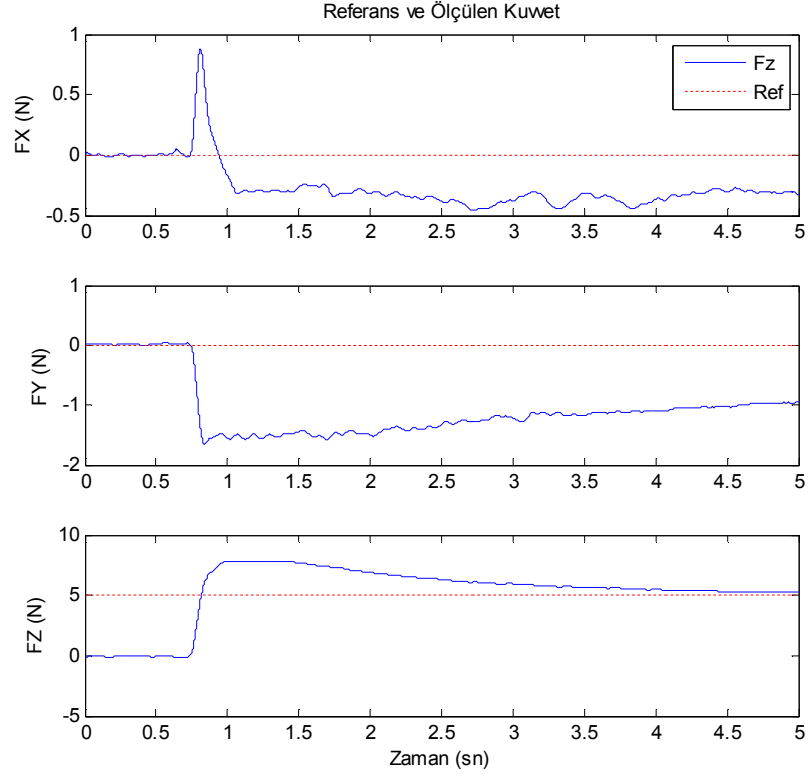
Şekil 5.51. +z ekseninde 5 N ve 15 mm referans girişi altında elde edilen empedans / kuvvet yanıtları (yay-1)



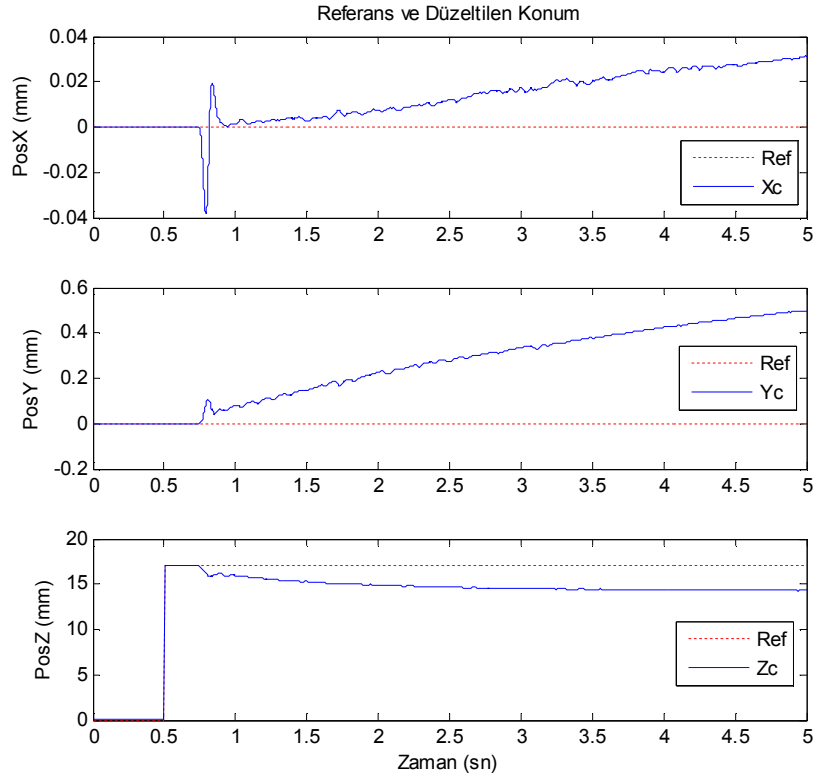
Şekil 5.52. +z ekseninde 5 N ve 15 mm referans girişi altında elde edilen konum ve değişimleri (yay-1)

Şekil 5.53 ve 5.54'te ise, robota 13 mm uzaklıktaki 5000 N/m yay sabitine sahip bir yaya doğru 5 N'lik kuvvet ve +z ekseninde 17 mm'lik konum girişi sonucunda elde edilen yanıtlar görülmektedir. Arzu edilen empedans / kuvvet kontrolü sağlanmıştır.

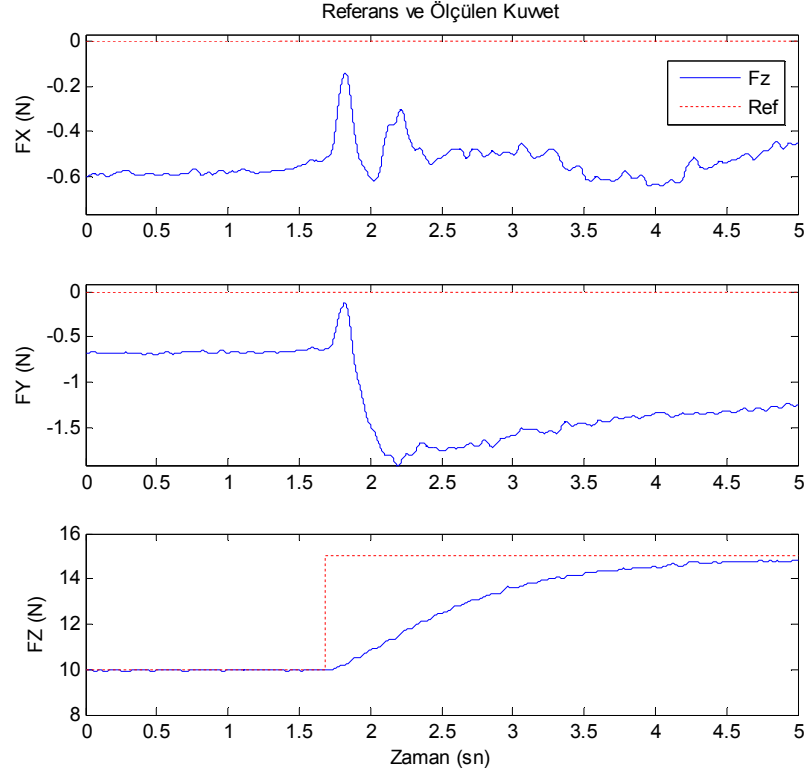
Şekil 5.55 ve 5.56'da ise, robota 13 mm uzaklıktaki 5000 N/m yay sabitine sahip bir yaya 10 N kuvvet uygulanırken 15 N'lik referans girişi altında elde edilen empedans / kuvvet yanıtları görülmektedir.



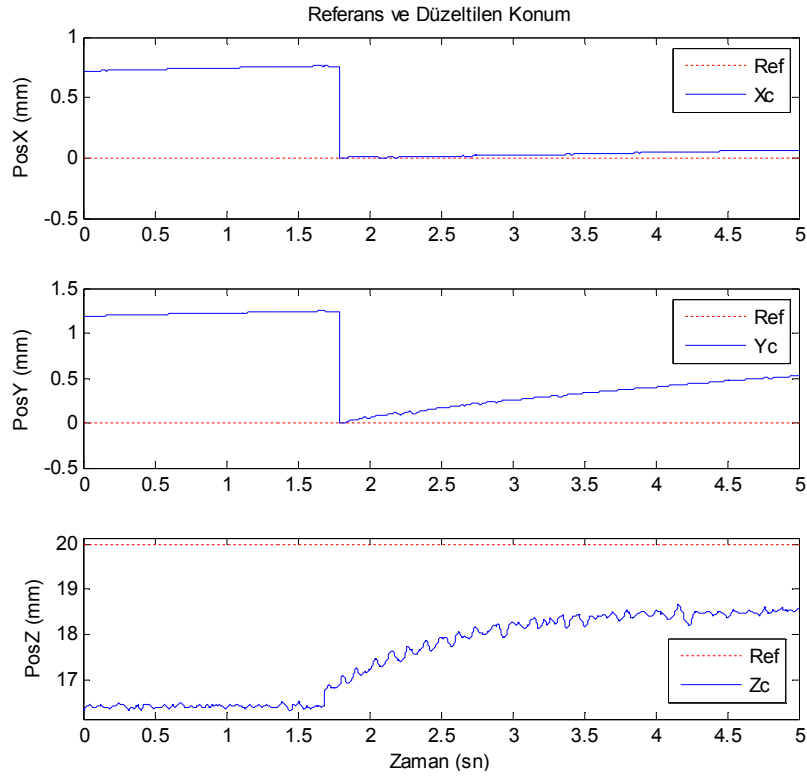
Şekil 5.53. +z ekseninde 5 N ve 17 mm referans girişi altında elde edilen empedans / kuvvet yanıtları (yay-1)



Şekil 5.54. +z ekseninde 5 N ve 17 mm referans girişi altında elde edilen konum ve değişimleri (yay-1)



Şekil 5.55. +z’de 10 N kuvvet uygulanırken 15 N’lık giriş altında elde edilen empedans / kuvvet yanıtları (yay-1)

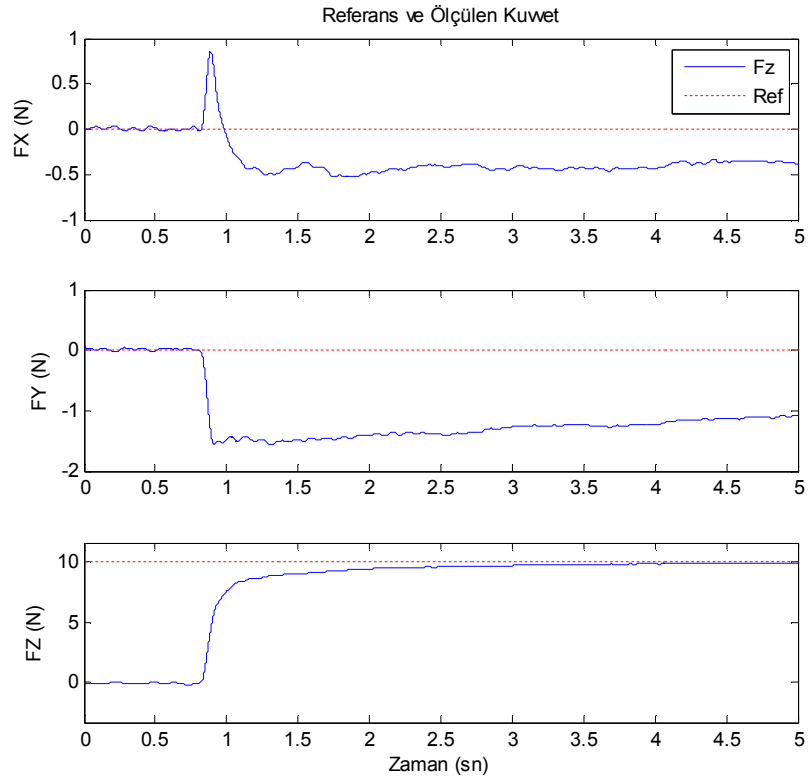


Şekil 5.56. +z ekseninde 10 N kuvvet uygulanırken 15 N’lık referans girişi altında elde edilen konum ve değişimleri (yay-1)

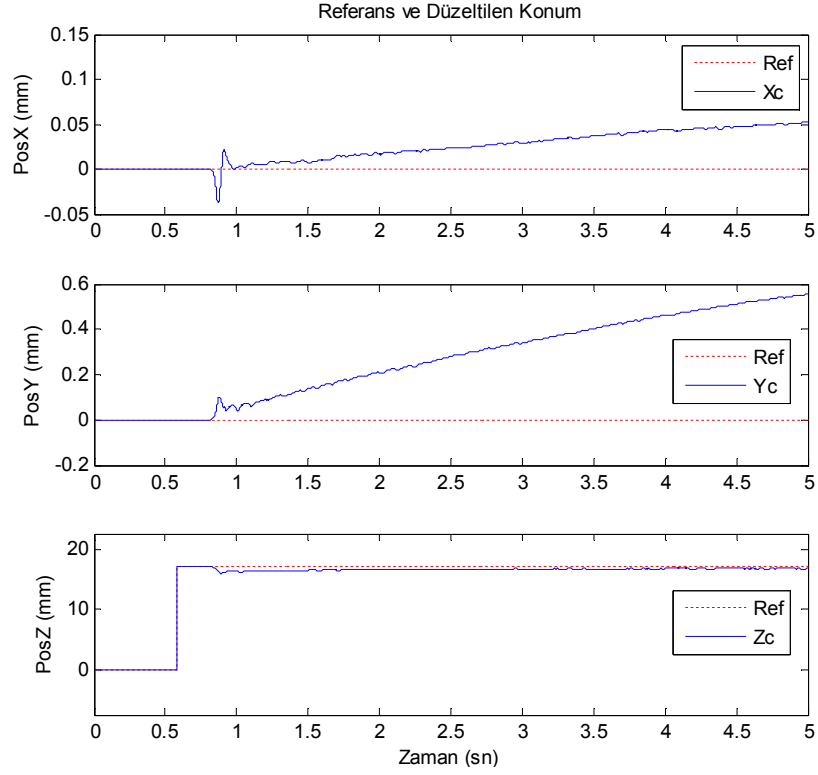
Şekil 5.57 ve 5.58’de, robota 13 mm uzaklıktaki 5000 N/m yay sabitine sahip bir yaya doğru 10 N’lik kuvvet ve +z ekseninde 17 mm’lik konum girişi sonucunda elde edilen yanıtlar görülmektedir.

Şekil 5.59 ve 5.60’da, robota 13 mm uzaklıktaki 5000 N/m yay sabitine sahip bir yaya doğru 10 N’lik kuvvet ve +z ekseninde 20 mm’lik konum girişi sonucunda elde edilen yanıtlar görülmektedir.

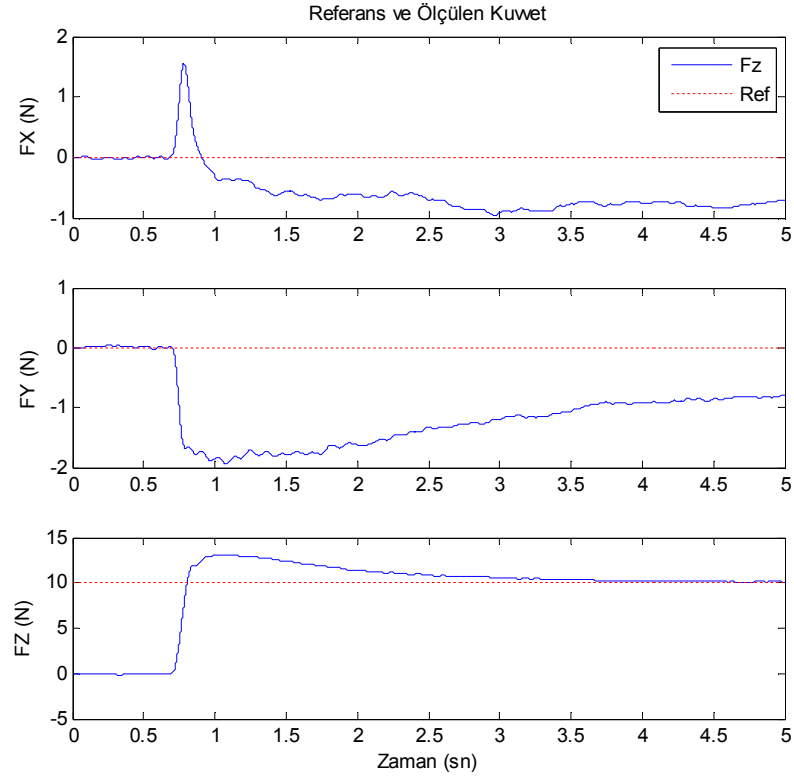
Şekil 5.61 ve 5.62’de, robota 13 mm uzaklıktaki 5000 N/m yay sabitine sahip bir yaya doğru 15 N’lik kuvvet ve +z ekseninde 20 mm’lik konum girişi sonucunda elde edilen yanıtlar görülmektedir. Farklı kuvvet konum referansı girişleri altında sistem arzu edilen etkileşim ve kuvvet kontrol performansı sergilemiştir.



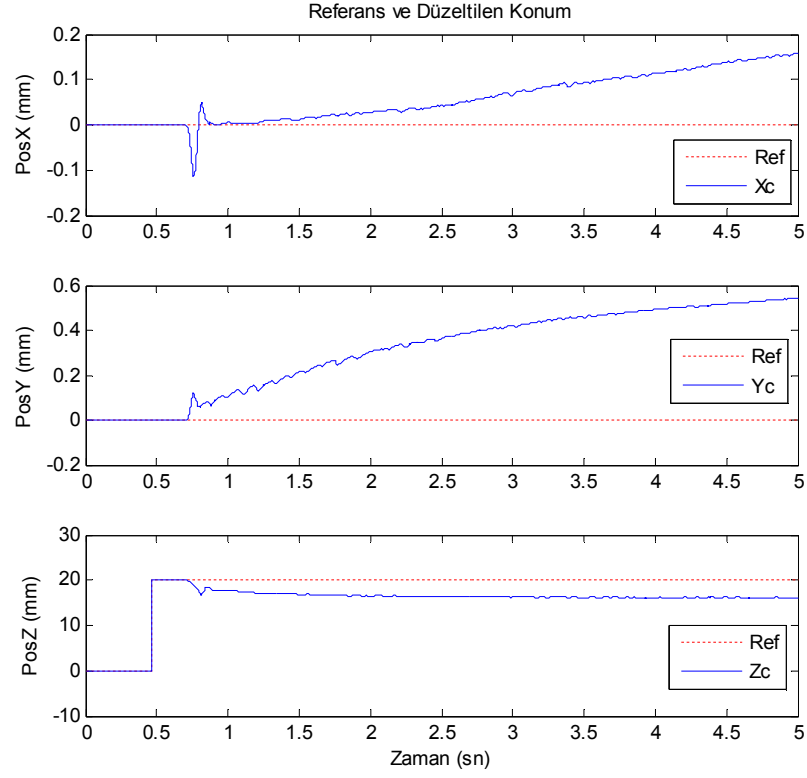
Şekil 5.57. +z ekseninde 10 N ve 17 mm referans girişi altında elde edilen empedans / kuvvet yanıtları (yay-1)



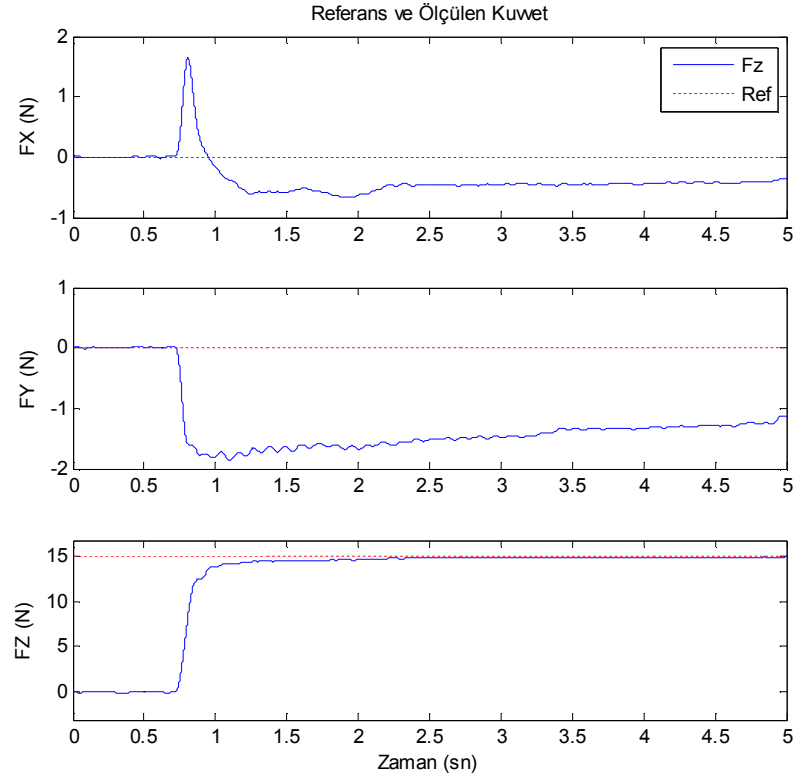
Şekil 5.58. +z ekseninde 10 N ve 17 mm referans girişi altında elde edilen konum ve değişimleri (yay-1)



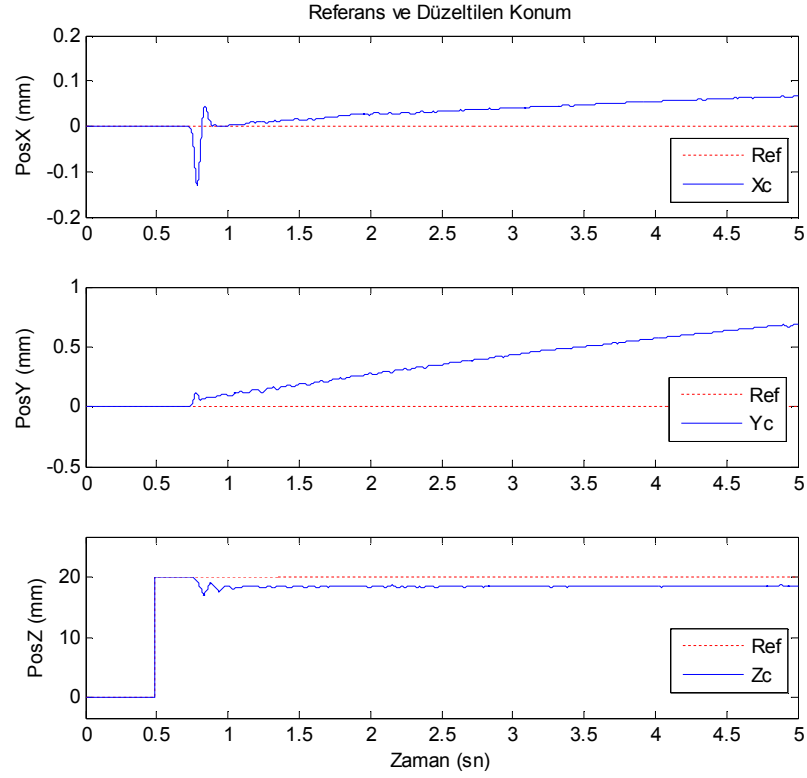
Şekil 5.59. +z ekseninde 10 N ve 20 mm referans girişi altında elde edilen empedans / kuvvet yanıtları (yay-1)



Şekil 5.60. +z ekseninde 10 N ve 20 mm referans girişi altında elde edilen konum ve değişimleri (yay-1)

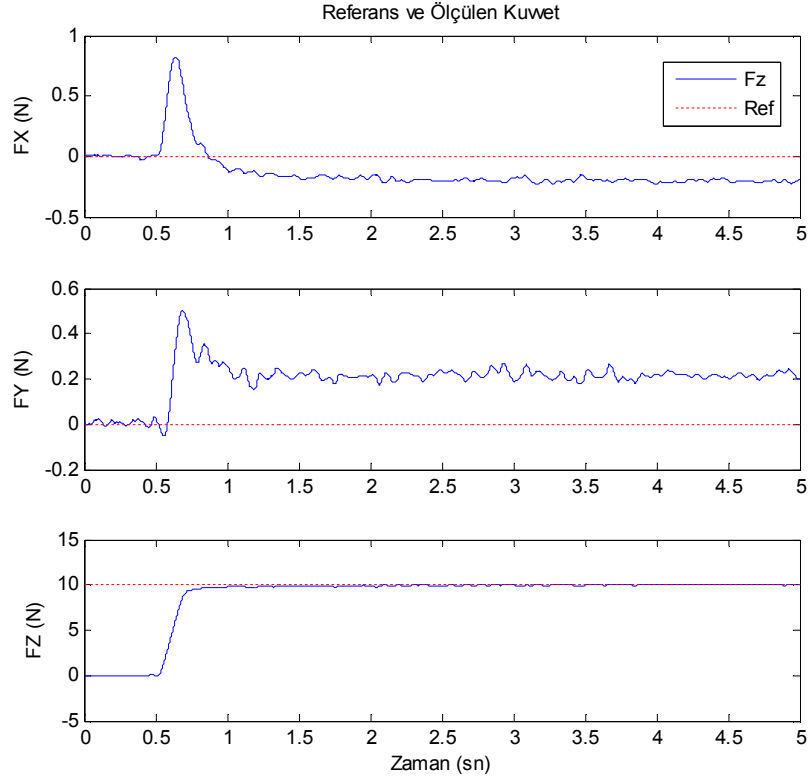


Şekil 5.61. +z ekseninde 15 N ve 20 mm referans girişi altında elde edilen empedans / kuvvet yanıtları (yay-1)

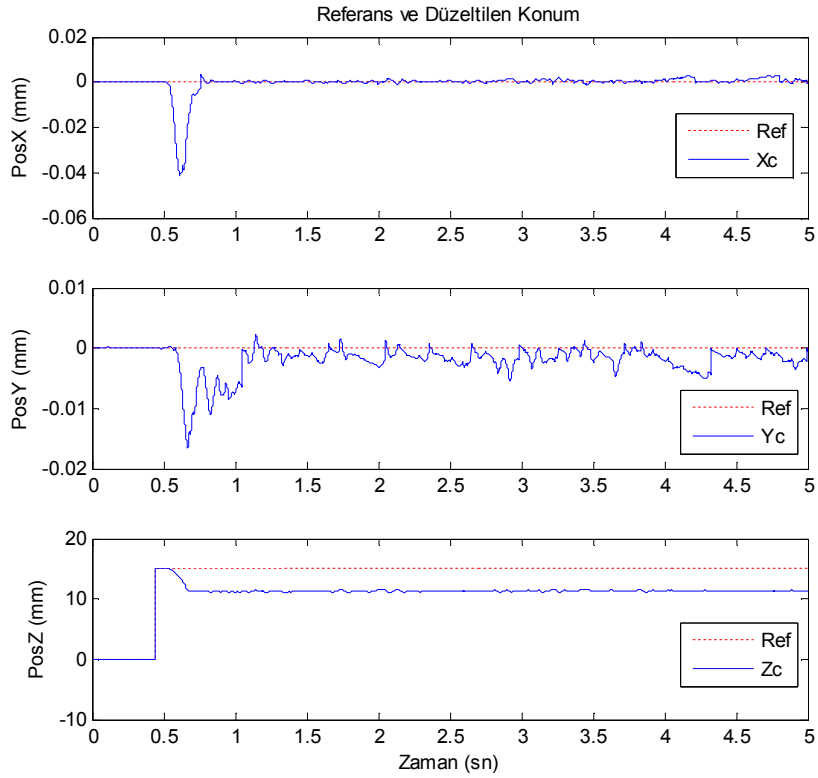


Şekil 5.62. +z ekseninde 15 N ve 20 mm referans girişi altında elde edilen konum ve değişimleri (yay-1)

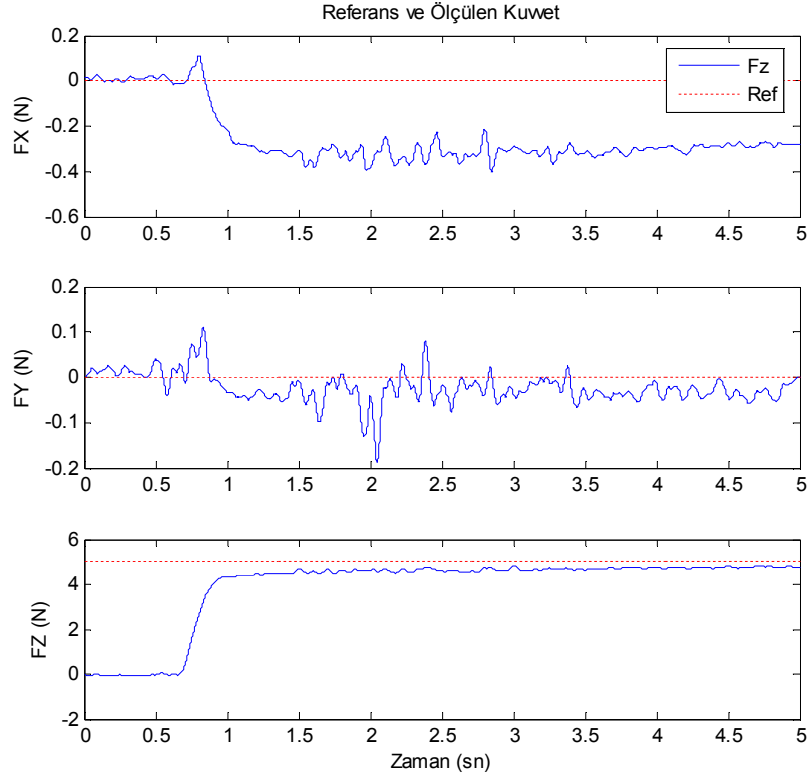
Şekil 5.63'ten Şekil 5.68'e sırasıyla, robota 2, 9 ve 12 mm uzaklıktaki 2300, 800 ve 1400 N/m yay sabitine sahip yaylara doğru 10, 5 ve 5 N'lik kuvvet ve +z ekseninde 15, 20 ve 22 mm'lik konum girişi sonucunda elde edilen yanıtlar görülmektedir. Şekillerden görüldüğü gibi, robotun farklı cisimlerle etkileşime girmesi sonucunda empedans kuvvet denetleyicisi benzer cevaplar üreterek arzu edilen kontrol performansının alınmasını sağlamıştır.



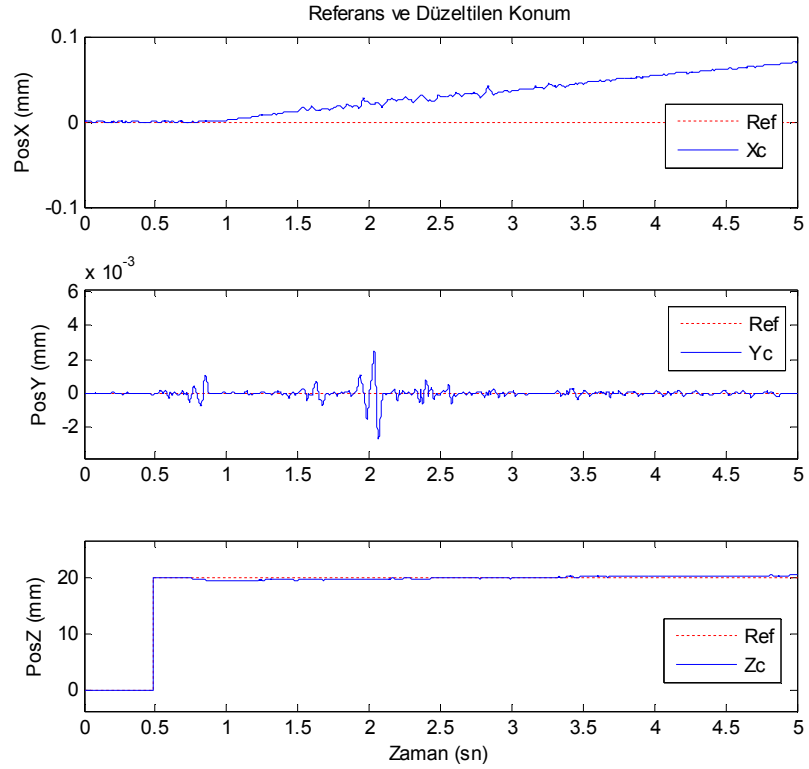
Şekil 5.63. +z ekseninde 10 N ve 15 mm referans girişi altında elde edilen empedans / kuvvet yanıtları (yay-2)



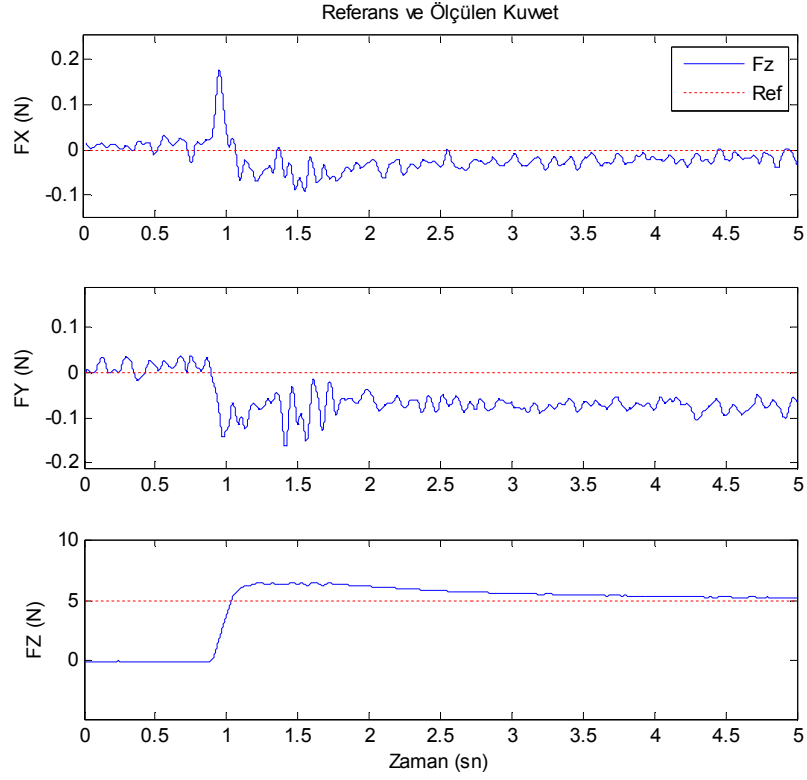
Şekil 5.64. +z ekseninde 10 N ve 15 mm referans girişi altında elde edilen konum ve değişimleri (yay-2)



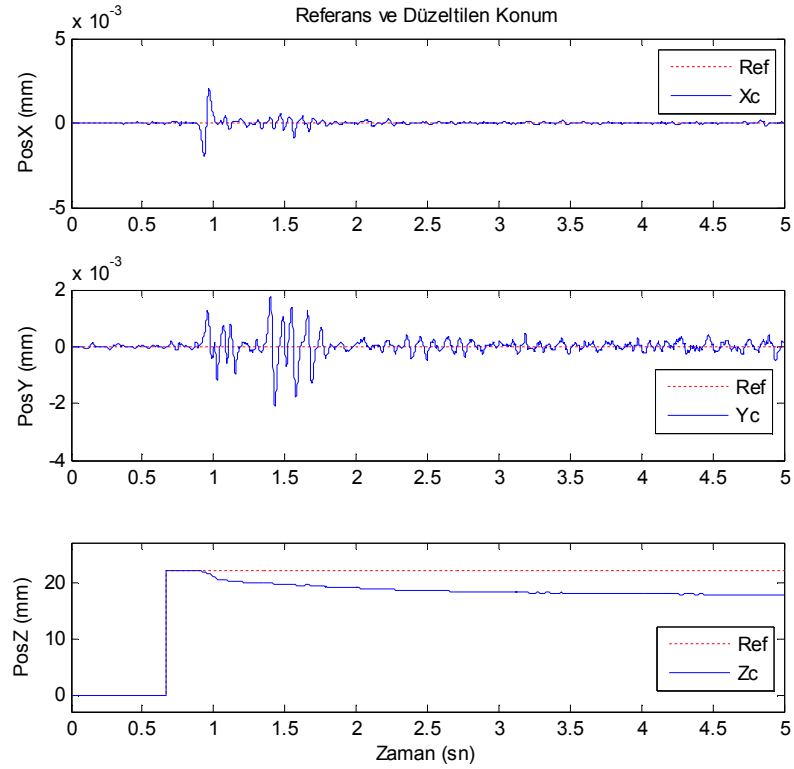
Şekil 5.65. +z ekseninde 5 N ve 20 mm referans girişi altında elde edilen empedans / kuvvet yanıtları (yay-3)



Şekil 5.66. +z ekseninde 5 N ve 20 mm referans girişi altında elde edilen konum ve değişimleri (yay-3)



Şekil 5.67. +z ekseninde 5 N ve 22 mm referans girişi altında elde edilen empedans / kuvvet yanıtları (yay-4)



Şekil 5.68. +z ekseninde 5 N ve 22 mm referans girişi altında elde edilen konum ve değişimleri (yay-4)

6. ENDOSKOP KONUMLAMA

Ülkemizde beyin cerrahisinde ihtiyaç duyulan alanlardan biri olan hipofiz bezi ameliyatlarında (Endoscopic Transsphenoidal Surgery) kullanılmak üzere robotun endoskop konumlayıcı ve tutucu olarak kontrolü hedeflenmiştir. Bu ameliyatlar hipofiz bezinde bulunan tümörün boşaltılmasını amaçlamaktadır ve görüntüleme için yüksek çözünürlüklü endoskoplar kullanılmaktadır. İşlem hastanın burun delikleri yoluyla gerçekleştirilmektedir.

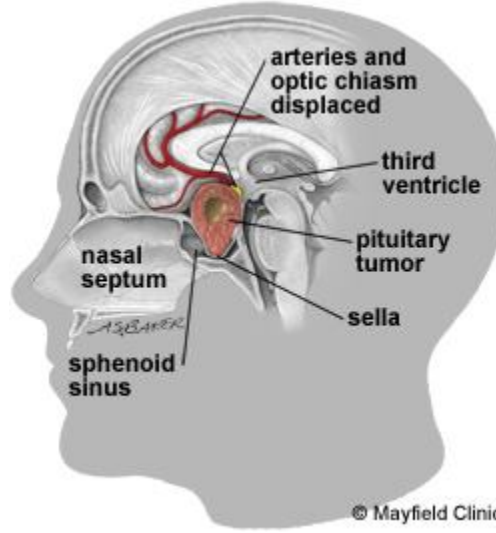
Literatür incelendiğinde bu uygulamanın yanında robotun sahip olduğu özelliklerle aşağıdaki alanlarda kullanılabileceği görülmektedir.

- Ortopedi
 - Kırık kemik yerleştirme ve sabitleme
 - Omurga delme ve vidalama
 - Diz cerrahisi
 - Kalça cerrahisi
 - Rehabilitasyon
- Beyin Cerrahisi
 - Kafatası delme
 - Endoskop tutucu
- Radyoloji
- Göz Cerrahisi
- Plastik Cerrahi
 - Protez
- Diş Hekimliği
 - Damak, diş üretimi

6.1. Endoskopik Transsfenoidal Cerrahi

Transsfenoidal cerrahi, kafatası içerisinde yer alan hipofiz bezi, sella bölgesi ve sfenoid sinüs tümörlerini kaldırmak için yapılır. Şekil 6.1’de bu bölgeler

görülmektedir. Cerrah hipofize doğrudan burundan yaklaşır. Ameliyat bir mikroskop ya da daha yaygın olarak bir endoskop kullanılarak minimal invaziv tekniği ile yapılabilir. Hipofiz tümörleri çeşitli hormon sorunlarına yol açar ve büyüyerek beynin tabanındaki önemli sinirleri ve arterleri sıkıştırır. Bu durumda, özellikle görme riski oluştuğunda, tümörü kaldırmak için cerrahi girişim gereklidir [84].



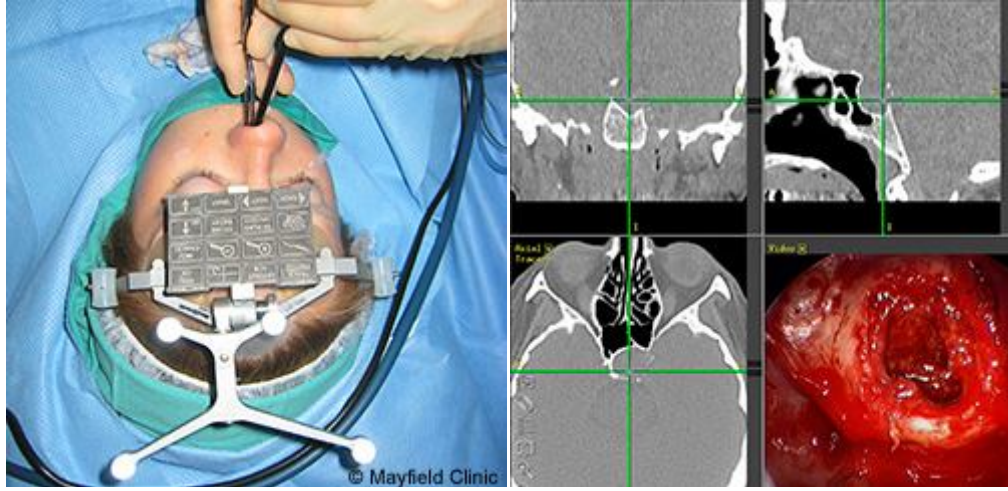
Şekil 6.1. Hipofiz bezi, sella bölgesi ve sfenoid sinüs tümörleri [84]

Geleneksel mikroskopik tekniği ile yapılan ameliyatlarda, cerrahın doğrudan alanı görebilmesi için cildin kesilmesi ve genizden büyük bir bölümün alınması gerekmektedir. Endoskopik cerrahi olarak adlandırılan minimal invaziv tekniğiyle ise burun boşluğunun arka tarafında küçük bir kesi kullanır ve böylece geniz dokularında az bozulma olmaktadır. Cerrah endoskop denilen küçük bir kamera ve ışık ile burun delikleri yoluyla çalışır. Her iki teknikte de, hipofize ulaşmak için geniz bölümü, sfenoid sinüs ve sella açılır. Hipofiz ortaya çıktığında beyin cerrahı tümörü kaldırır [84].

Genellikle 2-3 saat süren bu ameliyat 6 adımdan oluşmaktadır [84]. İlk olarak hasta hazır hale getirilir. Hasta ameliyat masasına sırt üstü yatırılır. Genel anestezi uygulanır ve burun boşluğu antibiyotik ve antiseptik solüsyon ile hazırlanır.

Bir görüntü yönlendirme sistemini (Şekil 6.2) hastanın başının üzerine yerleştirilebilir. Bu cihaz bir küresel konumlandırma sistemi (GPS) gibidir ve cerraha

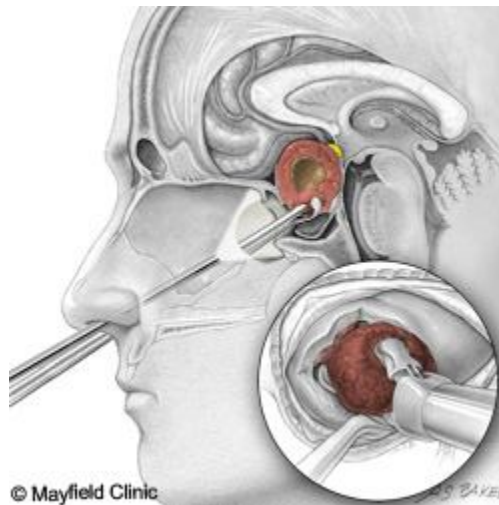
CT veya MRI tarayıcıları ile oluşturulan 3D "harita" ile burun içinde gezinmeye yardımcı olur.



Şekil 6.2. Ameliyat sırasında görüntü yönlendirme sisteminin kullanımı [84]

Cerrah endoskobu bir burun deliğine sokar ve burun boşluğunun arkasına doğru ilerler. Kameradan alınan video ekranda görüntülenir. Cerrah, ekranı izlerken burun deliğinden uzun tıbbi araçlar geçirir. Sol ve sağ burun deliğini bölen burun bölgesinin küçük bir parçası kesilir. Kemik kesen araçlar kullanılarak, sfenoid sinüs'ün ön duvarı açılır.

Sfenoid sinüsün arka duvarında yer alan ve sella denilen hipofiz bezini örten bir kemik vardır. İnce sella kemiği kaldırılarak dura denilen kafatasının sert kanalı ortaya çıkarılır. Dura açılarak tümör ve hipofiz bezine ulaşılır.



Şekil 6.3. Tümörün alınması [84]

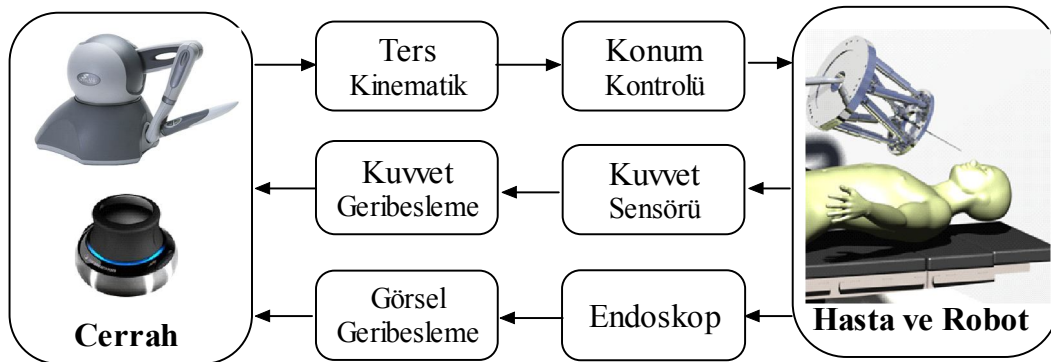
Selladaki küçük bir delik sayesinde, tümör (Şekil 6.3) küretler denilen özel araçlarla beyin cerrahı tarafından alınır.

Tümör çıkarıldıktan sonra, cerrah tümör boşluğunu doldurmak için yağ dokusu nakleder. Son olarak selladaki boşluk kemik nakliyle doldurularak ameliyat sonlandırılır.

6.2. Stewart Platformu ile Endoskop Konumlama ve Tutma

Hasta ameliyata hazırlandıktan sonra, cerrah sol elini kullanarak ameliyat süresince endoskopu tutması ve yönlendirilmesi gerekmektedir. Diğer eliyle ise görüntü eşliğinde cerrahi ekipmanları kullanarak ameliyatı gerçekleştirmektedir. İki-üç saat ya da daha fazla sürebilen bir ameliyatta cerrah çok yorulmaktadır. Bu dezavantajları ortadan kaldırmak için uzaysal fare ya da haptik vasıtasıyla robot sisteminin konum kontrolü gerçekleştirilerek uygulamalar yapılmıştır.

Robot haptik ve fare kullanılarak yönlendirilebilmektedir. Haptik çalışma uzayı robot ile eşleştirilerek kullanılabileceği gibi, artımsal olarak çalışması da sağlanabilir. Fare ise artımsal olarak çalışmaktadır. Şekil 6.4’de sistemin genel blok diyagramı verilmiştir.

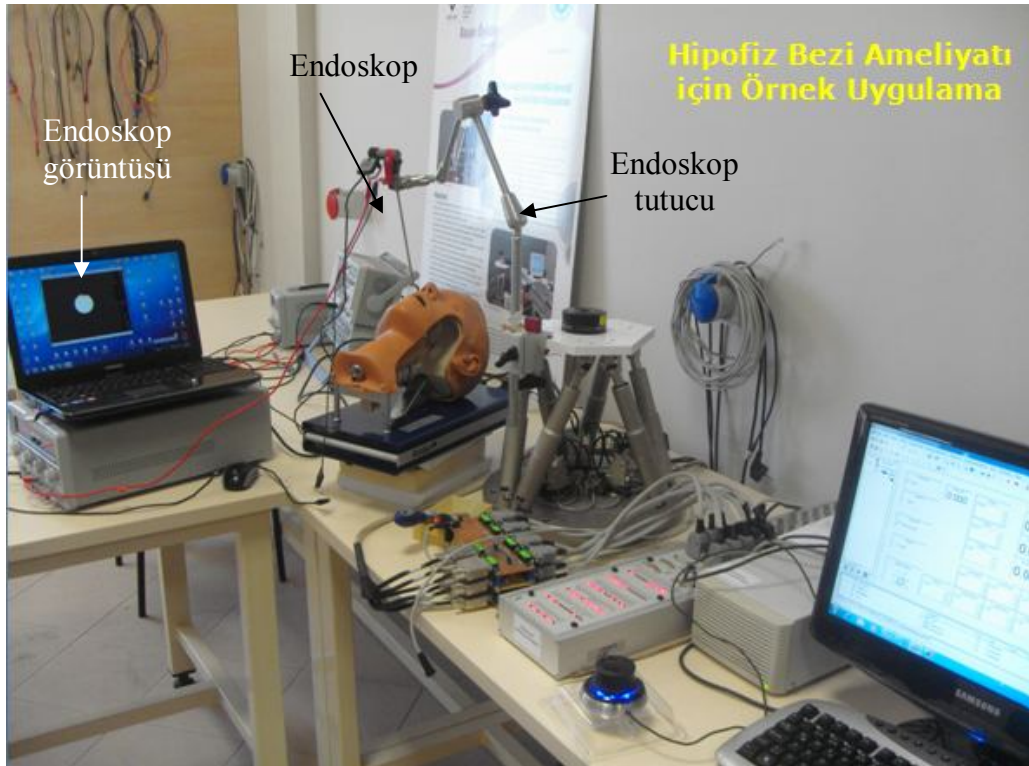


Şekil 6.4. Endoskop konumlama sisteminin genel blok diyagramı

Haptik ile robot çalışma uzayı oranlanarak eşleştirilmiştir. Haptikten alınan Kartezyen konum ve oryantasyon komutları ters kinematik sonucunda bacak boylarına dönüştürülmüştür. Aynı zamanda 6 eksen kuvvet sensöründen alınan kuvvet sinyalleri işlenerek haptiğe yansıtılabilmektedir.

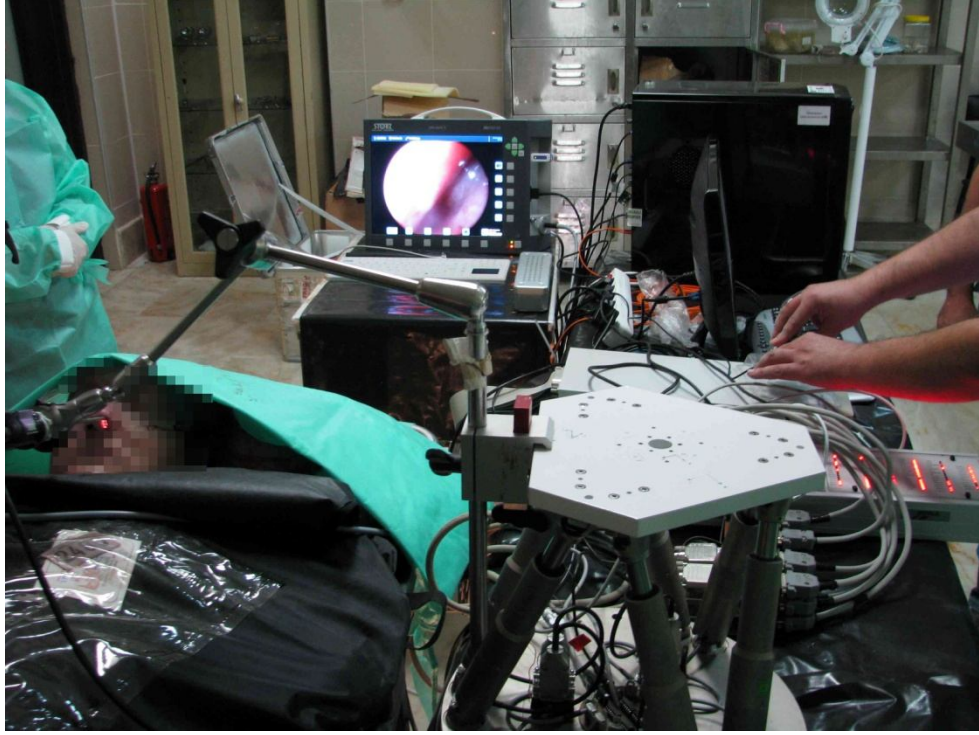
4. ve 5. bölümlerde SP'nin konum ve kuvvet kontrolü ele alınmıştı. 4. bölümde haptik ve fare ile yapılan konum kontrolüne ilişkin gerçek zamanlı deneysel sonuçlar sunulmuştur. Sonuçlardan görülebileceği gibi robot haptik ve fare tarafından üretilen yörüngeyi takip etmiştir. Ayrıca robotun herhangi bir cisimle temas durumunda ölçülen ve haptik tarafından yansıtılan kuvvet değişimleri de verilmiştir.

Buna göre bir insan kafa modeli üzerinde beyin cerrahlarının katılımıyla çeşitli uygulamalar yapılmıştır. Şekil 6.5'te uygulama sırasında çekilmiş bir resim görülmektedir.

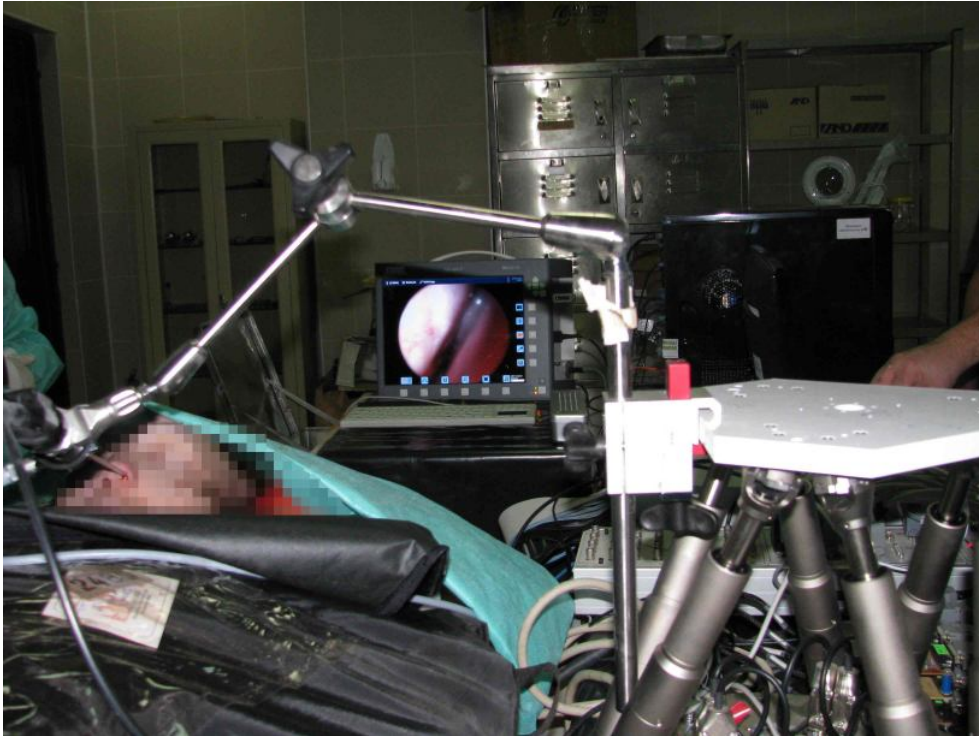


Şekil 6.5. Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen örnek uygulama

Maket üzerinde yapılan denemelerden sonra Üniversitemiz Beyin Cerrahisi Anabilim dalı öğretim üyelerinin desteği ve katılımıyla İstanbul Adli Tıp Kurumu'nda kadavralar üzerinde denemeler yapılmıştır. Uygulama sırasında çekilen görüntülerden ikisi Şekil 6.6 ve 6.7'de verilmiştir.

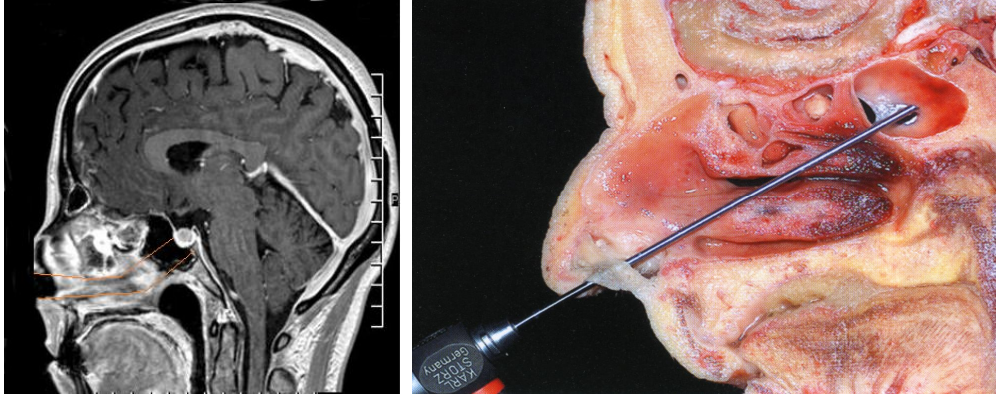


Şekil 6.6. Kadavra üzerinde yapılan deneme görüntüsü 1



Şekil 6.7. Kadavra üzerinde yapılan deneme görüntüsü 2

Yapılan deneylerden görülebileceği gibi, endoskop bir endoskop tutucu aracılığıyla robota monte edilmiştir. SP'nin uç işlevcisine eklenen bu sabit seri uzuv robotun kinematik yapısını değiştireceğinden robotun hareket özellikleri kısıtlanacaktır. Bu durumda robot sadece operasyon bölgesinde etkili olabilecektir. Şekil 6.8'de verilen kafatası görüntülerinden endoskopun hareket alanı ve operasyon bölgesi görülebilir.



Şekil 6.8. Operasyon bölgesi

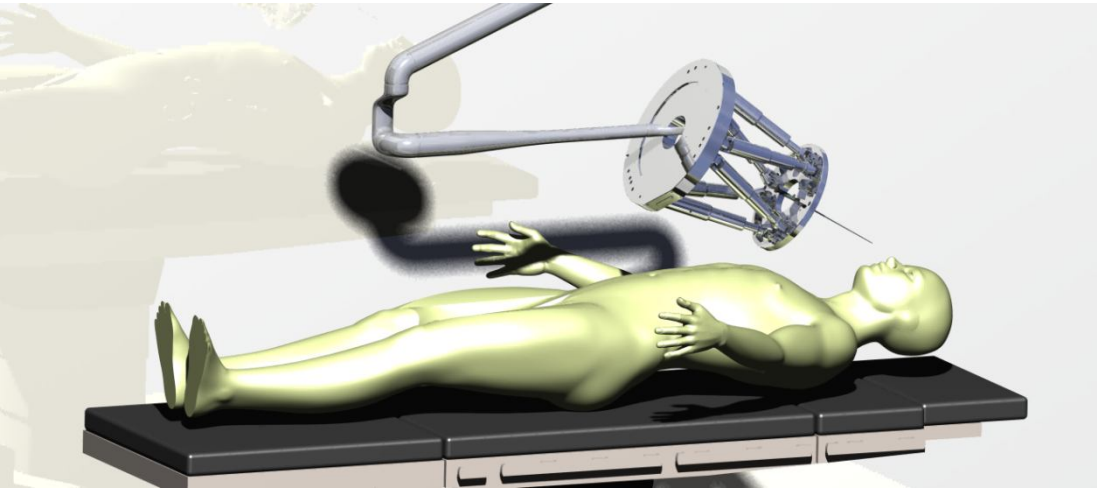
Yukarıda bahsedilen dezavantajları gidermek ve robotun hareket özelliklerinden maksimum düzeyde yararlanabilmek için Şekil 6.9 ile Şekil 6.14 arasında verilen konfigürasyonlar önerilmektedir. Bu konfigürasyonların çalışma uzayları endoskop ucuna yerleştirilen koordinat sistemiyle ifade edilerek Tablo 6.1'de karşılaştırılmıştır. Tablodan görülebileceği gibi tüm konfigürasyonlar yeterli iken 2. ve 3. konfigürasyonlar daha geniş çalışma uzayı sunmaktadır.

Tablo 6.1. Önerilen konfigürasyonların çalışma uzaylarının karşılaştırılması

	Konfigürasyon	Doğrusal	Dönme	Beceri	Cerrah Alanı
	1	x: ± 50 mm y: ± 50 mm z: ± 25 mm	α : $\pm 15^\circ$ β : $\pm 15^\circ$ γ : $\pm 30^\circ$	İyi	İyi
	2	x: ± 50 mm y: ± 25 mm z: ± 50 mm	α : $\pm 15^\circ$ β : $\pm 30^\circ$ γ : $\pm 15^\circ$	Mükemmel	İyi
	3	x: ± 50 mm y: ± 25 mm z: ± 50 mm	α : $\pm 15^\circ$ β : $\pm 30^\circ$ γ : $\pm 15^\circ$	Mükemmel	Mükemmel



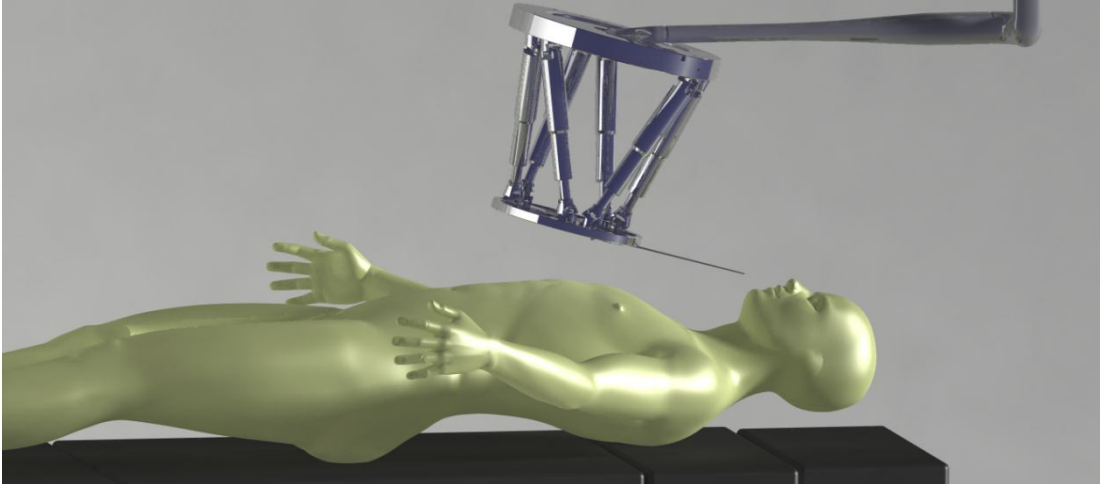
Şekil 6.9. Robotun ameliyathanede önerilen yerleşim planı-1



Şekil 6.10. Robotun ameliyathanede önerilen yerleşim planı-1 (farklı açı)



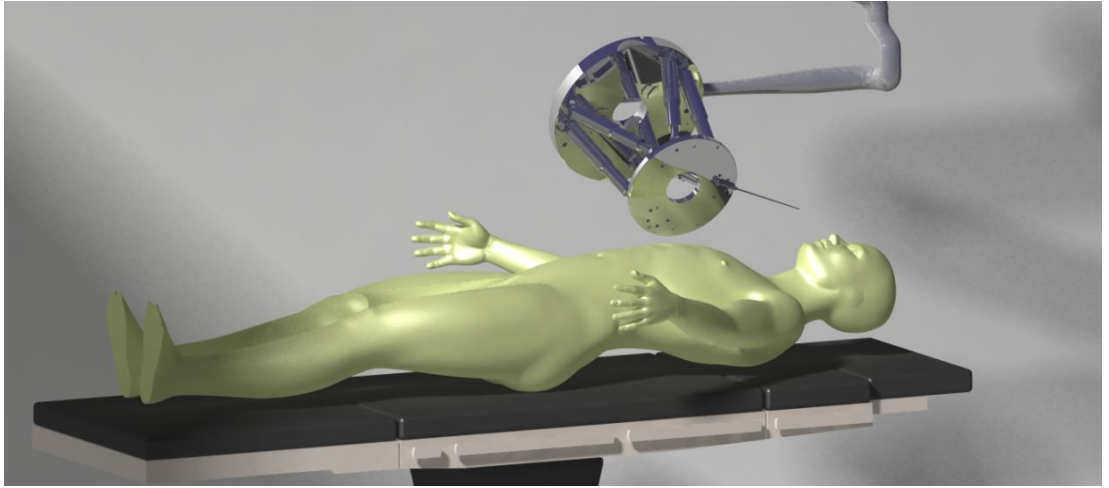
Şekil 6.11. Robotun ameliyathanede önerilen yerleşim planı-2



Şekil 6.12. Robotun ameliyathanede önerilen yerleşim planı-2 (farklı açı)



Şekil 6.13. Robotun ameliyathanede önerilen yerleşim planı-3



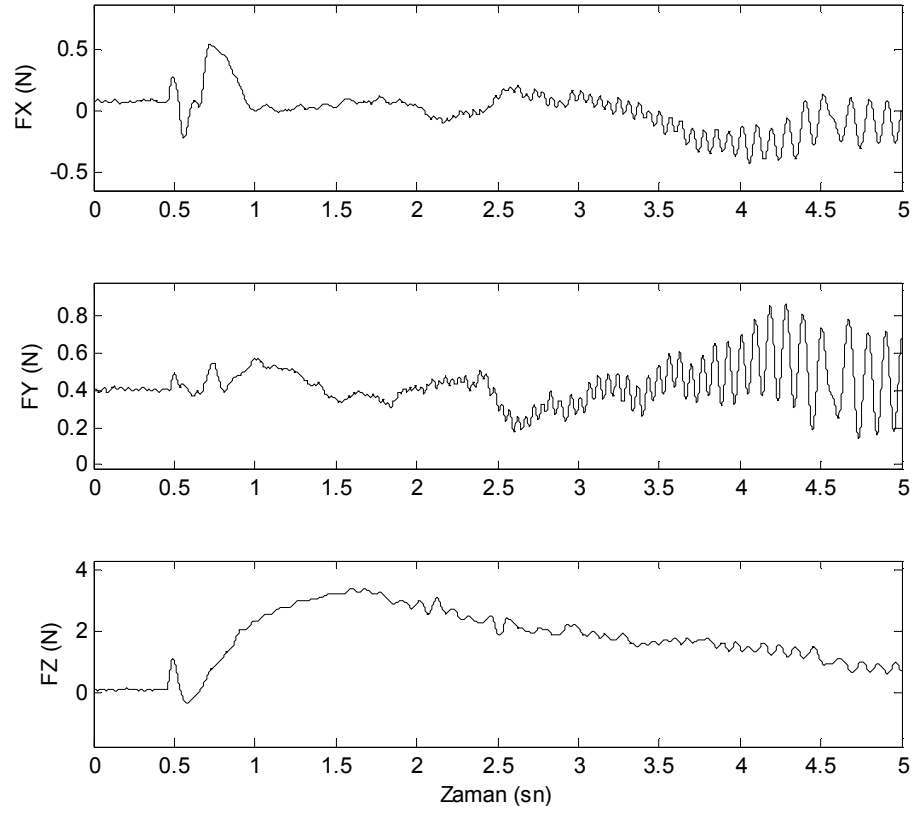
Şekil 6.14. Robotun ameliyathanede önerilen yerleşim planı-3 (farklı açı)

6.3. Geliştirilen Sistemin Delici ve Kesici Olarak Kullanımı

Endoskop konumlama ve tutma görevinin dışında Şekil 6.15'ten görüldüğü gibi robot delme ve kesme işlemlerinde kullanılabilir. Şekil 6.16'da ise z ekseninde 5 N kuvvet referansı altında yapılan tahta delme işlemi sonucunda ortaya çıkan kuvvet yanıtı görülmektedir. Şekilden görülebileceği gibi 0.5 sn sonra etkileşim gerçekleşmiştir ve referans kuvvette herhangi bir aşma meydana gelmemiştir. Robot referans konumuna doğru ilerledikçe kuvvet değerleri azalmıştır. Böylece geliştirilen sistem ortopedi ve beyin cerrahisinde ihtiyaç duyulan kemik kesme, delme ve kafatası delme gibi işlemlerde kuvvet ve konum kontrollü kullanılabilir.



Şekil 6.15. Stewart Platformu'nun delici ve kesici olarak kullanımı



Şekil 6.16. Delme deneyinde oluşan kuvvetler

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Paralel robotlar 1947 ve 1965 yıllarında tasarlanıp endüstride kullanılmaya başlayan ve gelişimi günümüze kadar süregelen ve devam eden önemli mekanizmalardan biridir. Bu tez çalışmasında, Stewart Platformu olarak adlandırılan altı serbestlik dereceli bir paralel manipülatörün medikal uygulama amaçlı, haptik ve fare güdümlü, konum ve yörünge kontrollü, empedans / kuvvet kontrollü ve kuvvet geri bildirimli özelliklerine sahip olacak şekilde geliştirilmesi ve kontrolü amaçlanmıştır.

Bu hedefler doğrultusunda öncelikli olarak robotik cerrahi konusu irdelenmiş ve paralel robotların bu alanda kullanım yerleri araştırılmıştır. Aynı zamanda deneysel robot sistemi için gerekli donanım, yazılım ve ekipmanlar tedarik edilmiş, geliştirilmiştir ve üretilmiştir. Deneysel robot sistemi; Stewart Platformu, eyleyiciler, güç kaynağı, lojik koruma devresi, ara geçiş kartı, 6 DOF fare, Phantom Omni haptik, 6 DOF kuvvet/tork sensörü, cerrahi ekipman tutucu, kuvvet test düzeneği ve gerçek zamanlı denetleyici bileşenlerinden oluşmaktadır.

Bilimsel olarak robot terimiyle beraber kinematik, dinamik, Jakobiyen ve kontrol terimleri akla ilk gelen kavramlardır. Kontrol teorisi açısından robot bir sistem olarak ele alındığında, denetleyici tasarımından önce matematiksel modelinin elde edilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda, Stewart Platformu'nun göreceli olarak kolay olması nedeniyle ters kinematiği elde edilmiş, ters kinematikten yararlanılarak Newton-Raphson nümerik iterasyon yöntemiyle ileri kinematiği çözülmüştür. Jakobiyen matrisiyle beraber gerekli testler yapılarak bulunan çözümlerin doğruluğu gösterilmiştir. Son olarak, çok karmaşık ve zor bir modele sahip olan robotun katı gövde dinamiği ve eyleyici dinamiği incelenerek benzetim modeli tasarlanmıştır.

Sistemin konum ve yörünge kontrolü eklem uzayında yüksek hassasiyetlerde PID, akıllı PID ve kayma kipli denetim yöntemleri uygulanarak sağlanmıştır. Robotun konum ve yörünge kontrolü basamak girişleri, noktadan-noktaya yörünge planlaması, 6 DOF fare ve 6 DOF haptik aygıtı aracılığıyla yapılabilmektedir.

0.5 μm tasarım çözünürlüğüne sahip doğrusal eyleyicilerin her biri bu çözünürlükte kontrol edilmiştir. Bağ çözünürlüğüne göre robotun sıfır konumundaki hareket kabiliyeti hesaplanmıştır ve lazer interferometre sistemiyle yapılan ölçümlerle beraber Tablo 7.1’de verilmiştir. Tablodan görülebileceği gibi robotun konumlama hassasiyeti oldukça yüksektir.

Tablo 7.1. Hesaplanan ve ölçülen değerler

Hareket		Hesaplanan	Ölçülen
Doğrusal	x	1.65 μm	1.599 μm
	y	2.85 μm	2.724 μm
	z	535 nm	534 nm
Dönme	x	0.45 μ°	0.43 μ°
	y	0.5 μ°	0.56 μ°
	z	0.9 μ°	0.91 μ°

Robot hareket kabiliyetleri incelendiğinde 0.5 μm ’den 100 mm’ye kadar bir uzaya sahiptir. Bu hareketlerin sağlanabilmesi için her bir bacağın 0.5 μm ’den 50 mm’ye kadar bir aralıkta (100000 kat fark) hassas biçimde kontrolünün sağlanması gerekmektedir. PID denetim yapısı bu sistemin kontrolünde birçok uygulama için yeterli olacaktır. Ancak, belirtilen geniş aralıkta hareket ettirildiğinde sistemin doğrusal olmayan yapısına bağlı olarak PID kontrolör yeterli olamayacaktır. Ayrıca doğrusal olmayan yükler altında sistemin PID kontrolörle kontrol edilmesi zorlaşacaktır. Ayrıca PID kontrolörde görülen bazı eksiklikleri şöyle sıralayabiliriz:

- Yüksek hassasiyetlere çıkıldığında oluşan yuvarlama hataları bacaklarda kırıntılara sebebiyet vermektedir. Bunların giderilmesi için değişkenlerin filtrelenmesi ile ilgili çalışmalar yapılabilir.
- Sistemin dinamik modeli kullanılarak geniş bir aralıkta en iyi PID katsayıları bulunabilir.
- Çalışma uzayı çeşitli bölgelere ayrılarak her bir bölge için uygun PID katsayılar bulunabilir.

PID ile sistemin kontrol edilmesi ve incelenmesinden sonra kayma kipli denetleyici tasarımı yapılmıştır. Kayma kipli kontrolör PID ile görülen kırıntıları ortadan kaldırmış, aşma miktarı sıfır seviyesine çekilmiş ve geniş çalışma aralığında iyi cevaplar üretmiştir. Olumlu özelliklerinin yanında sistem cevabının yavaşlaması ise bir dezavantaj olarak karşımıza çıkmaktadır.

Akıllı PI denetimin doğası gereği yörünge takibinde daha iyi bir performans göstermesi açıktır. Bu nedenle akıllı PI denetleyicisi özellikle yörünge takibindeki hataları minimize etmek için uygulanmıştır ve diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında daha iyi performans sergilediği görülmüştür.

Konum ve yörünge denetiminin sağlanmasından sonra robotun üç eksen kuvvet kontrolünün yapılabilmesi için empedans kontrol yöntemi incelenmiştir. Empedans kontrol yöntemi bir kuvvet kontrol yönteminden daha çok bir etkileşim kontrol yöntemi olarak tanımlanabilir. İkinci dereceden kütle-yay-damper sistemiyle tanımlanan mekanik empedans frekans uzayında ikinci dereceden bir transfer fonksiyonu olarak tanımlanmıştır. Konum tabanlı uygulanabilen empedans yöntemi, arzu edilen davranışı gösterecek olan empedans filtresi ve bu filtrenin kazancının bir bulanık denetleyici tarafından ayarlanmasına dayanan yeni, basit ve efektif bir yöntem olarak geliştirilmiştir. Yapılan benzetim çalışmaları yöntemin geçerliliği göstermiş ve deneysel olarak gerçekleştirilen denetim yapısı birçok deneyle desteklenerek sonuçlar sunulmuştur.

Hedeflenen kontrol başarımlarının gerçekleştirilmesiyle beraber, geliştirilen sistemin kullanılabileceği medikal uygulama alanları irdelenerek, ülkemizde beyin cerrahisinde hipofiz bezi ameliyatlarında cerraha yardımcı olmak üzere robotun endoskop konumlayıcı ve tutucu olarak kullanımı ele alınmıştır. Endoskopik transsfenoidal cerrahisi hakkında genel bilgiler verilerek laboratuvar ortamında ve kadvralar üzerinde deneyler yapılmıştır. Robotun daha etkin kullanılabilmesi için çeşitli yerleşim planları önerilmiştir. Geliştirilen SP sistemi küçük değişiklikler yapılarak farklı birçok tıbbi problemlere uygulanabilir. İleride yapılacak benzer çalışmalarda, geliştirilen sistemin uygulanabilirliğini artırabilmek için sertifikasyon ve etik ilkelerin göz önünde bulundurulması yerinde olacaktır.

Jokabiyen hesabı gerektiren deneysel uygulamalarda bacak birim vektörlerine ihtiyaç duyulduğu için her bir bacağa ivmeölçer yerleştirilmesi yerinde olacaktır. Stewart Platformu'nun Kartezyen uzayında kontrolünün yapılabilmesi için ihtiyaç duyulan ileri kinematik çözümü için gerçek zamanda cevap verebilecek bir yöntemin tercih edilmesi gerekecektir. Stewart Platformu çok karmaşık bir dinamik modele sahip olduğundan dolayı benzetiminin sağlıklı bir biçimde yapılabilmesi için yüksek

hesaplama gerekmektedir. Bu yüzden hesaplama gücü yüksek bilgisayar sistemleri tercih edilebilir ya da sadeleştirilmiş dinamik modeli kullanılabilir. Ayrıca, robot dinamik denklemleri için sistem tanımlaması yapılarak bazı bilinmeyen model parametrelerinin (sürtünme gibi) bulunması sağlanabilir.

Empedans ve kuvvet kontrolü için geliştirilen bulanık mantık denetleyicisi farklı malzemelerde kullanılmak üzere çeşitli optimizasyon teknikleri kullanılarak eğitilerek üyelik fonksiyonları ve kural tabanı iyileştirilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Gourin C. G., Terris D. J., History of Robotic Surgery, Editor: Faust R. A., *Robotics in surgery: history, current and future applications*, 1st ed., Nova Science Publishers Inc., New York, 3-12, 2007.
- [2] Priddey H., Industry and the Canal,
<http://www.localhistory.scit.wlv.ac.uk/Museum/OtherTrades/BCN/BJB.htm>
(Ziyaret Tarihi: 3 Aralık 2012).
- [3] Braun E. U., Mayer H., Knoll A., Lange R., Bauernschmitt R., The Must-Have in Robotic Heart Surgery: Haptic Feedback, Editor: Bozovic V., *Medical Robotics*, 1st ed., I-Tech Education and Publishing, Vienna, 9-21, 2008.
- [4] Robotic Surgery, http://en.wikipedia.org/wiki/Robotic_surgery (Ziyaret Tarihi: 3 Aralık 2012).
- [5] McKenna D. T., Gould M. D., Gould J. C., Facs M. D., Robotic Foregut Surgery, Editor: Bozovic V., *Medical Robotics*, 1st ed., I-Tech Education and Publishing, Vienna, 75-85, 2008.
- [6] Robotic Photos,
<http://south.sanfordhealth.org/services/roboticassistedurgery/roboticsphotos/>
(Ziyaret Tarihi: 3 Aralık 2012).
- [7] Chauhan S., Image Guided Robotic Systems for Focal Ultrasound Based Surgical Applications, Editor: Bozovic V., *Medical Robotics*, 1st ed., I-Tech Education and Publishing, Vienna, 29-41, 2008.
- [8] Minimal Access Surgery/Robotic Surgery, <http://www.gofertility.com/minimal-access-surgery> (Ziyaret Tarihi: 3 Aralık 2012).
- [9] Avcı C., Avtan L., Özmen M. M., Robotik Cerrahi,
<http://www.biltek.tubitak.gov.tr/bdergi/yeniufuk/icerik/robotikcerrahi.pdf>
(Ziyaret Tarihi: 3 Aralık 2012).
- [10] Medical Robotics, <http://www.rocketstarrobotics.com/experience2.html> (Ziyaret Tarihi: 3 Aralık 2012).
- [11] Computer Motion,
<http://allaboutroboticsurgery.com/newsproceduresa/newsproceduresc.php>
(Ziyaret Tarihi: 3 Aralık 2012).
- [12] Intuitive Surgical, <http://www.intuitivesurgical.com/> (Ziyaret Tarihi: 3 Aralık 2012).

- [13]Kwon D. S., Woo K. Y., Song S. K., Kim W. S., Cho H. S., Microsurgical telerobot system, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Victoria, Canada, 13-17 October 1998.
- [14]Speich J. E., Rosen J., Medical Robotics, *Encyclopedia of Biomaterials and Biomedical Engineering*, Marcel Dekker Inc., New York, 983-993, 2004.
- [15]Eljamel M. S., Robotic Applications in Neurosurgery, Editor: Bozovic V., *Medical Robotics*, 1st ed., I-Tech Education and Publishing, Vienna, 41-64, 2008.
- [16]PHANTOM® Desktop™ Haptic Device, <http://www.sensable.com/haptic-phantom-desktop.htm> (Ziyaret Tarihi: 3 Aralık 2012).
- [17]A Compact 6-DOF Haptic Interface, <http://www.space.mech.tohoku.ac.jp/research/haptic/haptic-e.html> (Ziyaret Tarihi: 3 Aralık 2012).
- [18]Omega3, <http://www.forcedimension.com/omega3-overview> (Ziyaret Tarihi: 3 Aralık 2012).
- [19]Magnetic levitation haptic interfaces, <http://butterflyhaptics.com/> (Ziyaret Tarihi: 3 Aralık 2012).
- [20]Tsai T., Hsu Y., Development of a Parallel Surgical Robot with Automatic Bone Drilling Carriage for Stereotactic Neurosurgery, *IEEE International Conference on systems, Man and Cybernetics*, Hague, Netherlands, 10-13 Oct. 2004.
- [21]Du Z., Kong M., Fu L., Sun L., A Novel Fluoroscopy-Guided Robot-Assisted Orthopaedic Surgery System, *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, Kunming, China, 17-20 December 2006.
- [22]Yen P. L., Lai C. C., Developing a Hybrid Cartesian Parallel Manipulator for Knee Surgery, *IEEE Conference on Automation and Mechatronics*, Bangkok, Thailand, 4 December 2006.
- [23]Kwon D., Yoon Y., Lee J., Ko S., Huh K., Chung J., Park Y., Won C., ARTHROBOT: a new surgical robot system for total hip arthroplasty, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Hawaii, USA, 29 October - 3 November 2001.
- [24]Girone M., Burdea G., Bouzit M., Popescu V., Deutsch J. E., A Stewart Platform-Based System for Ankle Telerehabilitation, *Autonomous Robots*, 2001, **10**, 203-212.
- [25]Graham A. E., Xie S. Q., Aw K. C., Xu W. L., Mukherjee S., Design of a Parallel Long Bone Fracture Reduction Robot with Planning Treatment Tool, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Beijing, China, 9-15 October 2006.

- [26] Ye R., Chen Y., Development of a six degree of freedom (DOF) hybrid robot for femur shaft fracture reduction, *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, Bangkok, Thailand, 22-25 February 2009.
- [27] Mukherjee S., Rendsburg M., Surgeon-instructed, Image-guided and Robot-assisted Long Bone Fractures Reduction, *1st International Conference on Sensing Technology*, Palmerston North, New Zealand, 21-23 November 2005.
- [28] Tanaka H., Ohnishi K., Nishi H., Kawai T., Morikawa Y., Ozawa S., Furukawa T., Haptic Endoscopic Surgery Robot Utilizing FPGA, *10th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control*, Trento, Italy, 26-28 March 2008.
- [29] Shoham M., Burman M., Zehavi E., Joskowicz L., Batkilin E., Kunicher Y., Bone-Mounted Miniature Robot for Surgical Procedures: Concept and Clinical Applications, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2003, **19**, 893-901.
- [30] Brandt G., Zimolong A., Carrat L., Merloz P., Staudte H. W., Lavallee S., Radermacher K., Rau G., CRIGOS: a compact robot for image-guided orthopedic surgery, *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 1999, **3**, 252-260.
- [31] Maurin B., Bayle B., Piccin O., Gangloff J., de Mathelin M., Doignon C., Zanne P., Gangi A., A Patient-Mounted Robotic Platform for CT-Scan Guided Procedures, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2008, **55**, 2417-2425.
- [32] Li Y., Xu Q., Design and Development of a Medical Parallel Robot for Cardiopulmonary Resuscitation, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2007, **12**, 265-273.
- [33] Barkana D. E., Design and Implementation of a Control Architecture for a Robot-Assisted Orthopedic Surgery, *International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, 2010, **6**, 42-56.
- [34] Barkana D. E., Evaluation of Low-Level Controllers for an Orthopedic Surgery Robotic System, *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 2010, **14**, 1128-1135.
- [35] Graham A. E., Xie S. Q., Aw K. C., Xu W. L., Mukherjee S., Robotic Long Bone Fracture Reduction, Editor: Bozovic V., *Medical Robotics*, 1st ed., I-Tech Education and Publishing, Vienna, 85-103, 2008.
- [36] Niesing B., Robots for spine surgery,
http://www.archiv.fraunhofer.de/archiv/magazin/pflege.zv.fhg.de/english/publications/df/df2001/magazine2_2001_46.pdf (Ziyaret Tarihi: 3 Aralık 2012).
- [37] Merlet J. P., *Parallel Robots*, Springer, Netherlands, 2006.
- [38] Stewart Platform, http://en.wikipedia.org/wiki/Stewart_platform (Ziyaret Tarihi: 3 Aralık 2012).

- [39] Stewart D., A platform with six degrees of freedom, *Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers*, 1965, **180**, 371-378.
- [40] Bonev I., The True Origins of Parallel Robots, <http://www.parallemic.org/Reviews/Review007.html>, (Ziyaret Tarihi: 3 Aralık 2012).
- [41] Hunt K. H., Structural kinematics of in-parallel-actuated robot-arms, *ASME J. Mech., Trans. Automat. Des.*, 1983, **105**, 705-712.
- [42] Küçük S., Bingül Z., *Robot Tekniği I*, Birsen yayınevi, İstanbul, 2004.
- [43] Nauna P., Waldron K. J., Murthy V., Direct kinematic solution of a Stewart Platform, *IEEE. Trans. Robotics Automat.*, 1990, **6**, 438-444.
- [44] Merlet, J., P., Direct kinematics and assembly modes of parallel manipulators, *Int. J. of Robotics Research*, 1992, **11**, 150-162.
- [45] Chen N. X., Song S. M., Direct position analysis of the 4-6 Stewart Platform, *ASME J. of Mechanical Design*, 1994, **116**, 61-66.
- [46] Liao Q., Seneviratne L. D., Earles S. W. E., Forward kinematic analysis for the general 4-6 Stewart Platform, *Intelligent Robots and Systems, IROS '93. Proc. of the IEEE/RSJ International Conference*, Yokohama, Japan, 26-30 July 1993.
- [47] Fitcher E. F., A Stewart Platform-Based Manipulator: General Theory and Practical Construction, *Int. J. of Robotics Research*, 1986, **2**, 157-182.
- [48] Kim D., Chung W., Analytic Singularity Equation and Analysis of Six-DOF Parallel Manipulators Using Local Structurization Method, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1999, **15**, 612-622.
- [49] Sefrioui J., Gosselin C. M., Singularity analysis and representation of planar parallel manipulators, *Robot. Autom. Syst.*, 1993, **10**, 209-224.
- [50] Space Navigator, <http://www.3dconnexion.com/products/spacenavigator.html> (Ziyaret Tarihi: 3 Aralık 2012).
- [51] Clark N., 3D mouse support using classes and events, <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/22124-3d-mouse-support-using-classes-and-events> (Ziyaret Tarihi: 3 Aralık 2012).
- [52] PHANTOM® OMNI™ Haptic Device, <http://www.sensable.com/haptic-phantom-omni.htm> (Ziyaret Tarihi: 3 Aralık 2012).
- [53] Gamma Transducer, http://www.ati-ia.com/products/ft/ft_models.aspx?id=Gamma (Ziyaret Tarihi: 3 Aralık 2012).

- [54]Ünsal A., Farklı Yapıdaki Stewart Platform Mekanizmalarının Düz ve Ters Kinematik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2007.
- [55]Huang C., Chang C., Yu M., Fu L., Sliding-mode tracking control of the Stewart platform, *5th Asian Control Conference*, Melbourne, Australia, 20-23 July 2004.
- [56]Patel A. J., Ehmann K. F., Calibration of a hexapod machine tool using a redundant leg, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2000, **40**, 489-512.
- [57]Kiusalaas J., *Numerical Methods in Engineering with Matlab*, Cambridge University press, New York, 2005.
- [58]Lin J., Chen C. W., Computer-aided-symbolic dynamic modeling for Stewart-platform manipulator, *Robotica*, 2009, **27**, 331-341.
- [59]Karahan O., Seri ve paralel robotlarda parçacık sürü optimizasyonu ile yörünge kontrolörü tasarımı, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2012.
- [60]Mendes M. F., Kraus J. W., Pieri E. R., Variable structure position control of an industrial robotic manipulator, *J. Braz. Soc. Mech. Sci*, 2002, **24**, 169-176.
- [61]Kassem A. M., Yousef A. M., Servo DC Motor Position Control Based on Sliding Mode Approach, *5th Arabia Saudi International Conference*, Riyadh, Saudi Arabia, 11-14 January 2009.
- [62]Utkin V. I., Sliding mode control design principles and applications to electric drives, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1993, **40**, 23-36.
- [63]Novel B., Fliess M., Join C., Mounier H., Steux B., A mathematical explanation via “intelligent” PID controllers of the strange ubiquity of PIDs, *Mediterranean Conference on Automation*, Marrakech, Morocco, 23-25 June 2010.
- [64]Fliess M., Join C., Intelligent PID controllers, *Proceedings of the 16th Mediterranean Conference on Control and Automation Congress Centre*, Ajaccio, France, 25-27 June 2008.
- [65]Fliess M., Join C., Riachy S., Nothing is as practical as a good theory: model-free control, <http://arxiv.org/abs/1103.5897> (Ziyaret Tarihi: 3 Aralık 2012).
- [66]Fliess M., Join C., Model-free control and intelligent pid controllers: towards a possible trivialization of nonlinear control?, <http://arxiv.org/abs/0904.0322> (Ziyaret Tarihi: 3 Aralık 2012).
- [67]Reckdahl K. J., Dynamics and control of mechanical systems containing closed kinematic chains, Phd Thesis, Stanford University, Stanford, 1996.

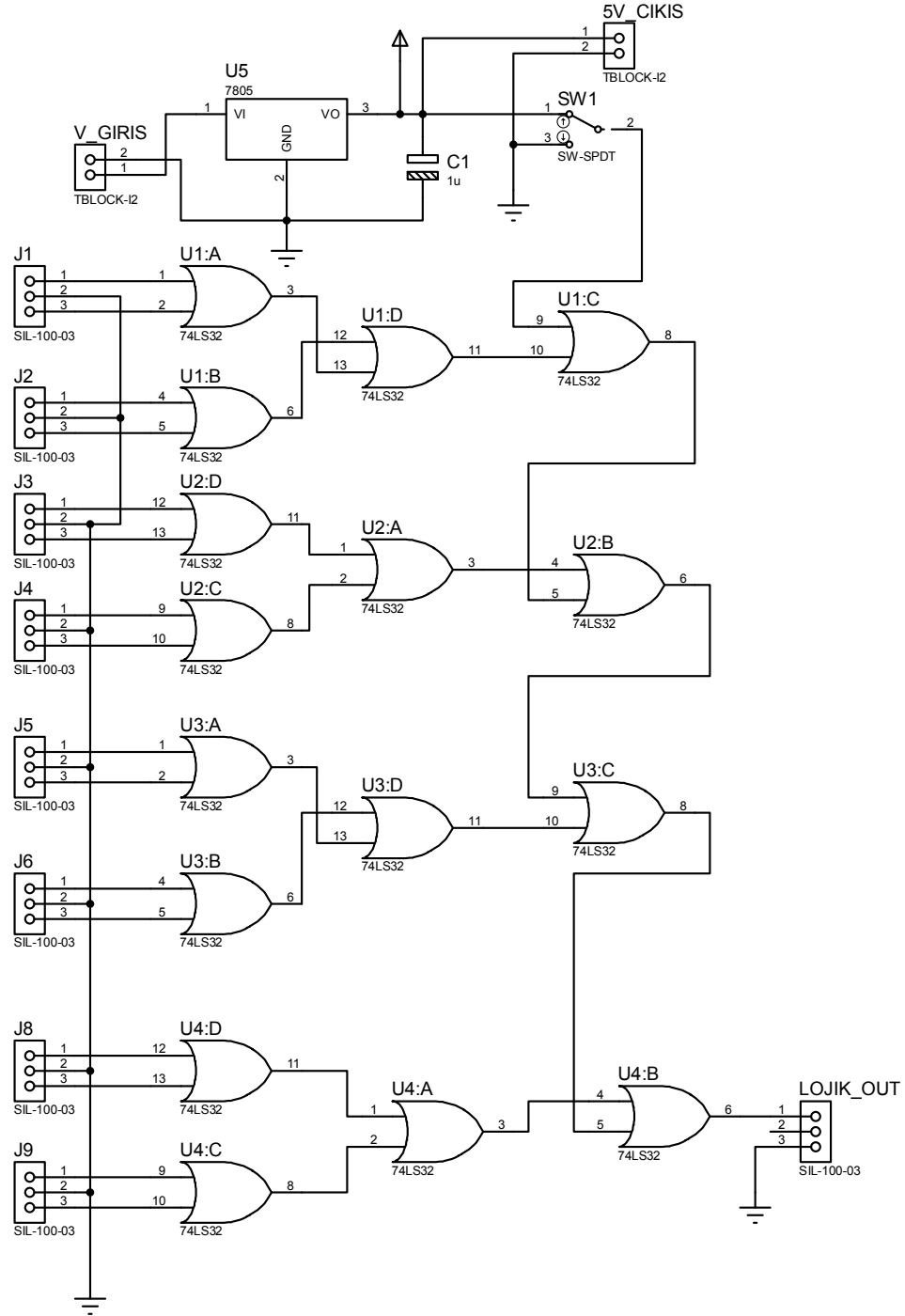
- [68] Ömürlü V. E., Yıldız İ., Self-tuning fuzzy PD-based stiffness controller of a 3x3 Stewart platform as a man-machine interface, *Turk. J. Elec. Eng. & Comp. Sci.*, 2011, **19**, 743-753.
- [69] Hogan N., Impedance Control: An Approach to Manipulation: Part I-Theory, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 1985, **107**, 1-7.
- [70] Zeng G., Hemami A., An overview of robot force control, *Robotica*, 1997, **15**, 473-482.
- [71] Yoshikawa T., Force Control of Robot Manipulators, *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics & Automation*, San Francisco, USA, 24-28 April 2000.
- [72] Yueyan C., Ji Z., Bidou W., Shuang H., High-Precision Fuzzy Impedance Control Algorithm and Application in Robotic Arm, *International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, Monterey, California, USA, 24-28 July 2005.
- [73] Seul J., Hsia T. C., Bonitz R. G., Force tracking impedance control of robot manipulators under unknown environment, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2004, **12**, 474- 483.
- [74] Patel R. V., Talebi H. A., Jayender J., Shadpey F., A Robust Position and Force Control Strategy for 7-DOF Redundant Manipulators, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2009, **14**, 575-589.
- [75] Bonilla I., González-Galván E. J., Chávez-Olivares C., Mendoza M., Loredon-Flores A., Reyes F., Zhang B., A vision-based, impedance control strategy for industrial robot manipulators, *IEEE Conference on Automation Science and Engineering*, Toronto, Canada, 21-24 August 2010.
- [76] Cheah C. C., Wang D., Learning Impedance Control for Robotic Manipulators, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1998, **14**, 452-465.
- [77] Castillo O., Melin P., *Type-2 Fuzzy Logic: Theory and Applications*, Springer, Berlin, 2008.
- [78] Davliakos I., Papadopoulos E., Impedance Model-Based Control for an Electrohydraulic Stewart Platform, *European Journal of Control*, 2009, **5**, 1-18.
- [79] Vukobratovic M., Surdilovic D., Ekalo Y., Katic D., *Dynamics and Robust Control of Robot-Environment Interaction*, World Scientific Publishing, New Jersey, 2009.
- [80] Almeida F., Lopes A., Abreu P., Force-impedance control: a new control strategy of robotic manipulators, Editors: Kaynak O., Tosunoglu S., Marcelo A., *Recent Advances in Mechatronics*, Springer, Singapore, 1999.
- [81] Stanisic R. Z., Fernández Á. V., Adjusting the parameters of the mechanical impedance for velocity, impact and force control, *Robotica*, 2012, **30**, 583-597.

- [82] Shih C. Y., An Impedance Control Design and Simulation of Stewart Platform with Fuzzy Neural Network Compensator, Master Thesis, Chung Yuan Christian University, Chung Li, 2003.
- [83] Seul J., Hsia T. C., Bonitz R. G., Force tracking impedance control of robot manipulators under unknown environment, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2004, **12**, 474-483.
- [84] Endoscopic Transsphenoidal Surgery, <http://www.mayfieldclinic.com/PE-EndoPitSurg.htm> (Ziyaret Tarihi: 3 Aralık 2012).

EKLER

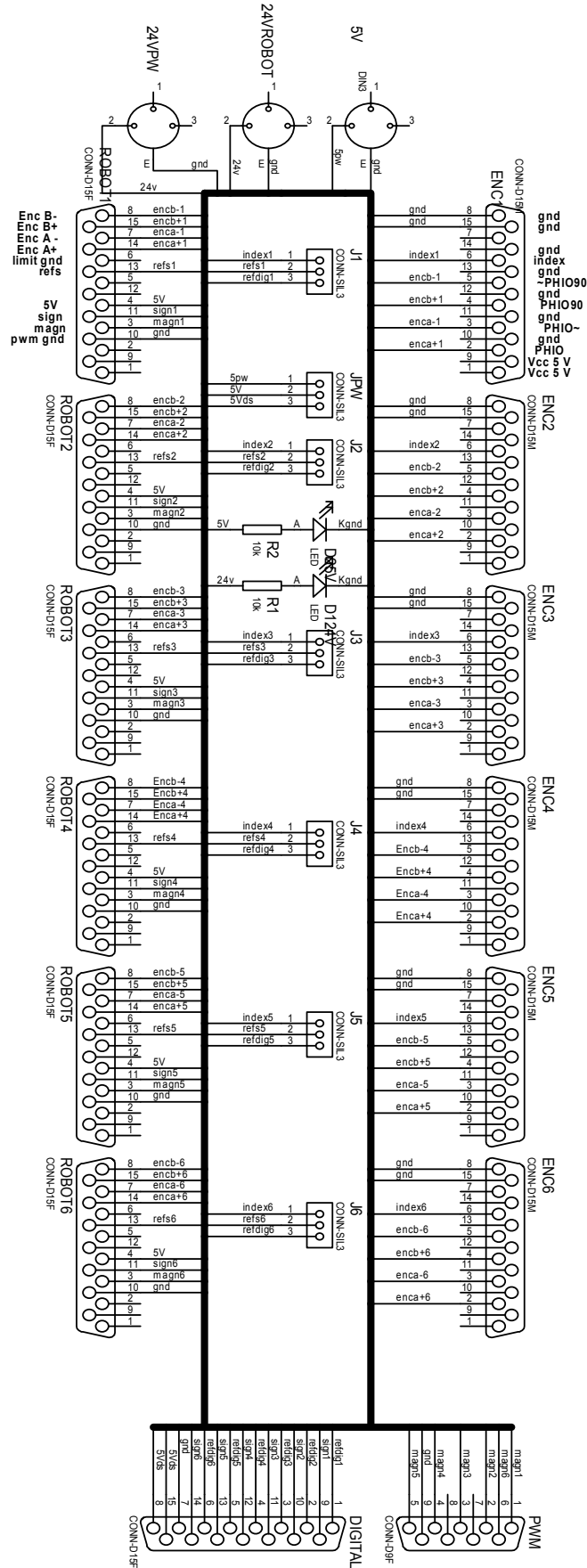
EK-A

Lojik koruma devre şeması:

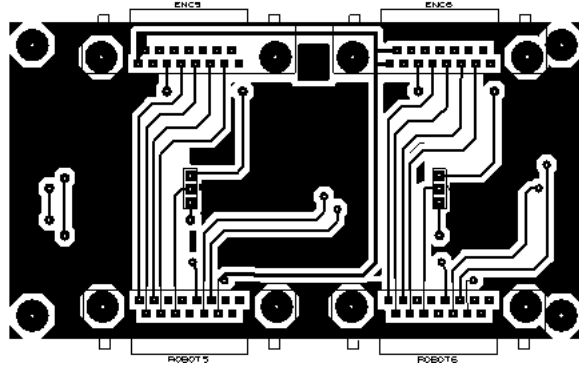
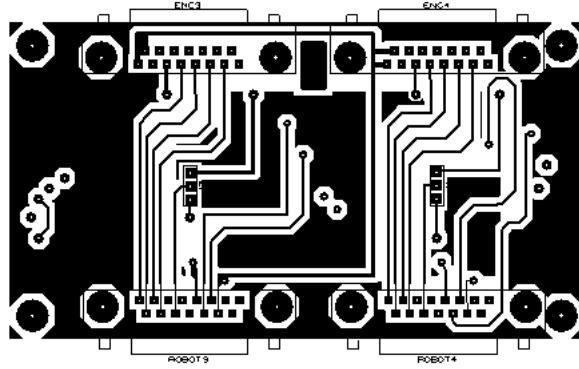
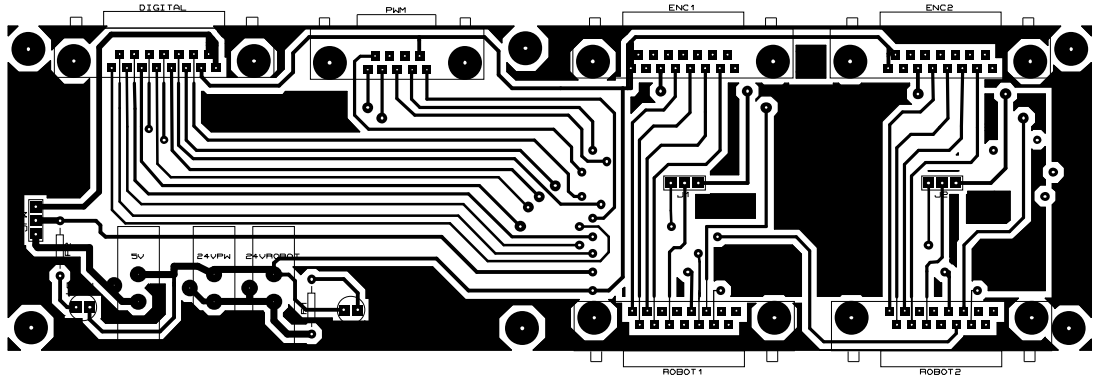


EK-B

Denetleyici - robot ara kartı devre şeması:



Denetleyici - robot ara kartı baskı devre şemaları:



EK-C

Dosya: main.m

```
close all; clc
clear
import mouse3D.*
hDrv = mouse3Ddrv; %instantiate driver object
hMon = mouse3Dmonitor(hDrv); %use of the monitor is optional
```

Dosya: mouse3Ddrv.m

```
classdef mouse3Ddrv < handle
    properties (SetAccess = private, GetAccess = public)
        SpaceNav
        Sen
        Key
    end
    events (ListenAccess = 'public', NotifyAccess = 'private')
        SenState
        ButState
    end
    methods
        function obj = mouse3Ddrv
            obj.SpaceNav = actxserver('TDxInput.Device');
            obj.Splash;
            % The following lines are a bit strange - events wont link
            % properly if they are nested low down in the COM object, so we
            % use pointers to them :)
            obj.Sen = obj.SpaceNav.Sensor;
            obj.Key = obj.SpaceNav.Keyboard;
            % Setup the device and drivers
            obj.RegisterEvents;
            obj.Reconnect;
            obj.SpaceNav.LoadPreferences('Matlab');
            %obj.monitorHandle = figure('CloseRequestFcn','closereq; disp("SpaceNavObj still running in background");');
        end %constructor
        function delete(obj)
            if obj.SpaceNav.IsConnected
                obj.SpaceNav.Disconnect;
            end
            delete(obj.SpaceNav)
        end %destructor
        function Reconnect(obj)
            if obj.SpaceNav.IsConnected
                obj.SpaceNav.Disconnect;
            end
            obj.SpaceNav.Connect;
        end %Reconnect
        function RegisterEvents(obj)
            obj.Sen.registerevent( {'SensorInput', @obj.senEvent });
            obj.Key.registerevent( {'KeyDown', @obj.keyDownEvent, 'KeyUp', @obj.keyUpEvent });
            obj.SpaceNav.registerevent( {'DeviceChange', @obj.connectEvent });
        end %RegisterEvents
        function connectEvent(varargin)
            obj = varargin{1};
            % Type categories are explained in the 3Dconnexions SDK
            switch obj.SpaceNav.Type
                case 0
                    devStr = ['ATTENTION: DEVICE NOT RECOGNISED, CHECK FOLLOWING:\n\t'...
                        'a) Is device connected properly?\n\t'...
                        'b) Is 3Dconnexions control panel running?\n\t'...
                        '\t\t... and then use the "Reconnect" method. '];
                case 6
                    devStr = 'SpaceNavigator Connected';
                case 4
                    devStr = 'SpaceExplorer Connected';
                case 25
                    devStr = 'SpaceTraveler Connected';
                case 29
                    devStr = 'SpacePilot Connected';
                otherwise
                    devStr = 'Device recognised by Windows driver, but device may function unexpectedly';
            end
        end
    end
end
```

```

        end
        fprintf(1,['DeviceID:%i -> ' devStr '\n'],obj.SpaceNav.Type);
    end%connectEvent
    function keyDownEvent(obj,varargin)
        %disp('You just depressed a key')
        notify(obj,'ButState'); % Broadcast notice of event
    end%keyDownEvent
    function keyUpEvent(obj,varargin)
        %disp('You just released a key')
        notify(obj,'ButState'); % Broadcast notice of event
    end%keyUpEvent
    function senEvent(varargin)
        obj = varargin{1};
        notify(obj,'SenState'); % Broadcast notice of event
    end%senEvent
end %methods
methods (Static)
    function Splash
        splTmp=['2008'\n\n\n' ];
        fprintf(1,splTmp);
    end%Splash
end%static methods
end

```

Dosya: [mouse3Dmonitor.m](#)

```

classdef mouse3Dmonitor < handle
    properties (SetAccess = private, GetAccess = public)
        lhSen
        lhBut
        fh
        th
        tlh
        bth
        tith
    end
    methods
        function obj = mouse3Dmonitor(drvObj)
            if ~isa(drvObj, 'mouse3D.mouse3Ddrv')
                error('First argument must be 3D mouse driver object handle')
            end
            obj.lhSen = addlistener(drvObj,'SenState',@obj.updateMon);
            obj.lhBut = addlistener(drvObj,'ButState',@obj.buttonMon);
            makeMonWin(obj);
        end
        function delete(obj)
            delete(obj.fh)
        end
        function updateMon(obj,src,varargin)
            seri = serial('COM1','BaudRate',9600);
            fopen(seri);
            set(obj.th(1), 'String', num2str(src.Sen.Translation.X,%.2f) );
            %src.Sen.Translation.X
            gon=[5];
            set(obj.th(2), 'String', num2str(src.Sen.Translation.Y,%.2f) );
            set(obj.th(3), 'String', num2str(src.Sen.Translation.Z,%.2f) );
            set(obj.th(4), 'String', num2str(src.Sen.Translation.Length,%.2f) );
            set(obj.th(5), 'String', num2str(src.Sen.Rotation.X,%.2f) );
            %src.Sen.Rotation.X
            set(obj.th(6), 'String', num2str(src.Sen.Rotation.Y,%.2f) );
            set(obj.th(7), 'String', num2str(src.Sen.Rotation.Z,%.2f) );
            set(obj.th(8), 'String', num2str(src.Sen.Rotation.Angle,%.2f) );
            if (src.Sen.Translation.X > 0)
                gon(2)=1;
            elseif (src.Sen.Translation.X < 0)
                gon(2)=2;
            else
                gon(2)=0;
            end
            if (src.Sen.Translation.Y > 0)
                gon(3)=1;
            elseif (src.Sen.Translation.Y < 0)
                gon(3)=2;
            else

```

```

        gon(3)=0;
    end
    if (src.Sen.Translation.Z > 0)
        gon(4)=1;
    elseif (src.Sen.Translation.Z < 0)
        gon(4)=2;
    else
        gon(4)=0;
    end
    if (src.Sen.Rotation.X > 0)
        gon(5)=1;
    elseif (src.Sen.Rotation.X < 0)
        gon(5)=2;
    else
        gon(5)=0;
    end
    if (src.Sen.Rotation.Y > 0)
        gon(6)=1;
    elseif (src.Sen.Rotation.Y < 0)
        gon(6)=2;
    else
        gon(6)=0;
    end
    if (src.Sen.Rotation.Z > 0)
        gon(7)=1;
    elseif (src.Sen.Rotation.Z < 0)
        gon(7)=2;
    else
        gon(7)=0;
    end
    fwrite(seri,gon);
    %fprintf(seri,'%d',gon);
    %gon
    %fread(seri,7)
    fclose(seri);
end
function buttonMon(obj,src,varargin)
    set(obj.bth(3), 'String', num2str(src.Key.IsKeyDown(1),'%i') );
    set(obj.bth(4), 'String', num2str(src.Key.IsKeyDown(2),'%i') );
end
function makeMonWin(obj,varargin)
    screenSize = get(0,'ScreenSize');
    fDepth = 300;
    fWidth = 200;
    obj.fh = figure(...
        'Units', 'Pixels',...
        'Position', [10 screenSize(4)-50-fDepth fWidth fDepth],...
        'ToolBar', 'none',...
        'Name', 'nrcWare 3Dconnexions monitor tool',...
        'NumberTitle', 'off',...
        'MenuBar', 'none',...
        'DockControls', 'on');
    axis off
    for n = 1:4
        yCoOrd = 1-((n+1)/12);
        obj.th(n) = text( 'Position', [.7 yCoOrd]);
        obj.tlh(n) = text( 'Position', [.1 yCoOrd]);
    end
    obj.tlh(9) = text(...
        'Position', [-.05 yCoOrd],...
        'String', 'Translation');
    for n = 5:8
        yCoOrd = 1-((n+2)/12);
        obj.th(n) = text( 'Position', [.7 yCoOrd]);
        obj.tlh(n) = text( 'Position', [.1 yCoOrd]);
    end
    obj.tlh(10) = text(...
        'Position', [-.05 yCoOrd],...
        'String', 'Rotation');
    set(obj.th,...
        'Units', 'normalized',...
        'String', 'x.xx');
    set(obj.tlh,...
        'Units', 'normalized');

```


EK-D

Dosya: Haptik.c

```

/*****
Copyright 2011 Selçuk Kizir
Haptic deneme yazılımı
*****/

// Kütüphaneler.....
#include <windows.h>
#include <conio.h>
#include <HD/hd.h>
#include <HDU/hduError.h>
#include <HDU/hduVector.h>
/*****

/* Tanımlamalar */
const double pi = 3.141592;
const double deg2rad = pi/180;
/*****

/* Değişkenler */
HDdouble force[3] = {0.0, 0.0, 0.0}; // uygulanacak kuvvet
unsigned char gon[14]; // gönderilecek veri
unsigned char seriforce[14]; // alınacak veri
HDdouble poss[3] = {0.0, 0.0}; // haptik konumu
HDdouble gimbal[3] = {0.0, 0.0}; // haptik yönelim
char seribul=0;
char inx=0;
char i=0;
/*****

// fonksiyonlar..
/*****

// Scheduler işlemleri.....
HDSchedulerHandle gCallbackHandle = HD_INVALID_HANDLE;
HDCallbackCode HDCALLBACK_ServoSchedulerCallback(void *pUserData)
{
    HDErrorInfo error;
    hdBeginFrame(hdGetCurrentDevice());
        hdSetDoublev(HD_CURRENT_FORCE, force);
        hdGetDoublev(HD_CURRENT_POSITION, poss);
        //hdGetDoublev(HD_CURRENT_TRANSFORM, transform);
        //hdGetDoublev(HD_CURRENT_JOINT_ANGLES, angle);
        hdGetDoublev(HD_CURRENT_GIMBAL_ANGLES, gimbal);
    hdEndFrame(hdGetCurrentDevice());
    if (HD_DEVICE_ERROR(error = hdGetError()))
    {
        hduPrintError(stderr, &error, "Error while commanding DAC values");
        if (hduIsSchedulerError(&error))
        {
            return HD_CALLBACK_DONE;
        }
    }
    return HD_CALLBACK_CONTINUE;
}
/*****

Main function.
*****/
int main(int argc, char* argv[])
{
    printf("\n *****\n");
    printf(" *                               *\n");
    printf(" **          © Selcuk Kizir          **\n");
    printf(" ***                               ***\n");
    printf(" ****                               ****\n");
    printf(" *****                               *****\n");
    printf(" ****                               ****\n");
    printf(" ***          Haptik -----> SP          **\n");
    printf(" **          Kuvvet -----> Haptik          *\n");
    printf(" *                               *\n");
    printf(" *****\n");
    // seri port
        DCB dcb;
        COMMTIMEOUTS CommTimeOuts;
        TCHAR* currentuser = L"COM1";

```

```

LPCWSTR *lstr = (LPCWSTR *)(&currentuser);
// open port for I/O
HANDLE hCom = CreateFile(*lstr,
    GENERIC_READ|GENERIC_WRITE,
    0,NULL,
    OPEN_EXISTING,0,NULL);
SetCommMask(hCom, EV_RXCHAR);
if(hCom == INVALID_HANDLE_VALUE)
{
    printf("E012_Failed to open port\n");
}
else
    printf("\n *Seri port acildi\n");
DWORD write = 14; // Number of bytes to write to serial port
DWORD read = 8;
// Giriş çıkış buffer ayarla
SetupComm(hCom, 100, 100);
// mevcut ayarları oku
GetCommState(hCom, &dcB);
dcB.BaudRate = 19200; // Baudrate at which running */
dcB.fBinary = TRUE; // Binary Mode (skip EOF check) */
dcB.fParity = FALSE; // Enable parity checking */
dcB.fOutxCtsFlow = FALSE; // CTS handshaking on output */
dcB.fOutxDsrFlow = FALSE; // DSR handshaking on output */
dcB.fDtrControl = DTR_CONTROL_ENABLE; // DTR Flow control */
dcB.fDsrSensitivity = FALSE; // DSR Sensitivity */
dcB.fTXContinueOnXoff = FALSE; // Continue TX when Xoff sent */
dcB.fOutX = FALSE; // Enable output X-ON/X-OFF */
dcB.fInX = FALSE; // Enable input X-ON/X-OFF */
dcB.fErrorChar = FALSE; // Enable Err Replacement */
dcB.fNull = FALSE; // Enable Null stripping */
dcB.fRtsControl = RTS_CONTROL_ENABLE; // Rts Flow control */
dcB.fAbortOnError = FALSE; // Abort all reads and writes on Error */
dcB.ByteSize = 8; // Number of bits/byte, 4-8 */
dcB.Parity = 0; // 0-4=None,Odd,Even,Mark,Space */
dcB.StopBits = ONESTOPBIT; // 0,1,2 = 1, 1.5, 2 */
// ayar yap
SetCommState(hCom, &dcB);
// Timeout ayarla (2s)
CommTimeOuts.ReadIntervalTimeout = 0;
CommTimeOuts.ReadTotalTimeoutMultiplier = 0;
CommTimeOuts.ReadTotalTimeoutConstant = 50;
CommTimeOuts.WriteTotalTimeoutMultiplier = 0;
CommTimeOuts.WriteTotalTimeoutConstant = 50;
// ayarları yaz
SetCommTimeOuts(hCom, &CommTimeOuts);
// DTR RTS aktif yap
EscapeCommFunction(hCom, SETDTR);
EscapeCommFunction(hCom, SETRTS);
// buffer leri önceden boşalt
PurgeComm(hCom, PURGE_TXABORT | PURGE_RXABORT | PURGE_TXCLEAR | PURGE_RXCLEAR);
HDErrorInfo error;
HDstring model;
HDboolean bDone = FALSE;
// Initialize Haptic Device
HHD hHD = hdInitDevice(HD_DEFAULT_DEVICE);
if (HD_DEVICE_ERROR(error = hdGetError()))
{
    hduPrintError(stderr, &error, "Failed to initialize haptic device");
    fprintf(stderr, "\nPress any key to quit.\n");
    getch();
    return -1;
}
model = hdGetString(HD_DEVICE_MODEL_TYPE);
printf("\n Initialized: %s\n", model);

/* Schedule the haptic callback function for continuously monitoring the
button state and rendering the anchored spring force */
gCallbackHandle = hdScheduleAsynchronous(
    ServoSchedulerCallback, 0, HD_MAX_SCHEDULER_PRIORITY);
if (HD_DEVICE_ERROR(error = hdGetError()))
{
    hduPrintError(stderr, &error, "Failed to schedule servoloop callback");
    fprintf(stderr, "\nPress any key to quit.\n");
}

```

```

    getch();
    hdDisableDevice(hHD);
    return -1;
}
hdEnable(HD_FORCE_OUTPUT);
/* Start the haptic rendering loop */
hdStartScheduler();
if (HD_DEVICE_ERROR(error = hdGetError()))
{
    hduPrintError(stderr, &error, "Failed to start servoloop");
    fprintf(stderr, "\nPress any key to quit.\n");
    getch();
    hdDisableDevice(hHD);
    return -1;
}
printf("\n Cikmak icin lutfen herhangi bir tusa basiniz!");
i=0;
/* Start the main application loop */
while (!kbhit())
{
    gon[0]=0x55;
    gon[1]=0xff;
    gon[2]=1;
    gon[3]=floor((poss[0]+225)*140/256); //y +- 50 mm
    gon[4]=floor((poss[0]+225)*140-gon[3]*256);
    gon[5]=floor((poss[1]+225)*140/256); //z +- 25 mm
    gon[6]=floor((poss[1]+225)*140-gon[5]*256);
    gon[7]=floor((poss[2]+225)*140/256); //x +- 50 mm
    gon[8]=floor((poss[2]+225)*140-gon[7]*256);
    gon[9]=floor((gimbal[2]+3)*42);
    gon[10]=floor((-gimbal[1]+3)*42);
    gon[11]=floor((gimbal[0]+3)*42);
    WriteFile(hCom,gon,write,&write,NULL);
    ReadFile(hCom,seriforce,10,&read,NULL);
    for (inx=0;inx<6;inx++)
    {
        if(seriforce[inx]==85 && seriforce[inx+1]==255)
        {
            force[2]= ((double) seriforce[inx+2]/35-3.3);
            force[0]=((double) seriforce[inx+3]/35-3.3);
            force[1]=((double) seriforce[inx+4]/35-3.3);
            break;
        }
    }
}
hdStopScheduler();
hdUnschedule(gCallbackHandle);
hdDisableDevice(hHD);
CloseHandle(hCom);
return 0;
}
/*****/

```

EK-E

```

function x = fcn(T, B, x0,l,R)
% sabitletler.....
f=[0 0 0 0 0 0];
J=[0 0 0 0 0 0;0 0 0 0 0 0;0 0 0 0 0 0;0 0 0 0 0 0;0 0 0 0 0 0];
% ileri kinematik
x0=x0+0.001*rand();
x=x0;
ex=0.0000001;
ind=0;
while ind~=6
    for i=1:6
        f(i) = (((R(1,1)*T(i,1)+R(1,2)*T(i,2)+x(1)-B(i,1))^2+(R(2,1)*T(i,1)+R(2,2)*T(i,2)+x(2)-
        B(i,2))^2+(R(3,1)*T(i,1)+R(3,2)*T(i,2)+x(3))^2)-(l(i)+0.267180911391782)^2);
        J(i,1)=(2*x(1)+2*(R(1,1)*T(i,1)+2*R(1,2)*T(i,2))-2*B(i,1));
        J(i,2)=(2*x(2)+2*(R(2,1)*T(i,1)+2*R(2,2)*T(i,2))-2*B(i,2));
        J(i,3)=(2*x(3)+2*(R(3,1)*T(i,1)+2*R(3,2)*T(i,2)));
        J(i,4)= 2*(T(i,1)*(cos(x(4))*sin(x(6)) + cos(x(6))*sin(x(5))*sin(x(4))) + T(i,2)*(cos(x(4))*cos(x(6)) -
        sin(x(5))*sin(x(4))*sin(x(6))))*...
        (x(3) + T(i,1)*(sin(x(4))*sin(x(6)) - cos(x(4))*cos(x(6))*sin(x(5))) + T(i,2)*(cos(x(6))*sin(x(4)) +
        cos(x(4))*sin(x(5))*sin(x(6)))) - ...
        2*(T(i,1)*(sin(x(4))*sin(x(6)) - cos(x(4))*cos(x(6))*sin(x(5))) + T(i,2)*(cos(x(6))*sin(x(4)) +
        cos(x(4))*sin(x(5))*sin(x(6))))*...
        (x(2) - B(i,2) + T(i,1)*(cos(x(4))*sin(x(6)) + cos(x(6))*sin(x(5))*sin(x(4))) + T(i,2)*(cos(x(4))*cos(x(6)) -
        sin(x(5))*sin(x(4))*sin(x(6)))));%matlab
        J(i,5)=-2*((cos(x(6)))*T(i,1)-(sin(x(6)))*T(i,2))*(x(1)*sin(x(5))-
        (sin(x(5))*B(i,1)+(cos(x(5))*sin(x(4)))*B(i,2)+x(3)*cos(x(4))*cos(x(5)))-...
        x(2)*cos(x(5))*sin(x(4)));
        J(i,6) = 2*(T(i,1)*(cos(x(4))*cos(x(6)) - sin(x(5))*sin(x(4))*sin(x(6))) - T(i,2)*(cos(x(4))*sin(x(6)) +
        cos(x(6))*sin(x(5))*sin(x(4))))*...
        (x(2) - B(i,2) + T(i,1)*(cos(x(4))*sin(x(6)) + cos(x(6))*sin(x(5))*sin(x(4))) + T(i,2)*(cos(x(4))*cos(x(6)) -
        sin(x(5))*sin(x(4))*sin(x(6)))) + ...
        2*(T(i,1)*(cos(x(6))*sin(x(4)) + cos(x(4))*sin(x(5))*sin(x(6))) - T(i,2)*(sin(x(4))*sin(x(6)) -
        cos(x(4))*cos(x(6))*sin(x(5))))*(x(3) + ...
        T(i,1)*(sin(x(4))*sin(x(6)) - cos(x(4))*cos(x(6))*sin(x(5))) + T(i,2)*(cos(x(6))*sin(x(4)) +
        cos(x(4))*sin(x(5))*sin(x(6)))) + ...
        2*(T(i,2)*cos(x(5))*cos(x(6)) + T(i,1)*cos(x(5))*sin(x(6)))*(B(i,1) - x(1) - T(i,1)*cos(x(5))*cos(x(6)) +
        T(i,2)*cos(x(5))*sin(x(6))); %matlab
    end
    x=x-inv(J)*f;
    ind=0;
    for k=1:6
        if (abs(f(k))<ex)
            ind=ind+1;
        end
    end
end
end

```

EK-F

function Id = fcn(x, xd, legV, bodypts)

```
% LegV 3x6 matrix
J1=[legV(1,1) legV(2,1) legV(3,1) 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
    0 0 0 legV(1,2) legV(2,2) legV(3,2) 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
    0 0 0 0 0 0 legV(1,3) legV(2,3) legV(3,3) 0 0 0 0 0 0 0 0;
    0 0 0 0 0 0 0 0 0 legV(1,4) legV(2,4) legV(3,4) 0 0 0 0 0 0;
    0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 legV(1,5) legV(2,5) legV(3,5) 0 0 0;
    0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 legV(1,6) legV(2,6) legV(3,6)];

J2=[1 0 0 0 0 0;
    0 1 0 0 0 0;
    0 0 1 0 0 0;
    1 0 0 0 0 0;
    0 1 0 0 0 0;
    0 0 1 0 0 0;
    1 0 0 0 0 0;
    0 1 0 0 0 0;
    0 0 1 0 0 0;
    1 0 0 0 0 0;
    0 1 0 0 0 0;
    0 0 1 0 0 0;
    1 0 0 0 0 0;
    0 1 0 0 0 0;
    0 0 1 0 0 0;
    1 0 0 0 0 0;
    0 1 0 0 0 0;
    0 0 1 0 0 0];

J2(:,4) = reshape([ cos(x(4))*sin(x(5))*sin(x(6)), cos(x(4))*cos(x(6))*sin(x(5)), -sin(x(4))*sin(x(5));
                  -sin(x(4))*sin(x(6)), -cos(x(6))*sin(x(4)), -cos(x(4));
                  cos(x(4))*cos(x(5))*sin(x(6)), cos(x(4))*cos(x(5))*cos(x(6)), -cos(x(5))*sin(x(4))]*bodypts,18,1);

J2(:,5) = reshape([ cos(x(5))*sin(x(4))*sin(x(6)) - cos(x(6))*sin(x(5)), sin(x(5))*sin(x(6)) + cos(x(5))*cos(x(6))*sin(x(4)),
cos(x(4))*cos(x(5));
                  0, 0, 0;
                  - cos(x(5))*cos(x(6)) - sin(x(4))*sin(x(5))*sin(x(6)), cos(x(5))*sin(x(6)) - cos(x(6))*sin(x(4))*sin(x(5)), -
cos(x(4))*sin(x(5))]*bodypts,18,1);

J2(:,6) = reshape([ cos(x(6))*sin(x(4))*sin(x(5)) - cos(x(5))*sin(x(6)), - cos(x(5))*cos(x(6)) - sin(x(4))*sin(x(5))*sin(x(6)), 0;
                  cos(x(4))*cos(x(6)), -cos(x(4))*sin(x(6)), 0;
                  sin(x(5))*sin(x(6)) + cos(x(5))*cos(x(6))*sin(x(4)), cos(x(6))*sin(x(5)) - cos(x(5))*sin(x(4))*sin(x(6)),
0]*bodypts,18,1);

Id=J1*J2*xd;
```

EK-G

Dosya: Jacobian.m

```
syms m1 m2 GTx1 GTy1 GTz1 GTx2 GTy2 GTz2 GTx3 GTy3 GTz3
syms GTx4 GTy4 GTz4 GTx5 GTy5 GTz5 GTx6 GTy6 GTz6
syms alpha beta gamma h1 h2 h3 h4 h5 h6 k1 k2 k3 k4 k5 k6
syms ux1 uy1 uz1 ux2 uy2 uz2 ux3 uy3 uz3 ux4 uy4 uz4 ux5 uy5 uz5 ux6 uy6 uz6 J1 J2 J
% Jacobian J1 Matrisi
J1=[ux1 uy1 uz1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
    0 0 0 ux2 uy2 uz2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
    0 0 0 0 0 0 ux3 uy3 uz3 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
    0 0 0 0 0 0 0 0 0 ux4 uy4 uz4 0 0 0 0 0 0;
    0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 ux5 uy5 uz5 0 0 0;
    0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 ux6 uy6 uz6];
% Jacobian J2 Matrisinin Elemanlarının Hesaplanması
RxAlpha=[1 0 0;0 cos(alpha) -sin(alpha);0 sin(alpha) cos(alpha)];
RyBeta=[cos(beta) 0 sin(beta);0 1 0;-sin(beta) 0 cos(beta)];
RzGamma=[cos(gamma) -sin(gamma) 0;sin(gamma) cos(gamma)0;0 0 1];
SX=[0 0 0;0 0 -1;0 1 0];SY=[0 0 1;0 0 0;-1 0 0];SZ=[0 -1 0;1 0 0;0 0 0];
% 4. stun
GT41=[GTx1 GTy1 GTz1];R41=RyBeta*SX*RxAlpha*RzGamma*GT41.';
R1GTx1=R41(1);R1GTy1=R41(2);R1GTz1=R41(3);
GT42=[GTx2 GTy2 GTz2];R42=RyBeta*SX*RxAlpha*RzGamma*GT42.';
R1GTx2=R42(1);R1GTy2=R42(2);R1GTz2=R42(3);
GT43=[GTx3 GTy3 GTz3];R43=RyBeta*SX*RxAlpha*RzGamma*GT43.';
R1GTx3=R43(1);R1GTy3=R43(2);R1GTz3=R43(3);
GT44=[GTx4 GTy4 GTz4];R44=RyBeta*SX*RxAlpha*RzGamma*GT44.';
R1GTx4=R44(1);R1GTy4=R44(2);R1GTz4=R44(3);
GT45=[GTx5 GTy5 GTz5];R45=RyBeta*SX*RxAlpha*RzGamma*GT45.';
R1GTx5=R45(1);R1GTy5=R45(2);R1GTz5=R45(3);
GT46=[GTx6 GTy6 GTz6];R46=RyBeta*SX*RxAlpha*RzGamma*GT46.';
R1GTx6=R46(1);R1GTy6=R46(2);R1GTz6=R46(3);
%5. stun
GT51=[GTx1 GTy1 GTz1];R51=SY*RyBeta*RxAlpha*RzGamma*GT51.';
R2GTx1=R51(1);R2GTy1=R51(2);R2GTz1=R51(3);
GT52=[GTx2 GTy2 GTz2];R52=SY*RyBeta*RxAlpha*RzGamma*GT52.';
R2GTx2=R52(1);R2GTy2=R52(2);R2GTz2=R52(3);
GT53=[GTx3 GTy3 GTz3];R53=SY*RyBeta*RxAlpha*RzGamma*GT53.';
R2GTx3=R53(1);R2GTy3=R53(2);R2GTz3=R53(3);
GT54=[GTx4 GTy4 GTz4];R54=SY*RyBeta*RxAlpha*RzGamma*GT54.';
R2GTx4=R54(1);R2GTy4=R54(2);R2GTz4=R54(3);
GT55=[GTx5 GTy5 GTz5];R55=SY*RyBeta*RxAlpha*RzGamma*GT55.';
R2GTx5=R55(1);R2GTy5=R55(2);R2GTz5=R55(3);
GT56=[GTx6 GTy6 GTz6];R56=SY*RyBeta*RxAlpha*RzGamma*GT56.';
R2GTx6=R56(1);R2GTy6=R56(2);R2GTz6=R56(3);
%6. stun
GT61=[GTx1 GTy1 GTz1];R61=RyBeta*RxAlpha*SZ*RzGamma*GT61.';
R3GTx1=R61(1);R3GTy1=R61(2);R3GTz1=R61(3);
GT62=[GTx2 GTy2 GTz2];R62=RyBeta*RxAlpha*SZ*RzGamma*GT62.';
R3GTx2=R62(1);R3GTy2=R62(2);R3GTz2=R62(3);
GT63=[GTx3 GTy3 GTz3];R63=RyBeta*RxAlpha*SZ*RzGamma*GT63.';
R3GTx3=R63(1);R3GTy3=R63(2);R3GTz3=R63(3);
GT64=[GTx4 GTy4 GTz4];R64=RyBeta*RxAlpha*SZ*RzGamma*GT64.';
R3GTx4=R64(1);R3GTy4=R64(2);R3GTz4=R64(3);
GT65=[GTx5 GTy5 GTz5];R65=RyBeta*RxAlpha*SZ*RzGamma*GT65.';
R3GTx5=R65(1);R3GTy5=R65(2);R3GTz5=R65(3);
GT66=[GTx6 GTy6 GTz6];R66=RyBeta*RxAlpha*SZ*RzGamma*GT66.';
R3GTx6=R66(1);R3GTy6=R66(2);R3GTz6=R66(3);
J2= [1 0 0 R1GTx1 R2GTx1 R3GTx1;
     0 1 0 R1GTy1 R2GTy1 R3GTy1;
     0 0 1 R1GTz1 R2GTz1 R3GTz1;
     1 0 0 R1GTx2 R2GTx2 R3GTx2;
     0 1 0 R1GTy2 R2GTy2 R3GTy2;
     0 0 1 R1GTz2 R2GTz2 R3GTz2;
     1 0 0 R1GTx3 R2GTx3 R3GTx3;
     0 1 0 R1GTy3 R2GTy3 R3GTy3;
     0 0 1 R1GTz3 R2GTz3 R3GTz3;
     1 0 0 R1GTx4 R2GTx4 R3GTx4;
     0 1 0 R1GTy4 R2GTy4 R3GTy4;
     0 0 1 R1GTz4 R2GTz4 R3GTz4;
     1 0 0 R1GTx5 R2GTx5 R3GTx5;
     0 1 0 R1GTy5 R2GTy5 R3GTy5;
```

```

0 0 1 R1GTz5 R2GTz5 R3GTz5;
1 0 0 R1GTx6 R2GTx6 R3GTx6;
0 1 0 R1GTy6 R2GTy6 R3GTy6;
0 0 1 R1GTz6 R2GTz6 R3GTz6];

```

Dosya: UstPlatformKutleMatrisi.m

```

clc;
clear all;
syms alpha beta gamma
syms Ix Iy Iz
syms dalpha dbeta dgamma
Xpo=[alpha beta gamma].';dXpo=[dalpha dbeta dgamma].';
RxAlpha=[1 0 0;0 cos(alpha) -sin(alpha);0 sin(alpha) cos(alpha)];
RyBeta=[cos(beta) 0 sin(beta);0 1 0 ;-sin(beta) 0 cos(beta)];
RzGamma=[cos(gamma) -sin(gamma) 0;sin(gamma) cos(gamma)0;0 0 1];
rot=RzGamma*RyBeta*RxAlpha;
I=diag([Ix Iy Iz]);
Omega_B=RyBeta*diag([1 0 0])+ diag([0 1 0])+RxAlpha*RzGamma*diag([0 0 1]);
Omega_U=simplify(transpose(RzGamma)*transpose(RxAlpha)*transpose(RyBeta)*Omega_B);
Mup=(transpose(Omega_U)*I*Omega_U);
Massup=[Mup(1,1) Mup(1,2) Mup(1,3)
         Mup(2,1) Mup(2,2) Mup(2,3)
         Mup(3,1) Mup(3,2) Mup(3,3)];

```

Dosya: BacakKutleMatrisi.m

```

syms m1 m2 GTx1 GTy1 GTz1 GTx2 GTy2 GTz2 GTx3 GTy3 GTz3
syms GTx4 GTy4 GTz4 GTx5 GTy5 GTz5 GTx6 GTy6 GTz6
syms alpha beta gamma h1 h2 h3 h4 h5 h6 k1 k2 k3 k4 k5 k6
syms ux1 uy1 uz1 ux2 uy2 uz2 ux3 uy3 uz3 ux4 uy4 uz4 ux5 uy5 uz5 ux6 uy6 uz6 J1 J2 J
J1=[ux1 uy1 uz1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
    0 0 0 ux2 uy2 uz2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
    0 0 0 0 0 0 ux3 uy3 uz3 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
    0 0 0 0 0 0 0 0 0 ux4 uy4 uz4 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
    0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 ux5 uy5 uz5 0 0 0 0 0 0;
    0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 ux6 uy6 uz6];
RxAlpha=[1 0 0;0 cos(alpha) -sin(alpha);0 sin(alpha) cos(alpha)];
RyBeta=[cos(beta) 0 sin(beta);0 1 0 ;-sin(beta) 0 cos(beta)];
RzGamma=[cos(gamma) -sin(gamma) 0;sin(gamma) cos(gamma)0;0 0 1];
SX=[0 0 0;0 0 -1;0 1 0];SY=[0 0 1;0 0 0;-1 0 0];SZ=[0 -1 0;1 0 0;0 0 0];
% 4. stun
GT41=[GTx1 GTy1 GTz1];
R41=RyBeta*SX*RxAlpha*RzGamma*GT41.';
R1GTx1=R41(1);R1GTy1=R41(2);R1GTz1=R41(3);
GT42=[GTx2 GTy2 GTz2];
R42=RyBeta*SX*RxAlpha*RzGamma*GT42.';
R1GTx2=R42(1);R1GTy2=R42(2);R1GTz2=R42(3);
GT43=[GTx3 GTy3 GTz3];
R43=RyBeta*SX*RxAlpha*RzGamma*GT43.';
R1GTx3=R43(1);R1GTy3=R43(2);R1GTz3=R43(3);
GT44=[GTx4 GTy4 GTz4];
R44=RyBeta*SX*RxAlpha*RzGamma*GT44.';
R1GTx4=R44(1);R1GTy4=R44(2);R1GTz4=R44(3);
GT45=[GTx5 GTy5 GTz5];
R45=RyBeta*SX*RxAlpha*RzGamma*GT45.';
R1GTx5=R45(1);R1GTy5=R45(2);R1GTz5=R45(3);
GT46=[GTx6 GTy6 GTz6];
R46=RyBeta*SX*RxAlpha*RzGamma*GT46.';
R1GTx6=R46(1);R1GTy6=R46(2);R1GTz6=R46(3);
%5. stun
GT51=[GTx1 GTy1 GTz1];
R51=SY*RyBeta*RxAlpha*RzGamma*GT51.';
R2GTx1=R51(1);R2GTy1=R51(2);R2GTz1=R51(3);
GT52=[GTx2 GTy2 GTz2];
R52=SY*RyBeta*RxAlpha*RzGamma*GT52.';
R2GTx2=R52(1);R2GTy2=R52(2);R2GTz2=R52(3);
GT53=[GTx3 GTy3 GTz3];
R53=SY*RyBeta*RxAlpha*RzGamma*GT53.';
R2GTx3=R53(1);R2GTy3=R53(2);R2GTz3=R53(3);
GT54=[GTx4 GTy4 GTz4];
R54=SY*RyBeta*RxAlpha*RzGamma*GT54.';
R2GTx4=R54(1);R2GTy4=R54(2);R2GTz4=R54(3);
GT55=[GTx5 GTy5 GTz5];

```

```

R55=SY*RyBeta*RxAlpha*RzGamma*GT55.;
R2GTx5=R55(1);R2GTy5=R55(2);R2GTz5=R55(3);
GT56=[GTx6 GTy6 GTz6];
R56=SY*RyBeta*RxAlpha*RzGamma*GT56.;
R2GTx6=R56(1);R2GTy6=R56(2);R2GTz6=R56(3);
%6. stun
GT61=[GTx1 GTy1 GTz1];
R61=RyBeta*RxAlpha*SZ*RzGamma*GT61.;
R3GTx1=R61(1);R3GTy1=R61(2);R3GTz1=R61(3);
GT62=[GTx2 GTy2 GTz2];
R62=RyBeta*RxAlpha*SZ*RzGamma*GT62.;
R3GTx2=R62(1);R3GTy2=R62(2);R3GTz2=R62(3);
GT63=[GTx3 GTy3 GTz3];
R63=RyBeta*RxAlpha*SZ*RzGamma*GT63.;
R3GTx3=R63(1);R3GTy3=R63(2);R3GTz3=R63(3);
GT64=[GTx4 GTy4 GTz4];
R64=RyBeta*RxAlpha*SZ*RzGamma*GT64.;
R3GTx4=R64(1);R3GTy4=R64(2);R3GTz4=R64(3);
GT65=[GTx5 GTy5 GTz5];
R65=RyBeta*RxAlpha*SZ*RzGamma*GT65.;
R3GTx5=R65(1);R3GTy5=R65(2);R3GTz5=R65(3);
GT66=[GTx6 GTy6 GTz6];
R66=RyBeta*RxAlpha*SZ*RzGamma*GT66.;
R3GTx6=R66(1);R3GTy6=R66(2);R3GTz6=R66(3);
J2=[1 0 0 R1GTx1 R2GTx1 R3GTx1;
0 1 0 R1GTy1 R2GTy1 R3GTy1;
0 0 1 R1GTz1 R2GTz1 R3GTz1;
1 0 0 R1GTx2 R2GTx2 R3GTx2;
0 1 0 R1GTy2 R2GTy2 R3GTy2;
0 0 1 R1GTz2 R2GTz2 R3GTz2;
1 0 0 R1GTx3 R2GTx3 R3GTx3;
0 1 0 R1GTy3 R2GTy3 R3GTy3;
0 0 1 R1GTz3 R2GTz3 R3GTz3;
1 0 0 R1GTx4 R2GTx4 R3GTx4;
0 1 0 R1GTy4 R2GTy4 R3GTy4;
0 0 1 R1GTz4 R2GTz4 R3GTz4;
1 0 0 R1GTx5 R2GTx5 R3GTx5;
0 1 0 R1GTy5 R2GTy5 R3GTy5;
0 0 1 R1GTz5 R2GTz5 R3GTz5;
1 0 0 R1GTx6 R2GTx6 R3GTx6;
0 1 0 R1GTy6 R2GTy6 R3GTy6;
0 0 1 R1GTz6 R2GTz6 R3GTz6];
H=diag([h1 h1 h1 h2 h2 h2 h3 h3 h3 h4 h4 h4 h5 h5 h5 h6 h6 h6]);
K=diag([k1 k2 k3 k4 k5 k6]);
MassLegs=(m1+m2)*(J2*(H-J1'*K*J1)*J2);

Dosya: BacakCoriloisMatrisi.m

syms m1 m2 GTx1 GTy1 GTz1 GTx2 GTy2 GTz2 GTx3 GTy3 GTz3
syms GTx4 GTy4 GTz4 GTx5 GTy5 GTz5 GTx6 GTy6 GTz6
syms px py pz alpha beta gamma dpx dpy dpz dalpha dbeta dgamma
syms h1 h2 h3 h4 h5 h6 k1 k2 k3 k4 k5 k6
syms ux1 uy1 uz1 ux2 uy2 uz2 ux3 uy3 uz3 ux4 uy4 uz4 ux5 uy5 uz5 ux6 uy6 uz6
Xpo=[px py pz alpha beta gamma].';
dXpo=[dpx dpy dpz dalpha dbeta dgamma].';
BacakKutleMatrisi_A.m;%Yontem A'ya göre bacakların kütle matrisi m-file
MassLegs=[ Massleg11 Massleg12 Massleg13 Massleg14 Massleg15 Massleg16;
Massleg21 Massleg22 Massleg23 Massleg24 Massleg25 Massleg26;
Massleg31 Massleg32 Massleg33 Massleg34 Massleg35 Massleg36;
Massleg41 Massleg42 Massleg43 Massleg44 Massleg45 Massleg46;
Massleg51 Massleg52 Massleg53 Massleg54 Massleg55 Massleg56;
Massleg61 Massleg62 Massleg63 Massleg64 Massleg65 Massleg66];
%Yontem A'ya göre bacakların Corilois matrisi

for i=1:6
for j=1:6
for k=1:6
a(k)=1/2*(diff(MassLegs(k,j),Xpo(i))+diff(MassLegs(k,i),Xpo(j))-diff(MassLegs(i,j),Xpo(k)))*dXpo(k);
end
Vmasslegs(i,j)=a(1)+a(2)+a(3)+a(4)+a(5)+a(6);
end
end
end

```

Dosya: BacakYerCekimiVektor.m

```

syms I m1 m2 pz g L1 L2 L3 L4 L5 L6
syms GTx1 GTy1 GTz1 GTx2 GTy2 GTz2 GTx3 GTy3 GTz3
syms GTx4 GTy4 GTz4 GTx5 GTy5 GTz5 GTx6 GTy6 GTz6
syms px py pz alpha beta gamma dpx dpy dpz dalpha dbeta dgamma
syms ux1 uy1 uz1 ux2 uy2 uz2 ux3 uy3 uz3 ux4 uy4 uz4 ux5 uy5 uz5
syms ux6 uy6 uz6 J1 J2 J
% Jacobian matrisi J1 Yöntem A
J1=[ux1 uy1 uz1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
    0 0 0 ux2 uy2 uz2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
    0 0 0 0 0 0 ux3 uy3 uz3 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
    0 0 0 0 0 0 0 0 0 ux4 uy4 uz4 0 0 0 0 0 0;
    0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 ux5 uy5 uz5 0 0 0;
    0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 ux6 uy6 uz6];
Xpo=[px py pz alpha beta gamma].';
dXpo=[dpx dpy dpz dalpha dbeta dgamma].';
GT1=[GTx1 GTy1 GTz1].';GT2=[GTx2 GTy2 GTz2].';
GT3=[GTx3 GTy3 GTz3].';GT4=[GTx4 GTy4 GTz4].';
GT5=[GTx5 GTy5 GTz5].';GT6=[GTx6 GTy6 GTz6].';
% Jacobian matrisi J2 Yöntem A
J2=[ 1 0 0 R1GTx1 R2GTx1 R3GTx1;
    0 1 0 R1GTy1 R2GTy1 R3GTy1;
    0 0 1 R1GTz1 R2GTz1 R3GTz1;
    1 0 0 R1GTx2 R2GTx2 R3GTx2;
    0 1 0 R1GTy2 R2GTy2 R3GTy2;
    0 0 1 R1GTz2 R2GTz2 R3GTz2;
    1 0 0 R1GTx3 R2GTx3 R3GTx3;
    0 1 0 R1GTy3 R2GTy3 R3GTy3;
    0 0 1 R1GTz3 R2GTz3 R3GTz3;
    1 0 0 R1GTx4 R2GTx4 R3GTx4;
    0 1 0 R1GTy4 R2GTy4 R3GTy4;
    0 0 1 R1GTz4 R2GTz4 R3GTz4;
    1 0 0 R1GTx5 R2GTx5 R3GTx5;
    0 1 0 R1GTy5 R2GTy5 R3GTy5;
    0 0 1 R1GTz5 R2GTz5 R3GTz5;
    1 0 0 R1GTx6 R2GTx6 R3GTx6;
    0 1 0 R1GTy6 R2GTy6 R3GTy6;
    0 0 1 R1GTz6 R2GTz6 R3GTz6];
ZT1=[0 0 1]*(RzGamma'*RxAlpha'*RyBeta'*GT1);
ZT2=[0 0 1]*(RzGamma'*RxAlpha'*RyBeta'*GT2);
ZT3=[0 0 1]*(RzGamma'*RxAlpha'*RyBeta'*GT3);
ZT4=[0 0 1]*(RzGamma'*RxAlpha'*RyBeta'*GT4);
ZT5=[0 0 1]*(RzGamma'*RxAlpha'*RyBeta'*GT5);
ZT6=[0 0 1]*(RzGamma'*RxAlpha'*RyBeta'*GT6);
ZT=[ZT1;ZT2;ZT3;ZT4;ZT5;ZT6];L=[L1;L2;L3;L4;L5;L6];
% for k=1:6
for m=1:9
    leg1(m)=J1(1,m)*J2(m,k);leg2(m)=J1(2,m)*J2(m,k);leg3(m)=J1(3,m)*J2(m,k);
    leg4(m)=J1(4,m)*J2(m,k);leg5(m)=J1(5,m)*J2(m,k);leg6(m)=J1(6,m)*J2(m,k);
end L1_diff(k)=leg1(1)+leg1(2)+leg1(3)+leg1(4)+leg1(5)+leg1(6)+leg1(7)+leg1(8)+leg1(9);
L2_diff(k)=leg2(1)+leg2(2)+leg2(3)+leg2(4)+leg2(5)+leg2(6)+leg2(7)+leg2(8)+leg2(9);
L3_diff(k)=leg3(1)+leg3(2)+leg3(3)+leg3(4)+leg3(5)+leg3(6)+leg3(7)+leg3(8)+leg3(9);
L4_diff(k)=leg4(1)+leg4(2)+leg4(3)+leg4(4)+leg4(5)+leg4(6)+leg4(7)+leg4(8)+leg4(9);
L5_diff(k)=leg5(1)+leg5(2)+leg5(3)+leg5(4)+leg5(5)+leg5(6)+leg5(7)+leg5(8)+leg5(9);
L6_diff(k)=leg6(1)+leg6(2)+leg6(3)+leg6(4)+leg6(5)+leg6(6)+leg6(7)+leg6(8)+leg6(9);
end
L_diff=[L1_diff;L2_diff;L3_diff;L4_diff;L5_diff;L6_diff];
% Yer Çekimi Vektörünün Elde Edilmesi
for k=1:6
    for i=1:3
        a(i)=(m1+m2)*g*((1/L(2*i))^2*(L_diff(2*i,k))+(1/L(2*i-1))^2*(L_diff(2*i,k))))*(pz+ZT(i))...
            +(m1+m2)*g*((1/L(2*i))+1/L(2*i-1))+2*m2/(m1+m2))*diff(pz+ZT(i),Xpo(k));
    end
    Glegs(k)=a(1)+a(2)+a(3);
end

```

Dosya: RobotParametersSetup.m

```

clear all;close all;clc;
start_time=0;samp_time=0.001;sim_time=2;
deg2rad=pi/180;x_axis=[1 0 0];y_axis=[0 1 0];z_axis=[0 0 1];
% Hareketli ve sabit platformun bağlantı noktalarının Hesabı
pos_base=[];

```

```

pos_top = [];
alpha_b = 16.41456206/2*deg2rad; % Sabit platform için offset açısı alpha_t = 25.68141134/2*deg2rad; % Üst platform için
offset açısı height = 0.25; % Home konumundaki yükseklik
radius_b = 0.29326616983/2; % Sabit platformun yarıçapı
radius_t = 0.18867975191/2; % Hareketli platformun yarıçapı
for i = 1:3,
    % Sabit platform noktaları
    angle_m_b = (2*pi/3)*(i-1) - alpha_b;
    angle_p_b = (2*pi/3)*(i-1) + alpha_b;
    pos_base(2*i-1,:) = radius_b*[cos(angle_m_b), sin(angle_m_b), 0, 0];
    pos_base(2*i,:) = radius_b*[cos(angle_p_b), sin(angle_p_b), 0, 0];
    % Hareketli platform noktaları
    angle_m_t = (2*pi/3)*(i-1) - alpha_t + 2*pi/6;
    angle_p_t = (2*pi/3)*(i-1) + alpha_t + 2*pi/6;
    pos_top(2*i-1,:) = [radius_t*cos(angle_m_t), radius_t*sin(angle_m_t), height];
    pos_top(2*i,:) = [radius_t*cos(angle_p_t), radius_t*sin(angle_p_t), height];
end
pos_top = [pos_top(6,:); pos_top(1:5,:)];
% GTi'lerin hesaplanması
body_pts = pos_top - height*[zeros(2,6);ones(1,6)];
% Bacak vektörleri
legs = pos_top - pos_base;
leg_length = [ ];
leg_vectors = [ ];
for i = 1:6,
    leg_length(i) = norm(legs(i,:));
    leg_vectors(i,:) = legs(i,:) / leg_length(i);
end
% Dönel ve silindirik eksenlerin hesaplanması
for i = 1:6,
    rev1(i,:) = cross(leg_vectors(i,:), z_axis);
    rev1(i,:) = rev1(i,:) / norm(rev1(i,:));
    rev2(i,:) = - cross(rev1(i,:), leg_vectors(i,:));
    rev2(i,:) = rev2(i,:) / norm(rev2(i,:));
    cyl1(i,:) = leg_vectors(i,:);
    rev3(i,:) = rev1(i,:);
    rev4(i,:) = rev2(i,:);
end
% Koordinat sistemleri
lower_leg = struct('origin', [0 0 0], 'rotation', eye(3), 'end_point', [0 0 0]);
upper_leg = struct('origin', [0 0 0], 'rotation', eye(3), 'end_point', [0 0 0]);
for i = 1:6,
    lower_leg(i).origin = pos_base(i,:) + (3/8)*legs(i,:);
    lower_leg(i).end_point = pos_base(i,:) + (3/4)*legs(i,:);
    lower_leg(i).rotation = [rev1(i,:), rev2(i,:), cyl1(i,:)]';
    upper_leg(i).origin = pos_base(i,:) + (1-3/8)*legs(i,:);
    upper_leg(i).end_point = pos_base(i,:) + (1/4)*legs(i,:);
    upper_leg(i).rotation = [rev1(i,:), rev2(i,:), cyl1(i,:)]';
end
% Atalet ve kütle hesabı
top_thickness = 0.015;
base_thickness = 0.035;
inner_radius = 0.017/2;
outer_radius = 0.036/2;
density = 2700;
%Bacak atalet ve kütle hesabı
[lower_leg_mass, lower_leg_inertia] = inertiaCylinder(density, ...
    0.75*leg_length(1), outer_radius, inner_radius);
[upper_leg_mass, upper_leg_inertia] = inertiaCylinder(density, ...
    0.75*leg_length(1), inner_radius, 0);
% Hareketli ve sabit plakaların kütle atalet hesabı
[top_mass, top_inertia] = inertiaCylinder(density, ...
    top_thickness, radius_t, 0);
[base_mass, base_inertia] = inertiaCylinder(density, ...
    base_thickness, radius_b, 0);
Dosya: InitialParameters_with_motor.m
global mu Ix Iy Iz
global m1 m2
global GTx1 GTy1 GTz1 GTx2 GTy2 GTz2 GTx3 GTy3 GTz3
global GTx4 GTy4 GTz4 GTx5 GTy5 GTz5 GTx6 GTy6 GTz6
global g l1 l2
global I
global n p Js Jm Bs Bm

```

```

Kb=2.730e-3;%back EMF sabiti V/rpm
Kt=26.10e-3;%Tork sabiti Nm/A
L=265e-6;% indüktans H
R=7.10;% Armatür direnci ohm
n=1;%Bağlama oranı
p=1e-3; % ball-screw pitch m – Vidali bilye dönüş oranı
Js= 0.00028573e-3; %Kg.m^2 %Vidali bilye atalet momenti
Jm=0.58e-6; % Kg.m^2 %Mass moment of inertia of the motor shaft
Bs= 0.123e-3; % N.s/rad % Vidali bilyenin Viskoz sürtünme katsayısı
Bm= 0.00196e-3; %N.s/rad Motor milinin Viskoz sürtünme katsayısı
mu=top_mass;%Kg %Hareketli platform kütlesi
Ix=top_inertia(1); %Kg.m^2 %Hareketli platformun atalet momenti
Iy=top_inertia(5);%Kg.m^2 % Hareketli platformun atalet momenti
Iz=top_inertia(9);%Kg.m^2 % Hareketli platformun atalet momenti
g=9.81;
m1=lower_leg_mass;%Bacakların hareketli kısmın kütlesi
m2=upper_leg_mass;%Bacakların sabit kısmın kütlesi
l1=220e-3;%m %Bacakların sabit kısmın uzunluğu
l2=50e-3; %m %Bacakların hareketli kısmın uzunluğu
ksi=80e-3;%m % BGi ile alt platform arasındaki uzunluk
I=(1/(m1+m2))*(ksi*I1-(1/2)*m2*I2);
GTx1=body_pts(1);GTy1=body_pts(2);GTz1=body_pts(3);
GTx2=body_pts(4);GTy2=body_pts(5);GTz2=body_pts(6);
GTx3=body_pts(7);GTy3=body_pts(8);GTz3=body_pts(9);
GTx4=body_pts(10);GTy4=body_pts(11);GTz4=body_pts(12);
GTx5=body_pts(13);GTy5=body_pts(14);GTz5=body_pts(15);
GTx6=body_pts(16);GTy6=body_pts(17);GTz6=body_pts(18);%0;
UMLegs=[m1 m2 GTx1 GTy1 GTz1 GTx2 GTy2 GTz2 GTx3 GTy3 GTz3 GTx4 GTy4 GTx5 GTy5 GTz5 GTx6 GTy6
GTz6];
UMForward=[m1 m2 mu g I Ix Iy Iz GTx1 GTy1 GTz1 GTx2 GTy2 GTz2 GTx3 GTy3 GTz3 GTx4 GTy4 GTz4 GTx5 GTy5
GTz5 GTx6 GTy6 GTz6];
UMJacobian=[GTx1 GTy1 GTz1 GTx2 GTy2 GTz2 GTx3 GTy3 GTz3 GTx4 GTy4 GTz4 GTx5 GTy5 GTz5 GTx6 GTy6
GTz6];

```

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] **Kızır S.**, Bingül Z., Impedance and force control of a Stewart Platform, *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, değerlendirme aşamasında .
- [2] **Kızır S.**, Bingül Z., Position Control and Trajectory Tracking of the Stewart Platform, Editor: Küçük S., *Serial and Parallel Robot Manipulators - Kinematics, Dynamics, Control and Optimization*, InTech, Rijeka, Croatia, 19-41, 2012.
- [3] **Kızır S.**, Bingül Z., Stewart Platformunun Konum ve Bulanık Empedans-Kuvvet Kontrolü, *Ulusal Otomatik Kontrol Toplantısı*, Niğde, Türkiye, 11-13 Ekim 2012.
- [4] **Kızır S.**, Bingül Z., Haptik Kontrollü Stewart Platformu ile Endoskop Konumlama, *Ulusal Otomatik Kontrol Toplantısı*, Niğde, Türkiye, 11-13 Ekim 2012.
- [5] **Kızır S.**, Bingül Z., Oysu C., Küçük S., Development and Control of a High Precision Stewart Platform, *SDÜ Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 2011, **3**, 51-59.
- [6] **Kızır S.**, Bingül Z., Yüksek Hassasiyetli Stewart Platformunun Kayma Kipli Konum Kontrolü ve Yörünge Takibi, *Ulusal Otomatik Kontrol Toplantısı*, Kocaeli, Türkiye, 21-23 Eylül 2010.
- [7] Karahan O., **Kızır S.**, Bingül Z., Yüksek Hassasiyetli Stewart Platformunun Kesir Dereceli PID Yöntemiyle Konum Kontrolü ve Yörünge Takibi, *Ulusal Otomatik Kontrol Toplantısı*, Kocaeli, Türkiye, 21-23 Eylül 2010.
- [8] **Kızır S.**, Bingül Z., Oysu C., Küçük S., Yüksek Hassasiyetli Stewart Platformunun Tasarımı ve PID ile Kontrolü, *Ulusal Otomatik Kontrol Toplantısı*, İstanbul, Türkiye, 13-16 Ekim 2009.
- [9] **Kızır S.**, Bingül Z., Oysu C., Development and Control of a High Precision Stewart Platform, *IJRCS09 - 2th International Joint Robotics Competition and Symposium*, Isparta, Türkiye, 20-24 Mayıs 2009.

ÖZGEÇMİŞ

1982 yılında Mersin’de dünyaya geldi. İlk ve orta öğrenimini Mersin’de tamamladı. 2000 yılında Kocaeli Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi Bölümü’nde yüksek öğrenimine başladı. 2005 yılında Teknik Öğretmen unvanı ile mezun oldu. 2005-2008 yılları arasında, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mekatronik Mühendisliği Bölümü’nde Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı. 2008 yılında Kocaeli Üniversitesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü’nde doktora eğitimine başladı. 2005 yılından bu yana Kocaeli Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü’nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır. Kontrol ve otomasyon sistemleri, robotik, güç elektroniği ve gömülü sistemler çalışma alanlarından bazılarıdır.