

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ROBOTİK UZAKBULUNUM SİSTEMLERİ
İÇİN PASİF DENETİMLİ UYARLAMALI BİR
DENETLEYİCİ TASARIMI

UFUK ÖZBAY
DOKTORA TEZİ
BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE
2012

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ROBOTİK UZAKBULUNUM SİSTEMLERİ
İÇİN PASİF DENETİMLİ UYARLAMALI BİR
DENETLEYİCİ TASARIMI

UFUK ÖZBAY
DOKTORA TEZİ
BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN
DOÇ. DR. ERKAN ZERGEROĞLU

GEBZE

2012



**GEBZE YÜKSEK
TEKNOLOJİ
ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA JÜRİ ONAY FORMU

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
.....19.05.2012..... tarih ve 2012/.....13..... sayılı kararıyla oluşturulan
jüri tarafından (19/04/2012 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Ufuk ÖZBAY'ın tez
çalışması Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA tezi olarak kabul
edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Doç. Dr. Erkan ZERGEROĞLU

ÜYE

: Prof. Dr. Muammer KALYON

ÜYE

: Prof. Dr. Selim SİVRİOĞLU

ÜYE

: Doç. Dr. İbrahim B. KÜÇÜKDEMİRAL

ÜYE

: Yrd. Doç. Dr. Abdulkadir BALIKÇI

ONAY

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri/Sosyal Bilimler Enstitüsü Yönetim
Kurulu'nun tarih ve/..... sayılı
kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

TEZİN BAŞLIĞI : ROBOTİK UZAKBULUNUM SİSTEMLERİ İÇİN PASİF DENETİMLİ UYARLAMALI BİR DENETLEYİCİ TASARIMI

YAZAR ADI : UFUK ÖZBAY

Bu bitirme çalışmasında; 1940`lı yıllardan başlayarak, robot bilimcilerin ve mühendislerin üzerinde çalışmalar yapmakta olduğu “telerobotik ve uzakbulunum (telepresence)” konularında etkin uygulama geliştirilmesi ve uyarlama kapasiteli, dayanıklı, ileri denetim algoritmalarının biçimlendirilmesi amaçlanmaktadır. Doktora çalışmasında kullanılan yöntemlerin konu üzerinde çalışmalar yapmış olan diğer araştırma gruplarının yöntemlerinden göstereceği en belirgin farklılık, uzaktan kumanda edilen veya çalışma alanında rehberi ile beraber işlev gören robotik mekanizmanın denetiminin, hem etrafına hem de yönlendiren rehberine karşı “pasif” olacak şekilde tasarlanacak olmasıdır. Bu pasivite özelliği, kullanıcıya robot koşullarını geri besleyen birimler için de geçerli olacaktır. Böylece robot hem etrafında, özellikle ulaşabileceği bir mesafe içerisinde, bulunabilecek diğer çalışanlara (bu gerek insan gerekse başka bir robot olabilir) hem de çalışma alanı içerisinde bulunan ve itina gösterilmesi zorunlu maddelere (robot nükleer atık merkezinde kullanılıyor ise nükleer atıklara, uzakbulunum yolu ile düzenlenen bir operasyonda kullanılıyorsa üzerinde operasyon/inceleme yapılan canlı organizmalara) zarar vermeyecek şekilde kullanıma sunulmaktadır.

SUMMARY

**TITLE OF THE THESIS : A MODEL BASED NONLINEAR ADAPTIVE
CONTROLLER FOR THE PASSIVE BILATERAL
TELEROBOTIC SYSTEM.**

AUTHOR : UFUK ÖZBAY

Telerobotics have been a widely studied field among robotics researchers and engineers since the beginning of 1940's. Our primary objective in this project is to develop and implement advanced control algorithms that are robust to external disturbance and/or can adapt for the uncertainties in the system parameters of telerobotic-telepresence type systems. However the major difference compared to the previous work, is the passivity type of approach we will try to impose on the system. That is; both the robot under the control of the teleoperator and the feedback apparatus attached to the operator (so that the operator can kind of feel the motion of the robot and the structure of the environment robot is working in) will be passive to their environment (thus to the teleoperator). This passivity property enables the telerobotic-telepresence system to safely operate under extreme conditions while still not harming or making any damage to its environment (or to the other organic or robotic devices) and also to itself. Moreover the robot under the supervision of a teleoperator would easily be able to handle fragile objects while dealing complex tasks.

TEŞEKKÜR

Tez alıőmasına danıőmanlık eden değerli hocam Doç. Dr. Erkan ZERGEROĞLU na Abdulkadir BALIKÇI'ya,

Çalıőmanın çeşitli aőamalarında önerileri ile destek veren Doç. Dr. Erkan ZERGEROĞLU, Dr. őeref Naci ENGİN ve Doç. Dr. Recep DEMİRCİ'ye,

İlgili taahhüt hükümleri gereği, Yurt İçi Doktora Burs Programı'ndan burs sağlayan TÜBİTAK'a,

Bir şekilde emeği geçen herkese,

Teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
2. TEORİK ALTYAPI VE YAPILANDIRMA	3
2.1. Fazladan Serbestlik Dereceli Robotların Koterniyonlardan Yararlanılarak Çoklu İçsel Hareket Kriterlerine Göre 3 Boyutlu Gürbüz Kontrolü.	3
2.1.1. Giriş	3
2.1.2. Robot Modeli	6
2.1.2.1. Kinematik Modeli	6
2.1.2.2.. Dinamik Modeli	7
2.1.3 Üç-Boyutlu Oryantasyonun Birim Koterniyonlarla Modellenmesi	8
2.1.4. Kontrol ve Hata Sistemi Formülasyonu	9
2.1.5. Kontrol Tasarımı ve Analizi	13
2.1.6. Birden Fazla İçsel Hareketin Eniyileme Kriterleri	16
2.1.6.1. Hünerlilik – Tekilliklerden Sakınmak	17
2.1.6.2. Eklem Sınırlarından Sakınmak	18
2.1.7. Benzetim Sonuçları	19
2.1.8. Deney Sonuçları	21
2.1.9. Sonuçlar	26
2.2. Robotik Uzakbulunum Sistemleri için Pasif Denetimli Uyarlamalı bir Denetleyici Tasarımı	26
2.2.1. Sistem Modeli	27
2.2.2. Denetim Amacı	29
2.2.3. Hata Dinamiği	31
2.2.4 Ön Denetleyici Tasarımı	33

2.2.4.1. Tam bilinen Sistem Parametreleri için Nonlinear Denetleyici	33
2.2.4.2. Parametrik Belirsizliklere Karşı Uyarlamalı Denetleyici Tasarımı	36
2.2.5. Pasif Uyarlamalı Denetleyici Tasarımı	39
2.2.6. Benzetim Çalışmaları	43
2.2.7. Sonuçlar	53
3. UZAK BULUNUM SİSTEMİ DENEY DÜZENEGİ	54
3.1. Alt Sistemler	54
3.1.1. Uzak Bulunum Sistemi	56
3.1.2. Kumanta Kolu Sistemi	57
3.1.3. Sanal Gerçekçilik Modülü	58
3.2. Deney Düzenegi	60
4. SONUÇLAR VE GENEL GÖRÜŞLER	63
KAYNAKLAR	65
ÖZGEÇMİŞ	68

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

n	:	Bağlantı pozisyon değişkenlerinin sayısı
m	:	İş uzayı değişkenlerinin sayısı
DOF	:	Fazla serbestlik derecesine (Degree of freedom)
$x(t)$:	Konum ve Oryantasyonu
$q(t)$:	Manipülatörün bağlantı açıları vektörünü
$p(q)$:	Robot ucu konum vektörü
$\emptyset(q)$:	Robot ucu oryantasyonunu vektörü Kovan
$\dot{q}(t)$:	Manipülatörün bağlantı hız vektörü
$\ddot{q}(t)$:	Manipülatörün bağlantı ivme vektörü
$J(q)$:	Jakobiyen matrisi
$J^+(q)$:	manipülatör Jakobiyen'inin sözde-tersi
I_n	:	$n \times n$ lik birim matris
$H(q)$:	Performans kriteri fonksiyonunun
$M(q)$:	Eylemsizlik matrisi
$C(q, \dot{q})$:	Merkezkaç-Coriolis matrisi
$G(q)$:	Yerçekimi vektörü
$F(\dot{q})$:	Sürtünme vektörü
ξ_d	:	Sınırlanabilen dış gürültü etkileri
$\tau(t)$:	Tork giriş vektörü
σ_m	:	Jakobiyen'inin en küçük tekil değeri
$\emptyset(t)$:	Birim koterniyon
$\varphi(t)$:	Euler açı/eksen parametreleri
$R(q)$:	Rotasyon matrisi
$J_p(q)$:	Konum Jakobiyeni
$J_\emptyset(q)$:	Oryantasyon Jakobiyeni
$\omega(t)$:	manipülatörün taban çerçevesine göre açısal hızı
e_p	:	Pozisyon hatası
p_d	:	İstenen robot ucu pozisyon vektörü
\tilde{R}	:	Rotasyon hatası matrisi
$\tilde{\omega}(t)$:	Robot ucu açısal hız hatası
$\omega_d(t)$:	Robot ucunun, manipülatörün taban çerçevesine göre istenen açısal

	hızı
$H_i(q)$: i. istenen başarımlı kriterini temsil eden skaler fonksiyon
ω_i	: Pozitif değeri ölçekleme ağırlık fonksiyonları
q_m	: Kumanda koluna (master) ait eklem konum vektörü
\dot{q}_m	: Kumanda koluna (master) ait eklem hız vektörü
\ddot{q}_m	: Kumanda koluna (master) ait eklem ivme vektörü
q_s	: Uzakbulunun robotuna (slave) ait eklem konum vektörü
\dot{q}_s	: Uzakbulunun robotuna (slave) ait eklem hız vektörü
\ddot{q}_s	: Uzakbulunun robotuna (slave) ait eklem ivme vektörü
F_H	: kullanıcının kumanda koluna uyguladığı kuvvet girişı
F_E	: uzak bulunum robotuna çalıştığı ortam tarafından uygulanan kuvvet

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. İş Uzayı Pozisyon Takip Hatası	20
2.2. İş Uzayındaki Oryantasyon Takip Hatası	20
2.3. Benzetimdeki Kontrol Tork Girişleri	21
2.4. Kullanılan açısal hız profili (tüm eksenler)	23
2.5. Robot ucu pozisyon takip hatası	23
2.6. Robot ucu oryantasyon takip hatası	24
2.7. Deney boyunca hünerlilik (Manipulability) değişimi	24
2.8. Deney boyunca içsel hareket en iyileme fonksiyonun değişimleri	25
2.9. Eklemlere uygulanan Çalışmalar	25
2.10. Referans giriş sinyali	45
2.11. Kumanta Kolu Takip Hatası	46
2.12. Robot Takip Hatası.	46
2.13. Kumanta Kolu Robotuna Verilen Denetim Sinyali	47
2.14. Uzak Bulunum Robotuna Verilen Denetim Sinyali	47
2.15 Kumanda Kolu Atalet Matrisi Parametreleri Tahminleri	48
2.16 Kumanda Kolu Sürtünme Matrisi Parametreleri Tahminleri	48
2.17. Uzak Bulunum Robotu Atalet Matrisi Parametreleri Tahminleri	49
2.18. Uzak Bulunum Robotu Merkezkaç-Coriolis Matrisi Parametreleri Tahminleri	49
2.19. Uzakbulunum Robotu Sürtünme Matris Parametrelerinin Tahminleri	50
2.20. Uyarlamalı Benzetimlerde Kumanda Kolu ve Uzakbulunum Robotlarının Düzlemsel Hareketleri	50
2.21. Kumanda Kolunun 0-100 mili saniye zaman gecikmelerinde hata çıkışları	51
2.22. Kumanda Kolunun 250-600 mili saniye zaman gecikmelerinde hata çıkışları	51
2.23. Uzakbulunum Robotunun 0-100 milli saniye zaman gecikmelerinde hata çıkışları	52
2.24. Uzakbulunum Robotunun 250-600 milli saniye zaman gecikmelerinde hata çıkışları	52
3.1. Uzak Bulunum Sisteminin Genel Diagramı	54

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.2. Uzakbulunum Robot Sistemi	57
3.3. Kumanda Kolu Sistemi	58
3.4. Sanal Gerçekçilik Sistemi	58
3.5. Uzak Bulunum Robot Sistemi Genel Görünüşü	60
3.6. Uzak Bulunum Sistemimizden Deneyler Sırasında	61
3.7. Uzak Bulunum Sistemimizden deneysel çalışmalar sırasında alınan datalar	61
3.8. Sanal Gerçekçilik Bilgisayar ve Kask Sistemimiz	62
3.9. Kullanıcı tarafında bulunan Haptik arabirim	62

1. GİRİŞ

Robotik biliminin belki de en eski çalışma alanlarından biri teleoperatif/telerobotik çalışmalarıdır. Operatörün direkt olarak çalışma alanı içinde bulunmasının zor veya imkânsız olduğu durumlarda, uzaktan yönlendirilen bir robotik cihaz tarafından operasyonun yapılması teleoperasyon (uzakbulum), işi gerçekleştiren robotik mekanizma ise telerobot olarak adlandırılmaktadır. Teleoperasyon çalışmaları temel olarak iki ayrı, uzakbulunum robotu ve kullanıcı tarafından yönlendirilen bir kumanda kolu, sistemin beraber koordineli olarak çalıştırılmasını gerektirir. Telerobotik sistemler için kullanılan denetim sistemleri endüstriyel robot denetim sistemlerinde kullanılan konum servo sistemlerinden farklılık göstermelidir. Özellikle robot çalışma alanında insan veya özen gösterilmesi gereken nesnelere bulunmakta ise robot bir noktadan diğer noktaya giderken karşısına çıkacak nesnelere karşı hassas olmalı, gerektiğinde yörüngesini değiştirebilmeli veya önüne çıkan nesneyi zarar vermeden iterek yolundan uzaklaştırabilmelidir. Bu gibi hassas konumlama gerektiren operasyonlar için robot dinamiğini yok sayan ve direkt olarak kinematik düzeyde çalışmayı tercih eden sistem yaklaşımları uygun değildir. Dolayısıyla ile modern teleoperasyon sistemlerinin kontrol/kumandasında kullanılan robotik mekanizmaların doğrusal olmayan sistem dinamikleri göz önünde tutulurken aynı zamanda da genel sistemin gerek kullanıcıya gerekse çevresine karşı pasiflik özelliklerini koruması beklenmektedir.

Uzakbulunum için robotik cihaz belirlenen işi yaparken ortamda olmayan kullanıcıya yapılan iş ve ortam hakkında sanki kullanıcı işin yapıldığı ortamda bulunuyormuş hissini verebilmektir. Böylece belirlenen iş yapılırken kullanıcı hünerinin robot kontrol algoritmasına katkıda bulunabilmesine olanak verilmiş de olur. Bunun başarılması ise özellikle kullanıcıya ortam hakkında dokunsal ve görsel geri besleme yapılarak sağlanabilir.

Bu doktora çalışması kapsamında yukarıda verilen problemlere çözüm getirebilecek teorik yaklaşımlar geliştirilmiş, geliştirilen yaklaşımların uygulanabilirlikleri benzetim çalışmaları ile desteklenmiş ve elde edilen veriler

ışığında gelişkin telerobotik-uzakbulunum denetlerinin de yapılabileceği bir deneysel düzenek oluşturulmaya çalışılmıştır.

Doktora raporumuzun geri kalan kısmı şu biçimde organize edilmiştir: İkinci bölümde sırası ile ilk önce artik eklemler robotlar sonrasında da pasif telerobotik sistemimiz için geliştirdiğimiz teorik altyapı, bu alt yapının kararlılık analizleri ve benzetimlerle desteklenmiş uyarlanabilirlikleri sunulmuştur. Üçüncü bölümde projemiz kapsamında geliştirilen dokunsal (haptik) arabirimle beraber geliştirilen deneysel düzeneğimizin alt birimleri tanıtılmıştır. Dördüncü bölüm geliştirilen yazılımlara ayrılmış olup beşinci bölümde oluşturulan deney düzeneği genel olarak tanıtılmaktadır. Son bölümümüz sonuçlar ve gelecekte yapılabilecek ve yapılması planlanan aktivitelere ayrılmıştır.

2. TEORİK ALTYAPI VE YAPILANDIRMA

Bu bölümde doktora çalışması kapsamında yapılan teorik çalışmalar sunulacak, oluşturulan teoriler gerek benzetim gerekse deneysel çalışmalarla desteklenmeye çalışılacaktır.

Teorik çalışmalarımız iki alt bölümde incelenebilir. Bunlar esas amacımız için denetleyici temellerini oluşturduğumuz fazladan eklemli (artık eklemli) robotların çoklu içsel hareket kriterleri ile ilgili gürbüz bir denetleyici tasarımı, ikinci alt bölümde ise ilk bölümde oluşturulan temel üzerine bina ettiğimiz pasif uyarlamalı telerobotik denetleyici tanıtılacaktır. Yapılan çalışmalarda kinematik serbestlik fazlalığı olan robotlar için çoklu içsel hareket kriterleri ile ilgili kontrolcü (robust) için hem benzetim hem de deneysel sonuçlar sunulmuşken pasif uyarlamalı telerobotik denetleyicimiz için sadece benzetim sonuçları sunulmuştur.

Yapılan benzetim ve deneysel çalışmalar Enstitümüzün Kontrol Uygulamaları ve Robotik Laboratuvarında çeşitli platformlar için geliştirilen gerçek zamanlı yazılımlar ile geliştirdiğimiz dokunsal arabirim ve laboratuvarımızdaki Puma 560 endüstriyel robot kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

2.1. Fazladan Serbestlik Dereceli Robotların Koterniyonlardan Yararlanılarak Çoklu İçsel Hareket Kriterlerine Göre 3 Boyutlu Gürbüz Kontrolü.

2.1.1. Giriş

Robot manipülatörleri ciddi oranda non-lineerlik içeren çok giriş-çıkışlı sistemlerdir. Ayrıca bu sistemler genellikle dinamik modellerindeki belirsizliklerden ve işletim ortamından kaynaklanan dış gürültüden de olumsuz etkilenmektedirler. Dolayısıyla etkin bir robot takip denetleyicisinin, bu tür etkilere karşı sağlam bir başarımla göstermesi son derece önemlidir. Fazladan serbestlik dereceli manipülatörler, iş uzayında herhangi bir görevi gerçekleştirmek için gerekenden daha

fazla serbestlik derecesine (DOF) sahip karmaşık sistemlerdir. Fazladan serbestlik derecesinden, zorlu görevlerde başarımının yükseltilmesinde ya da esneklik artışı sağlanmasında yararlanılabilir. Bu tip manipülatörlerin, bağlantı pozisyon değişkenlerinin sayısı “ n ”, iş uzayı değişkenlerinin sayısı “ m ” den daha fazla olduğu için, Jakobiyen matrislerinin en az “ $n-m$ ” boyutlu sıfır uzayları bulunmaktadır. Sıfır uzayına denk gelen bağlantı hızları, iş uzayındaki robot ucu hızını etkilememekte, dolayısıyla “içsel hareket” olarak adlandırılmaktadırlar. [Nakamura, 1991], [Nenchev, 1989] ve [Siciliano, 1990]'da belirtildiği gibi, serbestlik derecesi fazla olan manipülatörlerin ters kinematikleri için genellikle sonsuz sayıda çözüm bulunmaktadır. Bu nedenle yalnızca istenen robot ucu yörünge spesifikasyonları ile hem tüm sinyallerin kararlı olması gibi kontrol amaçlarını, hem de teklikler ve eklem sınırlarından sakınma gibi mekanik zorunlulukları sağlamaya uygun bir eklem uzayı yörüngesinin elde edilmesi son derece zordur. Serbestlik derecesi fazla robotlar için etkin denetleyici tasarımlarının, parametrik belirsizlikler ve dış gürültülere karşı hassas robot ucu takibini gerçekleştirirken, mekanik zorunluluklara karşı da “içsel hareketlerden” yararlanarak manipülatörün başarımını arttırmaları gerekmektedir.

Düzlemsel olmayan robot manipülatörlerinin 3-boyutlu iş uzayında kinematik modellerindekiler haricinde teklik problemi yaşamaması için, konum ve oryantasyon değişkenlerinin en uygun şekilde temsili önemlidir. Sık kullanılan Euler açıları ve Rodriguez parametreleri gibi teknikler, iş uzayının belli kısımlarında teklikler içerir ve denetleyicilerin başarımını olumsuz şekilde etkileyebilmektedirler. Bu problemten etkilenmemek için çalışmamızda, oryantasyon temsilinde 4 parametreden oluşan koterniyon değişkenlerinden yararlanılmıştır.

Serbestlik derecesi fazla manipülatörler için denetleyici geliştirme problemine birçok araştırmacı farklı çözüm önerileri getirmiştir. Khatib, [Khatib, Dec. 1983]'te Kartezyen uzayda bir manipülatörün dinamik modeli için uygun kontrol yöntemi geliştirip, bu sonucu Jakobiyen matrisinin sözde-tersini kullanarak serbestlik derecesi fazla robotlara genelleştirmiştir. Seraji, [Seraji, August 1989]'te iş uzayında robot ucu hareketine, kinematik ya da dinamik amaçların en iyilenmesi veya “duruş denetimi” (posture control) gibi “ $n-m$ ” adet yeni görev eklendiği konfigürasyon

denetimi yaklaşımını önermiştir. Hsu ve arkadaşları [P. Hsu, J. Hauser, and S. Sastry, 1989]'da, robot ucu takibini sağlamanın yanı sıra, fazladan bağlantı hızlarının da denetimine olanak sağlayan bir dinamik geri beslemeli linearizasyon denetleyicisi önermişlerdir. Oh ve arkadaşları [Y. Oh and W. K. Chung, June 1999]'de, serbestlik derecesi fazlası bulunan manipülatörlerin robot ucu ve sıfır uzayı hareketlerini kontrol eden gürültü gözlemleyicisi tabanlı bir denetleyici önermişlerdir. Zergeroğlu ve arkadaşları [E. Zergeroglu, D. M. Dawson, I. W. Walker, and P. Setlur, March 2004]'de Üstel robot ucu ve “yan görev” takibi sağlayan model tabanlı bir denetleyici önermişlerdir. Aynı çalışmada uyarlamalı ve çıkış geri-beslemeli denetleyiciler için de öneriler getirilmiştir. Bing ve arkadaşları [B. Xian, M. S. de Queiroz, D. Dawson, and I. Walker, Feb. 2004]'da, [E. Zergeroglu, D. M. Dawson, I. W. Walker, and P. Setlur, March 2004]'deki denetleyiciyi koterniyon geometrisine uyarlamıştır. Ancak bu denetleyiciler ya belirsiz robot dinamiklerinin lineer parametrelerine ayrıştırılabildiğini (uyarlamalı denetim), ya da sisteme dış gürültü etkisinin olmadığını (çıkış geri beslemeli denetim) varsaymaktadırlar. Bu geçmiş araştırmaların incelenmesinden serbestlik derecesi fazlalığı olan manipülatörlerin kontrolü için iki genel yaklaşımın benimsendiği gözlemlenebilir. İlk yaklaşım iş uzayının boyutunun probleme yeni kısıtlamalar eklenmesiyle arttırılarak sistemin serbestlik derecesi fazlasının giderilmesidir. Bu yaklaşım genişletilmiş Jakobiyen matrisine yeni algoritmik tekil noktalar eklenmesine, dolayısıyla robotun mekanik tekilliklerinden farklı durumlardayken de kontrol girişinin sonsuza ıraksamasına neden olabilmektedir. İkinci genel yaklaşım ise manipülatör Jakobiyen'inin sözde-tersinden yararlanan kontrol formülasyonlarıdır. Bu yaklaşım robotun asıl tekil noktalarında kontrol sinyalinin sınırlı kalmasını garantileyemese de, sisteme ek tekillikler dâhil etmemektedir. Yakın zamanlarda yapılan çalışmalarda ise Braganza ve arkadaşları hem kinematik hem de dinamik belirsizliği bulunan robot manipülatörleri için uyarlamalı bir denetleyici geliştirmiştir [D. Braganza, W.E. D. Dixon, D. Dawson and I. Walker, Dec. 2005]. Tatlıcıoğlu ve arkadaşları da yan görev eklentileri bulunan uyarlamalı bir kontrol önermiştir, ancak bu yan görevler genellikle robot dinamiklerinin tam olarak bilinmesini gerektirmektedir [E. Tatlıcıoğlu, M. McIntyre, D. Dawson, and I. Walker, Dec. 2005].

Bu doktora çalışmasında genelleştirilmiş sözde-ters formülasyonu ve 4 parametrelili birim koterniyon temsili yöntemlerinden faydalanılarak serbestlik

derecesi fazla robot manipülatörleri için gürbüz bir denetleyici geliştirilecektir. Önerilen kontrol, robot dinamikleri ve dış etkenlerden kaynaklanan belirsizliklere karşın, düzgün mutlak sınırlanmış robot ucu ve “yan görev” takibini başarmaktadır. Önerilen denetleyicinin bir diğer avantajı birden fazla yan görevi aynı anda gerçekleştirebilmesidir. Literatürdeki denetleyicilerden [P. Hsu, J. Hauser, and S. Sastry, 1989]'daki sisteme göre robot dinamiklerinin parametrik belirsizliklere karşı sağlam olması; [Y. Oh and W. K. Chung, June 1999]'ye göre sisteme fazladan tekillikler eklememesi; [E. Zergeroglu, D. M. Dawson, I. W. Walker, and P. Setlur, March 2004] ve [E. Tatlicioglu, M. McIntyre, D. Dawson, and I. Walker, Dec. 2005]'e göre daha geniş bir belirsizlik sınıfını denetleyebilmesi ve yine [E. Tatlicioglu, M. McIntyre, D. Dawson, and I. Walker, Dec. 2005]'e göre daha kapsamlı sürtünme modeli içermesi ve sistem dinamiklerine ihtiyaç duymadan birden fazla “yan görev” amacını eşzamanlı olarak gerçekleştirebilme avantajlarına sahiptir.

Sonraki alt bölümler şu şekilde sıralanmıştır. 2.1.2 bölümde fazladan serbestlik derecesi olan manipülatörlerin kinematik ve dinamik Özellikleri Özetlenmiştir. 2.1.3. bölümde birim koterniyon temsiline kısa bir tanıtım bulunmaktadır. 2.1.4. bölümde denetim amacı tanımlanmakta ve hata sistemi kurulmaktadır. Kontrol tasarımı detaylı olarak 2.1.5. bölümde açıklanmaktadır. Birden fazla “yan görevin” aynı anda sağlanması ile ilgili kriterler bölüm 2.1.6'da özetlenmiştir. Son olarak bölüm 2.1.7'de benzetim sonuçları ve bölüm 2.1.8'de sonuçlar yer almıştır.

2.1.2. Robot Model

2.1.2.1. Kinematik Model

Robot ucunun i uzayında, konum ve oryantasyonu $x(t) \in \mathbb{R}^m$

$$x = f(q) = \begin{bmatrix} p(q) \\ \emptyset(q) \end{bmatrix} \quad (2.1.1)$$

şeklinde eklem pozisyon vektörünün fonksiyonu olarak tanımlanır [M. W. Spong, 1989]. Denklem (2.1.1)'de, $f(q) \in \mathbb{R}^m$, $m \in \mathbb{Z}$, ileri kinematik denklemlerini; $q(t) \in \mathbb{R}^n$ 2 n-bağlantılı bir manipülatörün bağlantı açıları vektörünü; $p(q) \in \mathbb{R}^1$ ve

$\emptyset(q) \in \mathbb{R}^{(m-1)}$ vektörleri robot ucu konum ve oryantasyonunu ve $l \in \mathbb{Z}$ iş uzayının boyutunu göstermektedir. Denklem (2.1.1)'den, robot ucu ve bağlantı konum değerleri arasındaki diferansiyel ilişkiler:

$$\dot{x} = J(q)\dot{q}, \quad \ddot{x} = \dot{J}(q)\dot{q} + J(q)\ddot{q} \quad (2.1.2)$$

Denklemleri ile elde edilir. (2.1.2)'de $\dot{q}(t), \ddot{q}(t) \in \mathbb{R}^n$ bağlantı hız ve ivme vektörleri, $J(q) \triangleq \partial f(q)/\partial q \in \mathbb{R}^{m \times n}$ manipülatörün Jakobiyen matrisidir. Kinematik serbestlik derecesi fazlalığı bulunan robotlar için, eklem hızları şu ilişkiyle temsil edilebilir

$$\begin{aligned} \dot{q} &= J^+ \dot{x} + (I_n - J^+)q \\ &= J^+ \dot{x} + k(I_n - J^+)[\nabla H(q)] \end{aligned} \quad (2.1.3)$$

Bu denklemde $J^+(q) \in \mathbb{R}^{n \times m}$ manipülatör Jakobiyen'inin sözde-tersi olup

$$J^+ = J^+(JJ^T)^{-1}, \quad JJ^T = I_m \quad (2.1.4)$$

denklemleri ile tanımlanır [C. R. Rao, and S. K. Mitra, 1971]. (2.1.4) denkleminde $I_n \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $n \times n$ 'lik birim matrisi, $(I_n - J^+)$ izdüşümü matrisinin sıfır uzayını göstermektedir. $J^+ \dot{x}$ en küçük normlu eklem hızını veren çözüm; $(I_n - J^+)g$ denklem (2.1.3)'ün J 'nin sıfır uzayında homojen çözümü ve $g(t) \in \mathbb{R}^n$ ise uygulama koşulları dikkate alınarak (mekanik sınırlardan sakınma, engel aşma gibi alanlarda) seçilebilen "yan görev" denetim amacına göre manipülatörün başarımının artırılmasını sağlayan yardımcı hız vektörüdür. Bu başarım iyileştirmesi uygun bir $H(q) \in \mathbb{R}$, performans kriteri fonksiyonunun en iyileştirilmesiyle elde edilecektir.

2.1.2.2. Dinamik Model

n -bağlantılı, revolüt, doğrudan sürmeli bir robot manipülatörünün dinamik modeli

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + F(\dot{q}) + \xi_d = \tau \quad (2.1.5)$$

denklemindeki gibi alınmıştır [M. W. Spong, 1989]. (2.1.5)'de $M(q) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ve $C(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ eylemsizlik ve merkezkaç-Coriolis matrislerini $G(q) \in \mathbb{R}^n$ ve $F(\dot{q}) \in \mathbb{R}^n$ yerçekimi ve sürtünme vektörlerini, $\xi_d \in \mathbb{R}^n$ sınırlanabilen dış gürültü etkilerini ve $\tau(t) \in \mathbb{R}^n$ tork giriş vektörünü göstermektedir.

Denetleyicinin geliştirilmesi sırasında, manipülatör Jakobiyen'inin en küçük tekil değeri σ_m 'nin bilinen küçük bir $\delta > 0$ sabitinden büyük olduğu varsayılmaktadır. Buna göre $\max\{\|J^+(q)\|\}$ önceden bilinmekte ve tekil noktalardan sakınılması mümkün olmaktadır. Ayrıca yalnız revolüt robot manipülatörleri üzerinde durulacağı için $M(q), C(q, \dot{q}), G(q), J(q)$ ve $J^+(q)$ ile gösterilen tüm kinematik ve dinamik terimlerin $q(t)$ 'nin alacağı her değer için sınırlı kaldığı bilinmektedir.

2.1.3. Üç-Boyutlu Oryantasyonun Birim Koterniyonlarla Modellenmesi

3-boyutlu iş uzayındaki denetleyici fonksiyonlarının Euler açıları gibi, en az sayıda parametre ile temsil edilmesi, $SO(3)$ uzayında sisteme tekil noktalar dahil eder [R. M. Murray, Z. Li, S. S. Sastry, 1994]. Koterniyonlar ise oryantasyon için bir tane fazla parametre kullanarak $SO(3)$ uzayında sistem için tekillik göstermeyen parametrizasyonlar sağlarlar. Bu özellikten yararlanabilmek için çalışmamızda koterniyon tabanlı yaklaşım benimsenmiştir. Robot ucunun, taban çerçevesine (base frame) göre oryantasyonu, birim koterniyon $\emptyset(t) = [\eta(t), \vec{\varepsilon}(t)]^T \in \mathbb{R} \times \mathbb{R}^3$ ile

$$\eta(t) \triangleq \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right), \quad \vec{\varepsilon}(t) = [\varepsilon_1 \quad \varepsilon_2 \quad \varepsilon_3]^T \triangleq a \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) \quad (2.1.6)$$

şeklinde temsil edilir. (2.1.6)'da $\varphi(t) \in [0, 2\pi)$ ve $a(t) \in \mathbb{R}^3$ Euler açı/eksen parametreleri olup, $\vec{\varepsilon}^T \vec{\varepsilon} + \eta^2 = 1$ kısıtlamasını sağlarlar. Bir $\emptyset(t)$ birim koterniyonuna karşılık gelen rotasyon matrisi $R(q) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ de

$$R(q) = (\eta^2 - \vec{\varepsilon}^T \vec{\varepsilon})I^3 + 2\vec{\varepsilon} \vec{\varepsilon}^T - 2\eta \vec{\varepsilon}^x, \quad (2.1.7)$$

formülü ile elde edilir [Hughes, 1994]. Denklem (2.1.7)'de $\vec{a}^x, \forall \vec{a} = [a_1 \ a_2 \ a_3]$ gösterimi,

$$(\vec{a})^x \triangleq \begin{bmatrix} 0 & -a_3 & a_2 \\ a_3 & 0 & -a_1 \\ -a_2 & a_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.1.8)$$

şeklinde ters-simetrik bir matristir. Koterniyon cebirinden ve denklem (2.1.1)'den yararlanılarak, (2.1.2)'deki diferansiyel ilişki

$$\begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{\emptyset} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_p(q) \\ J_{\emptyset}(q) \end{bmatrix} \dot{q} \quad (2.1.9)$$

biçimine getirilebilir. Bu ifadede $J_p(q) \in \mathbb{R}^{3 \times n}$ ve $J_{\emptyset}(q) \in \mathbb{R}^{4 \times n}$ sırasıyla konum ve oryantasyon Jakobiyen'lerini gösterir. Robot ucunun, manipülatörün taban çerçevesine göre açılma hızı $\omega(t) \in \mathbb{R}^3$ ile $\emptyset(t)$ arasındaki ilişki ise

$$\dot{\emptyset} = \frac{1}{2} B(\eta, \vec{\epsilon}) \omega \text{ ve } B(\eta, \vec{\epsilon}) \triangleq \begin{bmatrix} -\vec{\epsilon}^T \\ \eta I_3 - \vec{\epsilon}^x \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{4 \times 3} \quad (2.1.10)$$

denklemleriyle modellenir. Denklem (2.1.9)'a $B^T B = I_3$ ifadesi uygulanırsa, robot ucu ve eklem hızları vektörleri arasındaki

$$\begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = J_q(q) \dot{q}, \quad (2.1.11)$$

denklemini elde ederiz. (2.1.11)'de $J_q(q) \in \mathbb{R}^{6 \times n}$ robot ucunun Jakobiyen matrisidir:

$$J_q(q) \triangleq \begin{bmatrix} J_p(q) \\ 2B^T J_{\emptyset}(q) \end{bmatrix}. \quad (2.1.12)$$

2.1.4. Kontrol ve Hata Sistemi Formülasyonu

Genel denetim amacımız robot ucunun istenen bir konum ve oryantasyon yörüngesini mümkün olduğunca yakın takip etmesi için $\tau(t)$ tork girişinin

tasarlanmasıdır. Kontrol girişi aynı zamanda manipülatörün serbestlik derecesi fazlası yoluyla (eklem sınırlarından sakınma veya engel aşma gibi) en az bir hareket eniyileme ölçütüne göre tanımlanan “yan görevleri” yerine getirebilmelidir. İş uzayında pozisyon ve oryantasyon takibi “temel kontrol amacı”, robotun fazladan serbestlik derecelerinden yararlanarak başarımların artırılması ise “yan denetim amacı” olarak adlandırılacaktır.

Ana denetim amacı için istenen robot ucu konum ve oryantasyonu ile asıl pozisyon/oryantasyon arasındaki hata sinyallerinin tanımlanması gerekir. Manipülatörün pozisyon hatası:

$$e_p = p_d - p \quad (2.1.13)$$

biçiminde tanımlanır. Denklem (2.1.13)'deki $p_d(t) \in \mathbb{R}^3$ istenen robot ucu pozisyon vektörü olup $p_d(t)$, $\dot{p}_d(t)$, ve $\ddot{p}_d(t)$ 'nin zamanın sınırlı fonksiyonları olduğu varsayılmıştır. Robotun oryantasyon hata işaretinin tanımı için, $\tilde{R} \triangleq RR_d^T$ rotasyon hatası matrisi ve $e_\theta \triangleq [e_\eta, e_\epsilon]^T$ koterniyon tabanlı hata ifadesinden yararlanılacaktır. Bu ifadelerden robot ucu açısal hız hatası $\tilde{\omega}(t)$,

$$\tilde{\omega}(t) = \omega - \tilde{R}\omega_d \quad (2.1.14)$$

şeklinde olup, $\omega(t)$, (2.1.11)'de tanımlanmış $\omega_d(t)$ ise robot ucunun, manipülatörün taban çerçevesine göre istenen açısal hızıdır. $\phi_d(t)$ ve $\omega_d(t)$ arasındaki ilişki de (2.1.10)'daki verilen ilişkiye benzer bir şekilde:

$$\dot{\phi}_d = \frac{1}{2}B(\eta_d, \tilde{\epsilon}_d)\omega_d \quad (2.1.15)$$

dinamikleri ile ifade edilir.

Bu tanımların ışığında, “ana denetim amacı” uygun bir $\tau(t)$ kontrol tork sinyali geliştirilerek, robot ucu konum ve oryantasyonunun istenen yörüngeleri mümkün

olduğunca yakın takip etmesinin sağlanmasıdır. “Yan görev amacı” için ise yan görev takip hatası, $e_N(t) \in \mathbb{R}^n$:

$$e_N = (I_n - J^+J)(g - \dot{q}) \quad (2.1.16)$$

şeklinde tanımlanabilir [P. Hsu, J. Hauser, and S. Sastry, 1989].

Robot ucu konum hatasının formülasyonu için denklem (2.1.13)'ün zamana göre türevi alınır,

$$\dot{e}_p = \dot{p}_d - \dot{p} \quad (2.1.17)$$

Robot ucu oryantasyon hata sistemi için ise denklemler (2.1.10), (2.1.15), ve (2.1.14)'ün uygulanmasıyla, $e_\emptyset(t)$ birim koterniyonunun zamanda türevi elde edilir:

$$\dot{e}_\emptyset = \frac{1}{2}B(e_\eta, e_\varepsilon)\tilde{\omega} \quad (2.1.18)$$

denklem (2.1.18)'de $B(\cdot) \in \mathbb{R}^{4 \times 3}$, (2.1.10)'daki ifadenin aynısıdır. (2.1.10) ve (2.1.15). denklemlerden, oryantasyon hatası

$$\dot{e}_\eta = -\frac{1}{2}e_\varepsilon^T \tilde{\omega}, \quad \dot{e}_\varepsilon = \frac{1}{2}(e_\eta I_3 - e_\varepsilon^x)\tilde{\omega} \quad (2.1.19)$$

biçiminde bulunur. Bu noktada [B. Xian, M. S. de Queiroz, D. Dawson, and I. Walker, Feb. 2004]dakine benzer bir yaklaşımla,

$$V_0 = \frac{1}{2}e_p^T e_p + (1 - e_\eta)^2 + e_\varepsilon^T e_\varepsilon \quad (2.1.20)$$

pozitif skaler fonksiyonu tanımlanmıştır. (2.1.20)'nin zamana göre türevi alınır; (2.1.17), (2.1.19) ve (2.1.14) denklemleri uygulanırsa

$$\dot{V}_0 = e_p^T(\dot{p}_d - \dot{p}) + e_\varepsilon^T R_d^T(\omega - \omega_d) \quad (2.1.21)$$

ifadesi elde edilir. Bazı matematiksel işlemlerden sonra (2.1.21) şu forma getirilebilir;

$$\dot{V}_0 = -e_p^T K_p e_p - e_\varepsilon^T K_0 e_\varepsilon + [e_p^T \quad e_\varepsilon^T] J_{ex} r_q \quad (2.1.22)$$

Bu ifadede filtrelenmiş hata terimi ve genişletilmiş Jakobiyen matrisi, r_q ve $J_{ex} \in \mathbb{R}^{6 \times n}$

$$r_q \triangleq (J_{ex})^\# \begin{bmatrix} \dot{p}_d + K_p e_p \\ -R_d^T \omega_d + K_0 e_\varepsilon \end{bmatrix} + (I_n - J_q^+ J_q) g - \dot{q} \quad (2.1.23)$$

$$J_{ex} \triangleq \begin{bmatrix} I_3 & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & -R_d^T \end{bmatrix} J_q, \quad (J_{ex})^\# \triangleq J_q^+ \begin{bmatrix} I_3 & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & -R_d \end{bmatrix}$$

ifadeleriyle tanımlanmıştır. (2.1.23)'te r_q nun K_p, K_0 kazançları köşegensel, pozitif tanımlı kazanç matrisleri, ve $g \in \mathbb{R}^n$ “yan görev” amacı için kontrol girişidir. (2.1.23)'te tanımlanan $r_q(t)$ 'yi $(I_n - J_q^+ J_q)$ ile önden çarparsak,

$$e_N = (I_n - J_q^+ J_q) r_q \quad (2.1.24)$$

ifadesini elde ederiz. Bu ifadeye göre $r_q(t)$ uygun şekilde denetlendiği zaman, (2.1.16)'da tanımlanan “yan görev” takip hatası da aynı şekilde kontrol edilecektir. Filtrelenmiş hatanın açık çevrim dinamikleri, (2.1.20), (2.1.22) denklemleri ve $r_q(t)$ 'nin (2.1.23)'te tanımlanan yapısal özelliklerinden yararlanılarak alınan zamanda türevinin $M(q)$ ile çarpılıp, (2.1.5)'teki sistem dinamiklerinin eklenmesi ile

$$M \dot{r}_q = -C r_q + \omega_{r_q} - \tau \quad (2.1.25)$$

biçiminde elde edilir. (2.1.25)'teki ω_{r_q} fonksiyonu:

$$\begin{aligned}
& \omega_{rq} \triangleq \\
& M(q) \frac{d}{dt} \left\{ (J_{ex})^\# \begin{bmatrix} \dot{p}_d + K_p e_p \\ -R_d^T \omega_d + K_0 e_\varepsilon \end{bmatrix} + (I_n - J_q^+ J_q) g \right\} \\
& + C(q, \dot{q}) \left\{ (J_{ex})^\# \begin{bmatrix} \dot{p}_d + K_p e_p \\ -R_d^T \omega_d + K_0 e_\varepsilon \end{bmatrix} + (I_n - J_q^+ J_q) g \right\} \\
& + G(q) + F(\dot{q}) + \xi_d
\end{aligned} \tag{2.1.26}$$

şeklinde gösterilebilir. ω_{rq} fonksiyonu da genel manipülatör dinamikleri gibi, lineer parametrelerine ayrıştırılabilen ve ayrıştırılamayan $W_q \theta$ ve ξ_{rq} kısımlara ayrılabilir:

$$\omega_{rq} = W_q \theta + \xi_{rq} \tag{2.1.27}$$

2.1.5. Kontrol Tasarım ve Analiz

(2.1.22) ve (2.1.25)'teki hata dinamiklerine göre

$$\tau = W_q \hat{\theta} + K_q r_q + J_{ex}^T \begin{bmatrix} e_p \\ e_\varepsilon \end{bmatrix} + \frac{r_q \rho_q^2}{\|r_q\| \rho_q + \epsilon} \tag{2.1.28}$$

şeklinde bir kontrol girişi, $e_p(t)$, $e_\varepsilon(t)$ ve $r_q(t)$, hata sinyallerini küresel olarak düzgün mutlak şekilde sınırlar. (2.1.28)'de $\hat{\theta}$ (2.1.27)'de tanımlanan parametreler için en iyi tahminlerin vektörü; K_q pozitif tanımlı, köşegensel bir kazanç matrisi, ρ_q

$$\rho_q \geq \|W_q \tilde{\theta}\| + \|\xi_{rq}\| \tag{2.1.29}$$

eşitsizliğini sağlayacak şekilde ayarlanması gereken bir sınırlama sabitidir. Denklem (2.1.28)'i (2.1.25)'te yerine yazarsak, $r_q(t)$ için kapalı çevrim dinamikleri elde edilir.

$$M \dot{r}_q = -C r_q + W_q \tilde{\theta} + \xi_{rq} - K_q r_q - J_{ex}^T \begin{bmatrix} e_p \\ e_\varepsilon \end{bmatrix} - \frac{r_q \rho_q^2}{\|r_q\| \rho_q + \epsilon} \tag{2.1.30}$$

Şimdi sistemin hata işaretleri ile ilgili şu teoremi tanımlayabiliriz.

Teorem 2.1.1 (2.1.28)'deki gürbüz denetim kanunu robot ucu konum ve oryantasyon hata işaretlerinin

$$\|e_p(t)\|, \|e_\varepsilon(t)\| \leq \|z_q(t)\| < \bar{d}, \quad t \geq 0 \quad (2.1.31)$$

şeklinde küresel düzgün mutlak sınırlanmasını (UUB) sağlar. Denklem (2.1.31)'de $z_q(t)$; vektörü,

$$z_q(t) \triangleq [r_q^T \quad e_p^T \quad e_\varepsilon^T]^T \quad (2.1.32)$$

şeklinde tanımlanmış olup, robot ucu pozisyon ve oryantasyon hatalarının mutlak sınırlarını belirler; $\bar{d} \in \mathbb{R}$ ise

$$\bar{d} = \sqrt{\frac{\left(\|z_q\|^2 + \left(\frac{\epsilon}{\lambda_3} + \varphi\right)\right)}{\lambda_1} \exp\left(-\frac{\lambda_3}{\lambda_1}t\right) + \frac{\epsilon + \lambda_3\varphi}{\lambda_1\lambda_3}} \quad (2.1.33)$$

formunda tanımlanır. Denklem (2.1.33)'te ϵ sabiti (2.1.28)'de tanımlanmıştır. Negatif olmayan $\varphi, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 \in \mathbb{R}$ ise,

$$\begin{aligned} \varphi &= (1 - e_\eta)^2, \quad \lambda_1 = \min\left\{\frac{1}{2}, \frac{m_1}{2}\right\}, \quad \lambda_2 = \max\left\{1, \frac{m_2}{2}\right\}, \\ \lambda_3 &= \min\{\lambda_{\min}(K_q), \lambda_{\min}(K_p), \lambda_{\min}(K_o)\} \end{aligned} \quad (2.1.34)$$

denklemlerindeki gibi tanımlanmıştır.

Kant 1.1 Teorem 2.1.1'in ispatı için,

$$V = \frac{1}{2} r_q^T M r_q + V_0 \quad (2.1.35)$$

şeklinde negatif olmayan skaler V fonksiyonunu tanımlayalım. Bu ifadede V_0 ; (2.1.20)'deki gibidir. Robot dinamiklerinin uygun özelliklerinin kullanımı ile (2.1.35),

$$\lambda_1 \|z_q\|^2 \leq V(z_q, t) \leq \lambda_2 \|z_q\|^2 + \varphi \quad (2.1.36)$$

biçiminde alt ve üst sınırlar içine alınabilir. (2.1.36) eşitsizliğinde, λ_1 ve φ (2.1.34)'te tanımlanmış olup, eşitsizliğin sağ tarafındaki $\gamma_2(\|z_q\|) = \lambda_2 \|z_q\|^2 + \varphi$ pozitif fonksiyonları radyal olarak sınırsızdır (radially unbounded). Bunun nedeni $z_q = 0$ ifadesi, $e_\eta = 1$ olmasını gerektirdiğinden, $\gamma_2 = 0$ ve $\lim_{z_p \rightarrow \infty} \gamma_2(\|z_q\|) = \infty$ 'dur. (2.1.35)'in zamanda türevi alınır, (2.1.22) ve (2.1.30) yerlerine yazılır, fazladan terimler sadeleştirilir, ve eylemsizlik, merkezkaç-Coriolis matrisleri arasındaki ters simetri özelliği uygulanırsa

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -e_p^T K_p \dot{e}_p - e_\varepsilon^T K_0 e_\varepsilon \\ & + r_q^T \left(W_q \tilde{\theta} + \xi_{r_q} - K_q r_q - \frac{r_q \rho_q^2}{\|r_q\| \rho_q + \epsilon} \right) \end{aligned} \quad (2.1.37)$$

denklemi elde edilir. Denklemler (2.1.29), (2.1.34) ve

$$\rho_q \|r_q\| - \frac{\rho_q^2 \|r_q\|^2}{\rho_q \|r_q\| + \epsilon} = \rho_q \|r_q\| \left(1 - \frac{\rho_q \|r_q\|}{\rho_q \|r_q\| + \epsilon} \right) \leq \epsilon \quad (2.1.38)$$

ilişkisinden yararlanılarak (2.1.37)'in sağ tarafı için

$$\dot{V} \leq -\lambda_3 \|z_q\|^2 + \epsilon \quad (2.1.39)$$

eşitsizliğiyle bir üst sınır tayin edilebilir. (2.1.36)'nın uygulanmasıyla (2.1.39)'daki üst sınır

$$\dot{V} \leq \frac{\lambda_3}{\lambda_2} V + \frac{\epsilon + \lambda_3 \varphi}{\lambda_2} \quad (2.1.40)$$

şeklinde yeniden ifade edilir. Denklemler (2.1.35) ve (2.1.40)'tan da

$$V(t) \leq V(0) \exp\left(-\frac{\lambda_3}{\lambda_2} t\right) + \frac{(\epsilon + \lambda_3 \varphi)}{\lambda_3} \left(1 - \exp\left(\frac{\lambda_3}{\lambda_2} t\right)\right) \quad (2.1.41)$$

koşulunun sağlandığı gösterilir. Buna göre (2.1.34), (2.1.36) ve (2.1.41) denklemlerinden yararlanılarak Teorem 2.1.1'deki sonuç kanıtlanır. Dolayısıyla $r_q(t)$ mutlak bir sınıra yakınsatılabilirse, denklem (2.1.24)'e göre tüm “yan görev” takip sinyalleri sınırlı sürede (finite time) mutlak bir sınıra ulaşır.

Açıklama 1.1 Denklem (2.1.34)'ün zamanın sonsuz değeri için limitinden,

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \bar{d} = \frac{\epsilon}{\lambda_3} + \frac{\varphi}{\lambda_1} \quad (2.1.42)$$

sonucu elde edilir. Bu denklemdeki $\frac{\varphi}{\lambda_1}$ terimi nedeniyle, işaretlerin yakınsayacağı mutlak sınırın yüksek başarımli robot ucu takibi için yeterince küçük olmayacağı düşünülebilir. Ancak $e_\epsilon(t)$ 'nin mutlak sınıra yakınsaması tamamlandığı zaman, $e_\eta(t)$ 'nin değeri 1'e yakınsayacağı için φ teriminin mutlak sınıra etkisi son derece az olacaktır.

2.1.6. Birden Fazla İçsel Hareketin Eniyileme Kriterleri

2.1.5. bölümde önerilen denetleyici, küresel düzgün mutlak iş uzayı takibi yapmasının yanı sıra, robotun serbestlik derecesi fazlalığı nedeniyle “yan görevlerin” sağlanması için de yeterli potansiyele sahiptir. Manipülatör için birden fazla performans kriteri tanımlandığı durumlarda, yan görevlerin en uygun şekilde belirlenmesi, denklem (2.1.3)'teki başarımlı kriteri fonksiyonu $H(q)$ 'ya göre gerçekleştirilebilir. [K. Clear, D. Tesar, May 1990]'da önerilen yöntem göre, kullanılacak başarımlı kriterlerinin tespitinden sonra, ağırlıklı toplamlarından oluşturulan

$$H(q) = \sum_{i=1}^s \omega_i H_i(q) \quad (2.1.43)$$

ifadesi genel bir başarıım kriteri olarak kullanılabilir. Denklem (2.1.43)'te $H_i(q)$, i . istenen başarıım kriterini temsil eden skaler fonksiyon; ω_i 'ler ise pozitif değerli ölçekleme ağırlık fonksiyonları; ve $s \in \mathbb{Z}_+$ gerçekleştirilecek yan görevlerin sayısıdır. (2.1.43)'ten yararlanılarak, (2.1.3)'te tanımlanan yardımcı eklem hızı vektörü $g(t)$,

$$g(t) = k \sum_{i=1}^s \omega_i [\nabla H_i] = k(\omega_1 g_1 + \omega_2 g_2 \cdots + \omega_s g_s) \quad (2.1.44)$$

formunda ifade edilebilir. Denklem (2.1.44)'te içsel hareket denetim parametresi $k \in \mathbb{R}$ önceden tanımlanmıştır.

$$\sum_{i=1}^s \omega_i = P \quad (2.1.45)$$

ω_i ağırlıkları, ilgili yan görevlerin uygulanması sırasında, önem seviyelerine göre değiştirilerek robotun başarıımını en iyileştirilebilir. Bu duruma örnek olarak robot eklem sınırlarına çok yakınken, eklem sınırlamalarından sakınma görevine hünerlilikten daha fazla ağırlık verilerek, ilgili kinematik tekliklerin aşılmasına yoğunlaşılması gösterilebilir.

2.1.6.1. Hünerlilik – Tekilliklerden Sakınmak

Ana denetim amacına ek olarak gerçekleştirilecek ilk “yan görev” amacı, serbestlik derecesi fazlası olan bir manipülatörün, tekil noktalardan sakındırılmasıdır. İlgili başarıım kriter fonksiyonu [Yoshikawa, 1984]'de tanımlanan hünerlilik ölçütüne göre belirlenir:

$$H(q) = \sqrt{\det(JJ^T)} \quad (2.1.46)$$

Denklem (2.1.46)'da $J(q)$, manipülatör Jakobiyen'idir. Dolayısıyla bu başarıım kriter fonksiyonu yalnızca robot kinematiklerine göre belirlenmektedir. Manipülatör tekil noktalarına yaklaşınca, $H(q)$ sıfır değerine inmekte, dolayısıyla robotun bu problemlerli noktalara uzaklığı ile ilgili iyi bir ölçü teşkil etmektedir.

2.1.6.2. Eklem Sınırlarından Sakınmak

Neredeyse tüm robotlar için eklem sınırlaması problemi söz konusudur. Robot eklem açıları, imalatçı firma tarafından belirlenmiş bir $q_{i_{\max}}$ maksimum açısı ve $q_{i_{\min}}$ minimum açısı aralığında bulunmak zorundadır. Bu nedenle eklem sınırlamalarından sakınma serbestlik derecesi fazla robotlar için önemli bir “yan görev” teşkil etmektedir. İlgili başarımlar ölçütü:

$$H(q) = \prod_{i=1}^n 4 \frac{(q_{i_{\max}} - q_i)(q_i - q_{i_{\min}})}{(q_{i_{\max}} - q_{i_{\min}})^2} \quad (2.1.47)$$

fonksiyonuna göre [T. F. Chan and R. V. Dubey, April 1995]'den uyarlanmıştır. Denklem (2.1.47)'de n robot eklem sayısıdır. Bu fonksiyon tüm eklem sınırlamalarından yapılan katkıların toplamından oluşmakta, ve sınırlardan uzakta olan eklemlere otomatik olarak daha fazla ağırlık vermektedir. (2.1.47)'deki toplamın her terimi, robot ilgili eklem alt ve üst sınırlarından eşit (dolayısıyla en büyük) uzaklıktayken 1 değerini alır; limitlere ulaşıldığı noktalarda ise 0 değerine iner.

Birden fazla sayıda başarımlar kriteri metodu uygulamanın en önemli avantajı, farklı “yan görev” amaçlarının ağırlıklı toplamından, sistem için genel bir performans kriteri oluşturulabilmesidir. Buna göre tanımlanmış olduğumuz manipülabilite ve eklem sınırlarından sakınma yan amaçları, denklem (2.1.44)'teki gibi bir araya getirilerek, basit birçoklu yan görev kriteri örneği elde edilebilir. Bu iki yan görevin eşit derecede ağırlıklı olduğu koşullarda, yan görev fonksiyonlarının her biri aynı 0.5 katsayısıyla $H(q)$ fonksiyonuna dahil olacaktır:

$$H(q) = 0.5 \left(\sqrt{\det(JJ^T)} \right) + 0.5 \left(\prod_{i=1}^n 4 \frac{(q_{i_{\max}} - q_i)(q_i - q_{i_{\min}})}{(q_{i_{\max}} - q_{i_{\min}})^2} \right) \quad (2.1.48)$$

Robotun operasyonu bu yan görevlerden birinin sınırlamasına daha yakın olursa, ilgili ağırlıklar bu durumun paralelinde yeniden şekillendirilebilir.

2.1.7. Benzetim Sonuçları

Önerilen denetleyicinin başarımıyla ilgili, benzetim sonuçlarından yararlanılacaktır. Bu simülasyonlarda, dinamik terimleri [Zhang, 1986]'dan alınan Puma 560 robot manipülatörü modeli kullanılmıştır. İstenen iş uzayı yörüngesi:

$$\begin{bmatrix} x_d(t) \\ y_d(t) \\ z_d(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.1 \sin(0.5t)(1 - e^{-0.1t^3}) + 0.17 \\ 0.1 \sin(0.5t)(1 - e^{-0.1t^3}) + 0.62 \\ 0.014 \end{bmatrix} \text{ [m]} \quad (2.1.49)$$

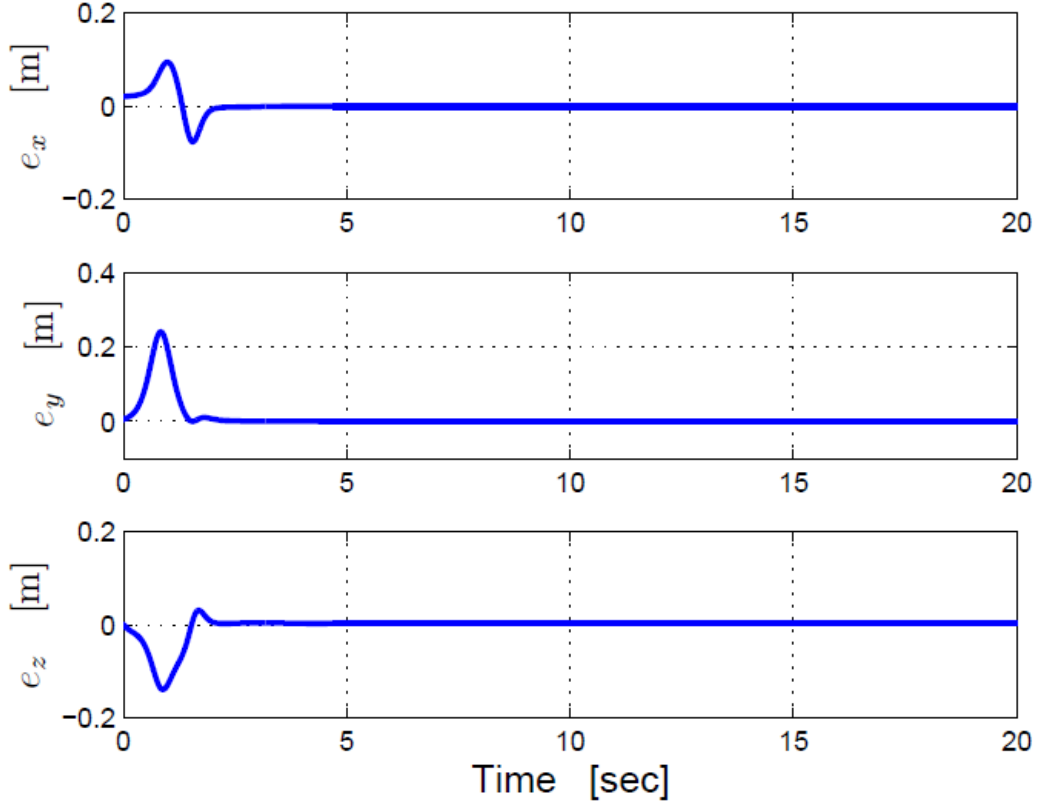
ve açısal hız bileşenlerinin denklem (2.1.15)'e uygulanması ile istenen oryantasyon yörüngesi:

$$\begin{aligned} \omega_{d_{x,y,z}}(t) = & 0.02 \cos(0.5t)(1 - e^{-0.1t^3}) \\ & + 0.01 \sin(0.5t)(1 - e^{-0.1t^3}) \end{aligned} \quad \text{[rad/s]} \quad (2.1.50)$$

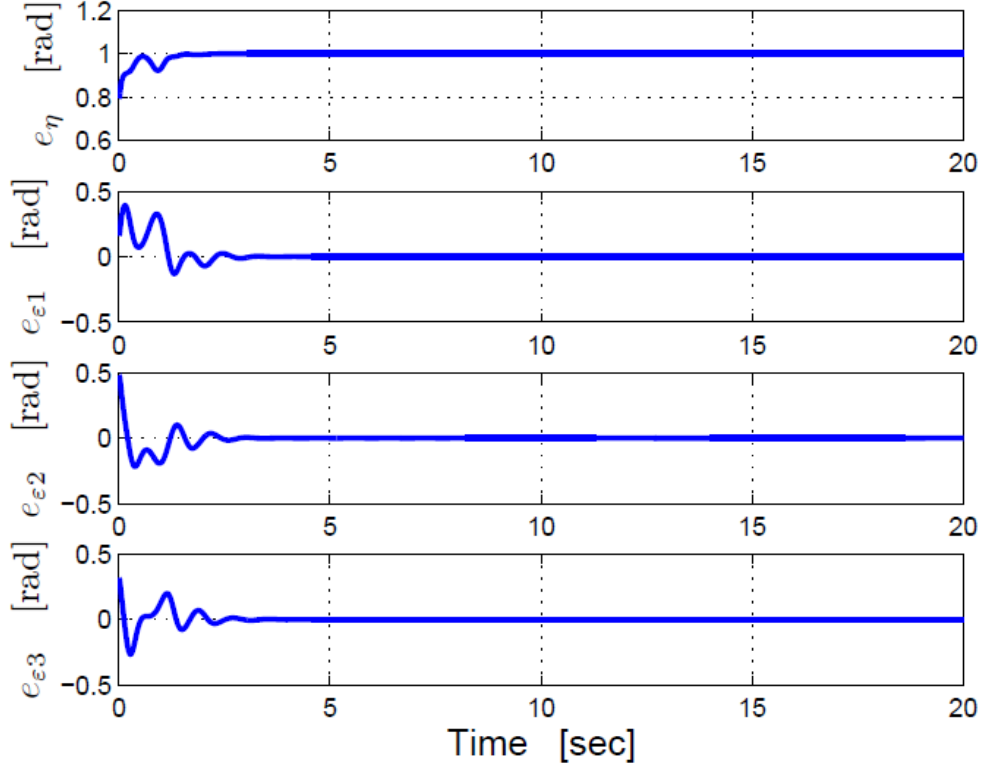
kurulmuştur. Koterniyonun ilk değeri $q_d = [-0.5 \ 0.5 \ 0.5 \ 0.5]^T$ olarak alınmıştır. Denetleyici parametreleri uygun başarımlar için,

$$\begin{aligned} K_p = \text{diag}\{18, \ 18, \ 20\}, \quad K_0 = \text{diag}\{15, \ 17, \ 17\} \\ K_q = \text{diag}\{90, \ 450, \ 280, \ 28, \ 17, \ 12\}, \quad \rho = 8, \quad \epsilon = 0.05 \end{aligned} \quad (2.1.51)$$

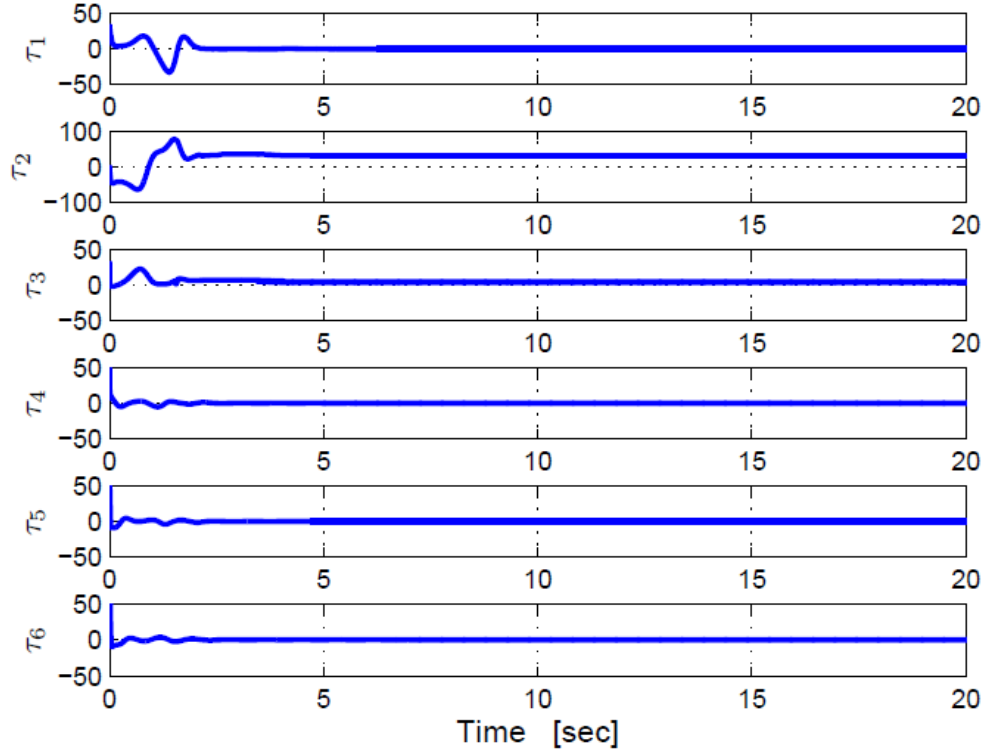
değerlerine ayarlanmıştır. Şekil 2.1.1'de konum hataları gösterilmektedir. Bu terimler kısa bir geçici tepkiden sonra hızla sıfır değerine yakınsamaktadır. Şekil 2.1.2'deki oryantasyon hataları da benzer özellikler göstermektedir; hatanın gerçel bileşeni e_η çabuk şekilde bire, sanal kısmı e_ϵ ise sıfıra ulaşmaktadır. Denetleyici tork girişleri de Şekil 2.1.3'teki sınırlı değer alan fonksiyonlardır. Bu sonuçlar önerilen denetleyicinin 3-boyutlu duruş yörüngelerinin takibi için kararlılık ve başarımını göstermektedir.



Şekil 2.1 İş Uzayı Pozisyon Takip Hatası.



Şekil 2.2 İş Uzayındaki Oryantasyon Takip Hatası.



Şekil 2.3 Benzetimdeki Kontrol Tork Girişleri.

2.1.8. Deneysel Sonuçları

Önerilen kontrolcünün gerçek zamanlı kullanılabilirliğini göstermek amacı ile laboratuvarımızda bulunan puma P560 robotu üzerinde bir takım deneysel çalışma yapılmıştır. Deneysel bir diğer amacı ise endüstriyel uygulamalarda meydana gelebilecek; parametreleri belirsizlikleri, dışsal gürültüler gibi bir takım zorluklara rağmen önerilen kontrolcünün istenilen görevleri yerine getirebileceği göstermektir. Deneysel sırasında Windows® işletim sistemi yüklü intel Pentium 4 3.00 Ghz işlemcili bir bilgisayar kullanılmıştır. Kontrolcü Matlab RTWT (real time Windows target) ile 1 khz örnekleme frekansı ile gerçekleştirilmiştir. Bilgisayar ile robot arasındaki bağlantı “Servo To Go model 2” giriş çıkış kartı yardımı ile yapılmıştır. Kullanılan kartın Matlab® için driverı olmadığı için C-mex S-functionlarla driver gerçekleştirilmiştir. Robotun başlangıç pozisyonu tekil noktalardan mümkün olduğu kadar uzak olacak şekilde altta verildiği gibi seçilmiştir.

$$q_i = [-60 \ 50 \ 185 \ 0 \ -45 \ 0]^T \ [deg] \quad (2.1.52)$$

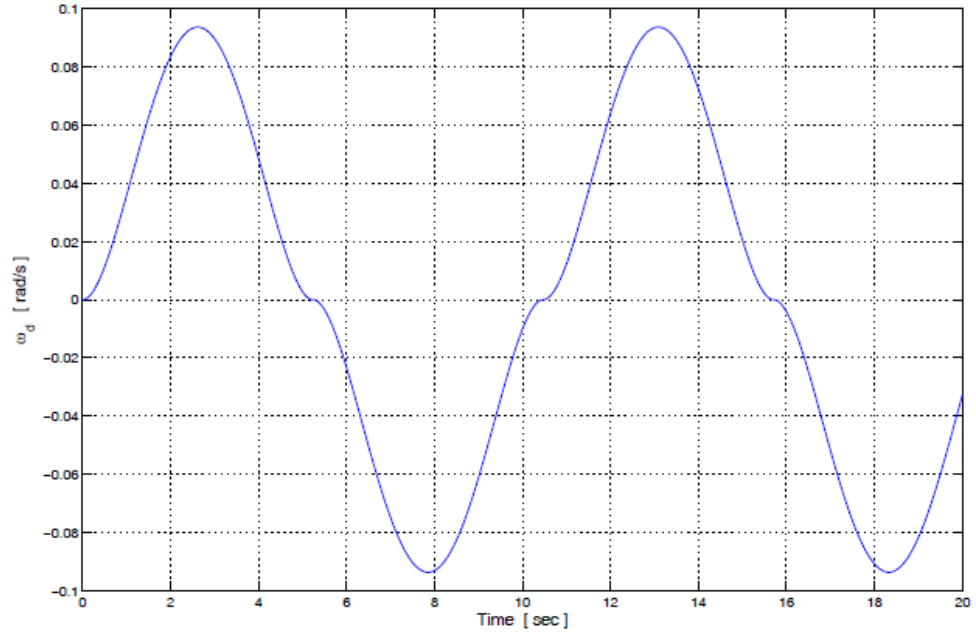
İstenilen uç pozisyon profili

$$\begin{bmatrix} x_d(t) \\ y_d(t) \\ z_d(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.2 \sin\left(t - \frac{\pi}{2}\right) (1 - e^{-0.01t^3}) + 0.18 \\ 0.4 \sin\left(0.6t + \frac{\pi}{2}\right) (1 - e^{-0.01t^3}) + 0.58 \\ 0.014 \end{bmatrix} \text{ [m]} \quad (2.1.53)$$

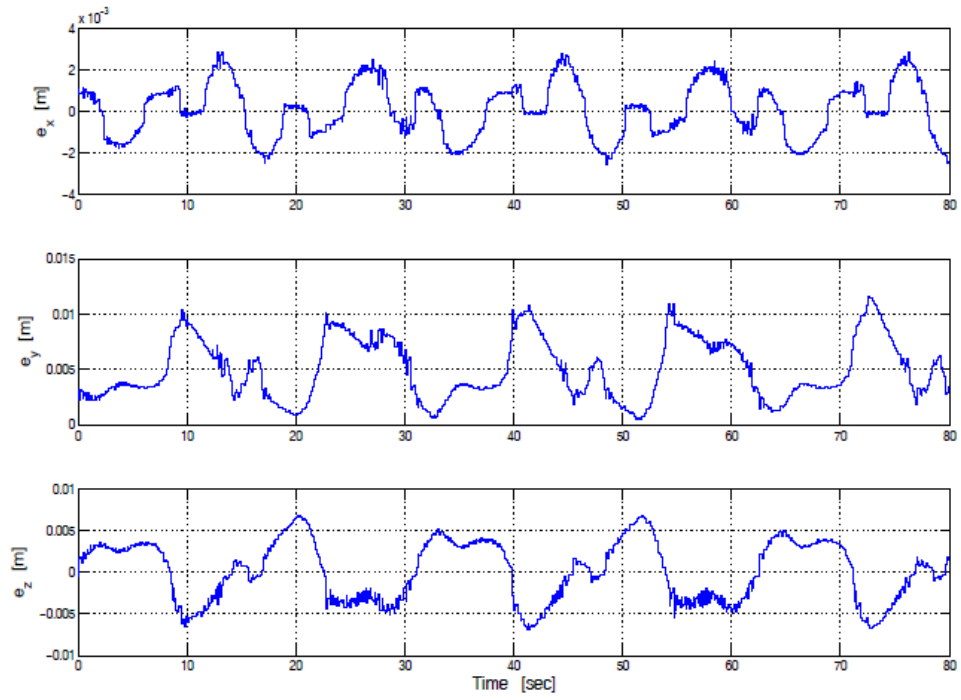
Şeklinde belirlenmiştir. İstenilen oryantasyon profili olarak ise Şekil 2.1.4 de verilen beşinci Dereceden bir polinomdan elde edilen yumuşak açısal hız profili kullanılmıştır. Ve kontrolcü kazançları alttaki gibi ayarlanmıştır.

$$\begin{aligned} K_p &= \text{diag}\{18 \quad 15 \quad 22\} \quad K_0 = \text{diag}\{28 \quad 28 \quad 2\} \\ K_q &= \text{diag}\{200 \quad 200 \quad 200 \quad 1 \quad 1 \quad 0.01\} \\ \rho &= 0.01 \quad \varepsilon = 4 \end{aligned} \quad (2.1.54)$$

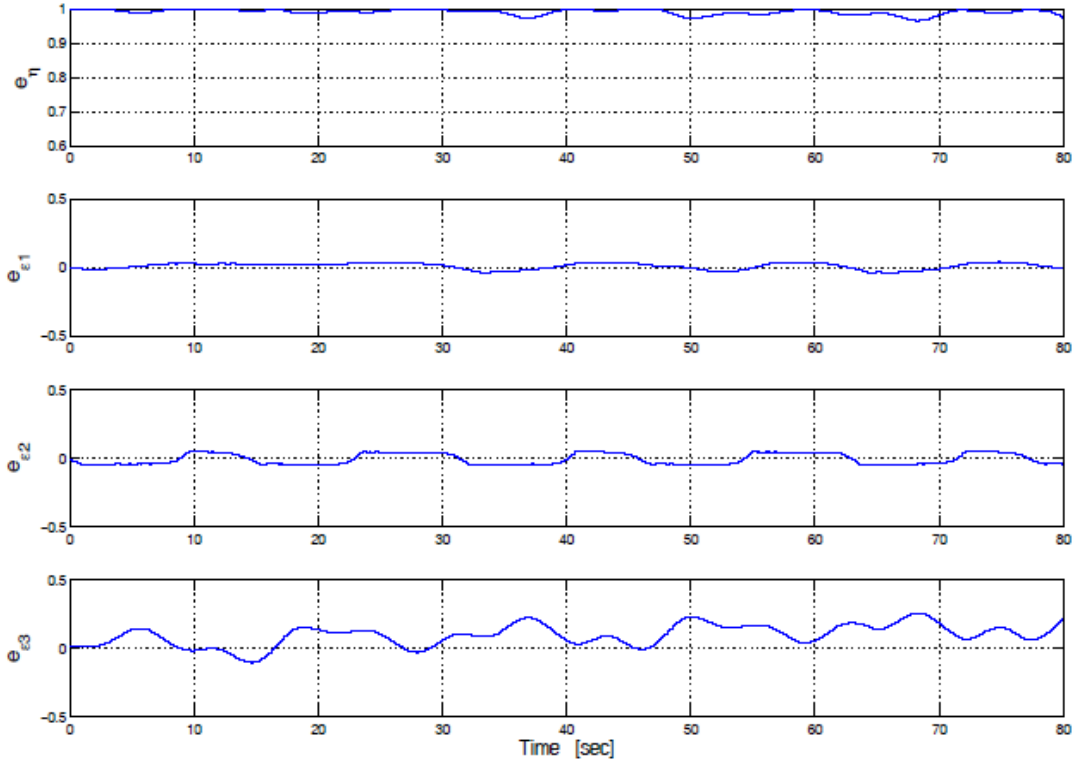
Pumanın yerçekimi etkisi [B. Armstrong, O. Khatib, and J.burdick, pp: 510-518, 1986] göre hesaplanmıştır fakat pumanın ucundaki el (gripper) (yaklaşık 0.8Kg) hesaba katılmamıştır. Bunun dışındaki tüm dinamik terimler tamamıyla bilinmeyen olarak alınmıştır. İçsel hareket eniyileme fonksiyonu (1.48) deki gibi seçilmiştir. Pozisyon ve oryantasyon hataları sırasıyla Şekil 2.1.5 ve 2.1.6 verildiği gibidir. Deney sırasınca hünerrilik ve içsel hareket en iyileme fonksiyonun değişimleri ise Şekil 2.1.7 ve Şekil 2.1.8 de gösterilmiştir. Şekil 1.9 da eklemlere uygulanan torklar gösterilmektedir.



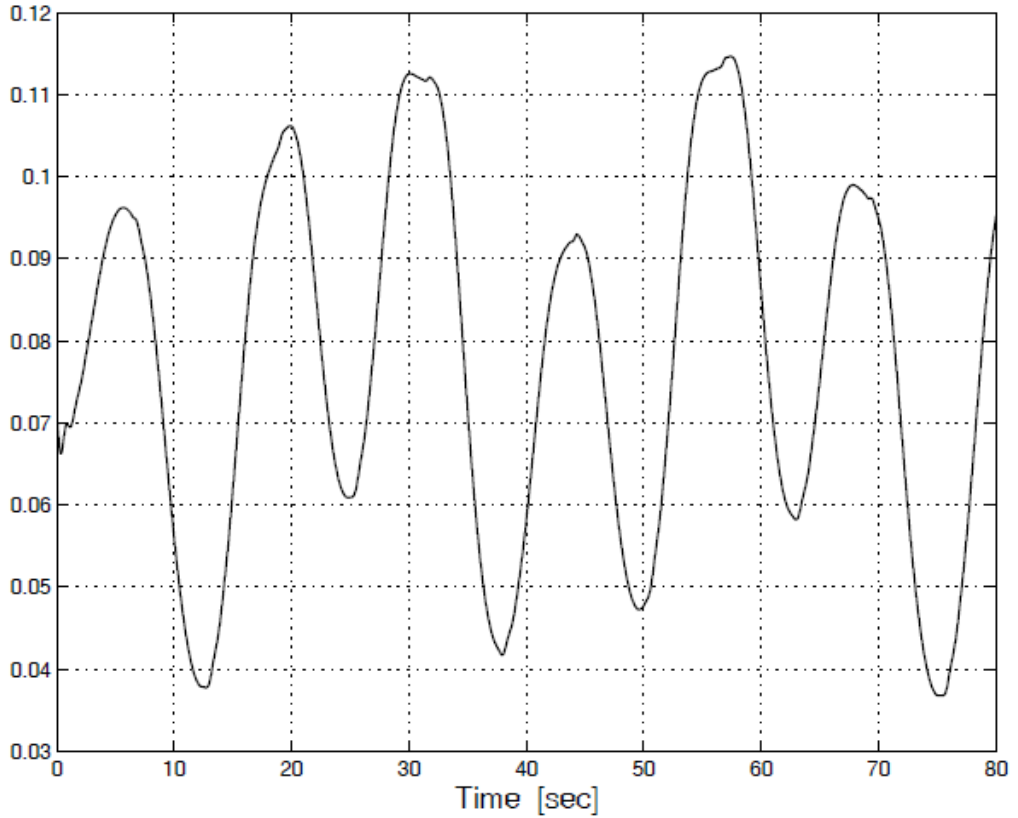
Şekil 2.4 Kullanılan açısal hız profili (tüm eksenler)



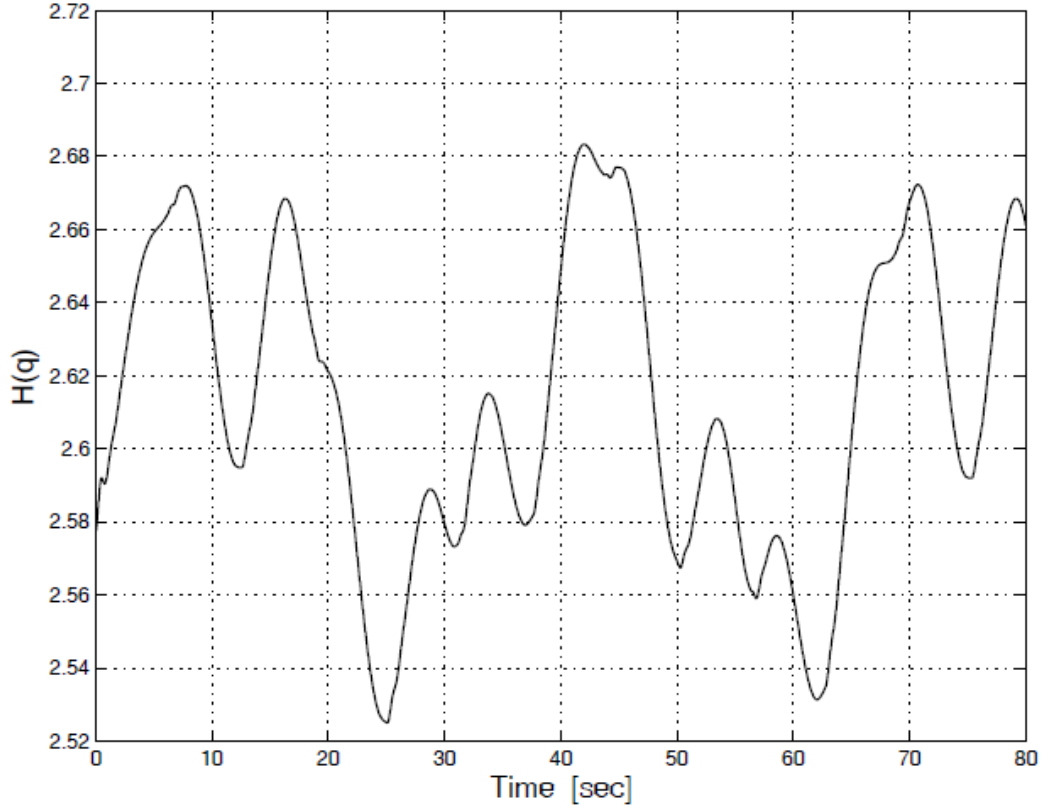
Şekil 2.5 Robot ucu pozisyon takip hatası



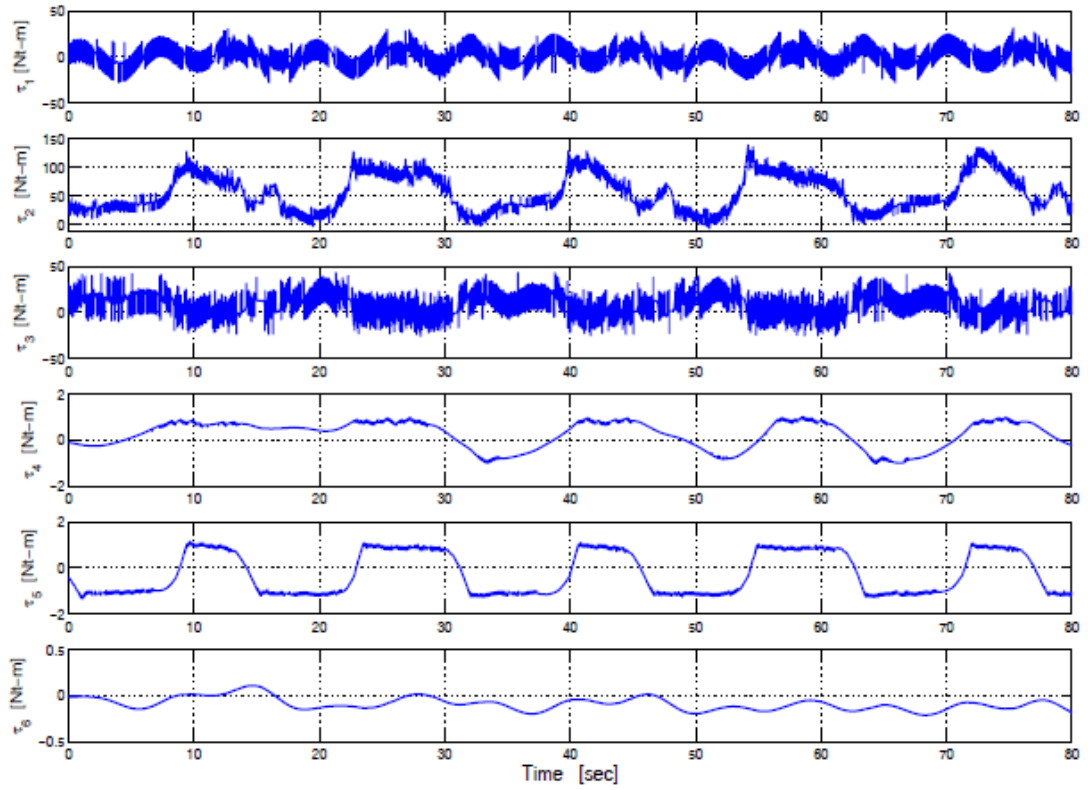
Şekil 2.6 Robot ucu oryantasyon takip hatası



Şekil 2.7 Deney boyunca hünrlilik (Manipulability) değışimi



Şekil 2.8 Deney boyunca içsel hareket en iyileme fonksiyonun değişimleri



Şekil 2.9 Eklemlere uygulanan Çalışmalar

2.1.9. Sonuçlar

Raporumuzun bu b6l6m6nde robot dinamik modelindeki belirsizlikler ve dış g6r6lt6ler olmasına karşın, k6resel d6zg6n mutlak sınırlamalı (GUUB) robot ucu konum, oryantasyon ve yan g6rev takibini sağlayan lineer olmayan bir denetleyici tasarlanmıştır. Kontrol stratejisi birim koterniyonlar ve manip6lat6r Jakobiyen'inin s6zde tersi y6nteminden yararlanmakta, dolayısıyla ters-kinematik hesaplamaları gerektirmemektedir. Bu nedenlerle denetleyici girişleri tekil değerler almamakta ve tasarım başarımı y6kselmektedir. Ayrıca denetleyici manip6lat6r6n içsel hareketine y6nelik sınırlamalar getirmemekte, sistemin dinamik parametrelerinden bağımsız şekilde (manip6labilite, mekanik sınırlamalardan sakınma, ya da engel aşma gibi) ‘‘yan g6revler’’ için de yeterli hareket serbestliği sağlamaktadır. Tasarlanan denetleyicinin kararlılığı ve başarımı benzetim ve deney sonuçları ile g6sterilmiştir. Bu b6l6mde gerçekleştirdiğimiz teorik alt yapı bir sonraki alt b6l6mde sunulan telerobotik uygulamasına zemin olarak hazırlanmıştır.

2.2. Robotik Uzakbulunum Sistemleri için Pasif Denetimli Uyarlamalı bir Denetleyici Tasarımı

Operat6r6n direkt olarak çalışma alanı içinde bulunması zor veya imkansız olan durumlarda, uzaktan y6nlendirilen bir robotik cihaz tarafından operasyonun yapılması teleoperasyon(uzakbulunum), işi gerçekleştiren robotik mekanizma ise telerobot olarak adlandırılmaktadır. Robotik biliminin belki de en eski çalışma alanlarından biri teleoperatif/telerobotik çalışmalardır (Konu hakkında temel bir literat6r araştırması için okuyucuya [L. Conway, R. A. Volz, and M. W. Walker., April 1990], (Pennington, 1987) yi incelemesi 6nerilebilir). Teleoperasyon alışmalar temel olarak iki ayrı, uzakbulunum robotu ve kullanıcı tarafından y6nlendirilen bir kumanda kolu, sistemin beraber koordineli olarak çalıştırılmasını gerektirir. Telerobotik sistemler için kullanılan denetim sistemleri end6striyel robot denetim sistemlerinde kullanılan konum servo sistemlerinden farklılık g6stermelidir. 6zellikle robot çalışma alanında insan veya 6zen g6sterilmesi gereken nesnelere bulunmakta ise robot bir noktadan diğer noktaya giderken karşısına çıkacak nesnelere karşı hassas olmalı, gerektiğinde y6r6ngesini değiştirebilmeli veya 6n6ne

çıkan nesneyi zarar vermeden iterek yolundan uzaklaştırabilmelidir. Bu gibi hassas konumlama gerektiren operasyonlar için robot dinamiğini yok sayan ve direkt olarak kinematik düzeyde çalışmayı tercih eden sistem yaklaşımlar uygun değildir [F. L. Lewis, C. T. Abdallah, D. M. Dawson, 1993]. Dolaysı ile modern tele-operasyon sistemlerinin kontrol/kumandasında kullanılan robotik mekanizmaların doğrusal olmayan sistem dinamikleri gözönünde tutulurken aynı zamanda da genel sistemin gerek kullanıcıya gerekse çevresine karşı pasiflik özelliklerini koruması beklenmektedir.

Bu alt bölümümüzde doğrusal olmayan sistem dinamiklerini göz ardı etmeden sistem içerisinde yer alabilecek parametrik belirsizlikleri uyarlarken pasiflik özelliğini de sağlayabilen bir denetleyici tasarımı ve analizi sunulmuştur. Alt bölümümüzün geri kalan şu biçimde sunulacaktır: 2.2.1. bölümde kullanılan sistem modeli tanıtılacak ve model hususunda yapmış olduğumuz temel kabuller açıklanacaktır. 2.2.2. Bölümde denetim amacımız anlatılırken genel telerobot sistemi için öngördüğümüz hata dinamiği 2.2.3. Bölümde sunulmuştur. Denetleyici tasarım ve analizi 2.2.4. ve 2.2.5. Bölümlerde anlatılırken benzetim çalışmalar 2.2.6.. Bölümde anlatılmış. 2.2.7. Bölüm ise ortaya çıkarılan sonuçlarını irdelenmesine ayrılmıştır.

2.2.1. Sistem Modeli

Yönlendirici çıktısı, uzak bulunum robotuna γ kadar etki ettirilen, n linkli bir kumanda kolu tarafından yönlendirilen, n linkli bir uzakbulunum robot sistemine ait eklem uzay tabanlı genel sistem dinamiği

$$\begin{aligned} \gamma\{M_m(q_m)\ddot{q}_m + C_m(q_m, \dot{q}_m)\dot{q}_m + F_m(\dot{q}_m) + G_m(q_m)\} &= \gamma\tau_1 + \gamma F_1 \\ M_s(q_s)\ddot{q}_s + C_s(q_s, \dot{q}_s)\dot{q}_s + F_s(\dot{q}_s) + G_s(q_s) &= \tau_2 + F_2 \end{aligned} \quad (2.2.1)$$

biçiminde verilebilir [W. Zhou, S.E.Salcudean, Kasım 2000]. Burada kullanılan $q_m, \dot{q}_m, \ddot{q}_m \in \mathbb{R}^n$ kumanda için kullanılan kumanda koluna (master) ait sırası ile eklem konum, hız ve ivme vektörlerini, $q_s, \dot{q}_s, \ddot{q}_s \in \mathbb{R}^n$ uzakbulunum robotuna (slave) ait eklem konum, hız ve ivme vektörlerini anlatmak amacı ile kullanılmış olup yine aynı denkleminde yer alan

$\{(\cdot)_i \mid i = m \text{ kumanda kolunu}, i = s \text{ uzakbulunum robotunu}\}$, göstermek kaydı ile $M_i(q_i)$ uygun boyutta pozitif tanımlı, simetrik atalet matrisini, $C_i(q_i, \dot{q}_i)$ merkezkaç ve Coriolis etkilerini içeren matris fonksiyonunu, $F_i(\dot{q}_i)$ sürtünme etkilerini içeren vektörü, $G_i(q_i)$ terimi yer çekimi etkilerini gösteren vektörü göstermek amacı ile kullanılmışlardır. Denklem (1) in sağ tarafında bulunan τ_1 ve τ_2 terimleri "master" ve "slave" sisteme uygulanan denetleyici girişlerini anlatmak için kullanılmış olup, F_1 ve F_2 terimleri sırası ile kumanda koluna kullanıcı ve uzakbulunum robotuna çevre tarafından uygulanan kuvvetlerin eklem uzaylarına izdüşümleridir. Belirtilen izdüşümleri robot çalışma uzayında uygulanan kuvvetler (kullanıcının kumanda koluna uyguladığı kuvvet girişi F_H ve uzak bulunum robotuna çalıştığı ortam tarafından uygulanan kuvvet F_E) ölçülebilir kabul edildiklerinde

$$\begin{aligned} F_H &= \gamma(J_m)^{-T} F_1 \\ F_E &= (J_s)^{-T} F_2 \end{aligned} \quad (2.2.2)$$

denklemini kullanarak hesaplamak mümkündür. Verilen denklemde J_m, J_s matris fonksiyonları sırası ile master ve slave robotların Jakobyian matrisleridir. Bilindiği üzere Jakobyian matrisleri ile robotlara ait ileri kinematik denklemlerini beraber kullanarak robotların çalışma ile eklem uzaylarını

$$\dot{x}_m = J_m \dot{q}_m, \quad \dot{x}_s = J_s \dot{q}_s \quad (2.2.3)$$

biçiminde ilişkilendirebiliriz. Yukarıdaki denklem (2.2.3) de belirtilen $x_m(t)$ sinyali kumanda kolunun, $x_s(t)$ sinyali ise uzak bulunum robotunun kendilerine ait iş alanlarında yapmış oldukları hareketleri (konum ve oryantasyon) göstermektedirler. Gerek hata dinamiğinin oluşturulması, gerekse analizin rahatlığı için (2.2.1) ile verilen sistem dinamiğini aşağıda verilen sade şekle getirmek mümkündür

$$\underline{M}(q)\ddot{q} + \underline{C}(q, \dot{q})\dot{q} + \underline{G}(q) = \tau + F \quad (2.2.4)$$

Burada tanımlanan değişkenler sırası ile

$$\begin{aligned}
\underline{M}(q) &= \begin{bmatrix} \gamma M_m & 0_{n \times n} \\ 0_{n \times n} & M_s \end{bmatrix}, & \underline{C}(q, \dot{q}) &= \begin{bmatrix} \gamma C_m & 0_{n \times n} \\ 0_{n \times n} & M_s \end{bmatrix}, \\
\underline{F}(\dot{q}) &= \begin{bmatrix} \gamma F_m \\ F_s \end{bmatrix}, & \underline{G}(q) &= \begin{bmatrix} \gamma G_m \\ G_s \end{bmatrix}, \\
F &= \begin{bmatrix} \gamma F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} & \text{ve} & \tau = \begin{bmatrix} \gamma \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{2.2.5}$$

şeklinde tanımlanmışlardır. Denklem (2.2.4) da tanımlanan birleştirilmiş eklem uzay değişkeni $q \in \mathbb{R}^{2n}$

$$q = [(q_m)^T \quad (q_s)^T]^T \tag{2.2.6}$$

şeklinde tanımlanmıştır. Ayrıca denetleyici tasarımı ile kararlılık analizinde kullanılmak üzere $\tanh(\cdot) \in \mathbb{R}^n$ vektör fonksiyonunu ξ vektörü $\xi = [\xi_1, \dots, \xi_n]^T \in \mathbb{R}^n$ olarak şekilde

$$\tanh(\xi) \triangleq [\tanh(\xi_1) \quad \dots \quad \tanh(\xi_n)]^T \tag{2.2.7}$$

biçiminde tanımlanmıştır. Denklem (2.2.7) ve hiperbolik fonksiyonların özelliklerinde yararlanarak, aşağıda verilen eşitsizliklerin, $\Omega \in \mathbb{R}_+$ sınırlayıcı bir sabit olarak tanımlandığında geçerli oldukları gösterilebilir.

$$\begin{aligned}
&\sum_{i=1}^n |\xi_i| - \xi^T \tanh(\xi) \geq 0 \\
&\int_{t_0}^t \sum_{i=1}^n |\xi_i| d\tau - \int_{t_0}^t \xi^T \tanh(\xi) d\tau \leq \Omega < \infty.
\end{aligned} \tag{2.2.8}$$

2.2.2 Denetim Amacı

Çalışmamızdaki ana amaç kumanda kolu ile robot iş uzayında istenilen bir yörüngeyi takip ederken uzak bulunum robotunun da kumanda kolu tarafından oluşturulan yörüngeyi çalışma uzayında takip etmesidir. Bu amaca uyulup uyulmadığının kriteri olarak, hata sinyalimizi

$$e = \begin{bmatrix} x_d - x_m \\ x_s - x_m \end{bmatrix} \tag{2.2.9}$$

biçiminde tanımlayalım. Hata sinyalinizde yer alan $x_d(t)$ terimi analizimizin ileri bölümlerinde inşa edeceğimiz takip etmek istediğimiz yörüngeyi tanımlamak amacı ile kullanılmış olup, $x_m(t)$ ve $x_s(t)$ sinyalleri ise (2.2.3) de tanımlanmışlardı. Dikkat edilecek olursa denklem (2.2.9) aynı zamanda

$$\begin{aligned} e &= \begin{bmatrix} x_d \\ 0_n \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_m \\ x_m - x_s \end{bmatrix} \\ &= \underbrace{\begin{bmatrix} x_d \\ 0_n \end{bmatrix}}_{x_d} - \underbrace{\begin{bmatrix} I_n & 0_n \\ I_n & -I_n \end{bmatrix}}_S \underbrace{\begin{bmatrix} x_m \\ x_s \end{bmatrix}}_x \end{aligned} \quad (2.2.10)$$

biçimine sokulabilir. Burada tanımlanan yardımcı sinyaller

$$\begin{aligned} X_d &= [(x_d)^T \quad (0_n)^T]^T, \\ x &= [(x_m)^T \quad (x_s)^T]^T, \\ X &= Sx \end{aligned} \quad (2.2.11)$$

biçiminde tanımlanmış olup S matrisi, yukarıda verilen tanımından da görülebileceği gibi, her zaman tersi alınabilir bir transformasyon olarak tanımlanmıştır. Bu yapı çalışmamızın geri kalanında gerek hata sistemi dinamiği oluşturulmasında gerekse kararlılık analizi geliştirilmesinde kullanılacaktır.

İkincil bir denetim amacımız ise bütünleşik sistemimizin hem kullanıcı hemde uzakbulunum robotuna uygulanan güçlere karşın çalışma uzayındaki hızlarının pasif kalmasıdır. Bu davranış çalışma uzayında

$$\int_{t_0}^t (\dot{x}_s^T F_E + \dot{x}_m^T F_H) d\tau \geq -c^2 \quad (2.2.12)$$

biçiminde modellenebilir. Denklem (2.2.3)'den de $F_H = \gamma J_m^{-T} F_1$, $F_E = J_s^{-T} F_2$ kullanılarak (2.2.12) aşağıda verilen eşitsizliğe ulaşılabilir

$$\int_{t_0}^t (\dot{q}_s^T F_2(\tau) + \gamma \dot{q}_m^T F_1(\tau)) d\tau \geq -c^2 \quad (2.2.13)$$

Kısaca pasiflik kriteri her ne kadar çalışma uzayında (2.2.12) biçiminde tanımlanmış olsa da (2.2.13)'ten de gözlenebileceği üzere eklem uzayında da geçerlidir. Pasiflik ara denetim amacımız, hem kullanıcının hem de uzak bulunun robotunun çalıştığı ortamın güvenliliğini garantilemek [D. Lee, P. Y. Li, Mayıs 2002] üzere tasarlanmaktadır. Ayrıca [R. J. Anderson and M. W. Spong, Mayıs 1989], [G. Niemeyer and J. J. E. Slotine, Ocak 1991], [Lawrence, Ekim 1993], [J. Ryu, D. Kwon, and B. Hannaford, Nisan 2004], [Colgate, Ağustos. 1993], [D. J. Lee and P. Y. Li, Haziran 2003], ve [D. Lee, P. Y. Li, Ekim 2005] de belirtildiği üzere, aralarında iletişim ağı bulunan sabit gecikmeli sistemler için yukarıda verilen entegral eşitsizliği bağlantılı sistemin kararlılığı için (iki sistemin bağlantısını sağlayan iletişim ortamından hız ve güç bilgileri iletildiğinde) gerek koşullardandır. Her denetleyici tasarımında olduğu gibi kullanacağımız bir diğer denetim amacımız da kapalı çevrim sistemde bulunan bütün sinyallerin sınırlandırılabilir olduğunu göstermektir.

2.2.3. Hata Dinamiği

Açık çevrim hata dinamiğini oluşturmak amacı ile denklem (2.2.10)'nin zamana göre türevi alırsak

$$\dot{e} = \dot{X}_d - \dot{X} = \dot{X}_d - \begin{bmatrix} \dot{x}_m \\ \dot{x}_m - \dot{x}_s \end{bmatrix} \quad (2.2.14)$$

denklemini elde edebiliriz. Yukarıdaki denkleme ileri kinematik formülasyonu sonucu denklem (2.2.3) de elde ettiğimiz formülasyonu yerleştirip, yeniden düzenlersek açık çevrim hata dinamiğini

$$\dot{e} = \dot{X}_d - J\dot{q} \quad (2.2.15)$$

biçiminde elde edebiliriz. Denklem (2.2.15)'de belirtilen birleştirilmiş genel Jakopyan matrisi

$$J = \begin{bmatrix} J_m & 0 \\ J_m & -J_s \end{bmatrix} \quad (2.2.16)$$

şeklinde tanımlanmış olup $\dot{q}(t)$ sinyali de (2.2.6) da verilen genel eklem pozisyon vektörünün zamana göre türevidir. (2.2.15) denkleminin sağ tarafına, α pozitif tanımlı ve simetrik bir kazanç matrisi olacak şekilde, αe terimini ekleyip çıkartır ve yeniden düzenlersek, genel sistem için aşağıda verilen açık çevrim hata dinamiğini elde edebiliriz;

$$\dot{e} = -\alpha e + Jr \quad (2.2.17)$$

Denklem (2.2.17) de belirtilen $r(t)$ yardımcı denetim sinyali, bir önceki alt bölüm ve (U. Özbay, H. T. Şahin, E. Zergeroğlu, Kasım 2008)'da verilen algoritmaya uygun olarak seçilmiş ve

$$r = J^+(\dot{X}_d + \alpha e) - \dot{q} \quad (2.2.18)$$

biçiminde tanımlanmış, J^+ notasyonu (2.2.16) ile tanımlanan J matrisinin sözde tersini ifade etmek için kullanılmıştır¹. Açık çevrim hata dinamiğinin (2.2.17) biçiminde yazılabilmesi bize analizimiz sırasında $e(t)$ ile gösterilen hata dinamiğini sıfıra sürmek için, $r(t)$ yardımcı kontrol sinyalinini de sıfıra sürmek zorunda olduğumuzu göstermektedir. Yani analizimiz $r(t)$ yardımcı sinyalinin de dinamiğine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu dinamiğin (2.2.4) ile verilen genel sistem denklemi yörüngelerinde etkisini elde etmek için (2.2.18) denkleminin zamana göre türevini alıp ortaya çıkan denklemin her iki tarafın (2.2.5) de tanımlanan, $\underline{M}(q)$ birleştirilmiş atalet matrisi ile çarparak

$$\underline{M}(q)\dot{r} = \underline{M}(q)\frac{d}{dt}\{J^+(\dot{X}_d + \alpha e)\} + \underline{C}(q, \dot{q})\dot{q} + \underline{F}(\dot{q}) + \underline{G}(q) - u \quad (2.2.19)$$

denklemini elde edebiliriz. Burada yer alan denetleme sinyali

¹ Bu çalışmamızda J matrisinin sıfır uzayının yansımaları göz ardı edilmiştir.

$$u = \tau + F \quad (2.2.20)$$

biçiminde oluşturulmuştur. Bu basamakta dikkatinizi çekmek istediğimiz nokta, gerek kullanıcının kumanda koluna gerekse çevrenin uzakbulunum robotunun ucuna uyguladığı kuvvetlerin ölçülebildiği varsayımından yararlanarak, analizimizin geri kalanında denetleyici sinyal olarak τ yerine u sinyalini kullanılabilir oluşudur. (2.2.19) denkleminin sağ tarafına kararlık analizinde atalet matrisinin türevini içeren terimi yok etmek amacı ile $\underline{C}(q, \dot{q})r$ terimini ekleyip çıkarır ve $\dot{q} = J^+(\dot{X}_d + \alpha e) - r$ tanımından yararlanırsak, $r(t)$ dinamiğini

$$\underline{M}(q)\dot{r} = -\underline{C}(q, \dot{q})r + Y(q, \dot{q}, \ddot{x}_d, e, \dot{e})\theta - u \quad (2.2.21)$$

şeklinde yeniden düzenleyebiliriz. Burada yer alan $Y(q, \dot{q}, \ddot{x}_d, e, \dot{e}) \in R^{2n \times m}$ bilinen ve ölçülebilen değişkenleri, $\theta \in \mathbb{R}^m$ ise birleşik sistemin mekanik parametrelerini içeren vektörü temsil etmekte olup robot dinamiğinin doğrusal olarak çarpanlarına ayrılabilme özelliği (M. W. Spong, 1989) kullanılarak oluşturulmuş olup çarpımları

$$Y\theta = \underline{M}(q) \frac{d}{dt} \{J^+(\dot{X}_d + \alpha e)\} + \underline{C}(q, \dot{q})\{J^+(\dot{X}_d + \alpha e)\} + \underline{F}(\dot{q}) + \underline{G}(q) \quad (2.2.22)$$

biçimindedir.

2.2.4. Ön Denetleyici Tasarımı

Bu bölümde, sadece takip hatasını sıfıra indirme amacımızı gerçekleştirmek için, sırası ile, (2.2.4) ile belirtilen birleşik sistemdeki bütün parametrelerin bilindiğini varsayarak nonlinear model tabanlı, daha sonra parametrelerde de belirsizlikler olabileceğini göz önüne alarak uyarlamalı(adaptive) ikinci bir denetleyici tasarlanacak. Tasarımların sistem kararlılığını sağlayabildiğini gösterebilmek için Lyapunov tarzı bir yaklaşım izlenecek, böylece sistem kapalı çevriminde yer alan sinyallerin sınırlanabilir oldukları da ispatlanmış olunacak. Bu bölümde sunulan tasarımlar, denetleyicilerin pasiflik amacını göz ardı edilmiş olup (kumandan kolu ile uzak bulunum robotunun aynı ortamda direkt olarak birbirlerine bağlı olma durumu),

sonraki bölümde sunulan pasif tanımlı, kullanıcı parametrelerini de uyarlayabilen denetleyicinin analizi için bir taban oluşturmak amacı ile sunulmuşlardır.

2.2.4.1. Tam bilinen Sistem Parametreleri için Nonlinear Denetleyici

Denklem (2.2.20) ile açık çevrim dinamiği verilen sistem için (2.2.4) birleştirilmiş sistemindeki bütün model parametreleri biliniyor kabul edildiğinde, kararlılık analizimizin bize uygun gösterdiği denetim sinyali

$$u = Y\theta + Kr + J^T e \quad (2.2.23)$$

biçimindedir. Bu denklemde yer alan K terimi, uygun boyutta, sabit terimli, simetrik, ve pozitif tanımlı denetleyici kazanç terimlerini içeren matris olarak tanımlanmıştır. Tasarladığımız bu sinyali (2.2.21) 'a uyguladığımız zaman aşağıda verilen kapalı çevrim dinamiğini elde ederiz

$$\underline{M}(q)\dot{r} = -\underline{C}(q, \dot{q})r - Kr - J^T e. \quad (2.2.24)$$

Analizimizin bu kısmında kapalı çevrim dinamiği belirlendiği için aşağıda verilen Teoremi sunmaya hazırız:

Teorem 2.1: *Birleştirilmiş sistem denklemi (2.2.4) ile ifade edilen kumada kolu uzakbulunum robot sistemi için; (2.2.23) ile tasarladığımız kontrol denetim sinyali, (2.2.9)'te belirtilen pozisyon takip hata teriminin üstel olarak söniümlenmesini garanti eder (J.J. Slotine ve W. Li, 1991). Yani her $t > 0$ için pozisyon takip hata sinyali*

$$e(t) \leq \sqrt{\frac{\lambda_2}{\lambda_1}} \|e(0)\| \exp \left\{ -\frac{\min(\lambda_{\min}(K), \lambda_{\min}(\alpha))}{\lambda_2} t \right\} \quad (2.2.25)$$

eşitsizliğini sağlayarak, üstel olarak azalan bir zarf içinde sifıra yakınsar. Denklem (2.2.25) de geçen $\lambda_{\min}(\cdot)$ fonksiyonu, matrisin en küçük öz değerini göstermek amacı ile λ_1 ve λ_2 değerleri sırası ile

$$\lambda_1 = \min\{\underline{m}, 1\} \quad \lambda_2 = \min\{\overline{m}, 1\} \quad (2.2.26)$$

olarak tanımlanmış olup, bu denklemden geçen $\underline{m}, \overline{m}$ yardımcı değerleri

$$\underline{m}\|\zeta\|^2 \leq \zeta^T \underline{M}(q)\zeta \leq \overline{m}\|\zeta\|^2 \forall \zeta \in \mathbb{R}^{2n}$$

eşitsizliğini sağlayan alt ve üst sınırlardır.

İspat Teorem 2.1 de verilen önermeyi ispat edebilmek için, pozitif tanımlı scalar $V(t)$ fonksiyonu

$$V = \frac{1}{2}r^T \underline{M}(q)r + \frac{1}{2}e^T e \quad (2.2.27)$$

biçiminde tanımlayalım. Yukarıda (2.2.26) ile verilen tanımlardan yararlanarak bu fonksiyon

$$\frac{1}{2}\lambda_1\|y\|^2 \leq V(y, t) \leq \frac{1}{2}\lambda_2\|y\|^2, \quad y \triangleq [r^T \quad e^T]^T \quad (2.2.28)$$

şeklinde alttan ve üstten sınırlanabilir. Denklem (2.2.27) de verilen $V(y, t)$ fonksiyonunun zamanda göre türevini alınıp, ortaya çıkan fonksiyonda (2.2.17), ve (2.2.24) yi yerlerine yerleştirir ve sadeleşme yapılırsa

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -r^T K r - e^T \alpha e \\ &\leq -\lambda_{\min}(K)\|r\|^2 - \lambda_{\min}(\alpha)\|e\|^2 \end{aligned} \quad (2.2.29)$$

elde edilir. Bu hesaplama sırasında $\frac{d}{dt}\{\underline{M}(q) - 2\underline{C}(q, \dot{q})\}$ fonksiyonunun ters simetrik özelliğinden yararlanılmıştır. İspatımız içerisinde verilen $y(t) \in R^{4n}$ vektöründen de yararlanarak (2.2.29) fonksiyonu, üstten

$$\dot{V} \leq -\min(\lambda_{\min}(K), \lambda_{\min}(\alpha))\|y\|^2 \quad (2.2.30)$$

Şeklinde sınırlayabiliriz. (2.2.28) eşitsizliğinden yararlanarak $\|y\|^2$ terimi yerine V fonksiyonu cinsinden karşılığını yerleştirerek de \dot{V} fonksiyonunun sınırını

$$\dot{V} \leq -\frac{2\min(\lambda_{\min}(K), \lambda_{\min}(\alpha))}{\lambda_2} V \quad (2.2.31)$$

şekilde yeniden düzenleyebiliriz. (2.2.31) ile verilen 1. mertebeden diferansiyel denklemin çözümü

$$V(t) \leq V(0) \exp \left\{ -\frac{2 \min(\lambda_{\min}(K), \lambda_{\min}(\alpha))}{\lambda_2} t \right\} \quad (2.2.32)$$

biçiminde olacaktır. Denklem (2.2.28) ile verilen eşitsizlikten de

$$\frac{1}{2} \lambda_1 \|y(t)\|^2 \leq V(t), \quad V(0) \leq \frac{1}{2} \lambda_2 \|y(0)\|^2 \quad (2.2.33)$$

eşitsizlikleri elde edilebilir. Bunların yardımları ile de $y(t)$ fonksiyonunun

$$\|y(t)\| \leq \sqrt{\frac{\lambda_2}{\lambda_1}} \|y(0)\| \exp \left\{ -\frac{\min(\lambda_{\min}(K), \lambda_{\min}(\alpha))}{\lambda_2} t \right\} \quad (2.2.34)$$

elde edilebilir. Kısaca $y(t)$ üsttel bir zarf içerisinde ekponansiyel olarak sifira gider. Dolayısı ile $y(t)$ sinyali içerisinde yer alan $r(t)$ ve $e(t)$ sinyalleri de aynı şekilde üsttel olarak sifira yakınsarlar. İspatımızın bu noktasına kadar $e(t)$ sinyalinin (2.2.25) sağladığını göstermiş olduk. Standard sinyal izleme metodoloji kullanılarak da, hata sinyalimiz sifira sürülürken sistem durumlarının da sınırlı değerler içerisinde kaldığını gösterebiliriz. Bu durumda Teorem 2.1'in ispatı tamamlanmış olur.

2.2.4.2. Parametrik Belirsizliklere Karşı Uyarlamalı Denetleyici Tasarımı

Bu bölümde, (2.2.21) ile açık çevrim dinamiği verilen sistem için (2.2.4) birleştirilmiş sistemindeki θ vektörü ile belirtilen, sabit sistem parametrelerinin belirsizlikler içerdiklerini düşünerek aynı sistem için uyarlamalı bir denetleyici tasarlayacağız. Hata sinyalimizi sifira sürebilmek için bir önceki bölümde kullandığımız denetleyici yerine

$$u = Y\hat{\theta} + Kr + J^T e \quad (2.2.35)$$

şeklinde uyarlamalı bir denetleyici önermekteyiz. Bu denetleyicide kullanılan $\hat{\theta}(t)$ terimi θ teriminin tahmini olup bu tahmin terimi

$$\dot{\hat{\theta}} = \Gamma Y^T r \quad (2.2.36)$$

diferansiyel ilişkisinden yararlanılarak güncellenmektedir. Burada tanımlanan Γ terimi kare, pozitif tanımlı ve diagonal tahmin kazanç matrisidir. Yapılan tahminin performansını incelemek üzere, parametre tahmin hata vektörü de

$$\tilde{\theta} = \theta - \hat{\theta}(t) \quad (2.2.37)$$

biçiminde tanımlanmıştır. (2.2.35) ile tasarladığımız denetleyiciyi, (2.2.21) ile verilen açık çevrim dinamiğine yerleştirirsek, uyarlamalı denetim için kapalı çevrim dinamiğimizi

$$\underline{M}(q)\dot{r} = -\underline{C}(q, \dot{q})r - Kr + Y\tilde{\theta} - J^T e \quad (2.2.38)$$

biçiminde elde edebiliriz. Artık ikinci Teoremimizi sunmaya hazırız:

Teorem 2.2 Birleştirilmiş sistem denklemleri (2.2.4) ile ifade edilen kumada kolu uzakbulunum robot sistemi için; (2.2.35) ile tasarladığımız uyarlamalı denetimleyici, içinde yer alan $\hat{\theta}$ ifadesi, (2.2.36) ifadesinin integralinden elde edildiğinde; (2.2.9)'de verilen hata sinyali, t sonsuza ıraksadığında sıfıra yakınsar; yani, pozisyon hata sinyali için $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$ yargısı geçerli olur.

İspat Teoremimizde sunulan yargıyı ispatlayabilmek için aşağıda verilen pozitif tanımlı scalar fonksiyonu tanımlayalım;

$$V_a = V + \frac{1}{2} \tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} \tilde{\theta} \quad (2.2.39)$$

Tanımlanan bu yeni fonksiyonda yer alan $V(t)$ terimi Teorem 1, denklem (2.2.27) de tanımlanmıştır. Bir önceki teoremimize benzer olarak (2.2.39) nin zamana bağlı türevini alır ve (2.2.17), ve (2.2.38) i çıkan denklemde yerlerine yerleştirip gerekli sadeleştirmeler yapılırsa V_a fonksiyonunun türevi

$$\dot{V}_a = -r^T K r - e^T \alpha e + r^T Y \tilde{\theta} - \tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\theta}} \quad (2.2.40)$$

Şeklinde elde edilebilir. Denklem (2.2.40) da $\dot{\tilde{\theta}}$ terimi (2.2.36) da verilen tasarımı konulduğunda

$$\dot{V}_a = -r^T K r - e^T \alpha e \quad (2.2.41)$$

elde edilir. (2.2.39) ve (2.2.41) den ifadelerinden $V_a(t)$ fonksiyonunun sınırlandırılabilir bir fonksiyon olduğu görülebilir: yani $V(a) \in \mathcal{L}_\infty$. $V_a(t)$ 'nin sınırlı olmasından dolayı, pozitif elemanlar biçiminde içerdiği $r(t)$, $e(t)$, $\tilde{\theta}$ fonksiyonları dolayısı ile (2.2.17) ifadesinden de $\dot{e}(t)$ de sınırlandırılabilir olduğu ispatlanabilir (kısaca $e(t)$ muntazam olarak sürekli bir fonksiyondur). Ayrıca (2.2.41) ifadesinin her iki tarafının integrali alınırsa $r(t), e(t) \in \mathcal{L}_2$ olduğu görülebilir. Standart sinyal izleme metodolojisi takip edilerek kapalı döngü sistemimizde bulunan bütün sinyaller sınırlandırılabilir ($\in \mathcal{L}_\infty$ olduğu ispatlanır). Böylece Barbalat Lemma [M. Krstic, I. Kanellakopoulos, ve P. Kokotovic, 1995]'nin direkt uygulamasından takip hata değerinin sifıra gideceği ispatlanmış olur: $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$ yani pozisyon hatası $e(t)$, t sonsuza ıraksadıkça sifıra yakınsayacağı ispatlanmış olur.

Açıklama 2 Her ne kadar matematiksel olarak her iki Teoremde de sonuçlar küresel kararlılığı (global stability) işaret etse de, denklem (2.2.18) den de görülebileceği üzere, $r(t)$ sinyalinin sınırlı kalabilmesi için, birleştirilmiş Jakopyan matrisinin sözde tersinin, J^+ alınabilmesi gerekmektedir. Yani herhangi bir (gerek kumanda kolu, gerekse uzakbulunum) robotunun çalışma alanı içerisinde tekil bir bölge içerisine (veya yakınına) girilirse, tasarlanan denetleyiciler sistem kararlılığı garanti edemeyebilirler. Bu yüzden sunulan denetleyiciler bölgesel kararlılık (regional stability) , sağlayabilmektedir². Buna karşın tasarlanan denetleyiciler ters kinematik hesaplamalarının içerdiği zayıflıkları göstermemektedir.

² Bu zayıflık, sadece bu çalışmada sunulan denetleyiciler için değil, bilgimiz dahilinde robot iş uzayında (task space) tasarlanan her robot denetleyici için geçerlidir.

2.2.5 Pasif Uyarlamalı Denetleyici Tasarımı

Önceki bölümlerde sunulan denetleyiciler sadece takip etme ana hedefini sağlayacak biçimde tasarlanmıştır. Bu bölümde ise, takip etme kriterinin yanı sıra telerobotik sistemlerde bulunması gereken pasiflik kriterinide sağlamak amacı ile tasarlanacaktır. Tasarımımıza geçmeden önce kullanıcı/dış çevre etkilerini içeren yeni bir kuvvet vektörünü

$$\underline{F} = S^T \begin{bmatrix} F_H \\ F_E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_H + F_E \\ -F_E \end{bmatrix} \quad (2.2.42)$$

biçiminde tanımlayalım. (M.McIntyre, W. Dixon, D. Dawson, ve E. Tatlıcıoğlu)' da uygulanan yapıya benzer olarak, kullanım kolu uygulama uzayında (2.2.10) denklemi ile tanımlanan $x_d(t)$ sinyalini

$$M_T \ddot{x}_d + B_T \dot{x}_d + K_T x_d = F_H + F_E \quad (2.2.43)$$

dinamiği kullanılarak hesaplayacağız. Denklem (2.2.43) da tanımlanan M_T, B_T, K_T sabit elemanlı, diyagonal matrislerdir. Kullanıcı tarafından kumanda koluna uygulanan F_H kuvveti ile dış dünyanın uzakbulunum robotuna uygulayacağı F_H kuvvetlerinin sınırlı kuvvetler oldukları düşünülürse ($F_E, F_H \in \mathcal{L}_\infty$) doğrusal sistem kuramından, \ddot{x}_d, \dot{x}_d ve x_d sinyallerinin de sınırlı sinyaller oldukları ($\ddot{x}_d, \dot{x}_d, x_d \in \mathcal{L}_\infty$) gözlemlenebilir. Tasarımımızın bu aşamasında aşağıda verilen Önermeyi sunabiliriz.

Kuram 1: Birleştirilmiş sistem denklemi (2.2.4) ile ifade edilen kumanda kolu uzakbulunum robot sistemi için; (2.2.10) ile tanımlanan takip etme hata vektörünün zamana göre türevinin, her elemanının mutlak değerlerinin toplamalarının entegrali sınırlandırılabilirse (kısaca $\dot{e}(t) \in \mathcal{L}_1$ olduğunda), x_d kumanda kolu çalışma uzayı referans sinyali, denklem (2.2.43) dinamiği kullanılarak üretilmesi genel sistemin (2.2.12) ile belirtilen pasiflik kriterini sağlaması için yeterli olacaktır.

Kanıt Yukarıda verilen yargıyı ispatlamak için negatif olmayan, sınırlandırılabilir $v_p(t) \in \mathbb{R}$ fonksiyonunu

$$V_p = \frac{1}{2} \dot{x}_d^T M_T \dot{x}_d + \frac{1}{2} x_d^T K_T x_d \quad (2.2.44)$$

şeklinde tanımlayalım. $v_p(t)$ fonksiyonunu zamana göre türevini alırsak

$$\dot{V}_p = \dot{x}_d^T M_T \ddot{x}_d + \dot{x}_d^T K_T x_d \quad (2.2.45)$$

fonksiyonunu elde ederiz. Denklem (2.2.45) de $M_T \ddot{x}_d$ in yerine denklem (2.2.43) den eşitini yazarak, $V_p(t)$ fonksiyonunu zamana göre türevini daha sade bir biçimde

$$\dot{V}_p = \dot{x}_d^T (F_H + F_E) - \dot{x}_d^T B_T \dot{x}_d \quad (2.2.46)$$

şeklinde elde edilebilir. (2.2.46) de yer alan $\dot{x}_d^T B_T \dot{x}_d$ terimi her zaman pozitif olup basındaki eksi işaretinde dolayı her zaman negatif değerler alacaktır, bu argüman göz önüne alındığında $V_p(t)$ fonksiyonunun zamana göre türevi için

$$\dot{V}_p \leq \dot{x}_d^T (F_H + F_E) \quad (2.2.47)$$

eşitsizliği elde edilebilir. $V_p(t)$ fonksiyonunun sınırlandırılabilir olmasından dolayı (2.2.47) fonksiyonunun her iki tarafının entegrali alındığında aşağıda verilen eşitsizliği elde etmemizi sağlayacaktır.

$$-c_1 \leq V_p(t) - V_p(t_0) \leq \int_{t_0}^t \dot{x}_d^T (F_H + F_E) d\tau \quad (2.2.48)$$

Bu ifadede kullanılan $-c_1 \in \mathbb{R}$ pozitif bir sınırlama katsayısı olup, aynı eşitsizlik (2.2.10) ve (2.2.42) tanımları kullanılarak

$$-c_1 \leq \int_{t_0}^t \dot{X}_d^T \underline{F} d\tau \quad (2.2.49)$$

biçiminde tekrar yazılabilir. Bu eşitsizliği denklem (2.2.10) den faydalanarak

$$\int_{t_0}^t X^T \underline{F} d\tau = \int_{t_0}^t \dot{X}_d^T \underline{F} d\tau - \int_{t_0}^t e^T \underline{F} d\tau \quad (2.2.50)$$

elde edilen denklemde yerine koyar ve Teoremimizde ihtiyaç duyulan $\dot{e}(t) \in \mathcal{L}_1$ ifadesi sağlandığını düşünürsek c_2 pozitif bir sınırlayıcı katsayı olacak şekilde

$$\int_{t_0}^t \mathbf{X}^T \underline{\mathbf{F}} d\tau \geq -c_2 \quad (2.2.51)$$

ifadesini yani

$$\int_{t_0}^t \mathbf{x}^T \mathbf{S}^T \mathbf{S}^T \begin{bmatrix} \mathbf{F}_H \\ \mathbf{F}_E \end{bmatrix} d\tau \geq -c_2 \quad (2.2.52)$$

elde ederiz. Bu ifade, (2.2.10)'de verilen $\mathbf{x} = [(\mathbf{x}_m)^T \quad (\mathbf{x}_s)^T]^T$ tanımı ve $\mathbf{S}^T \mathbf{S}^T = \mathbf{I}_{2n}$ eşitliği kullanıldığında (2.2.13) ifadesinin aynısı olduğu aşikardır.

Yukarıda verilen Önermemizin geçerli olabilmesi için, hata sinyalinin türevinin $\dot{e}(t) \in \mathcal{L}_1$ olması gerekmektedir. Bu gerekliliği sağlayabilmek (2.2.35) ile tasarladığımız denetleyiciyi,

$$\mathbf{u} = \mathbf{Y}\hat{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{K}\mathbf{r} + \beta_1 \text{Tanh}(\mathbf{r}) + \mathbf{J}^T(\mathbf{e} + \text{Tanh}(\mathbf{e})) \quad (2.2.53)$$

Şeklinde modifiye ederiz. Bu denklemde β_1 pozitif bir kazanç sabiti olup, (2.2.35) ile tanımlanan denetleyicide olduğu gibi uyarlama (adaptasyon) kuralı bu denetleyici için de (2.2.36) de tasarlandığı gibidir. (2.2.53) ile tasarladığımız yeni denetleyiciyi, (2.2.21) ile verilen açık çevrim dinamiğine yerleştirirsek, uyarlamalı denetim için kapalı çevrim dinamiğimizi

$$\underline{\mathbf{M}}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{r}} = -\underline{\mathbf{C}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\mathbf{r} + \mathbf{Y}\hat{\boldsymbol{\theta}} - \mathbf{K}\mathbf{r} - \beta_1 \text{Tanh}(\mathbf{r}) - \mathbf{J}^T(\mathbf{e} + \text{Tanh}(\mathbf{e})) \quad (2.2.54)$$

biçiminde elde edilebilir. Bu yeni denetleyici için aşağıda verilen Teoremi sunabiliriz:

Teorem 2.3 Birleştirilmiş sistem denklemi (2.2.4) ile ifade edilen kumada kolu-uzakbulunum robot sistemi için; (2.2.53) ile tasarladığımız uyarlamalı denetimleyici,

ve içinde yer alan $\hat{\theta}$ ifadesi, (2.2.36) ifadesinin entegralinden elde edildiğinde; konum hata sinyali için $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$ sağlarken, takip hata teriminin türevi de $\dot{e}(t) \in \mathcal{L}_1$ yargısı sağlanmasını garanti eder.

İspat: Teoremimizde sunulan yargıyı ispatlayabilmek için pozitif tanımlı scaler $V_{ap}(t)$ fonksiyonunu

$$V_{ap} = V_a + \sum_{i=1}^{2n} \ln(\cosh(e_i)) \quad (2.2.55)$$

şeklinde tanımlayalım. Tanımlanan bu yeni fonksiyonda yer alan V_a terimi Teorem 2, denklem (2.2.39) de tanımlanmıştı. V_{ap} 'nin zamana göre türevi alınıp, (2.2.54) ifadesi ile elde edilen kapalı çevrim dinamiği ve (2.2.36) ile verilen uyarılama kuralı ifadeleri yerleştirilip gerekli sadeleşmeler yapıldığında

$$\dot{V}_{ap} = -r^T K r - e^T \alpha e - \beta_1 r^T \text{Tanh}(r) - e^T \alpha \text{Tanh}(e) \quad (2.2.56)$$

ifadesi elde edilir. Bu ifadenin bulunmasında

$$\frac{d}{dt} \left\{ \sum_{i=1}^{2n} \ln(\cosh(e_i)) \right\} = \dot{e}^T \text{Tanh}(e)$$

eşitliği ile denklem (2.17) dan yararlanılmıştır. Denklem (2.2.56)'i

$$\xi^T \text{Tanh}(\xi) \geq 0 \quad \forall \xi \in \mathbb{R}^n$$

eşitsizliğinden yararlanarak

$$\dot{V}_{ap} \leq -r^T K r - e^T \alpha e \quad (2.2.57)$$

ifadesini elde edebilir ve Teorem 2 de verilen argümanlar takip ederek, $r(t), e(t) \in \mathcal{L}_2 \cap \mathcal{L}_\infty$ dolayısı ile $\dot{e}(t) \in \mathcal{L}_2 \cap \mathcal{L}_\infty$ ifadelerini elde edebilir ve Barbalat Lemma [M. Krstic, I. Kanellakopoulos, ve P. Kokotovic, 1995]'nin direkt uygulamasından $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$ ve standart sinyal takip argümanları kullanarak da

kapalı çevrimde bulunan bütün sinyallerin sınırlı olduklarını gösterebiliriz. Buna ek olarak denklem (2.2.56) in her iki tarafının entegralini alarak

$$V_{ap}(t_0) - V_{ap}(t) \geq \int_{t_0}^t \beta_1 r^T \text{Tanh}(r) d\tau + \int_{t_0}^t e^T \alpha \text{Tanh}(e) d\tau \quad (2.2.58)$$

ifadesini de elde edilebilir. $V_{ap}(t)$ teriminin sınırlandırılabilir olmasından dolayı $r^T \text{Tanh}(r)$ ve $e^T \text{Tanh}(e)$ terimlerinin entegrallerin de sınırlandırılabilirler. O zaman denklem (2.2.8)'de verilen eşitsizliklerden faydalanılarak

$$\int_{t_0}^t \sum_{i=1}^{2n} |r_i| d\tau \leq \Omega_1, \quad \int_{t_0}^t \sum_{i=1}^{2n} |e_i| d\tau \leq \Omega_2 \quad (2.2.59)$$

eşitsizlikleri, $\Omega_1, \Omega_2 \in \mathbb{R}$ sınırlayıcı sabitleri olacak şekilde elde edilir. Yani $r(t), e(t) \in \mathcal{L}_1$ sonucuna ulaşılmıştır. Elde ettiğimiz bu sonuç ve denklem (2.2.17) den yararlanılarak $\dot{e}(t) \in \mathcal{L}_1$ argümanı da ispatlanmış olur. Kısaca sunulan pasif tabanlı denetleyici (2.2.4) ile ifade edilen sistemimizi asimptotik olarak kararlı kılarken ($\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$) hata teriminin türevinin de \mathcal{L}_1 uzayına ait olmasını sağlamak ve takip edilen yörünge sinyali (2.2.43) dinamiği ile üretildiğinde her iki robot, tasarlanan denetleyici ve aralarında bulunan iletişim ağının oluşturduğu bütünleşik sistemimizin kararlılığı garantilenmiş olacaktır.

2.2.6. Benzetim Çalışmaları

Sunulan denetleyici sisteminin uygulanabilirliğini göstermek üzere 2 linkli düzlemsel bir kumanda kolu tarafından kumanda edilen 3 linkli direk sürülebilir bir robot sistemi seçilmiş olup simülasyon çalışmaları bu sistem üzerinde yapılmıştır. (Seçilen sistem için dinamik denklemler iki linkli robot için (1992), üç linkli robot için [U. Özbay, H. T. Şahin, E. Zergeroğlu, November 2008] 'den elde edilebilir). Benzetimlerde kullanılan denetleyici kazançları

$$\begin{aligned} \alpha &= \text{diag}\{2.1 \quad 2.1 \quad 2.8 \quad 2.9\} \\ K &= \text{diag}\{7.5 \quad 6.5 \quad 8 \quad 7 \quad 6\} \\ \beta_1 &= \text{diag}\{1 \quad 1 \quad 2 \quad 1 \quad 0.3\} \end{aligned}$$

olarak seçilmişlerdir.

Yapılan öncül benzetimlerde kullanıcı kolu ile uzakbulunum robotunun aynı ortamda oldukları düşünülmüş ve zaman geçikmeleri yok farz edilerek çalışmalar sürdürülmüştür. Tasarlanan denetleyici ve uyarlayıcı kazançları bu tip zaman geçikmesiz sistem için ayarlanmış, öncül (hazırlık) benzetimler sonunda bu kazançlarla bir daha oynanmamıştır. Benzetimlerde kullanılan referans sinyal, $M_T = I, B_T = K_T = 0$ ve F_H, F_E sinizodial sinyaller olacak şekilde (2.2.24) denklemi kullanılarak oluşturulmuş olup Şekil 2.2.1 ile verilmişlerdir. Şekil 2.2.2 ve 2.2.3 de simülasyonlar sırasında sistem takip hataları verilirken Şekil 2.2.4, ve Şekil 2.2.5 da denetim sinyal çıkışları sunulmuştur.

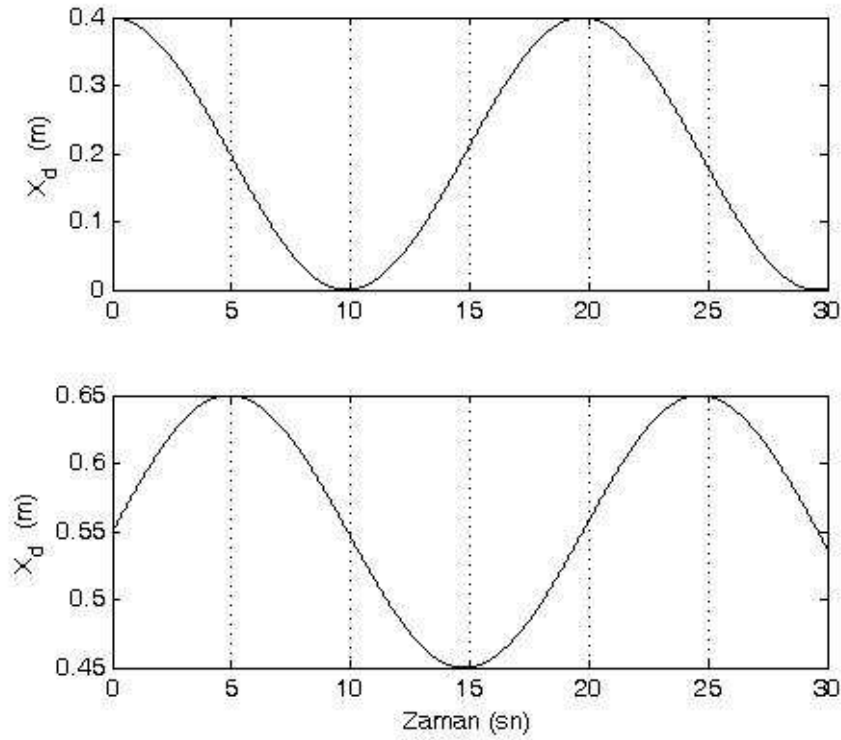
İkinci bölüm benzetim çalışmalarımız da sistem (hem kumanda kolu hem de uzakbulunum robotu) parametrelerinin tam olarak bilinmediği durum ele alınmıştır. Benzetim Çalışmaları sırasında denetleyici, kazançları değiştirilmemiş olup uyarlayıcı kazançları

$$\Gamma = \text{diag} \begin{Bmatrix} 3 & 0.1 & 0.2 & 0.4 & 0.1 & 0.1 & 1 \\ 0.3 & 0.03 & 5 & 1.2 & 5 & 2 & 3 \end{Bmatrix}$$

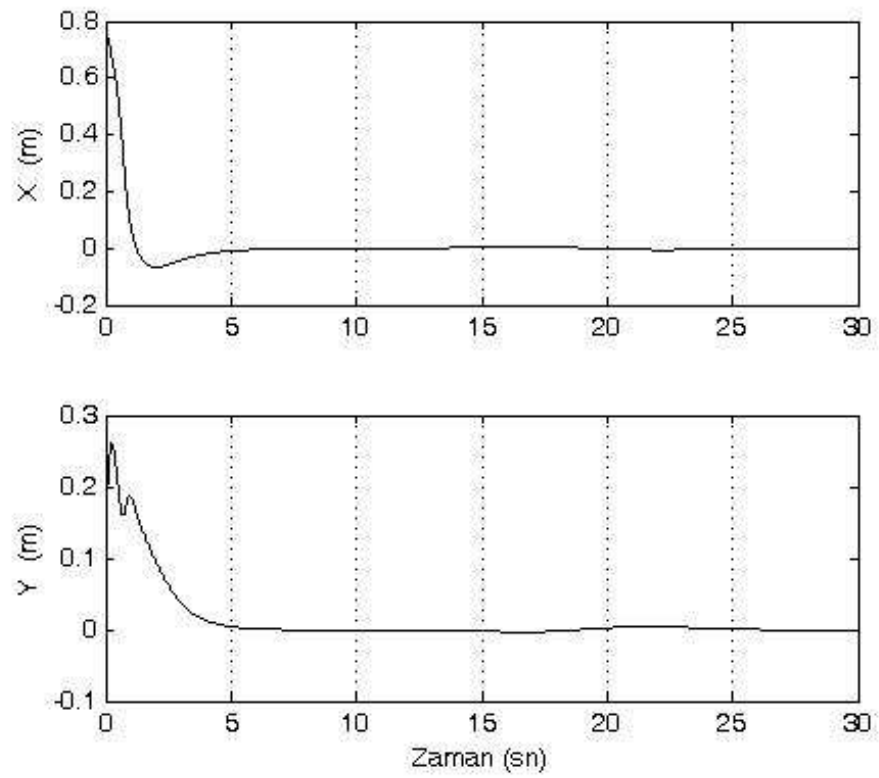
biçiminde ayarlanmıştır. Benzetim sonuçları Şekil 2.2.6 ile 2.2.11 de verilmiştir. Kumanda kolu parametrelerinin uyarlamaları Şekil 2.2.6 ile Şekil 2.2.7 de sunulurken uzakbulunum robotunun parametrelerinin tahminleri Şekil 2.2.8 ile Şekil 2.2.10 arasında verilmişlerdir. Şekillerden görüleceği üzere sistem parametrelerinin gerçek değerlerine ulaşmadığı ancak genel sistemi kararlı kılabacak sabit değerlere uyarladıkları beklendiği gibi bu değerlerin etrafında değişim gösterdikleri gözlemlenebilir. Şekil 2.2.11 de ise uyarlamalı denetleyici sırasında kumanda kolu ve uzakbulunum robotunun izlediği yörüngeler düzlemsel olarak sunulmuşlardır.

Üçüncü bölüm benzetim çalışmalarımız daha gerçekçi bir teleoperasyon senaryosu ele alınarak düzenlenmiş olup denetim ve uyarlama parametreleri değiştirilmeden sadece kumanda kolu sistemi ile uzakbulunum sistemi arasına sabit zaman gecikmeleri ilave edilerek yapılmışlardır. Bu benzetimlerde amacımız hem sistemimizin gerçekçi zaman gecikmelerine karşı gürbüz olduğunu benzetim yolu ile

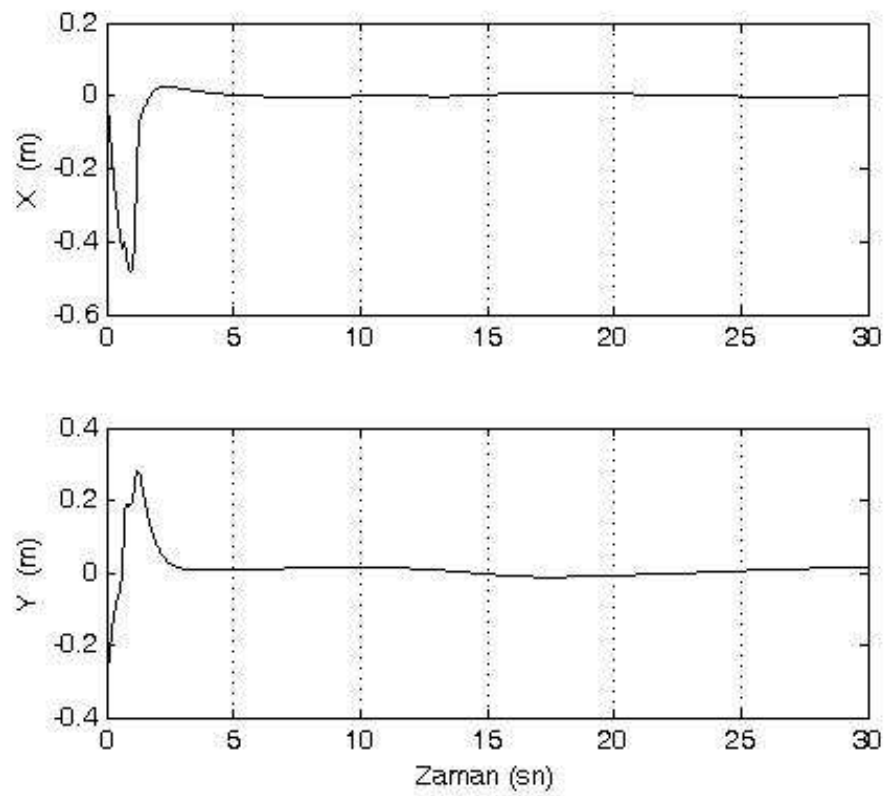
kanıtlamak hemde sistemimizin hangi zaman gecikmelerinde kullanımının uygun olabileceğini test etmek olmuştur. Benzetimlerimiz sırası ile 30, 100, 250, 500 ve 600 mili saniye gecikmeler verilerek tekrarlanmışlardır. Benzetim sonuçlarımız Şekiller 2.2.12 ile 2.2.15 arasında sunulmuşlardır. Şekillerde takip hataları derece cinsinden verilmişlerdir. Kumanda kolu takip hataları Şekil 2.2.12 ile Şekil 2.2.13 de sunulurken Uzakbulunum robotu takip hataları Şekil 2.2.14 ile Şekil 2.2.15 de sunulmuşlardır. Sonuçlardan da gözlenebileceği üzere sunulan denetleyici 600 mili saniye zaman gecikmeleri de dahil olmak üzere sistemin kararlılığını sağlayabilmekte ancak daha yüksek zaman gecikmelerinde gürbüzlüğünü kaybetmeye başlamaktadır.



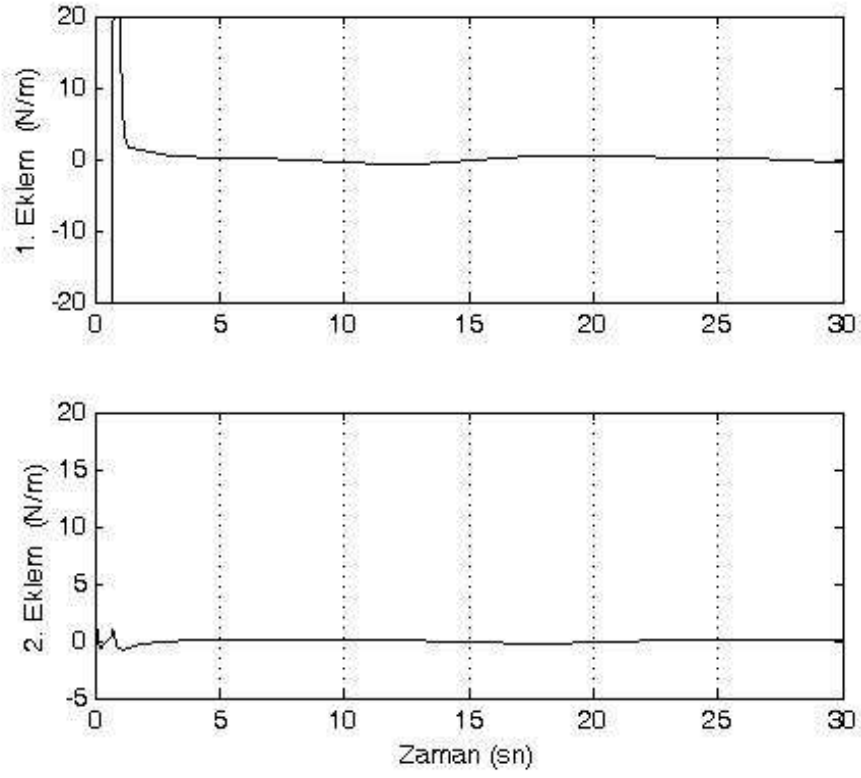
Şekil 2.10 Referans giriş sinyali



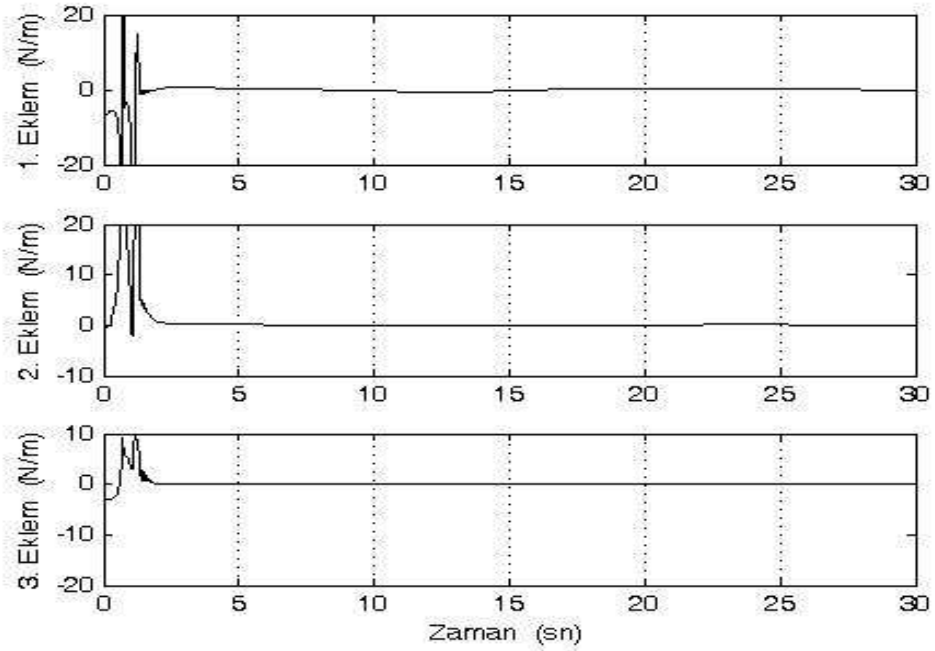
Şekil 2.11 Kumanta Kolu Takip Hatası.



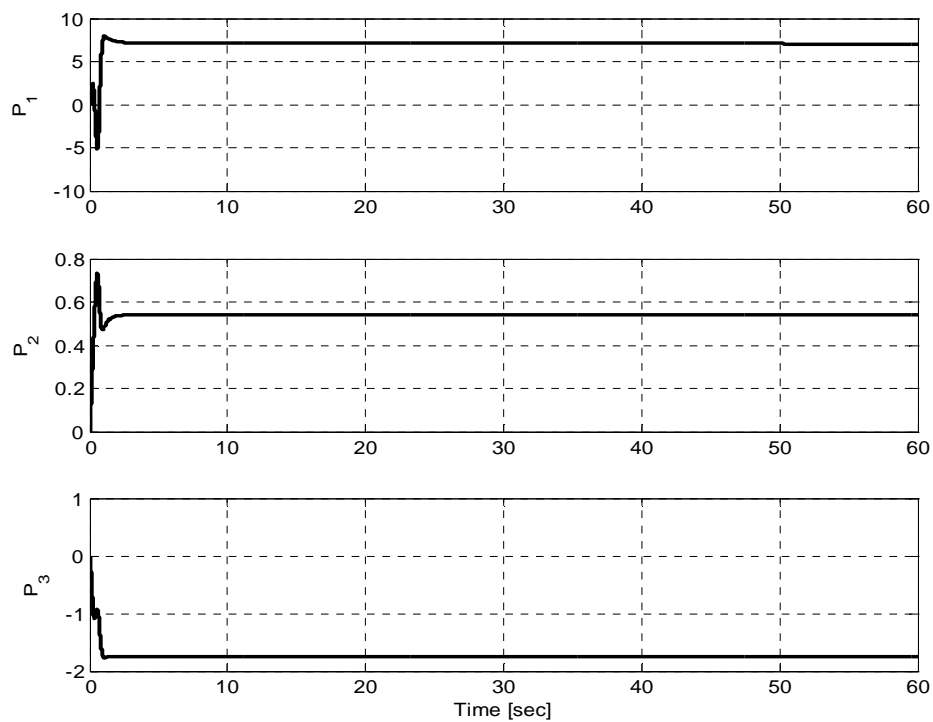
Şekil 2.12 Robot Takip Hatası.



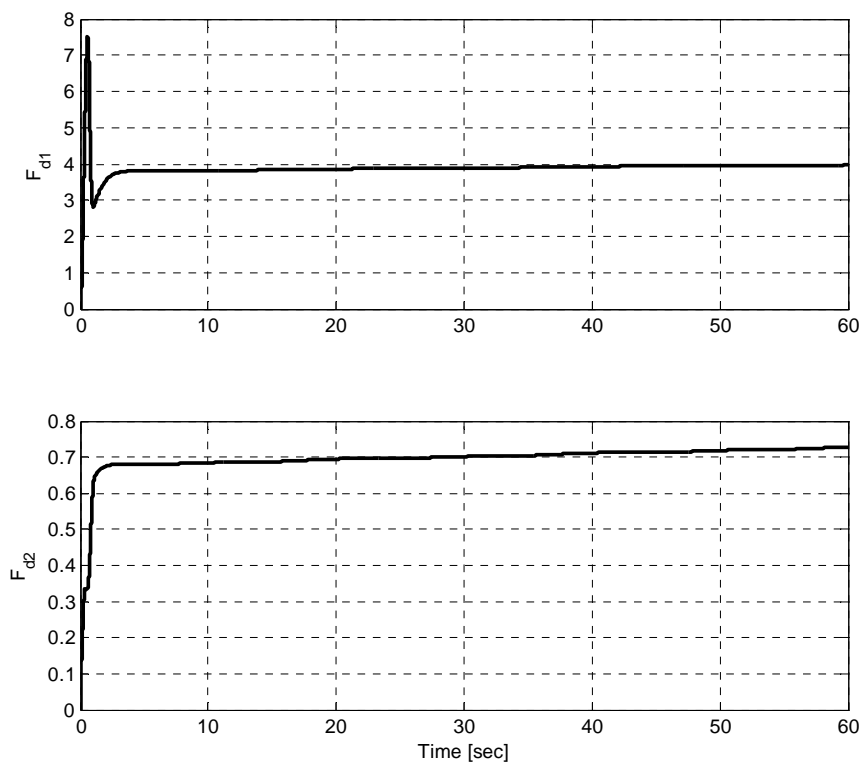
Şekil 2.13 Kumanta Kolu Robotuna Verilen Denetim Sinyali.



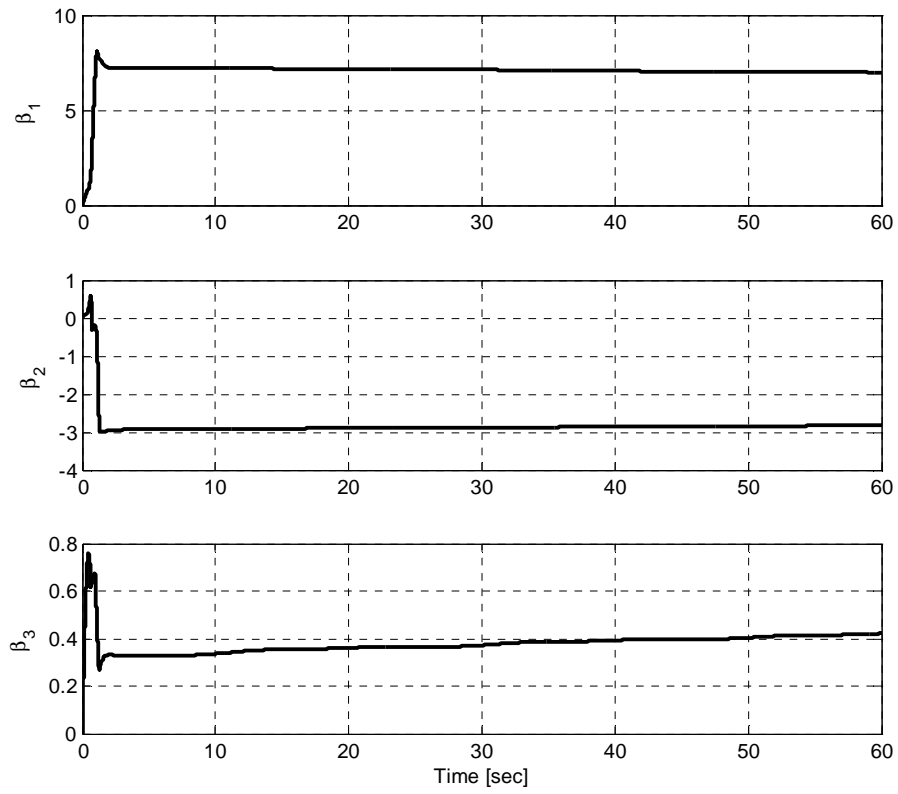
Şekil 2.14 Uzak Bulunum Robotuna Verilen Denetim Sinyali.



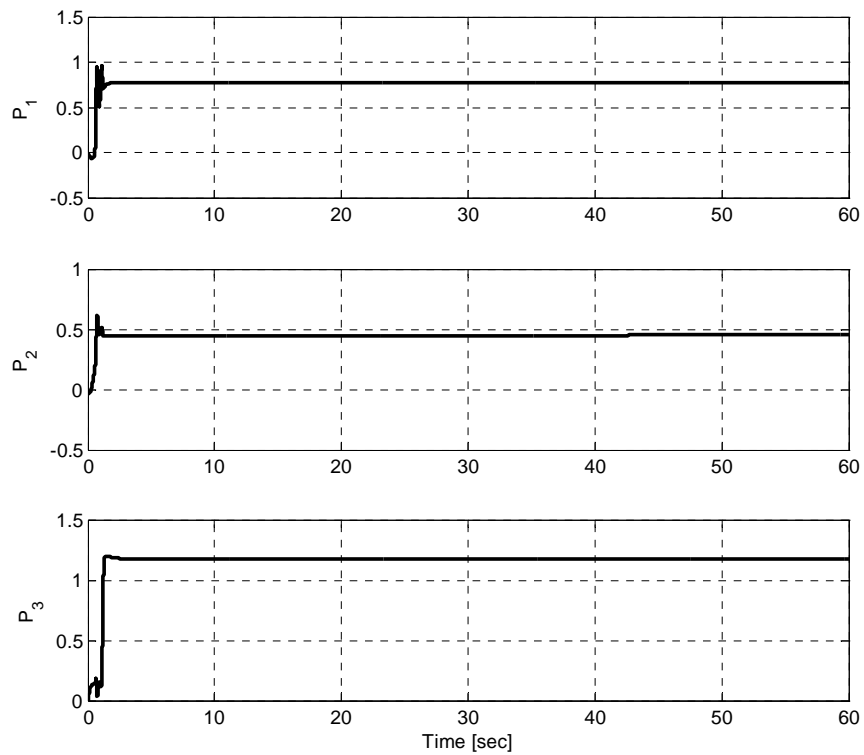
2.15 Kumanda Kolu Atalet Matrisi Parametreleri Tahminleri



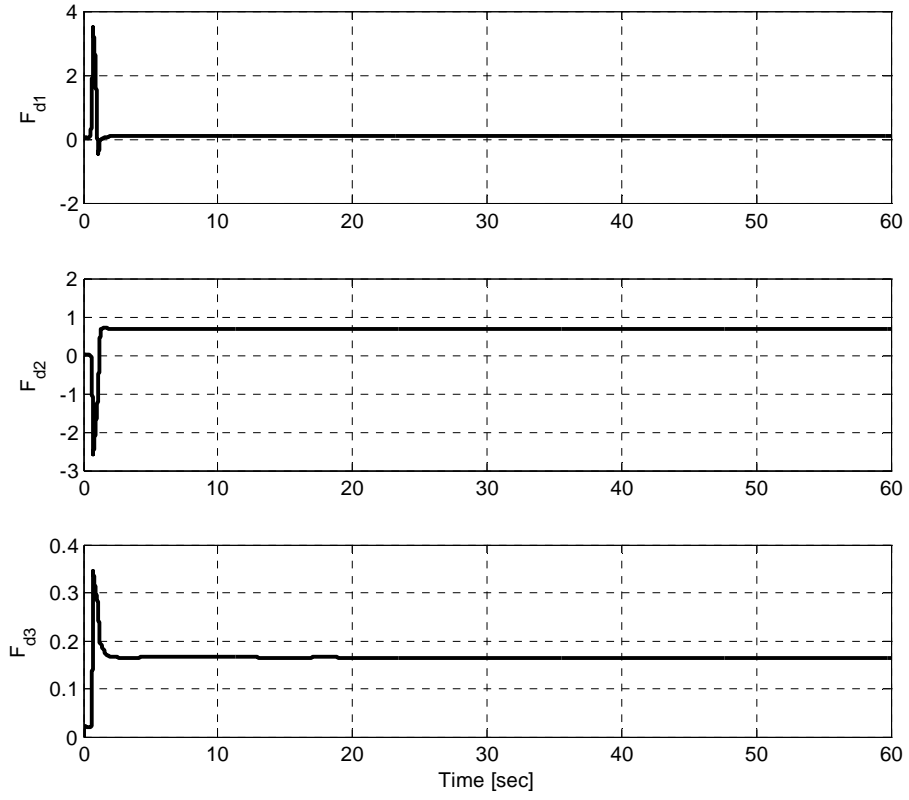
2.16 Kumanda Kolu Sürtünme Matrisi Parametreleri Tahminleri



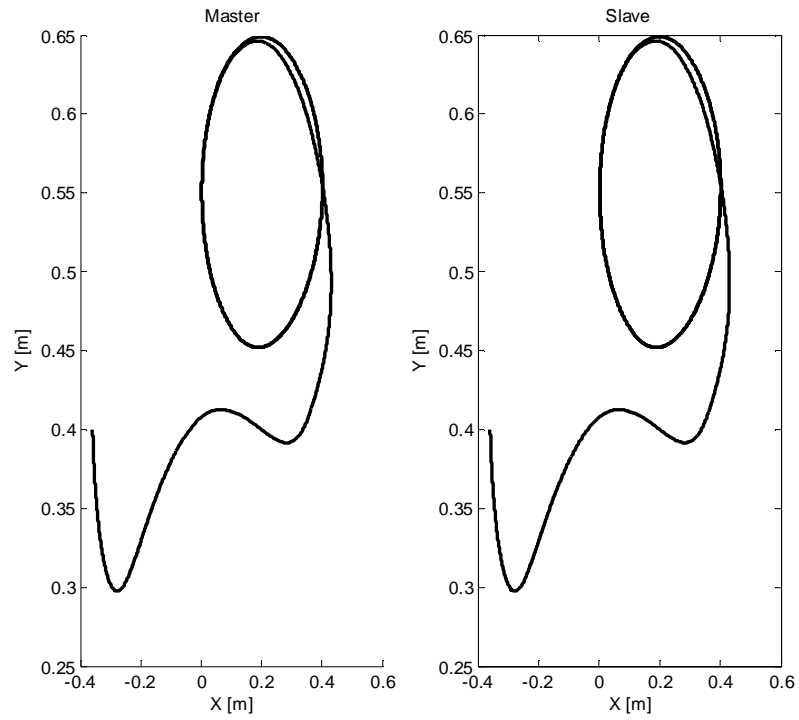
2.17- Uzak Bulunum Robotu Atalet Matrisi Parametreleri Tahminleri



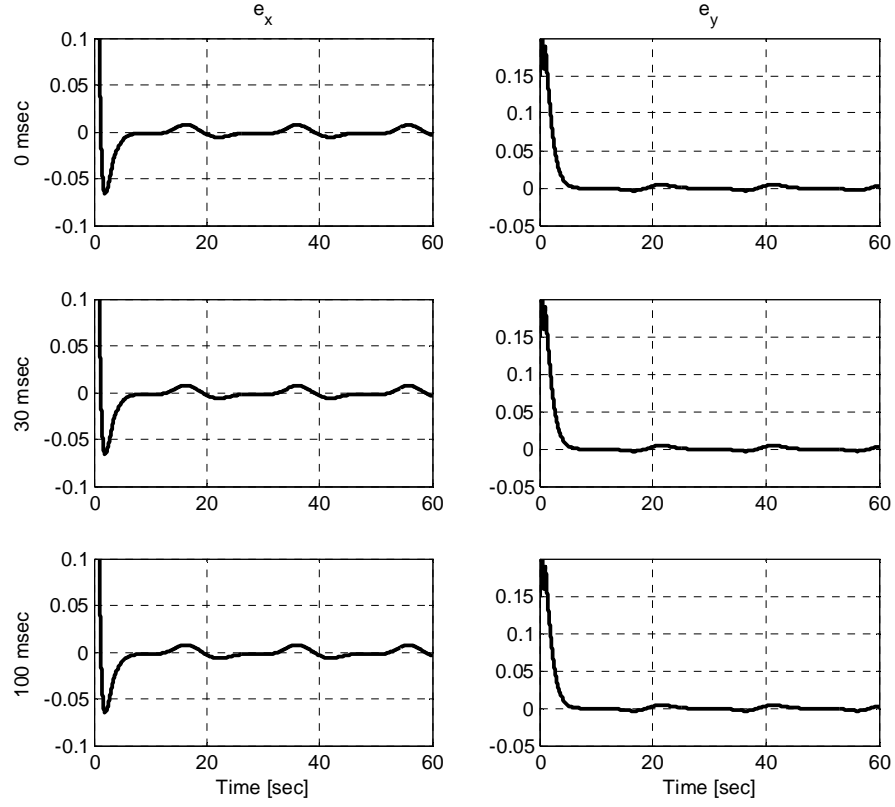
2.18- Uzak Bulunum Robotu Merkezkaç-Coriolis Matrisi Parametreleri Tahminleri



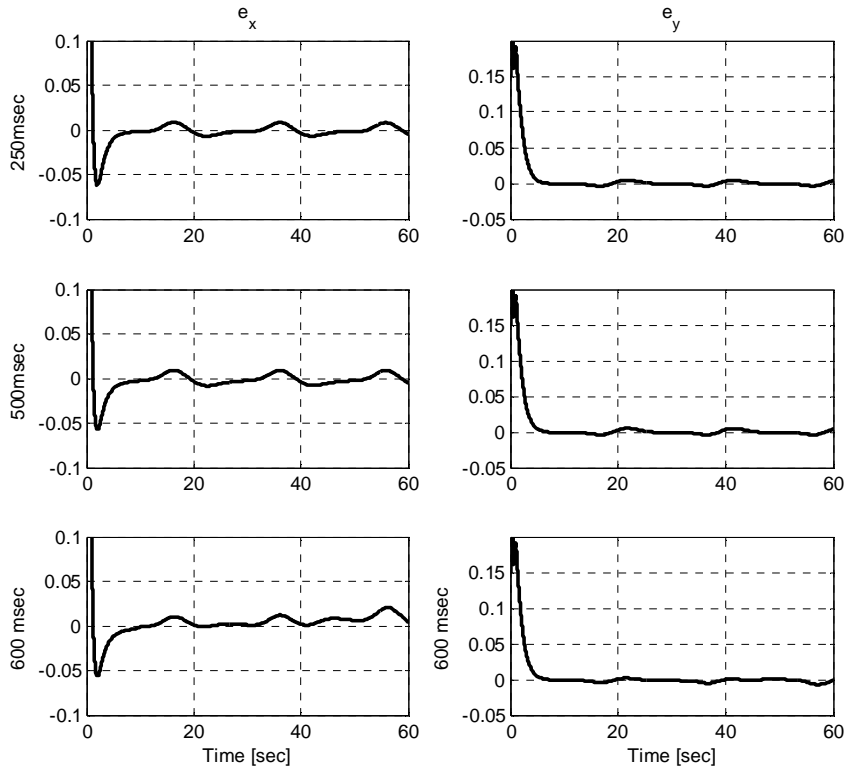
2.19- Uzakbulunum Robotu Sürtünme Matris Parametrelerinin Tahminleri



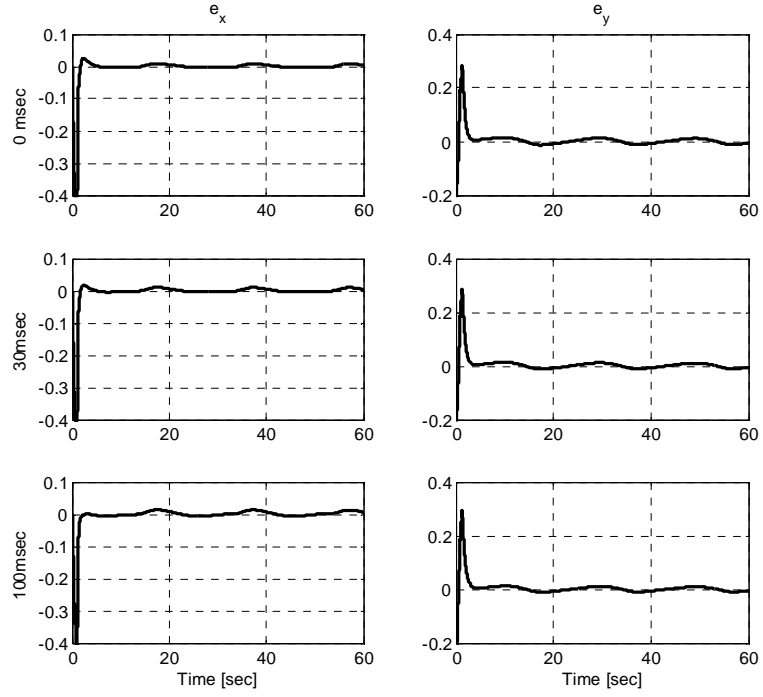
2.20- Uyarlamalı Benzetimlerde Kumanda Kolu ve Uzakbulunum Robotlarının Düzlemsel Hareketleri



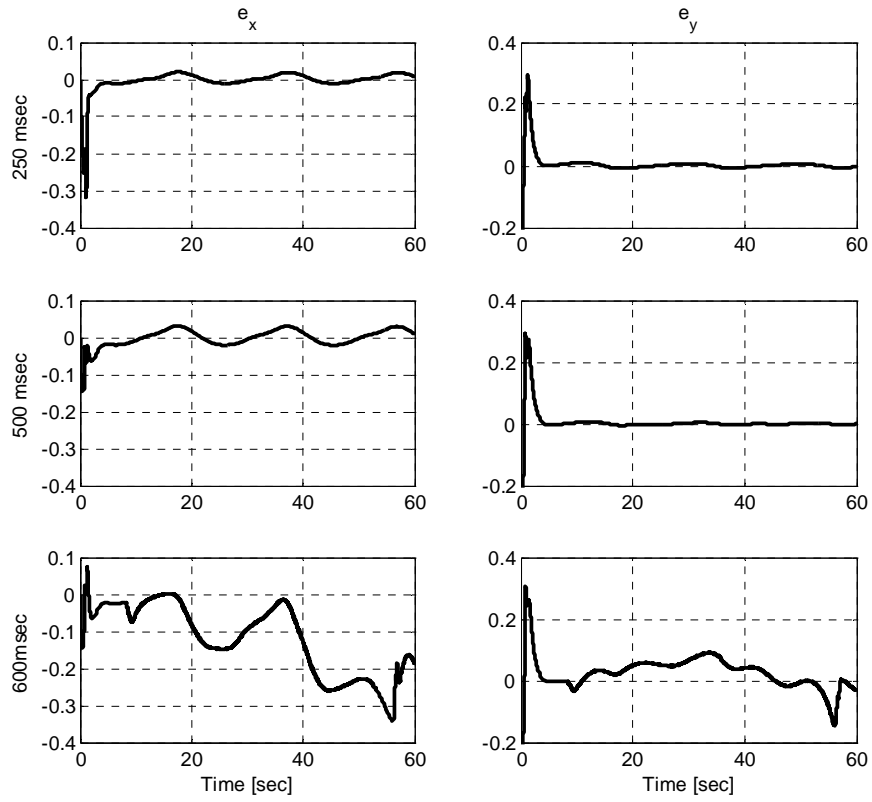
2.21 Kumanda Kolumun 0-100 mili saniye zaman gecikmelerinde hata çıkışları



2.22 Kumanda Kolumun 250-600 mili saniye zaman gecikmelerinde hata çıkışları



2.23- Uzakbulunum Robotunun 0-100 milli saniye zaman gecikmelerinde hata çıkışları



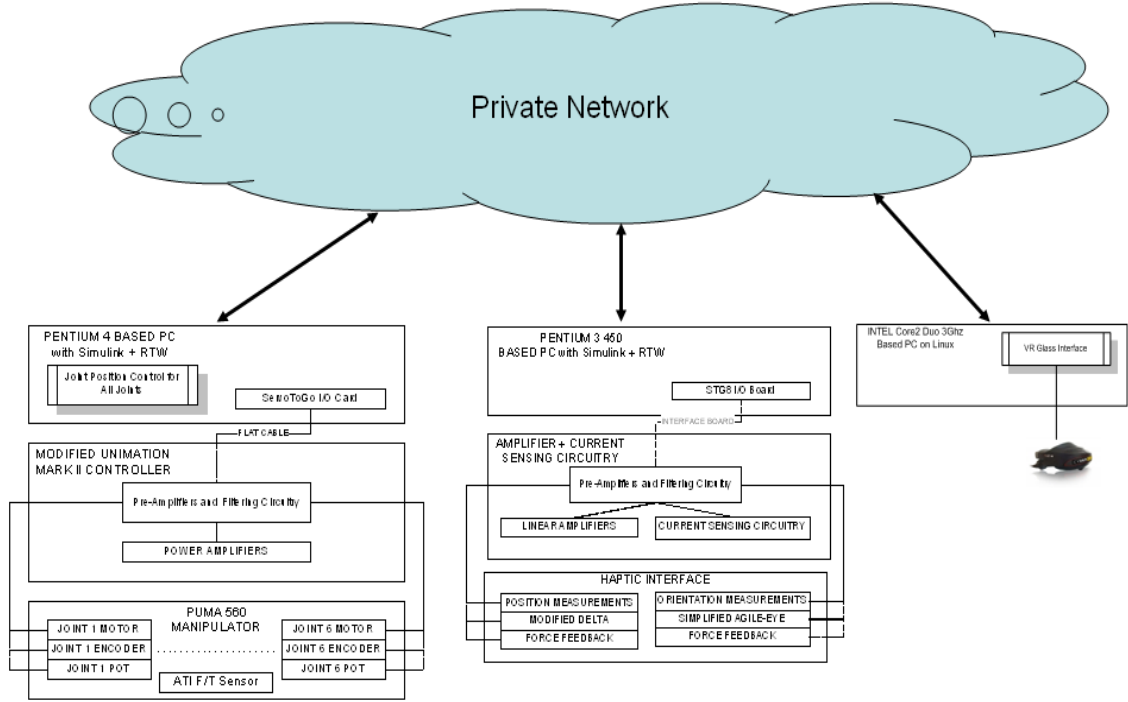
2.24- Uzakbulunum Robotunun 250-600 milli saniye zaman gecikmelerinde hata çıkışları

2.2.7 Sonuçlar

Sonuç olarak, kumanda kolu - Uzakbulunum robot sisteminden oluşan bir telerobotik sistem için sistem parametrelerindeki belirsizliklere rağmen asimptotik takip sağlayabilen uyarlamalı bir denetleyici sunulmuştur. Sunulan denetleyici için tasarımı ve kararlılık analizleri Lyapunov tarz yaklaşımlar kullanılarak yapılmış olup varılan kuramsal sonuçlar benzetim çalışmalarla da desteklenmiştir. Proje kapsamında tasarladığımız denetleyicimizin sabit zaman gecikmelerinde çalışabildiği gerek teorik gerekse benzetim çalışmaları ile desteklenmiştir.

3. UZAK BULUNUM SİSTEMİ DENEY DÜZENEĞİ

Projemiz kapsamında oluşturduğumuz uzakbulunum deney düzeneğimizin genel şeması Şekil 4.1 de sunulmuştur



3.1 Uzak Bulunum Sisteminin Genel Diagramı

3.1. Alt Sistemler

Sunulan diagramdanda anlaşılabilceği üzere 3 ayrı alt sistem (kumanda kolu sistemi, uzakbulunum robotu sistemi ve zahiri gerçeklik sistemi) olarak kurulmuştur. Alt sistemler arasındaki haberleşme “Gigabit Switch” üzerinden özel bir ağ üzerinden (private network) sağlanmaktadır. Sağlanan ağ bağlantıları sadece teleoperasyon sistemi için kullanılmakta olup ağ üzerinde oluşacak zaman geçikmelerini en aza indirebilmek ve haberleşme sırasında sabit zaman geçikmeleri

elde edebilmek için özel olarak seçilip programlanmıştır. Genel uzakbulunum sistemlerinden farklı olarak 3 alt sistem kullanılmasının sebebi, gelişme raporlarımızda da belirttiğimiz üzere, laboratuvarımızda bulunan denetim kartları ve bunların yazılımlarının birbirleri ile uyumsuzluğudur. Kısaca değinmek gerekirse; uzakbulunum robotumuz için bilgisayarların ISA girişine uygun ServoToGo Kartı kullanılmakta olup ISA girişine sahip bilgisayar günümüz itibari ile eski teknoloji sayılmakta olup işlemcilerinin güçleri sınırlıdır. Buna rağmen 6 eksenli uzakbulunum robotumuzu başarı ile kosturabilmekte ve güç-hız bileşenlerini özel ağbağlantısından alıp iletebilmektedirler. Kumanda kolu bilgisayarımızda ise projemiz ilk dönemlerin de PCI girişine sahip bir denetim kartı kullanılmış ve bu tip yüksek performanlı bir bilgisayar ile hem kumanda kolu denetimi hemde sanal gerçek işlemlerinin beraber yapılması planlanmıştır. Ancak PCI veri yolu kullanan Quanser Q8 marka denetim kartımız için yine Quanser firması tarafından üretilen yazılımlar gerçek zamanlı ağ kullanımı sırasında sistemimizin geri kalanı ile uyumsuzluklar göstermiş ve dolayısı ile sistem entegrasyonu yapılamamıştır. Bu zayıflığı aşmak üzere değişik işletim sistemlerinde adı geçen kartlar için sürücüler yazılmasına karşın proje ekibimizce geliştirilen bu yeni yazılımlar proje süremizde tam olarak uyumlandırılmamıştır. Proje süremizi daha fazla uzatmamak için kaumadan kolu denetimi içinde ISA veri yolu tabanlı ServoToGo denetim kartı kullanan bir bilgisayar seçilmiş ancak bu eski teknolojiye sahip bilgisayarımız da hem robot denetimi hemde sanal gerçekçilik işlemlerini beraber yapabilecek işlem hızına ulaşamamıştır. Problemin çözümü olarak özel ağımıza sanal gerçekçilik ve görüntü işleme paketlerini beraber üstlenebilecek ek bir bilgisayar daha eklenmiştir. Genel sistemimizde üç ayrı bilgisayar bulundurma sebebimiz bunlardan kaynaklanmaktadır.

Oluşturulan bu donanım ile, uzaktan yönetilen robottan alınan konum bilgisi ile çevrenin robotun ucuna uyguladığı kuvvet vektörü uzakbulunum bilgisayarımız tarafından işlenerek kuvvet ve hız bilgisi olarak kumanda kolu bilgisayarına gönderilmektedir. Kumanda kolu bilgisayarımızda kullanıcının belirlenen işi yapmak için kullandığı güç vektörü ile kumanda kolu konum bilgileri, yine kuvvet ve hız bilgisi olarak uzak bulunum bilgisayarına iletilmektedir. Bunlara ek olarak uzakbulunum robotu çalışma alanından alınan video sinyalleri özel ağımız üzerinden zahiri görüntü bilgisayarımıza iletilmekte, bu alt sistemimizde gerçekleştirilen 3

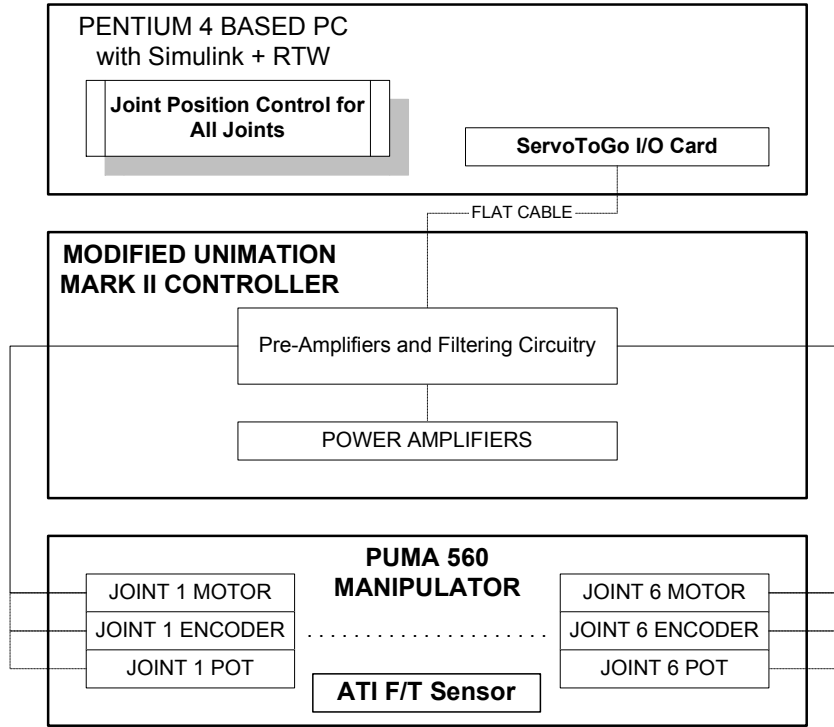
boyutlandırma ve kullanıcıya yardımcı olacak zahiri etmenlerin görüntüye eklenmesinden sonra 3 boyulu olarak VR kaskı ekranlarına iletilmektedir.

3.1.1. Uzak Bulunum Sistemi

Uzak bulunum sisteminin genel bir diyagramı Şekil 3.2 de sunulmuştur. Alt sistemimizin denetim algoritmaları Pentium 4 tabanlı, tek işlemcili, bir anakart üzerine kurulu bulunan ServoToGo denetim kartından oluşmuş bilgisayarımız üzerinde çalıştırılmaktadır. Bilgisayarımızla modifiye edilmiş Unimation denetleyici arasındaki iletişim yassı kablolar aracılığı ile yapılmaktadır. Bu veri yolundan sisteme uygulanması istenen eklem torkları iletilmekte geri besleme içinse robotun her ekleminde bulunan pozisyon ölçer (encoder) bilgileri alınmaktadır. Modifiye edilmiş Unimation denetleme modulu neredeyse tamamen değiştirilmiş olup içerisinde sadece laboratuvarımızda geliştirdiğimiz öngüçlendirici ve filtreleme devreleri ile orijinal sisteme ait akım güçlendirici devreleri bulunmaktadır.

Denetlenmeye çalışılan sistem 6 eksenli bir endüstriyel robot olan Puma 500 serisi manipulatordur. Bu robotun her eklemini için, robotun çeşitli yerlerine yerleştirilmiş 6 eklem motoru ve bu motorlara bağlı potansiyometre ve pozisyon ölçer (encoder) bulunmaktadır. Potansiyometreler robotun ilk pozisyon bilgisinin elde edilmesinde kullanılmakta olup, bu ilk işlem sonucu pozisyon ölçerlerin ilk değerleri doğrusal interpolasyon methodları kullanılarak bulunmakta ve robot denetimi sırasında bu algılayıcıların verdiği değerlerden faydalanılmaktadır. Alt sistemimizde ayrıca, robotun uçuna dış ortam tarafından uygulanacak kuvvet ve momentleri ölçmek üzere ATI firmasından alınan Kuvvet/moment algılayıcısı ile bu algılayıcıya ait veri iletim kartı da bulunmaktadır.

Alt sistemimizin özel ağımıza bağlantısı anakartımıza iliştirilmiş “gigabit ethernet“ kartı aracılığı ile yapılmaktadır.

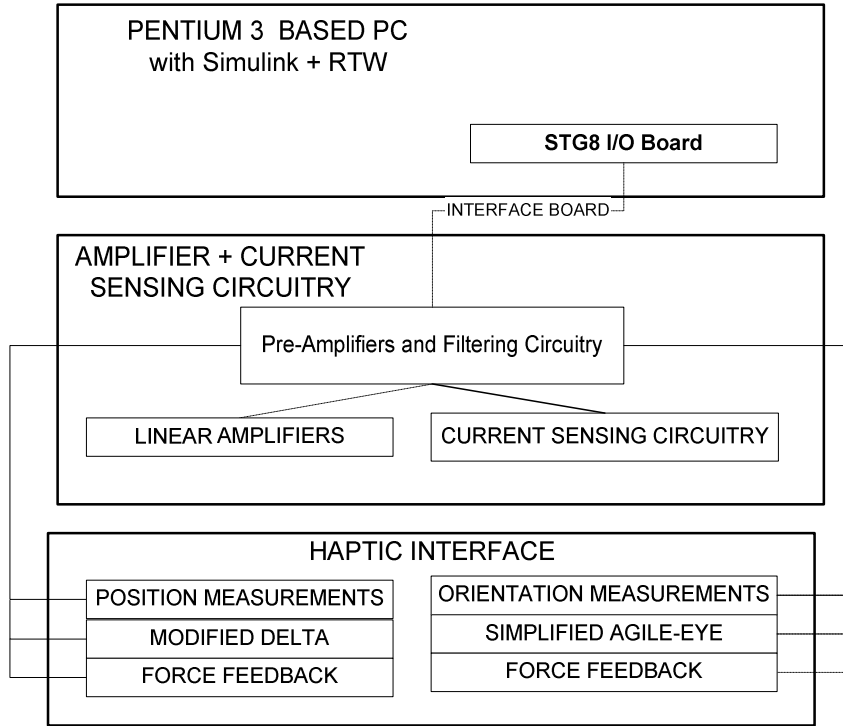


3.2 Uzakbulunum Robot Sistemi

3.1.2. Kumanda Kolu Sistemi

Kumanda kolu alt sistemimizin genel bir diagrafi Şekil 3.3 de sunulmuştur. Bu sistemimizde denetim algoritmalarının koşturuluşmasında Pentium 3 tabanlı 450Mhz lik tek işlemciye sahip ana kartlı bir bilgisayar kullanılmıştır. Sistemimizde denetim kartı olarak ISA tabanlı ServoToGo kartı kullanılmış, kart ile haptik arabirimimizdeki motor/algılayıcı bağlantıları ve sinyal temizleme/yeniden oluşturmalar ise kendi tasarımımız olan bir arabirim kartı sayesinde öngüçlendirici ve gürültü yok edici devrelerden geçirilerek doğrusal motor sürücü devrelerine verilmiştir.

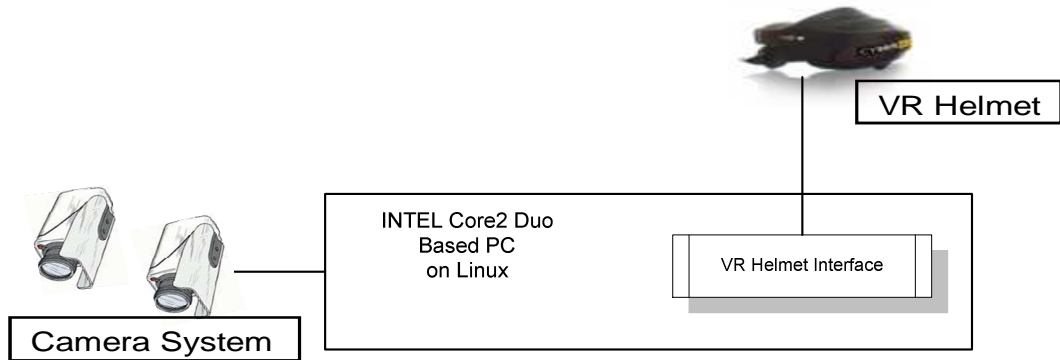
Haptik arabirimimiz motorları iki değişik tip sürücü ile denetlenmişlerdir. Oryantasyon için kullanılan mikro motorlar için küçük güçlü darlington transistör temelli doğrusal yükselticiler (bu sürücüler laboratuvarımızda geliştirilmişlerdir), taban eklemlerini sürebilmek için ise daha güçlü doğrusal sürücü devreleri kullanılmışlardır. Motor sürücüleri olarak doğrusal yükselticilerin kullanılma sebebi motorların çektikleri akımlarında ölçülerek geri besleme kullanılabilmesidir.



3.3 Kumanda Kolu Sistemi

3.1.3. Sanal Gerçekçilik Modülü

Sanal gerçekçilik alt sistemimizin genel bir diyagramı Şekil 3.4 de sunulmuştur. Bu sistemde gerek grafiksel gerekse sanal gerçekçilik işlemlerinin gerçek zamanda yapılabilmesi için diğer alt sistemlere göre daha yetkin bir işlemci kullanılmıştır.



3.4 Sanal Gerçekçilik Sistemi

Sistemimizin görüntü alma ve sanal gerçekçilik ekranlarının oluşturulması algoritmalarının çalıştırılmasında Intel Core2 Duo işlemciye sahip bir ana kart üzerine 2 adet (her göz için ayrı) Nvidia marka 512 MB hafızaya sahip ekran kartları kullanılmıştır. Ekran kartlarının çıkışları hem sistem geliştirilmesinin yapıldığı monitorlere hem de CyberMind firması tarafından üretilen sanal gerçekçilik kaskı iki monitorüne bağlanmıştır.

Uzak bulunum sisteminden sanal gerçekçilik modulüne görüntü aktarımı iki değişik biçimde gerçekleştirilebilmektedir. Bunlardan ilki; uzakbulunum ortamında robotumuzun ilk eklemi ucuna yerleştirilmiş olan BumbleBee Steryo kamera görüntülerinin direk olarak kaska iletilmesi ileidir. Bu metotta, saniyede 30 resim olarak her iki kameradan alınan görüntüler IEEE 1394 kablo ile ağ kullanılmadan direk sanal gerçekçilik sistemine ulaştırılmışlardır. Uzakbulunum sisteminden elde edilen steryo kamera görüntüleri kask sayesinde direk olarak 3 boyutlu ortamı vermektedir. Ancak bu çözüm ağı kullanmadığı için gerçekçi bir seneryo oluşumuna izin veremez, sadece laboratuvar testlerin kullanılmıştır.

İkinci yaklaşım ise ağ bağlantısı sonucu elde edilen robot hız bilgilerinin integralinin alınarak robot eklem pozisyonlarına çevrilmesi ve sanal gerçekçilik sisteminde kurulu bulunan simülatöre iletilerek uzak bulunum ortamının sanal görüntülerinin oluşturularak kaska verilmesidir. Bu yöntem 8. Gelişme raporumuzda da belirtildiği üzere başarı ile uygulanmıştır. Ancak bu metot sadece uzakbulunum ortamında ilk sanallaştırma işlemi sonrası bir değişiklik yapıldığında (örnek olarak objelerin yerleri değiştiğinde) kullanılabilirliğini yitirebilmektedir.

Yukarıda belirtilen olumsuzlukları giderebilmek amacı ile her iki sistemden aynı anda yararlanılmasını planlayan başka bir proje üretilmiş olup, rapor tarihimizde ön çalışmaları devam etmektedir.

3.2. Deney Düzenegi

Bu bölümde projemiz kapsamında oluşturulan deney düzenegimizin açıklamalı fotoğrafları yer almaktadır. Şekil 3.5 de uzakbulunum robotu ile uzak bulunum sistemimizin genel görünüşleri sunulmuştur.



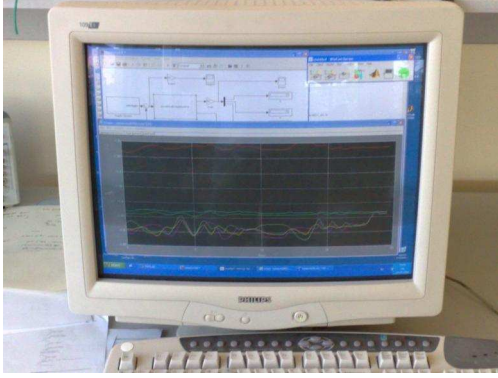
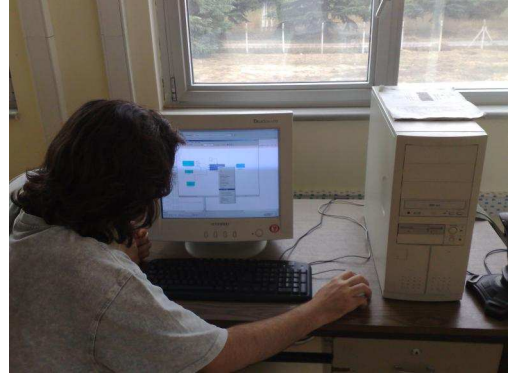
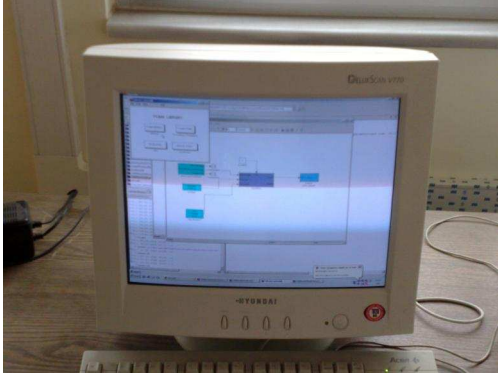
3.5 Uzak Bulunum Robot Sistemi Genel Görünüşü

Şekil 3.6 ve Şekil 3.7 de hazırlanan deneysek kodların sistem üzerinde hazırlanıp koşturulması ve deneysel çalışmalar sırasında sistemden alınan veriler ve deney düzenegi sunulmuştur



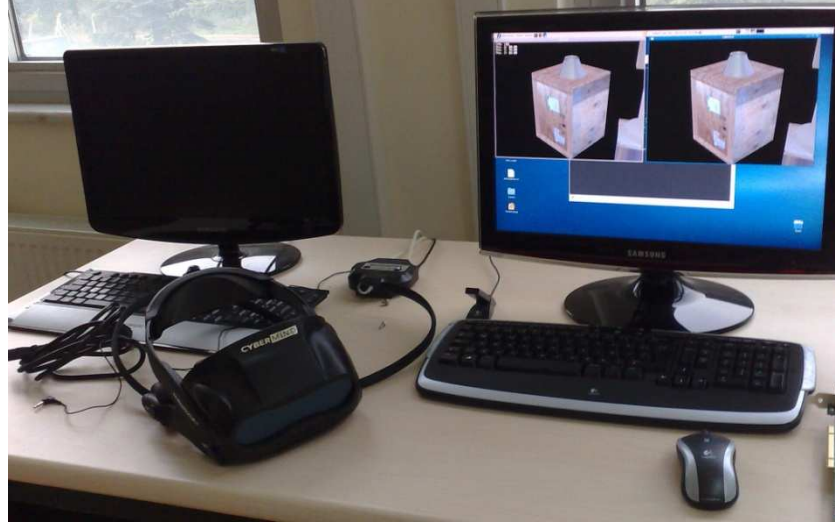


3.6 Uzak Bulunum Sistemimizden Deneyler Sırasında

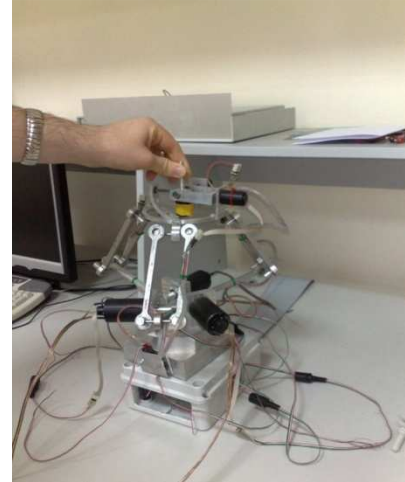


3.7 Uzak Bulunum Sistemimizden deneysel çalışmlar sırasında alınan datalar

Şekil 3.8 de sanal gerçekçilik kodlarının kosturulduğu sistemimiz ve VR kask sistemlerimiz sunulurken Şekil 3.9 kumanda kolu sistemimiz ve haptik arabirimimizi göstermektedir.



3.8. Sanal Gerçekçilik Bilgisayar ve Kask Sistemimiz.



3.9 Kullanıcı tarafında bulunan Haptik arabirim

4. SONUÇLAR VE GENEL GÖRÜŞLER

Tübitak KARİYER programınca desteklenen “*Telerobotik ve Uzakbulunum Uygulamaları için Pasif Denetimli, Robot İş Alanı Geliştirilmesi: Teori ve Uygulamaları*” isimli doktora çalışmamız yaklaşık olarak 5 yıl sürmüştür. Çalışmamız süresince teorik iki probleme çözümler getirilmiştir, telerobotik ve uzakbulunum sistemlerinde kullanılmak üzere bir haptik cihaz üretilmiş ve temel telerobotik deneylerinde kullanılmak üzere bir deney düzeneği planlanıp kurulmuştur.

Daha detaylı değinmek gerekirse teorik olarak ilk önce robot dinamik modelindeki belirsizlikler ve dış gürültüler olmasına karşın, küresel düzgün mutlak sınırlamalı (GUUB) robot ucu konum, oryantasyon ve yan görev takibini sağlayan lineer olmayan bir denetleyici tasarlanmıştır. Kontrol stratejisi birim koterniyonlar ve manipülatör Jakobiyen'inin sözde-tersi yönteminden yararlanmakta, dolayısıyla ters-kinematik hesaplamaları gerektirmemektedir. Bu nedenlerle denetleyici girişleri tekil değerler almamakta ve tasarım başarımı yükselmektedir. Ayrıca denetleyici manipülatörün içsel hareketine yönelik sınırlamalar getirmemekte, sistemin dinamik parametrelerinden bağımsız şekilde (manipülabilite, mekanik sınırlamalardan sakınma, ya da engel aşma gibi) “yan görevler” için de yeterli hareket serbestliği sağlamaktadır. Tasarlanan denetleyicinin kararlılığı ve başarımı benzetim ve deney sonuçları ile gösterilmiştir. Daha sonra bu denetleyici tasarımında faydalanılan methodlar kullanılarak kumanda kolu - Uzakbulunum robot sisteminden oluşan bir telerobotik sistem için sistem parametrelerindeki belirsizliklere rağmen asimptotik takip sağlayabilen uyarlamalı bir denetleyici sunulmuştur. Sunulan denetleyici için tasarımı ve kararlılık analizleri Lyapunov tarz yaklaşımlar kullanılarak yapılmış olup varılan kuramsal sonuçlar benzetim çalışmalarla da desteklenmiştir. Proje kapsamında tasarladığımız denetleyicimizin sabit zaman geçikmelerinde çalışabildiği gerek teorik gerekse benzetim çalışmaları ile desteklenmiştir.

Ayrıca projemiz kapsamında telerobotik ve uzakbulunum uygulamalarında kullanılmak üzere robotik bir iş alanı geliştirilmiştir. Geliştirilen sistemimizde kullanıcıya uzak bulunum ortamından dokunsal (haptik) geri besleme sağlayabilmek

amacı ile haptik bir arabirim mekanik olarak tasarlanıp üretilmiş, görsel (gerek gerçek gerekse sanal) geri besleme yapabilmek içinse üç boyutlu görünüş sunabilen sanal gerçekçilik kaskı kullanılmıştır.

KAYNAKLAR

- [1]. B. Armstrong, O. Khatib, and J. Burdick. (pp: 510-518, 1986). *The explicit and Automation and inertial parameters of the Puma 560 arm* (Cilt Vol. 1). Washington USA: in Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation.
- [2]. B. Xian, M. S. de Queiroz, D. Dawson, and I. Walker. (Feb. 2004). *Task-Space Tracking Control of Robot Manipulators via Quaternion Feedback* (Cilt Vol. 20, No. 1, pp. 160-167). IEEE Transactions on Robotics and Automation.
- [3]. C. R. Rao, and S. K. Mitra. (1971). *Generalized Inverse of Matrices and Its Applications*. New York: Wiley.
- [4]. Colgate, J. E. (Ağustos. 1993). *Robust Impedance Shaping Telemanipulation* (Cilt Vol. 9, No. 4, s. 374.384). IEEE Trans. Robot. Autom.
- [5]. D. Braganza, W.E. D. Dixon, D. Dawson and I. Walker. (Dec. 2005). *Tracking Control of Robot Manipulators with Kinematic and Dynamic Uncertainty* (Cilt pp. 5293-5297). Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control.
- [6]. D. J. Lee and P. Y. Li. (Haziran 2003). *Passive Bilateral Feedforward Control of Linear Dynamically Similar Teleoperated Manipulators* (Cilt Vol. 19, No. 3, s. 443.456). IEEE Trans. Robot. Autom.
- [7]. D. Lee, P. Y. Li. (Ekim 2005). *Passive Bilateral Control and Tool Dynamics Rendering for Nonlinear Mechanical Teleoperators* (Cilt Vol.21 No. 5, s.936-951). IEEE Trans. Robotics.
- [8]. D. Lee, P. Y. Li. (may 2002). *Passive Coordination Control of Nonlinear Bilateral Teleoperated Manipulators* (Cilt s: 3284-3289). Washington DC: Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation.
- [9]. *Direct Drive Manipulator Research and Development Package Operations Manual*. (1992). Berkeley, CA: Integrated Motion Inc.
- [10]. E. Tatlicioglu, M. McIntyre, D. Dawson, and I. Walker. (Dec. 2005). *Adaptive Nonlinear Tracking Control of Kinematically Redundant Manipulators with Sub-Task Extensions* (Cilt pp. 5293-5297). Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control.
- [11]. E. Zergeroglu, D. M. Dawson, I. W. Walker, and P. Setlur. (March 2004). *Nonlinear Tracking Control of Kinematically Redundant Robot Manipulators* (Cilt Vol. 9, No 1, pp 129-132). IEEE/ASME Transactions on Mechatronics.
- [12]. F. L. Lewis, C. T. Abdallah, D. M. Dawson. (1993). *Control of Robot Manipulators*. New York: MacMillan Publishing Co.

- [13]. G. Niemeyer and J. J. E. Slotine. (Ocak 1991). *Stable Adaptive Teleoperation* (Cilt Vol. 16, No. 1, s. 152.162). IEEE J. Ocean. Eng.
- [14]. Hughes, P. C. (1994). *Spacecraft Attitude Dynamics*. New York: Wiley.
- [15]. J. Ryu, D. Kwon, and B. Hannaford. (Nisan 2004). *Stable Teleoperation with Timedomain Passivity Control* (Cilt Vol. 20, No. 2, s. 365.373). IEEE Trans. Robot. Autom.
- [16]. J.J. Slotine ve W. Li. (1991). *Applied Nonlinear Control, Englewood Cliff*. Prentice Hall.
- [17]. K. Clear, D. Tesar. (May 1990). *Incorporating Multiple Criteria in the Operation of Redundant Manipulators* (Cilt pp.618-624). Cincinnati, Ohio: Proceedings of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation.
- [18]. Khatib, O. (Dec. 1983). *Dynamic Control of Manipulators in Operational Space* (Cilt pp. 1-10). New Delhi: 6th IFTOMM Congress on Theory of Machines and Mechanisms.
- [19]. L. Conway, R. A. Volz, and M. W. Walker. (Nisan 1990). *Teleautonomous systems: Projecting and coordinating intelligent action at a distance* (Cilt 6(2):146-158). IEEE Transactions on Robotics and Automation.
- [20]. Lawrence, D. A. (Ekim 1993). *Stability and Transparency in Bilateral Teleoperation* (Cilt Vol. 9, No. 5, s. 624.637). IEEE Trans. Robot. Autom.
- [21]. M. Krstic, I. Kanellakopoulos, ve P. Kokotovic. (1995). *Nonlinear and Adaptive Control Design*. New York, NY: Willey Interscience.
- [22]. M. W. Spong, M. V. (1989). *Robot Dynamics and Control*. New York: John Wiley and Sons Inc.
- [23]. M.McIntyre, W. Dixon, D. Dawson, ve E. Tatlıcıoğlu. *Passive Coordination of Nonlinear Bilateral Teleoperated Manipulators* (Cilt CU/CRB/8/16/05/#,1 <http://www.ces.clemson.edu/ece/crb/publitn/tr.htm>). Clemson University CRB Technical Report.
- [24]. Nakamura, Y. (1991). *Advanced Robotics Redundancy and Optimization*. Addison-Wesley Pub. Co. Inc.
- [25]. Nenchev, D. N. (1989). *Redundancy Resolution through Local Optimization: A Review* (Cilt Vol. 6, pp. 769-798). Journal of Robotic Systems.
- [26]. P. Hsu, J. Hauser, and S. Sastry. (1989). *Dynamic Control of Redundant Manipulators* (Cilt Vol. 6, pp. 133-148). Journal of Robotic Systems.
- [27]. Pennington, J. E. (1987). *Space Telerobotics: A Few More Hurdles* (Cilt pp. 30-33). IEEE Control Systems Magazine.

- [28]. R. J. Anderson and M. W. Spong. (May 1989). *Bilateral Control of Teleoperators with Time Delay* (Cilt Vol. 34, No. 5, pp.494-501). IEEE Trans. Autom. Control.
- [29]. R. M. Murray, Z. Li, S. S. Sastry. (1994). *A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation*. CRC Press.
- [30]. Seraji, H. (August 1989). *Configuration Control of Redundant Manipulators: Theory and Implementation* (Cilt Vol. 5, No. 4, pp. 472-490). IEEE Trans. on Robotics and Automation.
- [31]. Siciliano, B. (1990). *Kinematic Control of Redundant Robot Manipulators: A Tutorial* (Cilt Vol. 3, pp. 201-212). Journal of Intelligent and Robotic Systems.
- [32]. T. F. Chan and R. V. Dubey. (April 1995). *A Weighted Least Norm Square Based Scheme for Avoiding Joint Limits for Redundant Joint Manipulators* (Cilt Vol. 11, No. 2). IEEE Trans. on Robotics and Automation.
- [33]. U. Özbay, H. T. Şahin, E. Zergeroğlu. (November 2008). *Robust Tracking Control of Kinematically Redundant Robot Manipulators Subject to Multiple Self-Motion Criteria* (Cilt Vol. 26 Issue 06, pp 711-728). Robotica.
- [34]. W. Zhou, S.E.Salcudean. (Kasım 2000). *Stability Guaranteed Teleoperation: An Adaptive Motion /Force Control Approach* (Cilt Vol.45, No.11, s: 1951-1969). IEEE Transactions on Automatic Control.
- [35]. Y. Ikei, K. W. (1997). "Texture Presentation by Vibratory Tactile Display,". *Proc. 1997 IEEE Virtual Reality Annual Znt. Symp.*, (s. pp. 199-205). Albuquerque, New Mexico.
- [36]. Y. Oh and W. K. Chung. (June 1999). *Disturbance-Observer-Based Motion Control of Redundant Manipulators Using Inertially Decoupled Dynamics* (Cilt Vol. 4, No. 2, pp. 133-146). IEEE/ASME Trans. on Mechatronics.
- [37]. Y. Tsumaki, H. N. (1998.). Design of a Compact 6-DOF Haptic Interface. *Proc. of the 1998 IEEE Int. Conf. On Robotacs and Automataon,*, (s. 2580-2585).
- [38]. Yoshikawa, T. (1984). *Analysis and Control of Robot Manipulators with Redundancy* (Cilt pp. 735 747). Cambridge, MA: in Robotics Research- The First International Symposium, MIT Press.
- [39]. Zhang, R. P. (1986). *Computational Efficient Kinematics for Manipulators with Spherical Wrists based on Homogeneous Transformation Representation* (Cilt Vol. 5, No. 2, pp. 30-42). Int. Journal of Robotics Research.

ÖZGEÇMİŞ

Ufuk ÖZBAY 1982 yılında İzmit Kocaeli’de doğmuştur. İlk ve orta öğrenimini bu şehirde tamamlamıştır. Lisans öğrenimini Kocaeli Üniversitesi’nde, yüksek lisans öğrenimini ise Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü’nde tamamlamıştır.

