



**Farklı Kinematik Modellere Sahip Ana ve Bağımlı Robotları Olan
Telerobotik Sistemin Geliştirilmesi: Teori ve Uygulamaları**

Program Kodu: 1001

Proje No: 113E147

Proje Yürütücüsü: **Doç. Dr. Enver TATLICIOĞLU**

Araştırmacılar:

Prof. Dr. Erkan ZERGEROĞLU

Yrd. Doç. Dr. Mehmet İsmet Can DEDE

Bursiyerler:

Kamil ÇETİN

Osman Nuri ŞAHİN

Emre UZUNOĞLU

Meryem DENİZ

Kadriye Merve DOĞAN

Barış BAĞDADIOĞLU

Mehmet KIRAZ

ARALIK 2015

İZMİR

Önsöz

Ülkemizin geride kalma eğilimde olduğu robotik alanında önerdiğimiz Farklı Kinematik Modellere Sahip Ana ve Bağımlı Robotları Olan Telerobotik Sistemin Geliştirilmesi: Teori ve uygulamaları başlıklı projemize verdiği destekten ötürü adlı proje TÜBİTAK'a teşekkür ederiz.

İçindekiler

Önsöz	i
Şekil Listesi	vi
Tablo Listesi	x
Özet	xii
Abstract	xiii
1 Giriş	1
2 Görev uzayı denetleyicisi tasarımları	3
2.1 Artık robot kolları için ikincil görev hedefinde asimptotik kararlılık sağlayan görev uzayı denetleyicisi tasarımı	3
2.1.1 Giriş	3
2.1.2 Dinamik model, kinematik model ve özellikleri	5
2.1.3 Hata sistemi	7
2.1.4 Denetleyici tasarımı ve kararlılık analizi	8
2.1.5 Uyarlamalı denetleyici tasarımı	11
2.1.6 Benzetim sonuçları	13
2.1.7 Sonuçlar	16
2.2 Dinamik belirsizlikleri olan robot kolları için öğrenmeli görev uzayı denetleyicisi tasarımı	16
2.2.1 Giriş	16
2.2.2 Dinamik model, kinematik model ve özellikleri	18
2.2.3 Öğrenmeli denetleyici tasarımı	20
2.2.4 Kararlılık Analizi	24
2.2.5 Benzetim Sonuçları	26

2.2.6	Sonuçlar	27
2.3	Robot kollarının dinamik ve kinematik belirsizliklere karşı sürekli gürbüz görev uzayı takip denetimi	27
2.3.1	Giriş	27
2.3.2	Dinamik model, kinematik model ve özellikleri	28
2.3.3	Hata sistemi	30
2.3.4	Denetleyici tasarımı	32
2.3.5	Kararlılık analizi	33
2.3.6	Deney sonuçları	36
2.3.7	Sonuçlar	38
2.4	Robot kollarının dinamik ve kinematik belirsizliklere karşı görev uzayı takibi için gürbüz çıkış geri-beslemeli denetleyici tasarımı	39
2.4.1	Giriş	39
2.4.2	Dinamik model, kinematik model ve özellikleri	40
2.4.3	Hata Sistemi	40
2.4.4	Denetleyici ve gözlemci tasarımı	41
2.4.5	Deney Sonuçları	43
2.4.6	Sonuçlar	43
2.5	Sonuçlar	44
3	Eklemler uzayı denetleyici tasarımları	45
3.1	Robot kolları için çıkış geri-beslemeli öğrenmeli denetleyici tasarımı	45
3.1.1	Giriş	45
3.1.2	Robot dinamik modeli	46
3.1.3	Gözlemci-denetleyici tasarımı	47
3.1.4	Gözlemci hatası dinamiklerinin elde edilmesi	49
3.1.5	Eklemler takip hatası dinamiklerinin elde edilmesi	49
3.1.6	Sınırlılık ve kararlılık analizi	50
3.1.7	Benzetim sonuçları	52
3.1.8	Sonuçlar	53
3.2	Denetleyici girişinde çarpımsal bozan etkene sahip robot kolları için gürbüz eklem uzayı takip denetleyicisi tasarımı ve deneysel gerçekleştirilmesi	56

3.3	Sonuçlar	63
4	Telerobotik sistemlerin görev uzayında denetlenmesi için denetleyici tasarlanması	64
4.1	Pasif ayrıştırma yöntemi ile telerobotik uygulamalarının görev uzayında denetiminin sağlanması	64
4.1.1	Giriş	64
4.1.2	Telerobotik sistemin modeli	65
4.1.3	Telerobotik sistemin kenetlenmiş ve biçimlenmiş alt sistemlerinin modelleri	67
4.1.4	Denetleyici tasarımı	69
4.1.5	Benzetim sonuçları	69
4.1.6	Sonuçlar	71
4.2	Pasif ayrıştırma yöntemi ile artık eklemli telerobotik uygulamalarının görev uzayında denetiminin sağlanması	73
4.2.1	Giriş	73
4.2.2	Artık eklemli telerobotik sistemin modeli	73
4.2.3	Artık eklemli telerobotik sistemin kenetlenmiş ve biçimlenmiş alt sistemlerinin modelleri	76
4.2.4	Denetleyici tasarımı	77
4.2.5	Benzetim sonuçları	78
4.2.6	Sonuçlar	80
4.3	Sonuçlar	80
5	Model aracılı denetim	83
5.1	Sabit ve değişken zaman gecikmeleri ile baş eden iki yönlü doğrudan teleoperasyon ve model aracılı denetim yöntemlerinin geliştirilmesi ve deneysel olarak karşılaştırılması	83
5.1.1	Giriş	83
5.1.2	Teleoperasyon denetimi	85
5.1.3	Doğrudan teleoperasyon	85
5.1.4	Model aracılı teleoperasyon	85
5.1.5	Denetleyici yapısı	91
5.1.6	Deney düzeneği ve test sonuçları	92
5.1.7	Sonuçlar	92

5.2	Sabit zaman gecikmeleri ile baş eden iki yönlü doğrudan teleoperasyon ve model aracılı denetim yöntemlerinin bağımlı robotu mobil robot olan telerobotik sistemde deneysel olarak karşılaştırılması	96
5.2.1	Giriş	96
5.2.2	Test düzeneği	96
5.2.3	Doğrudan teleoperasyon testinin sonuçları	97
5.2.4	Model aracılı denetim testinin sonuçları	98
5.2.5	Sonuçlar	99
5.3	Model aracılı denetimi yönteminin iletişim hatalarına maruz kalan teleoperasyon sistemi için çoklu serbestlik derecesine çıkarılması ve deneysel gerçekleştirilmesi	107
5.3.1	Giriş	107
5.3.2	Önerilen denetleyicinin genel yapısı	109
5.3.3	Çoklu serbestlik derecesinde model oluşturulması ve güncellenmesi	111
5.3.4	Deney düzeneği	112
5.3.5	Test sonuçları	113
5.3.6	Sonuçlar	115
5.4	Sonuçlar	119
6	GTÜ ve İYTE arasında gerçekleştirilen telerobotik deney çalışmalarının sonuçları	120
6.1	Gerçek ana ve sanal bağımlı robotlar arasında görev uzayında denetim deneyi	121
6.2	Gerçek ana ve gerçek bağımlı robotlar arasında eklem uzayındaki denetim deneyi	122
6.3	Gerçek ana ve gerçek bağımlı robotlar arasında görev uzayındaki denetim deneyi	125
7	Sonuçlar ve tartışma	127
7.1	Tartışma	129
7.2	Kazanımlar ve devam çalışmaları	130
7.3	Proje kapsamındaki yayınlarımız	132
7.4	Eğitim faaliyetleri	133
7.5	Konferans katılım faaliyetleri	134
7.6	Proje konusunda devam eden lisansüstü çalışmalar	136
	Bibliography	149

EKLER**150**

A	Mekatronik sistemler için model bilgisinden bağımsız öz kazanç ayarlamalı hız gözlemcisi tasarımı	150
A.1	Giriş	150
A.2	Genel mekatronik sistem modeli	151
A.3	Hız gözlemcisi tasarımı	152
A.4	Kararlılık analizi	153
A.5	Deneysel sonuçlar	157
A.6	Sonuçlar	157
B	Kuvvet/tork gözlemcisi	158
B.1	Sistem modeli	160
B.2	Kuvvet/tork gözlemcisi tasarımı	161
B.3	Kararlılık analizi	162
B.4	Sonuçlar	162
C	(2.90) ile verilen üst sınırın elde edilmesi	162
D	(2.110) ile verilen eşitsizliğin elde edilmesi	167
E	(2.139) ile verilen terim için üst sınır elde edilmesi	169
F	(2.157) ile verilen eşitsizliğinin ispat edilmesi	171
G	(3.22) ile verilen terimin ispatı	172
H	Phantom omni haptik cihazının dinamik modeli	173
I	Phantom omni ve Haptic Wand haptik cihazları	175
J	Bölüm 2'in şekilleri	177

Şekil Listesi

3.1	Ekleme pozisyon takip hatası $e(t)$	54
3.2	Tork girişi $\tau(t)$	55
3.3	Takip edilmesi istenen ekleme pozisyonları $\theta_d(t)$ ile robotun ekleme pozisyonları $\theta(t)$.	55
3.4	$\gamma_p = 0.1$ için ekleme pozisyonları	58
3.5	$\gamma_p = 0.2$ için ekleme pozisyonları	59
3.6	$\gamma_p = 0.5$ için ekleme pozisyonları	59
3.7	$\gamma_p = 1$ için ekleme pozisyonları	60
3.8	$\gamma_p = 2$ için ekleme pozisyonları	60
3.9	Kazançların öz ayarlamalı olduğu durumda $\gamma_p = 0.1$ için ekleme pozisyonları	61
3.10	Kazançların öz ayarlamalı olduğu durumda $\gamma_p = 0.2$ için ekleme pozisyonları	61
3.11	Kazançların öz ayarlamalı olduğu durumda $\gamma_p = 0.5$ için ekleme pozisyonları	62
3.12	Kazançların öz ayarlamalı olduğu durumda $\gamma_p = 1$ için ekleme pozisyonları	62
3.13	Kazançların öz ayarlamalı olduğu durumda $\gamma_p = 2$ için ekleme pozisyonları	63
4.1	Ana ve bağımlı robotların uç noktalarının hareketleri	71
4.2	Ana ve bağımlı robotlara uygulanan tork	72
4.3	Kenetlenmiş ve biçimlenmiş sistemlerin hareketleri	72
4.4	Ana ve bağımlı robotların uç noktalarının hareketleri	81
4.5	Ana ve bağımlı robotlara uygulanan tork	81
4.6	Kenetlenmiş ve biçimlenmiş sistemlerin hareketleri	82
5.1	Model aracılı teleoperasyon	93
5.2	Modelde z ekseninde yüzey güncellemesi	94
5.3	Scara robotun mekanizması	94
5.4	Sabit zaman gecikmeli doğrudan teleoperasyon	95

5.5	Sabit zaman gecikmeli model aracılı teleoperasyon	95
5.6	Değişken zaman gecikmeli doğrudan teleoperasyon	96
5.7	Değişken zaman gecikmeli model aracılı teleoperasyon	97
5.8	Test düzeneği: Solda sanal bağımlı robot olarak kullanılan mobil robot ve ana robot olarak kullanılan HIPHAD robotu	100
5.9	Doğrudan teleoperasyon deneyinde bağımlı sistemin takip başarımı	101
5.10	Doğrudan teleoperasyon deneyinde ana sistemin kullanıcıya ilettiği kuvvet çıktıları	102
5.11	Doğrudan teleoperasyon deneyinde bağımlı sistemin pozisyon takip hatası (kırmızı), ana sistemin pozisyonu (mavi), bağımlı sistemin kaydırılmış pozisyonu (yeşil)	103
5.12	Model aracılı denetim deneyinde bağımlı sistemin takip başarımı	104
5.13	Model aracılı denetim deneyinde ana sistemin kullanıcıya ilettiği kuvvet çıktıları	105
5.14	Model aracılı denetim deneyinde bağımlı sistemin pozisyon takip hatası (kırmızı), ana sistemin pozisyonu (mavi), bağımlı sistemin kaydırılmış pozisyonu (yeşil)	106
5.15	Model aracılı teleoperasyon denetim yapısı	116
5.16	Model oluşturma akış şeması	117
5.17	Deney düzeneği	117
5.18	Değişken zaman gecikmesi ve iletişim hatalarında konum takibi	117
5.19	3 boyutlu teleoperasyon için konum takibi	118
5.20	(a) Empedans testi konum takibi (b) Empedans testi kuvvet takibi	118
6.1	Gerçek ana ve sanal bağımlı robot arasındaki görev uzayı takip hatası	122
6.2	Gerçek ana ve sanal bağımlı robotların görev uzayındaki hareketleri	123
6.3	Gerçek ana ve gerçek bağımlı robot arasındaki eklem uzayı takip hatası	124
6.4	Gerçek ana ve gerçek bağımlı robotların eklem uzayındaki hareketleri	124
6.5	Gerçek ana ve gerçek bağımlı robot arasındaki görev uzayı takip hatası	126
6.6	Gerçek ana ve gerçek bağımlı robotların görev uzayındaki pozisyonları	126
1	Hız gözlemcisi $\dot{q}(t)$	158
2	Pozisyon gözlemci hatası $\tilde{q}(t)$	159
3	Zamanla değişen gözlemci kazancı $\hat{\beta}(t)$	159
4	Zamanla değişen gözlemci kazancı $K(t)$	160
5	PHANToM Omni haptik cihazı	175

6	Gebze Teknik Üniversitesi'ndeki Haptic Wand haptik cihazı	176
7	Gebze Teknik Üniversitesi'ndeki Haptic Wand haptik cihazı	176
8	Görev uzayı takip hatası $e(t)$	177
9	Eklem açıları $\theta(t)$	178
10	Tork girişi $\tau(t)$	178
11	Takip edilmesi istenen görev uzayı pozisyonu $x_d(t)$ ve robotun uç noktasının pozisyonu $x(t)$	179
12	İkincil görev işlevi $y_s(t)$	179
13	Görev uzayı takip hatası $e(t)$	180
14	Eklem açıları $\theta(t)$	180
15	Tork girişi $\tau(t)$	181
16	Takip edilmesi istenen görev uzayı pozisyonu $x_d(t)$ ve robotun uç noktasının pozisyonu $x(t)$	181
17	İkincil görev işlevi $y_s(t)$	182
18	Görev uzayı takip hatası $e(t)$	182
19	Tork girişi $\tau(t)$	183
20	Öğrenme terimi $\hat{Q}(t)$	183
21	Takip edilmesi istenen görev uzayı pozisyonu ve robotun uç noktasının pozisyonunun farkın x ve y eksenlerinde ayrı ayrı gösterimi.	184
22	Takip edilmesi istenen görev uzayı pozisyonu ve robotun uç noktasının pozisyonunun $x-y$ ekseninde gösterimi.	185
23	Görev uzayı takip hatası $e(t)$	185
24	Takip edilmesi istenen görev uzayı pozisyonu $x_d(t)$ ile robotun uç noktasının pozisyonu $x(t)$	186
25	Tork girişi $\tau(t)$	186
26	Öz ayarlamalı durumda görev uzayı takip hatası $e(t)$	187
27	Öz ayarlamalı durumda takip edilmesi istenen görev uzayı pozisyonu $x_d(t)$ ile robotun uç noktasının pozisyonu $x(t)$	187
28	Öz ayarlamalı durumda tork girişi $\tau(t)$	188
29	Öz ayarlamalı denetleyici kazançları	188
30	Görev uzayı takip hatası $e(t)$	189

31	Görev uzayında takip edilecek pozisyon $x_d(t)$ ve robotun uç noktasının pozisyonu $x(t)$	189
32	Tork girişleri $\tau(t)$	190

Tablo Listesi

3.1	γ_p 'nin farklı değerleri için denetim kazançları	57
3.2	Farklı γ_p değerleri için öz ayarlamalı yapıdan faydalanılarak elde edilen denetim kazançlarının deney sonunda yakınsadıkları değerler	58

Özet

Proje kapsamında farklı kinematik modellere sahip ana ve bağımlı robotları olan telerobotik sistemler için denetleyicilerin tasarlanması ve İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü ve Gebze Teknik Üniversitesi (eski adı Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü) arasında gerçekleştirilecek deneyler ile gerçekleşmesi hedeflenmiştir. Proje kapsamında robot kolları için görev uzayı ve eklem uzayı denetleyicileri tasarlanmıştır. Tasarlanan denetleyiciler kinematik ve/veya dinamik model belirsizlikleri ile mücadele ederken aynı zamanda da eklem hızlarının ölçümlerinin eksikliği hız gözlemcileri giderilmiştir. Kararlılık analizleri Lyaunov tarzı yöntemler kullanılarak gösterilmiştir. Tasarlanan denetleyicilerin başarımları benzetim çalışmaları ve deneylerle gösterilmiştir. Ardından telerobotik çalışmalarına geçilmiştir. Telerobotik sistemlerin görev uzayında denetlenmesini sağlayan iki denetleyici tasarlanmış ve başarımları benzetimlerle gösterilmiştir. Daha sonra model aracılı denetim ve doğrudan teleoperasyon yöntemleri farklı kinematik modellere sahip ana ve bağımlı robotlardan oluşan telerobotik sistemler için deneysel olarak kıyaslanmıştır. Son olarak İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü ile Gebze Teknik Üniversitesi arasında internet ağı üzerinden farklı serbestlik derecelerine ve farklı kinematik modellere sahip robotlar arasında teleoperasyon deneyleri başarıyla yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler:

Robotik, Telerobotik, İleri Uyarlamalı ve Gürbüz Denetim

Abstract

Designing controllers for a telerobotic system consisting of kinematically dissimilar master and slave systems and then experimentally verifying the performance of these controllers for a telerobotic system with the master system located at Gebze Technical University and the slave system located at İzmir Institute of Technology are the main aims of this research project. In pursuit of these aims, task–space and joint–space controllers are designed. The controllers are to deal with parametric or unstructured uncertainties in kinematic and/or dynamic models of the robot manipulators while the lack of joint velocity measurements are addressed via design of velocity observers. Lyapunov based techniques are used to demonstrate the stability of the proposed controllers. Next two controllers are designed for task–space control of teleoperators systems and their performance are demonstrated via numerical simulations. Afterwards, experimental comparison of model mediated teleoperation and direct teleoperation for telerobotic systems composed of kinematically dissimilar master and slave systems. Finally, teleoperation experiments with master and slave robots having different degrees–of–freedom and different kinematic models are successfully performed between İzmir Institute of Technology and Gebze Technical University over the internet.

Keywords:

Robotics, Telerobotics, Advanced Adaptive and Robust Control Techniques

1. Giriş

Proje kapsamında farklı kinematik modellere sahip ana ve bağımlı robotları olan telerobotik sistemler için denetleyicilerin tasarlanması ve İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü ve Gebze Teknik Üniversitesi arasında gerçekleştirilecek deneyler ile tamamlanması hedef olarak gösterilmiştir. Bu kapsamda farklı kinematik modellere sahip ana ve bağımlı robotlardan oluşan telerobotik sistemde denetimin iki farklı şekilde gerçekleştirilmesi değerlendirilmiştir. Birinci yöntemde aynı eklem sayısına sahip ana ve bağımlı robotların eklemleri arasında takibi sağlayan eklem uzayı denetleyicilerinin geliştirilmesidir. İkinci yöntemde ise ana ve bağımlı robotların eklem sayısından bağımsız bir şekilde bu robotların uç noktalarının pozisyon ve yönelimlerinin takibinin görev uzayı denetleyicileri ile sağlanmasıdır. Bu kapsamda Bölüm 2'de telerobotik sistemlerde de kullanılabilecek görev uzayı denetleyicileri geliştirilmiştir. Farklı kinematik modellere sahip ana ve bağımlı robotları olan telerobotik sistemlerde denetimin eklem uzayında da gerçekleştirilebilecek olması üzerine Bölüm 3'te robot kolları için eklem uzayı denetleyicileri tasarlanmıştır. İlaveten Bölüm 4'te telerobotik sistemlerde görev uzayında takibi sağlayan denetleyiciler geliştirilmiştir. Hedeflenen internet ağı üzerinden telerobotik deneylerin gerçekleştirilmesi olduğu için zaman gecikmelerine karşı başarıyı iyi olan model aracılı denetim yöntemi ve bu yöntem kullanılarak elde edilen deneysel sonuçlar Bölüm 5'te paylaşılmıştır. Bölüm 6'da ise Bölüm 2 ve Bölüm 3'te geliştirilen denetleyiciler kullanılarak İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü ve Gebze Teknik Üniversitesi arasında gerçekleştirilen deneylerin sonuçları sunulmuştur.

Ek A ve Ek B'de mekatronik sistemler için sırasıyla öz ayarlamalı hız gözlemcisi ve kuvvet/tork gözlemcisi geliştirilmiştir.

Bundan sonraki bölümlerde her bölüm kendi içerisinde alt bölümlere ayrılmış olup her alt bölüm kendi içinde bir bütünlük içerecek şekilde sunulmuştur. Bu şekilde bir raporlamanın tercih edilmesinin ana sebebi proje konularının artık olmayan ve artık robotlar, uyarlamalı, öğrenmeli gürbüz denetleyici tasarımı, tüm durum, çıkış geri-beslemeli denetleyici tasarımı, telerobotik gibi farklı konularda olması ve bu farklı konuların hepsinin girişlerinin bir bütün halinde sunulmasının, yöntem-

lerin tek bir bölümde anlatılmasının içereceği zorluklar nedeniyledir.

2. Görev uzayı denetleyicisi tasarımları

Proje kapsamında artık robot kolları için görev uzayı denetleyicileri tasarlanmıştır. Tasarlanan bu denetleyiciler bu bölümde sunulmuştur. Bölüm 2.1'de artık robot kolları için dinamik ve kinematik modelin bilindiği, eklem pozisyon ve hızlarının ölçüldüğü durumda bir görev uzayı denetleyicisi tasarlanmıştır. Bu denetleyicinin artık olmayan robot kollarına uygun hale dönüştürülmüş hali Bölüm 6.1'de sunulan GTÜ ve İYTE arasında gerçekleştirilen deneylerde kullanılmıştır. Yine Bölüm 2.1'de dinamik modelde parametrik belirsizliklerin olduğu durum için uyarlamalı denetleyici de tasarlanmıştır. Ardından robotların dinamik modellerinde karşılaşılan yapısı belli olmayan belirsizliklerle başa çıkmak için Bölüm 2.2'de öğrenme tabanlı görev uzayı denetleyicisi geliştirilmiştir. Daha sonra robotun hem dinamik modelinde hem de kinematik modelinde belirsizliklerin olduğu duruma odaklanılmış ve tüm durum geri-beslemeli denetleyici tasarımı ve deneysel gerçekleşmesi Bölüm 2.3'te anlatılmıştır. Son olarak Bölüm 2.4'te robotun sadece uç noktasının pozisyon ve yöneliminin ölçüldüğü durumda yeni bir görev uzayı denetleyicisi tasarlanmıştır. Bu denetleyici Bölüm 6.3'te sunulan GTÜ ve İYTE arasında gerçekleştirilen deneylerde kullanılmıştır.

Bu bölüm kapsamında gerçekleştirilen sayısal çalışmaların sonuçları Ek J ile verilmiştir.

2.1 Artık robot kolları için ikincil görev hedefinde asimptotik kararlılık sağlayan görev uzayı denetleyicisi tasarımı

2.1.1 Giriş

Eklem sayısı görev uzayının boyutundan büyük olan robot kollarına kinematik olarak artık robot kolları ya da kısaca artık robot kolları denmektedir [1]. Artık robot kollarında gereğinden daha fazla eklem sayısı olması denetleyici tasarımını zorlaştırması ve uygulamasını karmaşıklaştırmasına rağmen, robotun uç nokta takibinde esneklikler sağlaması nedeniyle tercih edilmektedirler. Artık robot kolları üzerine yapılan denetleyici tasarımı çalışmalarına altta yer verilmiştir. Khatib robo-

tun kartezyen uzayında ifade edilen dinamik modeline dayanan çalışmasını Jakobiyen matrisinin sözde tersine dayanan yöntem ile artık robot kollarına uygulamıştır [2]. Seraji görev uzayında denetim sağlayan bir denetleyici tasarlamıştır [3]. Colbaugh artık robot kolları için gürbüz uyarlamalı denetleyici tasarlamıştır [4]. Peng genişletilmiş görev uzayı yöntemini kullanarak artık robot kolları için uyumlu denetleyici tasarlamıştır [5]. Robotik alanında artık robot kolları üzerine yapılan araştırmalara [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8] çalışmalarından ulaşılabilir.

Artık robot kollarında, verilen bir uç nokta pozuna (pozisyon ve yönelimine) sonsuz sayıda eklem düzeni karşı gelmektedir [9]. Bilimsel yazında görev uzayında istenilen bir hareket gerçekleştirilirken bazı eklem düzenlerinin tercih edilebileceği belirtilmiştir [10]. Tercih edilecek eklem düzenlerinin elde etmek amacıyla ikincil hedef işlevleri tanımlanabilir. İkincil hedeflere örnek olarak engellerden sakınma [11], eklem limitlerinden sakınma ya da bir nesnenin kavranması [12] verilebilir. Bilimsel yazındaki ilk çalışmalarda, ikincil hedefler asıl hedef olan görev uzayında takip hedefine kararlılık analizlerine katılmadan eklenmiştir [13], [14], [15]. Bu çalışmalardan Hsu'nun yayınında robotun dinamik ve kinematik modelinin (hem ileri kinematik model hem de hız kinematiği modeli) tam olarak bilindiği ve eklem pozisyonları ile eklem hızlarının ölçüldüğü durumda artık robotun iç hareketinin bir vektör uzayının projeksiyonunun takibi sağlanmıştır [13]. Bu problemin dinamik modelde yapısal belirsizliklerin olduğu durumda uyarlamalı denetleyiciler önerilmiştir [16], [17], [18], [19]. Öte yandan robotun dinamik modelinde yapısı belli olmayan belirsizlikler bulunduğu gürbüz denetleyiciler tasarlanmıştır [11], [12], [20], [21]. Üstteki çalışmalarda tasarlanan denetleyiciler görev uzayında takibi sağlasa da ikincil hedef için bir kararlılık analizi yapılmamıştır. Proje yürütücüsünün önceki çalışmalarında ikincil hedef hatası için kararlılık analizleri yapılmış ve ikincil hedef takip hatasının sadece sınırlı kaldığı gösterilmiştir [22], [23], [24], [25].

Bu çalışmada artık robot kollarının görev uzayında denetimi konusundaki bilimsel yazındaki önemli eksiklerden olan ikincil hedef takip hatasının sifıra sürülmesi hedeflenmiştir. Proje yürütücüsünün önceki çalışmalarında [22], [23], [24], [25] tasarladığı ikincil hedef denetleyicileri bu problemi çözemediği için yeni bir tasarıma ihtiyaç duyulmuştur. Tasarlanan yeni ikincil hedef denetleyicisi için yeni kararlılık analizlerinin yapılmasına ihtiyaç duyulmuştur. Kararlılık analizleri çalışmanın ileriki safhalarından da görülebileceği üzere hem görev uzayı takip hatasının hem de ikincil hedef takip hatasının beraberce incelenebileceği tek bir Lyapunov işlevi üzerinden yürütülmüştür.

2.1.2 Dinamik model, kinematik model ve özellikleri

Altta n serbestlik dereceli dönel eklemlili robot kolu modeli verilmiştir [13]

$$M(\theta)\ddot{\theta} + N(\theta, \dot{\theta}) = \tau(t) \quad (2.1)$$

öyle ki $N(\theta, \dot{\theta}) \in \mathbb{R}^n$ terimi alttaki şekilde tanımlanmıştır

$$N(\theta, \dot{\theta}) \triangleq V_m(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G(\theta) + F_d\dot{\theta}. \quad (2.2)$$

(2.1) ve (2.2)'de $\theta(t)$, $\dot{\theta}(t)$, $\ddot{\theta}(t) \in \mathbb{R}^n$ sırasıyla eklem pozisyon, hız ve ivme vektörlerini, $M(\theta) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ eylemsizlik matrisini, $V_m(\theta, \dot{\theta}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ merkez–kaç ve Coriolis etkilerini, $G(\theta) \in \mathbb{R}^n$ yerçekimi etkilerini, $F_d \in \mathbb{R}^{n \times n}$ sabit, artı tanımlı, köşegen dinamik sürtünme etkilerini, ve $\tau(t) \in \mathbb{R}^n$ tork girişini göstermektedir.

Bu kısımda geliştirilecek denetleyici altta verilen standart model özelliklerini kullanmaktadır [26], [27].

Özellik 1. *Eylemsizlik matrisi $M(\theta)$ simetrik ve artı tanımlı olup alttaki eşitsizlikleri sağlamaktadır*

$$m_1 \|\zeta\|^2 \leq \zeta^T M(\theta)\zeta \leq m_2 \|\zeta\|^2 \quad \forall \zeta \in \mathbb{R}^n. \quad (2.3)$$

Üstte $m_1, m_2 \in \mathbb{R}$ artı sabitleri ve $\|\cdot\|$ standart Öklit normunu göstermektedir.

Özellik 2. *Eylemsizlik matrisi ve merkez–kaç ve Coriolis etkilerini gösteren matris alttaki ters simetri özelliğini sağlamaktadır*

$$\zeta^T [\dot{M}(\theta) - 2V_m(\theta, \dot{\theta})]\zeta = 0 \quad \forall \zeta \in \mathbb{R}^n. \quad (2.4)$$

Özellik 3. *(2.1)'in sol tarafı alttaki şekilde doğrusal olarak parametrelerine ayrılır*

$$Y(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta})\phi = M(\theta)\ddot{\theta} + V_m(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G(\theta) + F_d\dot{\theta}. \quad (2.5)$$

Üstte $Y(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}) \in \mathbb{R}^{n \times p}$ regresör matrisini ve $\phi \in \mathbb{R}^p$ ise robotun özelliklerine bağlı sabit parametre vektörünü gösterir.

Robotun uç noktasının pozu (pozisyon ve yönelimi) görev uzayında $x(t) \in \mathbb{R}^m$ ile gösterilmekte

ve $n > m$ olduğunda robot artık olmaktadır. Altta verilen ileri kinematik ifadesi ile robotun uç noktasının pozisyon ve yönelimi robotun eklem pozisyonlarına bağlı olarak alttaki şekilde ifade edilir

$$x = f(\theta). \quad (2.6)$$

Üstte $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ ileri kinematik işlevini göstermektedir. Denklem (2.6)'nin zamana göre türevinin alınmasıyla alttaki ifade elde edilebilir

$$\dot{x} = J\dot{\theta}. \quad (2.7)$$

Denklem (2.7)'de $\dot{x}(t) \in \mathbb{R}^m$ görev uzayı hız vektörünü ve $J(\theta) \triangleq \frac{\partial f(\theta)}{\partial \theta} \in \mathbb{R}^{m \times n}$ ise Jakobiyen matrisini göstermektedir. $m \neq n$ olduğundan dolayı Jakobiyen matrisinin $J^+(\theta) \in \mathbb{R}^{n \times m}$ ile gösterilen ve altta tanımı verilen sözde tersine ihtiyaç duyulmaktadır

$$J^+ \triangleq J^T(JJ^T)^{-1}. \quad (2.8)$$

Jakobiyen matrisinin üstte verilen sözde tersi alttaki ifadeyi sağlamaktadır¹

$$JJ^+ = I_m. \quad (2.9)$$

(2.8)'de tanımlanan sözde ters altta verilen Moore–Penrose ifadelerini sağlar

$$JJ^+J = J \quad J^+JJ^+ = J^+ \quad (J^+J)^T = J^+J \quad (JJ^+)^T = JJ^+. \quad (2.10)$$

Üsttekilere ilaveten, $(I_n - J^+J)$ matrisi ise alttaki ifadeleri sağlar

$$\begin{aligned} (I_n - J^+J)(I_n - J^+J) &= I_n - J^+J \\ (I_n - J^+J)^T &= I_n - J^+J \\ J(I_n - J^+J) &= 0_{m \times n} \\ (I_n - J^+J)J^+ &= 0_{m \times n}. \end{aligned} \quad (2.11)$$

Altta verilenler artık robot kollarının dinamik denetimi üzerine olan bilimsel yazında sıklıkla kullanılmakta olup bu çalışmada da kullanılmaktadır.

Not 1. Denetleyici tasarımında Jakobiyen matrisinin sözde tersinin tüm $\theta(t)$ için elde edilebilir ol-

¹Bu raporda I_m $m \times m$ boyutlu birim matrisi ve $0_{m \times n}$ ise $m \times n$ boyutlu sıfır matrisini göstermektedir

ması gerekmektedir ki bu durum tüm kinematik tekilliklerin önceden bilinip robotun uç noktasının takip edeceği pozisyon ve yönelimin buna göre tasarlanması ile çözülebilir.

Not 2. Dinamik ve kinematik terimler $\theta(t)$ 'ya trigonometrik işlevler ile bağlı olup olası tüm $\theta(t)$ değerleri için sınırlıdır.

2.1.3 Hata sistemi

Görev uzayı takip hatası $e(t) \in \mathbb{R}^m$ ile gösterilmekte olup alttaki şekilde tanımlanmıştır

$$e \triangleq x_d - x. \quad (2.12)$$

Üstte $x_d(t) \in \mathbb{R}^m$ takip edilmesi istenilen görev uzayı pozisyon ve yönelimini göstermektedir ve $x_d(t), \dot{x}_d(t), \ddot{x}_d(t)$ sınırlı olacak şekilde tasarlanmaktadır.

(2.12)'nin türevini alıp (2.7) kullanıldığında alttaki ifade elde edilir

$$\dot{e} = \dot{x}_d - J\dot{\theta}. \quad (2.13)$$

Dinamik denetleyici tasarlamak amacıyla $r(t) \in \mathbb{R}^n$ ile gösterilen bir hata altta tanımlanmıştır

$$r \triangleq J^+(\dot{x}_d + \alpha e) + (I_n - J^+J)h - \dot{\theta}. \quad (2.14)$$

Üstte $\alpha \in \mathbb{R}^{m \times m}$ köşegen, artı tanımlı, sabit denetleyici kazancı olup, $h(t) \in \mathbb{R}^n$ ise ikincil görev hedefinin gerçekleşmesi için Bölüm 2.1.4'te tasarlanacak olan sıfır uzayı denetleyicisidir.

(2.14)'ün J ile çarpılıp (2.7), (2.9), (2.10), (2.11) ve (2.13)'ün kullanılmasıyla alttaki ifade elde edilir

$$\dot{e} = -\alpha e + Jr. \quad (2.15)$$

Çalışmanın geride kalanının sunumunu kolaylaştırmak amacıyla, geçici bir terim olan $r_a(t) \in \mathbb{R}^n$ alttaki şekilde tanımlanmıştır

$$r_a \triangleq J^+(\dot{x}_d + \alpha e) + (I_n - J^+J)h. \quad (2.16)$$

Üstteki ifadenin (2.14) ile beraber kullanılmasıyla alttaki ifade elde edilir

$$r = r_a - \dot{\theta}. \quad (2.17)$$

Üstteki ifadenin türevi alındıktan sonra eylemsizlik matrisi ile çarpılıp ardından da (2.1)'deki modelin kullanılması sonucu alttaki açık döngü hata dinamikleri elde edilir

$$M\dot{r} = Y\phi - V_m r - \tau. \quad (2.18)$$

Üstteki ifadede $Y(\theta, \dot{\theta}, r_a, \dot{r}_a) \in \mathbb{R}^{n \times p}$ regresör matrisi ve ϕ ise (2.5)'te tanımlanan sabit parametre vektörü olup çarpımları alttaki ifade ile elde edilmiştir

$$Y\phi = M\dot{r}_a + V_m r_a + G + F_d \dot{\theta}. \quad (2.19)$$

2.1.4 Denetleyici tasarımı ve kararlılık analizi

Bu bölümde robot modelinin bilindiği durumda bir görev uzayı denetleyicisi ile sıfır uzayı denetleyicisi tasarlanacak ve ardından da kararlılık analizi gerçekleştirilecektir. Daha matematiksel bir ifadeyle (2.5) veya (2.19)'daki ϕ vektörünün bilindiği durum incelenecektir. Bölüm 2.1.3'teki hata sistemi ve takip eden kararlılık analizlerine dayanarak alttaki denetleyici kuralı önerilmektedir

$$\tau = Y\phi + K_r r + J^T e - y_s J_s^T. \quad (2.20)$$

Üstte $y_s(\theta) \in \mathbb{R}$ ve $J_s(\theta) \in \mathbb{R}^{1 \times n}$ ikincil görev hedefi için daha sonra tasarlanacak terimleri, ve $K_r \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ise artı tanımlı, sabit, köşegen denetleyici kazanç matrisidir.

(2.20) ile tasarlanan denetleyiciyi (2.18) ile elde edilen açık döngü hata sisteminde yerine yazdığımızda, $r(t)$ için kapalı döngü hata sistemi alttaki şekilde elde edilir

$$M\dot{r} = -V_m r - K_r r - J^T e + y_s J_s^T. \quad (2.21)$$

İkincil görev işlevi y_s sadece θ 'ya bağlı olacak şekilde tasarlanacaktır ve tasarımına özen gösterilmesi gerekmektedir. Özellikle dikkat edilmesi gereken, takip eden kararlılık analizinde y_s 'nin sıfıra sürülmesi sağlanacaktır, dolayısıyla sıfıra gidebilecek bir işlevin seçilmesi gerekmektedir. Bu durum

bilimsel yazında geçmişte tercih edilmiş çoğu tasarımı bu çalışmada kullanılamaz hale getirmektedir.

İkincil görev işlevi y_s 'nin zamana göre türevi alttaki şekilde elde edilebilir

$$\dot{y}_s = J_s \dot{\theta}. \quad (2.22)$$

Üstteki ifadede $J_s(\theta)$ ikincil görev için Jakobiyen vektörü olup alttaki şekilde tanımlanmıştır

$$J_s \triangleq \frac{\partial y_s}{\partial \theta}. \quad (2.23)$$

(2.14)'ün (2.22)'de yerine yazılmasıyla alttaki ifade elde edilir

$$\dot{y}_s = J_s J^+ (\dot{x}_d + \alpha e) + J_s (I_n - J^+ J) h - J_s r. \quad (2.24)$$

Üstteki ifadenin yapısı ve takip eden kararlılık analizi ışığında sıfır uzayı denetleyicisi aşağıdaki şekilde tasarlanmıştır

$$h = - \frac{(I_n - J^+ J) J_s^T}{\|J_s (I_n - J^+ J)\|^2} [k_s y_s + J_s J^+ (\dot{x}_d + \alpha e)]. \quad (2.25)$$

Üstte, $k_s \in \mathbb{R}$ artı sabit bir kazanç olup, $Jh = 0_{m \times 1}$ sağlanmaktadır. Altta gerekli koşul sağlandığında

$$\|J_s (I_n - J^+ J)\| > 0 \quad (2.26)$$

$h(t)$ ifadesi tekillikten uzak (paydası sıfırdan farklı olacak) şekilde elde edilir. Matematiksel olarak belirtmek gerekirse, $\|J_s (I_n - J^+ J)\|$ büyüklüğünün sıfır olması durumu J_s^T vektörü $(I_n - J^+ J)$ matrisinin sıfır uzayında olduğunda gerçekleşir. Ve bu durum gerçekleştiğinde, (2.24)'teki sıfır uzayı denetleyicisi sıfır ile çarpılmış demektir. Bunun sonucunda, (2.26)'daki şartın sağlandığını kabul etmek makuldür. Ek olarak belirtmek isteriz ki, (2.26)'daki şart bilimsel yazında daha önce de kullanılmıştır [22], [23], [24], [25]. Son olarak, (2.25)'teki ikincil görev denetleyicisini (2.24)'te yerine yazdığımızda $y_s(t)$ için alttaki kapalı döngü hata dinamiklerini elde ederiz

$$\dot{y}_s = -k_s y_s - J_s r. \quad (2.27)$$

Tümleşik kararlılık analizi ile devam edeceğiz.

Teorem 1. (2.1) ve (2.2) ile verilen robot dinamik modeli, (2.20)'de tasarlanan denetleyici ve (2.25)'de tasarlanan ikincil görev denetleyicisi görev uzayında üstel takip ve ikincil görevde üstel kararlılık sağlar.

Kanıt. Kararlılık analizi $V_1(e, r, y_s) \in \mathbb{R}$ ile gösterilen ve altta verilen Lyapunov işlevinin tasarlanması ile başlamaktadır

$$V_1 \triangleq \frac{1}{2}e^T e + \frac{1}{2}r^T M r + \frac{1}{2}y_s^2. \quad (2.28)$$

(2.3) kullanılarak (2.28) için alttaki eşitsizlikler yazılır

$$\lambda_1 \|z\|^2 \leq V_1 \leq \lambda_2 \|z\|^2. \quad (2.29)$$

Üstte $\lambda_1 \triangleq \frac{1}{2} \min\{1, m_1\}$, $\lambda_2 \triangleq \frac{1}{2} \max\{1, m_2\}$, ve $z(t) \in \mathbb{R}^{(m+n+1) \times 1}$ birleştirilmiş hata vektörüdür

$$z(t) \triangleq \begin{bmatrix} e^T & r^T & y_s \end{bmatrix}^T. \quad (2.30)$$

(2.28) ifadesinin türevi alttaki şekilde elde edilir

$$\dot{V}_1 = e^T \dot{e} + r^T M \dot{r} + \frac{1}{2}r^T \dot{M} r + y_s \dot{y}_s. \quad (2.31)$$

(2.15), (2.21) ve (2.27)'deki ifadeler (2.31)'de yerine yazılınca alttaki ifade elde edilir

$$\dot{V}_1 = e^T (-\alpha e + J r) + \frac{1}{2}r^T \dot{M} r + r^T (-V_m r - K_r r - J^T e + y_s J_s^T) + y_s (-k_s y_s - J_s r). \quad (2.32)$$

(2.4) kullanılıp, sadeleştirmeler de yapıldıktan sonra alttaki ifade elde edilir

$$\dot{V}_1 = -e^T \alpha e - r^T K_r r - k_s y_s^2. \quad (2.33)$$

(2.33) ifadesinin sağ tarafı için alttaki üst sınır elde edilir²

$$\dot{V}_1 \leq -\lambda_3 \|z\|^2 \quad (2.34)$$

burada $\lambda_3 \triangleq \min\{\lambda_{\min}(\alpha), \lambda_{\min}(K_r), k_s\}$.

²Bu raporda $\lambda_{\min}(\cdot)$ ve $\lambda_{\max}(\cdot)$ sırasıyla bir matrisin en küçük ve en büyük özdeğerini gösterir.

(2.28), (2.29) ve (2.33), (2.34) ifadelerinden [28]'deki ilgili teorem kullanılarak $V_1(e, r, y_s)$ 'in üstel kararlı olduğu gösterilebilir. Bu durumda $z(t)$ ve dolayısıyla da $e(t), r(t), y_s(t)$ üstel kararlıdır. Benzer şekilde $V_1(e, r, y_s) \in \mathcal{L}_\infty$ olur ve dolayısıyla $z(t), e(t), r(t), y_s(t) \in \mathcal{L}_\infty$ olur. Takip edilmesi istenen görev uzayı pozisyon ve yöneliminin sınırlılığı kullanılarak (2.12)'den $x(t) \in \mathcal{L}_\infty$ gösterilir. Not 2 ile $e(t)$ ve $r(t)$ 'nin sınırlılıkları (2.15) ile beraber kullanılarak $\dot{x}(t) \in \mathcal{L}_\infty$ elde edilir. Üstteki sınırlılık ifadeleri (2.14) ile beraber kullanıldığında $\dot{\theta}(t) \in \mathcal{L}_\infty$ elde edilir. Ve yine üstteki sınırlılık ifadeleri Not 2 ve (2.18) ile kullanılarak $\dot{r}(t) \in \mathcal{L}_\infty$ elde edilir. (2.1) ile verilen robot modelinden $\tau(t) \in \mathcal{L}_\infty$ elde edilir. Standart sınırlılık takip yöntemleri kullanılarak kalan işaretlerin kapalı döngü sistemde sınırlılığı gösterilir. \square

2.1.5 Uyarlamalı denetleyici tasarımı

Bu bölümde, model bilgisinin tam olarak bilinmesini gerektiren (2.20)'deki denetleyici dinamik modeldeki parametrik bilinmezliklerle başa çıkacak şekilde yeniden tasarlanacaktır. Takip eden kararlılık analizlerine dayanarak alttaki uyarlamalı denetleyici önerilmektedir

$$\tau = Y\hat{\phi} + K_r r + J^T e - y_s J_s^T. \quad (2.35)$$

(2.20)'deki denetleyiciden farklı olarak buradaki denetleyici tasarımında parametre vektörü ϕ 'nin bilinmediği varsayıldığı için $\hat{\phi}(t) \in \mathbb{R}^p$ ile gösterilen ve altta güncelleme kuralı verilen parametre kestirim vektörü tanımlanmıştır

$$\dot{\hat{\phi}} = \Gamma Y^T r. \quad (2.36)$$

Üstte $\Gamma \in \mathbb{R}^{p \times p}$ sabit, artı tanımlı, köşegen uyarlamalı kazanç matrisidir.

Tekrar vurgulamak gerekirse, (2.20) ile (2.35) arasındaki en önemli temel fark dinamik modeldeki parametrik bilinmezliklerle başa çıkmak üzere tasarlanan, zamanla değişen bir güncelleme kuralı olan $\hat{\phi}(t)$ vektörüdür.

$\tilde{\phi}(t) \in \mathbb{R}^p$ ile gösterilen parametre kestirim vektörü alttaki şekilde tanımlanmıştır

$$\tilde{\phi} \triangleq \phi - \hat{\phi}. \quad (2.37)$$

(2.35) ve (2.37) ifadelerini (2.18)'de yerine yazdığımızda $r(t)$ için kapalı döngü hata sistemi alttaki

şekilde elde edilir

$$M\dot{r} = -V_m r - K_r r - J^T e + y_s J_s^T + Y\tilde{\phi}. \quad (2.38)$$

Görev uzayı takip hatası $e(t)$ ve ikincil işlev $y_s(t)$ dinamikleri dinamik model parametrelerine bağlı olmadığı için değişmeden kalacaklardır. Bu durumda uyarlamalı denetleyici yapısının kararlılık analizi için alttaki teorem ile devam edeceğiz.

Teorem 2. (2.35)'te tasarlanan uyarlamalı denetleyici (2.25)'te tasarlanan ikincil görev denetleyicisi ve (2.36)'da tasarlanan parametre kestirim kuralı hem görev uzayı takip hatasının hem de ikincil görevin asimptotik kararlılığı alttaki şekilde sağlanır

$$\|e(t)\| \rightarrow 0, |y_s(t)| \rightarrow 0 \quad t \rightarrow \infty. \quad (2.39)$$

Kanıt. Uyarlamalı denetleyicinin kararlılık analizi $V_2(e, r, y_s, \tilde{\phi}) \in \mathbb{R}$ ile gösterilen ve altta verilen Lyapunov işlevinin tasarlanması ile başlamaktadır

$$V_2 \triangleq V_1 + \frac{1}{2} \tilde{\phi}^T \Gamma^{-1} \tilde{\phi}. \quad (2.40)$$

Üstteki $V_1(e, r, y_s)$ daha önce (2.28)'de tanımlanmıştı. (2.40) için alttaki eşitsizlikler yazılabilir

$$\lambda_4 \|s\|^2 \leq V_2 \leq \lambda_5 \|s\|^2. \quad (2.41)$$

Üstte $\lambda_4 \triangleq \frac{1}{2} \min\{1, m_1, \lambda_{\max}(\Gamma)\}$, $\lambda_5 \triangleq \frac{1}{2} \max\{1, m_2, \lambda_{\min}(\Gamma)\}$ olup, $s(t) \in \mathbb{R}^{(m+n+p+1) \times 1}$ alttaki şekilde tanımlanan birleşik hata vektörüdür

$$s(t) \triangleq \begin{bmatrix} e^T & r^T & y_s & \tilde{\phi}^T \end{bmatrix}^T. \quad (2.42)$$

(2.40) ifadesinin türevi alttaki şekilde elde edilir

$$\dot{V}_2 = e^T \dot{e} + r^T M \dot{r} + \frac{1}{2} r^T \dot{M} r + y_s \dot{y}_s + \tilde{\phi}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\phi}}. \quad (2.43)$$

(2.15), (2.27), (2.38), (2.37)'nin türevi ile (2.36) ifadeleri ve (2.4)'deki ters simetri özelliği (2.43)'de yerine yazılınca alttaki ifade elde edilir

$$\dot{V}_2 = -e^T \alpha e - r^T K_r r - k_s y_s^2 \leq -\lambda_3 \|z\|^2. \quad (2.44)$$

Üstte geçen λ_3 (2.34)'te tanımlanmıştı.

(2.40), (2.41) ve (2.44) ifadelerinden $V(e, r, y_s, \tilde{\phi}) \in \mathcal{L}_\infty$ elde edilir. Bu durumda $s(t) \in \mathcal{L}_\infty$ ve dolayısıyla $e(t), r(t), y_s(t), \tilde{\phi}(t) \in \mathcal{L}_\infty$. Teorem 1'in kanıtına benzer şekilde tüm işaretlerin kapalı döngü sistemde sınırlılığını gösterilir. (2.44) ifadesinin başlangıç zamanı olan 0'dan $+\infty$ 'a kadar integrali alındığında alttaki ifade elde edilir

$$\int_0^{+\infty} \dot{V}_2(t) dt \leq -\lambda_3 \int_0^{+\infty} \|z(t)\|^2 dt. \quad (2.45)$$

Üstteki ifadenin matematiksel düzenlemelerinin ardından alttaki ifade elde edilir

$$\int_0^{+\infty} \|z(t)\|^2 dt \leq \frac{V_2(0)}{\lambda_3}. \quad (2.46)$$

Üstteki eşitsizlikten $z(t) \in \mathcal{L}_2$ gösterilir. Barbalat'ın önermesi [29] kullanılarak (2.39)'da verilen asimptotik kararlılık sonucu elde edilir. \square

2.1.6 Benzetim sonuçları

Tasarlanan denetleyicilerin başarımını test etmek amacıyla düzlemde hareket eden 3 serbestlik dereceli robot kolu ile benzetimler gerçekleştirilmiştir. Robot kolunun dinamik modelinde kullanılan matrisler altta verilmiştir [17]

$$M(\theta) = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{12} & M_{22} & M_{23} \\ M_{13} & M_{23} & M_{33} \end{bmatrix}, V_m(\theta, \dot{\theta}) = \begin{bmatrix} V_{m11} & V_{m12} & V_{m13} \\ V_{m21} & V_{m22} & V_{m23} \\ V_{m31} & V_{m32} & V_{m33} \end{bmatrix}, F_d = \begin{bmatrix} f_{d1} & 0 & 0 \\ 0 & f_{d2} & 0 \\ 0 & 0 & f_{d3} \end{bmatrix}. \quad (2.47)$$

Üstteki matrislerin elemanları altta verilmiştir³

$$\begin{aligned} M_{11} &= \beta_1 + 2p_1c_2 + 2p_2c_{23} + 2p_3c_3 & M_{22} &= \beta_2 + 2p_3c_3 \\ M_{12} &= \beta_2 + p_1c_2 + p_2c_{23} + 2p_3c_3 & M_{23} &= \beta_2 + p_3c_3 \\ M_{13} &= \beta_2 + p_2c_{23} + p_3c_3 & M_{33} &= \beta_3 \end{aligned}$$

³Bu raporda $s_i, c_i, s_{i,j}, c_{i,j}, s_{i,j,k}, c_{i,j,k}$ $i, j, k \in \{1, 2, 3\}$ için sırasıyla $\sin(\theta_i), \cos(\theta_i), \sin(\theta_i + \theta_j), \cos(\theta_i + \theta_j), \sin(\theta_i + \theta_j + \theta_k), \cos(\theta_i + \theta_j + \theta_k)$ terimlerini ifade eder.

$$\begin{aligned}
V_{11} &= -(p_1 s_2 + p_2 s_{23})\dot{\theta}_2 - (p_2 s_{23} + p_3 s_3)\dot{\theta}_3 \\
V_{12} &= -(p_1 s_2 + p_2 s_{23})(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) - (p_2 s_{23} + 2p_3 s_3)\dot{\theta}_3 \\
V_{13} &= -(p_2 s_{23} + p_3 s_3)(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_3) - p_2 s_{23}\dot{\theta}_2 \\
V_{21} &= (p_1 s_2 + p_2 s_{23})\dot{\theta}_1 \\
V_{22} &= -p_3 s_3 \dot{\theta}_3 \\
V_{23} &= -p_3 s_3(2\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) \\
V_{31} &= (p_2 s_{23} + p_3 s_3)\dot{\theta}_1 \\
V_{32} &= p_3 s_3(2\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \\
V_{33} &= 0
\end{aligned}$$

Üstte $\beta_1, \beta_2, \beta_3, p_1, p_2, p_3$ robotun bağlarının ağırlıklarına, uzunluklarına ve ağırlık merkezlerine bağlı sabit parametrelerdir, f_{d1}, f_{d2}, f_{d3} dinamik sürtünme katsayılarıdır. Benzetimlerde, bağların ağırlıkları sırasıyla 3.60Kg, 2.60Kg, 2.00Kg seçilmiştir. Bağ uzunlukları ise sırasıyla $l_1 = 0.4m$, $l_2 = 0.36m$, $l_3 = 0.30m$ seçilmiş olup bağların ağırlık merkezleri orta noktada seçilmiştir. Parametrelerin değerleri altta topluca verilmiştir

$$\begin{aligned}
\beta_1 &= 1.1956 & \beta_2 &= 0.3946 & \beta_3 &= 0.0512 \\
p_1 &= 0.4752 & p_2 &= 0.1280 & p_3 &= 0.1152 \\
f_{d1} &= 5.3 & f_{d2} &= 2.4 & f_{d3} &= 1.1.
\end{aligned}$$

(2.5)'teki sabit parametre vektörü ise alttaki şekilde oluşturulmuştur

$$\phi = [\beta_1 \quad \beta_2 \quad \beta_3 \quad p_1 \quad p_2 \quad p_3 \quad f_{d1} \quad f_{d2} \quad f_{d3}]^T. \quad (2.48)$$

Robot kolunun uç noktası altta verilen şekilde elde edilmiştir

$$x(t) = \begin{bmatrix} X(t) \\ Z(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 c_1 + l_2 c_{12} + l_3 c_{123} \\ l_1 s_1 + l_2 s_{12} + l_3 s_{123} \end{bmatrix}. \quad (2.49)$$

Üstte verilen ileri kinematikten Jakobiyen matrisi alttaki şekilde elde edilir

$$J = \begin{bmatrix} -l_1 s_1 - l_2 s_{12} - l_3 s_{123} & -l_2 s_{12} - l_3 s_{123} & -l_3 s_{123} \\ l_1 c_1 + l_2 c_{12} + l_3 c_{123} & l_2 c_{12} + l_3 c_{123} & l_3 c_{123} \end{bmatrix}. \quad (2.50)$$

Robot kolunun eklemleri başlangıçta $\theta(0) = [0.1 \ 0.5 \ 1.5]$ radyan pozisyonundadır. Takip edilmesi istenen görev uzayı pozisyonu ise alttaki şekilde seçilmiştir

$$x_d = \begin{bmatrix} X_d \\ Z_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5 + 0.1 \cos(t)(1 - \exp(-0.3t^3)) \\ 0.5 + 0.1 \sin(t)(1 - \exp(-0.3t^3)) \end{bmatrix}.$$

Her iki denetleyici için ikişer tane benzetim gerçekleştirilmiştir. Bu benzetimlerden birincisinde ikincil görev denetleyicisi tasarlanmamış olup, ikinci benzetimlerde altta verilen ikincil görev işlevi seçilmiştir.

$$y_s = \theta_2 - 1. \quad (2.51)$$

Üstte verilen ikincil görev işlevi ikinci eklemin açısal pozisyonunun 1 radyana gitmesini sağlar.

Denetleyici kazançlarının seçiminde deneme yanılma yöntemi tercih edilmiştir. Belirtmek isteriz ki denetleyici kazançlarının ayarlanması oldukça kolay bir şekilde gerçekleştirilmiş olup yöntem olarak önce yüksek denetleyici kazançları seçilip benzetimin çalıştığı görülünce daha düşük denetleyici kazançları ile benzetimler tekrarlanmıştır.

(2.20)'deki denetleyici için kazançlar ilk benzetimde (ikincil görevin olmadığı durumda) $\alpha = 20I_2$ ve $K_r = 30I_3$ ve ikinci benzetimde (ikincil görevin olduğu durumda) ilaveten $k_s = 5$ seçilmiştir.

Şekil 8'de her iki benzetim için görev uzayı takip hatası verilmiştir. Şekil 9'de her iki benzetimde elde edilen eklem açıları sunulmuştur. Şekil 10'de eklemlere uygulanan tork girişleri gösterilmiştir. Şekil 11'de takip edilmesi istenen görev uzayı pozisyonu ve robotun uç noktasının pozisyonu beraber verilmiştir. Şekil 12'de ikincil görev denetleyicisi sunulmuştur. Şekil 8'den görev uzayı takip hedefinin her iki benzetimde de sağlandığı görülebilir. Öte yandan Şekil 9'de üstte verilen eklem açılarından özellikle ikinci eklemin açısı ikincil görev olmadığı için serbestçe hareket ederken, alttaki şekilde ikincil görev denetleyicisinin ikinci eklemin açısını 1 radyana götürdüğü ve dolayısıyla da (2.51)'deki ikincil işlev sağlandığı görünmektedir.

(2.35)'teki uyarlamalı denetleyicinin başarımı da aynı ikincil görev işlevi ile benzetimlerle test edilmiştir. Birinci benzetimde (ikincil görevin olmadığı durumda) $\alpha = 10I_2$, $K_r = 20I_3$, $\Gamma = \text{diag}\{0.1, 0.75, 1.5, 0.035, 1.1, 0.05, 40, 30, 30\}$ ve ikinci benzetimde (ikincil görevin olduğu durumda) $k_s = 5$ seçilmiştir.

Önemli belirtmek isteriz ki uyarlamalı denetleyicinin başarımının test edildiği benzetimlerde robot dinamiklerinin modelinin benzetiminde kullanılan parametreler denetleyicide kullanılmamıştır.

Şekil 13'da her iki benzetim için görev uzayı takip hatası sunulmuştur. Şekil 14'de her iki benzetimde elde edilen eklem açıları verilmiştir. Şekil 15'de eklemlere uygulanan tork girişleri paylaşılmıştır. Şekil 16'da takip edilmesi istenen görev uzayı pozisyonu ve robotun uç noktasının pozisyonu beraber verilmiştir. Şekil 17'da ikincil görev denetleyicisi sunulmuştur. Şekil 13'den görev uzayı takip hedefinin her iki benzetimde de sağlandığı görülebilir. Öte yandan Şekil 14'de üstte verilen eklem açılarından özellikle ikinci eklemin açısı ikincil görev olmadığı için serbestçe hareket ederken, alttaki şekilde ikincil görev denetleyicisinin ikinci eklemin açısını 1 radyana götürdüğü ve dolayısıyla da (2.51)'deki ikincil işlev sağlandığı görünmektedir.

2.1.7 Sonuçlar

Bu çalışmada asıl hedeflenen asimptotik olarak kararlı ikincil görev denetleyicisi tasarlanmasıdır. Bu bağlamda, artık robot kollarındaki fazladan serbestlik derecesini ikincil görev için kullanırken robotun görev uzayında istenen bir pozisyonu takibini sağlayan biri model bilgisi gerektiren ve diğeri ise dinamik model parametrelerinin bilinmediği durumu içeren iki denetleyici tasarlanmıştır.

Bilimsel yazındaki benzerlerinden farklı olarak ikincil görev işlevi eklem pozisyonlarına bağlı hata benzeri bir yapıda tasarlanmıştır. Yine mevcut çalışmalardan farklı olarak hem görev uzayında takip hedefi için hem de ikincil görev işlevi için birleşik kararlılık analizi gerçekleştirilmiş ve her iki hedef için de asimptotik kararlılık garanti edilmiştir. Benzetim sonuçları ile önerilen denetleyicilerin başarımı test edilmiştir.

Proje ekibinin en iyi bilgisi dahilinde, gerçekleştirdiğimiz çalışma, bilimsel yazında tümleşik kararlılık analizinin yapıldığı ve ikincil görevde asimptotik kararlılığın sağlandığı ilk çalışmadır.

2.2 Dinamik belirsizlikleri olan robot kolları için öğrenmeli görev uzayı denetleyicisi tasarımı

2.2.1 Giriş

Endüstriyel robot uygulamalarının birçoğu görev uzayında periyodik bir görevi gerçekleştirmeyi gerektirmektedir. Model tabanlı denetleyicilerin robot dinamiğindeki belirsizlikler nedeniyle takip performansını arttırmak için kullanılması gerekmektedir. Model tabanlı denetleyiciler sınıfında az bilinen bir sınıf olan öğrenmeli denetleyiciler takip edilmesi istenilen uç nokta konumu ve yöneli-

minin tekrarlamalı yapısı ve dinamik belirsizlikleri yüksek kazançlı veya yüksek frekanslı gürbüz terimler kullanmadan telafi etme yeteneği sayesinde diğer model tabanlı denetleyiciler arasında önemli bir yere sahiptir.

Bizim bilgimiz dahilinde [30] ilk önerilen öğrenimli denetleyicidir. Ardından çeşitli tipte öğrenmeli denetleyici sunulmuştur [31], [32], [33], [34], [35], [36]. Birkaçını saymak gerekirse [31] ve [32]'deki güncelleme kurallarında Kernel işlevinin ve bilinmeyen etkili işlevlerin kullanımı vasıtasıyla yeni tekrarlamalı öğrenimli denetleyiciyi sunmuşlardır. Bu denetleyicilerin yapısı, diğer öğrenme tabanlı denetleyicilerle karşılaştırıldığında oldukça karmaşıktır. [30] ve [33]'te öğrenim çözüm yolunu iyileştirmek amacıyla robot sisteminin her özyinelemesinden sonra aynı başlangıç noktasına döndüğünü varsaymıştır. Bahsi geçen denetleyicilerin gürbüzlüğü [37]'de incelenmiştir. Uyarlamalı yinelemeli öğrenimli denetleyiciler [35]'te konum takip hatasının asimptotik yakınsamasını garanti etmektedir. Yine de bu denetleyiciler her periyodun başlangıcında uygulanan yeniden yerleştirme yöntemini gerektirmiştir. Uyarlamalı öğrenmeli denetleyici tasarımı [34] ve [38]'de doyuma ulaştırılmış öğrenmeli tabanlı ileri besleme teriminin Lyapunov tabanlı kararlılık analizleriyle sunulmuştur. Uyarlamalı öğrenmeli oransal integral tipli denetleyici olan [36] giriş referans işaretinin Fourier katsayılarının tanımlanması yöntemiyle öğrenir.

Üstte bahsi geçen denetleyicilerin neredeyse hepsi eklem uzayı için tasarlanmıştır. Kontrol hedefleri görev uzayında tanımlanmış periyodik bir yörüngeyi takip etmenin veya robot kolunun uç noktasının pozisyon ve yönelim takibinin aksine eklem uzayında tanımlanmış periyodik bir yörüngeyi takip etmektir. İstenilen yörünge hareketi belirlenmiş görev uzayında olan yinelemeli öğrenmeli denetleyiciler [39] ve [40]'te önerilmiştir. İki denetleyici de takip hatasının yakınsaması işlemsel olarak kanıtlanmıştır fakat iki denetleyici de hesaplaması kolay olmayan pozisyon düzeyinde ters kinematik hesaplamalarına ihtiyaç duymaktadır.

Bu çalışmada görev uzayında takip hedefeyen pozisyon düzeyinde karmaşık ters kinematik hesaplamalarını kullanmayan ve dinamik model bilgisinden bağımsız öğrenmeli denetleyiciyi sunduk. Önerilen denetleyici sistem dinamiklerinden kaynaklı belirsizlikleri istenilen uç nokta pozisyon ve yönelimini her periyodun sonunda öğrenerek asimptotik uç nokta takibini başarmaktadır. Kapalı döngü kararlılığı ve hata işaretinin yakınsaması Lyapunov tabanlı kararlılık analiz yöntemleriyle kesinleştirilmiştir ve sayısal benzetim sonuçları iki eklemlili düzlemsel robota uygulanarak, önerilen öğrenimli denetleyici tasarımının uygulanabilirliği gösterilmiştir.

2.2.2 Dinamik model, kinematik model ve özellikleri

Bu çalışmada kullanılan robot dinamik modeli (2.1) ve (2.2)'de verilmiştir. Altta takip eden denetleyici tasarımı ve kararlılık analizi aşamalarında kullanılacak olan model özellikleri verilmiştir. Ayrıca Özellik 2 de sağlanmaktadır.

Özellik 4. *Eylemsizlik matrisi alttaki eşitsizlikleri sağlar [26]*

$$m_1 I_n \leq M(\theta) \leq m_2 I_n. \quad (2.52)$$

Üstte $m_1, m_2 \in \mathbb{R}$ bilinen, artı sınırlayıcı sabitlerdir. Ayrıca eylemsizlik matrisi $M(q)$ 'nin tersi alttaki şekilde sınırlandırılabilir

$$\frac{1}{m_2} I_n \leq M^{-1}(q) \leq \frac{1}{m_1} I_n. \quad (2.53)$$

Özellik 5. *Merkezkaç Coriolis matrisi alttaki ifadeyi sağlar [26]*

$$V_m(\xi, \nu)\eta = V_m(\xi, \eta)\nu \quad \forall \xi, \nu, \eta \in \mathbb{R}^n. \quad (2.54)$$

Özellik 6. *(2.1) ve (2.2)'deki dinamik terimler alttaki şekilde sınırlandırılabilirler [26], [41], [42]*

$$\|M(\xi) - M(\nu)\| \leq \zeta_{M1} \|\xi - \nu\| \quad (2.55)$$

$$\|M^{-1}(\xi) - M^{-1}(\nu)\|_{i\infty} \leq \zeta_{M2} \|\xi - \nu\| \quad (2.56)$$

$$\|V_m(\xi, \eta)\| \leq \zeta_{C1} \|\eta\| \quad (2.57)$$

$$\|V_m(\xi, \eta) - V_m(\nu, \eta)\| \leq \zeta_{C2} \|\xi - \nu\| \|\eta\| \quad (2.58)$$

$$\|G(\xi) - G(\nu)\| \leq \zeta_G \|\xi - \nu\| \quad (2.59)$$

$$\|F(\xi) - F(\nu)\| \leq \zeta_F \|\xi - \nu\| \quad \forall \xi, \nu, \eta \in \mathbb{R}^n. \quad (2.60)$$

Üstte $\zeta_{M1}, \zeta_{M2}, \zeta_{C1}, \zeta_{C2}, \zeta_G, \zeta_F \in \mathbb{R}$ artı sınırlayıcı sabitlerdir.

Özellik 7. *Sürtünme terimi alttaki şekilde sınırlandırılabilir*

$$\|F_d\|_{i\infty} \leq \zeta_f \quad (2.61)$$

Üstte $\zeta_f \in \mathbb{R}$ artı sınırlayıcı sabittir.

Robot kolunun kinematik modeli altta verilmiştir

$$x = f(\theta). \quad (2.62)$$

Üstte $x(t) \in \mathbb{R}^n$ robotun uç noktasının pozisyon ve yönelimini ve $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ ise ileri kinematik işlevini gösterir. Hız kinematiği alttaki şekilde elde edilir

$$\dot{x} = J\dot{\theta}. \quad (2.63)$$

Üstte $J(\theta) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ile gösterilen Jakobiyen matrisi altta tanımlanmıştır

$$J \triangleq \frac{\partial f}{\partial \theta}. \quad (2.64)$$

İlaveten Not 1 ve Not 2 sağlanmaktadır.

Varsayım 1. $h: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ ile gösterilen ters kinematik denklemi altta verilmiştir [43], [44]

$$\theta = h(x). \quad (2.65)$$

Ters kinematik işlevi $h(\cdot)$ 'nin Ortalama Değer Teoremi [40] kullanılarak alttaki eşitsizlikleri sağladığı gösterilebilir

$$\|h(\xi) - h(\nu)\| \leq \zeta_h \|\xi - \nu\| \quad \forall \xi, \nu. \quad (2.66)$$

Üstte $\zeta_h \in \mathbb{R}$ artı sınırlayıcı sabittir. (2.65)'nin türevi alttaki şekilde elde edilir

$$\dot{\theta} = J^{-1}(x)\dot{x}. \quad (2.67)$$

Üstte $J^{-1}(x) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ Jakobiyen matrisinin tersi olup alttaki şekilde tanımlanmaktadır

$$J^{-1}(x) \triangleq \frac{\partial h(x)}{\partial x}. \quad (2.68)$$

Çalışmanın geride kalanında Jakobiyen matrisinin tersi için $J^{-1}(x)$ ve $J^{-1}(\theta)$ gösterimleri dönüşümlü olarak kullanılacaktır.

Not 3. Önemle vurgulamak isteriz ki (2.65)'te verilen ters kinematik işlevi sadece analiz amacıyla verilmiş olup tasarlanacak olan denetleyicide ters kinematik hesaplamalarına ihtiyaç duyulmaya-

caktır.

Özellik 8. Not 2'nin ışığında alttaki sınırlandırma elde edilir

$$\zeta_{J1} < \|J\| < \zeta_{J2} \quad (2.69)$$

ve üsttekinden ise alttaki sınırlandırma elde edilir

$$\frac{1}{\zeta_{J2}} < \|J^{-1}\| < \frac{1}{\zeta_{J1}}. \quad (2.70)$$

Üstte $\zeta_{J1}, \zeta_{J2} \in \mathbb{R}$ artı sınırlayıcı sabitlerdir. Jakobiyen matrisinin tersi alttaki eşitsizlikleri sağlar

$$\|J^{-1}(x) - J^{-1}(x_d)\| \leq \zeta_{J3} \|x - x_d\|. \quad (2.71)$$

Üstte $\zeta_{J3} \in \mathbb{R}$ artı sınırlayıcı sabittir. Çalışmamızda ilgili matrisin argümanlarını göstermek adına alttaki gösterim tercih edilecektir

$$\dot{J}^{-1}(x, \dot{x}) = \frac{d}{dt} \{J^{-1}(x)\}. \quad (2.72)$$

Jacobian matrisinin tersinin zamana göre türevi alttaki eşitsizlikleri sağlar [26]

$$\|\dot{J}^{-1}(\xi, \dot{\xi})\| \leq \zeta_{J4} \|\dot{\xi}\| \quad (2.73)$$

$$\|J^{-1}(\xi, \eta) - J^{-1}(\nu, \eta)\| \leq \zeta_{J5} \|\xi - \nu\| \|\eta\| \quad (2.74)$$

$$\|J^{-1}(\xi, \eta) - J^{-1}(\xi, \nu)\| \leq \zeta_{J6} \|\eta - \nu\| \quad \forall \xi, \nu, \eta \in \mathbb{R}^n. \quad (2.75)$$

Üstte $\zeta_{J4}, \zeta_{J5}, \zeta_{J6} \in \mathbb{R}$ artı sınırlayıcı sabitlerdir.

2.2.3 Öğrenmeli denetleyici tasarımı

Görev uzayı takip hatası $e(t) \in \mathbb{R}^n$ ile gösterilir ve alttaki şekilde tanımlanır

$$e \triangleq x_d - x. \quad (2.76)$$

Üstte $x_d(t) \in \mathbb{R}^n$ periyodik takip edilecek görev uzayı pozisyon ve yönelimini gösterir ve alttaki ifadeleri sağlar

$$x_d(t) = x_d(t - T), \dot{x}_d(t) = \dot{x}_d(t - T), \ddot{x}_d(t) = \ddot{x}_d(t - T) \quad (2.77)$$

ki burada T bilinen periyottur. x_d ve zamana göre ilk iki türevi alttaki şekilde sınırlandırılabilir

$$\|x_d(t)\| \leq \zeta_{x_d}, \|\dot{x}_d(t)\| \leq \zeta_{\dot{x}_d}, \|\ddot{x}_d(t)\| \leq \zeta_{\ddot{x}_d}. \quad (2.78)$$

Üstte $\zeta_{x_d}, \zeta_{\dot{x}_d}, \zeta_{\ddot{x}_d} \in \mathbb{R}$ artı sınırlayıcı sabitlerdir.

(2.63)'ün ışığında (2.76) ifadesinin türevi alttaki şekilde elde edilir

$$\dot{e} = \dot{x}_d - J\dot{\theta} \quad (2.79)$$

ve daha sonra alttaki şekilde tekrar yazılır

$$\dot{e} = -\alpha e + J \left[J^{-1} (\dot{x}_d + \alpha e) - \dot{\theta} \right]. \quad (2.80)$$

Üstte $\alpha \in \mathbb{R}^{n \times n}$ sabit artı tanımlı köşegen denetleyici kazanç matrisidir ve $r(t) \in \mathbb{R}^n$ altta tanımlanan hata işaretidir

$$r \triangleq J^{-1} (\dot{x}_d + \alpha e) - \dot{\theta}. \quad (2.81)$$

Üstteki tanım kullanılarak (2.80) ifadesinden alttaki ifade elde edilir

$$\dot{e} = -\alpha e + Jr. \quad (2.82)$$

(2.81) ifadesinin zamana göre türevi alınıp, $M(\theta)$ ile çarpılıp ardından (2.1), (2.2) ve (2.81) ifadeleri de kullanılarak alttaki ifade elde edilir

$$M\dot{r} = M \frac{d}{dt} \left[J^{-1} (\dot{x}_d + \alpha e) \right] + V_m J^{-1} (\dot{x}_d + \alpha e) - V_m r + G + F - \tau. \quad (2.83)$$

Sunum kolaylığı için $Q(x, \dot{x}, x_d, \dot{x}_d, \ddot{x}_d) \in \mathbb{R}^n$ ile gösterilen altta tanımı verilen belirsiz vektör oluşturulmuştur

$$Q \triangleq M \frac{d}{dt} \left[J^{-1} (\dot{x}_d + \alpha e) \right] + V_m J^{-1} (\dot{x}_d + \alpha e) + G + F. \quad (2.84)$$

Üstteki tanım (2.83)'te yerine yazıldığında alttaki ifade elde edilir

$$M\dot{r} = -V_m r + Q - \tau. \quad (2.85)$$

(2.84) ifadesine dayanarak $Q_d(x_d, \dot{x}_d, \ddot{x}_d) \in \mathbb{R}^n$ ile gösterilen başka bir belirsiz vektör altta tanımlanmıştır

$$Q_d \triangleq Q|_{x=x_d, \dot{x}=\dot{x}_d} \quad (2.86)$$

$$= M(h(x_d)) \frac{d}{dt} \{J^{-1}(x_d) \dot{x}_d\} + V_m(h(x_d), J^{-1}(x_d) \dot{x}_d) J^{-1}(x_d) \dot{x}_d + G(h(x_d)) + F(J^{-1}(x_d) \dot{x}_d). \quad (2.87)$$

Not 4. (2.87)'deki tanımından $Q_d(\cdot)$ 'nin $x_d(t)$, $\dot{x}_d(t)$, $\ddot{x}_d(t)$ 'ne bağlı olduğu bellidir. Takip edilmesi istenen görev uzayı pozisyon ve yöneliminin ve türevlerinin periyodik olmalarının ışığında $Q_d(t)$ de periyodik olup alttaki ifadeyi sağlar

$$Q_d(t) = Q_d(t - T). \quad (2.88)$$

İlaveten, takip edilmesi istenen görev uzayı pozisyon ve yöneliminin ve türevlerinin sınırlı oldukları için $Q_d(t)$ 'nin elemanları da $|Q_{di}(t)| \leq \beta_i$ $i = 1, \dots, n$ şeklinde $\beta_i \in \mathbb{R}$ artı sınırlayıcı sabitler ile sınırlıdır.

$Q(\cdot)$ ve $Q_d(\cdot)$ terimlerinin arasındaki fark $\tilde{Q}(x, \dot{x}, x_d, \dot{x}_d, \ddot{x}_d) \in \mathbb{R}^n$ ile gösterilir ve alttaki şekilde tanımlanır

$$\tilde{Q} \triangleq Q - Q_d. \quad (2.89)$$

Not 5. Ek C'da gösterildiği üzere $\tilde{Q}(\cdot)$ alttaki şekilde sınırlandırılabilir

$$\|\tilde{Q}\| \leq \rho(\|e\|) \|z\|. \quad (2.90)$$

Üstte $\rho(\|e\|) \in \mathbb{R}$ artı olup argümanının azalmayan işlevidir ve $z(t) \in \mathbb{R}^{2n}$ tanımı altta verilen tümleşik hata vektörüdür

$$z \triangleq [e^T r^T]^T. \quad (2.91)$$

(2.86) ve (2.89)'deki tanımlar kullanılarak (2.85)'den alttaki ifade elde edilir

$$M\dot{r} = -V_m r + Q_d + \tilde{Q} - \tau. \quad (2.92)$$

Üstteki açık döngü hata sistemine dayanarak pozisyon seviyesinde ters kinematik işlevi h 'yi gerektirmeyen ve sadece Jakobiyen matrisinin tersine ihtiyaç duyan alttaki denetleyici girişi tasarlanmıştır

$$\tau = Kr + k_n \rho^2 (\|e\|) r + J^T e + \hat{Q}. \quad (2.93)$$

Üstte verilen denetleyici tasarımında $K \in \mathbb{R}^{n \times n}$ sabit artı tanımlı köşegen kazanç matrisi, $k_n \in \mathbb{R}$ sabit artı kazancı olup $\hat{Q}(t) \in \mathbb{R}^n$ altta verilen güncelleme kuralına göre kendini yenileyen öğrenme terimidir

$$\hat{Q}(t) = \text{Sat}_\beta (\hat{Q}(t-T)) + k_L r. \quad (2.94)$$

Üstte $k_L \in \mathbb{R}$ artı denetleyici kazancı, $\beta \triangleq [\beta_1 \dots \beta_n]^T \in \mathbb{R}^n$ periyodik belirsizliğin elemanlarının üst sınırlarını, $\text{Sat}_\beta(\cdot) \in \mathbb{R}^n$ ise elemanları alttaki yapıda elde edilen vektör doyum işlevini gösterir

$$\text{sat}_{\beta_i}(\kappa_i) = \begin{cases} \beta_i \text{sgn}(\kappa_i), & |\kappa_i| > \beta_i \\ \kappa_i, & |\kappa_i| \leq \beta_i \end{cases} \quad \forall \kappa_i. \quad (2.95)$$

Üstte $\text{sgn}(\cdot) \in \mathbb{R}$ signum işlevidir. Denetleyici girişinin (2.92)'de yerine yazılmasıyla alttaki ifade elde edilir

$$M\dot{r} = \tilde{Q} + \chi - V_m r - k_n \rho^2 r - J^T e - Kr. \quad (2.96)$$

Üstte $\chi(t) \in \mathbb{R}^n$ teriminin tanımı altta verilmiştir

$$\chi \triangleq Q_d - \hat{Q}. \quad (2.97)$$

Not 4'ten alttaki çıkarımlar yapılabilir

$$Q_d(t) = \text{Sat}_\beta(Q_d(t)) = \text{Sat}_\beta(Q_d(t-T)). \quad (2.98)$$

Üstteki birinci eşitlik $Q_d(t)$ 'nin elemanlarının sınırlı olmasının bir sonucu olup, ikinci eşitlik ise $Q_d(t)$ 'nin periyodik olmasının bir sonucudur.

(2.94) ve (2.98)'in (2.97) ile beraber kullanılması alttaki çıkarımı elde etmemizi sağlar

$$\chi = \text{Sat}_\beta(Q_d(t-T)) - \text{Sat}_\beta(\hat{Q}(t-T)) - k_L r. \quad (2.99)$$

2.2.4 Kararlılık Analizi

Teorem 3. (2.93) ve (2.94) ile tasarlanan öğrenmeli denetleyici robotun uç noktasının görev uzayındaki periyodik pozisyon ve yönelimi denetleyici kazançları alttaki şartı sağlayacak şekilde seçildiğinde

$$\min \left\{ \lambda_{\min}(\alpha), \lambda_{\min}(K) + \frac{k_L}{2} \right\} - \frac{1}{4k_n} > 0 \quad (2.100)$$

asimptotik olarak takip etmesini sağlar

$$\|e(t)\| \rightarrow 0, t \rightarrow +\infty. \quad (2.101)$$

Kanıt. Altta $V(t) \in \mathbb{R}$ ile gösterilen Lyapunov işlevi tanımlanmıştır

$$V \triangleq \frac{1}{2}e^T e + \frac{1}{2}r^T M r + \frac{1}{2k_L} \int_{t-T}^t \left\| \text{Sat}_\beta(Q_d(\sigma)) - \text{Sat}_\beta(\hat{Q}(\sigma)) \right\|^2 d\sigma. \quad (2.102)$$

Leibniz formülü kullanılarak, $V(t)$ 'nin türevi alttaki şekilde elde edilir

$$\begin{aligned} \dot{V} &= e^T \dot{e} + \frac{1}{2}r^T \dot{M} r + r^T M \dot{r} + \frac{1}{2k_L} \left\| \text{Sat}_\beta(Q_d(t)) - \text{Sat}_\beta(\hat{Q}(t)) \right\|^2 \\ &\quad - \frac{1}{2k_L} \left\| \text{Sat}_\beta(Q_d(t-T)) - \text{Sat}_\beta(\hat{Q}(t-T)) \right\|^2. \end{aligned} \quad (2.103)$$

(2.82) ve (2.96) ile verilen hata dinamiklerinin (2.103)'de yerine yazılmasıyla alttaki ifade elde edilir

$$\begin{aligned} \dot{V} &= e^T(-\alpha e + J r) + \frac{1}{2}r^T \dot{M} r + r^T[\tilde{Q} + \chi - V_m r - k_n \rho^2 r - J^T e - K r] \\ &\quad + \frac{1}{2k_L} \left\| \text{Sat}_\beta(Q_d(t)) - \text{Sat}_\beta(\hat{Q}(t)) \right\|^2 - \frac{1}{2k_L} \left\| Q_d(t) - \hat{Q}(t) + k_L r \right\|^2. \end{aligned} \quad (2.104)$$

Üstteki son terimin eldesinde (2.97) ve (2.99) kullanılmıştır. (2.4) ve (2.97) kullanılıp sadeleştirmeler de yapılnca alttaki ifadeler elde edilir

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -e^T \alpha e + r^T \tilde{Q} - k_n \rho^2 r^T r + r^T \chi - r^T K r + \frac{1}{2k_L} \left\| \text{Sat}_\beta(Q_d(t)) - \text{Sat}_\beta(\hat{Q}(t)) \right\|^2 \\ &\quad - \frac{1}{2k_L} \left\| Q_d(t) - \hat{Q}(t) \right\|^2 - [Q_d(t) - \hat{Q}(t)]^T r - \frac{k_L}{2} r^T r \end{aligned} \quad (2.105)$$

$$\begin{aligned} &= -e^T \alpha e - r^T K r - \frac{k_L}{2} r^T r + [r^T \tilde{Q} - k_n \rho^2 r^T r] \\ &\quad + \frac{1}{2k_L} \left\| \text{Sat}_\beta(Q_d(t)) - \text{Sat}_\beta(\hat{Q}(t)) \right\|^2 - \frac{1}{2k_L} \left\| Q_d(t) - \hat{Q}(t) \right\|^2. \end{aligned} \quad (2.106)$$

Üstteki köşeli parantezdeki terim için alttaki çıkarım yapılabilir

$$r^T \tilde{Q} - k_n \rho^2 r^T r \leq \|r\| \left\| \tilde{Q} \right\| - k_n \rho^2 \|r\|^2 \quad (2.107)$$

$$\leq \rho \|r\| \|z\| - k_n \rho^2 \|r\|^2 \quad (2.108)$$

$$\leq \frac{1}{4k_n} \|z\|^2. \quad (2.109)$$

Ek D'deki geliştirmelerden alttaki eşitsizlik elde edilir

$$\left\| Q_d(t) - \hat{Q}(t) \right\|^2 \geq \left\| \text{Sat}(Q_d(t)) - \text{Sat}(\hat{Q}(t)) \right\|^2. \quad (2.110)$$

(2.109) ve (2.110) kullanılarak (2.106)'dan alttaki ifade elde edilir

$$\dot{V} \leq -e^T \alpha e - r^T K r - \frac{k_L}{2} r^T r + \frac{1}{4k_n} \|z\|^2 \quad (2.111)$$

$$\leq - \left[\min \left\{ \lambda_{\min}(\alpha), \lambda_{\min}(K) + \frac{k_L}{2} \right\} - \frac{1}{4k_n} \right] \|z\|^2. \quad (2.112)$$

(2.100) ile verilen kazanç şartının sağlanmasıyla sabit artı bir $\gamma \in \mathbb{R}$ değeri için alttaki sınırlandırma elde edilir

$$\dot{V} \leq -\gamma \|z\|^2. \quad (2.113)$$

(2.102) ve (2.113)'teki ifadelerden $V(t) \in \mathcal{L}_\infty$ garanti edilir ve dolayısıyla (2.102)'den $e(t)$, $r(t) \in \mathcal{L}_\infty$ elde edilir. $e(t)$ ve $r(t)$ 'nin sınırlılıklarını ve Not 2'yi (2.82) ile beraber kullanarak $\dot{e}(t) \in \mathcal{L}_\infty$ sağlanır. $e(t)$ ve $\dot{e}(t)$ sınırlılıkları ve $x_d(t)$ ve $\dot{x}_d(t)$ 'nin sınırlılıkları (2.76) ve türevi ile beraber kullanıldığında $x(t)$, $\dot{x}(t) \in \mathcal{L}_\infty$ garanti edilir. $r(t)$ 'nin sınırlılığı ile doyum işlevinin sınırlılığı beraber kullanıldığında (2.94)'ten $\hat{Q}(t) \in \mathcal{L}_\infty$ sağlanır. Üstteki sınırlılık çıkarımları (2.93) ile beraber kullanıldığında $\tau(t) \in \mathcal{L}_\infty$ garanti edilir. $\dot{x}(t) \in \mathcal{L}_\infty$ ve Not 2 beraberce (2.63) ile kullanıldığında $\dot{\theta}(t) \in \mathcal{L}_\infty$ ve dolayısıyla da $V_m(\theta, \dot{\theta}) \in \mathcal{L}_\infty$ sağlanır. (2.1)'den $\dot{\theta}(t) \in \mathcal{L}_\infty$ ispatlanır. Üstteki sınırlılık çıkarımları (2.92) ile beraber kullanıldığında $\dot{r}(t) \in \mathcal{L}_\infty$ garanti edilir.

(2.113) ifadesinin $t = 0$ 'dan $+\infty$ 'a integrali alınınca alttaki ifade elde edilir

$$\int_0^{+\infty} \|z(\sigma)\|^2 d\sigma \leq \frac{1}{\gamma} (V(0) - V(+\infty)) \leq \frac{V(0)}{\gamma}. \quad (2.114)$$

Üstteki ifadeden $z(t) \in \mathcal{L}_2$ açıktır. $z(t) \in \mathcal{L}_2$ ve $z(t)$, $\dot{z}(t) \in \mathcal{L}_\infty$ [28]'de bulunan Barbalat'ın önermesiyle beraber kullanıldığında $t \rightarrow +\infty$ $\|z(t)\| \rightarrow 0$ ve dolayısıyla $\|e(t)\|, \|r(t)\| \rightarrow 0$. \square

2.2.5 Benzetim Sonuçları

(2.93) ve (2.94)'te tasarlanan öğrenmeli denetleyicinin başarımını göstermek amacıyla iki serbestlik dereceli robot modeliyle sayısal benzetimler gerçekleştirilmiştir. (2.1) ve (2.2) ile verilen dinamik model alttaki modelleme bileşenleri ile beraber kullanılmıştır [43]

$$M = \begin{bmatrix} p_2 + p_3 + 2p_1s_2 & p_2 + p_1s_2 \\ p_2 + p_1s_2 & p_2 \end{bmatrix} \quad (2.115)$$

$$V_m = \begin{bmatrix} p_1s_2\dot{\theta}_2 & p_1s_2(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \\ -p_1s_2\dot{\theta}_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.116)$$

$$F = \begin{bmatrix} p_4 & 0 \\ 0 & p_5 \end{bmatrix} \quad (2.117)$$

$$G = \begin{bmatrix} 0.5m_1gl_1s_1 + m_2g(l_1s_1 + 0.5l_2s_{12}) \\ 0.5m_2gl_2s_{12} \end{bmatrix}. \quad (2.118)$$

Üstte $p_1 = 0.36$, $p_2 = 0.43$, $p_3 = 0.93$, $p_4 = p_5 = 1$, $m_1 = 0.36[kg]$, $m_2 = 0.2[kg]$, $g = 9.8[\frac{m}{s^2}]$, $l_1 = l_2 = 0.6[m]$. Robot kolunun ileri kinematiği altta verilmiştir

$$x = \begin{bmatrix} l_1s_1 + l_2s_{12} \\ l_1c_1 + l_2c_{12} \end{bmatrix} \quad (2.119)$$

ve Jakobiyen matrisi alttaki şekilde elde edilir

$$J = \begin{bmatrix} l_1c_1 + l_2c_{12} & l_2c_{12} \\ -l_1s_1 - l_2s_{12} & -l_2s_{12} \end{bmatrix}. \quad (2.120)$$

Takip edilecek görev uzayı pozisyonu periyodik olacak şekilde tasarlanmıştır

$$x_d = \begin{bmatrix} 0.5 + 0.2 \cos\left(\frac{2\pi t}{10}\right) \\ 0.5 + 0.2 \sin\left(\frac{2\pi t}{10}\right) \end{bmatrix}. \quad (2.121)$$

Robot kolunun eklemleri başlangıçta $\theta(0) = [-0.65, 2.5]^T$ radyan konumundadır ki bu görev uzayında $x(0) = [0.61, 0.225]^T$ metre pozisyonuna karşı gelmektedir.

Benzetim çalışmalarında kazançların ayarlanmasını kolaylaştırmak amacıyla denetleyicide $Kr+$

$k_n \rho^2(\|e\|)r$ yerine $r(t)$ 'yi çarpan sabit bir kazanç kullanılmış olup $20I_2$ seçilmiştir. Diğer kazançlar $\alpha = I_2$ ve $k_L = 1$ seçilmiştir. Üstte verilen denetleyici kazançları deneme yanılma yöntemiyle oldukça kolay bir şekilde seçilmiştir.

Görev uzayı hatası $e(t)$ Şekil 18'de verilmiştir. Tork girişi Şekil 19'de sunulmuştur. $\hat{Q}(t)$ ile gösterilen öğrenme terimi Şekil 20'te paylaşılmıştır. Şekil 21 ve Şekil 22'te takip edilmesi istenen görev uzayı pozisyonu ve robotun uç noktasının pozisyonu sırasıyla önce x ve y eksenlerinde ayrı ayrı ve sonra $x-y$ ekseninde gösterilmiştir. Şekil 18, 21 ve 22'ten görülebileceği üzere görev uzayı takip hedefi başarıyla gerçekleştirilmiştir.

2.2.6 Sonuçlar

Projemiz düşünüldüğünde ana ve bağımlı robotlar arasındaki kinematik farklar görev uzayında takip yapılmasını gerektirmektedir. Öte yandan robot kollarında tamamlanacak işin çoğu zaman periyodik olması da bu çalışmanın önemli sebeplerinden birisidir. Denetleyici tasarımı dinamik modeldeki belirsizlikleri de dikkate almak durumundadır. Bu çalışmada görev uzayında takip yapmak için öğrenmeli denetleyici tasarlanmıştır. Tasarlanan denetleyici bilimsel yazındaki benzer çalışmalar olan [39] ve [40]'dan farklı olarak elde edilmesi oldukça zor olan pozisyon seviyesinde ters kinematik probleminin çözülmesine ihtiyaç duymamaktadır. Lyapunov tarzı yöntemler kullanılarak asimptotik kararlılık ispatlanmıştır. Benzetim sonuçları ile tasarlanan denetleyicinin başarımı gösterilmiştir.

2.3 Robot kollarının dinamik ve kinematik belirsizliklere karşı sürekli gürbüz görev uzayı takip denetimi

2.3.1 Giriş

Robot kollarının belirsizliklere karşı denetlenmesi üzerine yapılan çalışmaların çoğu eklem uzayında takibin geliştirilmesi üzerine yoğunlaşmıştır. Halbuki gerçekte robot kolları verilen görevi çoğu zaman görev uzayında takip etmektedir. Bu yüzden kabul edilen ortak bir yöntem ters kinematik kullanılarak görev uzayı takip yolunu eklem değişkenlerine dönüştürmektir ve sonra eklemler için tasarlanan denetleyicilerin eklem uzayında takip yapmasını sağlamaktır. Ancak bu yöntemde robot kollarının hem ileri hem de ters kinematik hesaplamasına ihtiyaç vardır.

Denetleyici kuramı açısından bakıldığında sistem dinamikleri parametrik belirsizlikler olduğu zaman uyarlamalı denetim yöntemleri kullanılabilirken, yapısal olmayan belirsizlikler olması durumunda gürbüz kontrol yöntemleri kullanılabilir. Buna göre görev uzayında uyarlamalı takip kontrol yöntemini kullanan bir çok çalışma yapılmıştır [14], [17], [18], [23], [45], [46], [47], [48], [49], [50], [51]. Yapılan bu çalışmaların hemen hemen hepsi denetleyici tasarımlarında sistem dinamiklerini kısmen kullanmışlardır veya harici bir algılayıcı yardımıyla robot kolunun uç noktasının pozisyonunu ölçme ihtiyacı duymuşlardır. Yapısal olmayan belirsizliklerle uğraşmak için tasarlanan gürbüz denetim yöntemleri genellikle değişken yapısal tipli denetleyiciler ve yüksek kazançlı denetleyiciler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Değişken yapısal tipli denetleyici tasarımlarında genellikle işaret işlevi kullanılır ki bu da onların süreksizliğine neden olur. Diğer taraftan yüksek kazançlı denetleyiciler asimptotik takip sağlayamazlar [52].

Bu çalışmada dinamik modelinde yapısal olmayan belirsizlikler ve kinematik modelindeki belirsizlikler olan robot kollarının sürekli gürbüz denetleyici yöntemi ile görev uzayında takip denetimi üzerine odaklanılmıştır. Robot kollarının kinematik ve dinamik modelleri ile ilgili bazı varsayımlar altında tasarladığımız sürekli bir gürbüz denetleyici dinamik terimlerin yapısal olmayan belirsizliklerine ve kinematik modelin parametrik belirsizliklerine karşı asimptotik uç noktası takibi sağlamaktadır. Denetleyici girişinin tasarımında sürekliliği sağlamak için yardımcı hata teriminin signumunun integrali kullanılmaktadır. Denetleyici tasarımı Lyapunov tabanlı yöntemle analiz edilir ve uç noktası takip hatasının asimptotik kararlılığı sağlanır. Tasarlanan gürbüz denetleyicinin başarımı proje kapsamında alınan Phantom omni haptik cihaz üzerinde gerçekleştirilen deneyler ile sınanmıştır.

2.3.2 Dinamik model, kinematik model ve özellikleri

n eklemlili robot kolunun dinamik modeli (2.1) ve (2.2)'de verilmişti. Önceki çalışmadan farklı olarak bu çalışmada robot kolunun dinamik modelinin yapısı belli olmayan belirsizlikleri olduğu durumda denetleyici tasarlanacaktır. Bu çalışmada da robotun dinamik modeli (2.1)'de verilen yapıda olup (2.2) yerine alttaki tanım tercih edilmiştir [53]

$$N(\theta, \dot{\theta}) \triangleq V_m(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G(\theta) + F_d\dot{\theta} + \tau_d. \quad (2.122)$$

Üstte $\tau_d(t) \in \mathbb{R}^n$ robota etki eden bozan etkileri belirtmektedir.

Önemle belirtmek isteriz ki önceki çalışmada hedeflenen yeni bir ikincil görev denetleyicisi tasarlamak ve kararlılık analizleri ile asimptotik kararlılık sağlamak olduğu için modelin ya tamamen ya da kısmen bilindiği varsayılmıştı. Oysaki robotlara etki eden olumsuz etkilerin de çoğu zaman denetleyici tasarımında gözönünde bulundurulması gerekmektedir. Bu kapsamda bu çalışmada robotun dinamik modelindeki yapısı belli olmayan belirsizliklerle mücadele edilecektir.

Üstte verilen robot dinamik modeli Özellik 1'i sağlar. İlaveten önceki çalışmaya benzer şekilde Not 1 ve Not 2 de sağlanmaktadır.

Varsayım 2. (2.1) ile verilen robot dinamik modelindeki terimler ikinci dereceden türevlenebilir olup, argümanları sınırlı olduğunda sınırlıdır.

Önceki çalışmamızda artık robotlar için asimptotik kararlı ikincil görev denetleyicisi tasarlanmıştı, oysa ki bu çalışmada öncelikle hedeflenen robot modelindeki dinamik belirsizliklerle başa çıkmak olduğu için bu çalışmada robotun görev uzayının boyutu eklem sayısına eşit kabul edilerek ($m = n$) denetleyici tasarlanmıştır. Önemle belirtmek isteriz ki bu çalışmanın artık robotlara uygulanması oldukça kolay bir şekilde gerçekleştirilir.

Robotun uç noktasının pozisyon ve yönelimi $x(t) \in \mathbb{R}^n$ ile gösterilmiş olup alttaki şekilde elde edilir

$$x = f(\theta). \quad (2.123)$$

Üstte $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ robot kolunun ileri kinematik modelini göstermektedir. (2.123) ifadesinin zamana göre türevinin alınmasından sonra alttaki ifade elde edilir

$$\dot{x} = J\dot{\theta}. \quad (2.124)$$

Üstte $\dot{x}(t) \in \mathbb{R}^n$ robotun uç noktasının hızını ve $J(\theta) \triangleq \frac{\partial f(\theta)}{\partial \theta} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ise Jakobiyen matrisini gösterir. Denetleyicinin tasarımında alttaki alttaki kabuller kullanılacaktır.

Robotun ters kinematiği Varsayım 1'i sağlar.

Altta özellik bu çalışmanın bilimsel yazındaki benzerlerinden önemli farklarından birisidir. Öyle ki bu çalışmada robotun Jakobiyen matrisinde parametrik belirsizlikler olduğu kabul edilerek Jakobiyen matrisinin tam bilinmediği durum incelenmiştir. Üstte belirtilenlerin de ışığında tasarlanacak denetleyicinin dinamik model bilgisine ihtiyaç duymaması ve Jakobiyen matrisinin içindeki parametrelerin gerçek değerlerine ihtiyaç duymaması gerekecektir. Aşikardır ki bu kısıtlar denetleyici tasarımını oldukça zorlaştırmaktadır.

Özellik 9. (2.124) ile ifade edilen hız kinematiği alttaki şekilde parametrelerine doğrusal olarak ayrılabilir

$$J\dot{\theta} = W_j\phi_j. \quad (2.125)$$

Üstte $W_j(\theta, \dot{\theta}) \in \mathbb{R}^{n \times p}$ bilinen regresör matrisini ve $\phi_j \in \mathbb{R}^p$ ise hız kinematiğinde bilinmeyen parametrelerden oluşan vektörü gösterir.

Özellik 10. Parametre vektörü ϕ_j 'nin elemanları alttaki şekilde alttan ve üstten sınırlandırılabilir

$$\underline{\phi}_{ji} \leq \phi_{ji} \leq \bar{\phi}_{ji}. \quad (2.126)$$

Üstte $\phi_{ji} \in \mathbb{R}$ $\phi_j \in \mathbb{R}^p$ 'in i^{nci} elemanını gösterir. Öte yandan $\underline{\phi}_{ji}$ ve $\bar{\phi}_{ji} \in \mathbb{R}$ ise altta tanımlanan $\underline{\phi}_j$ ve $\bar{\phi}_j \in \mathbb{R}^p$ 'nin i^{nci} elemanını gösterir

$$\underline{\phi}_j \triangleq [\underline{\phi}_{j1}, \underline{\phi}_{j2}, \dots, \underline{\phi}_{jp}]^T \quad (2.127)$$

$$\bar{\phi}_j \triangleq [\bar{\phi}_{j1}, \bar{\phi}_{j2}, \dots, \bar{\phi}_{jp}]^T. \quad (2.128)$$

Varsayım 3. Kinematik terimler $J(\theta)$ ve $J^{-1}(\theta)$ $\theta(t)$ 'ya trigonometrik işlevlerle bağlıdır ve dolayısıyla da her olası $\theta(t)$ için sınırlıdırlar. Ve $J(\theta)$ ile $J^{-1}(\theta)$ ikinci dereceden türevlenebilir olup $\dot{J}(\cdot)$, $\ddot{J}(\cdot)$, $\dot{J}^{-1}(\cdot)$ ve $\ddot{J}^{-1}(\cdot)$ terimleri argümanları sınırlı olduğunda sınırlıdırlar.

2.3.3 Hata sistemi

Önceki bölümde de olduğu gibi görev uzayı takip hatası $e(t) \in \mathbb{R}^n$ ile gösterilip alttaki şekilde tanımlanır

$$e \triangleq x_d - x. \quad (2.129)$$

Üstte $x_d(t) \in \mathbb{R}^n$ takip edilmesi istenen görev uzayı pozisyon ve yönelimini gösterir. Bilimsel yazında standart olarak kullanılan $x_d(t)$, $\dot{x}_d(t)$, $\ddot{x}_d(t)$, $\ddot{\ddot{x}}_d(t)$ ve $\ddot{\ddot{\ddot{x}}}_d(t)$ ifadelerinin zamana bağlı sınırlı olacak şekilde tasarlandığı kabul edilir. (2.129) ifadesinin türevi alınıp (2.124) kullanıldığında altttaki ifade elde edilir

$$\dot{e} = -\alpha e + \hat{J}r - \tilde{J}\dot{\theta}. \quad (2.130)$$

Üstte $\alpha \in \mathbb{R}^{n \times n}$ artı tanımlı köşegen sabit kazanç matrisidir ve $r(t) \in \mathbb{R}^n$ alttaki şekilde tanımlanmıştır

$$r \triangleq \hat{J}^{-1}(\dot{x}_d + \alpha e) - \dot{\theta}. \quad (2.131)$$

Üstteki ifadede $\hat{J}(\theta) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ Jakobiyen matrisinin kestirimi olup alttaki şekilde elde edilebilir

$$\hat{J} \triangleq J|_{\phi_j = \hat{\phi}_j}. \quad (2.132)$$

Yine üstte $\tilde{J}(\theta) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ robotun gerçek Jakobiyen matrisi ile kestirimi arasındaki farkı gösterir ve alttaki şekilde tanımlanır

$$\tilde{J} \triangleq J - \hat{J}. \quad (2.133)$$

Yine üstte $\hat{\phi}_j(t) \in \mathbb{R}^p$ bilinmeyen parametre vektörü olan ϕ_j 'nin kestirimidir. (2.132) ve (2.133) ifadelerinden $\tilde{\phi}_j = \phi_j - \hat{\phi}_j \in \mathbb{R}^p$ parametre kestirim hatası olarak tanımlanınca $\hat{J}\dot{\theta} = W_j\hat{\phi}_j$ ve $\tilde{J}\dot{\theta} = W_j\tilde{\phi}_j$ ifadeleri elde edilir.

Bu çalışmanın sunumunu kolaylaştırmak amacıyla $s(t) \in \mathbb{R}^n$ ile gösterilen bir hata işareti altta tanımlanmıştır

$$s \triangleq \dot{r} + \gamma r. \quad (2.134)$$

Üstte $\gamma \in \mathbb{R}^{n \times n}$ köegen, artı tanımlı denetleyici kazanç matrisidir. Önemle belirtmek isteriz ki $s(t)$ denetleyici tasarımında kullanılmayacaktır.

(2.134) ifadesinin zamana göre türevi alınıp, (2.131) ifadesinin zamana göre ikinci türevi yerine yazılıp, (2.1) ifadesinin türevi yerine yazılıp ardından da $M(\theta)$ ile çarpılmasından sonra alttaki ifade elde edilir

$$M\dot{s} = M \frac{d^2}{dt^2} \{ \hat{J}^{-1}(\dot{x}_d + \alpha e) \} - \dot{\tau} + \dot{M}\ddot{\theta} + \dot{N} + M\gamma\dot{r}. \quad (2.135)$$

Üstteki ifadenin sağ tarafının yeniden düzenlenmesiyle alttaki ifade elde edilir

$$M\dot{s} = Q - \frac{1}{2}\dot{M}s - r - \dot{\tau}. \quad (2.136)$$

Üstte $Q(x, \dot{x}, \ddot{x}, e, r, s, t) \in \mathbb{R}^n$ ile gösterilen ve belirsizlikleri içeren terim altta tanımlanmıştır

$$Q \triangleq M \frac{d^2}{dt^2} \{ \hat{J}^{-1}(\dot{x}_d + \alpha e) \} + \dot{M}\ddot{\theta} + \dot{N} + M\gamma\dot{r} + \frac{1}{2}\dot{M}s + r. \quad (2.137)$$

Bu belirsiz terimle başa çıkarken $Q_d(x_d, \dot{x}_d, \ddot{x}_d, \ddot{\ddot{x}}_d) \in \mathbb{R}^n$ ile gösterilen ve altta tanımı verilen baka bir belirsiz terim tanımlanmıştır

$$Q_d \triangleq Q|_{x=x_d, \dot{x}=\dot{x}_d, \ddot{x}=\ddot{x}_d}. \quad (2.138)$$

Üstteki iki terimin arasında fark $\tilde{Q}(x, \dot{x}, \ddot{x}, e, r, s, t) \in \mathbb{R}^n$ ile gösterilir ve alttaki şekilde tanımlanır

$$\tilde{Q} \triangleq Q - Q_d. \quad (2.139)$$

Not 6. Ek E'de detaylandırıldığı üzere \tilde{Q} vektörünün büyüklüğü hatalara bağlı olarak üstten alttaki şekilde sınırlandırılabilir

$$\|\tilde{Q}\| \leq \rho(\|z\|) \|z\|. \quad (2.140)$$

Üstte $\rho(\cdot)$ eksi olmayan argümanın azalmayan işlevini ve $z(t) \in \mathbb{R}^{3n}$ ise altta tanımı verilen birleşik hatayı göstermektedir

$$z \triangleq [e^T, r^T, s^T]^T. \quad (2.141)$$

Önemle vurgulamak isteriz ki Q , Q_d ve \tilde{Q} terimleri sadece kararlılık analizinde kullanılacak olup denetleyici tasarımında kullanılmayacaklardır ve bu bağlamda bilinmelerine gerek yoktur.

2.3.4 Denetleyici tasarımı

Bölüm 2.3.3'deki hata dinamikleri ve takip eden kararlılık analizleri ışığında alttaki tork girişi tasarlanmıştır

$$\tau = (K + I_n)[r(t) - r(0) + \gamma \int_0^t r(\sigma) d\sigma] + \Pi(t). \quad (2.142)$$

Üstte $K \in \mathbb{R}^{n \times n}$ artı tanımlı, sabit, köşegen denetleyici kazanç matrisini gösterir ve $\Pi(t) \in \mathbb{R}^n$ ise alttaki şekilde güncellenen bir denetleyici terimidir

$$\dot{\Pi}(t) = \beta \text{Sgn}(r(t)), \quad \Pi(0) = 0_{n \times 1}. \quad (2.143)$$

Üstte $\beta \in \mathbb{R}^{n \times n}$ artı tanımlı, sabit, köşegen denetleyici kazanç matrisi ve $\text{Sgn}(\cdot) \in \mathbb{R}^n$ vektör signum işlevidir.

Üstte $r(0)$ teriminin denetleyicinin içerisine eklenmesinin sebebi başlangıç torkunun sıfır ($\tau(0) = 0_{n \times 1}$) olması içindir. (2.142) ve (2.143) ile tasarlanan denetleyici $r(t)$ 'ye ihtiyaç duyar ki yapısı

$r = \hat{J}(\theta, \hat{\phi}_j)^{-1}(\dot{x}_d + \alpha(x_d - x)) - \dot{\theta}$ şeklindedir ve $\theta, \dot{\theta}$ ölçümleri ile alttaki şekilde güncellenen $\hat{\phi}_j$ 'ye ihtiyaç duyar

$$\dot{\hat{\phi}}_j = \text{proj}\{\mu\}. \quad (2.144)$$

Üstteki $\mu \in \mathbb{R}^p$ terimi alttaki şekilde tasarlanmış olup

$$\mu \triangleq \Gamma_j W_j^T e \quad (2.145)$$

$\Gamma_j \in \mathbb{R}^{p \times p}$ artı tanımlı, sabit köşegen kazanç matrisi olup projeksiyon işlevi altta verilen yapıdadır

$$\text{proj}\{\mu_i\} = \left\{ \begin{array}{l} \mu_i \quad \text{if } \hat{\phi}_{ji} > \underline{\phi}_{ji} \\ \mu_i \quad \text{if } \hat{\phi}_{ji} = \underline{\phi}_{ji} \quad \text{and} \quad \mu_i > 0 \\ 0 \quad \text{if } \hat{\phi}_{ji} = \underline{\phi}_{ji} \quad \text{and} \quad \mu_i < 0 \\ 0 \quad \text{if } \hat{\phi}_{ji} = \bar{\phi}_{ji} \quad \text{and} \quad \mu_i > 0 \\ \mu_i \quad \text{if } \hat{\phi}_{ji} = \bar{\phi}_{ji} \quad \text{and} \quad \mu_i \leq 0 \\ \mu_i \quad \text{if } \hat{\phi}_{ji} < \bar{\phi}_{ji} \end{array} \right\}. \quad (2.146)$$

Üstte μ_i ve $\hat{\phi}_{ji}(t)$ sırasıyla μ ve $\hat{\phi}_j(t)$ 'nin i^{nci} elemanlarıdır. Kullanılan projeksiyon kuralı $\underline{\phi}_{ji} \leq \hat{\phi}_{ji}(0) \leq \bar{\phi}_{ji}$ şartı sağlandığında $\underline{\phi}_{ji} \leq \hat{\phi}_{ji}(t) \leq \bar{\phi}_{ji} \forall i = 1, 2, \dots, p$ garanti eder [54], [55].

(2.139), (2.134) ve (2.143) ile (2.142)'nin zamana göre türevini (2.136)'de yerine yazdığımızda $s(t)$ için alttaki kapalı döngü hata sistemi elde edilir

$$M\dot{s} = Q_d + \tilde{Q} - \frac{1}{2}\dot{M}s - r - (K + I_n)s - \beta \text{Sgn}(r). \quad (2.147)$$

2.3.5 Kararlılık analizi

Teorem 4. (2.142), (2.143) ve (2.144) ile tasarlanan denetleyici görev uzayında asimptotik takibi alttaki şekilde garanti eder

$$t \rightarrow \infty \quad \|e(t)\| \rightarrow 0. \quad (2.148)$$

Asimptotik kararlılık alttaki kazanç şartlarının sağlanması

$$\beta_i \geq |Q_{di}(t)| + \frac{1}{\gamma_i} |\dot{Q}_{di}(t)| \quad \forall t \quad (2.149)$$

$$\lambda_{\min}(\alpha) > \frac{\xi_j}{2} \quad (2.150)$$

$$\lambda_{\min}(\gamma) > \frac{\xi_j}{2} \quad (2.151)$$

ve K 'nin elemanlarının robotun başlangıç konumunun normuna göre yeterince büyük seçilmesi ile mümkün olur. Üstte $\beta_i, \gamma_i \in \mathbb{R}$ sırasıyla β ve γ 'nin i -nci elemanlarını, $Q_{di}(t)$ ve $\dot{Q}_{di}(t)$ sırasıyla $Q_d(t)$ and $\dot{Q}_d(t)$ 'nin i -nci elemanlarını ve $\xi_j \in \mathbb{R}$ ise $\xi_j \geq \|\hat{J}(\theta)\| \forall \theta$ şartını sağlayan artı sınırlayıcı bir sabiti gösterir.

Kanıt. $V(y, t) \in \mathbb{R}$ ile gösterilen ve altta tanımı verilen Lyapunov işlevi önerilmiştir

$$V \triangleq \frac{1}{2}e^T e + \frac{1}{2}r^T r + \frac{1}{2}s^T M s + P + \frac{1}{2}\tilde{\phi}_j^T \Gamma_j^{-1} \tilde{\phi}_j. \quad (2.152)$$

Üstte $P(t) \in \mathbb{R}$ altta tanımı verilen bir işlevdir

$$P \triangleq \zeta_P - \int_0^t \eta(\sigma) d\sigma. \quad (2.153)$$

Üstteki $\eta(t) \in \mathbb{R}$ ve $\zeta_P \in \mathbb{R}$ altta tanımlanmıştır

$$\eta(t) \triangleq s^T(t)[Q_d(t) - \beta \text{Sgn}(r(t))] \quad (2.154)$$

$$\zeta_P \triangleq \sum_{i=1}^n \beta_i |r_i(0)| - r^T(0)Q_d(0). \quad (2.155)$$

Öte yandan $y(t) \in \mathbb{R}^{(3n+1+p) \times 1}$ 'nin tanımı altta verilmiştir

$$y(t) \triangleq \begin{bmatrix} e & r & s & \sqrt{P} & \tilde{\phi}_j \end{bmatrix}. \quad (2.156)$$

Ek F'de verilen ispatın ışığında

$$P(t) \geq 0 \quad (2.157)$$

olduğu açıktır ve dolayısıyla $V(y, t)$ bir Lyapunov işlevidir. (2.152) ifadesi alttan ve üstten aşağıdaki

şekilde sınırlandırılabilir

$$\lambda_1 \|y\|^2 \leq V(y) \leq \lambda_2 \|y\|^2. \quad (2.158)$$

Üstte λ_1 ve $\lambda_2 \in \mathbb{R}$ alta tanımları verilen sınırlayıcı sabitlerdir

$$\lambda_1 \triangleq \frac{1}{2} \min\left\{1, m_1, \frac{1}{\lambda_{\max}(\Gamma_j)}\right\}, \lambda_2 \triangleq \max\left\{1, \frac{1}{2}m_2, \frac{1}{\lambda_{\min}(\Gamma_j)}\right\}. \quad (2.159)$$

(2.152) ifadesinin zamana göre türevi alttaki yapıdadır

$$\dot{V} = e^T \dot{e} + r^T \dot{r} + \frac{1}{2} s^T \dot{M} s + s^T M \dot{s} + \dot{P} + \tilde{\phi}_j^T \Gamma_j^{-1} \dot{\tilde{\phi}}_j. \quad (2.160)$$

(2.130), (2.134), (2.144), (2.147) ve (2.153)'nin zamana göre türevi üstteki ifade ile beraber kullanıldığında alttaki ifade edilir

$$\dot{V} = -e^T \alpha e + e^T \hat{J} r - r^T \gamma r + s^T \tilde{Q} - s^T (K + I_n) s. \quad (2.161)$$

Not 1'in ışığında Varsayım 3 ve (2.140) kullanıldığında (2.161) ifadesinin sağ tarafı için alttaki üst sınır elde edilir

$$\dot{V} \leq -\lambda_{\min}(\alpha) \|e\|^2 + \frac{\xi_j}{2} \|e\|^2 + \frac{\xi_j}{2} \|r\|^2 - \lambda_{\min}(\gamma) \|r\|^2 - \|s\|^2 + \rho \|s\| \|z\| - \lambda_{\min}(K) \|s\|^2. \quad (2.162)$$

(2.162)'deki son iki terim için alttaki üst sınır elde edilir

$$\rho \|s\| \|z\| - \lambda_{\min}(K) \|s\|^2 \leq \frac{\rho^2}{4\lambda_{\min}(K)} \|z\|^2 \quad (2.163)$$

ve bu sayede (2.162)'nin sağ tarafı alttaki şekilde sınırlandırılır

$$\dot{V} \leq -\left[\min\left\{\left(\lambda_{\min}(\alpha) - \frac{\xi_j}{2}\right), \left(\lambda_{\min}(\gamma) - \frac{\xi_j}{2}\right), 1\right\} - \frac{\rho^2}{4\lambda_{\min}(K)}\right] \|z\|^2. \quad (2.164)$$

(2.150) ve (2.151) sağlandığında ve K 'nin elemanları robot kolunun başlangıç koşullarına göre yeterince büyük seçildiğinde alttaki ifade elde edilir

$$\dot{V} \leq -\lambda \|z\|^2. \quad (2.165)$$

Üstte λ $0 < \lambda < 1$ şartını sağlayan bir sabittir.

(2.152) ve (2.165)'den $V(y, t) \in \mathcal{L}_\infty$ sağlanır. Dolayısıyla $y(t) \in \mathcal{L}_\infty$ ve $e(t), r(t), s(t), \tilde{\phi}(t) \in \mathcal{L}_\infty$ sağlanır. Takip edilmesi istenen görev uzayı pozisyon ve yöneliminin sınırlı olduğu kabulüne dayanarak, (2.129)'dan $x(t) \in \mathcal{L}_\infty$ sağlanır. Varsayım 3, $e(t)$ ve $r(t)$ 'nin sınırlılığı (2.130) ile beraber kullanılıncaya $\dot{x}(t) \in \mathcal{L}_\infty$ sağlanır. Üstteki sınırlılık sonuçları (2.131) ile beraber kullanılarak $\dot{\theta}(t) \in \mathcal{L}_\infty$ gösterilir. Eklem hızlarının sınırlılığı kullanılarak $W_j(\theta, \dot{\theta}) \in \mathcal{L}_\infty$ sağlanır. Gösterilen sınırlılık sonuçları (2.144) ile beraber kullanılarak $\hat{\phi}_j(t) \in \mathcal{L}_\infty$ gösterilir. (2.134)'den $\dot{r}(t) \in \mathcal{L}_\infty$ gösterildikten sonra bu sonuç (2.130) ve (2.131)'nin türevleriyle beraber kullanılarak $\ddot{\theta}(t), \ddot{e}(t) \in \mathcal{L}_\infty$ sağlanır. Varsayım 2 üstteki sonuçlarla beraber kullanılarak (2.147)'den $\dot{s}(t) \in \mathcal{L}_\infty$ sağlanır. (2.1) kullanılarak $\tau(t) \in \mathcal{L}_\infty$ gösterilir. Standart sınırlılık yöntemleri kullanılarak kalan işaretlerin sınırlılığı gösterilir.

(2.165) teriminin 0'dan $+\infty$ 'a integralinin alınması sonucu $\int_0^{+\infty} \|z(\sigma)\|^2 d\sigma \leq \frac{V(0)}{\lambda}$ elde edilir ki bu sonuç kullanılarak $z(t) \in \mathcal{L}_2$ sağlanır. $z(t) \in \mathcal{L}_2 \cap \mathcal{L}_\infty$ ve $\dot{z}(t) \in \mathcal{L}_\infty$ çıkarımları Barbalat'ın yardımcı önermesi [54] ile beraber kullanıldığında $t \rightarrow \infty$ iken $\|z(t)\| \rightarrow 0$ ve (2.148)'deki asimptotik kararlılık sonucu elde edilir. \square

2.3.6 Deney sonuçları

Tasarlanan denetleyicinin başarımını test etmek için Phantom omni haptik cihazda gerçekleştirilen deneyler bu bölümde gösterilmektedir. Şekil 5'da gösterilen Phantom omni haptik cihazı yaklaşık olarak 1750gr olup, 0.055mm pozisyon çözünürlüğüne, 0.26N geri sürme sürtünmesine, en yüksek olarak 3.3N kuvvet uygulamasına ve sürekli olarak 0.88N kuvvet uygulamasına sahiptir. Cihaz üçü pozisyon ve üçü yönelim olmak üzere 6 serbestlik dereceli pozisyon geri-bildirimini yapabilmektedir. Cihazın iki bağı, 3 aktif eklemi ve ikinci bağı sonuna eklenmiş 3 pasif eklemi vardır. Cihazın ilk üç eklemi eyleyicili olduğu için x, y ve z doğrultularında haptik kuvvet geri-bildirimini sağlar.

Bu bölümdeki deneylerde, cihazın ilk üç eklemi kullanılmıştır. Dijital enkoderlerden cihazın uç noktasının pozisyonu x, y ve z eksenlerinde ölçülür. Haberleşme arayüzü olarak bilgisayar ile cihaz arasında bölgesel alan ağı (LAN) portu kullanılmıştır. OpenHaptics ToolKit kullanılarak bilgisayar ortamında gerçek zamanlı uygulama sağlanır. Deneysel çalışmalarda MATLAB Simulink 100Hz data hızı kullanılmıştır. Deneylerde, MATLAB/Simulink Quarc kütüphanesindeki Phantom Toolbox kullanılarak robota eklem uzayında tork veya görev uzayında kuvvet bilgisi iletilir ve robotun uç noktasının veya eklem pozisyonlarının enkoder ölçümleri alınır.

Şekil 5'da cihazın kinematiki ile ilgili bilgiler mevcuttur. Denavit-Hartenberg yöntemi kullanılarak

cihazın ileri kinematiği alttaki şekilde elde edilir [56], [57], [58]

$$x(t) = \begin{bmatrix} X(t) \\ Y(t) \\ Z(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -s_1(l_1c_2 + l_2s_3) \\ -l_2c_3 + l_1s_2 + l_y \\ c_1(l_1c_2 + l_2s_3) - l_z \end{bmatrix}. \quad (2.166)$$

Üstte $l_1 = l_2 = 0.133\text{m}$ bağların uzunluklarını gösterir, $l_y = 0.023\text{m}$ ve $l_z = 0.168\text{m}$ görev uzayındaki sabit kayma değerlerini gösterir.

(2.166) ifadesinden (2.125) kullanılarak regresör matrisi $W_j \in \mathbb{R}^{3 \times 2}$ alttaki yapıda elde edilir

$$W_j = \begin{bmatrix} -c_1c_2\dot{\theta}_1 + s_1s_2\dot{\theta}_2 & -c_1s_3\dot{\theta}_1 - s_1c_3\dot{\theta}_3 \\ c_2\dot{\theta}_2 & s_3\dot{\theta}_3 \\ -s_1c_2\dot{\theta}_1 - c_1s_2\dot{\theta}_2 & -s_1s_3\dot{\theta}_1 + c_1c_3\dot{\theta}_3 \end{bmatrix}. \quad (2.167)$$

Öte yandan $\phi_j = [l_1, l_2]^T \in \mathbb{R}^2$ bulunur.

Takip edilmesi istenen görev uzayı pozisyonu altta verilmiştir

$$x_d(t) = \begin{bmatrix} X_d \\ Y_d \\ Z_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.05(1 - \exp(-0.05t)) \\ -0.05 + 0.02 \cos(0.05t) \\ -0.05 + 0.02 \sin(0.05t) \end{bmatrix}. \quad (2.168)$$

Denetleyici kazançları deneme yanılma yöntemiyle $\alpha = \text{diag}([40; 30; 20])$, $\beta = 0.1I_3$, $\gamma = 0.1I_3$, $K = \text{diag}([0.12; 0.03; 0.02])$, $\Gamma_j = 2I_2$ bulunmuştur. Cihaz deneylerde $\theta_1(0) = 0\text{rad}$., $\theta_2(0) = -0.26\text{rad}$., $\theta_3(0) = -0.5\text{rad}$ açılarıyla başlatılmıştır.

Görev uzayı takip hatası Şekil 23'de sunulmuştur. Şekil 24'de takip edilmesi istenen görev uzayı pozisyonu ile robotun uç noktasının pozisyonu verilmiştir. Tork girişi ise şekil 25'da paylaşılmıştır. Hem Şekil 23 hem de Şekil 24 incelendiğinde takip hedefinin gerçekleştiği görülür.

Bu bölümde geliştirilen denetleyici için [59] yayınıımızda tasarladığımız öz ayarlamalı kazançların kullanılması durumunda kazançların ayarlanması oldukça kolaylaşmaktadır. Tasarlanan denetleyicide K ile gösterilen denetleyici kazanç matrisinin elemanları alttaki şekilde güncellenip

$$K_i(t) = 1 + k_c + \frac{1}{2}r_i^2(t) + \alpha \int_{t_0}^t r_i^2(\sigma) d\sigma \quad (2.169)$$

ve β ile gösterilen denetleyici kazanç matrisinin elemanları alttaki şekilde güncellenip

$$\beta(t) = \beta_c + |r_i(t)| - |r_i(t_0)| + \alpha \int_{t_0}^t |r_i(\sigma)| d\sigma \quad (2.170)$$

üstte $\beta_c, k_c \in \mathbb{R}$ sıfır da olabilen üstteki kazançların sabit kısmıdır.

Elde edilen deney sonuçlarına ilaveten üstte verilen denetleyici kazançlarının öz ayarlamalı yöntem kullanılarak deney tekrarlanmıştır. Bu sayede denetleyici kazançlarının ayarlanması süreci ortadan kaldırılmıştır. Denetleyici kazançlarının öz ayarlamalı olduğu durumda elde edilen deney sonuçları Şekiller 26–29’te verilmiştir. Görev uzayı takip hatası Şekil 26’de sunulmuştur. Şekil 27’de takip edilmesi istenen görev uzayı pozisyonu ile robotun uç noktasının pozisyonu verilmiştir. Tork girişi ise Şekil 28’de paylaşılmıştır. Şekil 29’te denetleyici kazançlarının deney süresince değişimi verilmiştir. Hem Şekil 26 hem de Şekil 27 incelendiğinde takip hedefinin gerçekleştiği görülür.

2.3.7 Sonuçlar

Bu çalışmada robot kolları için yeni bir görev uzayı denetleyicisi tasarlanmıştır. Tasarlanan denetleyici dinamik modeldeki yapısı belli olmayan belirsizliklere ve hız kinematiğindeki parametrik belirsizliklere rağmen uç noktasında asimptotik takibi garanti etmiştir. İlaveten, bilimsel yazındaki birçok gürbüz ya da kayan kip denetleyicinin aksine hem asimptotik takip garanti edilmiş hem de tasarlanan denetleyici süreksiz değildir. Detaylı Lyapunov analizleriyle tasarlanan denetleyicinin kararlılığı matematiksel olarak incelenmiştir. Phantom omni haptik cihaz ile gerçekleştirilen deneyler ile denetleyicinin başarımı gösterilmiştir.

Bilimsel yazındaki uyarlamalı görev uzayı denetleyicilerinden olan [14], [17], [18], [23] ve önceki bölümdeki uyarlamalı denetleyici ile kıyaslandığında, burada tasarlanan denetleyici yapısı belli olmayan belirsizlikleri de telafi edebilmektedir. Öte yandan bilimsel yazındaki benzer gürbüz (model bilgisinden bağımsız) denetleyicilerden olan [52] ile kıyaslandığında takip hatasının sınırlı bir değere gitmesini iyileştirerek asimptotik kararlılığı sağlamıştır.

2.4 Robot kollarının dinamik ve kinematik belirsizliklere karşı görev uzayı takibi için gürbüz çıkış geri–beslemeli denetleyici tasarımı

2.4.1 Giriş

Robotik uygulamalarda robot kollarının belirsizlere karşı görev uzayında takip kontrolü önemli problemlerden biridir. Görev uzayı takip kontrolünün amacı robot kolunun uç noktasının istenen görevi doğru bir şekilde yapmasını sağlamaktır. Görev uzayı takip denetleyicilerinin çoğunda öncelikle eklem değişkenleri algılayıcılar kullanılarak ölçülür ve görev uzayı değişkenleri robot kolunun ileri kinematiği ile hesaplanır ve sonra tasarlanan denetleyici girişleri robot kolunun eklemlerine uygulanır. Bu yüzden bu yöntem eklem değişkenlerinin ölçülmesine ve ileri kinematik hesaplamasına gereksinim duyar. Eğer ileri kinematikte parametrik belirsizlikler varsa bu robot kolunun başarımında düşmeye sebep olabilir. Robot kolları için bir başka önemli sorun ise dinamik modeldeki yapısal ve yapısal olmayan belirsizliklerdir. Robot kollarının dinamik ve kinematik modeldeki bu belirsizlikler ile uğraşmak için bilimsel yazında bazı gürbüz denetim çalışmaları vardır [52], [60], [61] ve [62]. Ancak bu çalışmaların hepsi eklemlerin hem pozisyon hem de hız bilgisine gereksinim duymaktadır.

Bu çalışmanın esas amacı robot kolları için hem kinematik hem de dinamik modeldeki belirsizliklere karşı gürbüz çıkış geri–besleme yöntemini kullanarak görev uzayında takip denetimidir. Robot kollarının dinamik ve kinematik modellerinde bazı varsayımlarda bulunarak gürbüz bir çıkış geri beslemeli görev uzayı denetleyicisi tasarlanmıştır. Tasarlanan bu denetleyici eklem pozisyon ve hız bilgilerini ölçmeye veya bilmeye gerek kalmadan ve ayrıca kinematik ve dinamik modelleri bilmeye gerek kalmadan nihai sınırlı uç noktası takibi sağlar. Önerilen denetleyicinin performansını sunmak için deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Önemle belirtmek isteriz ki önceki çalışmada robotlara etki eden olumsuz etkiler gözönünde bulundurularak dinamik modeldeki yapısı belli olmayan belirsizlikler ve kinematik modeldeki parametrik belirsizler ile başa çıkabilen model bilgisinden bağımsız bir denetleyici önerilmişti. Fakat bir önceki denetleyici tasarımında tüm durum geri–beslemenin (pozisyon ve hız ölçümlerinin var olduğu kabul edilmişti) var olduğu durumlar gözönünde bulundurulmuştur. Öte yandan robot kollarında çoğu zaman hız ölçümü yapan algılayıcılar bulunmamaktadır ve bu durumun denetleyici tasarımında gözönünde bulundurulması gerekmektedir. Bilimsel yazında robotik araştırmacıları tarafından önerilen çözümlerden bir tanesi pozisyon ölçümlerinin türevi alınarak veya süzgeçlenerek hız bilgisine ulaşılmasıdır. Fakat bu durumda pozisyon bilgisindeki gürültülerin de türevi alındığında

daha da gürültülü olan bir hız bilgisine ulaşılır. Bunun alternatifi ise hız gözlemcisi kullanılmasıdır. Bu çalışmamızda robotun hem dinamik hem de kinematik modellerinde yapısı bilinmeyen belirsizliklerin olduğu ve sadece robotun uç noktasının ölçümlerinin sağlandığı durumda görev uzayında takip hedeflenmektedir. Özetle model bilgisinden bağımsız çıkış geri-beslemeli ve olabildiğince basit yapıda bir denetleyici tasarımı hedeflenmektedir.

2.4.2 Dinamik model, kinematik model ve özellikleri

Bu çalışmada kullanılan robotun dinamik modeli (2.1) ve (2.122) ile gösterilmiştir. Robotun dinamik modelinde hem eylemsizlik matrisi $M(\theta)$ hem de diğer dinamik etkileri gösteren $N(\theta, \dot{\theta})$ vektörü belirsizdir ve denetleyici tasarımında kullanılamayacaktır.

Bu çalışmada kullanılan robot dinamik modeli Özellik 1'i sağlar. İlaveten Not 1 ve Not 2 de sağlanmaktadır.

Robotun uç noktasının pozisyon ve yönelimi $x(t) \in \mathbb{R}^n$ ile gösterilmiş olup (2.123)'deki ifadeden elde edilir. (2.123)'deki ileri kinematik modelin türevinin alınmasıyla (2.124)'deki hız kinematiği elde edilir.

Bilimsel yazındaki benzer çalışmalardan en önemli fark olarak, bu çalışmada hem $f(\theta)$ ile gösterilen ileri kinematik modeli hem de $J(\theta)$ ile gösterilen Jakobiyen matrisi belirsizdir.

Sadece $x(t)$ ile gösterilen robotun uç noktasının pozisyon ve yönelimi lazer interferometer, theodolite, opto-camera systems [63], [64] gibi bir dış ölçüm vasıtasıyla elde edilebilmektedir.

2.4.3 Hata Sistemi

Robotun (2.1)'de verilen modelinin eylemsizlik matrisinin tersiyle çarpılmasıyla eklem ivme vektörü alt-taki şekilde elde edilir

$$\ddot{\theta} = M^{-1}\tau - M^{-1}N. \quad (2.171)$$

Öte yandan (2.124) ifadesindeki hız kinematiğinin zamana göre türevinin alınıp üstteki ifadenin de kullanılmasıyla robotun uç noktasının ivmesi elde edilir

$$\ddot{x} = \dot{J}\dot{\theta} + JM^{-1}\tau - JM^{-1}N. \quad (2.172)$$

(2.172)'deki ifadede tork girişi JM^{-1} ile çarpılmaktadır fakat bu çalışmada kısıtlayıcı bir şekilde

her iki terimin de belirsiz olduğu ve denetleyici tasarımında kullanılamayacağı belirtilmiştir. Bu noktada belirtmek isteriz ki, bilimsel yazında, genellikle, Jakobiyen matrisinin bilindiği durum tercih edilip üstteki ifadede denetleyici u 'nun geçici denetleyici kuralı olduğu durumda gerçek denetleyici kuralı $J^T u$ şeklinde tasarlanmaktadır. Bu yapının tercih edilmesinin sebebi bu durumda geçici denetleyici u artı tanımlı ve simetrik olan $JM^{-1}J^T$ ifadesiyle çarpılmış olur. Oysa ki bizim üzerinde çalıştığımız problemde J ve M matrislerinin belirsiz olması denetim hedefini oldukça zorlaştırır. Bu probleme çözüm olarak alttaki matris ayrıştırma işlemi önerilmektedir [65], [66]

$$JM^{-1} = SDU. \quad (2.173)$$

Üstte $S \in \mathbb{R}^{n \times n}$ artı tanımlı, simetrik bir matrisdir, $D \in \mathbb{R}^{n \times n}$ köşegen elemanları ± 1 olan köşegen matrisdir ve $U \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ise birim üst üçgenel matrisdir. Üstteki matris ayrıştırma işlemi bilimsel yazındaki robot modellerine uygulandığında D matrisi birim matris olarak elde edildi. Her ne kadar böyle bir sonuçla karşılaşılsa da bu çalışmada D matrisinin birim matris olmak zorunda olmadığı fakat bilinmesi gerektiği kabul edilmiştir. Bilimsel yazında benzer kabuller görülmüştür [67], [68], [69], [70], [71].

(2.173) ifadesini $\bar{M}(\theta) \triangleq S^{-1}(\theta) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ile çarptığımızda alttaki ifadeyi elde ederiz

$$\bar{M}\ddot{x} = \bar{M}J\dot{\theta} - \bar{M}JM^{-1}N + DU\tau. \quad (2.174)$$

Not edilmelidir ki S matrisi artı tanımlı ve simetrik olduğu için tersi olan \bar{M} matrisi de artı tanımlı ve simetriktir. Sunum kolaylığı açısından, $g(\theta, \dot{\theta}, t) \in \mathbb{R}^n$ ile gösterilen terim altta tanımlanmıştır

$$g \triangleq \bar{M}J\dot{\theta} - \bar{M}JM^{-1}N. \quad (2.175)$$

Üstteki ifadenin (2.174) ifadesinde yerine konulmasıyla alttaki ifadeyi elde ederiz

$$\bar{M}\ddot{x} = g + DU\tau. \quad (2.176)$$

2.4.4 Denetleyici ve gözlemci tasarımı

Denetim hedefi olarak robotun uç noktasının takip edilmesi istenen görev uzayı pozisyon ve yönelimine yakınsaması istenmektedir. Takip eden denetleyici tasarımı sadece robotun uç noktasının

pozisyon ve yöneliminin ölçülmesi kısıtıyla karşı karşıyadır.

Denetim hedefi önceki bölümlere benzer şekilde $e(t) \in \mathbb{R}^n$ ile gösterilir ve alttaki yapıda tanımlanır

$$e \triangleq x_d - x. \quad (2.177)$$

Üstte $x_d(t) \in \mathbb{R}^n$ takip edilmesi istenen görev uzayı pozisyon ve yönelimdir. Yine önceki çalışmalara benzer olarak $x_d(t)$, $\dot{x}_d(t)$, $\ddot{x}_d(t)$, $\ddot{\ddot{x}}_d(t)$ ve $\ddot{\ddot{\ddot{x}}}_d(t)$ terimlerinin sınırlı olduğu kabul edilmiştir.

Sunum kolaylığı için $r(t) \in \mathbb{R}^n$ ile gösterilen bir başka hata işareti altta tanımlanmıştır

$$r = \dot{e} + 2e. \quad (2.178)$$

Önemle belirtmek isteriz ki önceki bölümlerdeki $r(t)$ tanımlarından farklı olan bu hata sadece $x(t)$ ölçümleri elimizde olduğu için ölçülememektedir ve dolayısıyla da denetleyici tasarımında kullanılamaz.

Üstteki hata sistemi ve takip eden çıkarımlar ışığında tork girişi $\tau(t)$ alttaki şekilde tasarlanmıştır

$$\tau = DSat(K\hat{r}) + D\tau_{ff}. \quad (2.179)$$

Üstte $K \in \mathbb{R}^{n \times n}$ artı tanımlı köşegen sabit denetleyici kazanç matrisidir, $\tau_{ff} \in \mathbb{R}^n$ denetleyicinin ileri besleme kısmıdır, $Sat(\cdot) \in \mathbb{R}^n$ vektör doyum işlevi olup denetleyicinin sınırlandırılması amacıyla kullanılmaktadır. Öte yandan denetleyicide kullanılan $\hat{r}(t) \in \mathbb{R}^n$ (2.178)'de tanımlanan hata işaretinin gözlemci sürümü olup alttaki güncelleme kuralına göre elde edilmektedir

$$\dot{\hat{r}} = \frac{1}{\epsilon^2} \alpha_2 (e - \hat{e}). \quad (2.180)$$

Üstteki ifadede $\hat{e}(t) \in \mathbb{R}^n$ (2.177)'de tanımlanan görev uzayı takip hatasının gözlemci sürümü olup alttaki güncelleme kuralı ile elde edilir

$$\dot{\hat{e}} = \hat{r} - 2\hat{e} + \frac{1}{\epsilon} \alpha_1 (e - \hat{e}). \quad (2.181)$$

(2.180) ve (2.181)'de $\epsilon \in \mathbb{R}$ küçük artı bir sabit olup, $\alpha_1, \alpha_2 \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ise artı tanımlı köşegen gözlemci kazanç matrisleridir.

Teorem 5. (2.179)'de tasarlanan denetleyici ile (2.180) ve (2.181)'de tasarlanan gözlemciler görev

uzayı takip hatasının altta belirtilen şekilde sıfırın komşuluğunda sınırlı kalmasını sağlar

$$\|e(t)\| \leq \varepsilon. \quad (2.182)$$

Üstteki ifadede ε küçük artı bir sabit olup artan denetleyici kazancı K değerleri için küçülmektedir.

Kanıt. Matematiksel olarak oldukça detaylı olan ve dört aşamadan oluşan ispat [67]'da bulunur. \square

2.4.5 Deney Sonuçları

Tasarlanan denetleyicinin başarımını göstermek amacıyla Phantom omni haptik cihaz ile deneyler yapılmıştır. Bir önceki bölümden farklı olarak cihazın eyleyicili son iki eklemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu durumda Şekil 5'dan da görülebilecek Y ve Z eksenlerinden robotun uç noktasının pozisyon ölçümleri kullanılmıştır.

Altta takip edilecek görev uzayı pozisyonu verilmiştir

$$x_d(t) = \begin{bmatrix} Y_d \\ Z_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.08 - 0.02 \cos(0.1t) \\ -0.04 + 0.02 \sin(0.1t) \end{bmatrix}. \quad (2.183)$$

Deneylerde ileri–besleme terimi olmadan beklenen başarım elde edildiği için bu terim kullanılmamıştır. Denetleyici kazanç matrisi $K = \text{diag}([40; 30])$ seçilmiştir. Gözlemci kazançları ise $\alpha_1 = \text{diag}([10; 10])$, $\alpha_2 = \text{diag}([10; 10])$, $\varepsilon = 0.95$ seçilmiştir. Vektör doyum işlevinin alt ve üst değerleri ± 0.4 Nt-m seçilmiştir.

Şekil 30'te görev uzayı takip hatası $e(t)$ gösterilmiştir. Şekil 31'de görev uzayında takip edilecek pozisyon ve robotun uç noktasının pozisyonu sunulmuştur. Şekil 32'da tork girişleri verilmiştir. Şekiller 30 ve 31'ten görev uzayında takip hedefinin gerçekleştirildiği görülmektedir. Önemle belirtmek isteriz ki eğer denetleyici tasarımında ileri–besleme terimi kullanılsaydı daha da iyi bir takip sağlanabilirdi.

2.4.6 Sonuçlar

Bu çalışmada robot kolları için yeni bir görev uzayı denetleyicisi tasarlanmıştır. Tasarlanan denetleyici robotun uç noktasının takip hatasının sıfırın komşuluğunda küçük bir değere sürülmesini sağlamıştır. Denetleyici tasarımında eklem pozisyon veya hız ölçümlerine ihtiyaç duyulmadığı gibi

dinamik model ve kinematik model bilgilerine de ihtiyaç duyulmamıştır. Sadece robotun uç noktasının pozisyon ve yönelim bilgisi yeterli olduğu için az miktarda bilgiye ihtiyaç duyan basit bir denetleyici yapısı elde edilmiştir. Phantom omni haptik cihaz ile gerçekleştirilen deneyler ile denetleyicinin başarımı gösterilmiştir.

Bilimsel yazındaki gürbüz denetleyicilerle kıyaslandığında, tasarlanan denetleyici hem model bilgisinden bağımsız hem de çıkış geri-beslemeli olan az sayıdaki denetleyiciden bir tanesidir.

2.5 Sonuçlar

Bu bölümde elde edilen sonuçların bir kısmı altta detayları verilen uluslararası konferanslarda sunulmuştur:

- K. M. Dogan, Enver Tatlicioglu, & Erkan Zergeroglu, “Operational/Task Space Learning Control of Robot Manipulators with Dynamical Uncertainties,” Proc. of IEEE Multi-Conference on Systems and Control, 527-532, Sydney, Australia, 2015.
- K. Cetin, E. Tatlicioglu, & E. Zergeroglu, “Continuous Robust Task–Space Tracking Control of Robotic Manipulators with Uncertain Dynamics,” Proc. of IEEE Multi-Conference on Systems and Control, 312-317, Sydney, Australia, 2015.

Bu bölümde elde edilen sonuçların bir kısmı altta detayları verilen uluslararası konferanslarda inceleme aşamasındadır:

- K. Cetin, E. Tatlicioglu, & E. Zergeroglu, “On Null–Space Control of Kinematically Redundant Robot Manipulators,” Proc. of European Control Conference, Aalborg, Denmark, 2016, under review.
- K. Cetin, E. Tatlicioglu, & M. Deniz, “Task–space Tracking Control of Robot Manipulators with Uncertain Dynamics and Kinematics: Robust Output Feedback Approach,” Proc. of European Control Conference, Aalborg, Denmark, 2016, under review.

Bu bölümde elde edilen sonuçların bir kısmı altta detayları verilen dergide inceleme aşamasındadır:

- K. Cetin, E. Tatlicioglu, & E. Zergeroglu, “Task–Space Tracking Control of Robotic Manipulators with Uncertain Dynamic and Kinematic Terms: A Continuous Robust Approach,” Int. Journal of Robotics and Automation, 2015, under review.

3. Eklem uzayı denetleyici tasarımları

Proje kapsamında robot kolları için eklem uzayı denetleyicileri de tasarlanmıştır. Tasarlanan bu denetleyiciler bu bölümde sunulmuştur. Bölüm 3.1'de robot dinamik modelinin bilinmediği ve sadece robotun eklem pozisyonlarının ölçüldüğü durumda çıkış geri-beslemeli denetleyici tasarlanmıştır. Hız ölçümlerinin eksikliğini gidermek için model bilgisinden bağımsız hız gözlemcisi tasarlanmıştır. Bu bölümde tasarlanan denetleyicinin farklı bir sürümü Bölüm 6.2'de sunulan GTÜ ve İYTE arasında gerçekleştirilen deneylerde kullanılmıştır. Bölüm 3.2'de ise denetleyici girişinde çarpımsal bozan etkenlere maruz robot kolları için model bilgisinden bağımsız bir denetleyici önerilmiştir.

3.1 Robot kolları için çıkış geri-beslemeli öğrenmeli denetleyici tasarımı

3.1.1 Giriş

Neredeyse tüm endüstriyel uygulamalarda tekrarlı görevlerin gerçekleştirilmesi gerekmektedir ve bu nedenle robotlar birçok endüstriyel uygulamada önceden tanımlanmış bir görevi tekrar tekrar gerçekleştirmek üzere kullanılmaktadırlar. Doğrusal olmayan model tabanlı denetleyiciler arasında öğrenmeli denetleyiciler robotların dinamik model belirsizliklerine ve devirli görevden kaynaklı periyodik bozan etkenlere rağmen en iyi takip başarımını gerçekleştirdiği için tercih edilir. Dahası öğrenmeli denetim, bozan etkenleri gürbüz yüksek frekanslı veya yüksek kazançlı terimleri kullanmaya gerek kalmadan telafi ettiği için ve zamanla değişen bozan etkenlerle baş edebildiği için diğer denetleyicilere göre daha etkilidirler.

Robot kolları sistemler için tekrarlamalı öğrenmeli denetimin ilk çalışmalarından olan [72], [73] ve [74]'te bahsi geçen sistem dinamiklerinde denetim tasarımlarının asimptotik yakınsaması kısıtlı şartlar altında garanti edilir. Daha sonra [72] ve [73]'de bahsi geçen denetimlerin gürbüzlüğünü arttırmak için tekrarlamalı güncelleme kuralı Q filtresi eklenerek değiştirilmiştir. Daha önce önerilen tekrar-

lamalı öğrenimli denetim çözüm yollarında gürbüzlüğü arttırmak için [75] ve [76]'te güncelleme kuralında Kernel işlevlerinin kullanımı önerilmiştir. Ayrıca Sadegh ve diğerleri doyuma ulaştırılmış güncelleme kuralının kullanımı ile tekrarlamalı öğrenimli denetimin gürbüzlüğünü arttırmayı önermişlerdir [77]. Öte yandan [78]'de Lyapunov tabanlı kararlılık analizi yardımıyla tüm durum geri-beslemeli öğrenmeli denetleyicinin asimptotik takibi başarımını sunmuşlardır.

Öte yandan, neredeyse tüm endüstriyel robotlarda sadece konum algılayıcıları olmasına rağmen, yukarıda bahsi geçen her denetleyici tüm durum geri-beslemeli olup hesaplanabilmeleri pozisyon ve hız ölçümlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Hız bilgisine ulaşmak için pozisyon bilgisinin sayısal türevi alınarak hız bilgisinin elde edilmesinin sisteme fazladan gürültü eklemesi bilinen bir gerçektir. Bu yüzden eklem hız ölçümü gerektirmeyen çıkış geri-beslemeli öğrenmeli denetleyici tasarımı önemli açık bir araştırma problemidir. Geçmişte yapılan çalışmalardan birkaçını saymak gerekirse, doğrusal olmayan ayırık zamanlı sistemlerin farklı kısımları için sinir ağı tabanlı takviye edilmiş öğrenimli denetleyiciler [79] ve [80]'da gösterilmiştir. Tek girişli tek çıkışlı, en küçük evreli, bilinmeyen çıkış bağımlı sapmalı zamanla değişmeyen sistemler, bilinmeyen değiştirgenli ve bilinen ilgili derece değiştirgenli öğrenimli denetleyici düşünülmüştür [81]. Fakat bu çalışmalar dinamik model bilgisine tam olarak veya kısmen ihtiyaç duymaktadırlar.

Robot kolları için bu çalışmada model bilgisinden bağımsız gözlemleyicisi ile yeni ileri-beslemeli öğrenme terimi kullanarak periyodik eklem pozisyonlarını takip eden çıkış geri-beslemeli, tekrarlamalı öğrenmeli denetleyici tasarladık. Robot dinamiği ile ilgili belirsizliklere ve hız ölçümünün eksikliğine rağmen önerilen yöntem asimptotik takibi sağlamaktadır. Gözlemleyici—denetleyici çiftinin tüm kararlılığı Lyapunov tabanlı kararlılık analizleri kullanılarak sağlanmıştır.

3.1.2 Robot dinamik modeli

Bu çalışmada (2.1) ve (2.2) ile gösterilen robot dinamik modeli kullanılmıştır.

Kullanılan model Varsayım 2, Özellikler 2, 4, 5 ve 7 ile birlikte altta verilen özellikleri de sağlar.

Özellik 11. (2.1) ve (2.2) ile verilen dinamik modelin sağ tarafı sunum kolaylığı açısından altta tanımı verilen $W(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}) \in \mathbb{R}^n$ ile gösterilmektedir

$$W(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}) = M(\theta)\ddot{\theta} + V_m(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G(\theta) + F_d\dot{\theta}. \quad (3.1)$$

Üstteki ifade $\theta_d(t), \dot{\theta}_d(t), \ddot{\theta}_d(t) \in \mathbb{R}^n$ sırasıyla eklem uzayında takip edilecek pozisyon, hız ve ivme

olduğunda $W_d(\theta_d, \dot{\theta}_d, \ddot{\theta}_d) \in \mathbb{R}^n$ gösterimi kullanılarak alttaki şekilde yeniden tanımlanabilir

$$W_d(\theta_d, \dot{\theta}_d, \ddot{\theta}_d) = M(\theta_d)\ddot{\theta}_d + V_m(\theta_d, \dot{\theta}_d)\dot{\theta}_d + G(\theta_d) + F_d(\dot{\theta}_d). \quad (3.2)$$

3.1.3 Gözlemci–denetleyici tasarımı

Bu çalışmada hedeflenen çıkış geri–beslemeli denetim olduğu için denetleyici tasarımında sadece eklem pozisyon vektörü $\theta(t)$ ölçümlerinin elimizde olması kısıtıyla karşı karşıyayız.

Eklem pozisyon takip hatası, takip edilecek eklem pozisyonu $\theta_d(t) \in \mathbb{R}^n$ ile robotun eklemlerinin farkı $e(t) \in \mathbb{R}^n$ ile gösteriliyor olup alttaki şekilde tanımlanmıştır

$$e \triangleq \theta_d - \theta. \quad (3.3)$$

Takip edilecek eklem pozisyon vektörü ve ilk iki türevi bilinen bir periyot olan T ile periyodiktir

$$\theta_d(t) = \theta_d(t - T), \dot{\theta}_d(t) = \dot{\theta}_d(t - T), \ddot{\theta}_d(t) = \ddot{\theta}_d(t - T). \quad (3.4)$$

Elimizde ölçümleri olmayan eklem hızları için tasarlanacak olan eklem hız gözlemcisinin tasarımı eklem hız gözlemci hatası olan ve $\dot{\hat{\theta}}(t) \in \mathbb{R}^n$ ile gösterilen vektörün alttaki tanımı ile başlamaktadır

$$\dot{\hat{\theta}} \triangleq \dot{\theta} - \dot{\hat{\theta}}. \quad (3.5)$$

Benzer şekilde pozisyon gözlemci hatası $\tilde{\theta}(t) \in \mathbb{R}^n$ ile gösterilmekte olup altta tanımlanmıştır

$$\tilde{\theta} \triangleq \theta - \hat{\theta}. \quad (3.6)$$

Üstteki tanımlarda $\hat{\theta}(t)$ ve $\dot{\hat{\theta}}(t) \in \mathbb{R}^n$ sırasıyla pozisyon gözlemcisi ve hız gözlemcisini göstermektedir. Bu safhada, sunum kolaylığı için, $r(t) \in \mathbb{R}^n$ ve $s(t) \in \mathbb{R}^n$ ile gösterilen altta tanımları verilen iki hata işareti tanımlanmıştır

$$r \triangleq \dot{e} + \alpha e \quad (3.7)$$

$$s \triangleq \dot{\tilde{\theta}} + \alpha \tilde{\theta}. \quad (3.8)$$

Üstte $\alpha \in \mathbb{R}$ sabit artı kazançtır. Hız gözlemcisi alttaki yapıda tasarlanmıştır

$$\dot{\hat{\theta}} = p + k_0 \tilde{\theta} - k_c e. \quad (3.9)$$

Üstte $p(t) \in \mathbb{R}^n$ güncelleme kuralı altta verilen yardımcı bir terimdir

$$\dot{p} = k_1 \text{Sgn}(\tilde{\theta}) + k_2 \tilde{\theta} - \alpha k_c e. \quad (3.10)$$

Üstteki ifadelerde $k_0, k_c, k_1, k_2 \in \mathbb{R}^{n \times n}$ artı tanımlı köşegen kazanç matrisleri olup, $\text{Sgn}(\cdot) \in \mathbb{R}^n$ vektör signum işlevidir. Denetleyici girişi $\tau(t)$ altta tasarlanmıştır

$$\tau = \hat{W} + k_p e + k_c \alpha (\theta_d - \hat{\theta}) + k_c (\dot{\theta}_d - \dot{\hat{\theta}}). \quad (3.11)$$

Üstte $k_p \in \mathbb{R}^{n \times n}$ artı tanımlı köşegen denetleyici kazancı olup, ileri-besleme öğrenme terimi $\hat{W}(t) \in \mathbb{R}^n$ ile gösterilmekte olup güncelleme kuralı altta verilmiştir

$$\dot{\hat{W}}(t) = \text{Sat}_\beta(\hat{W}(t-T)) + k_L \alpha (\theta_d - \hat{\theta}) + k_L (\dot{\theta}_d - \dot{\hat{\theta}}). \quad (3.12)$$

Üstte $k_L \in \mathbb{R}$ artı sabit kazanç olup, $\beta \in \mathbb{R}$ vektör doyum işlevi $\text{Sat}_\beta(\cdot) \in \mathbb{R}^n$ 'nin doyum değerlerini göstermektedir. Altteki çıkarımlar sunum kolaylığı için çalışmanın geride kalanında tercih edilecektir

$$\theta_d - \hat{\theta} = e + \tilde{\theta} \quad (3.13)$$

$$\dot{\theta}_d - \dot{\hat{\theta}} + \alpha (\theta_d - \hat{\theta}) = r + s. \quad (3.14)$$

Üstteki çıkarımların ışığında (3.11)'de verilen denetleyici girişi ve (3.12)'de verilen öğrenme terimi alttaki şekilde tekrar yazılabilir

$$\tau = \hat{W} + k_p e + k_c (r + s) \quad (3.15)$$

$$\dot{\hat{W}}(t) = \text{Sat}_\beta(\hat{W}(t-T)) + k_L (r + s). \quad (3.16)$$

3.1.4 Gözlemci hatası dinamiklerinin elde edilmesi

(3.8) ifadesinin zamana göre türevi alınıp, ardından (3.9), (3.15), (3.16) ifadeleri yerine yazılıp, sonra sadeleştirmeleri yapıp ve ardından da gözlemci kazancı k_0 'ı alttaki şekilde seçince

$$k_2 = \alpha(k_0 - \alpha I_n) \quad (3.17)$$

alttaki hata dinamikleri elde edilir

$$\dot{s} = Q_d + Q_b - k_1 \text{Sgn}(\tilde{\theta}) - k_c r - \frac{1}{\alpha} k_2 s. \quad (3.18)$$

Üstte kullanılan $Q_d(\theta, \theta_d, \dot{\theta}_d, \ddot{\theta}_d, t) \in \mathbb{R}^n$ ve $Q_b(\theta, \dot{\theta}, \theta_d, \dot{\theta}_d, e, r, s, t) \in \mathbb{R}^n$ vektörleri altta tanımlanmışlardır

$$Q_d \triangleq \ddot{\theta}_d + M^{-1}(\theta) \left[\text{Sat}_\beta \left(\hat{W}(t - T) \right) - W_d(t) \right] \quad (3.19)$$

$$Q_b \triangleq [M^{-1}(\theta) - M^{-1}(\theta_d)] M(\theta_d) \ddot{\theta}_d + M^{-1}(\theta) \left[V_m(\theta_d, \dot{\theta}_d) \dot{\theta}_d - V_m(\theta, \dot{\theta}) \dot{\theta} + G(\theta_d) - G(\theta) + F_d \dot{e} \right] \\ + M^{-1}(\theta) [k_p e + k_c(r + s)] + M^{-1}(\theta) [k_L(r + s)]. \quad (3.20)$$

Not edilmelidir ki (2.53), (2.57), (2.61), (2.55), (2.56), (2.58) ve (2.59) ifadeleri kullanılarak Q_d and Q_b vektörlerinin büyüklükleri için alttaki üst sınırlar elde edilir

$$\|Q_d\| \leq \zeta_{Q_d} \quad (3.21)$$

$$\|Q_b\| \leq \rho_{01} \|e\| + \rho_{02} \|r\| + \rho_{03} \|s\| + \rho_{04} \|r\|^2. \quad (3.22)$$

Üstte $\zeta_{Q_d}, \rho_{01}, \rho_{02}, \rho_{03}, \rho_{04} \in \mathbb{R}$ bilinen sınırlayıcı sabitlerdir.

3.1.5 Eklem takip hatası dinamiklerinin elde edilmesi

Takip hatası dinamiklerine ulaşmak için (3.7)'de verilen $r(t)$ 'nin zamana göre türevini alıp, ardından $M(q)$ ile çarpıp, (2.1), (2.2), (3.3), (3.11) ifadelerini kullanıp, alttaki yapı elde edilir

$$M\dot{r} = -V_m r + \chi + W_d - \hat{W} - k_p e - k_c(r + s). \quad (3.23)$$

Üstte $\chi(t) \in \mathbb{R}^n$ ile gösterilen vektör altta tanımlanmıştır

$$\chi \triangleq M \left(\ddot{\theta}_d + \alpha \dot{e} \right) + V_m \left(\dot{\theta}_d + \alpha e \right) + G + F_d \dot{\theta} - W_d. \quad (3.24)$$

Üstte tanımı verilen $\chi(t)$ terimi için alttaki üst sınır elde edilir

$$\|\chi(t)\| \leq \rho_1 (\|e\|) \|e\| + \rho_2 (\|e\|) \|r\|. \quad (3.25)$$

Üstte $\rho_1(\cdot), \rho_2(\cdot) \in \mathbb{R}$ yapıları altta verilen artı sınırlayıcı işlevlerdir

$$\rho_1 = \zeta_1 + \zeta_2 \|e\|, \rho_2 = \zeta_3 + \zeta_4 \|e\|. \quad (3.26)$$

Üstte $\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3, \zeta_4 \in \mathbb{R}$ bilinen artı sabitlerdir.

3.1.6 Sınırlılık ve kararlılık analizi

(3.18) ve (3.23) ile verilen kapalı döngü hata sistemleri ışığında eklem pozisyonu takip hatası ile eklem hız gözlemci hatasının kararlılıklarını incelemek için alttaki teorem verilmiştir.

Teorem 6. (3.9)'de tasarlanan hız gözlemcisi ve (3.11)'de tasarlanan denetleyici girişi kapalı döngü sistemin yarı-küresel asimptotik kararlılığını denetleyici kazancı k_c alttaki şekilde

$$k_c = (k_n \zeta_1^2 + k_n \zeta_2^2 + \zeta_3 + 1) I_n \quad (3.27)$$

ve gözlemci kazancı k_2 alttaki şekilde

$$k_2 = \alpha (k_n \rho_{01}^2 + k_n \rho_{02}^2 + k_n \rho_{03}^2 + \rho_{04} + k_n k_L^2 + 1) I_n \quad (3.28)$$

seçildiğinde alttaki anlamda sağlar

$$t \rightarrow 0, \|e(t)\|, \|\dot{\theta}(t)\| \rightarrow 0. \quad (3.29)$$

Üstte $k_n \in \mathbb{R}$ artı sönümlenme sabitidir.

Kanıt. Kanıt dört alt kanıttan oluşmakta olup ilk kısmı yüzeysel olarak paylaşılırken, kalan kısmı detaylıca irlenecektir.

$V_1(r, e, s) \in \mathbb{R}$ ile gösterilen Lyapunov işlevi altta tanımlanmıştır

$$V_1 \triangleq \frac{1}{2}r^T M r + \frac{1}{2}e^T k_p e + \frac{1}{2}s^T s. \quad (3.30)$$

Üstteki Lyapunov işlevinin zamana göre türevi alınıp (3.7), (3.18) ve (3.23) kullanıldığında alttaki ifade elde edilir

$$\dot{V}_1 \leq -\gamma_0 V_1 + \epsilon_0. \quad (3.31)$$

Üstteki ifadede γ_0 ve ϵ_0 artı sabitlerdir. (3.30) ve (3.31) ifadelerinin yapısından $V_1(t) \in \mathcal{L}_\infty$ sağlanır ve dolayısıyla $e(t), r(t), s(t) \in \mathcal{L}_\infty$ garanti edilir. Standart sınırlılık yöntemleri kullanılarak $\tilde{\theta}(t)$ ve $\dot{\tilde{\theta}}(t)$ vektörlerinin de dahil olmak üzere tüm vektör ve matrislerin sınırlılığı gösterilir.

Ardından, $\tilde{\theta}(t)$ ve $\dot{\tilde{\theta}}(t)$ sınırlı olduğunda $\dot{\tilde{\theta}}(t)$ 'nin i^{nci} elemanının mutlak değerinin integrali için altta verilen üst sınır elde edilir

$$\int_{t_0}^t |\dot{\tilde{q}}_i(\sigma)| d\sigma \leq \gamma_1 + \gamma_2 \int_{t_0}^t |\tilde{q}_i(\sigma)| d\sigma + |\tilde{q}_i| \quad i = 1, \dots, n. \quad (3.32)$$

Üstte $\gamma_1, \gamma_2 \in \mathbb{R}$ artı sınırlayıcı sabitlerdir. Üstte verilen ifadenin ispatı araştırma grubumuzun gerçekleştirdiği çalışmalardan olan [82]'de bulunmaktadır.

Kapalı döngü sistemin kararlılığı ve hata vektörlerinin asimptotik kararlılığını göstermek için $V(t) \in \mathbb{R}$ ile gösterilen altta tanımlanan Lyapunov işlevi tanımlanmıştır

$$V \triangleq V_1 + P + \frac{1}{2k_L} \int_{t-T}^t \left\| \text{Sat}_\beta(W_d(\sigma)) - \text{Sat}_\beta(\hat{W}(\sigma)) \right\|^2 d\sigma. \quad (3.33)$$

Üstte $P(t) \in \mathbb{R}$ ile gösterilen terim altta tanımlanmıştır

$$P \triangleq \zeta_p - \int_0^t s^T(\sigma) \left[Q_d(\sigma) - k_1 \text{Sgn}(\tilde{\theta}(\sigma)) \right] d\sigma. \quad (3.34)$$

Üstte ζ_p artı bir sabittir. Denetleyici kazanç matrisi k_1 'in elemanlarının $Q_d(t)$ 'nin elemanlarına göre yeterince büyük seçilmesi durumunda araştırma grubumuzun [82] ile basılan çalışması olan [83]'den $P(t) \geq 0$ gösterilebilir. Önemle belirtmek isteriz ki (3.34) ile tanımlanan ifade Ek F'de incelenen terime yapısal olarak benzese de sistem vektörlerinin sınırlılığı ile ilgili farklılıklardan dolayı temelde farklıdır ve bu sebepten ispatı da farklıdır.

(3.33)'de tanımlanan Lyapunov işlevinin türevini alıp ardından (3.18), (3.23), (3.24) ifadelerini

yerine yazıp sonra sadeleştirmeleri de yapınca alttaki ifade elde edilir

$$\begin{aligned}\dot{V} = & -r^T k_{cr} - \alpha e^T k_{pe} - \frac{1}{\alpha} s^T k_2 s + r^T \chi + s^T N_b \\ & + \frac{1}{2k_L} \left\| \text{Sat}_\beta(W_d(t)) - \text{Sat}_\beta(\hat{W}(t)) \right\|^2 - \frac{1}{2k_L} \left\| [W_d - \hat{W}] \right\|^2 \\ & - \frac{k_L}{2} \|(r + s)\|^2 + k_L s^T (r + s).\end{aligned}\quad (3.35)$$

Üstteki ifadenin ikinci satırındaki terimler için alttaki eşitsizlik elde edilir

$$\left\| \text{Sat}_\beta(W_d(t)) - \text{Sat}_\beta(\hat{W}(t)) \right\|^2 - \left\| [W_d - \hat{W}] \right\|^2 \leq 0. \quad (3.36)$$

Benzer bir ispat Ek D'de bulunduğu için ayrıca verilmemiştir. (3.22), (3.25), (3.36)'deki ifadeleri (3.35) ile beraber kullanıp ardından doğrusal olmayan sönümlenme yöntemi kullanılarak alttaki ifade elde edilir

$$\dot{V} \leq - \left[\min \{ \alpha, 1 \} - \frac{3}{k_n} - \frac{1}{k_n} \|z\|^2 \right] \|z\|^2. \quad (3.37)$$

Üstteki ifadenin sağ tarafı için altta verilen üst sınır elde edilir

$$\dot{V} \leq -\gamma_4 \|z\|^2. \quad (3.38)$$

Üstte $\gamma_4 \in \mathbb{R}$ ($0 < \gamma_4 \leq 1$) şartını sağlayan bir sabittir. Barbalat'ın önermesi [26], [42] kullanılarak eklem hızı kestirim hatası ve eklem pozisyonu takip hatasının sıfıra gittiği gösterilebilir. \square

3.1.7 Benzetim sonuçları

Bu çalışmada tasarlanan çıkış geri-beslemeli denetleyicinin başarımını göstermek amacıyla iki eklemli düzlemde hareket eden robot kolu modelinin kullanıldığı benzetimler gerçekleştirilmiştir. arak two link, planar robot manipulator. (2.1) ve (2.2) ile verilen dinamik modelde alttaki terimler

kullanılmıştır

$$M = \begin{bmatrix} p_1 & -0.5p_2s_{(q_1-q_2)} \\ -0.5p_2s_{(q_1-q_2)} & p_3 \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

$$V_m = \begin{bmatrix} 0 & 0.5p_2\dot{q}_2c_{(q_1-q_2)} \\ -0.5p_2\dot{q}_1c_{(q_1-q_2)} & 0 \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

$$G = \begin{bmatrix} p_4c_1 + p_5c_{(q_1-0.5\pi)} \\ p_6s_2 \end{bmatrix}. \quad (3.41)$$

Üstte $s_{(q_1-q_2)} = \sin(q_1 - q_2)$, $c_{(q_1-q_2)} = \cos(q_1 - q_2)$, $c_{(q_1-0.5\pi)} = \cos(q_1 - 0.5\pi)$ kısaltmaları kullanılmış olup sabit parametreler $p_1 = 2.526 \times 10^{-3}$, $p_2 = 2.766 \times 10^{-3}$, $p_3 = 1.652 \times 10^{-3}$, $p_4 = 164.158 \times 10^{-3}$, $p_5 = 117.294 \times 10^{-3}$, $p_6 = 94.05 \times 10^{-3}$ seçilmiştir. Önemle belirtmek isteriz ki üstte verilen dinamik terimler sadece robot kolunun dinamiklerinin benzetiminde kullanılmış olup denetleyicide veya gözlemcide kullanılmamışlardır.

Takip edilmesi istenen eklem pozisyonları periyodik olacak şekilde tasarlanmıştır

$$q_d = \begin{bmatrix} (0.8 + 0.2 \sin(0.5t)) \sin(0.5 \sin(0.5t)) \\ (0.6 + 0.2 \sin(0.5t)) \sin(0.5 \sin(0.5t)) \end{bmatrix}. \quad (3.42)$$

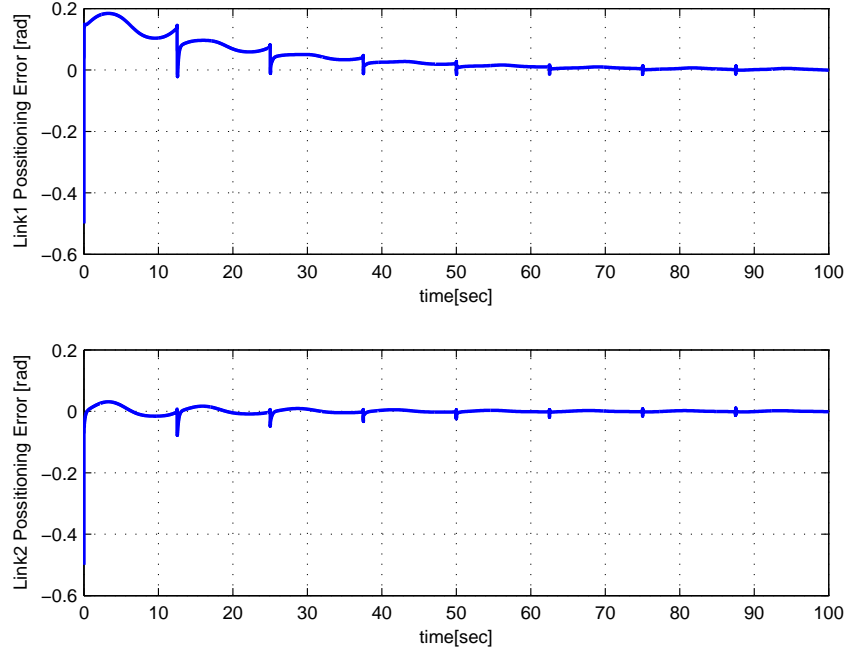
Robot kolunun eklemleri $q(0) = [0.1, 0.1]^T$ radyan konumunda başlatılmıştır. Denetleyici ve gözlemci kazançları deneme yanılma yöntemiyle $k_p = [0.1, 0; 0, 0.1]$, $k_c = [0.08, 0; 0, 0.08]$, $k_0 = [500, 0; 0, 500]$, $k_1 = [0.1, 0; 0, 0.1]$, $\alpha = 5.2$, $k_2 = \alpha(k_0 - \alpha)$, $k_L = 0.1$ seçilmiştir.

Eklem pozisyon takip hatası $e(t)$ Şekil 3.1'de gösterilmiştir. Tork girişi Şekil 3.2'de verilmiştir. Takip edilmesi istenen eklem pozisyonları ile robotun eklem pozisyonları Şekil 3.3'te sunulmuştur. Şekiller 3.1 ve 3.3'ten eklem takip hedefinin başarıyla gerçekleştirilmiştir. Özellikle Şekil 3.1'den denetleyicinin takip edilmesi istenen eklem pozisyonlarının 12.5 saniye olan her periyodunda hatada azalma gözlemlenmiştir.

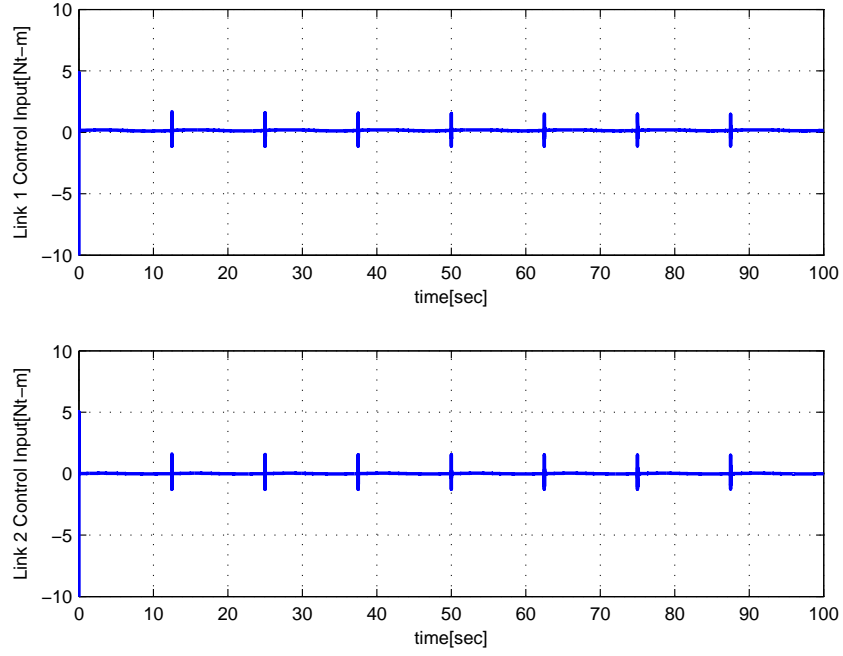
3.1.8 Sonuçlar

Bu çalışmada robot kollarının eklemlerinin takip edilmesi istenen pozisyonlara gitmesi için öğrenme tabanlı çıkış geri-beslemeli denetleyici tasarlanmıştır. Sadece eklemlerin pozisyon ölçümlerinin olduğu durumda tasarlanan denetleyici-gözlemci çifti asimptotik kararlılığı garanti etmiştir. Hata

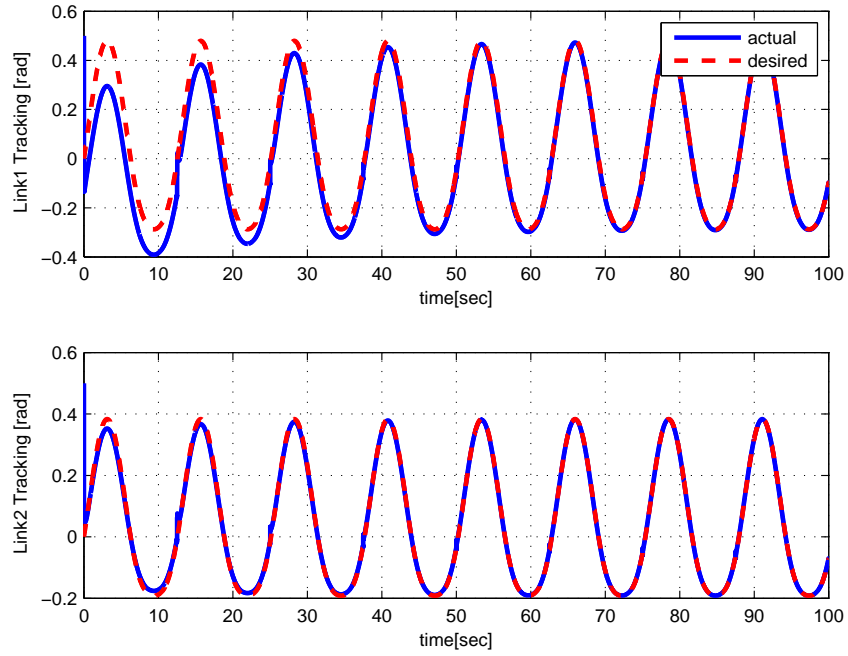
vektörlerinin kararlılığını göstermek amacıyla Lyapunov tarzı kararlılık analiz teknikleri kullanılmıştır. Benzetim sonuçları ile önerilen denetleyici-gözlemci çiftinin başarımı gösterilmiştir.



Şekil 3.1: Eklem pozisyon takip hatası $e(t)$



Şekil 3.2: Tork girişi $\tau(t)$



Şekil 3.3: Takip edilmesi istenen eklem pozisyonları $\theta_d(t)$ ile robotun eklem pozisyonları $\theta(t)$

3.2 Denetleyici girişinde çarpımsal bozan etkene sahip robot kolları için gürbüz eklem uzayı takip denetleyicisi tasarımı ve deneysel gerçekleştirilmesi

Bu çalışmada altta verilen n serbestlik dereceli dönel eklemli robot kolu modeli kullanılmıştır

$$M(\theta)\ddot{\theta} + N(\theta, \dot{\theta}) = M_d(t)\tau(t) \quad (3.43)$$

öyle ki $N(\theta, \dot{\theta}) \in \mathbb{R}^n$ terimi (2.2) tanımlanmış olup $M_d(t) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ birim üst üçgenel yapıda zamanla değişen çarpımsal bozan etkeni göstermektedir. Vurgulamak isteriz ki çarpımsal bozan etken eklem pozisyonu veya hızlarına da bağlı olabilir.

Eklem pozisyon takip hatası, takip edilecek eklem pozisyonu $\theta_d(t) \in \mathbb{R}^n$ ile robotun eklemlerinin farkı $e(t) \in \mathbb{R}^n$ ile gösteriliyor olup alttaki şekilde tanımlanmıştır

$$e \triangleq \theta_d - \theta. \quad (3.44)$$

$r(t) \in \mathbb{R}^n$ ile gösterilen altta tanımlı verilen hata işareti tanımlanmıştır

$$r \triangleq \dot{e} + \alpha e. \quad (3.45)$$

Üstte $\alpha \in \mathbb{R}^{n \times n}$ artı tanımlı köşegen sabit kazanç matrisidir.

[82]'de genel sistemler için tasarladığımız tork girişi robotlarda eklem uzayında denetim amacıyla alttaki şekilde tasarlanmıştır

$$\tau = D(K + I_n)[r(t) - r(0) + \gamma \int_0^t r(\sigma) d\sigma] + D\Pi(t). \quad (3.46)$$

Üstte $D \in \mathbb{R}^{n \times n}$ köşegen elemanları +1 veya -1 olan sabit bir matrisi göstermektedir, $K \in \mathbb{R}^{n \times n}$ artı tanımlı, sabit, köşegen denetleyici kazanç matrisini gösterir ve $\Pi(t) \in \mathbb{R}^n$ ise alttaki şekilde güncellenen bir denetleyici terimidir

$$\dot{\Pi}(t) = \beta \text{Sgn}(r(t)), \quad \Pi(0) = 0_{n \times 1}. \quad (3.47)$$

Üstte $\beta \in \mathbb{R}^{n \times n}$ artı tanımlı, sabit, köşegen denetleyici kazanç matrisi ve $\text{Sgn}(\cdot) \in \mathbb{R}^n$ vektör signum

işlevidir.

Bu yapıdaki denetleyicinin (3.43)'de $M_d(t)$ ile verilen çarpımsal bozan etken ile mücadelesi denetleyici kazançlarının en sonuncusundan başlayarak hassas bir şekilde ayarlanmasına bağlıdır. Genel sistemler için kararlılık analizleri [82]'de bulunmaktadır. Bu çalışmanın önerilen proje ile ilintisi ise bu tarz çarpımsal bozan etkenlerin robotların eyleyicilerindeki bir takım etkilerin bu yapıda modellenemesindedir.

Üstte verilen denetleyici için Şekil 5'de görülen PHANToM Omni haptik cihazı ile deneysel çalışmalar yapılmıştır. Deneysel çalışmalar esnasında, bahsedilen cihazın eklem açısı θ_1 ile gösterilen ilk eklemi mekanik olarak durdurularak yok sayılmış, eklem açıları sırasıyla θ_2 ve θ_3 ile gösterilen eklemlerde eklem uzayı denetimi gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda $M_d(t)$ alttaki yapıda uygulanmıştır

$$M_d = \begin{bmatrix} 1 & \gamma_p \sin(t) \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3.48)$$

Üstte γ_p artı sabit bir değeri göstermektedir.

Bu noktada önemle belirtmek isteriz ki hem sistem modeli hem de (3.48)'de verilen çarpımsal bozan etken $M_d(t)$ matrisinin birim üst üçgenel olması dışında yapısı denetleyici tarafından bilinmemektedir. Denetim hedefi, $\theta_2(t)$ ve $\theta_3(t)$ 'nin altta verilen eklem pozisyonlarını takip etmesi olarak belirlenmiştir

$$\theta_d(t) = (1 - \exp(-0.3t^3)) [30 \sin(t) \quad 45 \sin(t)]^T (\text{deg}). \quad (3.49)$$

Artı sabit değer γ_p 'nin farklı değerleri için deneme yanılma yöntem ile elde edilen denetim kazançları Tablo 3.1'de verilmiştir. Denetim sonuçları 3.4–3.8 şekillerinde görülebilmektedir. Verilen

Tablo 3.1: γ_p 'nin farklı değerleri için denetim kazançları

γ_p	K	C
0.1	diag{0.2, 0.1}	diag{0.01, 0.01}
0.2	diag{0.2, 0.1}	diag{0.005, 0.005}
0.5	diag{0.2, 0.1}	diag{0.0075, 0.0075}
1	diag{0.2, 0.1}	diag{0.01, 0.01}
2	diag{0.2, 0.1}	diag{0.01, 0.01}

şekillerden denetim hedefinin gerçekleştiği açıkça görülebilmektedir.

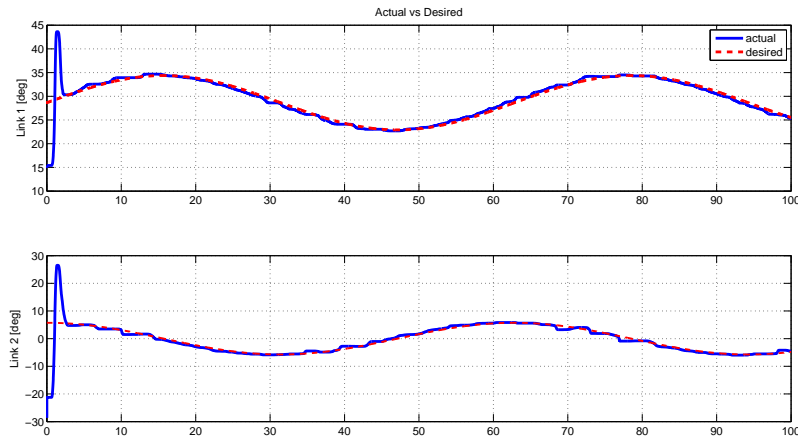
Deneyler, aynı deneysel düzenek üzerinde, aynı yaklaşımlar ve rotalar kullanılarak tekrarlanmış

olup, iki deneysel çalışma arasındaki tek fark bu kısımdaki denetim kazançlarının (2.169) ve (2.170) ile öz ayarlamalı denetim kazanç yapısı ile seçilmiş olmasıdır. Farklı γ_p için, öz ayarlamalı yapıdan faydalanılarak elde edilen denetim kazançları Tablo 3.2'de verilmiştir. Denetim sonuçları Şekiller 3.9–3.13'te görülebilir. Verilen şekillerden denetim hedefinin her seferinde gerçekleştiği açıkça görülebilmektedir.

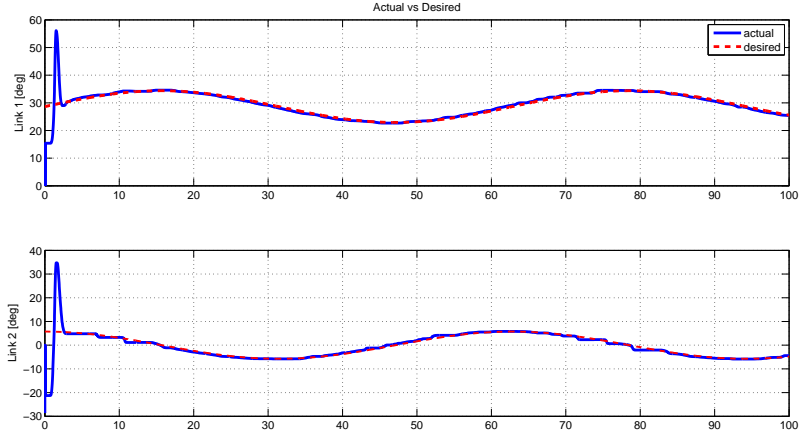
Tablo 3.2: Farklı γ_p değerleri için öz ayarlamalı yapıdan faydalanılarak elde edilen denetim kazançlarının deney sonunda yakınsadıkları değerler

γ_p	K	C
0.1	$\text{diag}\{0.1629, 0.0906\}$	$\text{diag}\{0.0013, 0.0091\}$
0.2	$\text{diag}\{0.1915, 0.0965\}$	$\text{diag}\{0.0008, 0.0049\}$
0.5	$\text{diag}\{0.1914, 0.0485\}$	$\text{diag}\{0.006, 0.0011\}$
1	$\text{diag}\{0.0844, 0.0916\}$	$\text{diag}\{0.0079, 0.0096\}$
2	$\text{diag}\{0.1311, 0.0036\}$	$\text{diag}\{0.0085, 0.0093\}$

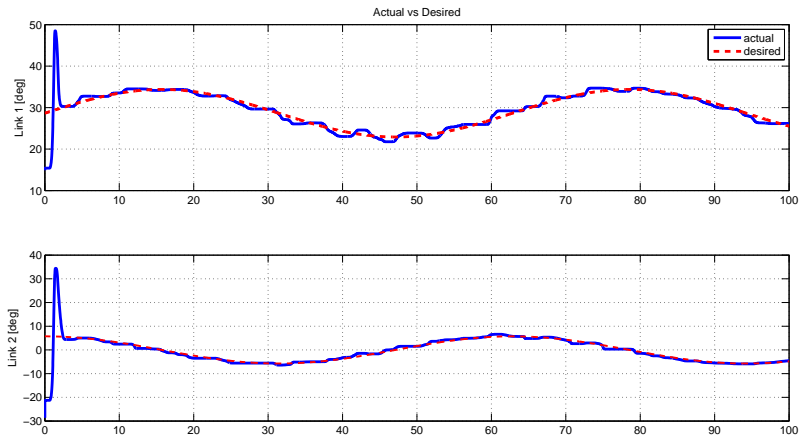
Bu çalışmamızda zamanla değişen çarpımsal bozan etkenlere maruz kalan robot kolları için eklem uzayında pozisyon takibi yapan model bilgisinden bağımsız denetleyici tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bilimsel yazında bu yapıdaki bozan etkenlerin olumsuz etkileri az çalışılmış olup gerçekleştirilen çalışmamız açık bir probleme çözüm önermiştir. Denetleyici kazançlarının öz ayarlamalı olarak seçilmesi doğrusal olmayan denetleyici tasarımlarındaki en önemli problemlerden birisine çözüm önermektedir. Hem sabit kazançlı hem de öz ayarlamalı kazançlı durumda gerçekleştirilen deneyler çalışmamızın başarımını ortaya koymaktadır.



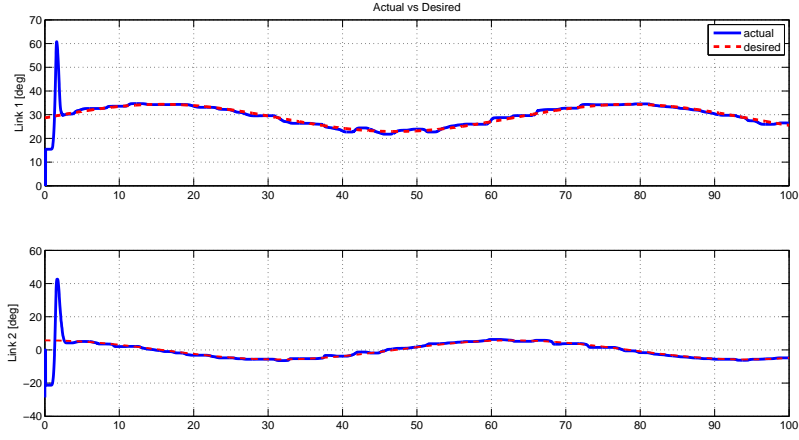
Şekil 3.4: $\gamma_p = 0.1$ için eklem pozisyonları



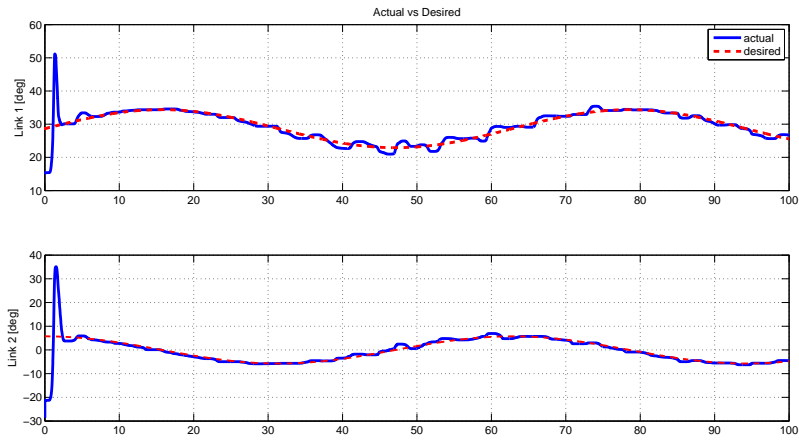
Şekil 3.5: $\gamma_p = 0.2$ için eklem pozisyonları



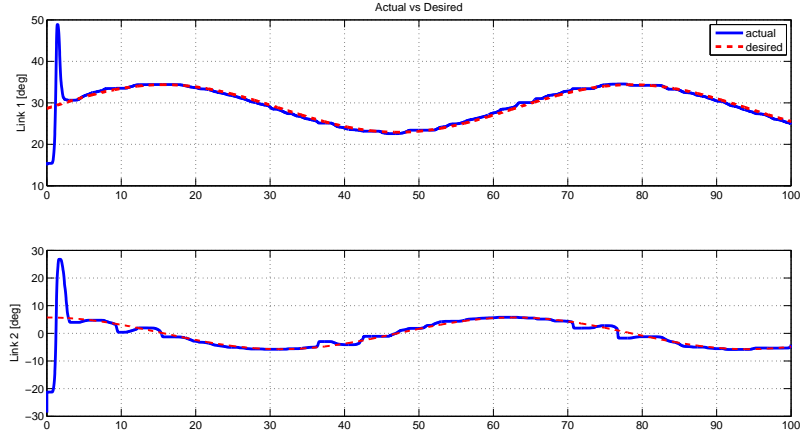
Şekil 3.6: $\gamma_p = 0.5$ için eklem pozisyonları



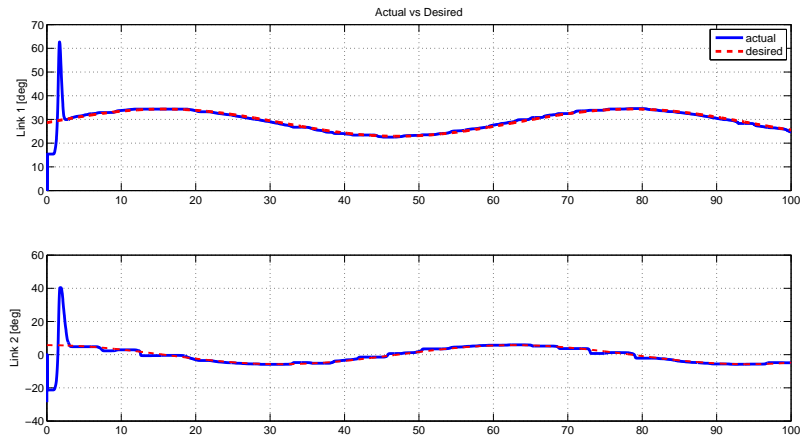
Şekil 3.7: $\gamma_p = 1$ için eklem pozisyonları



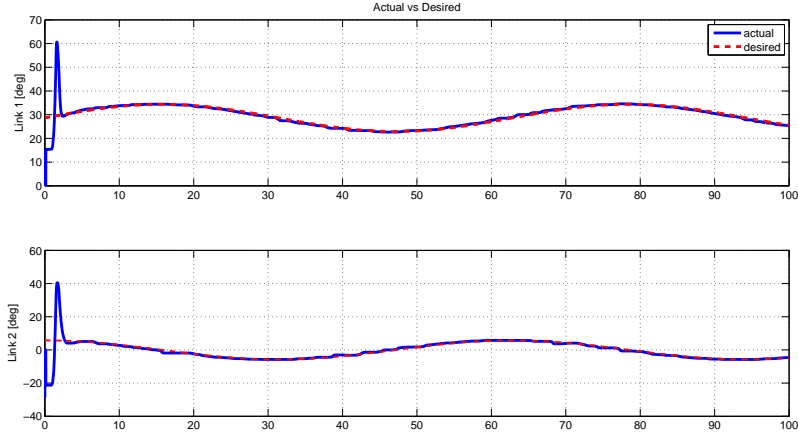
Şekil 3.8: $\gamma_p = 2$ için eklem pozisyonları



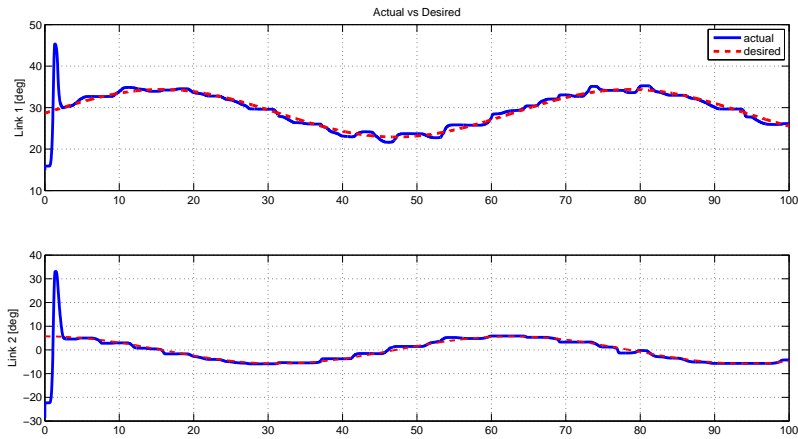
Şekil 3.9: Kazançların öz ayarlamalı olduğu durumda $\gamma_p = 0.1$ için eklem pozisyonları



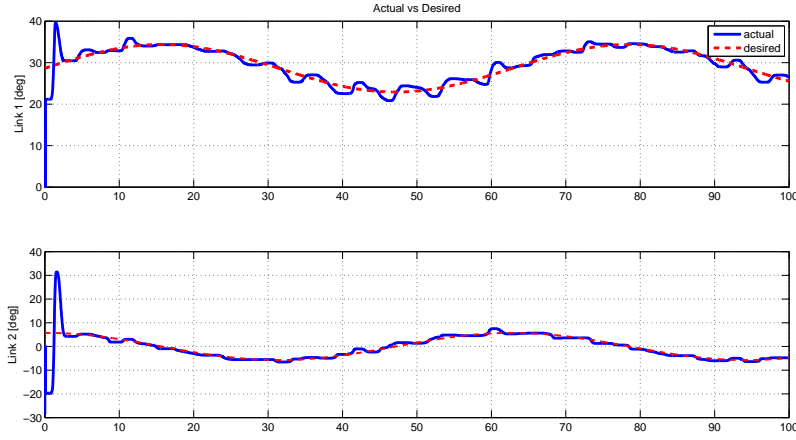
Şekil 3.10: Kazançların öz ayarlamalı olduğu durumda $\gamma_p = 0.2$ için eklem pozisyonları



Şekil 3.11: Kazançların öz ayarlamalı olduğu durumda $\gamma_p = 0.5$ için eklem pozisyonları



Şekil 3.12: Kazançların öz ayarlamalı olduğu durumda $\gamma_p = 1$ için eklem pozisyonları



Şekil 3.13: Kazançların öz ayarlamalı olduğu durumda $\gamma_p = 2$ için eklem pozisyonları

3.3 Sonuçlar

Bu bölümde elde edilen sonuçların bir kısmı altta detayları verilen uluslararası konferansta sunulmuştur:

- K. M. Dogan, E. Tatlicioglu, E. Zergeroglu, & K. Cetin, "Lyapunov based Output Feedback Learning Control of Robot Manipulators," Proc. of American Control Conf., 5337-5342, Chicago, IL, USA, 2015.

4. Telerobotik sistemlerin görev uzayında denetlenmesi için denetleyici tasarlanması

Proje kapsamında farklı kinematik modelleri olan ana ve bağımlı robotlar için denetleyiciler tasarlanması hedeflenmiştir. Bu kapsamda Bölüm 4.1'de aynı serbestlik derecesine sahip ana ve bağımlı robotlar için görev uzayı denetleyicisi tasarlanmıştır. Bölüm 4.2'de ise serbestlik dereceleri farklı olan ana ve bağımlı robotlardan oluşan telerobotik sistem için görev uzayında denetleyici geliştirilmiştir.

4.1 Pasif ayrıştırma yöntemi ile telerobotik uygulamalarının görev uzayında denetiminin sağlanması

4.1.1 Giriş

Çift yönlü telerobotik sistemi kullanıcı tarafından hareket ettirilen bir ana robot ve uzak bir ortamda buna bağımlı bir robottan oluşmaktadır. Uzaktan robotik sistemleri uzaktan ameliyat, uzay araştırmaları ve nükleer güç santralleri gibi uzaktan gerçekleştirilmeyi gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır [84].

Lee ve Li [85], [86], [87] kapalı döngü telerobotik sistemindeki ana ve bağımlı robotların dirençsizliğini sağlayan pasif ayrıştırma yöntemi geliştirmişlerdir. n serbestlik dereceli bir ana robot ve n serbestlik dereceli bir bağımlı robot içeren $2n$ serbestlik dereceli doğrusal olmayan telerobotik sisteminin dinamiği kenetlenmiş ve biçimlenmiş diye adlandırılan iki adet alt sistemlere ayrıştırılır. Biçimlenmiş alt sistem ana ve bağımlı robotların uyumlu çalışmasını temsil ederken kenetlenmiş alt sistem bütün sistemin tümünden hareketinin davranışını tanımlar. Pasif ayrıştırma yöntemi kullanıcı ve uzaktaki ortam arasındaki güvenli ve kararlı etkileşimi sağlamak için enerjik olarak pasif bir tarzda kenetlenmiş ve biçimlenmiş sistemlerin birbirinden ayrışmasını sağlamaktadır.

Bu çalışmada biz n serbestlik dereceli bir ana robot ve n serbestlik dereceli bir bağımlı robot içeren $2n$ serbestlik dereceli doğrusal olmayan telerobotik sisteminin görev uzayında kontrolü için pasif ayrıştırma yöntemini öneriyoruz. Önerilen pasif çift yönlü denetleyici telerobotik robot kollarının dinamik ve kinematik modellerinin tam olarak bilindiği ve ana ve bağımlı robot kollarının uç noktalarının ölçülebildiği üzerine geliştirilmiştir. Görev uzayında tasarladığımız denetleyici eklem uzayında yapılmış daha önceki çalışmalar olan [85], [86], [87]'den farklı olarak denetim hedefini görev uzayında gerçekleştirmektedir. Öte yandan kapalı döngü sistemin enerji pasifliği de korunmaktadır.

4.1.2 Telerobotik sistemin modeli

Telerobotik sistemindeki n serbestlik dereceli ana robotun dinamik modeli aşağıdaki gibi yazılır

$$M_1(\theta_1)\ddot{\theta}_1 + C_1(\theta_1, \dot{\theta}_1)\dot{\theta}_1 = \tau_1 + F_1 \quad (4.1)$$

burada $\theta_1(t), \dot{\theta}_1(t), \ddot{\theta}_1(t) \in \mathbb{R}^m$ ana robotun sırasıyla eklem pozisyonunu, hızını ve ivmesini temsil eder, $M_1(\theta_1) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ artı tanımlı simetrik eylemsizlik matrisi, $C_1(\theta_1, \dot{\theta}_1) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ merkezkaç Koriyolis matrisini, $\tau_1(t) \in \mathbb{R}^n$ tork giriş vektörünü ve $F_1(t) \in \mathbb{R}^n$ ise kullanıcı tarafından ana robota uygulanan kuvveti temsil eder.

n serbestlik dereceli bağımlı robotun dinamik modeli ise şu şekilde yazılır

$$M_2(\theta_2)\ddot{\theta}_2 + C_2(\theta_2, \dot{\theta}_2)\dot{\theta}_2 = \tau_2 + F_2 \quad (4.2)$$

burada $\theta_2(t), \dot{\theta}_2(t), \ddot{\theta}_2(t) \in \mathbb{R}^n$ bağımlı robotun sırasıyla eklem pozisyonunu, hızını ve ivmesini temsil eder, $M_2(\theta_2) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ artı tanımlı simetrik eylemsizlik matrisi, $C_2(\theta_2, \dot{\theta}_2) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ merkezkaç Koriyolis matrisini, $\tau_2(t) \in \mathbb{R}^n$ tork kontrol giriş vektörünü ve $F_2(t) \in \mathbb{R}^n$ ise uzaktaki bağımlı robotun çevresinden etkilendiği kuvveti temsil eder.

Ana ve bağımlı robotların kinematik modelleri ileri kinematik yöntemle şu şekilde yazılabilir

$$x_1 = f_1(\theta_1) \quad (4.3)$$

$$x_2 = f_2(\theta_2) \quad (4.4)$$

burada $x_1(t) \in \mathbb{R}^n$ ve $x_2(t) \in \mathbb{R}^n$ sırasıyla ana robotun ve bağımlı robotun görev uzayındaki po-

zisyonunu temsil eder ve $f_1, f_2 : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ ise sırasıyla ana ve bağımlı robotlar için ileri kinematik işlevlerini tanımlar. Denklem (4.3) ve (4.4)'nin zamana göre türevleri alındığında aşağıdaki hız kinematikleri elde edilir

$$\dot{x}_1 = J_1 \dot{\theta}_1 \quad (4.5)$$

$$\dot{x}_2 = J_2 \dot{\theta}_2 \quad (4.6)$$

burada $J_1(\theta_1) \triangleq \frac{\partial f_1}{\partial \theta_1} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ve $J_2(\theta_2) \triangleq \frac{\partial f_2}{\partial \theta_2} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ sırasıyla ana ve bağımlı robotlar için Jakobi-yen matrislerini tanımlar. Hız kinematik denklemleri bir kez daha türevi alındığında şu denklemleri elde ederiz

$$\ddot{x}_1 = \dot{J}_1 \dot{\theta}_1 + J_1 \ddot{\theta}_1 \quad (4.7)$$

$$\ddot{x}_2 = \dot{J}_2 \dot{\theta}_2 + J_2 \ddot{\theta}_2 \quad (4.8)$$

Yukarıdaki kinematik denklemlerden yararlanarak ana ve bağımlı robotlar için eklem ivmeleri şu şekilde elde edilir

$$\ddot{\theta}_1 = J_1^{-1} \ddot{x}_1 - \dot{J}_1 J_1^{-1} \dot{x}_1 \quad (4.9)$$

$$\ddot{\theta}_2 = J_2^{-1} \ddot{x}_2 - \dot{J}_2 J_2^{-1} \dot{x}_2. \quad (4.10)$$

Eklem hızı ve ivmesi denklemlerini ana ve bağımlı robotların dinamik modellerinde yerine koyarak görev uzayındaki dinamik modelleri şu şekilde oluşturulur

$$\bar{M}_1(x_1) \ddot{x}_1 + \bar{C}_1(x_1, \dot{x}_1) \dot{x}_1 = \bar{\tau}_1 + \bar{F}_1 \quad (4.11)$$

$$\bar{M}_2(x_2) \ddot{x}_2 + \bar{C}_2(x_2, \dot{x}_2) \dot{x}_2 = \bar{\tau}_2 + \bar{F}_2 \quad (4.12)$$

burada

$$\begin{aligned}
\bar{M}_1 &\triangleq J_1^{-T} M_1 J_1^{-1} \\
\bar{C}_1 &\triangleq -J_1^{-T} M_1 J_1^{-1} \dot{J}_1 J_1^{-1} + J_1^{-T} C_1 J_1^{-1} \\
\bar{\tau}_1 &\triangleq J_1^{-T} \tau_1 \\
\bar{F}_1 &\triangleq J_1^{-T} F_1 \\
\bar{M}_2 &\triangleq J_2^{-T} M_2 J_2^{-1} \\
\bar{C}_2 &\triangleq -J_2^{-T} M_2 J_2^{-1} \dot{J}_2 J_2^{-1} + J_2^{-T} C_2 J_2^{-1} \\
\bar{\tau}_2 &\triangleq J_2^{-T} \tau_2 \\
\bar{F}_2 &\triangleq J_2^{-T} F_2.
\end{aligned}$$

4.1.3 Telerobotik sistemin kenetlenmiş ve biçimlenmiş alt sistemlerinin modelleri

n serbestlik dereceli ana robotun görev uzayındaki dinamik modeli ile n serbestlik dereceli bağımlı robotun görev uzayındaki dinamik modeli birleştirilerek $2n$ serbestlik dereceli doğrusal olmayan telerobotik sistem oluşturulur ve görev uzayındaki dinamik model denklemi şu şekilde yazılır

$$\begin{bmatrix} \bar{M}_L & 0_{n \times n} \\ 0_{n \times n} & \bar{M}_E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_L \\ \ddot{x}_E \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{C}_L & \bar{C}_{LE} \\ \bar{C}_{EL} & \bar{C}_E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_L \\ \dot{x}_E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_L \\ \tau_E \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_L \\ F_E \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

burada $\bar{M}_L, \bar{M}_E, \bar{C}_L, \bar{C}_{LE}, \bar{C}_{EL}, \bar{C}_E \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ve $\tau_L, \tau_E, F_L, F_E \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ kenetlenmiş (L) ve biçimlenmiş (E) alt sistemlerinin dinamik model terimlerini temsil etmektedir. Oluşturulan $2n$ serbestlik dereceli doğrusal olmayan telerobotik sisteminin pasifliğini sağlamak üzere kenetlenmiş ve biçimlenmiş alt sistemlere ayrıştırmak için pasif ayrıştırma matrisi $S \in \mathbb{R}^{2n \times 2n}$ şu şekilde tanımlanır

$$S \triangleq \begin{bmatrix} (I_n - \bar{\phi}) J_1 & \bar{\phi} J_2 \\ J_1 & -J_2 \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

burada $\bar{\phi}(x_1, x_2) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ şu şekilde tanımlanır

$$\bar{\phi} \triangleq (\bar{M}_2^{-1} \bar{M}_1 + I_n)^{-1}. \quad (4.15)$$

Önemle belirtmek isteriz ki (4.14) ve (4.15) ile verilen tasarım tarifimizca geliştirilmiş olup bilimsel yazında telerobotik sistemlerin görev uzayında denetimi konusunda yenidir.

İleriki dönüşüm ve ayrıştırma yöntemlerinde kullanılacak kare olmayan $S \in \mathbb{R}^{2n \times 2n}$ matrisinin tersi şu şekilde tanımlanır

$$S^{-1} = \begin{bmatrix} J_1^{-1} & J_1^{-1}\bar{\phi} \\ J_2^{-1} & J_2^{-1}(\bar{\phi} - I_n) \end{bmatrix}. \quad (4.16)$$

Görev uzayında birleştirilmiş olan $2n$ serbestlik dereceli sistemin kenetlenmiş ve biçimlenmiş alt sistemlerine ayrıştırmak için şu denklem tanımlanır

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_L \\ \dot{x}_E \end{bmatrix} = S \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

burada \dot{x}_L ve \dot{x}_E sırasıyla kenetlenmiş ve biçimlenmiş alt sistemlerin görev uzayındaki hızlarını temsil eder. Pasif ayrıştırma matrisinin ve sözde tersinin yardımıyla $2n$ serbestlik dereceli doğrusal olmayan telerobotik sisteminin dinamik model terimleri şu şekilde elde edilir

$$\begin{bmatrix} \bar{M}_L & 0_{n \times n} \\ 0_{n \times n} & \bar{M}_E \end{bmatrix} \triangleq S^{-T} \begin{bmatrix} M_1 & 0_{n \times n} \\ 0_{n \times n} & M_2 \end{bmatrix} S^{-1} \quad (4.18)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{C}_L & \bar{C}_{LE} \\ \bar{C}_{EL} & \bar{C}_E \end{bmatrix} \triangleq S^{-T} \begin{bmatrix} C_1 & 0_{n \times n} \\ 0_{n \times n} & C_2 \end{bmatrix} S^{-1} + S^{-T} \begin{bmatrix} M_1 & 0_{n \times n} \\ 0_{n \times n} & M_2 \end{bmatrix} \dot{S}^{-1} \quad (4.19)$$

$$\begin{bmatrix} F_L \\ F_E \end{bmatrix} \triangleq S^{-T} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

$$\begin{bmatrix} \tau_L \\ \tau_E \end{bmatrix} \triangleq S^{-T} \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix}. \quad (4.21)$$

Yukarıdaki görev uzayında pasif ayrıştırılmış denklemlerden n serbestlik dereceli kenetlenmiş ve n serbestlik dereceli biçimlenmiş alt sistemler için alttaki dinamik denklemler yazılır

$$\bar{M}_L \ddot{x}_L + \bar{C}_L \dot{x}_L + \bar{C}_{LE} \dot{x}_E = \tau_L + F_L \quad (4.22)$$

$$\bar{M}_E \ddot{x}_E + \bar{C}_E \dot{x}_E + \bar{C}_{EL} \dot{x}_L = \tau_E + F_E. \quad (4.23)$$

4.1.4 Denetleyici tasarımı

Biçimlenmiş sistem için elde edilen (4.23) ile verilen dinamik denkleme göre ana ve bağımlı robot arasındaki uyumlu etkileşimi sağlamak için alttaki denetleyici önerilmektedir

$$\tau_E = \bar{C}_{EL}\dot{x}_L - K_v\dot{x}_E - K_p x_E - F_E \quad (4.24)$$

burada $K_v, K_p \in \mathbb{R}^{n \times n}$ artı tanımlı köşegen sabit kazanç matrisleridir. (4.24)'ü (4.23)'te yerine koyarsak alttaki kapalı döngü biçimlenmiş sistem dinamiği elde edilir

$$\bar{M}_E\ddot{x}_E + \bar{C}_E\dot{x}_E + K_v\dot{x}_E + K_p x_E = 0_{n \times 1} \quad (4.25)$$

böylece biçimlenmiş sistem için ilk kontrol amacımızı şu şekilde elde etmiş oluruz

$$x_E = x_1 - x_2 \rightarrow 0 \Leftrightarrow x_2 \rightarrow x_1 \quad (4.26)$$

böylece bağımlı robot ana robotun hareketini takip etmesine ve uyumlu bir etkileşim içinde olduklarına emin oluruz.

Diğer bir denetleyici de tüm $2n$ serbestlik dereceli kapalı döngü telerobotik sisteminin pasifliğini sağlamak için kenetlenmiş sistem modeli kullanılarak şu şekilde tasarlanır

$$\tau_L = \bar{C}_{LE}\dot{x}_E. \quad (4.27)$$

(4.27)'yi (4.22)'te yerine konulduğunda ikinci swnwtim amacımıza şu şekilde ulaşabiliriz

$$\bar{M}_L\ddot{x}_L + \bar{C}_L\dot{x}_L = F_L \quad (4.28)$$

böylece ana ve bağımlı robotlardan oluşan $2n$ serbestlik dereceli kapalı döngü tüm sistemin hareketi kullanıcı ve çevresel etkilerin oluşturduğu kuvvetlerin birleşimini takip eder.

4.1.5 Benzetim sonuçları

Önermiş olduğumuz telerobotik sistemleri için görev uzayında pasif ayrıştırma yönteminin başarımını göstermek için benzetim çalışması yapılmıştır. Benzetim çalışmasında iki adet düzlemde hareket

eden 2 serbestlik dereceli ana ve bağımlı robotları temsilen her ikisi içinde aşağıdaki aynı dinamik model kullanılmıştır

$$M_{1,2} = \begin{bmatrix} p_2 + p_3 + 2p_1s_2 & p_2 + p_1s_2 \\ p_2 + p_1s_2 & p_2 \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

$$C_{1,2} = \begin{bmatrix} p_1s_2\dot{\theta}_2 & p_1s_2(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \\ -p_1s_2\dot{\theta}_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

burada $M_{1,2}(\theta)$ ana ve bağımlı robotlar için eylemsizlik matrisini, $C_{1,2}(\theta, \dot{\theta})$ ana ve bağımlı robotlar için merkezkaç Koriyolis matrisini temsil eder ve model parametre değerleri şu şekilde seçilmiştir $p_1 = 0.36$, $p_2 = 0.43$, $p_3 = 0.93$, $p_4 = 1$ ve $p_5 = 1$. Kol uzunlukları $l_1 = l_2 = 0.6[m]$ 'dir. Kol ağırlıkları $m_1 = 3.6[kg]$ ve $m_2 = 2[kg]$ 'dir. Kolların ağırlık noktası her bir kol için orta noktası olduğu varsayılır. Kullanıcının ana robota etki ettiği kuvvet şu şekilde seçilmiştir

$$F_1(t) = \begin{bmatrix} -0.01 \sin(0.1t) - 0.01 \cos(0.1t) \\ -0.01 \cos(0.1t) + 0.01 \sin(0.1t) \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

ve çevresel etkilerin bağımlı robota uyguladığı kuvvet şu şekilde seçilmiştir

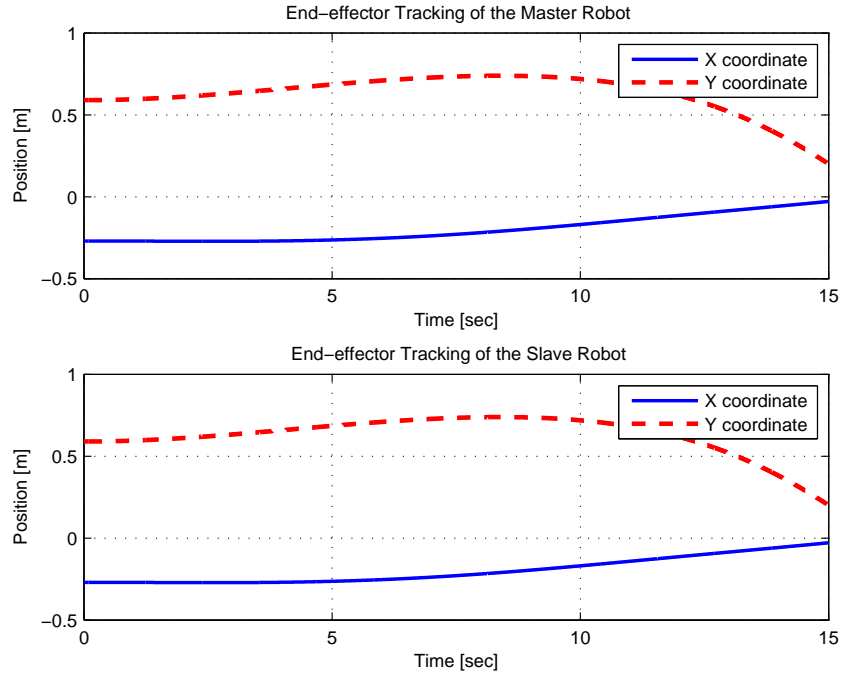
$$F_2(t) = \begin{bmatrix} -0.001 \sin(0.1t) - 0.001 \cos(0.1t) \\ -0.001 \cos(0.1t) + 0.001 \sin(0.1t) \end{bmatrix} \quad (4.32)$$

Benzetim çalışmasında örnekleme hızı 1msec olarak seçilmiştir. Kontrol kazançları $K_v = 25I_2$ ve $K_p = 35I_2$ olarak seçilmiştir. Ana ve bağımlı robotların başlangıç noktaları aynı olarak $\theta_1(0) = \theta_2(0) = [1.0; 2.0]$ radyan olarak seçilmiştir.

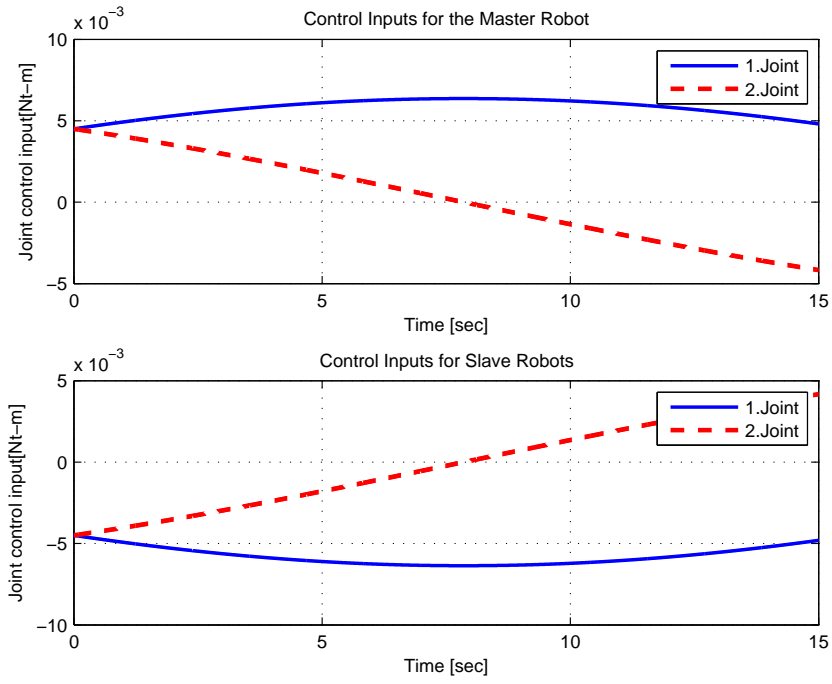
Benzetim çalışmalarının sonuçları aşağıdaki şekillerde görülebilir. Şekil 4.1 ana ve bağımlı robotların uç noktalarının düzlemde hareketini gösterir. Şekil 4.2 ana ve bağımlı robota uygulanan tork girişlerini gösterir. Şekil 4.3 kenetlenmiş ve biçimlenmiş alt sistemlerin pozisyon bilgilerini gösterir. Bu sonuçlardan açıkça görüldüğü üzere bağımlı robotun ana robotun hareketini takip ettiği görülmektedir.

4.1.6 Sonuçlar

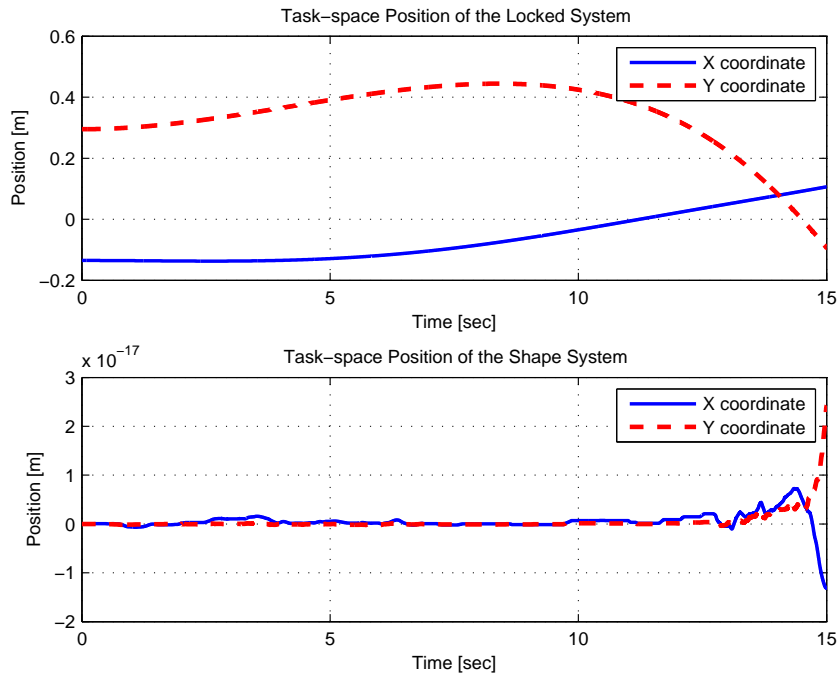
Bilimsel yazında telerobotik sistemlerin görev uzayında denetlenmesi az çalışılmış açık problemler-
dendir. Bu alışmamızda artık olmayan ana robot ile artık olmayan bağımlı robottan oluşan telero-
botik sistem için görev uzayında denetleyici tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan denetleyicinin
başarımı benzetim çalışmaları ile gösterilmiştir.



şekil 4.1: Ana ve bağımlı robotların uç noktalarının hareketleri



Şekil 4.2: Ana ve bağımlı robotlara uygulanan tork



Şekil 4.3: Kenetlenmiş ve biçimlenmiş sistemlerin hareketleri

4.2 Pasif ayrıştırma yöntemi ile artık eklemliler telerobotik uygulamalarının görev uzayında denetiminin sağlanması

4.2.1 Giriş

Ana ve bağımlı robotlar arasındaki eklem farklılıkları olmayan pasif ayrıştırma yönteminin görev uzayında sunulduğu önceki çalışmanın devamı olarak yaptığımız bu çalışmada m serbestlik dereceli artık eklemi olmayan bir ana robot ve n serbestlik dereceli artık eklemliler bir bağımlı robot içeren $n + m$ serbestlik dereceli doğrusal olmayan artık eklemliler telerobotik sisteminin görev uzayında kontrolü için pasif ayrıştırma yöntemi öneriyoruz. Pasif ayrıştırma yöntemine göre görev uzayında tasarladığımız denetleyici ile birlikte artık eklemliler bağımlı robot için ikincil bir görev denetleyici tasarlanabilmektedir. Önerilen bu denetleyiciler ana ve bağımlı robotların uyumlu etkileşimini sağlar, kapalı döngü telerobotik sisteminin tüm hareketinin pasifliği sağlar ve ayrıca bağımlı robotun sıfır uzayından yararlanarak ikincil görev denetleyicisi tasarlanabilmesine olanak sağlamaktadır.

4.2.2 Artık eklemliler telerobotik sistemin modeli

Eklem farklılıkları olan telerobotik sistemi için tasarladığımız görev uzayındaki pasif ayrıştırma yöntemi için öncelikle artık eklemsiz m serbestlik dereceli bir ana robot ve n serbestlik dereceli artık eklemliler bir bağımlı robottan oluşan $n + m$ serbestlik dereceli doğrusal olmayan artık eklemliler telerobotik sistemi görev uzayında oluşturulur ve dinamik modeli çıkartılır. Artık eklemsiz m serbestlik dereceli bir ana robotun dinamik modeli şu şekilde yazılır

$$M_1(\theta_1)\ddot{\theta}_1 + C_1(\theta_1, \dot{\theta}_1)\dot{\theta}_1 = \tau_1 + F_1 \quad (4.33)$$

burada $\theta_1(t), \dot{\theta}_1(t), \ddot{\theta}_1(t) \in \mathbb{R}^m$ ana robotun sırasıyla eklem pozisyonunu, hızını ve ivmesini temsil eder, $M_1(\theta_1) \in \mathbb{R}^{m \times m}$ artı tanımlı simetrik eylemsizlik matrisi, $C_1(\theta_1, \dot{\theta}_1) \in \mathbb{R}^{m \times m}$ merkezkaç Koriolis matrisini, $\tau_1(t) \in \mathbb{R}^m$ tork giriş vektörünü ve $F_1(t) \in \mathbb{R}^m$ ise kullanıcı tarafından ana robota uygulanan kuvveti temsil eder.

Artık eklemliler n serbestlik dereceli bir bağımlı robotun dinamik modeli şu şekilde yazılır

$$M_2(\theta_2)\ddot{\theta}_2 + C_2(\theta_2, \dot{\theta}_2)\dot{\theta}_2 = \tau_2 + F_2 \quad (4.34)$$

burada $\theta_2(t), \dot{\theta}_2(t), \ddot{\theta}_2(t) \in \mathbb{R}^n$ bağımlı robotun sırasıyla eklem pozisyonunu, hızını ve ivmesini temsil eder, $M_2(\theta_2) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ artı tanımlı simetrik eylemsizlik matrisi, $C_2(\theta_2, \dot{\theta}_2) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ merkezkaç Koriyolis matrisini, $\tau_2(t) \in \mathbb{R}^n$ tork giriş vektörünü ve $F_2(t) \in \mathbb{R}^n$ ise uzaktaki bağımlı robotun çevresinden etkilendiği kuvveti temsil eder.

Ana ve bağımlı robotların kinematik modelleri ileri kinematik yöntemle şu şekilde yazılır

$$x_1 = f_1(\theta_1) \quad (4.35)$$

$$x_2 = f_2(\theta_2) \quad (4.36)$$

burada $x_1(t) \in \mathbb{R}^m$ ve $x_2(t) \in \mathbb{R}^m$ sırasıyla ana robotun ve bağımlı robotun görev uzayındaki pozisyonunu temsil eder ve $f_1, f_2 : \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^m$ ise sırasıyla ana ve bağımlı robotlar için ileri kinematik fonksiyonlarını tanımlar. (4.35) ve (4.36)'nin zamana göre türevleri alındığında aşağıdaki hız kinematikleri elde edilir

$$\dot{x}_1 = J_1 \dot{\theta}_1 \quad (4.37)$$

$$\dot{x}_2 = J_2 \dot{\theta}_2 \quad (4.38)$$

burada $J_1(\theta_1) \triangleq \frac{\partial f_1}{\partial \theta_1} \in \mathbb{R}^{m \times m}$ ve $J_2(\theta_2) \triangleq \frac{\partial f_2}{\partial \theta_2} \in \mathbb{R}^{m \times n}$ sırasıyla ana ve bağımlı robotlar için Jacobian matrislerini tanımlar. Hız kinematik denklemleri bir kez daha türevi alındığında şu denklemleri elde ederiz

$$\ddot{x}_1 = \dot{J}_1 \dot{\theta}_1 + J_1 \ddot{\theta}_1 \quad (4.39)$$

$$\ddot{x}_2 = \dot{J}_2 \dot{\theta}_2 + J_2 \ddot{\theta}_2 \quad (4.40)$$

burada eklem hızları denklemleri ana robot için Jacobian matrisinin tersiyle $J_1^{-1} \in \mathbb{R}^{m \times m}$ ve bağımlı robot için de Jacobian matrisinin sözde tersiyle $J_2^+ \in \mathbb{R}^{n \times m}$ şu şekilde yazılır

$$\dot{\theta}_1 = J_1^{-1} \dot{x}_1 \quad (4.41)$$

$$\dot{\theta}_2 = J_2^+ \dot{x}_2 \quad (4.42)$$

Artık eklemli bağımlı robotların eklem sayısının boyutu ile görev uzayı boyutu arasındaki farklılıktan dolayı Jacobian matrisi kare olmadığı için normal şekilde tersi alınamamaktadır. Bu yüzden bağımlı

robot için Jacobian matrisinin sözde tersi şu şekilde tanımlanmaktadır

$$J_2^+ \triangleq J_2^T (J_2 J_2^T)^{-1} \quad (4.43)$$

Yukarıdaki kinematik denklemlerden yararlanarak ana ve bağımlı robotlar için eklem ivmeleri şu şekilde elde edilir

$$\ddot{\theta}_1 = J_1^{-1} \ddot{x}_1 - J_1^{-1} \dot{J}_1 J_1^{-1} \dot{x}_1 \quad (4.44)$$

$$\ddot{\theta}_2 = J_2^+ \ddot{x}_2 - J_2^+ \dot{J}_2 J_2^+ \dot{x}_2 \quad (4.45)$$

Eklem hızı ve ivmesi denklemlerini ana ve bağımlı robotların dinamik modellerinde yerine koyarak görev uzayındaki dinamik modelleri şu şekilde oluşturulur

$$\bar{M}_1(x_1) \ddot{x}_1 + \bar{C}_1(x_1, \dot{x}_1) \dot{x}_1 = \bar{\tau}_1 + \bar{F}_1 \quad (4.46)$$

$$\bar{M}_2(x_2) \ddot{x}_2 + \bar{C}_2(x_2, \dot{x}_2) \dot{x}_2 = \bar{\tau}_2 + \bar{F}_2 \quad (4.47)$$

burada

$$\bar{M}_1 \triangleq J_1^{-T} M_1 J_1^{-1}$$

$$\bar{C}_1 \triangleq -J_1^{-T} M_1 J_1^{-1} \dot{J}_1 J_1^{-1} + J_1^{-T} C_1 J_1^{-1}$$

$$\bar{\tau}_1 \triangleq J_1^{-T} \tau_1$$

$$\bar{F}_1 \triangleq J_1^{-T} F_1$$

$$\bar{M}_2 \triangleq J_2^{+T} M_2 J_2^+$$

$$\bar{C}_2 \triangleq -J_2^{+T} M_2 J_2^+ \dot{J}_2 J_2^+ + J_2^{+T} C_2 J_2^+$$

$$\bar{\tau}_2 \triangleq J_2^{+T} \tau_2$$

$$\bar{F}_2 \triangleq J_2^{+T} F_2.$$

4.2.3 Artık eklemli telerobotik sistemin kenetlenmiş ve biçimlenmiş alt sistemlerinin modelleri

m serbestlik dereceli artık eklemi olmayan ana robotun görev uzayındaki dinamik modeli ve n serbestlik dereceli artık eklemli bağımlı robotun görev uzayındaki dinamik modeli birleştirilerek $n + m$ serbestlik dereceli doğrusal olmayan artık eklemli telerobotik sistemi oluşturulur ve görev uzayındaki dinamik model denklemi şu şekilde yazılır

$$\begin{bmatrix} \bar{M}_L & 0_{m \times m} \\ 0_{m \times m} & \bar{M}_E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_L \\ \ddot{x}_E \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{C}_L & \bar{C}_{LE} \\ \bar{C}_{EL} & \bar{C}_E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_L \\ \dot{x}_E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_L \\ \tau_E \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_L \\ F_E \end{bmatrix} \quad (4.48)$$

burada $\bar{M}_L, \bar{M}_E, \bar{C}_L, \bar{C}_{LE}, \bar{C}_{EL}, \bar{C}_E \in \mathbb{R}^{m \times m}$ ve $\tau_L, \tau_E, F_L, F_E \in \mathbb{R}^{m \times 1}$ kenetlenmiş (L) ve biçimlenmiş (E) alt sistemlerinin dinamik model parametrelerini ifade etmektedir. Oluşturulan $n + m$ serbestlik dereceli doğrusal olmayan artık eklemli telerobotik sisteminin pasifliğini sağlamak üzere kenetlenmiş ve biçimlenmiş alt sistemlere ayırtırmak için pasif ayırtırma matrisi $S \in \mathbb{R}^{2m \times (n+m)}$ şu şekilde tanımlanır

$$S \triangleq \begin{bmatrix} (I_m - \bar{\phi}) J_1 & \bar{\phi} J_2 \\ J_1 & -J_2 \end{bmatrix} \quad (4.49)$$

burada $\bar{\phi}(x_1, x_2) \in \mathbb{R}^{m \times m}$ şu şekilde tanımlanır

$$\bar{\phi} \triangleq (\bar{M}_2^{-1} \bar{M}_1 + I_m)^{-1}. \quad (4.50)$$

Önemle belirtmek isteriz ki (4.49) ve (4.50) ile tasarlanan ayırtırma matrisi hem Bölüm 4.1'dekinden hem de bilimsel yazındakilerden [85], [86], [87] oldukça farklıdır. İleriki dönüşüm ve ayırtırma yöntemlerinde kullanılacak kare olmayan $S \in \mathbb{R}^{2m \times (n+m)}$ matrisinin sözde tersi şu şekilde tanımlanır

$$S^+ = S^T (SS^T)^{-1}. \quad (4.51)$$

Görev uzayında birleştirilmiş olan $n + m$ serbestlik dereceli sistemin kenetlenmiş ve biçimlenmiş alt sistemlerine ayırtırmak için şu denklem tanımlanır

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_L \\ \dot{x}_E \end{bmatrix} = S \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} \quad (4.52)$$

burada \dot{x}_L ve \dot{x}_E sırasıyla kenetlenmiş ve biçimlenmiş alt sistemlerin görev uzayındaki hızlarını temsil eder. Pasif ayrıştırma matrisinin ve sözde tersinin yardımıyla $n + m$ serbestlik dereceli doğrusal olmayan artık eklemlili telerobotik sisteminin dinamik model parametreleri şu şekilde elde edilir

$$\begin{bmatrix} \bar{M}_L & 0_{m \times m} \\ 0_{m \times m} & \bar{M}_E \end{bmatrix} \triangleq S^{+T} \begin{bmatrix} M_1 & 0_{m \times n} \\ 0_{n \times m} & M_2 \end{bmatrix} S^+ \quad (4.53)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{C}_L & \bar{C}_{LE} \\ \bar{C}_{EL} & \bar{C}_E \end{bmatrix} \triangleq S^{+T} \begin{bmatrix} C_1 & 0_{m \times n} \\ 0_{n \times m} & C_2 \end{bmatrix} S^+ + S^{+T} \begin{bmatrix} M_1 & 0_{m \times n} \\ 0_{n \times m} & M_2 \end{bmatrix} \dot{S}^+ \quad (4.54)$$

$$\begin{bmatrix} F_L \\ F_E \end{bmatrix} \triangleq S^{+T} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} \quad (4.55)$$

$$\begin{bmatrix} \tau_L \\ \tau_E \end{bmatrix} \triangleq S^{+T} \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} \quad (4.56)$$

Yukarıdaki görev uzayında pasif ayrıştırılmış denklemlerden m serbestlik dereceli kenetlenmiş ve m serbestlik dereceli biçimlenmiş alt sistemler için şu iki dinamik denklem yazılır

$$\bar{M}_L \ddot{x}_L + \bar{C}_L \dot{x}_L + \bar{C}_{LE} \dot{x}_E = \tau_L + F_L \quad (4.57)$$

$$\bar{M}_E \ddot{x}_E + \bar{C}_E \dot{x}_E + \bar{C}_{EL} \dot{x}_L = \tau_E + F_E. \quad (4.58)$$

4.2.4 Denetleyici tasarımı

Biçimlenmiş sistem için elde edilen denkleme göre ana ve bağımlı robot arasındaki uyumlu etkileşimi sağlamak için şu şekilde bir denetleyici tasarlanır

$$\tau_E = \bar{C}_{EL} \dot{x}_L - K_v \dot{x}_E - K_p x_E - F_E \quad (4.59)$$

burada $K_v, K_p \in \mathbb{R}^{m \times m}$ artı tanımlı köşegen sabit kazanç matrisleridir. (4.59)'i (4.58)'de yerine koyarsak şu şekilde kapalı döngü biçimlenmiş sistem dinamiği elde edilir

$$\bar{M}_E \ddot{x}_E + \bar{C}_E \dot{x}_E + K_v \dot{x}_E + K_p x_E = 0_{m \times 1} \quad (4.60)$$

böylece biçimlenmiş sistem için ilk kontrol amacımızı şu şekilde elde etmiş oluruz

$$x_E = x_1 - x_2 \rightarrow 0 \Leftrightarrow x_2 \rightarrow x_1 \quad (4.61)$$

böylece bağımlı robot ana robotun hareketini takip etmesine ve uyumlu bir etkileşim içinde olduklarına emin oluruz.

Diğer bir denetleyici de tüm $n + m$ serbestlik dereceli kapalı döngü telerobotik sisteminin pasifliğini sağlamak için kenetlenmiş sistem modeli kullanılarak şu şekilde tasarlanır

$$\tau_L = \bar{C}_{LE}\dot{x}_E. \quad (4.62)$$

(4.62)'i (4.57)'de yerine konulduğunda ikinci kontrol amacımıza şu şekilde ulaşılr

$$\bar{M}_L\ddot{x}_L + \bar{C}_L\dot{x}_L = F_L \quad (4.63)$$

böylece ana ve bağımlı robotlardan oluşan $n + m$ serbestlik dereceli kapalı döngü tüm sistemin hareketi kullanıcı ve çevresel etkilerin oluşturduğu kuvvetlerin birleşimini takip eder.

4.2.5 Benzetim sonuçları

Önermiş olduğumuz artık eklemli telerobotik sistemleri için görev uzayında pasif ayrıştırma yönteminin performansını göstermek için bir benzetim çalışması yapılmıştır. Bu benzetim çalışmasında kullanılan düzlemde hareket eden 2 serbestlik dereceli ana robotun dinamik modeli şu şekildedir

$$M_1 = \begin{bmatrix} p_2 + p_3 + 2p_1s_2 & p_2 + p_1s_2 \\ p_2 + p_1s_2 & p_2 \end{bmatrix} \quad (4.64)$$

$$C_1 = \begin{bmatrix} p_1s_2\dot{\theta}_2 & p_1s_2(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \\ -p_1s_2\dot{\theta}_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.65)$$

burada $M_1(\theta)$ ana robot için eylemsizlik matrisini, $C_1(\theta, \dot{\theta})$ ana robot için merkezkaç Koriyolis matrisini temsil eder ve model parametre değerleri şu şekilde seçilmiştir $p_1 = 0.36$, $p_2 = 0.43$, $p_3 = 0.93$, $p_4 = 1$ ve $p_5 = 1$. Kol uzunlukları $l_1 = l_2 = 0.6[m]$ 'dir. Kol ağırlıkları $m_1 = 3.6[kg]$ ve $m_2 = 2[kg]$ 'dir. Kolların ağırlık noktası her bir kol için orta noktası olduğu varsayılır. Kullanıcının ana robota etki

ettiği kuvvet şu şekilde seçilmiştir

$$F_1(t) = \begin{bmatrix} -0.01 \sin(0.1t) - 0.01 \cos(0.1t) \\ -0.01 \cos(0.1t) + 0.01 \sin(0.1t) \end{bmatrix} \quad (4.66)$$

Bu benzetim çalışmasında kullanılan düzlemde hareket eden 3 serbestlik dereceli artık eklemlili bağımlı robotun dinamik modeli şu şekildedir

$$M_2(\theta) = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{12} & m_{22} & m_{23} \\ m_{13} & m_{23} & m_{33} \end{bmatrix} \quad (4.67)$$

$$V_2(\theta, \dot{\theta}) = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & v_{13} \\ v_{21} & v_{22} & v_{23} \\ v_{31} & v_{32} & v_{33} \end{bmatrix} \quad (4.68)$$

burada M_2 bağımlı robot için eylemsizlik matrisini ve V_2 bağımlı robot için merkezkaç Koriyolis matrisini aşağıdaki terimlerle temsil ederler

$$\begin{aligned} m_{11} &= \beta_1 + 2p_1c_2 + 2p_2c_{23} + 2p_3c_3 & m_{22} &= \beta_2 + 2p_3c_3 \\ m_{12} &= \beta_2 + p_1c_2 + p_2c_{23} + 2p_3c_3 & m_{23} &= \beta_2 + p_3c_3 \\ m_{13} &= \beta_2 + p_2c_{23} + p_3c_3 & m_{33} &= \beta_3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} v_{11} &= -(p_1s_2 + p_2s_{23})\dot{\theta}_2 - (p_2s_{23} + p_3s_3)\dot{\theta}_3 \\ v_{12} &= -(p_1s_2 + p_2s_{23})(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) - (p_2s_{23} + 2p_3s_3)\dot{\theta}_3 \\ v_{13} &= -(p_2s_{23} + p_3s_3)(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_3) - p_2s_{23}\dot{\theta}_2 \\ v_{21} &= (p_1s_2 + p_2s_{23})\dot{\theta}_1 \\ v_{22} &= -p_3s_3\dot{\theta}_3 \\ v_{23} &= -p_3s_3(2\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) \\ v_{31} &= (p_2s_{23} + p_3s_3)\dot{\theta}_1 \\ v_{32} &= p_3s_3(2\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \\ v_{33} &= 0 \end{aligned}$$

burada $\beta_1, \beta_2, \beta_3, p_1, p_2, p_3$ kütle parametrelerini ifade eder. Bağımlı robotun kol ağırlıkları sırasıyla 3.60Kg, 2.60Kg and 2.00Kg'dır ve kol uzunlukları ise $l_1 = 0.4m, l_2 = 0.36m, l_3 = 0.30m$ 'dir ve her

bir kolun ağırlık merkezi kolların orta noktası olduğu varsayılır. Çevresel etkilerin bağımlı robota uyguladığı kuvvet şu şekilde seçilmiştir

$$F_2(t) = \begin{bmatrix} -0.001 \sin(0.1t) - 0.001 \cos(0.1t) \\ -0.001 \sin(0.1t) + 0.001 \cos(0.1t) \\ 0.001 \sin(0.1t) - 0.001 \cos(0.1t) \end{bmatrix} \quad (4.69)$$

Benzetim çalışmasında örnekleme hızı 1msec olarak seçilmiştir. Kontrol kazançları $K_v = 2I_2$ ve $K_p = 3I_2$ olarak seçilmiştir. Ana robotun başlangıç noktası $\theta_1(0) = \theta_2(0) = [0.5; 1.0]$ radyan ve bağımlı robotun başlangıç noktası $\theta_1(0) = \theta_2(0) = [0.1; 0.5; 1.5]$ radyan olarak seçilmiştir.

Benzetim çalışmalarının sonuçları aşağıdaki şekillerde görülmektedir. Şekil 4.4 ana ve bağımlı robotların uç noktalarının düzlemde hareketini gösterir. Şekil 4.5 ana ve bağımlı robota uygulanan tork girişlerini gösterir. Şekil 4.6 kenetlenmiş ve biçimlenmiş alt sistemlerin pozisyon bilgilerini gösterir. Bu sonuçlardan açıkça görüldüğü üzere bağımlı robotun ana robotun hareketini takip ettiği görülmektedir.

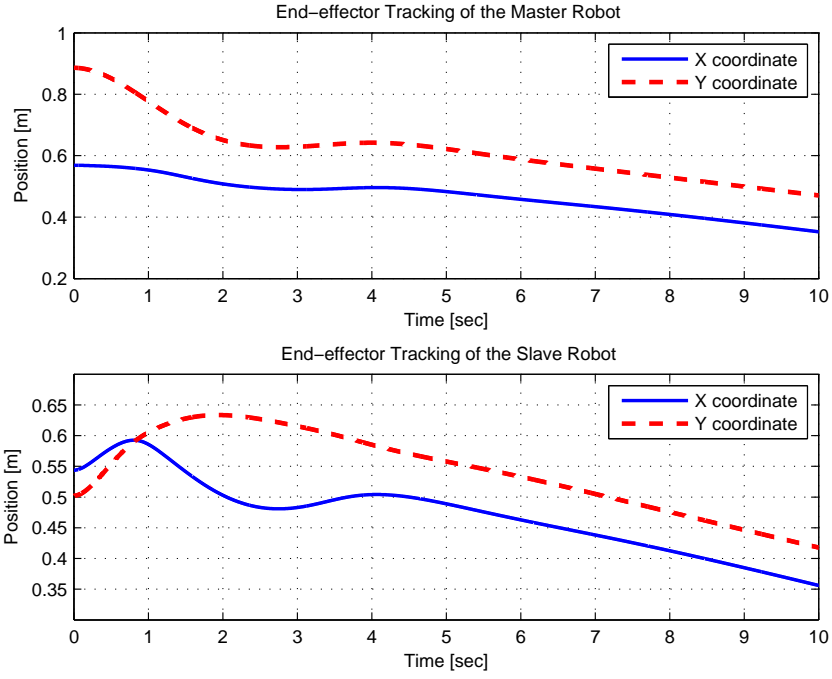
4.2.6 Sonuçlar

Bilimsel yazında telerobotik sistemlerin görev uzayında denetlenmesi az çalışılmış açık problemlerden birisi olup önceki bölümde bu probleme hem ana robotun hem de bağımlı robotun artık olmadığı durum gözönünde bulundurularak bir çözüm önerilmiştir. Bu bölümde ise bir önceki çalışmadan farklı olarak artık olmayan ana robot ile artık bağımlı robottan oluşan telerobotik sistem için görev uzayında denetleyici tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan denetleyici sadece görev uzayında takibi gerçekleştirmekle kalmayıp istenildiği takdirde tasarlanabilecek bir ikincil görev hedefini de başarabilecektir. Tasarlanan denetleyicinin başarımı benzetim çalışmaları ile gösterilmiştir.

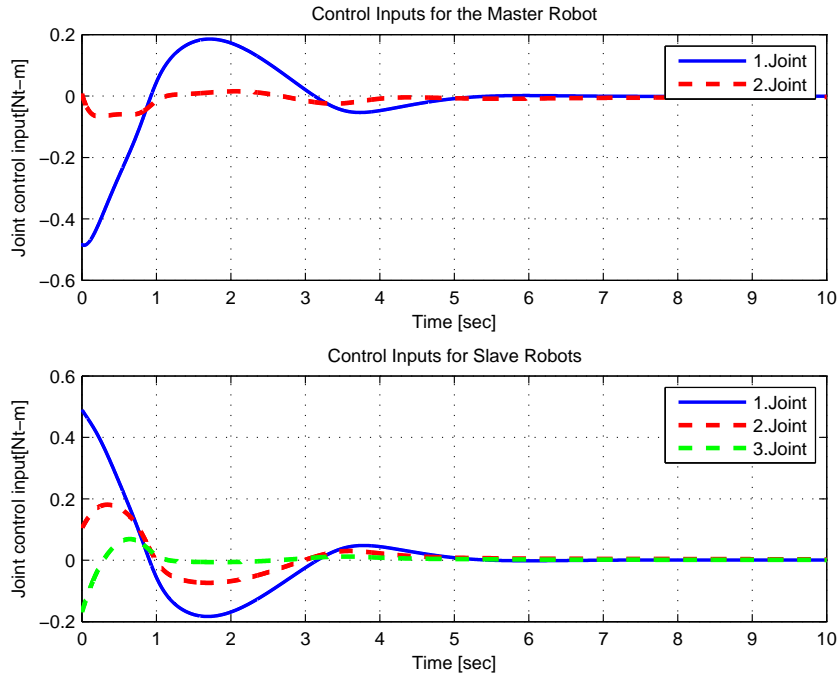
4.3 Sonuçlar

Bu bölümde elde edilen sonuçların bir kısmı altta detayları verilen uluslararası katılımlı ulusal konferansta sunulmuştur:

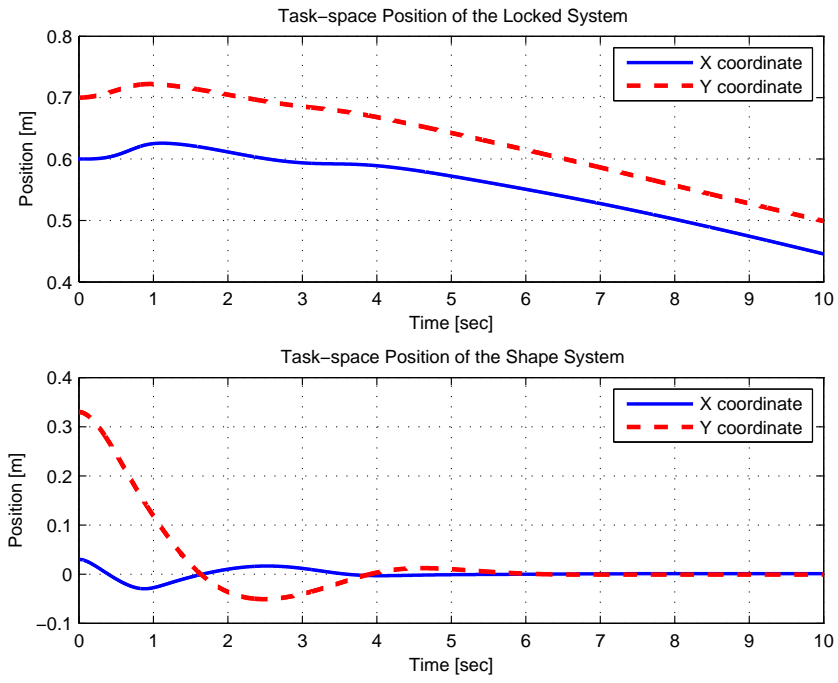
- E. Tatlicioglu & K. Cetin, "Passive decomposition: A task-space control approach," Proc. TrC IFToMM Symposium on Theory of Machines and Mechanisms, 615-618, Izmir, Turkey, 2015.



Şekil 4.4: Ana ve bağımlı robotların uç noktalarının hareketleri



Şekil 4.5: Ana ve bağımlı robotlara uygulanan tork



Şekil 4.6: Kenetlenmiş ve biçimlenmiş sistemlerin hareketleri

5. Model aracılı denetim

Proje kapsamında farklı kinematik modelleri olan ana ve bağımlı robotlardan oluşan telerobotik sistemlerin iletişim hatlarındaki gecikmelere maruz kaldıkları durumlar da incelenmiştir. Bu kapsamda model aracılı denetim yöntemi tercih edilmiştir. Bu kapsamda Bölüm 5.1’de ana robotun Phantom omni haptik cihaz ve bağımlı robotun ise sanal ortamda Scara robot modeli olduğu durumda deneysel çalışmalarla model aracılı denetimin başarımı gösterilmiştir. Bölüm 5.2’de model aracılı denetim yöntemi ile doğrudan teleoperasyon yönteminin başarımları ana robotu HIPHAD haptik cihazı ve bağımlı robotu sanal mobil robot olan telerobotik sisteminde kıyaslanmıştır. Bölüm 5.3’de ise model aracılı denetim yöntemi çoklu serbestlik dereceli uygulamalarda kullanılabilecek yapıya geliştirilmiştir.

5.1 Sabit ve değişken zaman gecikmeleri ile baş eden iki yönlü doğrudan teleoperasyon ve model aracılı denetim yöntemlerinin geliştirilmesi ve deneysel olarak karşılaştırılması

5.1.1 Giriş

İki yönlü teleoperasyon teknolojisi kullanıcının uzak, riskli veya tehlikeli ortamlardan haptik, görsel ve/veya işitsel geri-bildirim olarak karmaşık görevleri yerine getirebilmesini sağlar. Çoğunlukla kullanıcı bağımlı cihazı haptik olarak seçilebilen ana cihaz ile kullanır. İki yönlü teleoperasyonda iletilen işaretler hız ve/veya kuvvet bilgilerini içerebilir. Dört yönlü teleoperasyonda ise hem hız hem de kuvvet bilgileri iki yöne de iletilir. Bu sistemde amaçlanan ana sistemde kullanıcının bağımlı sistemin ortamında varolma hissiyatı ile çalışmasıdır [88], [89]. İşaretler kullanıcı ile ana cihaz ve bağımlı cihaz ile bulunduğu çevre alt sistemleri arasında sürekli olarak değiştiği için iletişim hattındaki denetleyici döngüsü kapalı döngüdür. Teleoperasyon sisteminde iletişim hattında mey-

dana gelen bilgi kayıpları ve zaman gecikmeleri nedeniyle kapalı döngü sisteminin kararlılığı olumsuz yönde etkilenir. Teleoperasyon sisteminin özellikle bir alt sisteminde veya iletişim hattında problemle karşılaşıldığında genel güvenliği sürdürmek için tüm alt sistemler güvenilir olmalı.

Uzakta varolma durumunun/hissiyatının artırılması teleoperasyon sisteminin geliştirilmesi aşamasında ve ardından görev başarımının artırılmasında önemli bir tasarım sorunudur. Teleoperasyon sisteminde kullanıcıya uzakta olma hissini oluşturulması sistemin önemli bir özelliğidir. Bağımlı sistemin bulunduğu çevrenin sanal temsilinin etkin görüntüsü ve karmaşık zamansal-uzaysal ilişkilerin görselleştirilerek teleoperasyon uygulamalarında kullanılması sistemin görev başarımını geliştirir [90]. Kullanıcı tarafından ana sistemden iletilen komutlar bağımlı sisteme aktarılırken aynı zamanda bağımlı sistem algılayıcıları kullanarak bağımlı sistem ortamının basit bir modelini oluşturmak amacıyla ana sistemdeki bilgiyi günceller [91]. Öte yandan bağımlı sistemin çevre modelinin iletilmesinde farklı bir yaklaşım kullanılmıştır [92], [93]. Bu yaklaşım literatürde sanal gerçeklik tabanlı veya model aracılı teleoperasyon olarak geçer ve dolaylı bağlantıyla şeffaflığı sağlamayı amaçlar. Teleoperasyon sisteminin başarımını iletişim hatlarındaki başarısızlığa rağmen geliştirmek amacıyla model aracılı teleoperasyon yöntemi ilk olarak önerilip Mitra ve Niemeyer tarafından uygulanmıştır [93]. Sabit zaman gecikmeleri ile yapılan testlerde yöntemin sistemler arasında iletilen bilgi yükünü azaltıp, sistemin bant genişliğini arttırdığı görülmüştür. Model aracılı yöntemin iletişim kanallarındaki sabit zaman gecikmelerinden kaynaklanan kararsızlığı azalttığı belirtilmiştir. Bu yöntemdeki esas amaç ana cihazın düşük frekanslarla güncellenen uzak ortamın sanal modeliyle etkileşime girmesidir. Bağımlı cihaz güncellenen bilgileri gecikmeli olarak yollar bu sebeple ana sistem arayüzü bağımlı sistem ortamının varlığı hissiyatı ile bir zaman gecikmesi ve kararsızlık olmaksızın kullanıcının ana cihazı yönlendirmesini sağlar [94]. Literatürdeki başka bir çalışma olan [95] paralel konum/kuvvet denetleyicisinin uygulandığı model aracılı teleoperasyon yöntemi ile denetim algoritması geliştirerek deneysel testlerinin yapılması üzerinedir. Dede ve Uzunoğlu bağımlı sistemin yerel denetiminde empedans denetimi kullanmış, model aracılı teleoperasyon yöntemini kullanan üç serbestlik dereceli ve iletişim hatalarının bulunduğu durum için teleoperasyon sistemi geliştirmiştir [96].

Bu çalışmada doğrudan teleoperasyon ve model aracılı teleoperasyon kullanarak bir denetim algoritması geliştirilmiş ve öncelikle sistem kararlılığı ardından da iletişim hatalarının varlığında teleoperasyon sisteminin başarımı gözlemlenmiştir. Bahsedilen yöntemler Matlab Simulink bloklarıyla gerçek zamanlı olarak, ana ve bağımlı alt sistemleri olan Phantom Omni haptik cihaz ve

sanal ortamda oluşturulmuş RRP SCARA robot kolu ile deneysel olarak test edilmiştir.

5.1.2 Teleoperasyon denetimi

Teleoperasyon sistemlerinde denetleme yapısı genelde ana ve bağımlı olmak üzere iki alt sisteme ayrılmıştır. Teleoperasyon sistemlerinde denetleyici hedefi bağımlı cihazın alt sisteminde bulunduğu ortamın içinde ana cihazla yönlendirilmesidir. Bilgilerin iletilmesi sırasında ana ve bağımlı sistemler arasındaki mesafe iletişim hattında zaman gecikmelerine ve bilgi kayıplarına neden olabilir. Bu çalışmada deneyler doğrudan teleoperasyon ve model aracılı yöntemlerle gerçekleştirilmiş ve iki yöntemin başarımları karşılaştırılmıştır.

5.1.3 Doğrudan teleoperasyon

Doğrudan teleoperasyon yönteminde ana ve bağımlı alt sistemler kendi denetleyicilerine sahiptir ve doğrudan etkileşime geçerler. Pozisyon ve hız komutları ana alt sistemin denetleyicisinden bağımlı alt sistemin denetleyicisine gönderilirken bağımlı sistemin bulunduğu çevreden elde edilen kuvvet ve/veya tork bilgileri ana alt sistem denetleyicisine gönderilir. İletişim hattındaki değişken veya sabit zaman gecikmeleri bu sayede azaltılır.

5.1.4 Model aracılı teleoperasyon

Şekil 5.1'de akış şeması verilen model aracılı teleoperasyon yönteminde kullanıcı komutları kendine ait denetleyicisi olan ana cihaza gönderir. Bağımlı sistemdeki denetleyici hareket iç döngüsü oransal-türev tipli denetleyici olan empedans denetleyicisini kullanmaktadır. Ana sistem bağımlı sistemin ve bağımlı sistem ortamının bağımlı alt sistemdeki temsilcisine (ingilizcesi proxy) bağlanır. Bu bağlantı sayesinde ana cihaz komutları bağımlı cihaza yolladığında, temsilci komutları bağımlı sistemden önce alır. Bahsedilen temsilcinin ana sistem ve bağımlı sistem arasında kullanılmasının hem avantajları hem de dezavantajları bulunmaktadır. Temsilcinin dinamikleri tüm sistemin hareketini etkilerken, temsilci sayesinde bağımlı sistemden gelen bildirimler doğrudan teleoperasyon yöntemine kıyasla daha az sıklıkla iletileceğinden gecikmelerden kaynaklanan pasifsizliği bozucu etkenler engellenir. Temsilcinin ve sanal model oluşturulmasındaki amaç, ana cihaza ve kullanıcıya iletişim gecikmelerinden, iletişim kayıplarından ve bağımlı sistemin ortamının bilinmezliğinden kaynakla-

nabilecek fazladan kuvvet aktarımlarını engellemektir. Ana cihaz engelle ulaştığında temsilci de bunu hisseder. Ana cihaz engelin içine girerken temsilci ve bağımlı sanal cihaz ise girmez. Bu durumda ana sistem hala ortamsal kuvvetleri kullanıcıya hissettirir.

Ana sistem

Ana sistemde, temsilci ana cihazın hareketlerini modellenmiş bağımlı sistem ortamının kısıtlarını dikkate alarak izler [93]. Kullanılan denetleyicide, temsilcinin dinamik hareketleri x_p , ölçülen bağımlı cihaz hareketleri x_s ve ölçülen kuvvete göre empedans terimi olan ortalama temas ayak uydurmayı amaçlayan hareketler x_r ile hesaplanır. Temsilcinin dinamik davranışı temsilci hızının ν_r aşağıdaki denklemlerle elde edilmesi ile sağlanır

$$\nu_r = \nu_m + \frac{k_{pm}}{k_{dm}} (x_m - x_p) \quad (5.1)$$

yukarıda x_m , ν_m , x_p , k_{pm} , ve k_{dm} sırasıyla ana sistemin konumunu, hızını, temsilcinin konumunu, oransal- türev denetleyici kazançlarını ifade eder. Temsilci ana sistemin konumuna ulaştığında temsilcinin hızı ana cihazın hızına ulaşmış olur ve aşağıdaki şartı sağlar

$$x_m - x_p = 0. \quad (5.2)$$

Kuvvet çıkışı denetleyici parametreleri ile temsilci ve ana sistem konumları arasında oluşan hata ile ana sistemde meydana gelir. Yüzey ile temas halindeki temsilci bu yüzey ile kısıtlandığından meydana gelen konum farkı ile kullanıcıya aşağıdaki gibi tanımlanan F_m kuvvetini aktarır

$$F_m = k_{pm} (x_p - x_m) + k_{dm} (\nu_p - \nu_m). \quad (5.3)$$

(5.1) ile (5.3) kullanılarak aşağıdaki ifade elde edilir

$$F_m = k_{dm} (\nu_p - \nu_r). \quad (5.4)$$

Yüzey normali n ile gösterildiğinde $\nu_p^T n$ sanal objenin yüzeyinde hareket eder ve artı tanımlıdır. Temsilcinin artı tanımlı yüzeyindeki hızı aşağıdaki gibi kısıtlandırılmıştır

$$\nu_p^T n \leq \beta \alpha \quad (5.5)$$

burada β yüzeye olan mesafeyi temsil etmektedir, α ise aşağıdaki gibi kısıtlandırılmıştır

$$\alpha \leq \frac{1}{\Delta T} \quad (5.6)$$

burada ΔT döngü zamanını temsil etmektedir.

Model oluşturulması ve güncellenmesi

Model güncellemesi bağımlı sistemde robotun uç noktasının konumu ve ortamla yapılan temasından kaynaklı tepki kuvvetleri ile elde edilir. Sistem cevabının kararlılığını sağlamak ve aşırı kuvvetlerden korunmak için bağımlı ortamın modeli ana sistemde belirli kısıtlamalarla Şekil 5.2'deki gibi güncellenmektedir. Temsilci elde edilen modelin kısıtlamaları içinde hareket ederken, alınan güncellemeler modele dinamik olarak uygulanır. Model güncellemeleri yüzey tanımlama, yok etme ve nesnenin kaydırılması yöntemleri ile uygulanır. Temsilci sanal yüzeyin içerisinde geçemeyecek şekilde ana cihazı takip ederken bir yandan bağımlı cihaz kendi ortamında gecikmeli olarak, gerçek yüzeylerle çalışır. Ortamda bulunan yüzeyden daha yüksek bir seviyede ölçülme durumu yüzeyin kaydırılması anlamına gelir. Bu yöntemde, ortamdaki yüzeyin konumu, eski sanal yüzeyin üzerinde olduğundan, güncellenecek olan yüzey temsilci konumunun hemen altında oluşturulur. Güncelleme, oluşturulan yüzey ile bağımlı ortamdaki yüzey aynı konuma gelene kadar devam eder ve aynı konuma ulaştığında sabitlenir. Sabitleme işleminden sonra yüzey modelde oluşturulur. Bu sayede ana cihazda model güncellemeleri sırasında kullanıcıya fazladan kuvvet aktarımı engellenmiş olur. Yüzeyin yok edilmesi yönteminde, güncellemede ortamdaki yüzeyin daha aşağıda ölçülmesi söz konusudur. Bu durumda ise güncellenen eski yüzey ortamdaki yüzeyin konumunda oluşturularak, yaratılan temsilci dinamiği ile aşamalı olarak ana cihazın konumuna getirilir. Bağımlı cihaz komutları temsilci yardımı ile aldığından, güncelleme yapılırken ana cihazın konumunu aşamalı olarak yakalar. Bu sayede bağımlı sistemde oluşabilecek salınımlı hareketler oluşmaz.

Model oluşturulması için bağımlı cihazın çalışma alanı x , y , z eksenlerinde parçalara ayrılır. Bağımlı cihaz ortamla temasa geçtiğinde kuvvet hesaplama yöntemi ile belirlenen yönde robotun uç noktasının hızının sıfırlanması bilgisi kullanılarak konum bilgileri ana sisteme model oluşturulması ve güncellenmesi için yollar. Ancak yeni bir yüzey ile karşılaşıldığında bilgi iletimi olduğu için bilgi iletimi az sıklıkla olur ve gecikmeden dolayı oluşabilecek pasifsizliği bozan etkenler azalır.

Sistem üzerinden yüzey konumunun tahmini ile beslenen yüzey bilgileri çalışmamızda z yönünde

oluşturulmuştur. z yönündeki yüzey modeli $x_{msurface}$ bağımlı sistemden alınan/ölçülen yüzey konumuna $x_{ssurface}$ eşittir. Bağımlı sistemde, ana sistemde beklenmedik kuvvet artımlarından kaçınmak için z yönünde aşağıdaki gibi bir kısıtlama verilmiştir

$$x_{msurface} = x_{ssurface} \quad (5.7)$$

$$x_{msurface} \leq x_p. \quad (5.8)$$

Bağımlı sistem

Bağımlı sistemin paralel konum/kuvvet denetimi eklem uzayında empedans denetleyici kullanılarak yapılır. Hesaplanan hız hatası e aşağıdaki gibi ifade edilir

$$e \triangleq \nu_p - \nu_s - \nu_r \quad (5.9)$$

burada ν_s ve ν_r sırasıyla bağımlı cihazın uç noktasının ölçülen hızını ve hedef empedans kullanılarak hesaplanan hareket özelliğini temsil eder.

Bağımlı sistemdeki oransal-integral-türev kuvvetimiz F_{PID} aşağıdaki gibi gösterilmiştir

$$F_{PID} = k_{ps}e + k_{ds}\dot{e} + k_{is} \int e \quad (5.10)$$

burada k_{ps} , k_{ds} ve k_{is} sırasıyla oransal, integral ve türev kazançlarını temsil eder.

Sanal olarak kütle-sönümleyici-yay ile oluşturulan empedans terimi I aşağıdaki gibidir

$$I \triangleq \frac{F}{\nu_r}. \quad (5.11)$$

Ana sistemde temas sonucunda oluşan kuvvetler temsilci ve ana sistemde yaratılan model üzerinden kullanıcıya gönderilir. Bu kuvvetler bağımlı sisteme de iletilip bağımlı cihazın kullanıcının uyguladığı kuvvetleri temas ettiği ortama aktarılır. Deney sırasında hiçbir temas söz konusu değilse denetim algoritması sadece konum denetimi için kullanılır. Kuvvet denetimi ise sadece temas/çarpma durumunda uygulanır.

Bağımlı sistem modeli

Bağımlı cihaz olarak tercih edilen sanal RRP Scara robotun mekanizması Şekil 5.3'te verilmiştir.

Bağımlı sistemin dinamik modeli aşağıdaki gibidir

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau + \tau_C \quad (5.12)$$

burada $q(t)$, $\dot{q}(t)$, $\ddot{q}(t) \in R^3$ sırasıyla eklem pozisyonlarını, hızlarını ve ivmelerini temsil ederken, $M(q) \in R^{3 \times 3}$ artı tanımlı simetrik eylemsizlik matrisini, $C(q, \dot{q}) \in R^{3 \times 3}$ koriyolis ve merkezkaç etkisini, $G(q) \in R^3$ yerçekimi etkisini, $\tau(t)$ ve $\tau_C(t) \in R^3$ denetleyici girişini ve temaslar için oluşturulmuş kuvvet girişini temsil etmektedir.

3 eklemlı Scara robot kolunun eylemsizlik matrisi $M(q)$ aşağıdaki gibidir

$$M = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{12} & M_{22} & M_{23} \\ M_{13} & M_{23} & M_{33} \end{bmatrix} \quad (5.13)$$

ve elemanları alta verilmiştir

$$M_{11} = I_1 + I_2 + m_2 a_1^2 + m_3 a_1^2 + m_3 a_2^2 + 2m_3 a_1 a_2 c_2 \quad (5.14)$$

$$M_{12} = m_3 a_2^2 + m_3 a_1 a_2 c_2 + I_2 \quad (5.15)$$

$$M_{13} = 0 \quad (5.16)$$

$$M_{22} = m_3 a_2^2 + I_2 \quad (5.17)$$

$$M_{23} = 0 \quad (5.18)$$

$$M_{33} = m_3 \quad (5.19)$$

burada I_1 ve I_2 sırasıyla 1. ve 2. eklemlerin atalet momentlerini, m_1 , m_2 , m_3 sırasıyla 1., 2. ve 3. eklemlerin kütlelerini, a_1 ve a_2 sırasıyla 1. ve 2. eklemlerin uzunluklarını temsil eder. Kütle merkezleri eklem merkezleri ile aynı hizada alınmıştır. Koriyolis ve merkezkaç etkisi $C(q, \dot{q})$ aşağıdaki gibi

verilmiştir

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} \quad (5.20)$$

ve elemanları alta verilmiştir

$$C_{11} = -m_3 a_1 a_2 \dot{q}_2 s_2 \quad (5.21)$$

$$C_{12} = -m_3 a_1 a_2 s_2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \quad (5.22)$$

$$C_{13} = 0 \quad (5.23)$$

$$C_{21} = m_3 a_1 a_2 s_2 \dot{q}_1 \quad (5.24)$$

$$C_{22} = 0 \quad (5.25)$$

$$C_{23} = 0 \quad (5.26)$$

$$C_{31} = 0 \quad (5.27)$$

$$C_{32} = 0 \quad (5.28)$$

$$C_{33} = 0. \quad (5.29)$$

Yerçekim vektörü $G(q)$ aşağıdaki gibidir

$$G = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ m_3 g \end{bmatrix} \quad (5.30)$$

burada g yerçekim ivmesini temsil etmektedir. Genelleştirilmiş temas kuvveti F_C aşağıdaki gibi hesaplanmıştır

$$F_C = J^T \tau_C \quad (5.31)$$

burada $J(q) \in R^{3 \times 3}$ Scara'nın Jakobiyen matrisidir ve aşağıda verilmiştir

$$J = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} \\ J_{31} & J_{32} & J_{33} \end{bmatrix} \quad (5.32)$$

ve elemanları alta verilmiştir

$$J_{11} = -a_1 s_1 - a_2 s_{12} \quad (5.33)$$

$$J_{12} = -a_2 s_{12} \quad (5.34)$$

$$J_{13} = 0 \quad (5.35)$$

$$J_{21} = a_1 c_1 + a_2 c_{12} \quad (5.36)$$

$$J_{22} = a_2 c_{12} \quad (5.37)$$

$$J_{23} = 0 \quad (5.38)$$

$$J_{31} = 0 \quad (5.39)$$

$$J_{32} = 0 \quad (5.40)$$

$$J_{33} = -1. \quad (5.41)$$

5.1.5 Denetleyici yapısı

Genel olarak teleoperasyon sistemlerinde denetim yapısı bağımlı ve ana olmak üzere iki alt sisteme ayrılır. PID tipli denetleyici bağımlı sistemin ortamında ilk temastan kaynaklı hasardan kaçınmak için empedans denetimi olarak tasarlanır. PD tipli denetleyici ise ana sistemde tasarlanır. Bu denetleyicide hareket iç döngüsünde bağımsız eklem denetimi yapılır.

Konum bilgisi ve hesaplanmış temas kuvvetleri kısıtlamalarını tahmin etmek amacıyla bağımlı cihazın dinamik modelinden elde edilir. Temsilci, ana cihazı, model oluşturulmasını sağlayan bağımlı robotun tasarlanmış dinamikleri yardımıyla izler. Ana sistem güncellenmiş konuma ulaştığında, güncellemeler model oluşturulması için kullanılır. Bu çalışmada güncelleştirmeler deneysel olarak gözlemlenmiştir.

5.1.6 Deney düzeneği ve test sonuçları

Test sonuçları doğrudan teleoperasyon ve model aracılı teleoperasyon tekniklerinin zaman gecikmeleri ile baş etme yöntemini göstermektedir. Deneylerde Matlab Simulink yardımıyla gerçek zamanlı denetim yazılımı olan QUARC kullanılmıştır. Simülasyonlar 0.002 saniye sabit adım aralığı (Ode 1) ve gerçek zamanlı Windows hedef kodu kullanılmıştır.

Test empedans denetimi olmadan yürütülmüştür. Empedans denetimi uygulanmadığından temas sırasında bağımlı sistemden ortama beklenmedik kuvvetlerin sarf edildiği gözlemlenmiştir.

Takip hatasını azaltan değerler olarak, deneme yanılma yöntemiyle, en iyi sonucu verecek k_{ps} , k_{ds} , k_{pm} ve k_{dm} sırasıyla 10, 40, 0.8 ve 0.4 seçilmiştir. Orantı-türev denetleyicisi zaman gecikmeli serbest hareket takibi testi ile test edilmiştir. Pozisyon takibi, z yönünde Şekil 5.4 ve Şekil 5.5'te sabit zaman gecikmesi ile gösterilmiştir ve Şekil 5.6 ve Şekil 5.7'de değişken zaman gecikmesi ile gösterilmiştir.

Deneylerde ilk temastan itibaren kısıtlamalar model güncellemesi kullanılarak öğrenilmiştir. Komutlar ana sistem ile bağımlı sistem arasında görev uzayında yollarır. Eğer belirli bir duvar (engel) tanımlanmamış ise bağımlı cihaz ana cihazı serbest şekilde izler. Bağımlı cihaz temas anına kadar serbest hareketine devam eder. Bağımlı cihazın sırasıyla sabit zaman gecikmeli ve değişken zaman gecikmeli izleme başarımı Şekil 5.5 ve Şekil 5.7 ile gösterilmiştir. Daha sonra bağımlı çevrede -25mm'de duvar tanımlanmış ve sabit zaman gecikmesi 1 saniye seçilmiştir. Bağımlı cihaz temas sırasında duvarı aşmaya çalıştığında sanal kuvvet uygulanarak duvarın konumu korunmaktadır. Ana sistemden bağımlı sisteme duvarı aş komutu geldiğinde temsilci duvara karşı konumunu koruyarak bağımlı sistemin duvarı aşmasını engeller. Ana cihazımız duvarı aşabilirken bağımlı cihazımız temsilci sayesinde duvarı aşamaz, kuvvet geri-bildirim yaratılır ve ana cihazı izlemeye devam eder. Ana sisteme bağımlı sistemden yollanan kuvvet geri-bildirim cihazda kırılma/bozulma durumlarına yol açmaması için doyuma ulaştırılır. Duvarın pozisyonu bilindiğinden ve model sürekli güncellendiğinden duvara ulaşırken sistem yavaş çalışır.

5.1.7 Sonuçlar

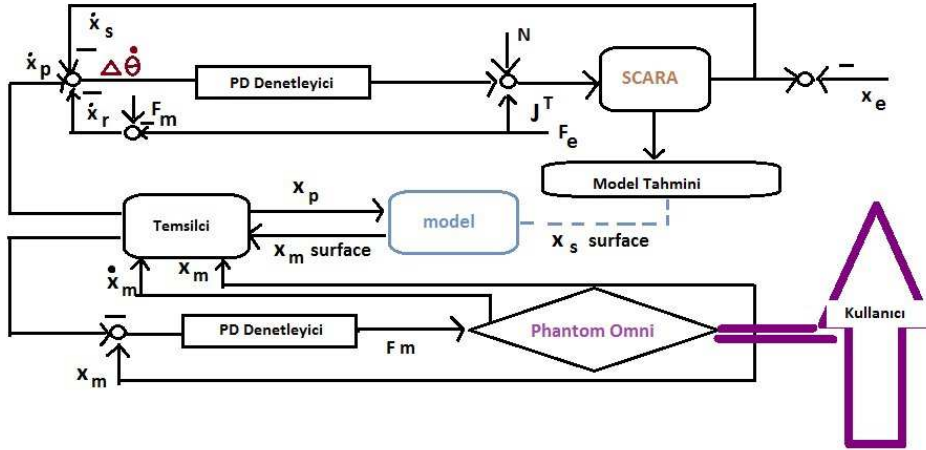
Bu çalışmada doğrudan teleoperasyon ve model aracılı teleoperasyon yöntemleri iletişim hatalarına maruz kalan iki yönlü teleoperasyon sistemine uygulanmıştır. Tasarlanan algoritma, bir adet haptik cihaz (Phantom Omni) ve bir adet sanal ortamda oluşturulan robot kolu (RRP Scara) kul-

lanılarak gerçek zamanlı testlere z yönünde uygulanmıştır.

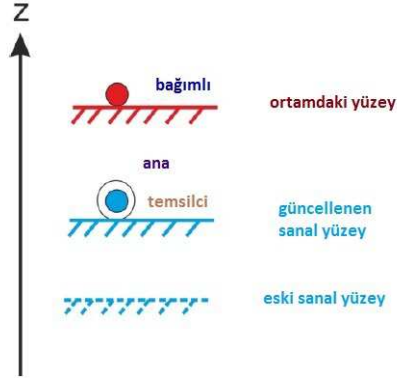
Doğrudan teleoperasyon yöntemi ile bağımlı cihaz ana cihazı izleyebilmiştir. Ana cihaz duvarı aştığında, bağımlı cihaz ana cihazı gecikme ile izlemiş ve yüksek kuvvet geri-bildirimini yollamıştır. Bu yöntemin dezavantajı ise yüksek kuvvet geri-bildirimleri ana cihaza zarar verme ihtimalinin ve sistemde kararsızlığa yol açma ihtimalinin olmasıdır.

İletişim hatalarından kaynaklanabilecek kararsızlıkların oluşturacağı zararlardan korunmak için model aracılı teleoperasyon yöntemi uygulanmıştır. Sabit ve değişken iletişim gecikmesine maruz bırakılan testlerden başarılı konum takibi sonuçları elde edilmiştir. Zaman gecikmelerinin ve bilgi kayıplarının olduğu durumda sistemin kararlılığını koruduğu gözlemlenmiştir.

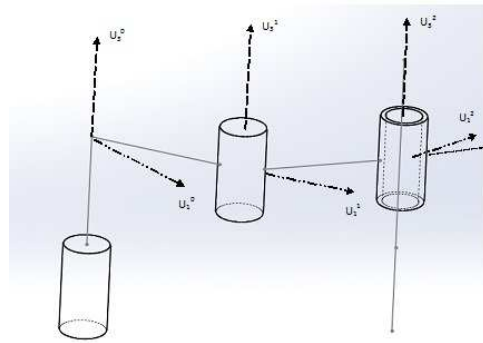
Bu çalışmada model aracılı teleoperasyon yönteminin, özellikle bağımlı sistemde ortam kısıtlarına rağmen, sistemin pasifliğini iletişim hatlarındaki problemlere rağmen korunduğunu ve izleme başarımının geliştiği görülmüştür.



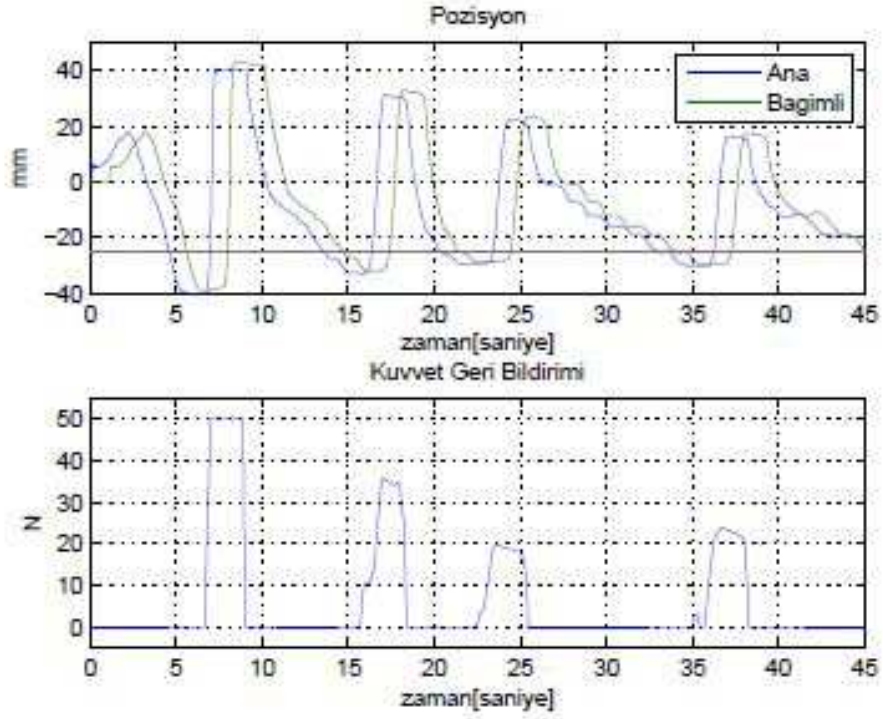
Şekil 5.1: Model aracılı teleoperasyon



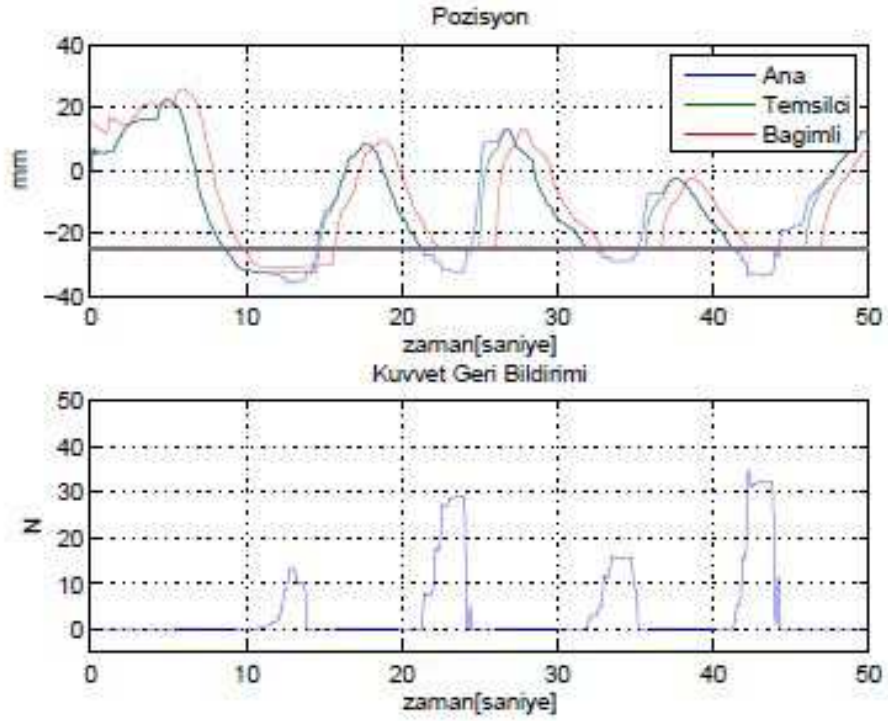
Şekil 5.2: Modelde z ekseninde yüzey güncellemesi



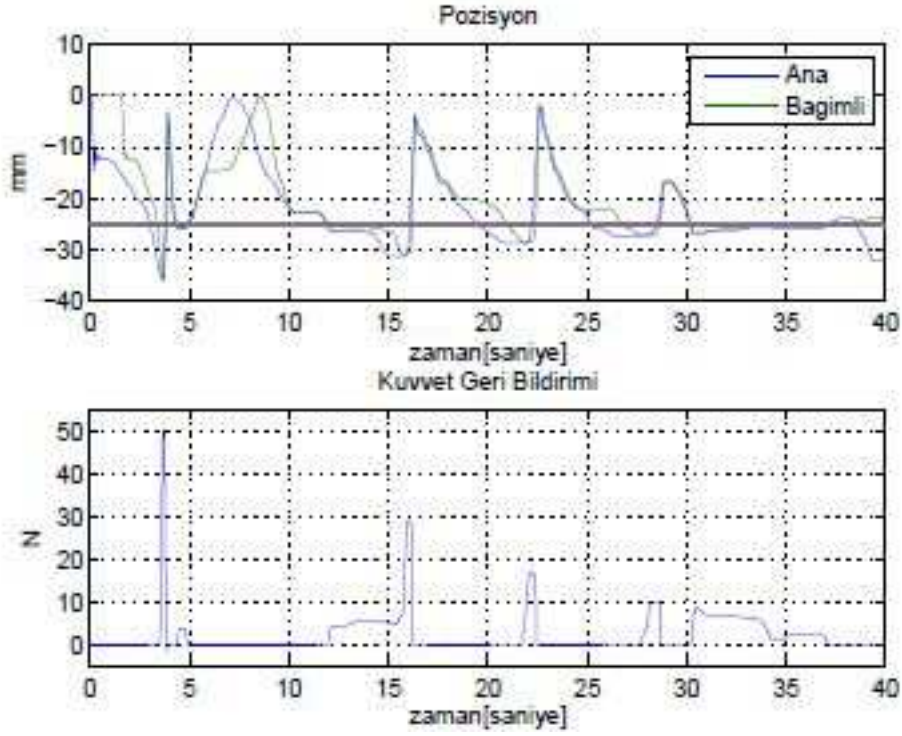
Şekil 5.3: Scara robotun mekanizması



Şekil 5.4: Sabit zaman gecikmeli doğrudan teleoperasyon



Şekil 5.5: Sabit zaman gecikmeli model aracılı teleoperasyon



Şekil 5.6: Değişken zaman gecikmeli doğrudan teleoperasyon

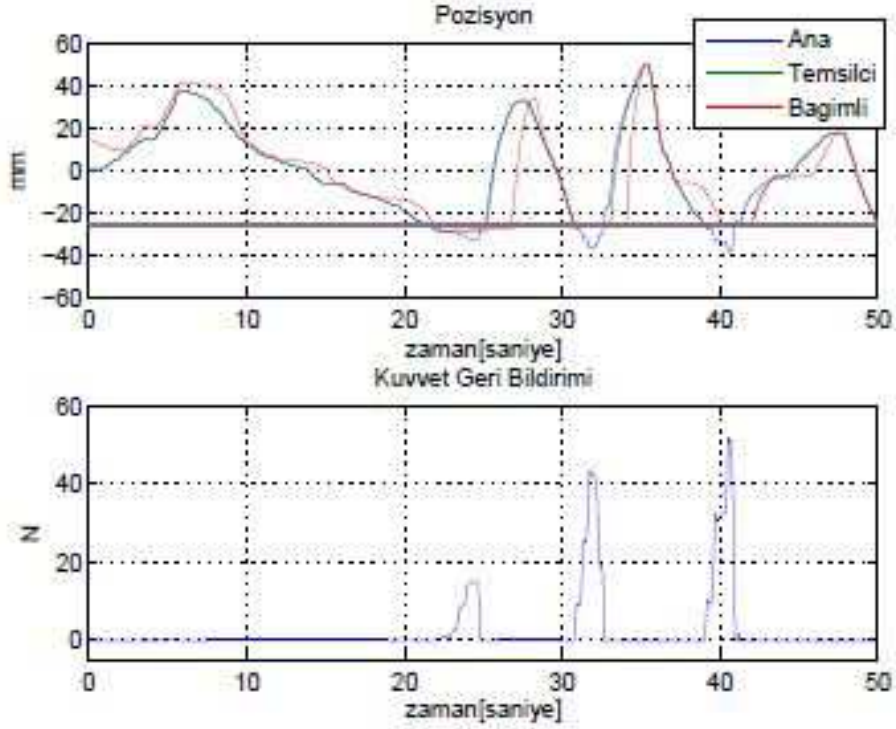
5.2 Sabit zaman gecikmeleri ile baş eden iki yönlü doğrudan teleoperasyon ve model aracılı denetim yöntemlerinin bağımlı robotu mobil robot olan telerobotik sistemde deneysel olarak karşılaştırılması

5.2.1 Giriş

Bu çalışmamızda önceki bölümde detayları verilmiş olan model aracılı denetimin farklı bir uygulaması sunulmuştur. Model aracılı denetim yönteminin işleyişi hem önceki bölümde hem de ikinci gelişme raporunda sunulduğu için bu bölümde sadece deneysel çalışmanın sonuçları paylaşılmıştır.

5.2.2 Test düzeneği

Bu çalışmada test düzeneği ana robotu araştırma grubumuz tarafından geliştirilmiş olan 3 serbestlik dereceli HIPHAD haptik cihazı [97] ve bağımlı robotu dört serbestlik dereceli mobil robotun sanal benzetimi olan telerobotik sistemidir. Ana ve bağımlı robotlarda kullanılan denetleyiciler



Şekil 5.7: Değişken zaman gecikmeli model aracılı teleoperasyon

önceki bölüm ile benzerlikler içerdiği için burada tekrar edilmemiştir. Testler esnasında hedeflenen her iki yönde de 1 saniyelik sabit iletişim hattı sebebiyle gecikme olduğu durumda bağımlı sistemin pozisyonunun ana sistemin pozisyonunu takibinin ve kararlılığının sağlanmasıdır.

5.2.3 Doğrudan teleoperasyon testinin sonuçları

İlk olarak doğrudan teleoperasyon kullanılarak hareket ve kuvvet bilgilerinin doğrudan gönderildiği durumda bağımlı sistemin takip başarımı ve kararlılığı incelendi. Ardından sistemin takip başarımı ve kararlılığını arttırmak amacıyla ikinci deneyde model aracılı denetim yöntemi kullanılmıştır. Şekil 5.8'de gösterilen deney düzeneğinde soldaki monitörde mobil robotun merkezinde olduğu 10 metre kenar uzunluğuna sahip alan bağımlı robotun çevresidir. Bağımlı mobil robot ana robot tarafından duvara doğru sürülecek ve temas gerçekleştiğinde mobil robot kullanıcıdan gelen komutlarla teması devam ettirmeye zorlanacaktır. Temas kuvvetleri duvara 1 metre kala oluşturulmaya başlanacak olup bu sayede temsilci oluşturulan modelin yüzeyiyle y ekseninde 4 metre ilerlendiğinde etkileşime geçecektir.

Bağımlı sistemin denetleyici kazançları deneme yanılma yöntemiyle oldukça kolay bir şekilde kabul edilebilir geçici durum ve kalıcı durum başarımı elde edecek şekilde ayarlanmıştır ve $k_{ps} = 3.5$, $k_{ds} = 0.0075$, $k_{is} = 0.05$ değerleri kullanılmıştır. Bu kazançlar bağımlı robot ana robottan gelen komutları takip ederken hatayı küçültecek şekilde seçilmiştir. Ana sistemde denetleyici kazançları duvar ile çarpışma olması durumunda ana sistemde sönümleyici etki sağlanması amacıyla deneme yanılma yöntemiyle $k_{pm} = 1$ ve $k_{dm} = 0.25$ seçilmiştir. Bu kazanç değerleri her iki testte de değiştirilmeden kullanılmıştır.

Her iki testte de bağımlı sistemin takip başarımı hesaplanmıştır. Sonuçları Şekil 5.9'den görülebilen testler ilk 10 saniyede herhangi bir temas kuvveti oluşmayacak şekilde gerçekleştirilmiştir. 10. saniyeden (4 metre seviyesi aşıldıktan sonra) bir saniye sonra (iletilişim hattındaki gecikmeden dolayı) kullanıcı 0.3Nm seviyelerinde bir kuvvet geri-bildirimini hissetmektedir. Bu etkinin doğal bir sonucu olarak kullanıcı hemen ana robotu 3 metre seviyelerine getirmiştir. Bu andan daha sonra kullanıcı artık kuvvet geri-bildiriminin seviyesini hissettiği için 35. saniyedeki gibi teması bir süre tutabilmektedir. Öte yandan yine sonuçlardan robotu 4 metre seviyelerinde tutmaya çalışmanın bağımlı sistemde osilasyon benzeri bir davranışa sebep olduğu da görülmektedir. Doğrudan teleoperasyon deneyinde ana sistemin kullanıcıya ilettiği kuvvet çıktıları ise Şekil 5.10'te görülebilir.

Bağımlı sistemin bulunduğu ortamın fiziki limitlerine ulaştığı 20. ve 38. saniyelerden sonra sırasıyla yarım metre ve bir metre civarlarında bir pozisyon kaymasının olduğu Şekil 5.11'te verilen takip hatasından görülebilir. Bu durumun temel sebebi bu çalışmada ana ve bağımlı sistemler arasında iletilen bilginin hız ve kuvvet olması ve mobil robot olan bağımlı sistemin fiziksel kısıtlara ulaştığında ya da iletişim hatları kaynaklı hataları telafi edememesidir.

5.2.4 Model aracılı denetim testinin sonuçları

Model aracılı denetim deneyinde bağımlı sistemin takip başarımı ve ana sistemin kullanıcıya ilettiği kuvvet çıktıları Şekil 5.12 ve Şekil 5.13'da verilmiştir. Deneyin başında kısıt yokken temsilci serbestçe hareket eden ana sistemi takip etmektedir ve ana sistemden gelen komutlar bağımlı sisteme iletilmektedir. Bu kısım doğrudan teleoperasyon deneyi ile aynıdır. Öte yandan 10. saniyeden diğer bir deyişle 4 metre seviyesi aşıldıktan bir saniye sonra bir kuvvet geri-bildirim oluşturulmaktadır ve bundan da bir saniye sonra temsilci model güncellemesi yapmaktadır. Kullanıcı robotu duvarın içerisine doğru yönlendirdiğinde temsilcinin modeli ana sistem kısıttan uzaklaşınca kadar son seviyesinde kalmaktadır. Kullanıcı robotu 4 metre seviyesinin altına çektiği zaman temsilci ana ro-

botu izlemektedir. Temsilci ana robot 4 metre seviyesinin altına indikten sonra modelini 4 metrede güncellemektedir. Ve deneyin 24. saniyesinde ana sistem 4 metre seviyesini bir daha geçmek istediğinde temsilci artık 4 metre seviyesini geçmemektedir ve dolayısıyla da bağımlı sistem olarak kullanılan mobil robot da 4 metre seviyesinde kalmaktadır. Model aracılı denetim yönteminde Şekil 5.13'de gösterilen kullanıcıya iletilen kuvvet geri-beslemesi de Şekil 5.10'tekilerden oldukça düşük seviyelerdedir. Şekil 5.14'den görülebileceği üzere bağımlı sistem ana sistem doğrudan teleoperasyondakine göre daha iyi takip etmektedir. Yine benzer şekilde pozisyon hatasında kaymalar gözlemlenmekle birlikte doğrudan teleoperasyondaki seviyelerin oldukça altındadır.

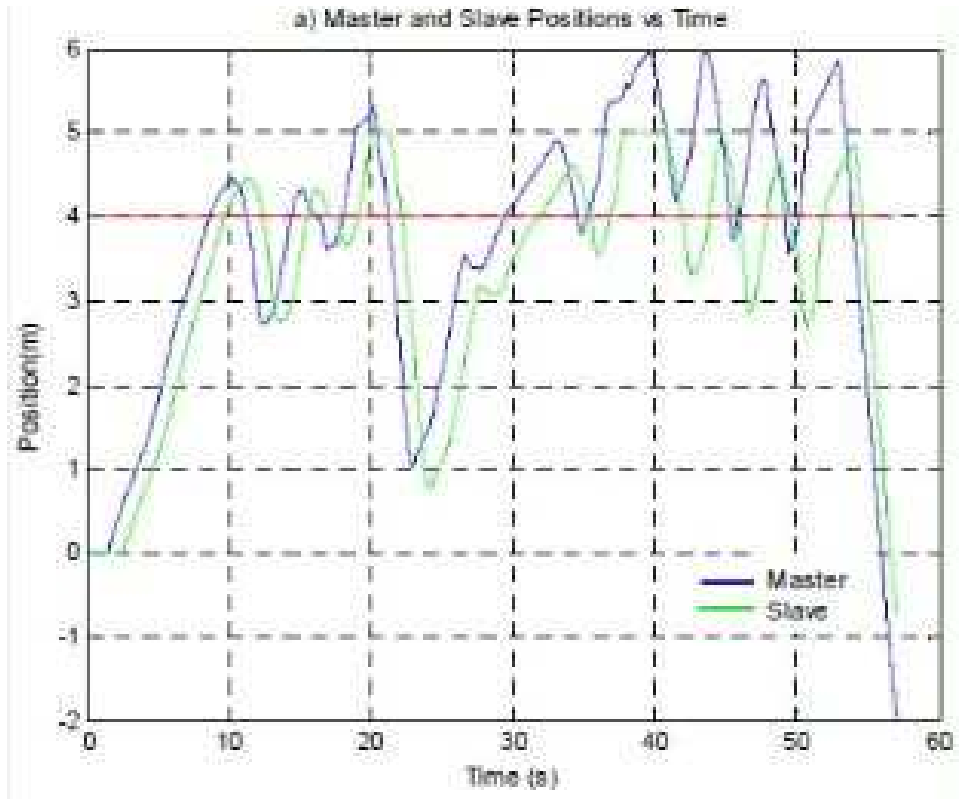
5.2.5 Sonuçlar

Bu çalışmada model aracılı denetim yöntemi ana sistemi HIPHAD haptik cihaz ve bağımlı sistemi sanal mobil robot olan telerobotik sisteme uygulanmıştır. Model aracılı yöntemin başarımını kıyaslamak için doğrudan teleoperasyon yöntemi de kullanılarak testler gerçekleştirilmiştir. Her iki yöntemde de denetleyici kazançları temasın olmadığı durumda takip hatasını küçültecek ve ana kullanıcıya iletilen kuvvetlerin sönümlenmesini ayarlayacak şekilde tespit edilmiş ve aynı denetleyici kazançları kullanılmıştır. Her iki testte de iki yönde de sabit 1 saniye zaman gecikmesi bulunduğu durum incelenmiştir.

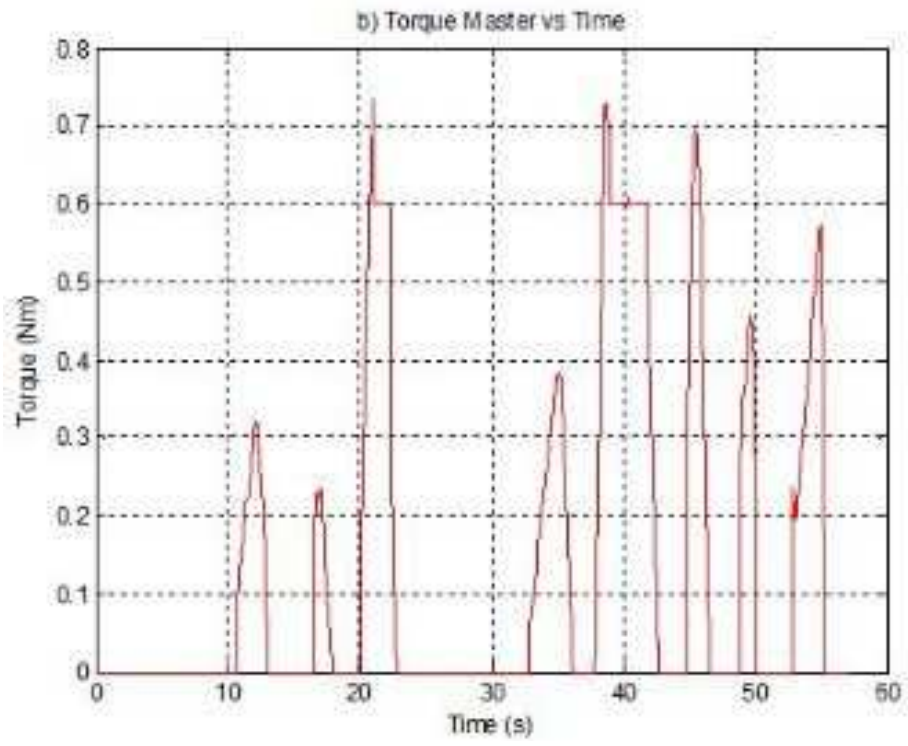
Doğrudan teleoperasyon deneyinde 4 metre seviyesindeki sanal duvar ile temas edildiğinde sanal sistemin pozisyonunda osilasyonlar gözlemlendi, kullanıcıya iletilen temas kaynaklı kuvvet geri-bildirimleri yüksekti ve ilaveten sanal duvar ile her temastan sonra pozisyon hatasında bir kayma oluştu. Model aracılı denetim tekniğinde ilk temastan sonra kullanıcıya iletilen kuvvet geri-beslemeleri doğrudan teleoperasyona göre oldukça düşük seviyelerde elde edildi. Ayrıca sanal duvarın olduğu 4 metre seviyesinin altına inildikten sonra ana sistem bağımlı sistemi tekrar 4 metre seviyesinin üstüne çıkartmak istediğinde temsilci 4 metre seviyesini geçmedi ve dolayısıyla bağımlı sistem de 4 metre seviyesinde kaldı. Ana ve bağımlı sistemler arasında iletilen bilginin hız ve kuvvet bilgisi olması sebebiyle gerçekleşen kayma model aracılı denetim testlerinde kabul edilebilir seviyelerde gerçekleşmiştir.



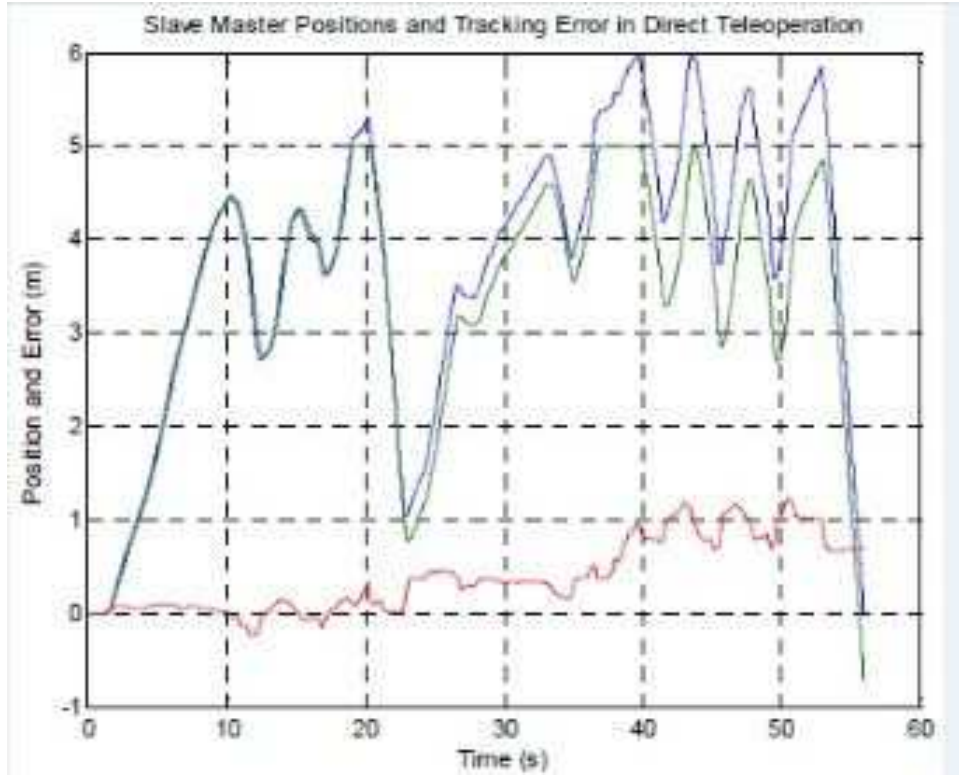
Şekil 5.8: Test düzeneği: Solda sanal bağımlı robot olarak kullanılan mobil robot ve ana robot olarak kullanılan HIPHAD robotu



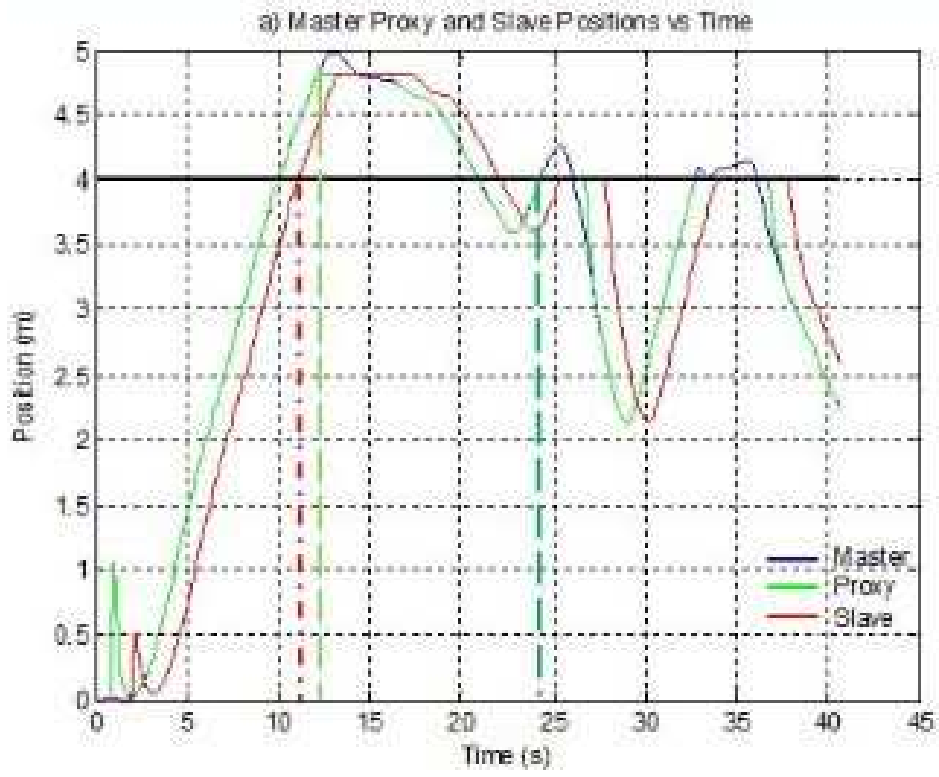
Şekil 5.9: Doğrudan teleoperasyon deneyinde bağımlı sistemin takip başarımı



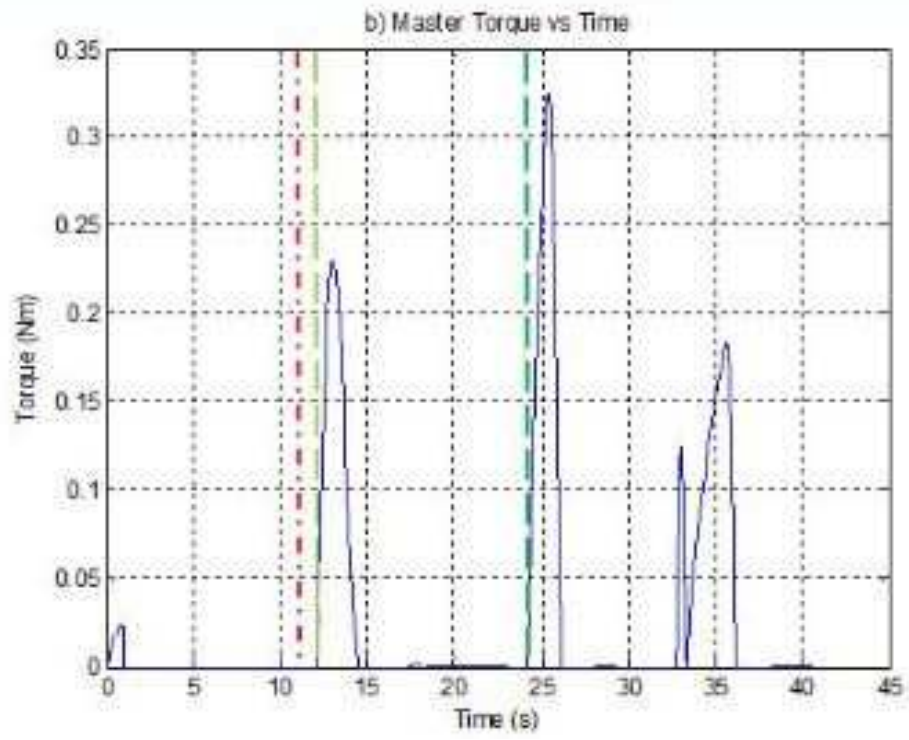
Şekil 5.10: Doğrudan teleoperasyon deneyinde ana sistemin kullanıcıya ilettiği kuvvet çıktıları



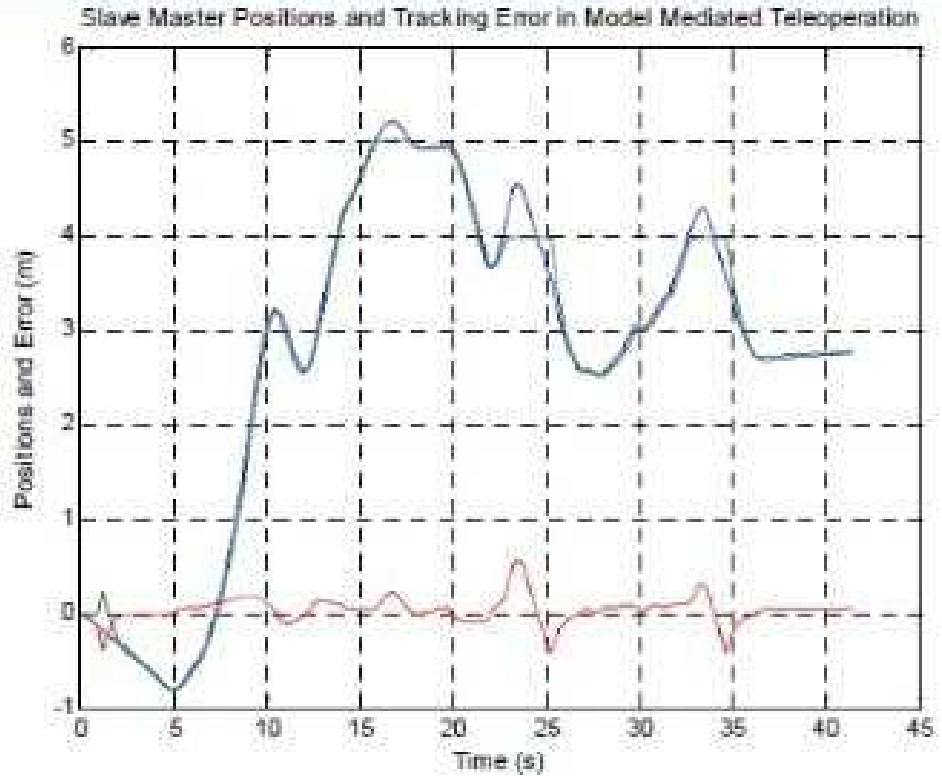
Şekil 5.11: Doğrudan teleoperasyon deneyinde bağımlı sistemin pozisyon takip hatası (kırmızı), ana sistemin pozisyonu (mavi), bağımlı sistemin kaydırılmış pozisyonu (yeşil)



Şekil 5.12: Model aracılı denetim deneyinde bağımlı sistemin takip başarımı



Şekil 5.13: Model aracılı denetim deneyinde ana sistemin kullanıcıya ilettiği kuvvet çıktıları



Şekil 5.14: Model aracılı denetim deneyinde bağımlı sistemin pozisyon takip hatası (kırmızı), ana sistemin pozisyonu (mavi), bağımlı sistemin kaydırılmış pozisyonu (yeşil)

5.3 Model aracılı denetimi yönteminin iletişim hatalarına maruz kalan teleoperasyon sistemi için çoklu serbestlik derecesine çıkarılması ve deneysel gerçekleştirilmesi

5.3.1 Giriş

Teleoperasyon sistemleri kullanıcının güvenli ve uzak mesafelerden otonom sistemlerin gerçekleştiremeyeceği derecede karmaşık görevlerin gerçekleştirilmesini sağlar. Sualtında ve uzayda gerçekleştirilen veya radyoaktif materyaller gibi tehlikeli materyallerin kullanıldığı operasyonlar teleoperasyon uygulamaları için tipik örnekler olarak verilebilir. Teleoperasyon sistemlerinde sistem genellikle ana ve bağımlı olmak üzere iki alt sisteme ayrılır. Kullanıcı uzaktaki ortamda (bağımlı cihazın operasyonu gerçekleştirdiği ortam) bulunmaksızın, ana sistem arayüzü üzerinden, bağımlı sisteme komutlar gönderir ve bağımlı sistem operasyonu gerçekleştirir [98]. İki yönlü teleoperasyonda, kullanıcıya operasyonu başarılı bir şekilde gerçekleştirmesi için ek olarak ana sistem üzerinden haptik geri-beslemesi (dokunma duygusu geri-beslemesi) sağlanır. Sistemler arasında iletilen işaretler hız (dolayısıyla hareket komutu), kuvvet veya iki yönlü teleoperasyon da her ikisinin de bilgilerini içerebilir. İki kanallı olarak adlandırılan sistemler, ana ve bağımlı sistem arasında sadece iki işaretin iletiildiği sistemleri tanımlar. Dört kanallı teleoperasyon ise hem kuvvet hem de hareket bilgilerinin iki tarafa da iletiildiği sistemleri tanımlar [95]. Bu durumlardaki amaç, görevini başarı ile gerçekleştirilmesi için ana sistem üzerinden kullanıcıya bağımlı sistemin çalıştığı ortamda çalışıyor hissiyatı yaratmaktır ve arttırmaktır. Buna uzakta varolma hissiyatı (telepresence) denir. Kısaca iki yönlü teleoperasyon sistemleri, yani bağımlı sistemde ölçülen dış etki kuvvetlerinin de ana sisteme iletiildiği sistemler, kullanıcının uzakta gerçekleştirilen karmaşık manipülasyonları başarı ile gerçekleştirebilmesi için haptik geri-beslemeden yararlanırlar [88], [89].

Teleoperasyon denetimlerinin tasarımı, iki sistem arasındaki iletişim gecikmeleri ve kopukluklarından dolayı, birbiri ile çelişen sistemin kararlılığı ve performansı kriterleri arasında dengeleme gerektirir. İki yönlü teleoperasyonlarda görülen ve zaman gecikmelerinden kaynaklanan kararsızlık problemi, 1960'ların ortalarında bir sorun olarak tanımlanmıştır [99]. İlk çalışmalardan itibaren basit manipülasyon deneyleri ile iletişim gecikmelerinin kullanıcının performansı üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir [100]. Genel olarak iletişim gecikmelerinden kaynaklanan kararsızlıklar kuvvet geribildirimini kullanan iki yönlü teleoperasyon sistemlerinde önemli sorunlardan biri olarak kabul edil-

mektedir ve bu sorunu çözmek için farklı denetim algoritmaları geliştirilmiştir. Bunlardan ilki komut ver ve bekle yöntemidir. Kullanılan ikinci bir yöntem ise hibrit bir denetim yöntemi olan kullanıcının üst seviye komutları gönderdiği ve ikincil komutların uzaktaki sistemin kendi denetim döngüsü ile gerçekleştirdiği yönetsel yada üst seviye denetim yöntemidir [101]. Bir diğer uygulanan yöntem ise kullanıcının sistemin cevabını gerçekleşmeden önce gözlemleyebilmesi ve olası hataları engelleyebilmesini sağlayan tahmin bazlı ya da gözlem bazlı denetimdir. Bu yöntemlerin dışında pasiflik esaslı denetimlerin ve konum/kuvvet denetleyicilerin geliştirilmesi iki yönlü teleoperasyon denetimlerinde ve bu denetimlerin iletişim gecikmelerine karşın kararlılığının sağlanabilmesinde büyük etkide bulunmuştur [88], [102], [103].

Son yıllarda, iletişim gecikmesi ve kopukluğu olan bir teleoperasyon sisteminin performansının iyileştirilmesi için Mitra and Niemeyer [93] tarafından model aracılı denetim yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemde kullanıcı tarafında bulunan ana sistem tanımı içinde bağımlı sistemin çalıştığı uzakdaki ortamın basitleştirilmiş bir modeli yer almaktadır. Kullanıcı komutları bu model üzerinden bağımlı sisteme iletilmektedir. Söz konusu sanal model gerçekleştirilen görev ve kullanılan algılayıcılardan alınan veriler dahilinde yaratılmaktadır. Ana sistem vasıtasıyla kullanıcı tarafından iletilen komutlar bağımlı sisteme aktarılırken eş zamanlı olarak bağımlı sistem algılayıcı verileri kullanılarak bağımlı sistem ortamının basitleştirilmiş bir modelini oluşturmak için ana sisteme güncellemeler iletilir. Bu yöntemde, bağımlı sistemden konum/kuvvet bilgilerinin iletilmesi yerine bağımlı sistem ortamının basitleştirilmiş bir modeli hakkında bilgiler iletilmektedir. Dolayısıyla kullanıcı ana sistem arayüzü (haptik ana sistem) iletişim hatalarından dolayı oluşabilecek kararsızlıklardan bağımsız olarak uzaktan varolma hissiyatı ile çalışır. Mitra ve Niemeyer'in sabit zaman gecikmeleri ile yaptığı testlerde de görüldüğü gibi bu yöntem ile sistemler arasında iletilen bilginin yükünü düşürürken teleoperasyon sisteminin bant genişliğini arttırmaktadır. Sonuç olarak, bu yöntemle iletişim kanallarındaki sabit zaman gecikmelerinden kaynaklanabilecek kararsızlığının azaltıldığı bildirilmiştir [93], [94].

Paralel konum/kuvvet denetleyicileri kuvvet geri-beslemesini de denetimde algoritmasında kullanılarak özellikle bulunduğu ortam ile fiziksel teması olan çalışmalarda daha güvenli ve başarılı bir denetim sağlamaktadır. Paralel konum/kuvvet denetleyicilerinde ölçülen kuvvet bilgilerinin kullanıldığı denetim döngüsü konum denetimine paralel olarak kullanılmaktadır. Empedans denetimi, admitans denetimi, hibrit paralel konum/kuvvet denetimi ve bu yöntemlerin güncellenmiş sürümleri de dahil olmak üzere birçok paralel konum/kuvvet denetimi algoritması geliştirilmiştir. Bu dene-

tim algoritmalarının uygulama alanlarından bir tanesi de iki yönlü teleoperasyon sistemleridir. İki yönlü teleoperasyon sistemlerinde bağımlı sistemin çalıştığı ortamdaki belirsizlikler (ortamdaki nesnelere sertlikleri ve konumları gibi) genellikle sistemde, özellikle ilk temas anında, kararsızlık problemleri yaratmaktadır. Söz konusu sorunların çözülmesi için empedans denetimleri [104], [105], konum/kuvvet denetim teknikleri, gürbüz empedans denetim algoritmaları [106], hibrit konum/kuvvet empedans denetimleri [107], uyumlu (adaptive) empedans denetimi [108], uyumlu admitans denetimi [109], ve tahmin–esaslı empedans denetimleri [110] geliştirilmiştir. Teleoperasyon sistemlerinde bu denetim yöntemlerinin uygulanmasındaki esas amaç ana ve bağımlı sistemler arasında olabildiğince iyi bir performans ile konum dışında kuvvet izleniminin de gerçekleştirilmesidir.

Bu çalışmanın amacı bağımlı sistemde bir paralel konum/kuvvet denetleyicisinin entegre edildiği, model aracılı teleoperasyon yöntemi ile bir denetim algoritması geliştirmek ve deneysel testlerini iletişim hataları oluşurken gerçekleştirmektir. Çalışmada geliştirilen denetim yönteminin doğrulaması ve işlevselliği, teleoperasyon sisteminin kararlılığını ve performansının sanal olarak yaratılan iletişim hatalarının varlığında gözlemlenmesi ile ölçülmüştür. Bunun için bağımlı sistemin yerel denetiminde paralel konum/kuvvet denetimsi (empedans denetimi) kullanılmış, model aracılı teleoperasyon algoritmasını kullanan üç serbestlik dereceli ve iletişim hatalarının yaşandığı bir durum için teleoperasyon denetimi geliştirilmiş ve Novint Falcon ve Sensable Phantom Haptic Desktop haptik cihazları kullanarak oluşturulan teleoperasyon sistemi ile deneyler gerçekleştirilmiştir.

Bir sonraki bölümde güncellenmiş model aracılı teleoperasyonun, yerel ve ana sistemin denetimleri anlatılmıştır. Üçüncü bölümde ise deneysel düzenek ve bunu izleyen bölümde deney sonuçları verilmektedir. En son bölüm ise deney sonuçları ve oluşturulan denetim üzerinde yapılan tartışmalar ve varılan sonuçlar için ayrılmıştır.

5.3.2 Önerilen denetleyicinin genel yapısı

Bu çalışmada kullanılan denetim yapısı Şekil 5.15’de gösterilmiştir. Genel olarak teleoperasyon sistemlerinde olduğu gibi, denetim yapısı bağımlı ve ana olmak üzere iki alt sisteme ayrılmıştır. Bu sistemler ve aralarındaki ilişkiler Şekil 5.15’de gözlemlenebilir. Bağımlı sistemdeki yerel denetleyici hareket iç döngüsü PID tipi denetleyici olan empedans denetimi kullanmaktadır. Hareket iç döngüsünde bağımsız eklem denetimi yapılmaktadır ve Koriyolis ve merkezkaç kuvvetleri bozucu etken olarak alınması suretiyle sadece yerçekimi kuvvetleri doğrusal olmayan etkenlerin devreden çıkarılması için denetime eklenmiştir. Empedans denetimin esas kullanılma amacı bağımlı sis-

temde ilk temaslarda yaşanabilecek hasarlardan korunmak ve bağımlı sistemin uzaktakiyle uyumlu çalışmasını sağlamaktır.

Ortogonal çalışma uzayı için koordinat sistemi sağ el kuralına göre \vec{x}^1 , \vec{x}^2 ve \vec{x}^3 birim vektörleri gözetilerek Şekil 5.15'de verilen parametreler aşağıdaki şekilde verilmiştir:

$$\begin{aligned}\dot{\vec{x}}_p &= [\dot{x}_p^1, \dot{x}_p^2, \dot{x}_p^3] : \text{Temsilci (Proxy) konum (hız) bilgisi} \\ \dot{\vec{x}}_s &= [\dot{x}_s^1, \dot{x}_s^2, \dot{x}_s^3] : \text{Bağımlı sistem konum (hız) bilgisi} \\ \dot{\vec{x}}_m &= [\dot{x}_m^1, \dot{x}_m^2, \dot{x}_m^3] : \text{Ana sistem konum (hız) bilgisi} \\ \dot{\vec{x}}_f &= [\dot{x}_f^1, \dot{x}_f^2, \dot{x}_f^3] : \text{Empedans terimi için düzeltme terimleri} \\ \bar{F}_c &= [\bar{F}_c^1, \bar{F}_c^2, \bar{F}_c^3] : \text{Yüzeye dik tepki kuvveti} \\ \bar{F}_m &= [\bar{F}_m^1, \bar{F}_m^2, \bar{F}_m^3] : \text{Ana cihaz üzerinden aktarılan kuvvetler} \\ \bar{\tau}_{ref} &= [\bar{\tau}_{ref1}, \bar{\tau}_{ref2}, \bar{\tau}_{ref3}] : \text{Referans eklem tork komutları}\end{aligned}$$

Çalışmada temas kuvvetleri hakkındaki bilgiler, alışlagelmiş olduğu gibi kuvvet algılayıcıları kullanmak yerine, önceden hesaplanmış tepki kuvvetleri tahmini verileri yardımıyla bağımlı sistemin içinde elde edilir. Bunu sağlamak için bağımlı cihazın çalışma alanı küçük parçalara bölünerek uç noktasının her ayrı parça içinde konumlandırılması için gerekli tork değerlerinden oluşturulan konuma bağlı veri seti oluşturulmuştur. Bağımlı sistem çalışırken bulunduğu konumda bu verileri kıyas alarak sistemin dinamiğine bağlı olarak tepki kuvvetlerini \bar{F}_c ile hesaplar. Bunun sonucunda hesaplanmış tepki kuvvetleri empedans denetimine kuvvet algılayıcısı çıktısı olarak geri beslenir. Ayrıca, hesaplanan tepki kuvvetleri, cihazın ilk defa temas ettiği bir yüzeyde bu yüzeyin konum (xs-yüzey) bilgilerini oluşturmakta ve ana sistemde bağımlı sistem ortamının modelinin güncellenmesinde kullanılmaktadır. Modeli oluşturmak için bağımlı sistemin temas haline geçildiği andaki konum kullanarak temas edilen nesnenin yüzeyi için gerekli bilgi edinilir.

Temas edilen ortamın empedansları (ortamdaki yüzeylerin sertlikleri gibi) da bağımlı sistem tarafından ölçülebilir veya hesaplanabilir. Fakat bu çalışmada çevresel empedansların modelde yaratımı kullanılmamıştır. Çalışmada ana ve bağımlı cihaz arasında bilgi iletimleri, cihazların kinematik yapıları farklı olduğu için, görev uzayında tanımlanmıştır.

Ana sistem tanımı içinde bağımlı sistemi temsil etmek üzere kendi dinamikleri ile bağımlı sistemin temsilcisi (proxy) yaratılır. Temsilci ana sistem içinde yaratılan bağımlı sistem ortamının basitleştirilmiş modeli ile etkileşim içindedir. Temsilcinin hareketleri, bağımlı sisteme komut ola-

arak aktarılır ve bağımlı sistemin yerel denetleyicisinde kullanılır. Temsilci ana sistemde sistemin pasifliğini sağlamak amacı ile bazı kısıtlamalar altında ana cihazın (kullanıcının kullandığı haptik cihaz) hareket isteklerini izlemekte ve ana sistemin taleplerini temsilci hareketleri ile \dot{x}_p bağımlı sisteme iletmektedir. Dinamik temsilcinin ve sanal modelin yaratımı, ana cihaza dolayısı ile kullanıcıya, iletişim gecikmeleri, iletişim kayıpları veya ortamın bilinmezliklerden oluşabilecek fazladan kuvvet aktarımlarını engellemede kullanılmaktadır [93], [111].

Ana sistem içinde temsilci bağımlı sistemin vekili olarak çalışmaktadır. Temsilci kullanıcı tarafından verilen hareket komutlarını sanal olarak oluşturulan dinamiği ile modelin kısıtlamaları içinde Mitra and Niemeyer [93] çalışmasında önerdiği gibi takip etmektedir.

Ana sistemde temas kuvvetleri temsilci ve ana sistemde yaratılan model üzerinden kullanıcıya iletilir. Kullanıcının hissettiği yani, kullanıcıya modelde gerçekleşen temaslar sonucu uygulanan kuvvetler, bağımlı sisteme de iletilip bağımlı cihazın kullanıcının uyguladığı kuvvetleri temas ettiği ortama aktarmasında kullanılır. Bu yöntem algoritmada hem konum hem de kuvvet izlenimini sağlar. Eğer çalışma sırasında hiçbir temas yok ise denetim algoritması sadece konum denetimi olarak çalışır. Kuvvet denetimi sadece çarpmalar ve temaslarda devreye girer. Eksi işaretli ana sistem kuvvet isteklerinin kuvvet okumalarını değiştirip ana sistemden iletilen kuvvetin ortama uygulanması Şekil 5.15'de bağımlı sistemin empedans terimi girişinde gösterilmiştir. Ana sistem ve bağımlı sistem alt denetleyicileri önceki bölümde detaylı olarak anlatılmıştır.

5.3.3 Çoklu serbestlik derecesinde model oluşturulması ve güncellenmesi

Önerilen algoritmada model oluşturulması için güncelleme akışı Şekil 5.16'de gösterilmiştir. Çalışmada model güncellemeleri, bağımlı sistem tarafında ortamlarla temas sonucunda oluşan/hesaplanan tepki kuvvetleri ve uç noktası konum ölçümleri sayesinde elde edilen, ortamdaki nesnelerin görev uzayındaki yüzeyleri hakkında bilgilerden oluşmaktadır.

Model oluşturulması için bağımlı cihazın çalışma alanı \vec{x}^1 , \vec{x}^2 ve \vec{x}^3 eksenlerinde parçalara ayrılmıştır. Böylece herhangi bir eksen yönünde parçalara ait yükseklik bilgileri diğer iki eksene bağlı olarak yaratılır. Bağımlı cihazın ortamlarla temasa geçtiği bilgisi daha önceden bahsi geçen kuvvet ölçme/hesaplama yöntemi ve belirli bir yönde cihazın uç noktasının hızının sıfırlanması bilgisi kullanılarak oluşturulur. Algoritmada bağımlı sistemde ortam ile temasın gerçekleştiği tah-

mini olarak hesaplandığında, konum bilgileri ana sisteme modelin oluşturulması ve güncellenmesi için iletilir. Söz konusu güncellemeler ancak bağımlı sistem, ortamda farklı bir yüzeye veya konumu değişen bir yüzeye temas ettiğinde oluşturulur. Böylece bağımlı sistemden gelen bildirimler doğrudan denetim yöntemine kıyasla daha az sıklıkla iletilmekte ve gecikmelerden kaynaklanacak pasifsizliği bozucu etkenler engellenmektedir.

Bağımlı cihazın çalışma uzayı 10 mm boyutunda küplere bölünerek ayrılmıştır. Küplerin 10 mm olmasının nedeni bağımlı cihazın uç noktasının fiziksel boyutudur. Sonuç olarak çalışma uzayı ayrılan bölgeler kullanarak katı yüzeylerin modellenmesinde kullanılır. Şekil 5.16'de sanal yüzey modelinin çalışma uzayında nasıl yaratıldığı gösterilmiştir. Uç noktasının bulunduğu bölgede cihaz temas geçerse bölge içerisinde yüzey tanımlanmış olur. Model güncellemeleri ile bu yeni tanımlanan yüzey kullanılmaktadır. Eğer önceden yaratılmış bir yüzey tekrar temas bilgisi alınmazsa o bölgedeki yüzey güncelleme ile silinir.

Temsilci, oluşturulan modelin kısıtlamaları içinde hareket ederken bir yandan model güncellemeleri alınmakta ve modelde dinamik olarak uygulanmaktadır. Bu çalışmada model güncellemeleri yüzey tanımlama, yok etme ve nesnenin kaydırılması şeklinde uygulanmıştır. Şekil 5.16'de gösterildiği gibi temsilci, sanal olarak yaratılan modelin kısıtlamaları içinde (sanal yüzeylerin içinden geçemeyecek şekilde) ana cihazı takip ederken, bağımlı cihaz kendi ortamında gerçek yüzeylerle gecikmeli olarak çalışmaktadır.

5.3.4 Deney düzeneği

Denetim çalışmalarının deneyleri ana ve bağımlı cihazlardan, sanal model, bağımlı ve ana sistem denetimleri ve model aracılı algoritmadan oluşan teleoperasyon sistemi ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.17'da verildiği gibi, ana sistemde 3 serbestlik dereceli paralel mekanizmalı bir haptik masaüstü cihazı olan Novint Falcon ana cihaz, ve bağımlı sistemde ise seri mekanizmaya sahip olan Phantom Desktop bağımlı cihaz olarak kullanılmıştır. Dolayısıyla, deney düzeneğinde, kinematik olarak birbirlerinden oldukça farklı olan ana ve bağımlı robotlar kullanılmıştır. Algoritmanın uygulamaları ve gerçek zamanlı deneyler Real-Time Windows Target ile MATLAB Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir.

Haptik cihazların denetiminin uygulanmasında programlama arayüzü olarak MATLAB Simulink ortamında üçüncü bir kuruluş ürünü olan QuaRC yazılımı kullanılmıştır. Bu yazılım, gerçek zamanla senkronize şekilde cihazlarda bulunan algılayıcı bilgilerini okuyan ve eyletici komutlarını ile-

ten blokları içermektedir. Her iki cihazın eyleticilerine komutlar eklem uzayında veya görev uzayında, kullanılan blokların içinde yer alan mekanizmaların kinematik hesaplamaları kullanılarak iletelebilmektedir. Bağımlı cihaz için eyletici komutları eklem uzayında gönderilmekte iken ana cihazda eyletici komutları görev uzayında iletilmektedir.

Ana sistemde, model aracılı yöntem ile tahminsel olarak oluşturulan model testler sırasında görsel olarak kullanıcıya uzakta bulunan ortamın basitleştirilmiş 3 boyutlu modeli olarak oluşturulmuştur. Söz konusu sanal görsel geri-besleme QuaRC blokları ile program içerisinde sanal gerçeklik görüntüsü olarak oluşturulmaktadır. Deneyler boyunca basitleştirilmiş modeli gerçek zamanlı olarak kullanıcıya sanal gerçeklik modeli ile sunulmuştur.

5.3.5 Test sonuçları

Bu çalışmada, bağımlı cihazın çalışma alanında ilk defa karşılaştığı fiziksel bir yüzey ile çarpışması ve bu çarpışma sonunda tanımlanan model ile etkileşimlerini içeren bir senaryo test edilmiştir. Testte fiziksel bir nesne, test başladıktan sonra cihazın çalışma alanına yerleştirilmiş ve etkileşimleri gözlemlenmiştir.

Testler boyunca kullanıcıya sanal model görsel geri-beslemesi, sanal cihazın temselsel uç noktası ve ilk temas sonucunda tanımlanan nesnenin yüzeyleri olarak oluşturulmuştur. Böylece kullanıcının algısı çalıştığı temsilcinin görsel oluşturulması ile artırılmıştır.

İletişim hatalarının olduğu durumda teleoperasyon testi

İletişim kopukluklarının uygulandığı testte ayrıca iletişim gecikmesi de 0.7 ve 2 saniye arasında değişken olarak sisteme verilmiştir. Sistem beşinci ve yedinci saniyeler arasında iletişim kaybına maruz kalmıştır. Test sonuçları Şekil 5.19'te ana cihazın uç noktasının ve bağımlı cihazın uç noktasının \vec{x}^3 ekseninde zamana bağlı konum değişimi olarak gösterilmiştir. Bu örnekte nesnenin \vec{x}^3 eksenindeki yüzeyi ile bağımlı cihazın ana cihazdan iletilen komutlar doğrultusunda etkileşimleri incelenmektedir.

Şekil 5.18'te görülebileceği gibi ilk çalıştırmadan itibaren bağımlı cihazın gecikme ile ana cihazdan iletilen konum komutlarını izlediği görülmektedir. Bağımlı cihaz ilk inişte ($-z$ ekseni yönündeki hareketinde), nesne çalışma alanına yeni konulduğunda, -20 mm'de bulunan nesnenin yüzeyi ile temas haline geçer. Bu çarpışma sonucu elde edilen temas yüzeyinin konum bilgisi gecikme

ile model güncellemesi olarak model aracılı yöntem kullanılarak ana sisteme aktarılır. İlk temas ardından iletişim kopukluğu hatası sonucu bağımlı sistem 8'inci saniyeye kadar konumunu korur ve bilgi tekrar iletilmeye başlandığında hareketine devam eder. 8'inci saniyeden sonra gerçekleşen temaslarda nesnenin yüzeyinin konum bilgisi ile ana sistemde nesnenin haptik geribildirimini yaratılır. Böylece kullanıcı, yaratılan basitleştirilmiş sanal modelde nesnenin yüzeyi ile olan teması temsilci aracılığı ile gözlemlemekte ve temasta oluşan kuvvetleri hissetmektedir. Şekil 5.18'te oluşturulan model sayesinde kullanıcının hareketlerinin \bar{x}^3 ekseninde tanımlanan yüzey konumu ile sınırlandırıldığı ve bağımlı sistemin ana sistemdeki sanal model ile etkileşimler sonucunda gecikme ile ana cihaz hareketlerini takip ettiği gözlemlenmektedir.

Şekil 5.19'te önerilen algoritmanın 3 boyutlu uzayda gerçekleştirdiği konum izleme performansı verilmiştir. Bağımlı konumu bağımlı cihazın uç noktasının izlediği yörüngeyi, temsilci konumu ise kullanıcı hareketleri izleyen temsilcinin yörüngesini göstermektedir. Bu testte de teleoperasyon sistemi iletişim gecikmelerine mağruz bırakılmıştır. Test sonucundan konum izleme hatasının 1mm içinde kaldığı gözlemlenmiştir.

Şekil 5.19'te ilk çarpışmada gözlemlendiği gibi model üzerinde henüz yüzey ait bir bilgi olmadığı için temsilci yüzeyin altında da çalışabilmektedir. İlk temas ile bağımlı sistemden yüzey konumu bilgisi aktarıldıktan sonra ana sistemdeki model altında sanal yüzey yaratılır. İkinci temas sırasında model içerisinde sanal yüzey yaratılmış olduğu için temsilci yüzeyi geçememektedir. Bunun sonucunda temsilci ana cihaz ile hareket ettiren kullanıcıya kuvvetler yansıtılır.

Empedans denetimi testi

Empedans denetiminin etkisini gösterebilmek için iletişim gecikmesi ile teleoperasyon sisteminin empedans denetimi ve empedans denetimi olmadan sade hareket denetimi ile gösterdiği tepkiler sunulmuştur. Bu örnekte bağımlı sistem, ana sistemin komutlarını 0.7 saniye sabit bir gecikme ile izlemektedir. Şekil 5.20'da ana sistem tarafından uygulanan kuvvet ve bağımlı sistemin empedans ve empedans denetimi olmadan aynı komuta göre kuvvet takibi gösterilmiştir. 5'inci saniyede bağımlı sistem fiziksel yüzeye çarpar ve gecikme ile bu yüzeyin konum bilgisi ana sisteme aktarılır. Ana sistemde modelin içinde sanal yüzey yaratılarak kullanıcının bu yüzey ile etkileşimleri gecikme ile bağımlı sistemine aktarılır. 5'inci ve 9'uncu saniyeler arasında ana sistemden iletilen konum istekleri doğrultusunda bağımlı cihaz uzak ortamdaki nesnenin yüzeyi ile temasını sürdürmektedir.

Empedans denetimi olmadan elde edilen sonuçta yüzeyle temas halinde iken bağımlı cihazın

nesneye nispeten daha fazla kuvvet uyguladığı görülmektedir. Empedans denetiminin kullanılmadığı senaryoda, bağımlı sistemin ortama uyguladığı kuvvet bağımlı cihaza zarar vermemek amacı ile 2N ile sınırlandırılmıştır. Ana sistemde model güncellemesi gerçekleştirildikten sonra kullanıcı tarafından yaratılan sanal yüzeye karşı uygulanan kuvvet bağımlı sisteme aktarılır. Bağımlı sistemde bu kuvvetin ortamdaki nesneye uygulanması için her bir ekleme uygulanması gereken tork değerleri hesaplanır ve bağımlı cihazın hareketi için eklem uzayında hesaplanan tork değerlerine eklenir.

Empedans denetiminde ortama bağımlı cihaz tarafından uygulanması istenen kuvvetler ölçülen kuvvetlerden çıkarılmak suretiyle ölçülen kuvvet değeri güncellenir. Bu şekilde tekrar hesaplanan kuvvet geribildirim, empedans terimi kullanılarak, bağımlı cihazın yapması beklenen hareketi günceller. Empedans denetimi ile gerçekleştirilen testin sonuçlarında ilk çarpışma ile yüzeye uygulanan kuvvetin olabildiğince sönümlendirildiği ve ortama uyum sağlandığı görülmüştür. Yine de ilk temas halinde empedans denetiminde de başlangıçta bir salınım gözlemlenmiştir. Bahsi geçen sönümlenme performansı empedans teriminin parametrelerinin değiştirilmesi ile iyileştirilebilir. Ayrıca empedans denetimi olmadan yapılan testin sonuçları ile karşılaştırıldığında kuvvet izlenim performansının da arttırıldığı görülmektedir.

5.3.6 Sonuçlar

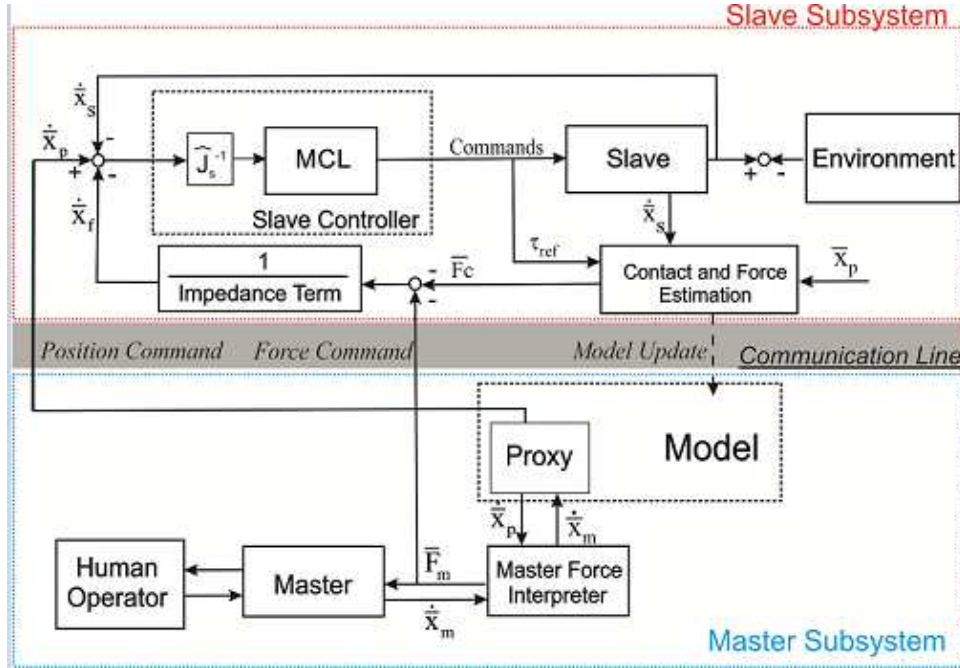
Bu çalışmada model aracılı teleoperasyon yöntemi iletişim hatalarına maruz kalan bir teleoperasyon sistemine uygulanmıştır. Oluşturulan algoritma, masasüstü haptik cihazları ile oluşturulan teleoperasyon sistemi kullanılarak gerçek zamanlı testler ile sınanmıştır. Model aracılı teleoperasyon yöntemi bu çalışma ile 3 serbestlik derecesinde çalışacak şekilde uygulanmıştır. Önemle vurgulamak isteriz ki model aracılı denetim yöntemi üzerine bilimsel yazında yapılan geçmiş çalışmalar tek serbestlik derecesiyle kısıtlıydı.

İletişim hatalarından kaynaklanabilecek kararsızlıkların giderilmesi dışında bağımlı cihazın özellikle ortama ilk temasında büyük kuvvetlerin oluşmasını engellemek amacı ile empedans denetimi bağımlı cihazın yerel denetleyicisi olarak sınanmıştır. İlk temas sırasında empedans denetiminde çalışan sistemde ortaya çıkan kuvvetler empedans denetimi olmayan çalışma ile kıyaslanmıştır.

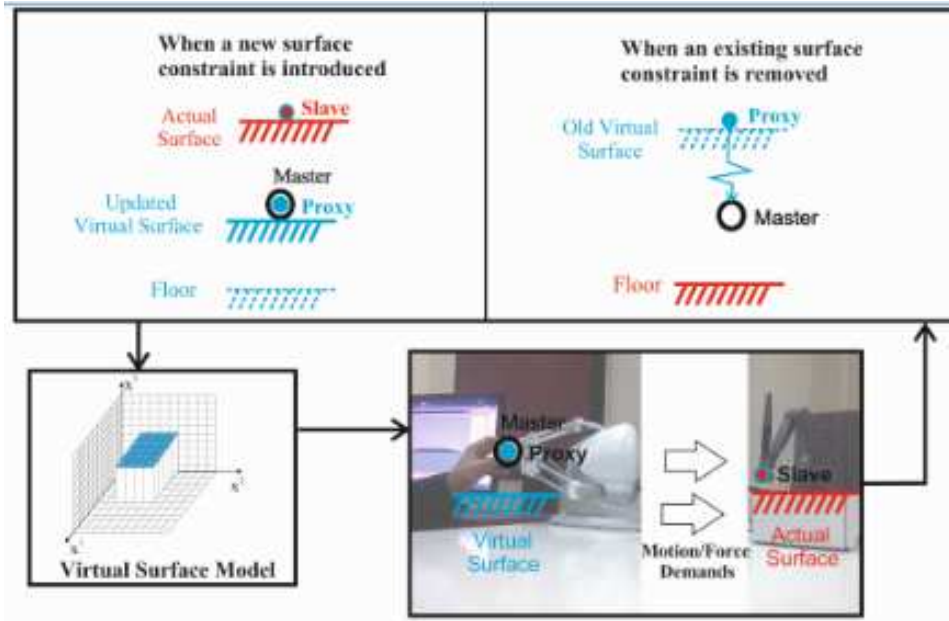
İletişim hatalarından kaynaklanabilecek kararsızlıklardan dolayı oluşabilecek zararlardan korunmak için model aracılı yöntem uygulanmıştır. Değişken iletişim gecikmesine ve kaybına maruz bırakılarak gerçekleştirilen testlerden konum takibi sonuçları elde edilmiştir.

Değişken zaman gecikmelerinin ve bilgi kayıplarının yaşandığı durumda teleoperasyon denetim sisteminin kararlılığını koruduğu ve gecikme ile ana sistemden iletilen komutları güvenli bir şekilde (ortama en az kuvvet ileterek) gerçekleştirdiği gözlemlenmiştir. Buna ek olarak bağımlı cihazda kullanılan empedans denetiminin bağımlı cihazın özellikle ortamda bilinmeyen nesnelere etkileşimde uygulayabileceği kuvvetlerin azaltılması empedans denetimi olmayan çalışmaya göre sağlamıştır. Empedans denetiminde kuvvet izleniminde belirli bir hata ile ana cihazdan iletilen kuvvet isteği izlenmektedir. Bunun bir sebebinin kuvvet algılayıcısının kullanılmaması ve oluşan kuvvetlerin önceden elde edilen veriler doğrultusunda bağımlı cihazın tork isteklerinin kıyaslanması ile hesaplanması olduğu değerlendirilmiştir.

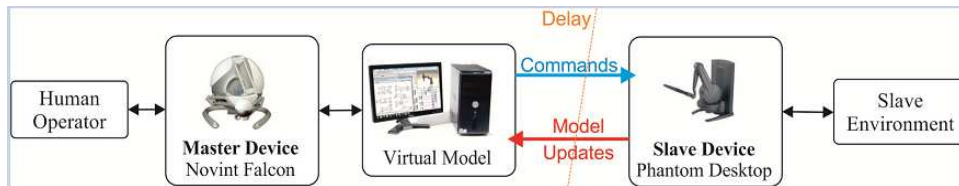
Bu çalışmada model aracılı yöntemin özellikle bağımlı sistemin içinde çalıştığı ortamın kısıtlarının (ortamdaki nesnelere yerleri veya şekillerinin) sık olarak değişmediği durumlarda, sistemin pasifliğinin iletişim hatalarına rağmen korunduğu ve operasyonun performansının geliştirildiği gözlemlenmiştir. Özellikle empedans denetimi ile model aracılı denetim yönteminin birlikte kullanılması ile daha güvenli bir teleoperasyon sistemi geliştirilebileceği görülmüştür.



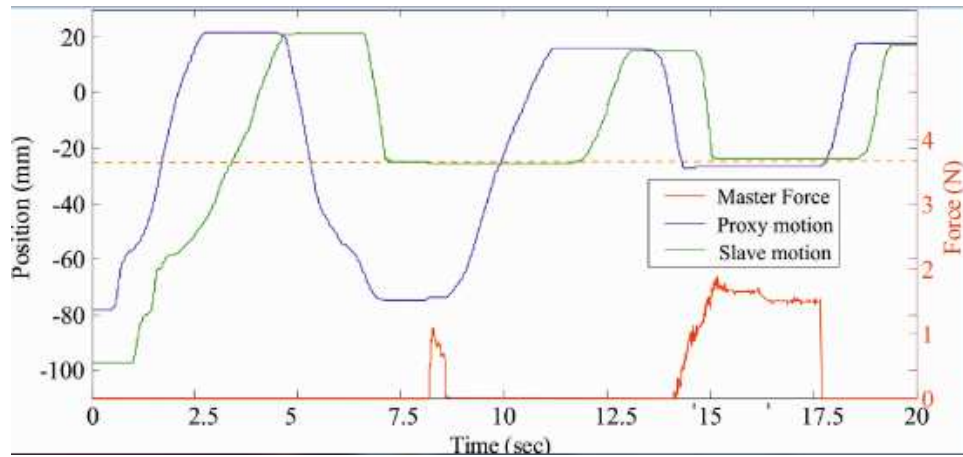
Şekil 5.15: Model aracılı teleoperasyon denetim yapısı



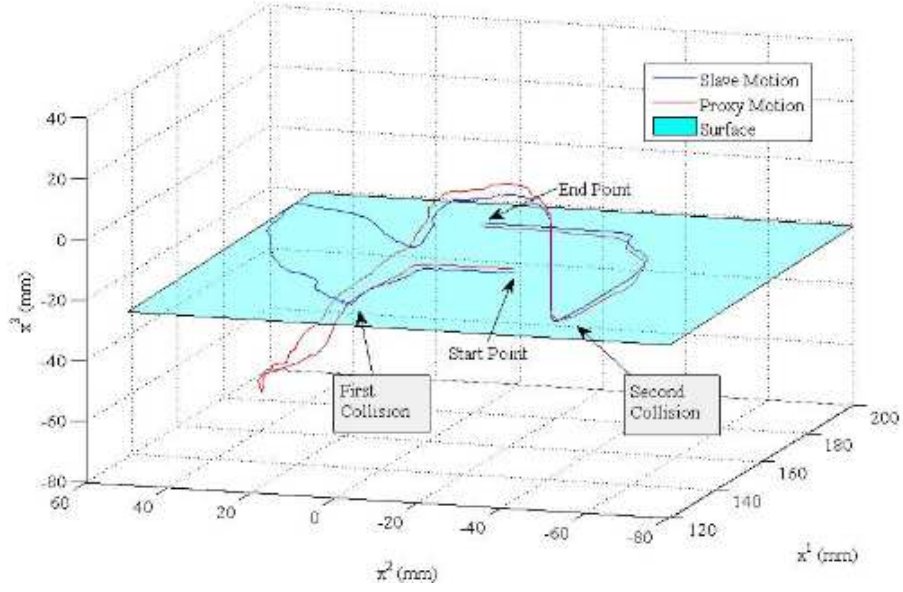
Şekil 5.16: Model oluşturma akış şeması



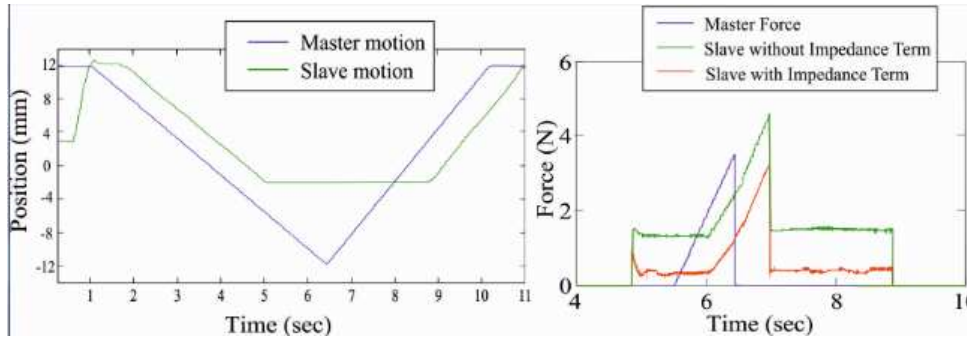
Şekil 5.17: Deney düzeneği



Şekil 5.18: Değişken zaman gecikmesi ve iletişim hatalarında konum takibi



Şekil 5.19: 3 boyutlu teleoperasyon için konum takibi



Şekil 5.20: (a) Empedans testi konum takibi (b) Empedans testi kuvvet takibi

5.4 Sonuçlar

Bu bölümde elde edilen sonuçların bir kısmı altta detayları verilen dergide yayına kabul edilmiş olup basım aşamasındadır:

- E. Uzunoğlu & M. İ. C. Dede, “Extending Model-Mediation Method to Multi-Degree-of-Freedom Teleoperation Systems Experiencing Time Delays in Communication,” *Robotica*, 2015, accepted, to appear, doi:10.1017/S0263574715001010.

Bu bölümde elde edilen sonuçların bir kısmı altta detayları verilen ulusal konferanslarda sunulmuştur:

- K. M. Doğan, M. Deniz, M. İ. C. Dede, & E. Tatlıcıoğlu, “Sabit ve Değişken Zaman Gecikmeleri ile Baş Eden İki Yönlü Doğrudan Teleoperasyon ve Model Aracılı Denetim,” *Otomatik Kontrol Türk Milli Komitesi Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı (TOK’15)*, 873-878, Denizli, Eylül 2015.
- B. Taner, M. İ. C. Dede, & E. Uzunoğlu, “Applying Model Mediation Method to a Mobile Robot Bilateral Teleoperation System Experiencing Time Delays in Communication,” *Proc. TrC IFToMM Symposium on Theory of Machines and Mechanisms*, 577-585, Izmir, Turkey, 2015.

6. GTÜ ve İYTE arasında gerçekleştirilen telerobotik deney çalışmalarının sonuçları

Telerobotik deney çalışmalarımız birbirinden gayet uzak mesafede bulunan iki laboratuvar arasında gerçekleştirilmiştir. Bu laboratuvarlardan biri İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü Kontrol laboratuvarı ve diğeri ise Gebze Teknik Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü Kontrol Uygulamaları ve Robotik laboratuvarıdır. Yapılan çalışmalarda İzmir'deki Phantom omni haptik cihazı bağımlı robot olarak ve Gebze'deki Haptic Wand haptik cihazı ise ana robot olarak kullanılmış olup ve aralarındaki TCP/IP tabanlı haberleşme bağlantısı her iki üniversitenin Bilgi İşlem Dairelerinden alınan izinle özel olarak ayrılmış birer port ve kalıcı internet protokolü (IP) numaraları kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Şekiller 6 ve 7 gösterilen Gebze'de kullanılan ana robot Quanser'in 5 serbestlik dereceli Haptic Wand haptik cihazıdır. Haptic Wand robotu bir çift mekanik alet düzeneği ile 3 öteleme ve 2 dönme hareketine sahiptir. Her bir mekanik düzenek biri omuzlarında diğeri belinde daha güçlü olan 2'şer DC motor ile direkt olarak sürülür. Haptic Wand cihazının kontrol uç noktası her iki mekanik düzeneğin her iki uç noktasına evrensel eklemler üzerinden bağlanmıştır. Haptic Wand cihazının arayüzünü ve kinematik hesaplamalarını yapmak için Matlab/Simulink içindeki Quarc kütüphanesi deneysel çalışmalarda kullanılmaktadır.

İzmir'de kullanılan bağımlı robot ise Sensable'ın 6 serbestlik dereceli Phantom Omni haptik cihazıdır. 2 kollu Phantom Omni cihazı 3 öteleme yönünde (x, y, z) hareketini gerçekleştiren 3 aktif kol eklemi ve 3 dönme yönünde hareketini sağlayan 3 pasif bilek eklemine sahiptir. Phantom Omni cihazının x, y ve z yönlerinde uç noktasını ölçmek için eklem noktalarında sayısal kodlayıcılara sahiptir. Phantom Omni cihazının arayüzünü ve bilgisayar ile bağlantısını sağlamak için Matlab/Simulink içindeki Quarc kütüphanesi deneysel çalışmalarda kullanılmaktadır.

Yaptığımız deneysel çalışmalarda ana ve bağımlı robotların bağlı olduğu bilgisayarlarda Matlab/Simulink programları sabit adımlı ve $100Hz$ veri hızında çalıştırılmıştır. Gebze'deki ana ro-

botun İzmir'deki bağımlı robota görev uzayında ve eklem uzayında istenen hareketleri yapması için sadece komut göndererek tek taraflı kontrol uygulaması gerçekleştirilmiştir. TCP/IP tabanlı gerçekleştirdiğimiz telerobotik deneylerimizde gözlemlediğimiz gecikme bir yönde ortalama 0.01 saniye olarak ölçülmüştür. Yapılan 3 farklı deneysel çalışmalar ve elde edilen sonuçlar takip eden bölümlerde detaylı bir şekilde anlatılmaktadır.

6.1 Gerçek ana ve sanal bağımlı robotlar arasında görev uzayında denetim deneyi

Gebze'deki Haptic Wand haptik cihazı tarafından gönderilen görev uzayındaki hız bilgisinin İzmir'de sanal bir robot (Phantom Omni haptik cihazın modeli) tarafından alınarak ve bu bilginin integrali alınarak görev uzayında istenen pozisyonun takibi gerçekleştirilmiştir. Bu deneysel çalışmada Bölüm 2.1'de artık robot kolları için tasarlanan görev uzayı denetleyicisindeki artıklığın kaldırılması ile elde edilen görev uzayı denetleyicisi tercih edilmiştir. Sanal robot modeli olarak gelecek çalışmalara altyapı hazırlamak amacıyla Phantom Omni cihazın modeli kullanılmıştır. Kullanılan dinamik model her ne kadar önceki raporlarda verilmiş olsa da bu raporun bütünlüğü adına Ek H'de de sunulmuş olup, kinematik model aşağıdaki gibidir

$$x(t) = \begin{bmatrix} X(t) \\ Y(t) \\ Z(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -s_1(l_1c_2 + l_2s_3) \\ -l_2c_3 + l_1s_2 + l_y \\ c_1(l_1c_2 + l_2s_3) - l_z \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

burada $l_1 = 0.133\text{m}$ ve $l_2 = 0.133\text{m}$ sırasıyla birinci ve ikinci kol uzunluklarını belirtir, $l_y = 0.023\text{m}$ ve $l_z = 0.168\text{m}$ kinematik modeldeki y ve z eksenlerini denkleştirmek için öteleme miktarlarını temsil eder.

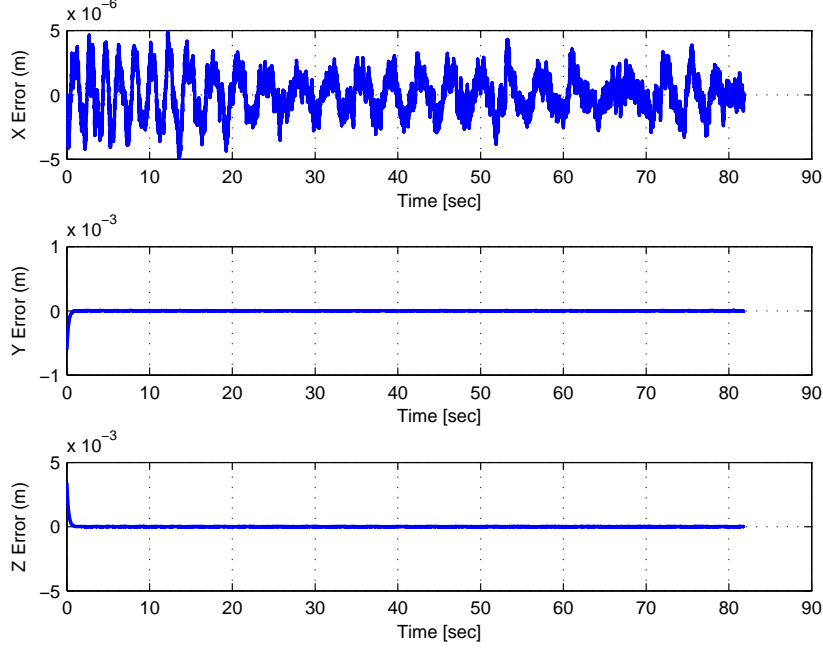
Kullanılan denetleyici (2.20)'den elde edilmiş olup altta verilmiştir

$$\tau = Y\phi + K_r r + J^T e. \quad (6.2)$$

Üstteki denetleyicide kazançlar $\alpha = 5I_3$ ve $K_r = 2I_3$ seçilmiştir.

Yapılan bu deney çalışmasında görev uzayında pozisyon takip hatası Şekil 6.1'de ve ana ve bağımlı robotların uç noktalarının pozisyonları Şekil 6.2'de gösterilmektedir. Şekil 6.1'den görüldüğü üzere

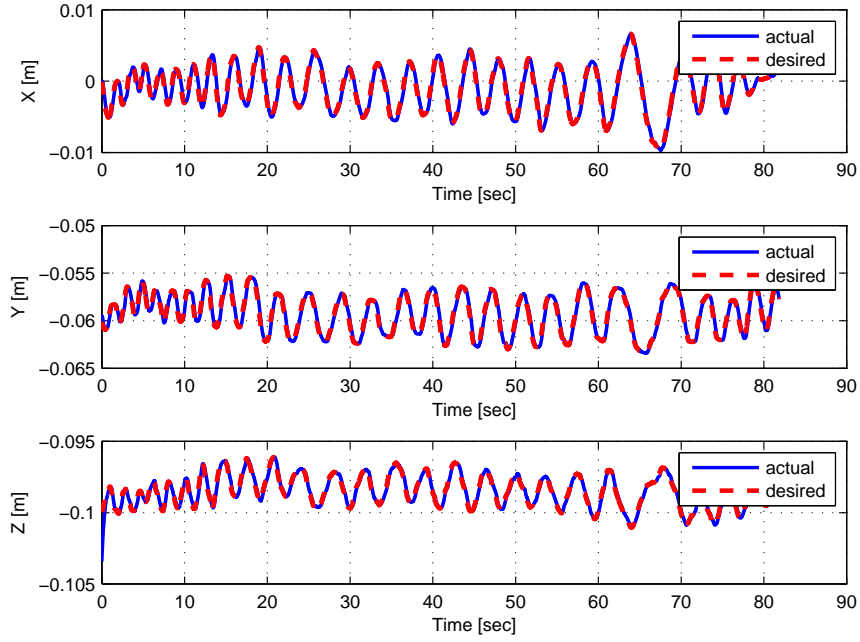
takip hatası oldukça düşüktür ve Şekil 6.2'ye göre İzmir'deki sanal bağımlı robot her üç ekseninde Gebze'deki gerçek Haptic Wand haptik cihazının hareketini takip etmiştir.



Şekil 6.1: Gerçek ana ve sanal bağımlı robot arasındaki görev uzayı takip hatası

6.2 Gerçek ana ve gerçek bağımlı robotlar arasında eklem uzayındaki denetim deneyi

Gebze'de gerçek bir ana robot olarak kullanılan Haptic Wand cihazı 3 ekseninde hareket ettirilerek eklemlerin hızları takip edilmesi istenen bilgi olarak İzmir'de gerçek bir robot olarak kullanılan Phantom Omni cihazına gönderilmiştir. Alınan hız bilgisinin integrali alınarak eklemler için istenen pozisyon bilgileri elde edilmiştir. Bağımlı robot tarafında tüm dinamik ve kinematik modelin bilindiği ve eklem açılarının ölçüldüğü ve hız bilgisinin de gözlemleyici ile kestirildiği bir eklem uzayı denetleyicisi tasarlanmıştır. Bu denetleyici Bölüm 3.1'de tasarladığımız öğrenmeli çıkış geri-beslemeli denetleyicinin robotun dinamik modelinin bilindiği durumdaki hali olup (3.11)'de \hat{W} terimi yerine



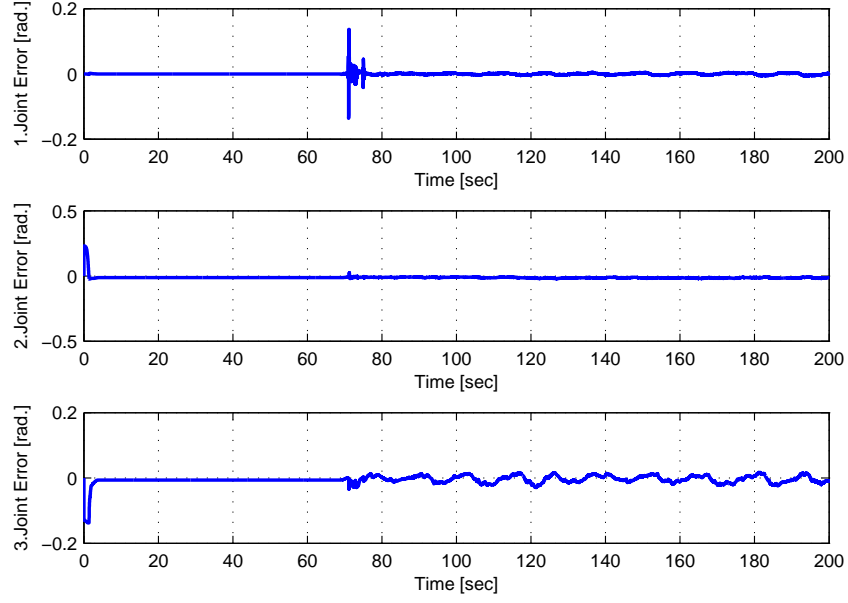
Şekil 6.2: Gerçek ana ve sanal bağımlı robotların görev uzayındaki hareketleri

öğrenmeye çalışılan W_d terimi kullanılmıştır. Denetleyicinin yapısı altta paylaşılmıştır

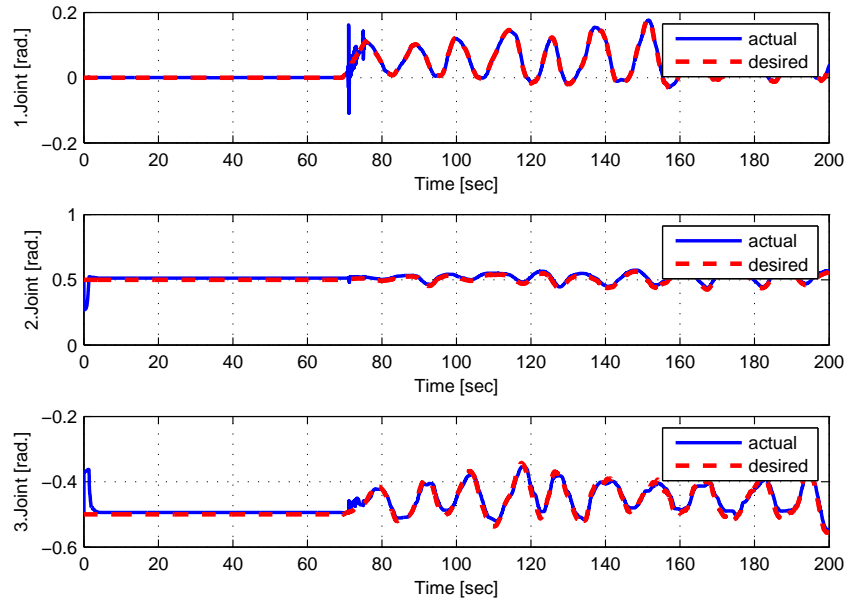
$$\tau = \hat{W} + k_p e + k_c \alpha (\theta_d - \hat{\theta}) + k_c (\dot{\theta}_d - \dot{\hat{\theta}}). \quad (6.3)$$

Üstteki denetleyicide ve (3.9) ve (3.10)'de tasarlanan hız gözlemlecinde kazançlar $K_p = \text{diag}([30; 16; 5])$, $K_c = \text{diag}([0.048; 0.12; 0.16])$, $K_0 = \text{diag}([80; 60; 40])$, $K_1 = 10I_3$, $K_2 = 10I_3$, $\alpha = 2I_3$ seçilmiştir.

Yapılan bu deney çalışmasında eklem uzayında pozisyon takip hatası Şekil 6.3'de ve ana ve bağımlı robotların eklem pozisyonları Şekil 6.4'de gösterilmektedir. Şekil 6.3'den görüldüğü üzere takip hatası oldukça düşüktür ve Şekil 6.4'ye göre İzmir'deki Phantom Omni haptik cihazının üç eklemi Gebze'deki Haptic Wand haptik cihazının eklem pozisyonlarını takip etmiştir.



Şekil 6.3: Gerçek ana ve gerçek bağımlı robot arasındaki eklem uzayı takip hatası



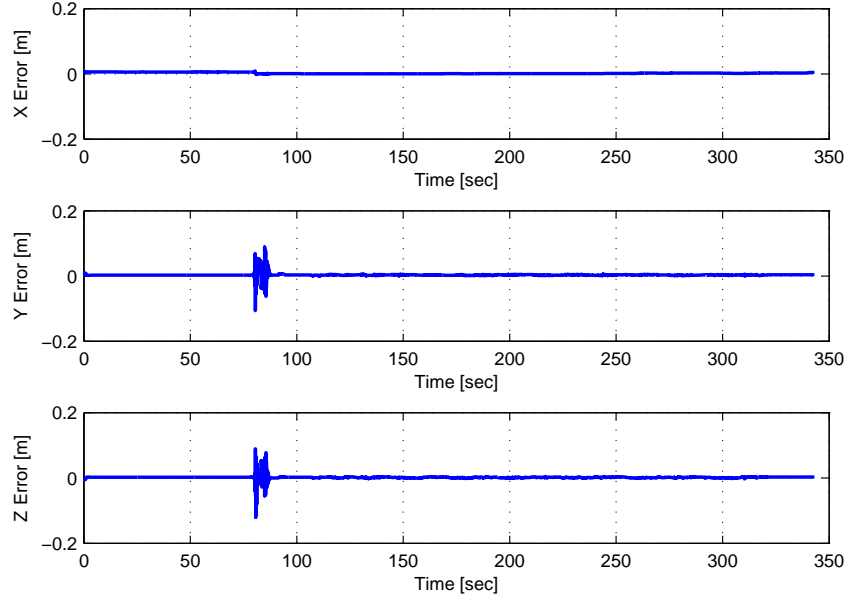
Şekil 6.4: Gerçek ana ve gerçek bağımlı robotların eklem uzayındaki hareketleri

6.3 Gerçek ana ve gerçek bağımlı robotlar arasında görev uzayındaki denetim deneyi

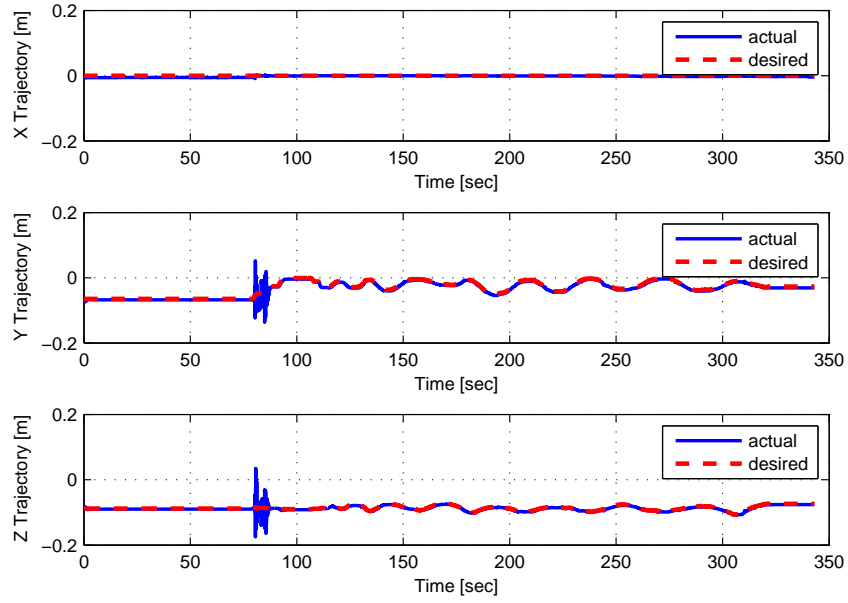
Gebze'de gerçek bir ana robot olarak kullanılan Haptic Wand cihazı hareket ettirilerek uç noktasının x, y, z yönlerindeki hızları takip edilmesi istenen bilgi olarak İzmir'de gerçek bir robot olarak kullanılan Phantom Omni cihazına gönderilmiştir. Alınan hız bilgisinin integrali alınarak robot uç noktası için istenen pozisyon bilgileri elde edilmiştir. Bağımlı robot tarafında dinamik modelin bilinmediği, eklem açılarının ölçüldüğü ve hız bilgisinin de çıkış geri besleme gözlemleyicisi ile kestirildiği bir görev uzayı gürbüz denetleyicisi tasarlanmıştır.

Bu deneysel çalışmada Bölüm 2.4'de sunmuş olduğumuz model bilgisinden bağımsız çıkış geri-beslemeli görev uzayı denetleyicisi kullanılmıştır. Denetleyici ve yüksek kazançlı hız gözlemcisinin kazançları $\alpha_1 = 10I_3$, $\alpha_2 = 10I_3$, $K = \text{diag}([48; 32; 24])$, $\epsilon = 0.95$ seçilmiştir.

Yapılan bu deney çalışmasında görev uzayında pozisyon takip hatası Şekil 6.5'de ve ana ve bağımlı robotların uç noktalarının pozisyonları Şekil 6.6'de gösterilmektedir. Şekil 6.6'e göre İzmir'deki bağımlı robot olarak kullanılan Phantom Omni haptik cihazı x, y, z ekseninde Gebze'deki ana robot olarak kullanılan Haptic Wand haptik cihazının hareketini takip etmiştir. Öte yandan Şekil 6.5'den de görüldüğü gibi hata dinamik modelin bilinmediği ve bağımlı robotun hız bilgisinin ölçülmediği duruma göre oldukça düşüktür.



Şekil 6.5: Gerçek ana ve gerçek bağımlı robot arasındaki görev uzayı takip hatası



Şekil 6.6: Gerçek ana ve gerçek bağımlı robotların görev uzayındaki pozisyonları

7. Sonuçlar ve tartişma

Proje kapsamında gerçekleştirilen çalışmalar bu raporda anlatılmıştır. Bölüm 2'de telerobotik sistemlerde de kullanılabilir görev uzayı denetleyicileri geliştirilmiştir. Bölüm 2.1'de artık robot kolları için dinamik ve kinematik modelin bilindiği, eklem pozisyon ve hızlarının lldği durumda bir görev uzayı denetleyicisi tasarlanmıştır. Bu denetleyici yine aynı bölümde dinamik modeldeki parametrik belirsizliklerle başa çıkmak için uyarlamalı denetleyici de tasarlanmıştır. Bu iki denetleyicinin bilimsel yazına kattıkları en önemli yenilik ikincil görev hedefinde asimptotik kararlılık elde edilmesi olmuştur. Bölüm 2.2'de ise robotların dinamik modellerinde karşılaşılan yapısı belli olmayan belirsizliklerle mücadele etmek için öğrenme tabanlı görev uzayı denetleyicisi geliştirilmiştir. Bu alışma ile Bölüm 2.1'de elde edilen sonuçlar bir adım ileriye götürülerek dinamik modeldeki yapısı belli olmayan belirsizlikler de mücadele edilebilmiştir. Bu çalışmanın bilimsel yazındaki benzerlerinden en önemli farkı ise pozisyon seviyesinde ters kinematik bilgisine ihtiyaç duymamasıdır. Ardından, Bölüm 2.3'te robotun dinamik modelinde yapısı belli olmayan belirsizlikler ve kinematik modelinde ise parametrik belirsizlikler olduğu durumda görev uzayı denetleyicisi tasarlanmış ve Phantom omni haptik cihazı ile gerçekleştirilen deneylerle başarımı gösterilmiştir. Ayrıca yine bu bölümde bilimsel yazına önemli katkılarımızdan birisi olan denetleyicilerin kazançlarını öz ayarlamalı yapıya kavuşturan yöntemimiz de deneysel olarak sınanmıştır. Bölüm 2.2'de tasarlanan denetleyici ile karşılaştırıldığında bu bölümde tasarladığımız denetleyici Jakobiyen matrisinin tam olarak bilinmesi gereksinimi ortadan kaldırmıştır. Bölüm 2.4'te ise robotun dinamik ve kinematik model bilgisine ihtiyaç duymayan ve ilaveten robotun eklem pozisyon ve hız ölümlerini de gerektirmeyen sadece robotun uç noktasının pozisyon ve yöneliminin lldği durumda yeni bir görev uzayı denetleyicisi tasarlanmıştır. Hız ölümlerinin eksikliği yüksek kazançlı hız gözlemcisi tasarımıyla aşılmıştır. Bu bölümde tasarlanan denetleyicinin başarımı Phantom omni haptik cihazında gerçekleştirilen deneyler ile gösterilmiştir. Bu denetleyici öncekilerle kıyaslandığında benzer bir takip sonucu elde etmek için oldukça az bilgiye ihtiyaç duymaktadır.

Bölüm 3'te telerobotik sistemlerde de kullanılabilir eklem uzayı denetleyicileri tasarlanmıştır.

Bölüm 3.1'de robot dinamik modelinin yapısı belli olmayan belirsizlikler içerdiği ve robotun eklem pozisyonlarının ölçüldüğü ama eklem hızları bilgisinin olmadığı durum için eklem uzayı denetleyicisi tasarlanmıştır. Hız ölçümlerinin yerine geçmek üzere model bilgisine ihtiyaç duymayan hız gözlemcisi geliştirilmiştir. Bu çalışma bilimsel yazındaki benzerlerden farklı olarak hız bilgisine ihtiyaç duymamaktadır. Ardından Bölüm 3.2'de denetleyici girişinde çarpımsal bozan etkenlere maruz kalan robot kolları için model bilgisinden bağımsız bir denetleyici önerilmiştir. Bu çalışma genel sistemler için tasarladığımız bir denetleyicinin özel hali olup başarımını göstermek için proje kapsamında alınan Phantom omni haptik cihaz ile deneyler yapılmıştır. Bu çalışmada ilaveten denetleyici kazançları öz ayarlamalı güncelleme yöntemi ile elde edilmiştir.

Bölüm 4'te telerobotik sistemlerin görev uzayında koordinasyonunu sağlayan denetleyiciler geliştirilmiştir. Bölüm 4.1'de ana ve bağımlı robotların aynı serbestlik derecesine sahip olduğu durum için görev uzayı denetleyicisi tasarlanmıştır. Bu çalışma Bölüm 4.2'de ana robotun artık olmadığı, bağımlı robotun ise artık olduğu durum için geliştirilmiştir. Bu durumda yine görev uzayında takip gerçekleştirilmiş olup bağımlı robottaki fazla serbestlik derecelerinin ikincil görevler için kullanılabilmesine olanak sağlanmıştır.

Bölüm 5'te farklı kinematik modelleri olan ana ve bağımlı robotlardan oluşan telerobotik sistemlerin iletişim hatlarındaki gecikmelere maruz kaldıkları durumlar incelenmiştir. Model aracılı denetim yöntemi kullanılarak Bölüm 5.1'de ana robotun RRR Phantom omni haptik cihaz ve bağımlı robotun ise sanal ortamda RRP Scara robot modeli olduğu durumda deneysel çalışmalarla model aracılı denetimin zaman gecikmelerine karşı başarımı gösterilmiştir. Bu çalışma esnasında bilimsel yazındaki önemli eksiklerden birisi olan model aracılı yöntemin sadece bir serbestlik dereceli senaryolar üzerinde kullanılmış olduğu tespit edilmiş ve Bölüm 5.3'de yöntem çoklu serbestlik dereceli uygulamalarda kullanılabilir yapıya geliştirilmiştir. Bu kısımda yapılan geliştirmeler ana robotun Novint Falcon haptik cihaz ve bağımlı robotun ise Phantom Desktop haptik cihaz olduğu durumda deneysel olarak gerçekleştirilmiştir.

Tüm bu çalışmaların ardından GTÜ ile İYTE arasında telerobotik deneylerine geçilmiştir. Üniversitelerin bilgi işlem dairelerinden alınan özel izinle tedarik edilen IP adresleri kullanılarak internet ağı üzerinden çalışmalara başlanmıştır. Bu kapsamda, öncelikle küçük bir işaret göndererek zaman gecikmesinin miktarı tespit edilmeye çalışılmıştır. Tespit edilen gecikmelerin 0.01 saniye seviyelerinde kalması nedeniyle ikinci gelişme raporunda deneysel sonuçları paylaşılan zaman gecikmesi kestirim algoritmasına ihtiyaç duyulmamış ve model aracılı denetim yöntemine

de başvurulmamıştır. Elimizdeki robotların özellikleri gözönünde bulundurularak, GTÜ'deki Haptic Wand haptik cihazının kullanıcı tarafından hareket ettirilen ana robot ve İYTE'deki Phantom omni haptik cihazın ise bağımlı robot olduğu durum kullanılmıştır. Bu kapsamda önce ana sistem robot ve bağımlı sistem sanal robot seçilmiş ve Bölüm 2.1'de geliştirilen denetleyicinin artık olmayan sürümü kullanılarak görev uzayında takip deneyleri gerçekleştirilmiştir ve elde edilen deney sonuçları Bölüm 6.1'de sunulmuştur. Elde edilen sonuçların başarımının ardından hem ana sistemin hem de bağımlı sistemin robot olduğu üzerinde çalışmalara başlanmıştır. Bu kapsamda Bölüm 3.1'de geliştirilen denetleyicinin dinamik modeli bilindiği durum için değiştirilmiş sürümü ile deneyler yapılmış ve sonuçlar Bölüm 6.2'de paylaşılmıştır. Son olarak Bölüm 2.4'te detayları verilmiş olan denetleyici kullanılarak sonuçları Bölüm 6.3'te verilen görev uzayında takip deneyleri gerçekleştirilmiştir.

7.1 Tartışma

Proje kapsamında kinematik olarak farklı yapıdaki robotlar arasında telerobotik deneylerinin gerçekleştirilecek olması sebebiyle öncelikle görev uzayında takibi sağlayan denetleyiciler geliştirilmiştir. Bu denetleyicilerin tasarımında adım adım daha az bilgiye ihtiyaç duyulacak şekilde geliştirmeler gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda bu denetleyicilerin Phantom omni robot üzerinde testleri de gerçekleştirilmiştir. Ardından eklem uzayı denetleyicileri geliştirilmiş ve hem Phantom omni haptik cihazında hem de detayları ikinci gelişme raporunda verilen ana ve bağımlı robotun aynı olduğu telerobotik sistemde testleri gerçekleştirilmiştir. Bu testler sırasında detayları ikinci gelişme raporunda verilen bir telerobotik sisteminde ana ve bağımlı sistemler arasındaki ileri ve bağımlı ve ana sistemler arasındaki geri zaman gecikmesinin tespit edilmesi üzerine çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda yerel alan ağında (LAN) bir saniyenin üzerinde zaman gecikmeleriyle karşılaşılması üzerine bu büyüklükteki zaman gecikmeleriyle mücadelede amacıyla model aracılı başarım yöntemine başvurulmuştur. Detayları ikinci gelişme raporunda da verilen ana sistemin phantom omni olduğu bağımlı sistemin ise sanal ortamda farklı kinematik modele sahip RRP Scara robot olduğu ve sabit ve değişken zaman gecikmesinin göz önünde bulundurulduğu telerobotik sistemde gerçekleştirilen deneyler yapılmıştır. Ardından model aracılı denetim yönteminin üç boyutlu uzayda da çalışabilmesine olanak verecek yapının bilimsel yazında olmadığı tespit edilmiş ve bu probleme çözüm bulunarak yöntem çoklu serbestlik derecesine uygun hale getirilmiştir. En son olarak GTÜ ve İYTE arasında

deneylere geçilmiştir. İlk denemeler esnasında zaman gecikmesinin düşük olması nedeniyle model aracılı denetim yöntemine ihtiyaç olmadı ve deneyler aşamalı olarak gerçekleştirildi. İlk aşamada bağımlı robot sanal ortamda oluşturuldu ve deneylerin başarımının beklenen seviyelerde olmasının ardından robot–robot deneylerine geçildi. Bu deneyler de başarıyla tamamlandı.

7.2 Kazanımlar ve devam çalışmaları

Bu proje kapsamında kinematik olarak farklı olan ana ve bağımlı robotlardan oluşan telerobotik sistemler çalışılmıştır. Proje ekibi bu yapıdaki telerobotik sistemlerde görev uzayı denetleyicilerinin tercih edilebilmesi nedeniyle bu konuda araştırmalar gerçekleştirmişlerdir. Bu kapsamda bilimsel yazındaki önemli eksiklikler tespit edilmiş ve çözümler önerilmiştir. Projenin nihai hedefi olarak internet ağı üzerinden telereobotik deneylerin gerçekleştirilmesi olduğu için zaman gecikmeleri ve telerobotikte zaman gecikmeleri ile mücadelede kullanılan model aracılı denetim yöntemi ile çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda bilimsel yazındaki eksiklikler tespit edilmiş ve değerli katkılar verilmiştir. Son aşamada ise GTÜ İYTE arasında deneyler yapılmıştır.

Proje ekibi

- robot kollarının görev uzayında uyarlamalı, öğrenmeli, gürbüz denetimi,
- robot kollarının eklem uzayında öğrenmeli, gürbüz denetimi,
- robot kolları için farklı hız gözlemcisi tasarımı ve uygulanması,
- farklı kinematik modelleri olan ana ve bağımlı robotlardan oluşan telerobotik sistemin geliştirilmesi ve denetlenmesi,
- telerobotikte zaman gecikmesiyle mücadele yöntemleri,
- internet ağı üzerinde bilgi iletimi ve telerobotik deneylerin gerçekleştirilmesi

konularında bilgi birikimi edinmişlerdir.

Proje ekibinden Yrd. Doç. Dr. M. İ. Can Dede ve Doç. Dr. Enver Tatlıcioğlu'nun mühendislik ekibinde olduğu 115E725 numaralı ve Cerrahi Aletlerle Yönlendirilebilen Robot Yardımlı Endoskop Kontrol Sistemi (Neuroscope) başlıklı projemiz TÜBİTAK tarafından Öncelikli Alanlar Ar-Ge Projeleri Destekleme Programı kapsamında açılmış olan SB0206 Cerrahi Ekipman ve Robotik Sistemler çağrısı kapsamında desteklenmesine karar verilen projeler arasında yer almaktadır.

NeuRoboScope projesi ile her iki görme sinirinin arasında kafa tabanına yerleşmiş, özel bir salgı organı olan hipofiz bezinden kaynaklanan tümörlerin cerrahisi sırasında, bu işlemde kullanılan görüntüleme aracı olan endoskopun cerrahın istediği şekilde yönlendirilmesine yarayan özel bir robotik sistem geliştirmesi amaçlanmaktadır. Sistem, ameliyatı gerçekleştiren cerrahın ameliyatta kullanılan -biri endoskop olmak üzere- üç adet aleti aynı anda kullanmasına izin verecektir. Bu sayede söz konusu cerrahi operasyonun performansının ve verimliliğinin arttırılacağı ve ameliyat süresinin kısılacağı öngörülmektedir. Önerilen sistemde cerrahın kullandığı aletlerin hepsine ameliyat sırasında kolaylıkla monte edilebilecek hafif bir ana kumanda sistemi ile aletin hareketleri operatörün istediği anda algılanarak ve uygun bir şekilde işlenerek görüntüleme aleti olan endoskopu tutan robot kola hareket bilgisi ulaştırılacaktır. Bu sayede cerrah diğer iki eliyle farklı cerrahi aletleri kullanırken ameliyat boyunca devamlı bir şekilde endoskopu yönlendirebilecektir.

NeuRoboScope projesi kapsamında geliştirilecek ana kumanda sistemi ile endoskopun denetimi gerçekleştirilecek olup bu iki sistemin kinematik yapıları farklıdır. Dolayısıyla ana kumanda sistemi ve endoskoptan oluşan sistem ana ve bağımlı robotları farklı kinematik yapıda olan bir telerobotik sistemi olup tamamlanan projemizin sonuçları NeuRoboScope projesinde kullanılacaktır. Bu kapsamda NeuRoboScope projesi tamamlanan projemizin devamı niteliğindedir. Önemle belirtmek isteriz ki tamamlanan projemizin başvuru formunda yaygın etki/katma değeri kısmında projenin sonuçlarının tıbbi robotikte uygulanabileceği belirtilmişti.

Proje ekibinden Yrd. Doç. Dr. M. İ. Can Dede ve Doç. Dr. Enver Tatlıcıoğlu'nun araştırmacı ekibinde olduğu Verilen Göreve Uygun Optimal Robot Manipülatör Tasarlayan Akıllı Sistem başlıklı projemiz TÜBİTAK tarafından Öncelikli Alanlar Ar-Ge Projeleri Destekleme Programı kapsamında açılmış olan 1003-MAK-OTOM-2015-2 Akıllı İmalat Sistemlerine Yönelik Araştırmalar Çağrısı kapsamında ikinci aşama başvurusuna hak kazanmıştır. İkinci aşama başvurusunu yaptığımız projede hedeflenen endüstriyel uygulamalarda kullanım amacıyla geliştirilecek olan modüler robot kolu olup denetimin görev uzayında yapılması hedeflenmesi sebebiyle Bölüm 2'de tasarladığımız görev uzayı denetleyicilerinin kullanılması planlanmaktadır ve dolayısıyla tamamlanan projemizin devamı niteliğindedir.

7.3 Proje kapsamındaki yayınlarımız

Bu projede elde edilen sonuçların bir kısmı altta detayları verilen dergide yayına kabul edilmiş olup basım aşamasındadır:

- E. Uzunoğlu & M. İ. C. Dede, “Extending Model-Mediation Method to Multi-Degree-of-Freedom Teleoperation Systems Experiencing Time Delays in Communication,” *Robotica*, 2015, accepted, to appear, doi:10.1017/S0263574715001010.

Bu projede elde edilen sonuçların bir kısmı altta detayları verilen dergide inceleme aşamasındadır:

- K. Cetin, E. Tatlicioglu, & E. Zergeroglu, “Task–Space Tracking Control of Robotic Manipulators with Uncertain Dynamic and Kinematic Terms: A Continuous Robust Approach,” *Int. Journal of Robotics and Automation*, 2015, under review.

Bu projede elde edilen sonuçların bir kısmı altta detayları verilen uluslararası konferanslarda sunulmuştur:

- K. M. Dogan, E. Tatlicioglu, E. Zergeroglu, & K. Cetin, “Lyapunov based Output Feedback Learning Control of Robot Manipulators,” *Proc. of American Control Conf.*, 5337-5342, Chicago, IL, USA, 2015.
- K. Cetin, E. Tatlicioglu, & E. Zergeroglu, “Continuous Robust Task–Space Tracking Control of Robotic Manipulators with Uncertain Dynamics,” *Proc. of IEEE Multi-Conference on Systems and Control*, 312-317, Sydney, Australia, 2015.
- K. M. Dogan, Enver Tatlicioglu, & Erkan Zergeroglu, “Operational/Task Space Learning Control of Robot Manipulators with Dynamical Uncertainties,” *Proc. of IEEE Multi-Conference on Systems and Control*, 527-532, Sydney, Australia, 2015.
- A. Bayrak, E. Tatlicioglu, E. Zergeroglu, & M. Deniz, “A New Continuous Velocity Observer Formulation for a Class of Uncertain Nonlinear Mechanical Systems,” *Proc. of IEEE Multi-Conference on Systems and Control*, 1278-1283, Sydney, Australia, 2015.

Bu projede elde edilen sonuçların bir kısmı altta detayları verilen uluslararası konferanslarda inceleme aşamasındadır:

- K. Cetin, E. Tatlicioglu, & E. Zergeroglu, "On Null–Space Control of Kinematically Redundant Robot Manipulators," Proc. of European Control Conference, Aalborg, Denmark, 2016, under review.
- K. Cetin, E. Tatlicioglu, & M. Deniz, "Task–space Tracking Control of Robot Manipulators with Uncertain Dynamics and Kinematics: Robust Output Feedback Approach," Proc. of European Control Conference, Aalborg, Denmark, 2016, under review.
- K. Cetin, A. Bayrak, & E. Tatlicioglu, "Online Time Delay Estimation in Networked Control Systems with Application to Bilateral Teleoperation," Proc. of European Control Conference, Aalborg, Denmark, 2016, under review.

Bu projede elde edilen sonuçların bir kısmı altta detayları verilen ulusal konferanslarda sunulmuştur:

- E. Tatlicioglu & K. Cetin, "Passive decomposition: A task–space control approach," Proc. TrC IFToMM Symposium on Theory of Machines and Mechanisms, 615-618, Izmir, Turkey, 2015.
- B. Taner, M. İ. C. Dede, & E. Uzunoğlu, "Applying Model Mediation Method to a Mobile Robot Bilateral Teleoperation System Experiencing Time Delays in Communication," Proc. TrC IFToMM Symposium on Theory of Machines and Mechanisms, 577-585, Izmir, Turkey, 2015.
- K. M. Doğan, M. Deniz, M. İ. C. Dede, & E. Tatlıcıoğlu, "Sabit ve Değişken Zaman Gecikmeleri ile Baş Eden İki Yönlü Doğrudan Teleoperasyon ve Model Aracılı Denetim," Otomatik Kontrol Türk Milli Komitesi Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı (TOK'15), 873-878, Denizli, Eylül 2015.

7.4 Eğitim faaliyetleri

Bu bölümde proje yürütücüsü ve araştırmacıların proje süresince yürüttükleri lisans ve lisansüstü seviyedeki eğitim faaliyetleri kısaca paylaşılmıştır.

Prof. Dr. Erkan Zergeroğlu Gebze Teknik Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği bölümünde projenin yürürlükte olduğu sürede Güz 2013 ve Güz 2014 dönemlerinde lisans dördüncü sınıf dersi olan BIL 485 Robotik Uygulamalarına Giriş dersini ve Bahar 2014 ve Bahar 2015 dönemlerinde lisansüstü seçmeli ders olan BIL 685 Robot Kontrol Teorisi dersini vermiştir.

Doç. Dr. Enver Tatlıcıoğlu İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği bölümünde projenin yürürlükte olduğu sürede Güz 2013 döneminde lisansüstü seçmeli ders olan EE 561 İleri Robot Kinematiği, Güz 2014 döneminde lisans dördüncü sınıf dersi olan EE 463 Robotiğe Giriş ve Makina Mühendisliği lisansüstü müfredatında yer alan ME 580 Haptik ve Teleoperasyon dersini Yrd. Doç. Dr. Can Dede ile beraber vermiştir. Önemle belirtmek isteriz ki ME 580 dersi İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü'nde Makina Mühendisliği ve Elektrik Elektronik Mühendisliği'nden birer hocanın ortak olarak verdikleri ilk derstir. İlaveten üstteki EE 561 İleri Robot Kinematiği ilk defa bu Güz 2013 döneminde verilmiş olup içerik olarak görev uzayı denetleyicilerinin tasarımı üzerinde durulmaktadır.

Yrd. Doç. Dr. Can Dede İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Makina Mühendisliği bölümünde projenin yürürlükte olduğu sürede Güz 2013 döneminde lisans dördüncü sınıf dersi olan ME 460 Robot Teknolojisine Giriş ve Makina Mühendisliği lisansüstü müfredatında yer alan ME 574 Robotbilim İlkeleri, Bahar 2014 döneminde lisans dördüncü sınıf dersi olan ME 462 Robotların Dinamik Modellenmesi ve Kontrolü ve Makina Mühendisliği lisansüstü müfredatında yer alan ME 567 Robotik Araştırmaları derslerini, Güz 2014 döneminde Makina Mühendisliği lisansüstü müfredatında yer alan ME 574 Robotbilim İlkeleri ve ME 580 Haptik ve Teleoperasyon derslerini, Bahar 2014 döneminde lisans dördüncü sınıf dersi olan ME 462 Robotların Dinamik Modellenmesi ve Kontrolü ve Makina Mühendisliği lisansüstü müfredatında yer alan ME 579 Robot Manipülatörlerinin Dinamik Analizi derslerini vermiştir.

7.5 Konferans katılım faaliyetleri

Projenin yürürlükte olduğu sürede proje ekibinin katıldığı konferans faaliyetleri altta verilmiştir.

Haziran 2015'te kısa adı UMTS olan Uluslararası Katılımlı 17. Makina Teorisi Sempozyumu'na proje ekibinin neredeyse tamamı katılmışlardır. Bu sempozyumda proje ekibinin elde ettiği sonuçları paylaşmak ve hem ülkemizden hem de yurtdışından haptik ve teleoperasyon çalışan araştırmacıları biraraya getirmek amacıyla UMTS tarihinde ilk kez Haptik Teleoperasyon önerilmiştir. Fakat sempozyum programı ile ilgili teknik bir detay sebebiyle Çalıştay iki özel oturumda gerçekleştirilmiştir. Bu özel oturumlardan birincisi Doç. Dr. Enver Tatlıcıoğlu oturum başkanlığında gerçekleştirilmiş olup altta detayları verilen bildiriler sunulmuştur:

- Concept and Implementations of a Haptic Simulation Method For Transfer and Guiding Mec-

hanisms, Bilgehan Demirkale, Carsten Teichgräber ve Maik Berger

- Contact Feedback for Upper Limb Protheses, Mohammad Aziziaghdam ve Evren Samur
- A Haptic Device for Simulating the Entry into the Throat in Endoscopy, Anirudh N. Katti, Shanthanu Chakravarthy ve G. K. Ananthasuresh
- Generalized Virtual Environment Models for Haptic Rendering, Ozan Tokatlı ve Volkan Patoğlu

İkinci özel oturumun başkanlığını Boğaziçi Üniversitesi'nden Yrd. Doç. Dr. Evren Samur yapmış olup altta detayları verilen bildiriler sunulmuştur:

- Applying Model Mediation Method to a Mobile Robot Bilateral Teleoperation System Experiencing Time Delays in Communication, Barış Taner, M. İ. Can Dede ve Emre Uzunoğlu
- Passive Decomposition: A Task-Space Control Approach, Enver Tatlıcioğlu ve Kamil Çetin
- A Study on Selecting the Method of Constructing the Information to be Exchanged in Unlimited-workspace Bilateral Teleoperation, Mehmet Görkem Karabulut, M. İ. Can Dede ve Barış Taner
- Gerçek Zamanlı Altı Serbestlik Dereceli Haptik Bir Robot İle Sanal Robotun Teleoperasyonu, Tayfun Abut, Servet Soygüder ve Hasan Alli

Özel oturumlardaki bildiriler ortalama 2,5 hakem tarafından incelendikten sonra 20 dakikalık sunuma kabul edilmiş olup biri hariç hepsi İngilizce sunulmuştur. Oturumlar devam ederken salonlarda 30 civarında dinleyicinin bulunduğu tespit edilmiştir. Her iki özel oturumdan sonra hem bildiri sunan araştırmacılarla hem de dinleyicilerden bazılarıyla proje konusuyla ilgili edinimlerimiz paylaşılmış ve haptik ve teleoperasyon konularında bilimsel tartışmalar gerçekleştirilmiştir.

Üstte verilen bildirilerden proje ekibinden Doç. Dr. Enver Tatlıcioğlu, Yrd. Doç. Dr. M. İ. Can Dede, Kamil Çetin ve Emre Uzunoğlu'nun yazar oldukları çalışmalar projemizin sonuçlarını içermektedir. Passive Decomposition: A Task-Space Control Approach başlıklı çalışma Bölüm 4.1'de sunuların ön sonuçlarıdır. Applying Model Mediation Method to a Mobile Robot Bilateral Teleoperation System Experiencing Time Delays in Communication başlıklı çalışma detayları Bölüm 5.2'te verilmiştir.

Proje ekibinden K. Merve Doğan detayları Bölüm 3.1'de verilen çalışmaların sonuçlarını sunmak üzere Temmuz 2015'te ABD'nin Chicago şehrinde düzenlenen American Control Conference'a katılmıştır.

Eylül 2015'te proje ekibinden Prof. Dr. Erkan Zergeroğlu ve Doç. Dr. Enver Tatlıcıoğlu Pamukkale Üniversitesi tarafından Denizli'de düzenlenen TOK'a katılmışlardır. Bu sempozyumda proje ekibinin elde ettiği sonuçları paylaşmak ve ülkemizden haptik ve teleoperasyon çalışan araştırmacıları biraraya getirmek amacıyla Haptik ve Teleoperasyon Özel Oturumu önerilmiştir. Özel oturum Prof. Dr. Erkan Zergeroğlu ve Doç. Dr. Enver Tatlıcıoğlu'nun eş başkanlığında gerçekteşirilmiş olup altta detayları verilen bildiriler sunulmuştur:

- 5 Serbestlik Dereceli Dokunsal Geri Bildirim Cihazının Gerçek Zamanlı Linux/Xenomai İşletim Sistemi Altında Uygulanması ve Denetimi, Cüneyt Ay ve Erkan Zergeroğlu
- MR Sıvısı ile Çalışan Haptik Kol Tasarımı, Mehmet Görkem Karabulut, Barış Taner ve M. İ. Can Dede
- Sabit ve Değişken Zaman Gecikmeleri ile Baş Eden İki Yönlü Doğrudan Teleoperasyon ve Model Aracılı Denetim, K. Merve Doğan, Meryem Deniz, M. İ. Can Dede ve Enver Tatlıcıoğlu
- Sanal Cisimlerin Sürtünmeli Temas Altında Haptik Deformasyonu, Naci Zafer ve Sezcan Yılmaz
- Modüler Mobil Robot Tasarımı ve İmalatı, Gökçe Burak Tağlıoğlu, Cihat Bora Yiğit, Eray Çakıray ve Mesut Acar

Oturum devam ederken salonda 25 civarında dinleyicinin bulunduğu tespit edilmiştir.

Üstte verilen bildirilerden proje ekibinden Prof. Dr. Erkan Zergeroğlu, Doç. Dr. Enver Tatlıcıoğlu, Yrd. Doç. Dr. M. İ. Can Dede, K. Merve Doğan ve Meryem Deniz'in yazar oldukları çalışmalar projemizin sonuçlarını içermektedir.

Sabit ve Değişken Zaman Gecikmeleri ile Baş Eden İki Yönlü Doğrudan Teleoperasyon ve Model Aracılı Denetim başlıklı çalışma Bölüm 5.1'de sunulanların ön sonuçlarıdır.

Belirtmek isteriz ki üstte belirtilen proje ekibinin bildirilerinde ve sunumlarında TÜBİTAK'a verdiği destekten ötürü teşekkür edilmiştir.

7.6 Proje konusunda devam eden lisansüstü çalışmalar

Proje kapsamında bursiyer olarak desteklenen doktora öğrencisi Kamil Çetin'in tez başlığı "Control of Redundant Robot Manipulators with Telerobotic Applications" olup proje konuları üzerine gerçekteşirilen çalışmaları da içermektedir.

Proje kapsamında bursiyer olarak desteklenen yüksek lisans öğrencisi Kadriye Merve Doğan'ın tez başlığı "Development of a telerobotic platform" olup proje konuları üzerine gerçekleştirilen çalışmaları da içermektedir.

Kaynakça

- [1] E. S. Conkur and R. Buckingham, "Clarifying the definition of redundancy as used in robotics," *Robotica*, vol. 15, pp. 583–586, 1997.
- [2] O. Khatib, "Dynamic control of manipulators in operational space," in *IFTOMM Cong. Theory of Machines and Mechanisms*, New Delhi, India, 1983, pp. 1–10.
- [3] H. Seraji, "Configuration control of redundant manipulators: Theory and implementation," *IEEE Trans. Robot. Autom.*, vol. 5, no. 4, pp. 472–490, 1989.
- [4] R. Colbaugh and K. Glass, "Robust adaptive control of redundant manipulators," *J. Intelligent and Robotic Systems*, vol. 14, no. 1, pp. 68–88, 1995.
- [5] Z. Peng and N. Adachi, "Compliant motion control of kinematically redundant manipulators," *IEEE Trans. Robot. Autom.*, vol. 9, no. 6, pp. 831–837, 1993.
- [6] Y. Nakamura, *Advanced Robotics Redundancy and Optimization*. Reading, MA: Addison-Wesley, 1991.
- [7] T. Yoshikawa, "Analysis and control of robot manipulators with redundancy," in *Robotics Research - The First International Symp.*, Cambridge, MA, 1994, pp. 735–747.
- [8] B. Siciliano, "Kinematic control of redundant robot manipulators: A tutorial," *J. Intelligent and Robotic Systems*, vol. 3, no. 3, pp. 201–212, 1990.
- [9] I. Walker, "Impact configurations and measures for kinematically redundant and multiple armed robot systems," *IEEE Trans. Robot. Autom.*, vol. 10, no. 5, pp. 670–683, 1994.
- [10] D. Nenchev, "Redundancy resolution through local optimization: A review," *J. of Robotic Systems*, vol. 6, no. 6, pp. 769–798, 1989.

- [11] A. Kapadia, E. Tatlicioglu, and D. M. Dawson, "Set-point navigation of a redundant robot in uncertain environments using finite range sensors," in *Proc. IEEE Int. Conf. Decision and Control*, Cancun, Mexico, 2008, pp. 4596–4601.
- [12] D. Braganza, M. L. McIntyre, D. M. Dawson, and I. D. Walker, "Whole arm grasping control for redundant robot manipulators," in *Proc. American Control Conf.*, Minneapolis, MN, USA, 2006, pp. 3194—3199.
- [13] P. Hsu, J. Hauser, and S. Sastry, "Dynamic control of redundant manipulators," *J. of Robotic Systems*, vol. 6, no. 3, pp. 133–148, 1989.
- [14] B. Xian, M. S. de Queiroz, D. M. Dawson, and I. D. Walker, "Task-space tracking control of robot manipulators via quaternion feedback," *IEEE Tr. on Robotics and Automation*, vol. 20, no. 1, pp. 160–167, 2004.
- [15] J. Nakanishi, R. Cory, M. M. J. Peters, and S. Schaal, "Operational space control: A theoretical and empirical comparison," *Int. J. Robotics Research*, vol. 27, no. 6, pp. 737–757, 2008.
- [16] S. Luo and S. Ahmad, "Adaptive control of kinematically redundant robots," *IMA J. of Mathematical Control & Information*, vol. 14, pp. 225–253, 1997.
- [17] E. Zergeroglu, D. Dawson, I. D. Walker, and A. Behal, "Nonlinear tracking control of kinematically redundant robot manipulators," in *Proc. American Control Conf.*, Chicago, Illinois, 2000, pp. 2513–2517.
- [18] E. Zergeroglu, D. M. Dawson, I. D. Walker, and P. Setlur, "Nonlinear tracking control of kinematically redundant robot manipulators," *IEEE/ASME Tr. on Mechatronics*, vol. 9, no. 1, pp. 129–132, 2004.
- [19] K. P. Tee and R. Yan, "Adaptive operational space control of redundant robot manipulators," in *Proc. American Control Conf.*, San Francisco, CA, USA, 2011, pp. 1742–1747.
- [20] E. Zergeroglu, H. T. Sahin, U. Ozbay, and U. A. Tektas, "Robust tracking control of kinematically redundant robot manipulators subject to multiple self-motion criteria," in *IEEE Int. Conf. on Control App.*, Munich, Germany, 2006, pp. 2860—2865.

- [21] H. T. Sahin, U. Ozbay, and E. Zergeroglu, "Quaternion based robust tracking control of kinematically redundant manipulators subject to multiple self-motion criteria," in *Proc. IEEE Int. Conf. Decision and Control*, San Diego, CA, USA, 2006, pp. 6462—6467.
- [22] E. Tatlicioglu, M. L. McIntyre, D. M. Dawson, and I. D. Walker, "Adaptive nonlinear tracking control of kinematically redundant robot manipulators with sub-task extensions," in *Decision and Control, 2005 and 2005 European Control Conference. CDC-ECC '05. 44th IEEE Conference on*, Dec 2005, pp. 4373—4378.
- [23] —, "Adaptive non-linear tracking control of kinematically redundant robot manipulators," *Int. J. Robot. Autom.*, vol. 23, no. 2, pp. 98—105, Mar. 2008.
- [24] E. Tatlicioglu, D. Braganza, T. C. Burg, and D. M. Dawson, "Adaptive control of redundant robot manipulators with sub-task extensions," in *Proc. American Control Conf.*, Seattle, WA, 2008, pp. 856—861.
- [25] —, "Adaptive control of redundant robot manipulators with sub-task objectives," *Robotica*, vol. 27, pp. 873—881, 10 2009.
- [26] F. Lewis, D. Dawson, and C. Abdallah, *Robot Manipulator Control: Theory and Practice*. New York, NY, USA: Marcel Dekker, 2003.
- [27] S. Nicosia and P. Tomei, "Robot control by using only joint position measurements," *IEEE Tr. on Automatic Control*, vol. 35, no. 9, pp. 1058—1061, 1990.
- [28] H. Khalil, *Nonlinear Systems*. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall PTR, 2002.
- [29] M. Krstic, I. Kanellakopoulos, and P. Kokotovic, *Nonlinear and Adaptive Control Design*. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 1995.
- [30] S. Arimoto, S. Kawamura, and F. Miyazaki, "Bettering operation of robots by learning," *J. of Robotic Systems*, vol. 1, no. 2, pp. 123—140, 1984.
- [31] W. Messner, R. Horowitz, W. Kao, and M. Boals, "A new adaptive learning rule," *IEEE Tr. on Autom. Contr.*, vol. 36, pp. 188—197, 1991.
- [32] R. Horowitz, "Learning control of robot manipulators," *ASME J. Dyna. Syst., Meas. Contr.*, vol. 115, pp. 402—411, 1993.

- [33] S. Arimoto, S. Kawamura, and F. Miyazaki, "Realization of robot motion based on a learning method," *IEEE Tr. on Systems, Man, Cybernetics*, vol. 18, no. 1, pp. 126–134, 1988.
- [34] W. E. Dixon, E. Zergeroglu, D. M. Dawson, and B. T. Costic, "Repetitive learning control : A Lyapunov–based approach," *IEEE Tr. on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 32, no. 4, pp. 538–545, 2002.
- [35] A. Tayebi, "Adaptive iterative learning control of robot manipulators," *Automatica*, vol. 40, pp. 1195–1203, 2004.
- [36] S. Liuzzo and P. Tomei, "A global adaptive learning control of robot manipulators," *Automatica*, vol. 44, pp. 1378–1384, 2008.
- [37] D. Heinzinger, B. Fenwick, B. Paden, and F. Miyazaki, "Robust learning control," in *Proc. IEEE Int. Conf. Decision and Control*, Tampa, FL, USA, 1989, pp. 436–440.
- [38] W. E. Dixon, A. Behal, D. M. Dawson, and S. P. Nagarkatti, *Nonlinear Control of Engineering Systems: A Lyapunov–Based Approach*. Basel, Switzerland: Birkhauser, 2003.
- [39] M. Sekimoto, S. Arimoto, S. Umesao, T. Torii, and H. Hahiguchi, "Iterative learning control in task-space for robots with redundant joints," *J. of Robotic Systems*, vol. 25, no. 6, pp. 921–929, 2007.
- [40] S. Arimoto, M. Sekimoto, and S. Kawamura, "Task-space iterative learning for redundant robotic systems: Existence of a task-space control and convergence of learning," *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration*, vol. 1, no. 4, pp. 312–319, 2008.
- [41] N. Sadegh and R. Horowitz, "Stability and robustness analysis of a class of adaptive controllers for robot manipulators," *Int. J. Robotics Research*, vol. 9, no. 3, pp. 74–92, 1990.
- [42] F. L. Lewis, C. T. Abdallah, and D. M. Dawson, *Control of Robot Manipulators*. New York, NY, USA: MacMillan, 1993.
- [43] D. M. Dawson, M. M. Bridges, and Z. Qu, *Nonlinear Control of Robotic Systems for Environmental Waste and Restoration*, M. J. U. of New Mexico, Ed. Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice Hall, 1995, vol. 5.

- [44] ———, *Nonlinear control of robotic systems for environmental waste and restoration*. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall PTR, 1995.
- [45] C. C. Cheah, S. Kawamura, S. Arimoto, and K. Lee, "PID control of robotic manipulator with uncertain Jacobian matrix," in *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, Detroit, MI, USA, 1999, pp. 494–499.
- [46] C. C. Cheah, K. Lee, S. Kawamura, and S. Arimoto, "Asymptotic stability of robot control with approximate Jacobian matrix and its application to visual servoing," in *Proc. IEEE Int. Conf. Decision and Control*, Sydney, Australia, 2000, pp. 3939–3944.
- [47] H. Yazarel and C. C. Cheah, "Task-space adaptive control of robotic manipulators with uncertainties in gravity regressor matrix and kinematics," *IEEE Tr. on Automatic Control*, vol. 47, no. 9, pp. 1580–1585, 2002.
- [48] C. C. Cheah, "Approximate Jacobian robot control with adaptive Jacobian matrix," in *Proc. IEEE Int. Conf. Decision and Control*, Maui, HI, USA, 2003, pp. 5859–5864.
- [49] C. C. Cheah, M. Hirano, S. Kawamura, and S. Arimoto, "Approximate Jacobian control for robots with uncertain kinematics and dynamics," *IEEE Tr. on Robotics and Automation*, vol. 19, no. 4, pp. 692–702, 2003.
- [50] ———, "Approximate Jacobian control with task-space damping for robot manipulators," *IEEE Tr. on Automatic Control*, vol. 49, no. 5, pp. 752–757, 2004.
- [51] C. C. Cheah, "Task-space PD control of robot manipulators: Unified analysis and duality property," *Int. J. of Robotics Research*, vol. 27, no. 10, pp. 1152–1170, 2008.
- [52] U. Ozbay, H. T. Sahin, and E. Zergeroglu, "Robust tracking control of kinematically redundant robot manipulators subject to multiple self-motion criteria," *Robotica*, vol. 26, no. 6, pp. 711–728, 2008.
- [53] M. W. Spong and M. Vidyasagar, *Robot Dynamics and Control*. New York, NY, USA: John Wiley & Sons Inc., 1989.
- [54] M. Krstic, I. Kanellakopoulos, and P. Kokotovic, *Nonlinear and Adaptive Control Design*. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 1995.

- [55] D. Braganza, W. E. Dixon, D. M. Dawson, and B. Xian, "Tracking control for robot manipulators with kinematic and dynamic uncertainty," *Int. J. Robotics and Automation*, vol. 23, no. 2, 2008.
- [56] A. Nygaard, "High-level control system for remote controlled surgical robots," Master's thesis, Master of Science in Engineering Cybernetics, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, 2008.
- [57] A. J. Silva, O. A. D. Ramirez, V. P. Vega, and J. P. O. Oliver, "Phantom omni haptic device: Kinematic and manipulability," in *Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference*, Cuernavaca, Morelos, Mexico, 2009, pp. 193–198.
- [58] T. Sansanayuth, I. Nilkhamhang, and K. Tungpimolrat, "Teleoperation with inverse dynamics control for phantom omni haptic device," in *SICE Annual Conference*, Akita, Japan, 2012, pp. 2121–2126.
- [59] B. Bidikli, E. Tatlicioglu, and E. Zergeroglu, "A self tuning RISE controller formulation," in *Proc. American Control Conf.*, Portland, OR, USA, 2014, pp. 5608–5613.
- [60] S. Chan and H. Liaw, "Robust motion control for robotic assembly tasks using variable structure control scheme," *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, vol. 18, no. 1, pp. 67–86, 1997.
- [61] B. Feng, G. Ma, Q. Wen, and C. Wang, "Adaptive robust control of space robot in task space," in *Mechatronics and Automation, Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on*, 2006, pp. 1571–1576.
- [62] C. Cheah and X. Li, "Singularity-robust task-space tracking control of robot," in *Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference on*, 2011, pp. 5819–5824.
- [63] L. H. Kam Lau, Robert Hoeken, "Robot performance measurements using automatic laser techniques," *Robotics & Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 2, pp. 227–236, 1985.
- [64] G. W. Zobrist and C. Y. Ho, *Progress in Robotics and Intelligent Systems*. Norwood, New Jersey, USA: Ablex Publishing Corporation, 1996.
- [65] R. R. Costa, L. Hsu, A. K. Imai, and P. Kokotovic, "Lyapunov-based adaptive control of MIMO systems," *Automatica*, vol. 39, no. 7, pp. 1251–1257, 2003.

- [66] A. S. Morse, "A gain matrix decomposition and some of its applications," *Systems & Control Letters*, vol. 21, no. 1, pp. 1–10, 1993.
- [67] J. Chen, A. Behal, and D. M. Dawson, "Robust feedback control for a class of uncertain mimo nonlinear systems," *Automatic Control, IEEE Transactions on*, vol. 53, no. 2, pp. 591–596, 2008.
- [68] B. Bidikli, E. Tatlicioglu, and E. Zergeroglu, "A robust tracking controller for dynamically positioned surface vessels with added mass," in *Decision and Control (CDC), 2014 IEEE 53rd Annual Conference on*. IEEE, 2014, pp. 4385–4390.
- [69] I. Tanyer, E. Tatlicioglu, and E. Zergeroglu, "A robust dynamic inversion technique for asymptotic tracking control of an aircraft," in *Control Conference (ASCC), 2013 9th Asian*. IEEE, 2013, pp. 1–6.
- [70] —, "A robust adaptive tracking controller for an aircraft with uncertain dynamical terms," in *World Congress*, vol. 19, no. 1, 2014, pp. 3202–3207.
- [71] I. Tanyer, "Development of nonlinear robust control techniques for unmanned aerial vehicles," Ph.D. dissertation, Izmir Institute of Technology, 2015.
- [72] S. Hara, Y. Yamamoto, T. Omata, and M. Nakano, "Repetitive control systems: A new type servo system for periodic exogenous signals," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 33, no. 7, pp. 659–668, 1988.
- [73] M. Tomizuka, T. Tsao, and K. Chew, "Discrete-time domain analysis and synthesis of repetitive controllers," *ASME Journal on Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 111, pp. 353–358, 1989.
- [74] M. Tsai, G. Anwar, , and M. Tomizuka, "Discrete-time repetitive control for robot manipulators," in *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, 1988, pp. 1341–1347.
- [75] W. Messner, R. Horowitz, W. Kao, and M. Boals, "A new adaptive learning rule," *IEEE Tr. on Autom. Contr.*, vol. 36, pp. 188–197, 1991.
- [76] R. Horowitz, "Learning control of robot manipulators," *ASME J. Dyna. Syst., Meas. Contr.*, vol. 115, pp. 402–411, 1993.

- [77] N. Sadegh and R. Horowitz, "Stability and robustness analysis of a class of adaptive controllers for robot manipulators," *Int. J. Robotics Research*, vol. 9, no. 3, pp. 74–92, 1990.
- [78] W. E. Dixon, E. Zergeroglu, D. M. Dawson, and B. T. Costic, "Repetitive learning control : A Lyapunov–based approach," *IEEE Tr. on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 32, no. 4, pp. 538–545, 2002.
- [79] P. He and S. Jagannathan, "Reinforcement learning based output-feedback control of nonlinear systems with input constraints," in *Proc. of the 2004 American Control Conf.*, Boston, MA- USA, 2004, pp. 2563–2568.
- [80] P. Shih and S. Jagannathan, "Reinforcement learning based output-feedback controller for complex nonlinear discrete-time systems," in *22nd IEEE Int. Symp. on Int. Control Part of IEEE Multi-Conference on Syst. and Control*, Singapore, 2007, pp. 407–412.
- [81] R. Marino, P. Tomei, and C. Verrelli, "Learning control for nonlinear systems in output feedback form," *Systems & Control Letters*, vol. 61, pp. 1242–1247, 2012.
- [82] B. Bidikli, E. Tatlicioglu, E. Zergeroglu, and A. Bayrak, "An asymptotically stable robust controller formulation for a class of mimo nonlinear systems with uncertain dynamics," *Int. J. of Systems Science*, 2015, accepted, to appear (doi: 10.1080/00207721.2015.1039627).
- [83] —, "An asymptotically stable continuous robust controller for a class of uncertain MIMO nonlinear systems," ArXiv e-prints, Tech. Rep. 1301.5483, Jan. 2013.
- [84] P. F. Hokayem and M. W. Spong, "Bilateral teleoperation: An historical survey," *Automatica*, vol. 42, no. 12, pp. 2035–2057, 2006.
- [85] D. Lee and P. Y. Li, "Passive bilateral feedforward control of linear dynamically similar teleoperated manipulators," *IEEE Tr. on Robotics and Automation*, vol. 19, no. 3, pp. 443–456, 2003.
- [86] —, "Passive coordination control of nonlinear bilateral teleoperated manipulators," in *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, Washington, DC, USA, 2002, pp. 3278—3283.
- [87] —, "Passive tool dynamics rendering for nonlinear bilateral teleoperated manipulators," in *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, Washington, DC, USA, 2002, pp. 3284—3289.

- [88] G. Niemeyer and J. J. E. Slotine, "Telemanipulation with time delays," *Int. J. of Robotics Research*, vol. 23, pp. 873–890, 2004.
- [89] H. Flemmer, "Control design and performance analysis of force reflective teleoperators: A passivity based approach," Ph.D. dissertation, Department of Machine Design, Royal Institute of Technology, 2004.
- [90] K. M. Stanney, R. R. Mourant, and R. S. Kennedy, "Human factors issues in virtual environments: A review of the literature," *Presence*, vol. 7, no. 4, pp. 327—352, 1998.
- [91] R. Chellali, *Tele-operation and Human Robot Interactions, Remote and Telerobotics*. Basel, Switzerland: N. Mollet, 2010.
- [92] B. Hannaford, "A design framework for teleoperators with kinesthetic feedback," *IEEE Tr. on Robotics and Automation*, vol. 5, no. 4, pp. 426—434, 1989.
- [93] P. Mitra and G. Niemeyer, "Model-mediated telemanipulation," *Int. J. of Robotics Research*, vol. 27, no. 2, pp. 253—262, 2008.
- [94] G. N. D. Gentry and G. Niemeyer, "User perception and preference in model mediated telemanipulation," in *Euro haptics conference, and symposium on haptic interfaces for virtual environment and teleoperator systems*, 2007, pp. 268—273.
- [95] M. I. C. Dede and S. Tosunoglu, "Parallel position/force controller for teleoperation systems with time delays," in *IFAC Workshop on Technology Transfer in Developing Countries: Automation in Infrastructure Creation*, Izmir, Turkey, 2007.
- [96] E. Uzunoglu and M. I. C. Dede, "İletisim hatalarına maruz kalan iki yonlu teleoperasyon sisteminin geliştirilmiş kuvvet takibi performanslı model-aracılı denetimi," in *National Conference of Turkish National Committee of Automatic Control*, Malatya, Turkey, 2013, pp. 1017–1022.
- [97] T. Bilginçan, E. Gezgin, and M. I. C. Dede, "Integration of the hybrid-structure haptic interface hiphad v1.0," in *Int. Sym. of Mechanism and Machine Theory*, 2010, pp. 267–284.
- [98] J. Cui, S. Tosunoglu, R. Roberts, C. Moore, and D. W. Repperger, "A review of teleoperation system control," in *Proceedings of the Florida Conference on Recent Advances in Robotics*, 2003.

- [99] J. Vertut and P. Coiffet, "Teleoperation and robotics evolution and development," *Robot Technology*, vol. 3A, 1985.
- [100] W. R. Ferrell, "Remote manipulative control with transmission delay," *IEEE Tr. on Human Factors in Electronics*, vol. 6, pp. 24—32, 1965.
- [101] W. R. Ferrell and T. B. Sheridan, "Supervisory control of remote manipulation," *IEEE Spectrum*, pp. 81—88, 1967.
- [102] D. A. Lawrence, "Stability and transparency in bilateral teleoperation," *IEEE Tr. Robot. Automat.*, vol. 9, no. 15, pp. 624—637, 1993.
- [103] G. Niemeyer and J. Slotine, "Stable adaptive teleoperation," *IEEE J. of Oceanic Engineering*, vol. 16, no. 11, pp. 152—162, 1991.
- [104] N. Hogan, "Impedance control: an approach to manipulation-part i: Theory; part ii: Implementation; part iii: Applications," *Trans. ASME J. Dynamic Systems, Measurement and Control*, vol. 107, no. 1, 1985.
- [105] H. Kazerooni, T. B. Sheridan, and P. K. Houpt, "Robust compliant motion for manipulators-part i: The fundamental concepts of compliant motion; part ii: Design method," *IEEE J. Robotics and Automation*, vol. 2, no. 2, pp. 83—105, 1986.
- [106] Z. Lu and A. A. Goldenberg, "Robust impedance control and force regulation: Theory and experiments," *Int. J. of Robotics Research*, vol. 14, pp. 225—254, 1995.
- [107] R. J. Anderson and M. W. Spong, "Asymptotic stability for force reflecting teleoperators with time delay," in *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, 1989, pp. 1625—1618.
- [108] H. Park and J. Lee, "Adaptive impedance control of a haptic interface," *Mechatronics*, vol. 14, no. 3, pp. 237—253, 2004.
- [109] H. Seraji, "Adaptive admittance control: An approach to explicit force control in compliant motion," in *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, San Diego, CA, USA, 1994, pp. 2705—2712.
- [110] M. C. Chien and A. C. Huang, "Adaptive impedance control of robot manipulators based on function approximation technique," *Robotica*, vol. 22, no. 4, 2004.

- [111] P. Mitra and G. Niemeyer, "Dynamic proxy objects in haptic simulations," in *Proc. of IEEE Conf. on Robotics, Automation and Mechatronics*, Singapore, 2004, pp. 1–3.
- [112] Y. X. Su, C. H. Zheng, P. C. Mueller, and B. Y. Duan, "A simple improved velocity estimation for low-speed regions based on position measurements only," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 14, no. 5, pp. 937–942, 2006.
- [113] S. Arimoto, V. Parra-Vega, and T. Naniwa, "A class of linear velocity observers for nonlinear mechanical systems," in *Proc. of Asian Control Conf.*, Tokyo, Japan, 1994, pp. 633–636.
- [114] C. C. de Wit and J. Slotine, "Sliding observers for robot manipulators," *Automatica*, vol. 27, no. 5, pp. 859–864, 1991.
- [115] A. Abdessameud and M. F. Khelfi, "A variable structure observer for the control of robot manipulators," *Int. J. Appl. Math. Compt. Sci.*, vol. 16, no. 2, pp. 189–196, 2006.
- [116] A. Astolfi, R. Ortega, and A. Venkatraman, "A globally exponentially convergent immersion and invariance speed observer for mechanical systems with non-holonomic constraints," *Automatica*, vol. 46, no. 5, pp. 182–189, 2010.
- [117] M. Namvar, "A class of globally convergent velocity observers for robotic manipulators," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 54, no. 8, pp. 1956–1961, 2009.
- [118] J. Davila, L. Fridman, and A. Levant, "Second-order sliding-mode observer for mechanical systems," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 50, no. 11, pp. 1785–1789, 2005.
- [119] J.-H. Choi, E. A. Misawa, and G. E. Young, "A study on sliding mode state estimation," *ASME J. Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 121, no. 6, pp. 255–260, 1999.
- [120] Y. Xiong and M. Saif, "Sliding mode observer for nonlinear uncertain systems," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 46, no. 12, pp. 2012–2017, 2001.
- [121] D. M. Dawson, Z. Qu, and J. C. Carroll, "On the state observation and output feedback problems for nonlinear uncertain dynamic systems," *Systems and Control Letters*, vol. 18, no. 2, pp. 217–222, 1992.
- [122] B. Walcott and S. Zak, "State observation of nonlinear uncertain dynamical systems," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 32, no. 2, pp. 166–170, 1987.

- [123] A. Teel and L. Praly, "Global stabilizability and observability imply semi global stabilizability by output feedback," *Systems and Control Letters*, vol. 22, no. 2, pp. 313–325, 1994.
- [124] A. N. Atassi and H. K. Khalil, "A separation principle for the stabilization of a class of nonlinear systems," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 44, no. 9, pp. 1672–1687, 1999.
- [125] J. Chen, A. Behal, and D. Dawson, "Robust feedback control for a class of uncertain mimo nonlinear systems," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 53, no. 2, pp. 591–596, 2008.
- [126] B. Xian, M. de Queiroz, D. Dawson, and M. McIntyre, "A discontinuous output feedback controller and velocity observer for nonlinear mechanical systems," *Automatica*, vol. 40, no. 4, pp. 695 – 700, 2004.
- [127] J. Dasdemir and E. Zergeroglu, "A new continuous high-gain controller scheme for a class of uncertain nonlinear systems," *Int. J. of Robust and Nonlinear Control*, vol. 25, no. 1, pp. 125—141, 2015.
- [128] B. Xian, D. M. Dawson, M. S. de Queiroz, and J. Chen, "A continuous asymptotic tracking control strategy for uncertain nonlinear systems," *IEEE Tr. on Automatic Control*, vol. 49, no. 7, pp. 1206–1211, 2004.

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Doç. Dr. ENVER TATLICIOĞLU
Proje No:	113E147
Proje Başlığı:	Farklı Kinematik Modellere Sahip Ana ve Bağımlı Robotları Olan Telerobotik Sistemin Geliştirilmesi: Teori ve Uygulamaları
Proje Türü:	1001 - Araştırma
Proje Süresi:	24
Araştırmacılar:	ERKAN ZERGEROĞLU, MEHMET İSMET CAN DEDE
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	İZMİR YÜKSEK TEKNOLOJİ ENS. MÜHENDİSLİK F. ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜH
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	01/10/2013 - 01/10/2015
Onaylanan Bütçe:	239714.0
Harcanan Bütçe:	206550.13
Öz:	<p>Proje kapsamında farklı kinematik modellere sahip ana ve bağımlı robotları olan telerobotik sistemler için denetleyicilerin tasarlanması ve İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü ve Gebze Teknik Üniversitesi (eski adı Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü) arasında gerçekleştirilecek deneyler ile gerçekleşmesi hedeflenmiştir. Proje kapsamında robot kolları için görev uzayı ve eklem uzayı denetleyicileri tasarlanmıştır. Tasarlanan denetleyiciler kinematik ve/veya dinamik model belirsizlikleri ile mücadele ederken aynı zamanda da eklem hızlarının ölçümlerinin eksikliği hız gözlemçileri giderilmiştir. Kararlılık analizleri Lyaunov tarzı yöntemler kullanılarak gösterilmiştir. Tasarlanan denetleyicilerin başarımları benzetim çalışmaları ve deneylerle gösterilmiştir. Ardından telerobotik çalışmalarına geçilmiştir. Telerobotik sistemlerin görev uzayında denetlenmesini sağlayan iki denetleyici tasarlanmış ve başarımları benzetimlerle gösterilmiştir. Daha sonra model aracılı denetim ve doğrudan teleoperasyon yöntemleri farklı kinematik modellere sahip ana ve bağımlı robotlardan oluşan telerobotik sistemler için deneysel olarak kıyaslanmıştır. Son olarak İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü ile Gebze Teknik Üniversitesi arasında internet ağı üzerinden farklı serbestlik derecelerine ve farklı kinematik modellere sahip robotlar arasında teleoperasyon deneyleri başarıyla yapılmıştır.</p>
Anahtar Kelimeler:	Robotik, Telerobotik, İleri Uyarlamalı ve Gürbüz Denetim
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır