

**ALTI SERBESTLİK DERECELİ HAPTİK ROBOT İLE TELEOPERASYON
VE SİSTEM DİNAMIĞI**

Tayfun ABUT

Yüksek Lisans Tezi

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Servet SOYGÜDER

AĞUSTOS-2015

**T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ALTI SERBESTLİK DERECELİ HAPTİK ROBOT İLE TELEOPERASYON VE
SİSTEM DİNAMİĞİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tayfun ABUT

(121120102)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 28.07.2015

Tezin Savunulduğu Tarih: 13.08.2015

Tez Danışmanı : Doç.Dr. Servet SOYGÜDER (Fırat Üniv.)

Diğer Jüri Üyeleri : Prof.Dr. Hasan ALLİ (Fırat Üniv.)

Doç.Dr. Davut HANBAY (İnönü Üniv.)

AĞUSTOS-2015

ÖNSÖZ

Teleoperasyon, insanları bilinmeyen ortamlardaki görevlere hazırlama ve geliştirme olanağı sağlayan bir robot teknolojisidir. Teleoperasyon sistemleri insanların erişemediği noktalarda ya da insan güvenliğinin olmadığı ortam hakkında bilgi edinilmesi ve gereken verilerin toplanması için kullanılmaktadır. Haptik sistemlerin gelişimiyle robotlar hissetme ve hissettirme gibi özelliklere kavuşmuşlardır. Günümüzde haptik, sanal veya gerçek ortamlardaki dokunmayla ilgili bilimin adı halini almıştır. Haptik manipülatörler ve arayüzler kuvveti hissetmemize yarayan, sanal ortamdaki cisimlere dokunma, onları hissetme, kontrol etme ve düzenlemeye imkân veren sistemlerdir. Bu kapsamda bu tezde sanal ve gerçek zamanlı robotların tele operasyonu gerçekleştirilmiştir. Sanal model ve gerçek robot arasında etkileşim sağlayabilen bir arayüz geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritma kullanılarak kullanıcıya geri besleme olarak kuvvet ve sanal robotun görsel hareketi elde edilmektedir. Tek yönlü(unilateral) hareket kontrolü ve iki yönlü(bilateral) kuvvet ve konum kontrolü gerçekleştirilmiştir.

Bu tez, kendisiyle birlikte çalışmayı, çalışanın yeteneği ölçüsünde yararlandığı biri olarak gördüğüm değerli hocam sayın Doç. Dr. Servet SOYGÜDER 'in yönetiminde hazırlanmıştır. Bana bu olanağı sağladığı için ve çalışmam boyunca esirgemediği ilgi ve desteği için kendisine teşekkür ederim.

Tayfun ABUT

ELAZIĞ – 2015

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET	V
SUMMARY.....	VII
ŞEKİLLER LİSTESİ	IX
TABLOLAR LİSTESİ	XIII
KISALTMALAR VE SEMBOLLER LİSTESİ	XIV
1. GİRİŞ	1
1.1. Çalışmanın Motivasyonu	1
1.2. Teleoperasyon Nedir?	2
1.3. Teleoperasyon Sisteminin Unsurları	2
1.4. Teleoperasyon Sistemlerinin Uygulama Alanları	4
1.5. Haptik Nedir?	5
1.6. Sanal Gerçeklik Nedir?	5
1.7. Literatüre Bakış	6
1.8. Teze Genel Bakış	10
2. MASTER ROBOT	12
2.1. Giriş	12
2.2. Kinematik Analiz	13
2.2.1. Düz kinematik analiz	14
2.2.2. Ters kinematik analiz	14
2.3. Jakobiyen Matrisi	16
2.4. Ters Jakobiyen Matrisi.....	16
2.5. Master Robotun Dinamik Denklemleri	17
3. SLAVE ROBOTLAR	20
3.1. Giriş	20
3.2. Kinematik Analiz	22
3.2.1. Düz kinematik analiz	24
3.2.2. Ters kinematik analiz	27
3.3. Jakobiyen Matrisi	28
3.3.1. Sanal slave robotun jakobiyen matrisi.....	29
3.3.2. Gerçek slave robotun jakobiyen matrisi.....	29
3.4. Ters Jakobiyen Matrisi.....	29
3.5. Sanal Slave Robotun Dinamik Denklemleri	30
4. GÖRSEL ARAYÜZÜN OLUŞTURULMASI.....	31
4.1. Giriş	31
4.2. Sanal Robot ve Görsel Ara Yüzün Oluşturulması.....	31
5. KONTROL TEORİSİ	34
5.1. Giriş	34
5.2. Tek Yönlü (Unilateral) Kontrol.....	34
5.3. İki Yönlü (Bilateral) Kontrol	35
5.4. PID (Proportional-Integral-Derivative) Kontrol	42

5.5.	Hesaplanmış Tork Kontrol Yöntemi (Computed Torque Control Method-CTC).....	45
5.6.	PD Tabanlı Hesaplanmış Tork Kontrol Yöntemi (Computed Torque Control Method).....	47
5.7.	PID Tabanlı Hesaplanmış Tork Kontrol Yöntemi (Computed Torque Control Method).....	50
5.7.1.	Routh-Hurwitz kriteri:	51
5.8.	Kendinden Uyarlamalı (Adaptive) Kontrol.....	54
5.8.1.	Kendinden uyarlamalı hesaplanmış tork kontrol yöntemi (adaptive computed torque control method)	56
6.	KUVVET KONTROLÜ	63
6.1.	Giriş	63
6.2.	Kuvvet Gerçekleme.....	64
6.3.	Empedans (Impedance) Kontrol	65
7.	TELEOPERASYON SİSTEMİNDE KULLANILAN ROBOTLARIN VE SİSTEMİN SİMULASYONU	67
7.1.	Giriş	67
7.2.	Phantom Omni Haptik Robotun PID İle Denetimi	67
7.3.	6 Serbestlik Dereceli Slave Robotun PD Tabanlı Hesaplanmış Tork Methodu (CTC) İle Denetimi	74
7.4.	Master-PID ve Slave-PD-CTC ile Robotun Denetimi	80
7.5.	Master-PID ve Slave-Adaptif PD-CTC ile Robotun Denetimi	83
8.	DENEYSEL SONUÇLAR.....	87
8.1.	Giriş	87
8.2.	Sistemin Kurulumu.....	87
8.3.	DeneySEL Çalışmalar 1.....	92
8.3.1.	Düz kinematik analiz	92
8.3.2.	Ters kinematik analiz	94
8.3.3.	Jakobiyen matrisi	966
8.3.4.	Yörünge takibi.....	100
8.4.	DeneySEL Çalışmalar 2.....	103
8.4.1.	Giriş	103
8.4.2.	Phantom omni haptik robot(master) ile sanal robotun (virtual slave) hareket kontrolü.....	104
8.4.3.	Master robot ile gerçek slave ve sanal slave (real master-virtual slave-real slave) robotun hareket kontrolü	109
8.4.4.	Master robot ile sanal slave robotun iki yönlü konum ve kuvvet kontrolü.....	114
9.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	117
9.1.	Sonuçlar	117
9.2.	Öneriler	118
	KAYNAKLAR.....	119
	EKLER	119
	ÖZGEÇMİŞ	155

ÖZET

Teleoperasyon, insanları bilinmeyen ortamlardaki görevlere hazırlama ve geliştirme olanağı sağlayan bir robot teknolojisidir. Teleoperasyon sistemleri insanların erişemediği noktalarda ya da insan güvenliğinin olmadığı ortam hakkında bilgi edinilmesi ve gereken verilerin toplanması için kullanılmaktadır. Bir diğer teleoperasyon tanımı ise robotların eylemlerinin bir kullanıcı tarafından uzaktan kontrol edilmesi anlamını taşımaktadır. Haptik sistemlerin gelişimiyle robotlar hissetme ve hissettirme gibi özelliklere kavuşmuşlardır. Günümüzde haptik, sanal veya gerçek ortamlardaki dokunmayla ilgili bilimin adı halini almıştır. Haptik manipülatörler ve arayüzler kuvveti hissetmemize yarayan, sanal ortamdaki cisimlere dokunma, onları hissetme, kontrol etme ve düzenlemeye imkân veren sistemlerdir. Bu tezin hedeflerinden biri sanal ve gerçek zamanlı robotların tele operasyonunu gerçekleştirmektir. Bu kapsamda Phantom Omni haptik 6 serbestlik dereceli cihaz kullanılarak 6 serbestlik dereceli endüstriyel robotun 3 serbestlik dereceli sanal modeli ile etkileşim sağlayabilen bir arayüz geliştirilmiştir. Kullanıcı haptik arayüz noktasını hareketlendirerek sistem için pozisyon, hız ve ivme girdisi oluşturmaktadır. Geliştirilen algoritma ile bu girdiler kullanarak kullanıcıya geri besleme olarak kuvvet ve sanal robotun görsel hareketi elde edilmektedir. Kuvvet geri beslemesi endüstriyel robotun oluşturulan dinamik modeli aracılığı ile hesaplanmaktadır. Sanal robot hareketlerinin kullanıcıya görsel geri besleme olarak sağlanması için bir görsel arayüz tasarlanmıştır. Tasarlanan görsel arayüz, içerisinde endüstriyel robotun katı modelinin konumlandığı sanal bir ortamı göstermektedir. Oluşturulan sanal ortam ve görsel arayüz Matlab paket programı kullanılarak geliştirilmiştir. Sanal endüstriyel robotun gerçek boyutları fabrika üretim tesislerinden elde edilerek CAD modeli katı modelleme paket programında oluşturulmuş ve sanal ortam oluşturmak için Matlab paket programında bulunan sanal gerçeklik araç kutusu (VR) kullanılmıştır. Phantom Omni haptik robot ve sanal 6 serbestlik dereceli endüstriyel robot için kinematik, ters kinematik, dinamik ve ters dinamik modelleri elde edilmiş ve gerçek-sanal robotların kontrolünde PD ve PID tabanlı ileri beslemeli hesaplanmış tork kontrol yöntemleri gerçek ve benzetim ortamında gerçekleştirilmiştir.

Bu tezin hedeflerinden ikincisi gerçek ve sanal robotlar arasında tek yönlü(unilateral) hareket kontrolünü gerçekleştirmektir. Bu kapsamda 3 serbestlik dereceli robot kol için kinematik, ters kinematik ve jakobiyen matrisleri elde edilmiştir. Bu kısımda Phantom Omni haptik robot ile sanal endüstriyel robot ve 3 serbestlik dereceli robot kol ile hareket kontrolü gerçekleştirilmiş ve sonuçları irdelenmiştir. Hedeflenen çalışmalardan üçüncüsü olan sanal robot ve teleoperasyon ile iki yönlü (bilateral) kuvvet ve hareket kontrolünde PID ve kendinden uyarlamalı (adaptive) hesaplanmış tork kontrol yöntemi ile gerçekleştirilmiş, benzetim ve gerçek ortamda uygulanmış, sonuçları irdelenmiştir. Sonuçlar grafiksel olarak elde edilmiş ve değerler tablolar haline getirilerek irdelenmiştir. Sonuç olarak, denetim algoritmalarının performansları dikkate alındığında kendinden uyarlamalı hesaplanmış tork (Adaptive Based –CTC) denetim algoritmasının kullanılan denetim algoritmalarından daha iyi bir performans elde edildiği ve uygulanabilir oldukları görülmüştür. Bu tez kapsamında geliştirilen programlar, sanal robot ve haptik cihaz hakkında gelecekteki çalışmalar için kullanılabilir.

Anahtar Kelimeler: Phantom Omni Haptik Robot, Teleoperasyon, Sanal Endüstriyel Robot, Tek Yönlü Kontrol, İki Yönlü Kontrol, Haptik, Hesaplanmış Tork Kontrol, Kendinden Uyarlamalı (Adaptive) Hesaplanmış Tork Denetim Algoritması

SUMMARY

Dynamic of System and Teleoperation with Six Degree of Freedom Haptic Robot

Teleoperation is a robot technology that prepares and enables developing humans to duties in the unknown environments. Teleoperation systems have been used to acquire information about the insecure environment for human or locations unreached by the human and gather required data. Another definition of teleoperation refers to remote control of robot actions by a user. Robots attain features such as feeling and making it feel with the development of the haptic system. Today, haptic becomes the science of touching in cyber or real environments. Haptic manipulators and interfaces are the systems that enable touching, feeling, controlling and regulating the objects in the cyber environment and feel the power. One of the objectives of this thesis is to carry out the teleoperation of the cyber and real time robots. In this scope, an interface that communicates with the cyber model of 3 degree of freedom of industrial robot with 6 degree of freedom by using 6 degree of freedom device of Phantom Omni haptic. The user forms position, speed and momentum input for system by mobilizing the haptic interface point.

The power and visual movement of cyber robot have been acquired as a feedback for the user by using these inputs with developed algorithms. Power feedback is calculated with dynamic model formed with industrial robot. A visual interface has been designed to provide user with movement of cyber robot as a visual feedback. The visual interface designed shows a cyber environment where solid model of industrial robot locates within. Cyber environment and visual interface have been developed by using Matlab package program. The real size of the cyber industrial robot has been formed in the CAD model solid modeling package program by obtaining from the factory production facilities and virtual reality tool box (VR) has been used that is found in the Matlab package program to create cyber environment. Kinematic, reverse kinematic, dynamic and reverse dynamic models have been obtained for cyber 6 degree of freedom industrial robot and Phantom Omni haptic robot and torque control methods calculated as feed-forward based on PD and PID for the real-cyber robot control have been controlled in the real and simulation environment.

The second objective of this thesis is to carry out unilateral movement control between the real and cyber robots. In this sense, kinematic, reverse kinematic and Jacobian matrix have been obtained for 3 degree of freedom robotic arm. In this section, movement control has been carried out with 3 degree of robotic arm and cyber industrial robot with Phantom Omni haptic robot and results have been examined. Cyber robot and teleoperation and bilateral power and PID in movement control that are the third objective of the study have been carried out with torque control method calculated adaptively and implemented in simulation and real environment and the results are examined. The results are obtained in graphical sense and values are shown in tables. As a result, when the performance of control algorithms are considered, control algorithms of Adaptive Based-CTC has a better performance and applicability. The programs developed in the scope of this thesis can be used for future studies about the cyber robot and haptic device.

Keywords: Phantom Omni Haptic Robot, Teleoperation, Virtual Industrial Robot, Unilateral Control, Bilateral Control, Haptic, Computed Torque Control (CTC), Adaptive Based Computed Torque Control(Adaptive Based –CTC)

ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. Bir teleoperasyon sisteminin unsurları	3
Şekil 1.2. İlk oluşturulan Master-Slave Sistem [25].....	6
Şekil 1.3. IOMaster7D Haptik Cihazı[53].....	8
Şekil 1.4. Teleoperasyon Uygulaması	9
Şekil 1.5. Encounter Tür Master-Slave El Etkileşimi[54].....	9
Şekil 1.6. Nesne Algılama	10
Şekil 2.1. Phantom Omni Haptik robotun şekli.....	12
Şekil 2.2. Phantom Omni Haptik robotun serbest cisim diyagramı	14
Şekil 2.3. Phantom Omni Haptik robot için ters kinematik şekli	15
Şekil 3.1. ABB firması tarafından üretilen IRB140 modeli [90].....	21
Şekil 3.2. IRB140 modelinin 6 serbestlik derecesi [93]	21
Şekil 3.3. 3 serbestlik dereceli robot kol	21
Şekil 3.4. Standart bir Denavit-Hartenberg parametreleri.....	22
Şekil 3.5. IRB140 modeli robotun serbest cisim diyagramı.....	25
Şekil 3.6. 3 serbestlik dereceli robotun serbest cisim diyagramı.....	27
Şekil 4.1. Solidworks programında oluşturulan robot.....	32
Şekil 4.2. Sanal gerçeklik araç kutusu kullanılarak oluşturulan sanal ortam	33
Şekil 5.1. Tek yönlü (unilateral) teleoperasyon sisteminin blok diyagramı	34
Şekil 5.2. İki yönlü (bilateral) teleoperasyon sisteminin blok diyagramı.....	35
Şekil 5.3. PID geri beslemeli sistem.....	43
Şekil 5.4. Sürekli salınım süresi (Saniye cinsinden)	44
Şekil 5.5. PD kontrol akış şeması.....	48
Şekil 5.6. PD kontrol hata grafiği.....	50
Şekil 5.7. PID kontrol modeli.....	533
Şekil 5.8. $K_i=12000$ hata grafiği	53
Şekil 5.9. $K_d=30$ hata grafiği	534
Şekil 5.10. $K_p=400$ hata grafiği	534
Şekil 5.11. Adaptif sistemin kontrol blok diyagramı	61

Şekil 6.1. Master Robot ile duvar arasındaki sanal kütle-yay-damper sistemi.....	65
Şekil 6.2. Master ve Slave robotların mekaniksel modeli	66
Şekil 7.1. Master robotun sinüs girişine karşı konum grafiği.....	67
Şekil 7.2. Master robotun sinüs girişine karşı konum hata grafiği	68
Şekil 7.3. Master robotun sinüs girişine karşı hız sonuçları	68
Şekil 7.4. Master robotun sinüs girişine karşı hız hata grafiği	69
Şekil 7.5. Master robotun sinüs girişine karşı ivme grafiği.....	69
Şekil 7.6. Master robotun sinüs girişine karşı ivme hata grafiği	70
Şekil 7.7. Master robotun random girişine karşı konum sonuçları grafiği	71
Şekil 7.8. Master robotun random girişine karşı konum hata grafiği	73
Şekil 7.9. Master robotun random girişine karşı hız sonuçları grafiği	73
Şekil 7.10. Master robotun random girişine karşı hız hata grafiği	73
Şekil 7.11. Master robotun random girişine karşı ivme sonuçları grafiği	73
Şekil 7.12. Master robotun random girişine karşı ivme hata grafiği	73
Şekil 7.13. Slave robotun sinüs girişine karşı konum grafiği.....	754
Şekil 7.14. Slave robotun sinüs girişine karşı konum hata grafiği	754
Şekil 7.15. Slave robotun sinüs girişine karşı hız grafiği	775
Şekil 7.16. Slave robotun sinüs girişine karşı hız hata grafiği	775
Şekil 7.17. Slave robotun sinüs girişine karşı ivme grafiği	776
Şekil 7.18. Slave robotun sinüs girişine karşı ivme hata grafiği	776
Şekil 7.19. Slave robotun random girişine karşı konum sonuçları grafiği	77
Şekil 7.20. Slave robotun random girişine karşı konum hata grafiği	77
Şekil 7.21. Slave robotun random girişine karşı hız sonuçları grafiği	778
Şekil 7.22. Slave robotun random girişine karşı hız hata grafiği	778
Şekil 7.23. Slave robotun random girişine karşı ivme sonuçları grafiği	779
Şekil 7.24. Slave robotun random girişine karşı ivme hata grafiği	779
Şekil 7.25. Master-Slave robotun sinüs girişine karşı konum sonuçları grafiği.....	80
Şekil 7.26. Master-Slave robotun sinüs girişine karşı konum hata grafiği.....	80
Şekil 7.27. Master-Slave robotun sinüs girişine karşı hız sonuçları grafiği.....	81
Şekil 7.28. Master-Slave robotun sinüs girişine karşı hız hata grafiği	801
Şekil 7.29. Master-Slave robotun random girişine karşı konum sonuçları grafiği.....	81
Şekil 7.30. Master-Slave robotun random girişine karşı konum hata grafiği.....	80

Şekil 7.31. Master-Slave robotun random girişine karşı hız sonuçları.....	83
Şekil 7.32. Master-Slave robotun random girişine karşı ivme sonuçları	83
Şekil 7.33. Master-Slave robotun kare girişine karşı konum sonuçları grafiği	84
Şekil 7.34. Master-Slave robotun kare girişine karşı konum hata grafiği	84
Şekil 7.35. Master-Slave robotun random girişine karşı konum sonuçları	85
Şekil 7.36. Master-Slave robotun sinüs girişine karşı konum sonuçları	85
Şekil 7.37. Master-Slave robotun sinüs girişine karşı konum hata grafiği.....	86
Şekil 8.1. Geomagic Touch Setup programı arayüzü.....	87
Şekil 8.2. Geomagic Touch Diagnostic Programı arayüzü	88
Şekil 8.3. 3 serbestlik dereceli robot kol	89
Şekil 8.4. HİTECH HS-645Mg servo motor	89
Şekil 8.5.Arduino Mega 2560 R3.....	89
Şekil 8.6. Arduino Mega 2560 R3 pinlerinin gösterimi	90
Şekil 8.7. Q8 USB data acquisition card (DAQ).....	92
Şekil 8.8.Deney düzeneği şekli	92
Şekil 8.9. Düz kinematik simulink modeli	93
Şekil 8.10. Deneysel olarak oluşturulan ters kinematik bloğu	94
Şekil 8.11. Oluşturulan ters kinematik ve düz kinematik model dosyası.....	95
Şekil 8.12 Modifiye edilmiş düz kinematik bloğu	96
Şekil 8.13.Modifiye edilmiş model dosyası	97
Şekil 8.14. Modifiye edilmiş model dosyası subsystem hali.....	97
Şekil 8.15. Lineer ve açısal hız model dosyası.....	97
Şekil 8.16. Ölçülen lineer V_x, V_y ve V_z hız sonuçları	98
Şekil 8.17. Jakobiyen matrisi kullanılarak hesaplanan V_x, V_y, V_z lineer hız sonuçları..	99
Şekil 8.18. Grafikler sırasıyla 1. 2.ve 3.ekleme ait açısal hız sonuçları	100
Şekil 8.19. Noktaların öğretilmesi için kullanılan akış şeması.....	1001
Şekil 8.20. 1.eklem için oluşturulan yörünge	101
Şekil 8.21. 2.eklem için oluşturulan yörünge	1012
Şekil 8.22. 3.eklem için oluşturulan yörünge	102
Şekil 8.23. Robotun uç efektör noktasının izlediği yörünge	102
Şekil 8.24. Çalışma uzayında 3B oluşturulan yörünge.....	1023
Şekil 8.25. Çalışma uzayında izlenen yörünge.....	103
Şekil 8.26. Phantom Omni haptik cihaz bloğu	1034

Şekil 8.27. Tek yönlü teleoperasyon sistemimizin unsurları.....	104
Şekil 8.28. Deney düzeneği fotoğrafları.....	105
Şekil 8.29. Teta1, teta 2 ve teta 3 için deney sonuçları	106
Şekil 8.30. Teta1, teta 2 ve teta 3 için hata grafikleri.....	106
Şekil 8.31. Teta1, teta 2 ve teta 3 için deney sonuçları	107
Şekil 8.32. Teta1, teta 2 ve teta 3 için hata grafikleri.....	107
Şekil 8.33. Teta1, teta 2 ve teta 3 için konum grafikleri	108
Şekil 8.34. Master-Slave robotun teta1, teta 2 ve teta 3 için konum deney sonuçları.....	108
Şekil 8.35. Master-Slave robotun teta1, teta 2 ve teta 3 için hız deney sonuçları.....	109
Şekil 8.36. Master-Slave robotun teta1, teta 2 ve teta 3 için ivme deney sonuçları.....	109
Şekil 8.37. Deney düzeneği R-S-R.....	110
Şekil 8.38. Kullandığımız iki yönlü (bilateral) teleoperasyon sisteminin blok diyagramı.....	111
Şekil 8.39. Teta1, teta 2 ve teta 3 için konum grafikleri	111
Şekil 8.40. Teta1, teta 2 ve teta 3 için hata grafikleri.....	112
Şekil 8.41. Teta1, teta 2 ve teta 3 için konum grafikleri	112
Şekil 8.42. Teta1, teta 2 ve teta 3 için konum grafikleri	113
Şekil 8.43. Teta1, teta 2 ve teta 3 için hata grafikleri.....	113
Şekil 8.44. Teta1, teta 2 ve teta 3 için deney sonuçları	114
Şekil 8.45. Fx, Fy ve Fz için deney sonuçları	114
Şekil 8.46. Teta1, teta 2 ve teta 3 için deney sonuçları	115
Şekil 8.47. Fx, Fy ve Fz için deney sonuçları	115
Şekil 8.48. Fx, Fy ve Fz için deney sonuçları	1156
Şekil 8.49. Fx, Fy ve Fz için deney sonuçları	1156

TABLolar LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. Phantom Omni haptik robotun teknik özellikleri.....	13
Tablo 3.1. Sanal slave robot modeli 6 eklem için D-H tablosu.....	26
Tablo 3.2. 3 serbestlik dereceli robot kol ilk 3eklem için D-H tablosu.....	27
Tablo 5.1. PID kontrol parametrelerinin sistem üzerindeki etkisi.....	43
Tablo 5.2. Ziegler-Nichols katsayı ayarlama kuralı Kcr kritik kazanç ve Pcr kritik periyot	44
Tablo 5.3. PID kontrol katsayıları	44
Tablo 5.4. Routh Tablosunu oluşturma	52
Tablo 8.1. Phantom Omni haptik robotun DH parametreleri	93
Tablo 8.2. Düz kinematik ile elde edilen değerleri.....	94
Tablo 8.3. Ters kinematik giriş değerleri	94
Tablo 8.4. Ters kinematik sonuç değerleri	96

KISALTMALAR VE SEMBOLLER LİSTESİ

P	:	Oransal Kazanç
I	:	İntegral Kazanç
D	:	Türevsel Kazanç
PD	:	Oransal- Türevsel Kazanç
PID	:	Oransal- İntegral- Türevsel Kazanç
DH	:	Denavit-Hartenbeng
CTC	:	Hesaplanmış Tork Kontrol
Kp	:	Oransal kontrol katsayısı
Kd	:	Türevsel kontrol katsayısı
Ki	:	İntegral kontrol katsayısı
Pcr	:	Sistemin çıkış salınımının her bir periyodunu
Kcr	:	Salınımın en yüksek kazancı
$M(\theta)$:	Dinamik denklemlerin kütle matrisi
$C(\theta)$:	Coriolis ve merkezkaç kuvveti matrisi
$D(\theta)$:	Dinamik denklemlerin sönüm katsayı matrisleri
$N(\theta)$:	Dinamik denklemlerin ağırlık kuvvetleri matrisleri
F_{fc}	:	Robota etki eden kuru sürtünme katsayısı
e	:	Hata
\dot{e}	:	Hatanın değişimi
F_{fv}	:	Robota etki eden viskoz sürtünme katsayısı
Q_f	:	Robota etki eden toplam kuvvetleri
Z_f	:	Signum işaret fonksiyonu matrisi
F_f	:	6 parametrelili vektör
L	:	Lagrange -Euler
T	:	Robotun toplam kinetik enerjisini
V	:	Robotun toplam potansiyel enerjisini
m	:	Robotların kütleleri
J	:	Robotların jakobiyen matrislerini
J^{-1}	:	Robotları ters jakobiyen matrisleri
$L_{1,2,3,4}$:	Robotun eklem boyları
I	:	Kütlesel atalet momenti ile temsil
$\theta_{1,2,3,4,5,6}$:	Robotların eklemlerinin açısal konumları
$\dot{\theta}_{1,2,3,4,5,6}$:	Robotların eklemlerinin açısal hızları
$\ddot{\theta}_{1,2,3,4,5,6}$:	Robotların eklemlerinin açısal ivmeleri
x_s	:	Slave robotun konum bilgisi
x_m	:	Master robotun konum bilgisi

τ_s	:	Slave robot için gerekli tork değeri
x_r	:	Kütle-yay-sönüm sisteminin referans konumu
u	:	Kontrol sinyali
f_h	:	Sensörden gelen kuvvet
τ_e	:	Robota etki eden çevresel torklar
τ	:	Robotlara etki eden torklar
q_d	:	İstenen yörünge
q	:	Gerçek yörünge
w	:	Bozucu fonksiyon
τ_m	:	Master robot için gerekli tork değeri
w_n	:	Doğal frekans
g	:	Yer çekim ivmesi
ζ	:	Sönümlenme oranı
k_r	:	Katılık terimi

1. GİRİŞ

Robot, yeniden programlanabilen, nesnelere, parçaları, aletleri programlanmış işe göre taşıyan ve işleyen makinelerdir [1]. Robotlar çeşitli amaçlarla çok farklı uygulama alanlarında kullanılabilirler. İnsanların kendilerine yardımcı bulma merakı sonunda meydana gelen robotlar, teknolojinin gelişimiyle insanın temel özelliklerine ve yeteneklerine sahip olmaya başlamıştır. Bu nedenle robotlar için çok çeşitli görevler tanımlanabilir. Bu karmaşık görevleri yerine getirebilmek için, robotların akıllı sistemler olmaları gerekmektedir. Robotları daha fazla akıllı hale getirebilmek sürekli olarak geliştirilebilir bir alandır ve bunu gerçekleştirmenin etkin yollarından biri robot algılarını geliştirmektir. Dış dünya ile temas kurma haptik duyu tanımının temelini oluşturmaktadır (Haptik terimi Türkçe 'de dokunsal olarak kullanılsa da, anlamını tam karşılamaması nedeniyle olduğu gibi kullanılmıştır). Davranış biçimleri çevreden gelen uyarıların bireyde oluşturduğu izlenimlerin sonucudur. Bu bağlamda robotik uygulamalarda haptik cihazlarda tek ve iki yönlü kuvvet ve tork geri besleme son zamanlarda robotik alanında aktif şekilde araştırılmakta ve çalışılmaktadır. Gerçek çalışmalar öncesinde sanal ortamda robotik uygulamalar geliştirmek güvenilir ve hızlı bir şekilde test etme olanağı sağlamaktadır. Sanal gerçeklik bu tür uygulamalar geliştirme ve test aşamasında olası zararları önleyebilmektedir. Bu çalışmanın amacı bir efendi-köle (master-slave) sistemi oluşturmaktır. Bu çalışmada master robot olarak Phantom Omni 6 DOF haptik cihaz kullanılmakta, slave robot olarak da sanal IRB 140 modeli ile 3 serbestlik dereceli robot kullanıldı. Haptik cihaz ile sanal slave robot ve 3 serbestlik dereceli robotun tek yönlü (unilateral) hareket kontrolü gerçekleştirildi. İkinci olarak haptik cihaz ile sanal slave robot arasında iki yönlü (bilateral) kuvvet ve konum kontrolü gerçekleştirildi.

1.1. Çalışmanın Motivasyonu

Haptik sistemlerin gelişimiyle robotlar hissetme ve hissettirme gibi özelliklere kavuşmuşlardır. Günümüzde haptik, sanal veya gerçek ortamlardaki dokunmayla ilgili bilimin adı haline almıştır. Haptik manipülatörler ve arayüzler kuvveti hissetmemize yarayan, sanal ortamdaki cisimlere dokunma, onları hissetme, kontrol etme ve düzenlemeye imkân veren sistemlerdir. Teleoperasyon sistemleri insanların erişemediği noktalarda ortam hakkında bilgi edinilmesi ve gereken verilerin toplanması çalışmalarında

kullanılmaktadır. Robotların, gerçek davranışlarının elde edilmesi amacıyla ilk olarak sanal ortamda benzetilmesi, gerçek robotlar ile yapılan deneyler esnasında oluşabilecek hasarların belirlenmesi ve algoritma geliştirme aşamalarında fark edilip önlenmesi açısından önem taşımaktadır.

Bu tezin hedeflerinden biri sanal ve gerçek zamanlı robotların tele operasyonunu gerçekleştirmektir. ABB firmasının IRB140 modelinin hareketlerini görselleştirmek için ve simule etmek için sanal ortam oluşturuldu. Bu programda sanal robot hareketlerinin kullanıcıya görsel geri besleme olarak sağlanması için bu görsel arayüz tasarlanmıştır. Bu çalışmanın bir diğer hedefi ise sanal robot, reel robot ve Phantom Omni haptik robot ile tek yönlü(unilateral) hareket kontrolü gerçekleştirilmiş ve sonuçları irdelenmiştir. Hedeflenen çalışmalardan biri olan sanal robot ve teleoperasyon ile iki yönlü (bilateral) kuvvet ve hareket kontrolü gerçekleştirilmiş, benzetim ve gerçek ortamda uygulanmış, sonuçları irdelenmiştir. Bu tez kapsamında geliştirilen programlar, sanal robot ve haptik cihaz hakkında gelecekteki çalışmalar için kullanılabilir.

1.2. Teleoperasyon Nedir?

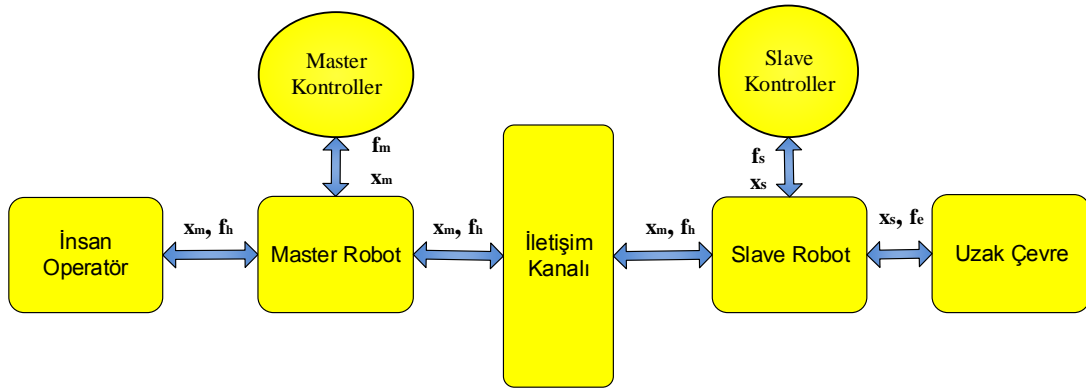
Teleoperasyon, insanları bilinmeyen ortamlardaki görevlere hazırlama ve geliştirme olanağı sağlayan bir robot teknolojisidir. Teleoperasyon sistemleri insanların erişemediği noktalarda ya da insan güvenliğinin olmadığı ortam hakkında bilgi edinilmesi ve gereken verilerin toplanması için kullanılmaktadır. Operatör için bağlantı güçleri türettiklerinde “haptik teleoperasyon” adını alırlar. Bir diğer teleoperasyon tanımı ise robotların eylemlerinin bir kullanıcı tarafından uzaktan kontrol edilmesi anlamını taşımaktadır. Tele-robotik uygulamalarında yapılacak işlem, tele-operatör tarafından belirlenir ve uzaktan kontrol sistemi ile robota aktarılır. Giriş için bir kumanda kolu (joystick) , direksiyon veya robot kullanılarak kontrol edilir. Bu giriş cihazlarına ana aygıt(master) veya ana kontrolör olarak adlandırılır. Ana aygıt (master) tarafından belirli bir görevi gerçekleştirmek için kullanılan uzaktaki cihaz veya robot köle (slave) olarak adlandırılır.

1.3. Teleoperasyon Sisteminin Unsurları

Bir teleoperasyon sistemi genellikle şu beş unsurdan oluşmaktadır: 1) Operatör olarak insan, 2) Operatör tarafından kullanılan bir robot ya da joystick (master), 3) İletişim kanalı, 4) Uzaktaki robot (slave) ve 5) Çevre (Şekil 2). Pozisyon, hız veya kuvvet bilgileri

master ve slave sistemler arasında iletişim kanalı yoluyla paylaşılmaktadır. Master tarafında kullanılan cihazların üzerlerine monte edilen kamera sayesinde geri dönüşüm alınır. Sonraki görevi ise çevresel birimlerden daha çok veri toplamasıdır. Monitörü robot gözü gibi düşünebiliriz. Kameralar vasıtası ile robotun ulaştığı yerlerin görüntüsü alınır ve bu görüntü bilgileri işlenerek ortam hakkında istatistiksel veriler elde edilir. Ulaşılan yerlerin üç boyutlu şekli çıkartılır. Ortam hakkında bilgi toplanmış olup toplanan veriler değerlendirilir.

Standart bir teleoperasyon sisteminde pozisyon ya da hız gibi referans sinyalleri master tarafında üretilir ve iletişim kanalı yoluyla slave tarafına gönderilir. Slave robotun çevreyle etkileşimi sonucunda slave tarafında üretilen kuvvet bilgisi ise iletişim kanalından master tarafına yollanır. Böylece operatör, çevrenin uyguladığı kuvveti sanki slave tarafındaymış gibi hisseder (telepresence).



Şekil 1.1. Bir teleoperasyon sisteminin unsurları

Paylaşılan sinyallere (pozisyon, hız, kuvvet) göre değişen çeşitli teleoperasyon kontrol mimarileri literatürde mevcuttur. Bunların bazılarında master'ın hızı slave tarafına gönderilirken, slave tarafında ölçülen kuvvet master tarafına gönderilmektedir. Kullanıcıda, robot üzerinden gelen verileri algılayarak bir sonraki eylemine karar verir ve robotu o doğrultuda kontrol etmeye devam eder. Bir başka deyişle, uzakta bulunan kullanıcı, robotun hissiyatına sahip olur ve algılanan verilere göre robot sistemini kontrol eder. Teleoperasyon uygulamalarında, kullanıcı kontrol ettiği düzeneğin bir sonraki eylemini komuta edebilmesi için uzaktaki düzeneğe ait çevresel faktörleri doğru bir şekilde algılanmalı ve hissetmelidir. Bu sebepten ötürü, teleoperasyon uygulamalarında görüntü, ses, sıcaklık, kuvvet, basınç ve denge gibi değişkenler robot üzerine yerleştirilmiş algılayıcılar ile kullanıcı tarafına iletilmektedir.

1.4. Teleoperasyon Sistemlerinin Uygulama Alanları

Teleoperasyon sistemleri birçok uygulama alanında kullanılmaktadır. İnsan hâkimiyeti uzayda arttıkça uygulamaların gerçekleştirilmesi için robotlara daha çok ihtiyaç duyulmuştur. Tele-operatör sistemler kullanılarak insan çalışması zor olan ve verilerin toplanması gereken uzay çalışmalarında yararlanılır.

Teleoperasyon sistemleri tıp alanında hizmet verme yeteneğine sahiptir. Cerrahlık gibi yüksek seviyede kabiliyet gerektiren ve tehlike içeren mesleklere hazırlıkta benzetim içeren teleoperasyon sistemleri eğitim amaçlı olarak kullanılabilirler [2]. Çeşitli sebeplerle bazı uzuvlarının hareket yeteneğini kaybetmiş hastalar için rehabilitasyon sırasında kondisyonlarına yardımcı olması için kullanılmaktadır [3]. Buradaki kullanım amacı sadece tanı bırakmak değil aynı zamanda cerrahların ameliyatlar öncesinde hareket kabiliyetlerini gerçekleştirmektir. Teleoperasyon sistemleri doktorların bulunmadığı yerlerde doktorlara buldukları yerden sistem sayesinde ameliyat yapma olanağı sağlamaktadır. Doktor komutları master cihaz ile uzakta bulunan slave cihaza iletişim kanalı aracılığıyla iletilir. Doktor ise bir bilgisayar yardımıyla video ve ses şeklinde geribildirim alır ve aynı zamanda master robot yardımıyla da kuvvet geri beslenmektedir.

Uzaktan sualtı seri manipülatörleri ve insanları ulaşamadığı insansız sualtı araçlarının (UUV) kullanımında bilim adamları ve mühendisler tarafından kullanılmaktadır. Sualtı aracı kablosuz haberleşme aracılığıyla master robota bir bilgisayar ile bağlanır. Bu araçlar vasıtasıyla deniz toprak örnekleri, derin deniz yaşamı, su sıcaklığı, tuzluluk ve yeni canlı türleri gibi değişen şeyler hakkında her türlü veri toplamak için kullanılır.

Gerçek koşullarda eğitim pahalı veya tehlikeli olduğundan askeri eğitim simülasyonlarında kullanılmaktadır. Ayrıca teleoperasyon sistemleri pilot eğitimi için uçuş simülatörleri olarak da kullanılmaktadırlar. Ayrıca son zamanlarda meydana gelen nükleer santral sızıntılarında ve ham petrol sızıntılarının sualtı araçlarınının manipülasyonu içinde kullanılmaktadır. Özetle kullanım alanlarından bazıları nükleer santraller, su altı çalışmaları, uzay çalışmaları, medikal çalışmalar, robotik cerrahi, eğitim ve askeri uygulamalar vb. bunlardan bazılarıdır.

1.5. Haptik Nedir?

Haptik kelimesi dokunma yoluyla doğal veya yapay mekanik ortamı hissetme yeteneği anlamına gelir. Haptik, dokunma duyusuyla ilgili Yunanca kökenli bir terimdir. Günümüzde haptik, sanal veya gerçek ortamlardaki dokunmayla ilgili bilimin adı haline almıştır. Haptik manipulatörler ve ara yüzeyler kuvveti hissetmemize yarayan, sanal ortamdaki cisimlere dokunma, onları hissetme, kontrol etme ve düzenlemeye imkân veren sistemlerdir. Haptik arabirimler insan ve makine iletişimini dokunma yoluyla mümkün kılar ve çoğunlukla bunu kullanıcının hareketlerine karşılık olarak yapar. Haptik arabirimler, insanın hareket ve dokunma kanallarını uyaran mekanik sinyaller üretirler, ayrıca insanlara onların ortamında hareket etme imkanı sağlarlar[4].

Haptik teknolojisi, uzaktan kontrollü sistemlerde ya da sanal gerçeklik uygulamalarında geniş bulan, kullanıcıda dokunma hissi uyandırmayı amaçlayan çalışmaları içermektedir. Haptik sistemler tıp, medikal, askeri uygulamalar, savunma sanayi, eğitim, oyun ve eğlence gibi birçok uygulama alanında kullanılmaktadır[5-20].

1.6. Sanal Gerçeklik Nedir?

Sanal gerçeklik, bilgisayar yardımıyla oluşturulan bir benzetim ortamında doğal etkileşimlerin elde edildiği dinamik bir kombinasyon teknolojisi olarak tanımlanmaktadır. Sanal gerçeklik, üç boyutlu ortamda oluşturulan gerçek dışı bir uzayda dolaşma ve yürüme olanaklarını sunmaktadır [21]. Bu ise tasarlanan sistemleri kavrama ve algılama gücümüzü önemli ölçüde arttırmaktadır. Sanal gerçeklik, bir teknolojiden ziyade bir tecrübe olarak, siber-uzaydaki görüntülerle karşılıklı ve etkileşimli bir iletişim şeklidir. Örneğin eğlence, savunma sanayi, medikal alandaki karmaşık bilimsel deneylere, mühendislik problemlerinde, eğitim ve öğretim alanları v.b. çok geniş bir sahada pek çok uygulama alanı bulmaktadır[22-28]. Şu ana kadar eğlence dünyasından, tıp alanındaki karmaşık bilimsel deneylere kadar pek çok uygulama alanı bulmuştur [29]. Sanal dünyalar, etkileşimli kontrolün temini ve objelerdeki değişimlerin yansıtılabilmesi için gerçek zamanda ya da gerçeğe yakın bir süratle görüntülenmelidir. Bunu gerçekleştirilebilmesi için güçlü görüntü işleyebilen bilgisayarlara gerek vardır. Fakat sanal ilk örnek oluşturmak gerçeğine göre daha ucuz olmasında dolayı kullanımlar hızla yaygınlaşmaktadır

1.7. Literatüre Bakış

Teleoperasyon insan ve bilgisayar etkileşimini sağlayan bir sistemdir. Birçok uygulama alanı olduğundan literatürde oldukça geniş bir yelpazeye sahiptir. Tele operatörler ile belirli bir uzaklıktan çalışmalar 1940 'lı yıllarda geliştirilmeye başlandı. Atom fiziğinde ilerlemeler sonucu uzaktan laboratuvar uygulamaları bir ihtiyaç doğurdu. Nükleer radyasyon, yüksek sıcaklıklar, kimyasallar uzaktan taşıma sistemlerinin geliştirilmesi konusunda önemli bir adım oluşturdu. Şekil 2.2'de gösterilen R.Goertz[30] başkanlığında Chicago yakınlarındaki Argonne National Laboratory Remote Control Division'da ilk küçük ölçekli master-slave mekanik manipülatör geliştirilmiştir. Goertz[31] tarafından 1950'lerde ilk master slave sistem geliştirilerek kuvvet geribildirimli elektrikli servo manipülatörler ile sağlanmaktadır.



Şekil 1.2. İlk oluşturulan Master-Slave Sistem [30]

İlk master-slave mekanik manipülatör geliştirildikten sonra araştırma çalışmaları bu yönde genişlemesine neden oldu. Teleoperasyon teknolojisi geliştikçe mekanik bağlantılar, elektrikli servolar ve kameralar vasıtasıyla uzaktan doğrudan görüntüleme gelişti.

Bilgisayar destekli teleoperasyon teknolojisi 1965-1970 li yıllarda robotik uygulamaları artırmak amacıyla artmıştır[32]. Teleoperasyon teknolojisinin gelişiminin ilk evrelerinde birincil uygulamalar toksin kimyasallar ve radyoaktif maddelerin taşınması, nükleer atık işleme ve işletmeden çıkarma alanlarıdır. İnsan operatörler, video görüntülerinin görsel yardımıyla ile sağlanan ve bir el kontrolörü ile robotu uzaktan kontrolünü sağlamanın yanı sıra görevi tamamlamak için kendisine etkin bir yardımcı bulmuş oldu. Denetimli kol fikri sinyalin gidiş ve dönüşte gecikme zamanı ile teleoperasyon cihazları sorgulanmaya başlandı[33-35]. Araştırmacılar tarafından çeşitli

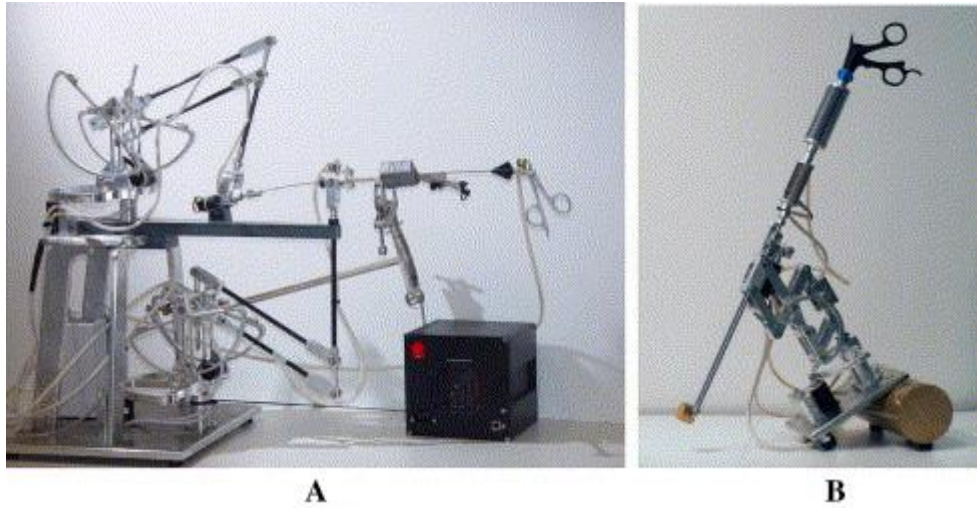
çalışmalar yapılmıştır. Sheridan [36]1989 yılında yararlı bir literatür çalışması sundu. Hokayem ve Spong 'da son zamanlarda yapılan çalışmalar hakkında bir literatür çalışması yayınladı[37].Çoğu teleoperasyon sistemleri çok hassas görevlerde uygulandığı için sistemin stabil olması önemli bir parametredir. Stabilite sonrası teleoperasyon sisteminin şeffaflığı önemlidir[38]. İki yönlü teleoperasyon sistemlerinin şeffaflığı[39]ayrı ortamlarda bulunan master ve slave taraflarının kuvvet ve pozisyon tepkilerinin denkliği olarak tanımlanmaktadır.

Katsura iki yönlü teleoperasyon sistemlerinde mükemmel şeffaflığın[40] mümkün olmadığını çalışmasında sunmaktadır. İletişim ağında zaman gecikmesi sistemin kararlılığı konusunda önemli bir sorun teşkil etmektedir. Son on yıl içinde teleoperasyon sistemlerinde zaman gecikmesi farklı yönleriyle araştırılmıştır. Zaman gecikmesi iki yönlü teleoperasyon sistemlerinde kararlılığı etkilediğini gösteren bir çalışmayı Anderson ve Spong [41] sunmuştur. Teleoperasyon sistemlerinde iki yönlü denetleyici tasarımları konusunda Yan ve Salcudean [42] tanıtan bir makale yazmıştır. Kikuchi ve arkadaşları [43] iletişimde zaman gecikmesi telafisi için değişen dinamik ortamda alternatif teleoperasyon sistemi önerdi. Zhu ve Salcudean [44] kuvvet ve hareket ölçeklendirme ile iki yönlü teleoperasyon sistemleri için kararlılık garantili yeni bir denetleyici tasarımı yayınladı. Ando ve arkadaşları [45] insan davranışı ve teleoperasyon sisteminde psikolojik zaman teorisine dayanan zaman gecikmesi arasındaki ilişkiyi bulmuştur. Görsel geribildirim zaman gecikmesi bir derece azalttı. Elhajj ve arkadaşları[46] zaman gecikmesi etkilerinin haptik geribildirim ile üstesinden gelebilecek olay tabanlı kontrol yöntemi geliştirdi.

Itoh ve arkadaşları[47] hareket ve kuvvet için sanal ortam modeli kullanılarak yeni bir öngörülü görüntüleme yöntemi geliştirdi. Önerilen yöntemin önemli katkısı tahmini hareketini sağlamak ve hatta kısıtlı alanda gerçek ortamda herhangi bir sanal modelini kullanmadan insan operatörünü bilgilendirmektir. Shahdi ve Sirouspour [48] bilinmeyen ortamlarda teleoperasyon sistemi için adaptif bir yöntem geliştirdi. Şeffaflığı geliştirmek ve zaman gecikmesi etkisini telafisi için Smith ve Van Hashtrudi-Zaad [49] Smith öngörülü sinir ağını kullanarak yeni bir yöntem tanıttı. IP ağları üzerinden teleoperasyon sistemlerinde kuvvet geribesleme sorununu Polushin ve arkadaşları [50] tarafından ele alınmaktadır.

Batı Avustralya Üniversitesi (University of Western Australia) 'de ilk web tabanlı tele robotik çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu tele robot sisteminde robot büyük ölçüde özerk çalışır fakat videolarla operatöre görsel geri besleme sağlanır.

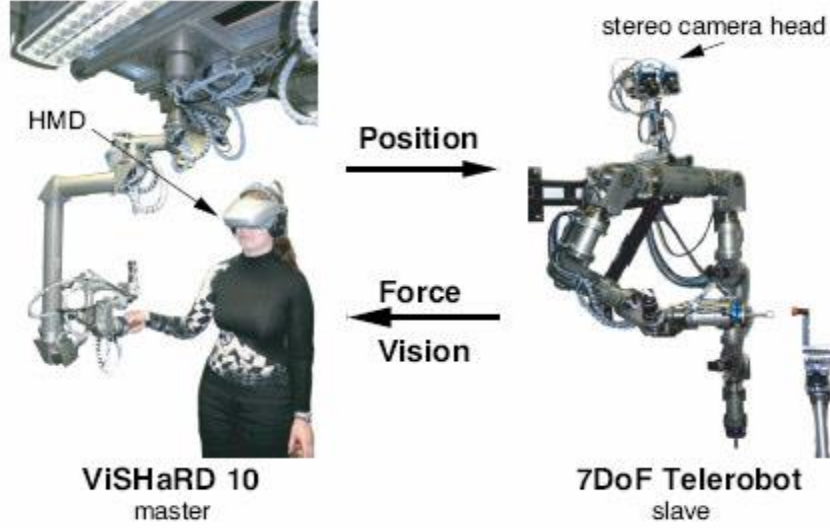
Böylece kararsızlık sorunu bir ölçüde denetim altına alınmış olur[51-52]. Puma Boya Projesi[53] internet tabanlı online ulaşılabilen bir projedir. Bu projede insanlar web tabanlı sanal tuval araçlığıyla resim yapabilmektedir. Benzer şekilde birçok proje [54] internet tabanlı kontrolör uygulanmıştır. JBIT projesi [55] kuvvet yansıtan kapalı döngü ile internetten uzaktan kumanda edilmektedir. Liu ve arkadaşları [56] yeni bir aktarım protokolü Trinomial Protokolü nü tanıtmışlardır. Bu protokol kabaca İletim Denetimi Protokolü (TCP) ve Kullanıcı Datagram Protokolü (UDP) kombinasyonu idi. Khamis ve arkadaşları [57] internet üzerinden uzaktan mobil etkileşimli denetim kontrol yöntemi kullanmışlardır. Cerrahi eğitimler haptik cihazlar için başka bir geniş uygulama alanıdır. Haptik arayüzler farklı tıbbi operasyonel benzetimlerde daha fazla kullanılıyor. Şekil 1.3' de verilen IOMaster7D ve IOMaster5D gibi yeni haptik cihazlar endoskopik nörocerrahisine, ENT cerrahisine ve laparoskopi benzetimine uygulamak için geliştirilmiştir [58].



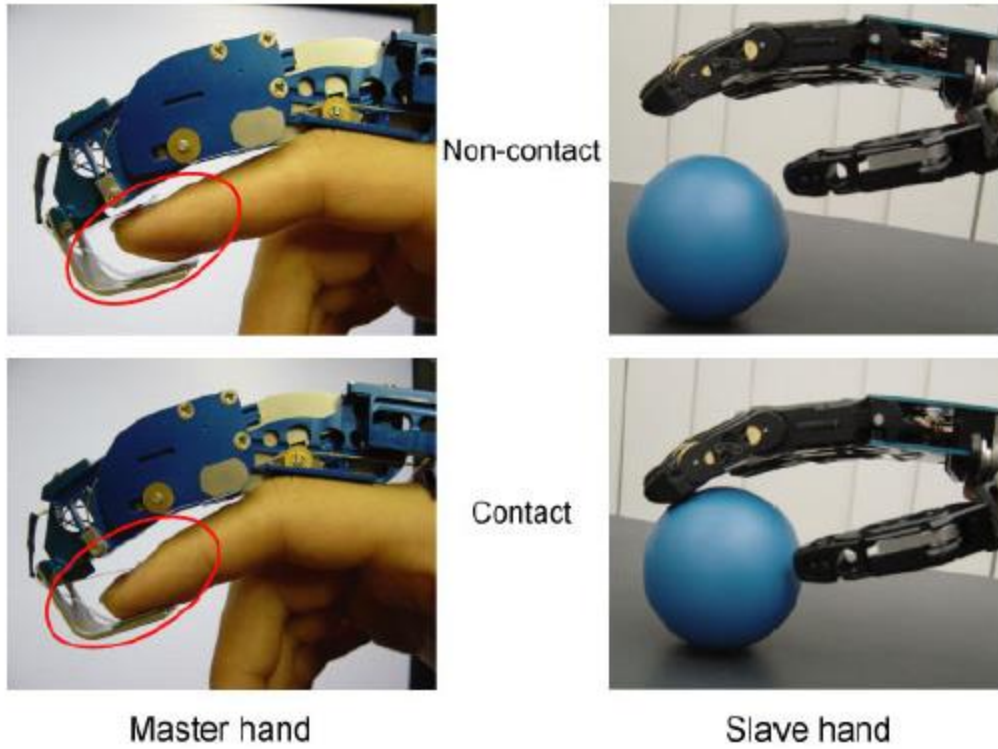
Şekil 1.3. IOMaster7D Haptik Cihazı[58]

Teleoperasyonlar çoğunlukla cerrahi işlemlere hizmet ettiklerinden dolayı önemli uygulamalardır. Bu işlemlerde, gerçek uzaktaki çevreyle sanal çevre yer değiştirir. Buna tehlikeli deneylerde ve bir operatör tarafından kontrol edilmesi gereken temas kuvveti içeren uygulamaların bir kaçında ihtiyaç duyulur. Şekil 1.4 'te bunun gibi bir uygulama

gösterilmiştir. ViSHARD10 master manipulatör olarak isimlendirilen 10 serbestlik dereceli haptik cihazdır. Slave robot ise 7 serbestlik dereceli ve uzaktadır.



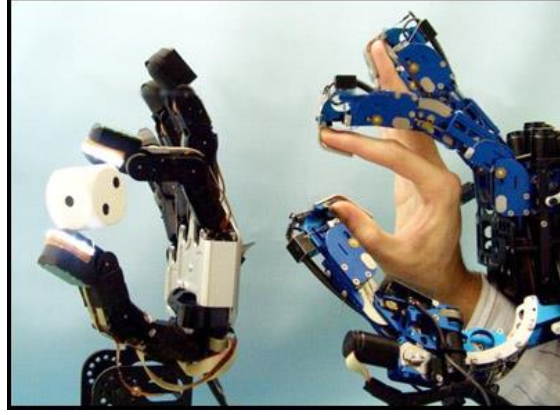
Şekil 1.4. Teleoperasyon Uygulaması



Şekil 1.5. Encounter Tür Master-Slave El Etkileşimi[59]

Şekil 1.5' de encounter tür haptik cihaz geliştirilmiştir. Bu örnekte kullanıcı master cihazına temas etmediği halde, slave cihazı kullanıcının hareketlerini algılamaktadır. Slave

el hiçbir şeyle temas etmediğinde kullanıcıya bu durum aktarılır. Slave el bir nesneyle temas ettiği zaman master cihazının parmakları operatörün parmağına direnç kuvvetini verir [59].



Şekil 1.6. Nesne Algılama[60]

Tokyo Üniversitesinde Katsunari Sato tarafından geliştirilmiştir. Haptic Telexistance haptik hissiyat olarak yüksek gerçeklik kazandırmıştır. Master-Slave yapı ile yapılmıştır. Parmak hareketleri ile sensör ile algılanmaktadır. İlki load sensör ile uygulanan basınç algılanır. İkincisi ise photo reflector sensörüdür. Reflektör algılayıcısı ile basınç yönü belirlenir [60]. Literatürde farklı çalışma başlıkları altında çeşitli çalışmalar mevcuttur[60-72].

Yapılan literatür taraması sonucunda ileri denetim algoritmalarının bir arada kullanıldığı ve karşılaştırıldığı çalışmalara az rastlanmıştır. Sonuç olarak, tezin literatüre katkısı hesaplanmış tork kontrol yöntemi ve adaptif (Adaptive) metotlarının bir arada kullanımı ve performansının başarılı olduğu tezde ortaya koymaktadır.

1.8. Teze Genel Bakış

Bölüm 1’de teleoperasyon nedir, kullanım alanları ve teleoperasyon sisteminin bileşenleri, haptik ve sanal gerçeklik hakkında genel bilgiler verildi. Geçmişten günümüze teleoperasyon, haptik ve sanal gerçeklik hakkında literatür çalışması verildi. Son bölümde ise tezin bölümleri tanıtıldı.

Bölüm 2’de Phantom Omni haptik robot hakkında genel bilgiler verildi. Haptik (master) robotun kullanıldığı literatür kısmı ve robotun kinematik ve dinamik analizi elde edildi. Kinematik analiz kısmında düz kinematik, ters kinematik, jakobiyen matrisi ve ters

jakobiyen matrisi hesaplandı. Dinamik analiz kısmında ise robotun Lagrange-Euler yöntemi kullanılarak sistemin hareket denklemleri elde edildi.

Bölüm 3’de altı serbestlik dereceli sanal slave IRB 140 modeli tanıtıldı. Robotun kullanıldığı alanlar ve literatür taraması yapıldı. Sanal slave robotun kinematik ve dinamik analizi gerçekleştirildi. Ayrıca bu kısımda 3 serbestlik dereceli robot kolun da kinematik analizi gerçekleştirildi.

Bölüm 4’de bu kısımda IRB 140 modeli için hazırlanan görsel arayüz tanıtılmış ve nasıl oluşturulduğu açıklanmıştır.

Bölüm 5’de ise Teleoperasyon sistemlerinde kullanılan kontrol yöntemleri tanıtıldı. Daha sonra sistemin kontrolünde kullanılan tek yönlü (unilateral) ve iki yönlü (bilateral) kontrol yöntemleri açıklandı. PD, PID, hesaplanmış tork kontrol yöntemi ve adaptif hesaplanmış tork kontrol yöntemi açıklandı ve sisteme uyarlanması gösterildi.

Bölüm 6’de kuvvet oluşturma yöntemleri ve kuvvet kontrol yöntemleri açıklandı.

Bölüm 7’de bölüm 2 ve bölüm 3’ de kinematik ve dinamik denklemleri çıkartılmış olan master ve slave robotların sayısal benzetim sonuçları grafiklerle gösterilmiştir. Bölüm 5’de ifade edilen kontrol yöntemlerinin sisteme uygulanması sonucu elde edilen veriler grafiklerle verildi.

Bölüm 8’de deneysel olarak parametre tanımlama çalışmaları ile teleoperasyon çalışmaları verilmiş ve sonuçları irdelenmiştir. Bu kısımda öncelikle deney düzeneğinin kurulumu ve kullanılan kartlar tanıtıldı. Phantom Omni haptik robotun deneysel olarak düz kinematik, ters kinematik, jakobiyen matrisi ve yörünge oluşturulması uygulamaları açıklandı ve sonuçları irdelendi.

Bölüm 9’da bu bölümde, tek yönlü hareket kontrolü ile iki yönlü kuvvet ve konum kontrolü verilmiş ve sonuçları grafiklerle gösterildi ve elde edilen sonuçlar tartışıldı.

Bölüm 10’da son olarak elde edilen sonuçlar doğrultusunda önerilerde bulunularak, gelecekte yapılması düşünülen çalışmalara değinildi.

2. MASTER ROBOT

2.1. Giriş

Sistemimizin ana denetleyicisi olarak görev yapan Phantom Omni haptik robot SensAble Teknolojileri tarafından üretilen dokunsal cihazlardan biridir. Phantom dokunsal arayüzler, geniş çalışma alanı, düşük atalet uygulamaları, düşük sürtünme ve hassas pozisyon özellikleri ile yaygın kullanım alanına sahiptir[73]. Bu cihaz Sensable teknolojileri şirketi tarafından geliştirilerek ve piyasaya sürülen ilk dokunsal cihazlardan biridir. Phantom arayüzlü cihazın küçük boyutu, nisbeten düşük maliyeti ve dokunsal bilginin basitleştirilerek sunulması özellikleri tercih edilmesinin sebeplerindedir. Phantom dokunsal ve tele robotik[74-76] uygulamalarında yaygın olarak kullanılmasına rağmen haptik arayüz ve yazılımları üstüne çalışmalar sürmektedir. Robotun tam olarak işlevsel doğru bir dinamik modeli üzerinde çalışmalar devam etmektedir[77]. Simülasyon, kontrol, iletişim kayıpları giderilmesi amaçlı kullanımlarda dinamik model tasarımı ve dinamik parametrelerin doğru belirlenmesi gerektirir. Robotik manipülatörlerin dinamik model parametrelerinin tanımlama çalışmaları üzerine çeşitli araştırmacılar[73, 76, 78-82] tarafından incelenmiştir. PHANTOM Omni elektromekanik haptik cihaz birçok uygulama alanında kullanılmaktadır. Örneğin rehabilitasyon, tele-robotik, teleoperasyon, eğlence, robotik cerrahi vb. uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır[83-85]. Phantom Omni haptik cihaz 6 döner ekleme sahiptir fakat ilk 3 eklem aktif, 3 bilek eklemi ise pasiftir yani motorla tahrik edilmemektedir. Genellikle çalışmalarda sistemin ilk 3 serbestlik dereceli kullanılır fakat sistemde 6 adet kodlayıcı (encoder) vardır.



Şekil 2.1. Phantom Omni Haptik robotun şekli

Phantom Omni literatürde çok yaygın olarak kullanılan bir cihazdır. Veras ve arkadaşları [86] engelli hastalara günlük ihtiyaçlarında yardımcı olabilmek için kurduğu teleoperasyon sisteminde ana aygıt olarak Phantom Omni robotu ile yardımcı aygıt içinse

Puma 560 robot kol kullandı. Song ve arkadaşları [87] 6 serbestlik dereceli tele-rehabilitasyon sistemini kontrol etmek için ana aygıt olarak kullandı. Ayrıca Phantom omni robot hidrolik bir makinenin kontrolü için giriş cihazı olarak da kullanıldı. Hayn ve arkadaşları [88] bir ekskavatörde kontrol yöntemi geliştirmek için Omni robotu ana kontrolör olarak kullandı.

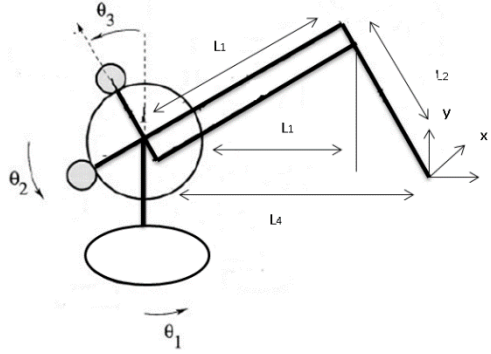
Tablo 2.1. Phantom Omni haptik robotun teknik özellikleri

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

2.2. Kinematik Analiz

Bir robotun analizinin yapılabilmesi için, önce robotun tabanına referans eksen takımı kabul edilen genel (global) bir kartezyen koordinat sistemi yerleştirilir. Sonra benzer şekilde her eklem ya da uzva birer eksen takımı yerleştirilir. Robotun konum ve yönlendiği, işte bu eklemlere yerleştirilen yerel koordinat sistemlerine göre bağıl konumları ile belirlenir. Kinematik analizlerin yapılabilmesi için koordinat sistemlerinin birbirleri ile ilişkisini belirleyen dönüşümlere homojen dönüşümler denir. Bu bölümde, cihaz için düz, ters kinematik ve jakobiyen matrisi hesaplamaları yapılmıştır.

2.2.1. Düz kinematik analiz



Şekil 2.2. Phantom Omni Haptik robotun serbest cisim diyagramı[89]

İleri kinematik, verilen eklem değişkenlerine göre robotun kartezyen uzayda nerede olduğunu belirleme işlemi olarak da tanımlanabilir. Düz kinematik için Denavit - Hartenberg yöntemi [90] kullanılmıştır. Bir sistemin belirli durumlarını göze alarak nasıl hareket ettiğini anlamak için bu sistemin kuvvet, atalet ve enerji gibi dinamik büyüklüklerini bilmemiz gerekir. Robotun ileri yön kinematiği (forward kinematics); robotu oluşturan linklerin konumları, hızları ve ivmeleri arasındaki ilişkiyle ilgilenir. Jarillo ve arkadaşları[91] ile Abut ve arkadaşları[92] Phantom Omni haptik robotun kinematiği ve uygulanabilirliği hakkında birer bildiri yayınladı. Eklem açıları bir noktada birleşmiş gibi;

$$x = \sin\theta_1(L_1 \cdot \cos\theta_2 + L_2 \sin\theta_3) \quad (2.1)$$

$$y = L_2 \cos\theta_3 + L_1 \sin\theta_2 \quad (2.2)$$

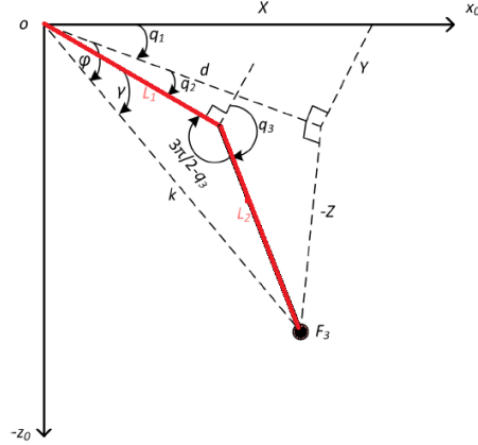
$$z = \cos\theta_1(L_1 \cos\theta_2 + L_2 \sin\theta_3) \quad (2.3)$$

Burada parametre uzunlukları $L_1=L_2=132$ mm, $L_3=25$ mm ve $L_4= 170$ mm 'dir.

2.2.2. Ters kinematik analiz

Ters kinematik (inverse kinematics) hesaplamaları robot kontrol işlemlerinde çok önemli bir yere sahiptir. Ters kinematik, uç işlevcisinin verilen konum ve yönelim verilerine göre eklem değişkenlerinin değerlerinin bulunması işlemidir.

Yani robot uç işlevcisinin istenilen konuma gitmesi için eklemlerin dönme, kayma miktarları gibi değerlerini belirlemek için ters kinematik sonuçlarını bulmamız gerekir. Ters kinematik çözümü aktüatörlerin eklem toraklarının hesaplanması, gerçek zamanlı kontrol ve yörünge planlaması gibi işlemlerde ön plana çıkmaktadır [93-94].



Şekil 2.3. Phantom Omni Haptik robot için ters kinematik şekli[95]

$$\theta_1 = -a \tan 2(y / x) \quad (2.4)$$

$$\theta_2 = \phi - \gamma \quad (2.5)$$

$$\theta_3 = \frac{3\pi}{2} - \cos^{-1}\left(\frac{L_1^2 + L_2^2 - k^2}{2L_1L_2}\right) \quad (2.6)$$

$$k = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (2.7)$$

$$\phi = \cos^{-1}\left(\frac{d}{k}\right), z \leq 0 \quad (2.8)$$

$$\phi = -\cos^{-1}\left(\frac{d}{k}\right), z > 0 \quad (2.9)$$

$$d = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (2.10)$$

$$\gamma = \sin^{-1}\left(\frac{L_2 \sin\left(\frac{3\pi}{2} - \theta_3\right)}{k}\right) \quad (2.11)$$

2.3. Jakobiyen Matrisi

Bu bölümde yalnızca robotun son pozisyonu ile değil, aynı zamanda hızı ile ilgilenilmiştir. Robotun belirlenmiş yönde, belirlenmiş bir hızda hareket edebilmesi için, her eklem hareketi koordineli olmalıdır.

Bilindiği üzere robotun pozisyonu ve dönmesi direk olarak eklemlerin hareketine bağlıdır. Bundan dolayı, eklem hareketini koordine etmek için eklem deplasmanları ile robotun pozisyonu arasındaki diferansiyel ilişkiyi denklem 2.12' de verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} v \\ w \end{bmatrix} = [J] \cdot q \quad (2.12)$$

$$J = \begin{bmatrix} l_1 \cos \theta_2 + l_2 \sin \theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & l_1 \cos (\theta_2 - \theta_3) & 0 \\ 0 & -l_1 \sin (\theta_2 - \theta_3) & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ \cos \theta_3 & 0 & 0 \\ \sin \theta_3 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{6 \times 3} \quad (2.13)$$

2.4. Ters Jakobiyen Matrisi

Ters jakobiyen matrisi lineer ve açısal hızların hesaplanmasına imkân sağlar. Her matrisin tersi alınamaz. Determinantı sıfıra eşit olan jakobiyen matrisine tekildir denir. Tekil noktalar robotun uzanabileceği en uzak noktalar ve yakın noktaları belirler. Jakobiyen matristen faydalanılarak çalışma uzayı belirlenebilir.

- Tekil Olması
- $\text{rank}(J) < \min\{6, n\}$, Jakobiyen Matris full rank değilse,
- Jakobiyenin tersi alınamaz.
- Sınır Tekillikliği: Tutucu uç çalışma uzayının dış zarfına değdiği zaman meydana gelir.

İç Tekillikler: Çalışma uzayının iç sınırına geldiği zaman oluşur. Bu durumlarda iki veya daha fazla eleman aynı doğrultu üzerinde olurlar. Bunlardan faydalanılarak çalışma uzayı belirlenebilir. $\text{Det}(J)=0$

Eğer J(Jakobiyen Matris) kare değilse, tersinin alınabilmesi için Pseudoinverse kullanılır. Örneğin ;

A matrisi mxn boyutlu matris ve A⁺ ise A'nın Pseudoinverse olsun. Eğer A full ranka sahip ise, A⁺ aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$A^+ = \begin{cases} A^T [AA^T]^{-1} & m \leq n \\ A^{-1} & m = n \\ [A^T A]^{-1} A^T & m \geq n \end{cases}$$

İspat: Eğer m≤n ise bu matrisin rankı m olur. Rank(A)=m. O halde mxm boyutlu AA^T matrisinin tersi alınabilir.

Eğer A⁺, A'nın tersi ise, AA⁺A=A olması gerekir.

$$AA^+A = A[A^T(AA^T)^{-1}]A = (AA^T)^{-1}AA^T A = A$$

Ters jakobiyen işleminde geleneksel matris tersi kullanılamaz o yüzden matrisin pseudoinverse alınır.

$$\dot{\theta} = J^{-1} * \dot{x} \quad (2.14)$$

$$J^{-1} = \frac{adj(J)}{\det(J)} \quad (2.15)$$

$$J^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{c_1}{L_1 * c_2 + L_2 * s_3} & 0 & \frac{-s_1}{L_1 * c_2 + L_2 * s_3} \\ \frac{s_1 * s_3}{L_1 * c_{2-3}} & \frac{c_3}{L_1 * c_{2-3}} & \frac{c_1 * s_3}{L_1 * c_{2-3}} \\ \frac{-c_2 * s_1}{L_2 * c_{2-3}} & \frac{c_3}{L_2 * c_{2-3}} & \frac{c_1 * c_2}{L_2 * c_{2-3}} \end{bmatrix}_{3 \times 3} \quad (2.16)$$

2.5. Master Robotun Dinamik Denklemleri

Bir robotun kontrolünde yüksek performanslı kontrolörler uygulamak için robotun dinamik denklemlerini elde etmek gerekir. Dinamik denklemlerinin çıkartılmasında hem

sistematik ve kolay olması hem de robot dinamik denklemlerinde çok yaygın kullanılması sebebiyle Lagrange -Euler (L-E)[96] metodu kullanılmıştır. Genel olarak Lagrange-Euler denklemi aşağıdaki formülle elde edilmiştir. Ek A'da sistemin tam dinamik denklemleri verilmiştir.

$$L = T - V \quad (2.17)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} + \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_i} = Q_i + \tau_i \quad (2.18)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^n F_j \frac{\delta p_j}{\delta q_i} \quad (2.19)$$

Tüm çevresel genelleştirilmiş kuvvetler F_j tarafından uygulanan kuvvetleridir. Q_f ise sisteme etki eden Coulumb ve viskoz sürtünme kuvvetlerinin içeren matristir. τ_i Genelleştirilmiş kuvvetler dışında yörünge takibi için gerekli motor torkunu ifade etmektedir. Phantom Omni haptik cihazın dinamik denklemleri aşağıda verilmiştir.

$$M(\theta) \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \end{bmatrix} + C(\dot{\theta}, \theta) \begin{bmatrix} \dot{\theta} \end{bmatrix} + N \begin{bmatrix} \dot{\theta} \end{bmatrix} = \tau + Q \quad (2.20)$$

Sistemin Coriolis matrisi $C(\dot{\theta}, \theta) \begin{bmatrix} \dot{\theta} \end{bmatrix}$, ifadesi Coriolis ve merkezkaç kuvvetlerini göstermektedir. Ayrıca sistemin genelleştirilmiş kuvvetleri vektör formunda aşağıdaki gibi ifade edilmektedir. $M(\theta)$ ise 3*3'lük pozitif tanımlı simetrik bir matris olup aynı zamanda sistemin atalet matrislerini de içermektedir. Matrisin sabitlerini m, L, J temsil etmekte sistemin değişkenleri yalnızca θ 'dır. Sistemin Coriolis matrisi, Coriolis ve merkezkaç kuvvetlerini göstermektedir. Burada $N(\theta)$ ise 3*3'lük bir matris olup ağırlık kuvvetlerinden oluşur ve matrisin değişkenleri yalnızca θ 'dır. F_f 6 parametrelilik vektörü ifade eder.

$$Q_f = F_{fc} \operatorname{sgn}(\dot{\theta}) + F_{fv} \dot{\theta} \quad (2.21)$$

$$Q_f = \begin{bmatrix} Q_{f1} \\ Q_{f2} \\ Q_{f3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{fc1} \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_1) + Q_{fv1} \dot{\theta}_1 \\ Q_{fc2} \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_2) + Q_{fv2} \dot{\theta}_2 \\ Q_{fc3} \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_3) + Q_{fv3} \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} = Z_f F_f \quad (2.22)$$

$$Z_f = \begin{pmatrix} \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_1) & 0 & 0 & \dot{\theta}_1 & 0 & 0 \\ 0 & \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_2) & 0 & 0 & \dot{\theta}_2 & 0 \\ 0 & 0 & \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_3) & 0 & 0 & \dot{\theta}_3 \end{pmatrix} \quad (2.23)$$

$$F_f = [F_{fc1} \quad F_{fc2} \quad F_{fc3} \quad F_{fv1} \quad F_{fv2} \quad F_{fv3}]^T \quad (2.24)$$

3. SLAVE ROBOTLAR

3.1. Giriş

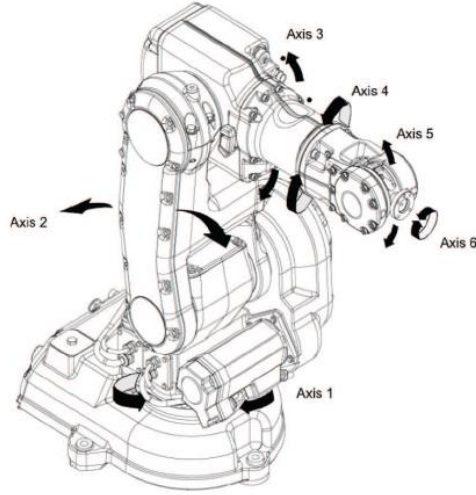
Amerikan Robot Enstitüsü, robot kavramını şu şekilde ifade etmektedir: "Robot, çeşitli görevlerin gerçekleştirilmesi için, nesne, parça, takım ya da değişken programlanmış hareketler aracılığıyla, özel parçaları hareket ettirmek amaçlı tasarlanmış, çok fonksiyonlu, yeniden programlanabilir manipülatördür." Endüstriyel robot, genel amaçlı, insana benzer özelliklere sahip programlanabilir bir makinedir. Bir robotun insana benzeyen en önemli özelliği onun koludur. Tutma ve yerleştirme işlemlerinde robot kolu kullanılır. Robot kolu, başka bir makineyle birleştirilerek, malzemenin yüklenmesi ve takım değiştirme işlemini yapmaktadır. Kesme, şekil verme, yüzey kaplama, silindirik ve düzlem yüzey taşlama gibi imalat işlemlerini gerçekleştirir. Montaj ve kontrol uygulamalarında kullanılmaktadır. Bugün sanayide insanın yeri günden güne azalmaktadır. Gelecekte üretim aşamasında insan unsuru büyük ölçüde azalacaktır. İnsanın yerini alacak olan ise kendi çalışma alanında programlanmış suni bir zekâyâ sahip makineler (robotlar) olacaktır.

Günümüzde robotlar uzay, tıp, otomotiv, tekstil, kimya, askeri ve benzeri birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Robot kullanmak artık bir keyfiyet olmaktan çok mecburiyet haline almıştır. Bugün bir uzay mekiğinde uyduyu yörüngeye yerleştirme, tıpta ilaçların hijyenik ortamda üretimi, otomotiv sektöründe montaj ve boyama işlemleri, tekstil sektöründe boyama, kesme ve dokuma işlemleri, askeri alanda mayın arama bomba imha ve benzeri gibi insan için riskli işler robotlar tarafından yapılmaktadır. İnsanoğlunun mars yüzeyinde evrenin geçmişine ait yaptığı bilimsel çalışmaların neredeyse tamamı robotlar tarafından yapılmaktadır. Gelecekte insan robot teknolojisi geliştirme, programlama ve bakımına zaman ayıracaktır. Çünkü üretim, hizmet, güvenlik sektörlerinde robotlar çalışacaktır.

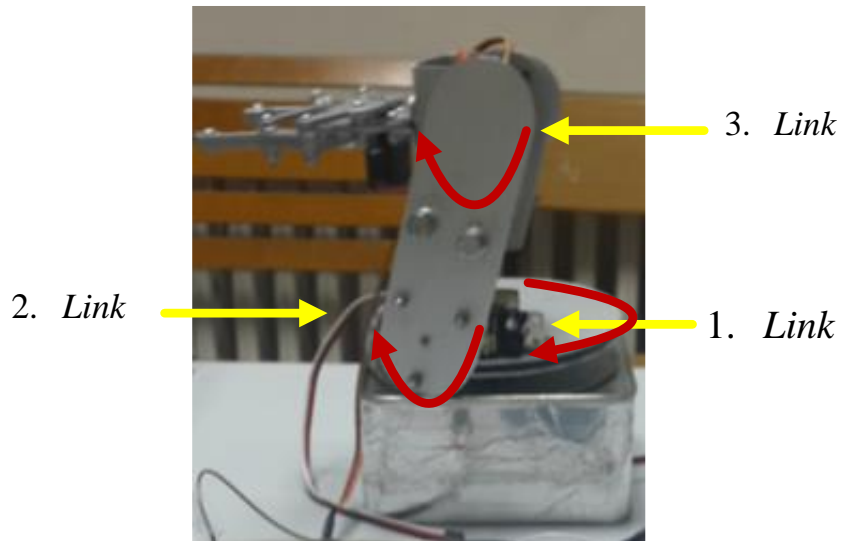
Sistemimizin bağımlı denetleyicileri(slave) olarak görev yapan robot 6 serbestlik dereceli sanal endüstriyel robot ve 3 serbestlik dereceli robottur. Bu çalışmada kullanılan endüstriyel robot ABB firması tarafından üretilen IRB140'ın sanal modelidir[97-101]. Bu robot 6 serbestlik dereceli seri bir robot 6 döner ekleme sahiptir.



Şekil 3.1. ABB firması tarafından üretilen IRB140 modeli [97]



Şekil 3.2. IRB140 modelinin 6 serbestlik derecesi [98]



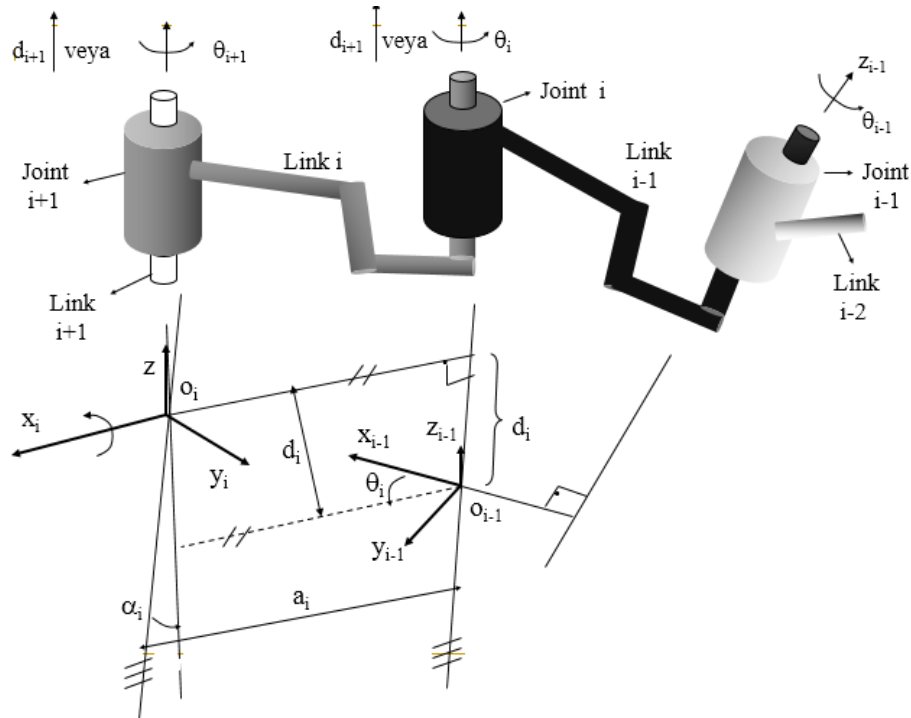
Şekil 3.3. 3 serbestlik dereceli robot kol

Şekil 3.2 'de IRB140 modelinin 6 döner eklemi gösterilmiştir. Şekil 3.3 'de ise 3 serbestlik dereceli robot kol gösterilmiştir. Bu çalışmada kullanılan dinamik parametreler sanal IRB140 modeline aittir. Robotun gerçek parametreleri ek C'de verilmiştir.

3.2. Kinematik Analiz

Bir robotun analizinin yapılabilmesi için, önce robotun tabanına referans eksen takımı kabul edilen genel (global) bir kartezyen koordinat sistemi yerleştirilir. Sonra benzer şekilde her eklem ya da uzva birer eksen takımı yerleştirilir. Robotun konum ve yönelmesi, işte bu eklemlere yerleştirilen yerel koordinat sistemlerine göre bağlı konumları ile belirlenir. Kinematik analizlerin yapılabilmesi için koordinat sistemlerinin birbirleri ile ilişkisini belirleyen dönüşümlere homojen dönüşümler denir. Bu ilişkileri sistematik olarak ilk defa Denavit-Hartenberg tarafından belirlenmiştir [102].

n serbestlik dereceli bir manipülatör için n link ve n eklem olacaktır. Her bir link için linkin eklem eksenine bir koordinat sistemi eklenecektir. Her (x_i, y_i, z_i) $(i+1)$ eklemine karşılık düşünülür. i. linkine bağlanmıştır. Eklem sürücüsü i. eklemi hareket ettirirse link i link $(i-1)$ e göre hareket edecektir[103]. Bu durumda i. koordinat sistemi i. linke bağlandığı için bu link ile hareket edecektir.



Şekil 3.4. Standart bir Denavit-Hartenberg parametreleri

Her koordinat sistemi 3 temel kurala göre belirlenir.

1. z_{i-1} eksenini i . eklemin hareket eksenini boyunca yerleştirilir.
2. x_i eksenini z_{i-1} eksenine normal olup, ondan öteye yönelir.
3. y_i eksenini sağ el kuralını sağlayacak şekilde yerleştirilir.

Burada yer koordinat sistemi (x_0, y_0, z_0) seçmek serbesttir. Fakat tek koşul z_0 eksenini ilk eklemin hareket eksenini boyunca olmalıdır. n . Koordinat sistemi ise elde (tutucuda) istenen bir yere yerleştirilir. Ancak tek koşul x_{n-1} in z_{n-1} e normal olmasıdır. D-H gösterimi 4 geometrik büyüklüğe bağlıdır. Bunlar herhangi bir dönel ya da prizmatik eklemi tam olarak belirler.

θ_i : x_{i-1} ekseninden x_i eksenine geçişte z_{i-1} eksenini etrafındaki dönme açısı.

d_i : $(i-1)$. Koordinat sisteminin orijininden x_i ile z_{i-1} ekseninin kesim noktası arasında z_{i-1} eksenini üzerindeki uzaklık.

a_i : i . koordinat sisteminin orijini ile x_i ile z_{i-1} kesişim noktası arasındaki mesafe. (link i 'nin uzunluğu)

α_i : z_{i-1} eksenini ile z_i eksenini arasındaki açı (x_i eksenini etrafında dönmelerinden kaynaklanan)

- Dönen bir eklem için d_i , a_i , ve α_i eklem parametreleri olup sabittir. θ_i ise eklem değişkenidir.
- Prizmatik eklem için a_i , α_i ve θ_i eklem parametreleri olup d_i değişkendir.

Bu temel kurallara göre herhangi bir robot kolunda koordinat sistemleri yerleştirilir. Eklem parametreleri hesaplanır. Bundan sonra $(i-1)$ koordinat sistemine göre i . koordinat sistemini verecek homojen transformasyonlar (dönüşümler) bulunur.

θ_i koordinat sistemini θ_{i-1} koordinat sisteminden;

a-) z_{i-1} eksenini etrafında rotasyon (dönme), öyleki x_{i-1} eksenini ile x_i çakışır (paralel)

b-) z_{i-1} eksenini boyunca d_i kadar öteleme

c-) x_i eksenini boyunca a_i kadar öteleme (orijinler çakışır.)

d-)x_i ekseninde etrafında döndürme (z_i, z_{i-1} arasındaki açı)

Buna göre:

$$A_i = \text{Rot}(z, \theta_i) \cdot \text{Trans}(0,0,d_i) \cdot \text{Trans}(a,0,0) \cdot \text{Rot}(x, \alpha_i) \quad (3.1)$$

$$A_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & 0 \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha_i & -\sin\alpha_i & 0 \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$$A_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & 0 \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & \cos\alpha_i & -\sin\alpha_i & 0 \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$A_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & 0 \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & \cos\alpha_i & -\sin\alpha_i & 0 \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$A_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i \cos\alpha_i & \sin\theta_i \sin\alpha_i & a_i \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i \cos\alpha_i & -\cos\theta_i \sin\alpha_i & a_i \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Bu bölümde, ilk olarak sanal slave robot için düz, ters kinematik ve jakobiyen matrisi hesaplamaları yapıldı ve dinamik denklemleri elde edildi. İkinci olarak 3 serbestlik dereceli robot için düz kinematik, ters kinematik ve jakobiyen matrisi elde edildi.

3.2.1. Düz kinematik analiz

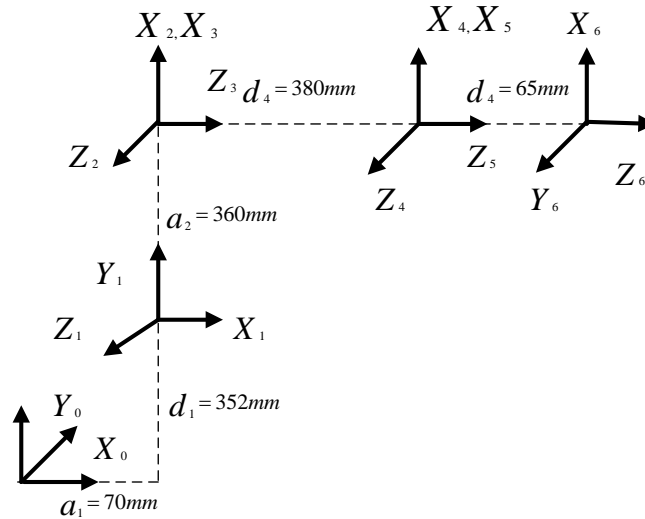
Düz kinematik çözüm homojen matrislerin çarpımıyla elde edilir. Düz kinematik için Denavit - Hartenberg yöntemi [102] kullanılmıştır. Bir sistemin belirli durumlarını göze alarak nasıl hareket ettiğini anlamak için bu sistemin kuvvet, atalet ve enerji gibi dinamik büyüklüklerini bilmemiz gerekir.

Robotun düz kinematiği (forward kinematics); robotu oluşturan linklerin konumları, hızları ve ivmeleri arasındaki ilişki ile tork ve kuvvet etkisi dikkate alınmadan hesaplanır. Bu yaklaşım robotun parametreleri ve eklem değişkenleri arasındaki cebirsel ilişkilerden yararlanır.

- Öncelikle robotun başlangıç değerlerine göre eklemlere koordinat sistemleri yerleştirilir.
- İkinci adımda dönme eklemlerine Z eksenleri yerleştirilir.
- Üçüncü adımda Z eksenine dik ve uzuv boyunca uzanan X eksenleri yerleştirilir.
- Dördüncü adımda Sağ El kuralına göre Y eksenleri yerleştirilir.
- Son adımda da koordinat sistemleri eklemlere yerleştirildikten sonra D-H değişkenleri belirlenir ve tabloya eklenir. (Z Ekseni bizden kâğıda doğrudur.)
- Öncelikle D-H değişkenlerinden sabit olan parametreler belirlenir.

Şimdi ise D-H değişkenlerinden değişen parametrelerini bulunur ancak her bir eklem için yalnızca bir parametre değişken olabilir kısacası döner eklem için eklem açısı, kayar eklem içinse eklem kaçıklığıdır.

3.2.1.1. Sanal Slave Robotun Düz Kinematik Hesabı



Şekil 3.5. Sanal slave modeli robotun serbest cisim diyagramı

Yukarıdaki adımlar dikkate alınarak robotun ilk ekleminden itibaren eksen takımları yerleştirilir. Eksen takımları yerleştirdikten sonra elde edilen değerler DH tablosuna yazıldı. Aşağıdaki tabloda DH parametreleri gösterilmiştir.

Tablo 3.1. Sanal slave robot modeli 6 eklem için D-H tablosu

Eklem(i)	θ (rad)	d (m)	a (m)	α (rad)
1	θ_1	d_1	a_1	$-\pi/2$
2	θ_2	0	a_2	0
3	θ_3	0	0	$\pi/2$
4	θ_4	d_4	0	$\pi/2$
5	θ_5	0	0	$\pi/2$
6	θ_6	d_6	0	0

Elde edilen tabloya göre her ekleme ait değişkenleri aşağıdaki genel matriste yerine bırakılarak dönüşüm matrislerini bulunur.

$$A_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i \cdot \cos\alpha_i & \sin\theta_i \cdot \sin\alpha_i & a_i \cdot \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i \cdot \cos\alpha_i & -\cos\theta_i \cdot \sin\alpha_i & a_i \cdot \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Birinci eklem için dönüşüm matrisi;

$$A_1 = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & \sin\theta_1 & 0 & a_1 \cos\theta_1 \\ \sin\theta_1 & -\cos\theta_1 & 0 & a_1 \sin\theta_1 \\ 0 & 1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

İkinci eklem için dönüşüm matrisi;

$$A_2 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2 + \pi/2) & -\sin(\theta_2 + \pi/2) & 0 & a_2 \cos(\theta_2 + \pi/2) \\ \sin(\theta_2 + \pi/2) & \cos(\theta_2 + \pi/2) & 0 & a_2 \sin(\theta_2 + \pi/2) \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Üçüncü eklem için dönüşüm matrisi;

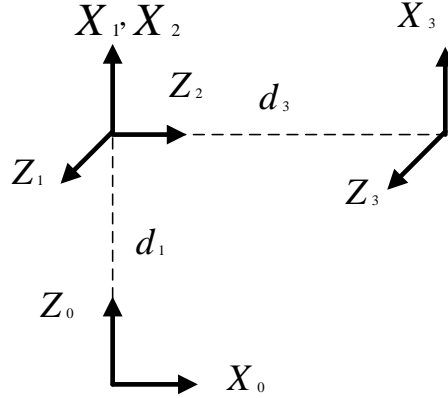
$$A_3 = \begin{bmatrix} \cos\theta_3 & 0 & \sin\theta_3 & 0 \\ \sin\theta_3 & 0 & -\cos\theta_3 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Bu çalışmada ilk üç kullanılacağından ilk üç eksenin dönüşüm matrisi hesaplanmıştır. Robotun ilk üç eksenin ve tamamının dönüşüm matrisi ek B' de

gösterilmiştir. Elde edilen üç ekleme ait dönüşüm matrisleri birbirleriyle çarpılarak robota ait dönüşüm matrisi elde edilir.

$$T = A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \quad (3.11)$$

3.2.1.2. Gerçek Slave Robotun Düz Kinematik Hesabı



Şekil 3.6. 3 serbestlik dereceli robotun serbest cisim diyagramı

Tablo 3.2. 3 serbestlik dereceli robot kol ilk 3 eklem için D-H tablosu

Eklem(i)	θ (rad)	d (m)	a (m)	α (rad)
1	θ_1	d_1	0	$-\pi/2$
2	θ_2	0	0	0
3	θ_3	d_3	0	$\pi/2$

Elde edilen D-H tablosuna göre dönüşüm matrisleri bulunur ve 3 dönüşüm matrisi çarpılarak düz kinematik hesap edildi. Robotun ilk üç eksenin ek C' de gösterilmiştir.

3.2.2. Ters kinematik analiz

Ters kinematik (inverse kinematics) hesaplamaları robot kontrol işlemlerinde çok önemli bir yere sahiptir. Ters kinematik, uç işlevcisinin verilen konum ve yönelim verilerine göre eklem değişkenlerinin değerlerinin bulunması işlemidir. Ters kinematik çözümü aktüatörlerin eklem torklarının hesaplanması, gerçek zamanlı kontrol ve yörünge

planlaması gibi işlemlerde ön plana çıkmaktadır. Ters kinematik çözüm için farklı yaklaşımlar mevcuttur.

3.2.2.1. Sanal slave robotun ters kinematik hesabı

Aynı linkin ters kinematiğini DH Metodu (Denavit- Hartenberg) yöntemi ile bulunur. Ek D 'de ters kinematik dönüşüm matrisleri ve ara dönüşüm işlemleri verilmiştir.

$$\theta_1 = a \tan 2\left(-\frac{a_x}{a_y}\right) \quad (3.17)$$

$$\theta_2 = a \tan 2\frac{(C_1.a_x + S_1.a_y)}{a_z} \quad (3.18)$$

$$\theta_3 = a \tan 2 - \left(\frac{C_2(C_1.o_x + S_1.o_y) - S_2.o_z}{(-S_2(C_1.o_x + S_1.o_y) - C_2.o_z)}\right) \quad (3.19)$$

3.2.2.2. Gerçek slave robotun ters kinematik hesabı

Ek E 'de ters kinematik dönüşüm matrisleri ve ara dönüşüm işlemleri verilmiştir.

$$\theta_1 = a \tan 2\left(-\frac{a_x}{a_y}\right) \quad (3.20)$$

$$\theta_2 = a \tan 2\frac{(C_1.a_x + S_1.a_y)}{a_z} \quad (3.21)$$

$$\theta_3 = a \tan 2 - \left(\frac{C_2(C_1.o_x + S_1.o_y) - S_2.o_z}{(-S_2(C_1.o_x + S_1.o_y) - C_2.o_z)}\right) \quad (3.22)$$

3.3. Jakobiyen Matrisi

Bu bölümde yalnızca robotun son pozisyonu ile değil, aynı zamanda hızı ile ilgilenilmiştir. Jakobiyen matrisi ise eklemler arasındaki hız ilişkilerini ifade eder. Jakobiyen matrisi bu yönüyle robotik işlemlerde çok kullanılan bir araçtır.

Jakobiyen matrisine girdi olarak robotumuzun uç organının anlık hız değerlerini verir çıkış olarak ise her bir eklemin hız değerlerini alırız. Klasik olarak ters kinematik

işlemlerde konumlar üzerinden hareket edilirken jakobiyen matrisi bu konum ilişkilerini hız olarak tanımlamamızı sağlamaktadır.

3.3.1. Sanal slave robotun jakobiyen matrisi

$$J = \begin{bmatrix} l_1 \cos \theta_2 + l_2 \sin \theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & l_1 \cos (\theta_2 - \theta_3) & 0 \\ 0 & -l_1 \sin (\theta_2 - \theta_3) & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ \cos \theta_3 & 0 & 0 \\ \sin \theta_3 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{6 \times 3} \quad (3.23)$$

3.3.2. Gerçek slave robotun jakobiyen matrisi

$$J = \begin{bmatrix} \bar{b}_0 x \bar{r}_0 & \bar{b}_1 x \bar{r}_1 & \bar{b}_2 x \bar{r}_2 \\ \bar{b}_0 & \bar{b}_1 & \bar{b}_2 \end{bmatrix}_{6 \times 3} \quad (3.24)$$

$$J = \begin{bmatrix} -d_3 \sin \theta_1 & 0 & -\sin \theta_1 \\ -d_3 \cos \theta_1 & 0 & \cos \theta_1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{6 \times 3} \quad (3.25)$$

3.4. Ters Jakobiyen Matrisi

Ters jakobiyen matrisi lineer ve açısal hızların hesaplanmasına imkân sağlar. Jakobiyen kullanılarak yapılan yörünge planlamasında ters kinematik denklemlerinden gelen bazı tekillik problemleri ortadan kalkmakta ve sisteme istenilen karmaşıklıkta yörünge verilebilmektedir.

$$\dot{\theta} = J^{-1} * \dot{x} \quad (3.26)$$

$$J^{-1} = \frac{adj(J)}{\det(J)} \quad (3.27)$$

3.5. Sanal Slave Robotun Dinamik Denklemleri

Bu kısımda da dinamik denklemlerinin çıkartılmasında hem sistematik ve kolay olması hem de robot dinamik denklemlerinde çok yaygın kullanılması sebebiyle Lagrange-Euler (L-E) metodu kullanılmıştır. Sanal slave robotun dinamik denklemleri aşağıda verilmiştir.

$$M(\theta)\left[\ddot{\theta}\right]+C\left(\dot{\theta},\theta\right)\left[\dot{\theta}\right]+N\left[\dot{\theta}\right]=\tau+\tau_e \quad (3.28)$$

$M(\theta)$ ise 3*3'lük pozitif tanımlı simetrik bir matris olup aynı zamanda sistemin atalet matrislerini de içermektedir. Matrisin sabitlerini m, L, J temsil etmekte sistemin değişkenleri yalnızca θ 'dır. Sistemin Coriolis matrisi, Coriolis ve merkezkaç kuvvetlerini göstermektedir. Burada $N(\theta)$ ise 3*3'lük bir matris olup ağırlık kuvvetlerinden oluşur ve matrisin değişkenleri yalnızca θ 'dır. τ uygulanan tork vektörünü, τ_e ise çevreden kaynaklanan kuvveti ifade eder.

4. GÖRSEL ARAYÜZÜN OLUŞTURULMASI

4.1. Giriş

Bu bölümde Phantom omni haptik cihaz ile sanal 6 serbestlik dereceli robot arasında gerçekleştirilecek hareket kontrolü ve etkileşim için görsel bir arayüz tasarlanmıştır.

4.2. Sanal Robot ve Görsel Ara Yüzün Oluşturulması

Teleoperasyon çalışmalarında kullanıcıya en gerçekçi şekilde geri beslemede bulunmak oldukça önemlidir. Bu çalışmada oluşturulan sanal gerçeklik sahnesi bu amaçla hazırlanmıştır. Bu görsel arayüz master robot ile gerçekleştirilen durumları sanal slave robot ile gerçek zamanlı görsel geri besleme imkânı tanımaktadır.

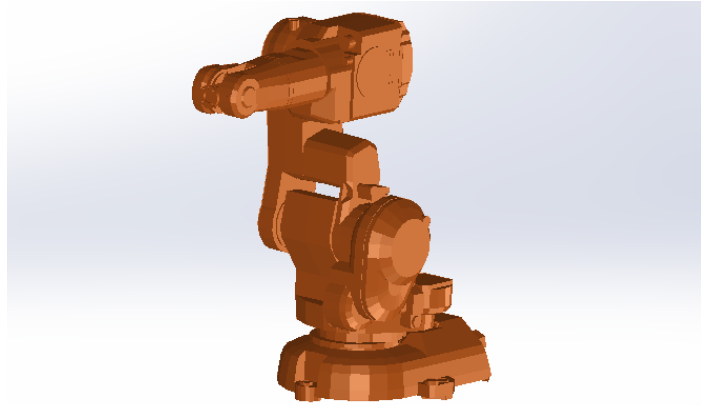
Sanal gerçeklik (Virtual Reality VR) fiziksel sistemlerin gerçekçi simülasyonlarına imkan tanıyan oldukça yaygın olarak kabul gören bir teknolojidir. 3D boyutlu modelleme için çok çeşitli programlar kullanılmaktadır. VRML, OpenGL ve OpenInventor en yaygın kullanılan program çeşitlerindedir[104-108]. Bu çalışmada VRML 3D sanal gerçeklik ortamını oluşturmak için tercih edilmiştir. VRML fiziksel sistemlerin gerçekçi olarak görüntülenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Hesaplamalı algoritmalar kullanıldığı için MATLAB bu çalışmada kullanıldı ve 3 boyutlu görsel ortam için MATLAB VRML kullanıldı. Bu nedenle VRML ile 3D sahne oluşturmak ve MATLAB kaynak koduyla oluşturulan algoritmaların robotların kontrolü ve etkileşimi için en uygun program olduğundan tercih edildi.

Virtual Reality Toolbox, Matlab paket programında bulunan bir araç kutusudur. MATLAB ve Simulink programları ile herhangi bir cismin, üç boyutlu ortamda kontrol edebilme imkânı sağlamaktadır. Bu şekilde oluşturulmuş herhangi bir nesnenin konum, rotasyon gibi bilgilerine ulaşabilme ve onları değiştirme imkânı sağlamaktadır. Virtual Reality Toolbox'ı kullanmak için çeşitli adımları tamamlamak gerekmektedir. Öncelikle kontrol edilecek nesne ile ilgili "Virtual" sahnenin hazırlanması gerekir. Ardından bu sahnenin kontrol yapısına eklenmesi gerekir. Bundan sonra "sanal" sahne olarak anılacak "virtual" sahne kısmı, Virtual Reality Modeling Language (VRML) dili kullanılarak hazırlanabilir. VRML dili ile uygulama geliştirilebilen birçok editör tipi mevcuttur.

MATLAB 'da Virtual Reality Toolbox paketi kullanıldı. Kullanıcı ara yüzü bu araç kutusu ile sözü edilen dilin bir sürümü olan VRML97 editörüdür.

VR Sink bloğu sistemin 3 boyutlu görselini sağlamak için kullanıldı. SolidWorks, Catia, 3DS Max Design vb. paket programlarında çizilmiş herhangi bir model, VRML97 formatına çevrilebilir ve bu model Virtual Reality ToolBox'un kullanabileceği şekilde değiştirilebilir. Bunun için öncelikle oluşturulan katı model montaj "Assembly vb." dosyasına ihtiyaç vardır. Gerçekleştirilen çizim SolidWorks kullanılarak vrml97 olarak kaydedilebilir.

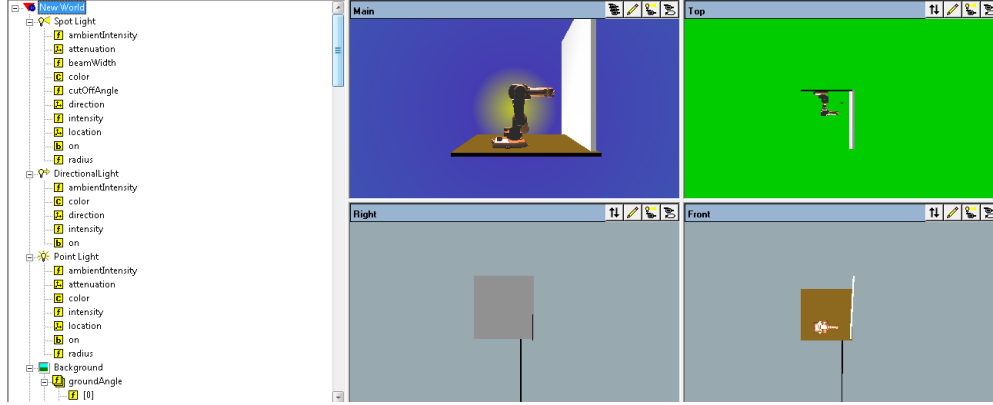
Bu çalışmada ilk olarak katı modeli çizilecek olan robotun fabrika üretim boyutları belirlendi. Boyutlar belirlendikten sonra Solidworks paket programında robotu eklemleri çizildi ve daha sonra çizilen robot eklemleri 3D haline getirildi. 3D model haline getirildikten sonra robot eklemleri montaj dosyasına eklenerek ve her biri eklem montajı gerçekleştirildi.



Şekil 4.1. Solidworks programında oluşturulan sanal slave robot

Çizimlerin sanal ortam içine yerleştirilmesi işlemi daha sonra oluşabilecek hataların önüne geçilebilmesi bakımından çok önemlidir. Öncelikle her bir parça ayrı ayrı vrlm dosyası haline getirilip sırasıyla sanal gerçeklik araç kutusu (virtual reality toolbox) içinde açıldı. Bunun için bir simulink dosyası açıldı "Simulink 3d Animation" ismi altında bulunan "VR Sink" bloğu dosyanın içine atıldı ve bloğa çift tıklamak suretiyle karşımıza çıkan programdan yeni (new) seçeneğinin seçilmesiyle 3 boyutlu ekran karşımıza çıktı. Açılan ekranda vrlm formatında kaydettiğimiz dosyaların hepsini açıp teker teker montajları gerçekleştirildi. Montaj yapılırken dikkate edilmesi gereken noktalardan biri montaj sıralamasıdır. En alt eklemden en üst eklem doğru sıralama ile montaj yapılması

gerekmektedir. İki yönlü kontrol uygulamasında kullanılacak sanal duvar ile alt taban sanal sahneye eklendi. Ayrıca her bir eklem için dönme ve öteleme blokları seçildi. Sanal ortam için gerekli olan sahne, ışık ve renk ayarları gerçekleştirildi. Sonuç olarak 6 serbestlik dereceli robot, duvar ve alt tabandan oluşan sanal ortam gerçekleştirildi.



Şekil 4.2. Sanal gerçeklik araç kutusu kullanılarak oluşturulan sanal ortam

5. KONTROL TEORİSİ

5.1. Giriş

Bu bölümde ilk olarak master-slave robotların kontrolleri anlatılacak ikinci olarak teleoperasyon sisteminin kontrolünde kullanılan tek yönlü (unilateral) kontrol ve iki yönlü (bilateral) yöntemi anlatılacaktır. Ayrıca robotların kontrolünde kullanılan PID, hesaplanmış tork kontrol ve adaptif(uyarlamalı) hesaplanmış tork kontrol yöntemleri verildi.

5.2. Tek Yönlü (Unilateral) Kontrol

Teleoperasyon tanımlarından biri bir robotun manipülasyonudur. Tek yönlü kontrol yönteminde herhangi bir geri besleme yoktur. İnsan operatör tarafından yönlendirilen slave robota iletişim kanalından girişler (konum, hız vb.) master tarafından gönderilir. Robotun kontrolü gerçekleştirilmiş olur. Slave robotun durumunu güncellemek için master tarafına herhangi bir geri besleme gönderilmediğinden, kullanıcı tarafından tek ipucu görmek veya duymaktır. Bu kontrol yöntemi manipulatörlerin uzaktan kontrolü için kullanılmıştır. Literatürde bu konuda bazı çalışmalar mevcuttur ve çalışılmaya devam etmektedir[109-112].

Teleoperasyon sistemlerinde ortam hakkında bilgi edinilmesi önemli bir husus olduğundan bu kontrol yönteminin en önemli eksiği geri besleme olmamasıdır. Bu nedenle iki yönlü(bilateral) kontrol methodu geliştirilmiştir. Şekil 5.1 'de tek yönlü kontrol yönteminin blok yapısı gösterilmiştir.

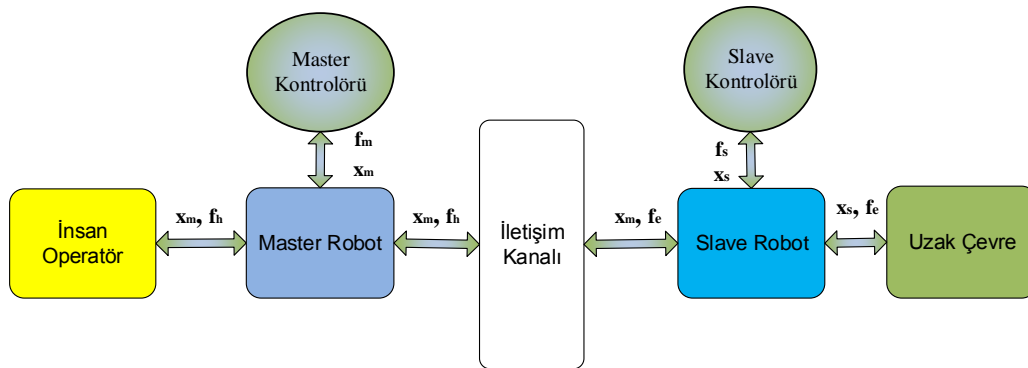


Şekil 5.1. Tek yönlü (unilateral) teleoperasyon sisteminin blok diyagramı

5.3. İki Yönlü (Bilateral) Kontrol

İki yönlü teleoperasyon sistemlerinde tek yönlü (unilateral) teleoperasyon sistemlerinden farklı olarak kullanıcı ile robot arasında iletişim vardır. Bu iletişim geri besleme şeklinde genel olarak kuvvet veya torkdur.

Master ve slave robot arasındaki iletişimde durum değişkenleri[113], kuvvet[114] ve tork değerleri ve sisteme herhangi bir öge eklemek için ve öge hakkında bilgi edinilmesi için kullanılmaktadır. Ses ve görüntü[115] geri beslemesi sayesinde zor görevler yüksek performanslı ve kısa süre içerisinde gerçekleştirilmiştir. İleri ve geriye doğru iletişimde yani iki yönlü iletişimde sistemde kararsızlık ve sistemin kontrolünde istikrarsızlık görülmektedir. Bu problem iki yönlü kontrolde pasiflik (passivity) kontrol biçimini ortaya çıkarmıştır. Genelde master cihazlar tek serbestlik dereceli joystick veya eldiven ile çok serbestlik dereceli ara yüzler kullanılır[116]. Slave robotlar [117] genelde tek veya birden fazla ve çok serbestlik dereceli manipulatörlerdir. Genel Şekil 5.2 'de genel iki yönlü kontrol yapısı görülmektedir.



Şekil 5.2. İki yönlü (bilateral) teleoperasyon sisteminin blok diyagramı

Bilateral tele operasyonda temel problemlerden biri iletişim kanalındaki gecikme ve veri kaybıdır. İletişim kanalından gönderilen sinyaller sabit veya değişken gecikmeye maruz kalabilmekte ve bu gecikme sebebiyle bilateral teleoperasyon sistemlerinde kararlılık ve saydamlık sağlanamamaktadır [118]. Literatürde kararlılık problemini çözmek üzere Sheridan ve Ferrell'in çalışmalarından [119]. Bu yana birçok yöntem geliştirilmiştir. Yazarlar uzaktan manipulasyon üzerinde çalışmış ve basit görevleri tamamlama sürelerini gözlemlemek için deneyler yapmışlardır. Yaptıkları çalışmalardan, gecikmenin kararlılığı bozucu etkisinin 'move and wait' stratejisi ile yok

edilebileceği sonucuna varmışlardır. Sheridan ve Ferrell deneylerinde kuvvet yansımaları hesaba katmamıştır. Kuvvet geribeslemesi kullanıldığında bilateral teleoperasyonda saniyenin onda biri mertebesindeki gecikmelerin sistemi kararsız yaptığı deneysel olarak gösterilmiştir [120] ve [121]. Kararlılık, sadece küçük bant genişliğindeki referanslar için sağlanabilmektedir. İletişim gecikmesi sistemin doğrusallığını bozan ve sistem derecesini sonsuza kadar artıran bir etkiye sahip olduğu için o yıllarda bu alanda çok az çalışma yapılmıştır. Daha sonraki yıllarda Leung ve Lin kararlılığı bozan etkenler ile ilgili analizler yapmışlardır [122], [123].

Anderson ve Spong tarafından geliştirilen *passivity* tabanlı *scattering transformation* yöntemi [124], [125], [126] ile Niemeyer ve Slotine tarafından önerilen *scattering* tabanlı *wave variables* (dalga değişkenleri) yaklaşımı [127] , [128] bu problemin çözümü için ilk önerilen yöntemlerdir. Mikrocerrahi, mikro ya da makro manipulasyon gibi görevlerin gerçekleştirilmesinde, master ve slave taraflarındaki sinyallerin eşleşememe problemi ‘scaled telemanipulation’ fikrini motive etmiştir. Colgate, Laplace uzayında empedans ölçekleme (*impedance scaling*) tekniği [129], Kosuge ise zaman uzayında empedans ölçekleme (*impedance scaling*) tekniği [130] üzerinde çalışmışlardır. Niemeyer ve Slotine’in önerdiği dalga değişkenleri (*wave variables*) teorisinde [131] iletişim kanalının giriş ve çıkışındaki güç akışı, giriş ve çıkış dalgaları olarak yeniden tanımlanmıştır. Dalga değişkenleri, hız ve kuvvet (güç) sinyallerine dalga dönüşümü (*wave transformation*) uygulanarak elde edilmektedir. Scattering teorisindeki sonucun aynısına dalga teorisiyle de ulaşılmıştır. Dalga değişkenleri tekniğinde dalga taşıyıcıların değişmesiyle kesişim (*junction*) ve bitiş (*termination*) noktalarında dalga yansımaları (*wave reflections*) gözlemlenmektedir.

Dalga dönüşümünün karakteristik empedansının geri kalan sisteme eşlenmesiyle dalga yansımaları yok edilebilmektedir. Sistemin kararlılığı *passivity* teorisine kanıtlanmış ancak sistemin performansı yeterli düzeyde olmadığından performans geliştirme çalışmaları devam etmiştir. [132]’de bilateral sistemin geçici durum (*transient*) tepkisi analiz edilmiş ve telepresence ve operasyon hızı arasında ayarlamalar yapabilmek için bir ayarlama (*tuning*) mekanizması geliştirilmiştir. Bahsedilen yöntemler gecikmenin sabit olduğu durumlar için geliştirilmiştir ancak 1990’ların ortalarından itibaren kullanımı yaygınlaşan internet iletişimi, değişken gecikmeye sebep

olduğundan bu yöntemleri yetersiz kılmıştır. İletişim kanalındaki gecikme, düşük bant genişliği, iletişim kanalındaki tıkanıklık ve uzaklık gibi faktörlerden dolayı zamanla değişen bir yapı kazanmaktadır. İnternet iletişiminde gönderilen verinin yanlış sıralanması veya veri kaybı da gözlemlenebilmektedir. Zamanla değişen gecikmenin etkisi ve paket değişimli ağda (packet switched network) görülen paket kayıpları Hirche ve Buss tarafından incelenmiştir [133]. Oboe ve Fiorini de internet tabanlı teleoperasyon üzerinde çalışmış ve zamanla değişen gecikmenin sistem kararlılığına etkilerini gözlemek amacıyla deneyler yapmışlardır [134], [135]. 1998'de özellikle zamanla değişen gecikmenin olduğu sistemleri incelemek amacıyla bir bilateral teleoperasyon sistemi tasarlanmıştır. Bu sistemle gecikmenin davranışı gözlemlenmiş ve gecikme parametrelerinin kullanıldığı bir kontrol yöntemi önerilmiştir [136]. Daha sonra Lozano, Chopra ve Spong zamanla değişen gecikme problemini ele almış ve zamanla değişen gecikmenin sistemin pasifliğini bozarak kararsızlaştırdığını göstermiştir [137], [138]. Yazarlar scattering dönüşümü yöntemini zamanla değişen gecikme için yeniden düzenlemiş ve iletişim bloğuna zamanla değişen bir kazanç parametresi ekleyerek sistem pasifliğini garanti etmişlerdir. İnternet teknolojisi ilerledikçe ve internet tabanlı teleoperasyon önem kazandıkça dalga değişimi tabanlı yaklaşımlar da geliştirilmiştir. Kararlılığı sağlamak amacıyla dalga değişkenleri filtrelerinin kullanıldığı [139] 'de zamanla değişen gecikmeler üzerinde çalışılmıştır. Doğru bir pozisyon geribeslemesi alabilmek ve nümerik integrasyondan kaçınmak amacıyla iletişim kanalından dalga değişkenleri yerine dalga integralleri gönderilmiştir.

Chopra, Berestesky ve Spong da internet iletişiminde passivity tabanlı yöntemlerin geliştirilmesi üzerinde çalışmış ve sisteme scattering değişkenlerinin yeniden düzenlenmesini sağlayan iki iletişim yönetim modülü (Communication Management Modules) eklenmesini önermişlerdir [140]. Bu yöntem iletişim kanalında zamanla değişen gecikme varken sistemin pasifliğini ve asimtotik kararlılığını garanti etmektedir. Passivity tabanlı yöntemler, bilateral teleoperasyonda gecikme telafisi problemini çözen temel yöntemler olarak düşünülebilir. Asimtotik kararlılık ispatlanmış ve hız yakınsaması sağlanmış olsa da daha önceki passivity tabanlı çalışmalarda başarılı bir pozisyon takibi sağlanamamıştır. Dalga eşleşmesi yöntemi salınımları önleyebilmektedir ancak pozisyon ve kuvvet takibindeki hatalar telafi edilememektedir. 2001 yılında eşleşme elemanlarından biri (master tarafındaki) kaldırılarak pozisyon

hataları da yok edilmiş ve iletişim kanalında zamanla değişen gecikme varken tam kuvvet yansıması (transparency) sağlanmıştır [141]. Bu yöntemde empedans parametresi 'b' kazanç aralığını sabit tutacak şekilde zamana bağlı olarak değiştirilerek gecikme miktarındaki değişimin etkisi telafi edilmiştir. Pozisyon yakınsaması problemi Chopra ve arkadaşları tarafından ele alınmış ve master ve slave taraflarında gecikmeli pozisyon hatasıyla doğru orantılı birer terim eklenerek dalga değişkenleri yaklaşımı geliştirilmiş, böylece daha iyi bir pozisyon takibi sağlanmıştır [142], [143]. 2003'te Munir ve Book, Kalman filtresi tabanlı yöntemlerinde pozisyon sapması problemi üzerinde çalışmışlardır [144].

Bilateral teleoperasyon sistemlerinde gecikme telafisinde pozisyon ve kuvvet takibi problemi için başka bir passivity tabanlı yöntem ise 2006'da Namerikawa ve Kawada tarafından önerilmiştir [145]. Bu yöntemde master ve slave empedansları her iki tarafa da sanal sönümlenme eklenerek eşleştirilmiştir. Pozisyon kontrolünde kullanılan kazanç parametreleri Lyapunov kararlılık yöntemlerine göre seçilerek sanal sönümlenmeden kaynaklanan sistem operasyon yeteneğinin düşmesi önlenmiştir.

2005'te Lee ve Spong birden fazla serbestlik derecesi olan doğrusal olmayan robotlardan oluşan bilateral teleoperasyon sistemleri için PD tabanlı kontrol yöntemi önermiştir [146]. Daha önceki passivity tabanlı yöntemlerde teleoperasyon sistem bloklarının pasifliği her blok için ayrı olarak düşünülmüşken bu yöntemde kapalı döngü teleoperasyon sistemi bir bütün olarak pasifleştirilmiştir. Daha önceki scattering yaklaşımlarında pozisyon yakınsaması dolaylı olarak sağlanmışken bu yöntemde iletişim gecikmesinin ileri ve geri yönlerde aynı (simetrik) ve tam olarak bilindiği varsayılmıştır. 2006'da Lee ve Spong bu gerçek dışı varsayımları ortadan kaldırarak gecikmeyi bilinmeyen ve asimetrik olarak düşünmüşlerdir [147]. İletişim ve kontrol bloklarını birlikte pasifleştirmek için denetleyici pasifliği, Lyapunov-Krasovskii tekniği ve Parseval teoremini kullanmışlardır. Nuno ve ekibi [148] hızdan kuvvete doğru herhangi bir L_∞ kararlı dönüşümü olmadığı için Lee ve Spong'un yöntemlerindeki varsayımlarının doğrulanamayacağını ileri sürmüşlerdir. Her iki taraftaki manipulator sistemlerine yeterli miktarda sönümlenme eklenmesiyle sistemlerin pasifleştirilebileceğini ve doğrusal olmayan teleoperatörlerin PD benzeri kontrolörlerle kararlı hale getirilebileceğini ispatlamışlardır. Böylece scattering dönüşümü olmadan da

PD benzeri yöntemlerin bilateral teleoperasyon sistemlerini kontrol edebildiği gösterilmiştir. Aynı çalışmada sönümleme eklenmesinin performans düşüklüğüne sebep olabileceğine değinilmiştir. Daha sonraki bir başka çalışmada [149] yazarlar, iletişim kanalında zamanla değişen gecikme varken doğrusal olmayan teleoperatörler için global pozisyon takibi sağlayan ve P-like ve PD-like olarak adlandırılan denetleyiciler tasarlamışlardır. Sistemin kararlılığı Lyapunov analizi ile ispatlanmış, pozisyon ve hız yakınsaması master ve slave üzerine dışarıdan bir kuvvet etki etmediğinde sağlanmıştır. Bununla birlikte bu çalışmada kuvvet yansıtımı üzerinde durulmamıştır. Andriot ve ekibi passivity teorisine dayanan genel bir bilateral kontrol sistemi tasarlamak için bir sentez yöntemi önermişlerdir [150]. Gecikme problemi esnek ve katı (rigid) eklemli manipulatörler için düşünülmüş ve problemin katı eklemli manipulatörler için çözülmüş olduğu iddia edilmiştir. Esnek eklemli manipulatörler için, H_∞ tabanlı kontrol yöntemi önerilmiştir.

Telerobotikte, H_∞ kontrol teorisi Kazerooni ve Tsay tarafından kullanılmıştır [151], [152]. Master ve slave sistemlerinin dinamikleri birbirlerinin fonksiyonu olacak şekilde tanımlanmıştır. H_∞ kontrol teorisi ve model indirgeme tekniği, sistem davranışının belirlenen fonksiyonlarla tanımlanmasının garanti edilmesinde kullanılmaktadır. Master ve slave arasında hız ve pozisyon bilgisi yerine kuvvet bilgisi iletilmekte ancak kuvvet iletimi daha geniş bir bant genişliği gerektirmektedir. Hız veya pozisyon bilgisi gönderilmediği için pozisyon takibi hatası oluşmaktadır. Bu çalışmalarda slave sistemin serbest hareketi hiç düşünülmemiş, sadece çevreyle etkileşim hareketi düşünülmüştür. Önerilen yöntem kararlılığı sağlamış olsa da iletişim kanalındaki gecikmeden kaynaklanan performans düşüklüğü önlenememiştir. 1995'te H_∞ ile μ analiz ve sentez tekniğinin kullanıldığı yeni bir yöntem sunulmuştur [153]. Önceki yöntemlerden farklı olarak bu yöntemde gecikmeye karşı kararlılık ve performans birlikte düşünülmüştür. Kontrol yöntemi hem çevreyle etkileşim, hem de serbest hareket için tasarlanmıştır. Sabit ve üst sınırı olan gecikmeler çevreyle etkileşimin olduğu kısıtlı harekete bozucu bir etki yapmaktadır ve bu etki normu 1'den küçük olacak şekilde filtrelenmiştir. Daha sonra ise μ sentez yöntemi kullanılarak denetleyici tasarlanmıştır. 1998'de ise Sano, sınırlı zaman gecikmeleri için farklı denetleyiciler tasarlamış ve kazanç çizelgelemesi (gain scheduling) yöntemiyle ölçülen her zaman gecikmesi miktarı için uygun olan denetleyiciyi kullanan bir yöntem

geliştirmiştir. Farklı zaman gecikmeleri için çalışabilen bu yöntem internet tabanlı teleoperasyonda kullanılmaya uygundur [154]. Dinamik bir çevrede zamanla değişen gecikmelere maruz kalan alternatif bir bilateral sistem yapısı Kikuchi, Takeo ve Kosuge tarafından önerilmiştir [155].

Önerilen sistem, bilateral teleoperasyon, görüntü bilgisi (visual information) ve çevresel tahmin görüntüleme (environment prediction display) alt sistemleri olmak üzere 3 alt sistemin birleşimidir. Slave tarafındaki kamera sistemi resimleri toplamakta ve bunları master sistemine göndermektedir. Zamanla değişen gecikme sebebiyle görüntü bilgi alt sistemi tarafından gönderilen görüntü bilgisi bilateral tele operasyonda kullanılamamaktadır. Bu sebeple, slave manipülatörün tahmin edilen o anki pozisyonunu veren çevresel tahmin görüntüleme alt sistemi kullanılmaktadır. Değiştirilmiş bir kayan kipli denetleyici ile değişken gecikme telafisi yöntemi 1999'da sunulmuştur [156]. Bu yöntemde master tarafında bir empedans denetleyici ve slave tarafında ise kayan kipli denetleyici kullanılmıştır. Doğrusal olmayan kayan kipli denetleyici kazanç parametreleri gecikme değişimlerine bağlı değildir. Bundan dolayı da gecikmenin miktarı bilinmek zorunda değildir ve denetleyici kazanç parametreleri gecikmeden bağımsız olarak ayarlanabilmektedir.

Literatürde gecikme telafisi için kestirime dayalı yöntemler de kullanılmıştır. Gecikme terimlerinin kontrol sisteminin karakteristik denkleminde çıkartılmasına dayanan Smith predictor bu yöntemlerden biridir [157], [158]. Munir ve Book, Smith predictor'ü değiştirerek ve Kalman filtresi kullanarak yeni bir kestirici önermiştir [159],[160]. Bu yöntemde pasifliği sağlamak amacıyla bir enerji düzenleyici kullanılmıştır. Dalga değişkenleri ve Smith predictor yöntemleri Ganjefar, Momeni ve Janabi tarafından 2002'de bir araya getirilmiştir [161]. Kestirici kontrol yöntemlerini kullanan ve Smith predictor tabanlı kestirici denetleyici yöntemi ile yapay sinir ağlarına dayanan bir yaklaşım [162] 'ta sunulmuştur.

Natori, Tsujhi ve Ohnishi değişken iletişim kanalı gecikmesinin telafisi için İletişim kanalı Gözlemleyicisi (Communication Disturbance Observer) yöntemini önermişlerdir. Kestirici tabanlı yaklaşımlardan farklı olarak bu yöntemde gecikmenin miktarını bilmek gerekli olmadığı için değişken gecikmeli sistemlere de uygulanabilir. Bu yöntemde gecikmenin etkisi sisteme dışarıdan etkiyen dış bozucu kuvvet olarak

kabul edilmiş ve bu bozucu kuvvet iletişim kanalı gözlemcisi tarafından kestirilerek sistemden çıkarılmıştır [163],[164],[165]. Ancak, çıkarılan bu kuvvet sadece gecikmeden kaynaklanan bozucu kuvvet değil aynı zamanda çevreyle etkileşim sırasında oluşan çevresel kuvvetleri de içermektedir. Bu sebeple kuvvet bilgisi master tarafına tam olarak iletilmemektedir. 2009'da iletişim kanalı gözlemcisi yöntemi iyileştirilmiş ve çevresel kuvvet iletişim kanalındaki bozucu etkilerden ayrılmıştır [166] , [167] adlı çalışmada dış kuvvetler tepki kuvveti gözlemcisi (reaction torque observer) ile hesaplanmıştır.

Tepki kuvveti gözlemcisi [168] sisteme etki eden kuvvetleri tahmin etmek için pozisyon bilgisini kullanan bir bozucu gözlemci olarak tanımlanmıştır. Saydam bir teleoperasyon sağlayabilmek için Ohnishi ve ekibi kuvvet ve hız sinyallerinin paylaşıldığı dört kanallı denetleyici (four channel controller) yöntemini kullanmışlardır. Bu kontrol mimarisi 1993'te Lawrence tarafından [169], 1994'te ise Yokokohji ve Yoshikawa tarafından birbirlerinden bağımsız olarak önerilmiştir [170]. Master ve Slave arasında mükemmel bir saydamlık sağlanabilmesi için insan operatör tarafından görülen empedansın çevrenin empedansına eşit olması gerekmektedir. Lawrence iki portlu hibrit parametre matrisi kullanarak dört bilgi kanalı kullanılmaksızın saydamlığın sağlanamayacağını göstermiştir. Yokokohji de aynı sonuca zincir matrisi kullanarak ulaşmıştır. Geleneksel yöntemde dört kanallı denetleyici, sistemi pozisyon modunda kontrol etmek için tasarlanmıştır. 1995'te Zhu ve Salcudean, Lawrence'in formülasyonunu geliştirerek saydamlığı hız modunda çalışan sistemler için de sağlanabilir hale getirmiştir [171].

Lawrence'in yönteminden farklı olarak kuvvet hissetme gerekli değildir. Çevre empedansının tahmini, çevre bilgisinin elde edilmesi için kullanılmıştır. Bahsedilen dört kanallı denetleyici tabanlı yöntemlerde master, slave, çevre ve operatör empedanslarının tam olarak bilindiği varsayılmaktadır. Belirsizlik problemlerinin üstesinden gelebilmek için kuvvet geribeslemesinin kullanılmadığı adaptif kontrol tabanlı yöntemler öne çıkmıştır [172]. Teleoperatörün iki tarafında adaptasyon göz önünde bulundurulmuştur. Dalga değişkenleri yöntemi de kuvvet geri beslemeli tele operatörler için geliştirilmiştir, [173], [174]. Bir başka çalışmada [175] bilateral kontrol sisteminin saydamlığını sağlamak için dalga değişkenleri dönüşümüne dalga empedansı eklenmiştir.

5.4. PID (Proportional-Integral-Derivative) Kontrol

PID (oransal integral türevi) kontrolü çok eskiden beri kullanılan kontrol stratejilerinden [176] biridir. Birçok uygulama iyi performans gösteren methodu pnömatik cihazlarda, vakum katı durumdaki dijital elektronik kartlarda ve bugünlerde mikroişlemcilerde kullanılmaktadır. Nispeten diğer kontrolcülere göre ayarlaması kolay olduğundan ve basit bir kontrol düzeneği olduğundan kullanımı yaygındır. PID kontrol endüstride tatminkâr performansından dolayı hala kullanılmamaktadır. 1989'da kontrol tipleri hakkında yapılan literatür taramasında 90'dan fazla PID tipi [177] kontrolör kullanıldığı tespit edilmiştir. PID kontrol yıllardır araştırma konusu olmuştur ve birçok alanda uygulanmış ve uygulanmaya devam etmektedir [178-182]. PID kontrol tarafından kontrol edilecek olan prosesin matematiksel modelinin iyi bilinmesine gerek olmadığı ve kontrol parametrelerini tatminkâr şekilde ayarlanabildiği görülmüştür. Denklem 5.1'de PID kontrol yöntemini temel yapısı görülmektedir.

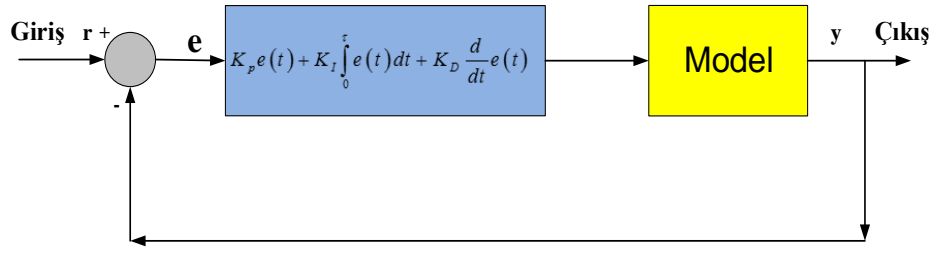
$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (5.1)$$

Bir PID sistemi incelenirken K_p , K_d ve K_i değerlerinin sistem üzerindeki etkileri aşağıda açıklanacaktır.

K_p ; Oransal kontrol olup yükselme zamanını azaltacak fakat kalıcı hal hatasını ortadan kaldırmayacaktır.

K_i ; İntegral kontrol olup kalıcı hal hatasını azaltmakta etkili fakat geçici hata üzerinde olumsuz tesir bırakabilmektedir.

K_d ; Türevsel kontrol olup sistemin kararlılığının artmasında, maksimum aşmanın azaltılmasında ve geçici azalmanın gelişmesinde etkili olmaktadır. Genel olarak sistemi şekilde verildiği gibi ifade edebiliriz.



Şekil 5.3. PID geri beslemeli sistem

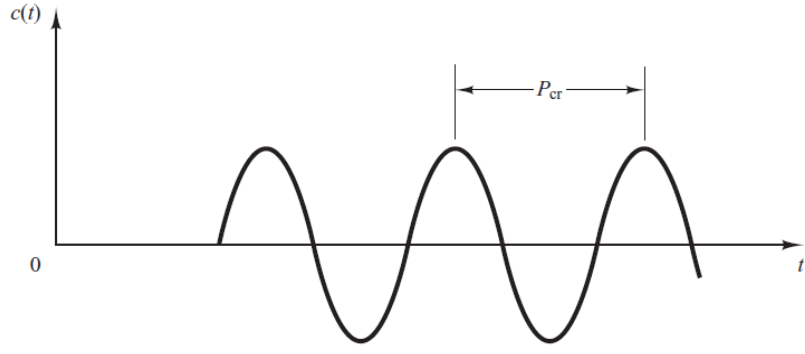
Tablo 5.1. PID kontrol parametrelerinin sistem üzerindeki etkisi

Kontrol	Yükselme zamanı	Aşım	Yerleşme zamanı	Sürekli hal hatası
K_p	Azalır	Artar	Az Değişir	Azalır
K_i	Azalır	Artar	Artar	Sıfırlar
K_d	Az Değişir	Azalır	Azalır	Değişmez

PID katsayıları çeşitli yöntemlerle ayarlanabilmektedir[183-187]. Bu çalışmada PID katsayılarının bulunmasında John G. Ziegler ve Nathaniel B. Nichols tarafından ileri sürülen Ziegler-Nichols yöntemi kullanıldı[188] ve bu yöntem içerisinde de kapalı çevrim kontrol tipi kullandı.

Kapalı çevrim ile uğraşırken alacağımız hata sinyali genel olarak bir salınım şeklinde sürekli hataya giden bir salınım olacaktır. Bu salınımın periyodu ve aşımı dikkate alınarak Ziegler-Nichols yöntemi ile sonuca ulaşmak mümkün olabilecektir. Bu yöntem bir deneysel yaklaşım modelidir.

Sistemin çıkış salınımının her bir periyodunu P_{cr} ile ve salınımın en yüksek kazancı K_{cr} ile ifade edilirse K_p , K_i , K_d değerleri için Tablo 5.1'deki formüller kullanıldı[189].



Şekil 5.4. Sürekli salınım süresi (saniye cinsinden)[189]

Tablo 5.2. Ziegler-Nichols katsayı ayarlama kuralı K_{cr} kritik kazanç ve P_{cr} kritik periyot[189]

Denetleyici Tipi	K_P	K_I	K_D
P	$0.5 * K_{cr}$	∞	0
PI	$0.4 * K_{cr}$	$0.8 * P_{cr}$	0
PID	$0.6 * K_{cr}$	$0.5 * P_{cr}$	$0.125 * P_{cr}$

Yukarıdaki formülleri sistemimize uygulamak için hata sinyalinin salınımının belirli bir oranda ve sürekli olması gereklidir. Burada sistemimiz lineer olmadığı için K_p oransal kazanç katsayısı ile uygun değerini seçerek sistemimizin hatasını indirmeye çalışıldı. K_p değeri için farklı değerler denedikten sonra görüldü ki belirli bir değerden sonra sistemimizi olumsuz etkilemektedir. Sistemimiz farklı periyotlarda çalıştığından her bir eksen için farklı katsayılar elde edildi.

Tablo 5.3. PID kontrol katsayıları

	K_P	K_I	K_D
X	4	2	0.4
Y	4	2	0.35
Z	4	0.45	2

K_p 'nin artırılması kalıcı durum hatasına sebep olmaktadır. Kalıcı durum hatasını gidermek için literatürde birçok çalışmada K_i kullanılmaktadır. K_i değeri ise hataların

toplamı üzerinden devam ettiğinden hedeflenen ulaşma süresini uzattığı görülmüştür. Kd ise kısa zamanda cevap vermektedir. Bu sebeple PID kontrol kullanıldı.

5.5. Hesaplanmış Tork Kontrol Yöntemi (Computed Torque Control Method- CTC)

Hesaplanmış tork kontrol robotların kontrolünde yaygın olarak kullanılan robust ve doğrusal olamayan bir denetleyicidir. Bu kontrol sistemi geri beslemeli lineerleştirmeye dayanan doğrusal olamayan geri beslemeli kontrol yasasını kullanarak sistem için gerekli tork değerlerini hesaplamaktadır. Hesaplanmış tork kontrol (CTC) bir model tabanlı kontrol sistemidir. Bir sisteme bozucu etki olmadığında çıkış, referans sinyalinin hatasız takip etmektedir. Sistem bozucu etki altında hatalı takip etmektedir. Bu durumu ortadan kaldırmak sisteme etki eden bozucu sinyalin tam tersi büyüklükte bir giriş sinyali eklenerek hata sıfırlanmaya çalışılır.

Sisteme etki eden bozucu etkiler eklem torklarıdır. Bu tork değerleri hesaplanıp sisteme pozitif olarak eklenir. Sisteme girilecek bu tork değerlerinin hesaplanmasına ileri beslemeli hesaplanmış tork (Feedforward Computed Torque) kontrol methodu denir. Bu methodda aslında sisteme giren doğrusal olmayan bozucu sinyallerin modellenip bu modelin sistem içerisinde yok edilebilmesidir. Sisteme girilecek olan tork değerlerinin doğru bir şekilde hesaplanması gerekir. Bu kontrol methodu için sistemin dinamik modelinin iyi bilinmesi gereklidir[190].

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + F(\dot{q}) + G(q) + \tau_d = \tau \quad (5.2)$$

$$N(q) = C(q, \dot{q})\dot{q} + F(\dot{q}) + G(q) + \tau_d \quad (5.3)$$

Robot kolunun her bir mafsalı için gerekli olan tork değerleri denklem 5'den hesaplandı. Sistemin ters kinematikinden elde edilen istenen ivmenin kontrolör ile düzeltilmesi sonucu birim atalet ivmesi oluşur. Her bir mafsala uygulanan torklar bu kontrol sinyali ile ayarlanan hesaplanan tork sistemine giriş sinyali olarak verildi.

$$M(q)\ddot{q} + N(q, \dot{q}) = \tau + \tau_d \quad (5.4)$$

Bu arzu edilen yörüngeyi takibini garantileyen, doğrusal olmayan bir kontrol kuralıdır. Robot kolunun takip etmesi istenen yörüngeyi önceden tanımlanacağı gerçeğinden yola çıkarak takip hatası,

$$e(t) = q_d(t) - q(t) \quad (5.5)$$

Yukarıdaki denklemde q_d istenen eklem yörüngeyi ifade etmekte q ise gerçek yörünge göstermektedir. 5.3 nolu denklemde kullanmak için 1. ve 2. dereceden türevleri alındı.

$$\dot{e}(t) = \dot{q}_d(t) - \dot{q}(t) \quad (5.6)$$

$$\ddot{e}(t) = \ddot{q}_d(t) - \ddot{q}(t) \quad (5.7)$$

5.5 ve 5.6 nolu denklemleri 5.3 nolu denklemde yerine yazılarak hata için genel bir formül oluşturulur.

$$\ddot{e}(t) = \ddot{q}_d(t) + \frac{N(q, \dot{q}) + \tau_d - \tau}{M(q)} \quad (5.8)$$

$$\ddot{q}(t) = \frac{\tau - N(q, \dot{q}) - \tau_d}{M(q)} \quad (5.9)$$

Yukarıdaki denklemlerin içinde normal tork denkleminimize ek olarak çevreden sisteme etki eden bozucu kuvvetler τ_d işaretiyle gösterildi. τ_d ifadesini denklemden çıkarmak için 5.9 nolu denklem kullanıldı.

$$\ddot{e}(t) = u(t) - w(t) \quad (5.10)$$

Denklemde u (kontrol fonksiyonunu) ve w (bozucu fonksiyonu) temsil eder ve u ve w denklemleri 5.10 ve 5.11' de gösterildi.

$$u(t) = \ddot{q}_d(t) + \frac{N(q, \dot{q}) - \tau}{M(q)} \quad (5.11)$$

$$w(t) = \frac{\tau_d}{M(q)} \quad (5.12)$$

5.10 nolu denklem kullanılarak kontrol fonksiyonu u 'ya bağlı tork fonksiyonu 5.11 nolu denklemde gösterildi.

$$\tau = N(q, \dot{q}) - M(q)(u - \ddot{q}_d) \quad (5.13)$$

Kontrol fonksiyonu tasarlama robust, PID, adaptif vb. gibi birçok yöntem kullanılır.

5.6. PD Tabanlı Hesaplanmış Tork Kontrol Yöntemi (Computed Torque Control Method)

PD kontrol çalışmasında hata ve hatanın türevi değerleriyle oluşturulan kontrol fonksiyonu 5.14'de gösterildi.

$$u = (-K_p e - K_d \dot{e}) \quad (5.14)$$

Bu durumda 5.13 nolu denklemde gösterilen tork ve hata denklemlerine yukarıda gösterilen kontrol ifadesi yerine yazılarak 5.15, 5.16 ve 5.17 'deki denklemler elde edildi.

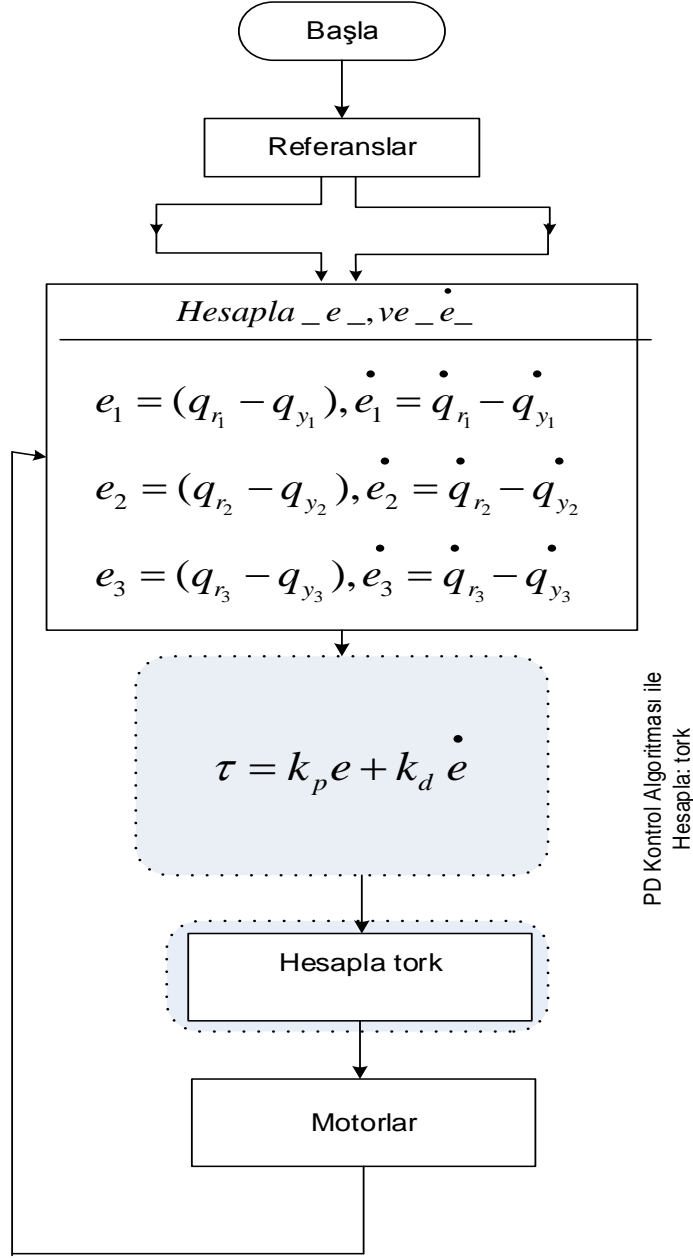
$$\tau = N(q, \dot{q}) - M(q)(-K_p e - K_d \dot{e} - \ddot{q}_d) \quad (5.15)$$

$$\tau = N(q, \dot{q}) + M(q)(K_p e + K_d \dot{e} + \ddot{q}_d) \quad (5.16)$$

$$\ddot{e}(t) = -K_p e - K_d \dot{e} - w(t) \quad (5.17)$$

5.17'deki denklemden bozucu fonksiyon yalnız bırakılarak aşağıdaki denklem edildi.

$$w(t) = \ddot{e}(t) + K_p e + K_d \dot{e} \quad (5.18)$$



Şekil 5.5. PD kontrol akış Şeması

Sistemin karakteristik polinomu denklem 5.18 'de gösterildi.

$$\Delta(s) = |s^2 + K_d s + K_p| \quad (5.19)$$

Standart bir olarak 2. dereceden bir polinomun genel ifadesi 5.20 'de gösterildi.

$$p(s) = s^2 + 2\zeta w_n(t) + w_n^2 \quad (5.20)$$

5.20 'deki denklemde ζ sönümlenme oranını ve omega ω_n doğal frekansı göstermektedir.

$$K_p = \omega_n^2 \quad K_d = 2\zeta\omega_n \quad (5.21)$$

PD kontrolcüde genelde kritik sönümlenme oranı $\zeta = 1$ olarak alınır.

$$K_p = \frac{K_d^2}{4} \quad K_d = 2\sqrt{K_p} \quad (5.21)$$

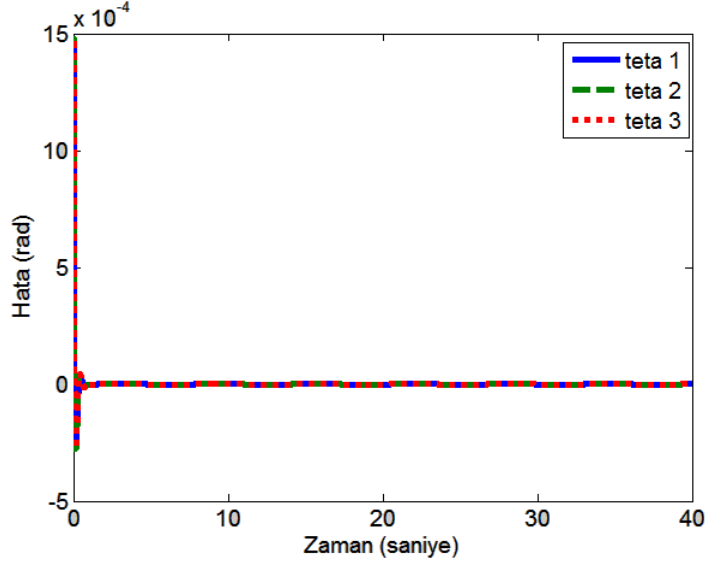
Doğal frekans hatalara cevap verme süresi ve minimuma indirilebilmesi için önemlidir. Bu şekilde arzu edilen ω_n bu hususlar dikkate alınarak seçilmelidir.

Doğal frekans seçimleri için üst limitler vardır ve en genel ifade 5.22 nolu denklemde gösterildi.

$$\omega_n = \frac{\omega_r}{2} \quad \omega_r = \sqrt{\frac{k_r}{J}} \quad (5.22)$$

5.22 nolu denklemde gösterilen sistemin doğal frekansını ω_n , J eklemin ataletini(inertia) k_r katılık (stiffness) göstermektedir. J değeri 0.01 kg/m^2 ve katılık değeri 2.56 N/m ve doğal frekans 16 Hz alındı. Tasarlanan PD kontrolcüde sürekli hal hatası mevcuttur.

Hatayı tamamen yok etmek mümkün olmadığından minimuma indirilmeye çalışıldı. $K_p=400$, $K_d=30$ kullanılarak çizdirilen grafik şekil 5.6 gösterildi.



Şekil 5.6. PD kontrol hata grafiği

5.7. PID Tabanlı Hesaplanmış Tork Kontrol Yöntemi (Computed Torque Control Method)

PID tabanlı hesaplanmış tork kontrol yönteminde sisteme PD kontrolden farklı olarak hatanın integrali 5.23 nolu denklem kullanılarak eklendi.

$$\dot{\varepsilon} = e \quad (5.23)$$

Kontrol fonksiyonuna 5.23'deki ifade eklendiğinde 5.24 nolu denkleme dönüşmektedir.

$$u = (-K_i \varepsilon - K_p e - K_d \dot{e}) \quad (5.24)$$

Bu durumda 5.13 nolu denklemde gösterilen tork ve hata denklemlerine yukarıda gösterilen kontrol ifadesi yerine yazılarak 5.25 ve 5.26'daki denklemler elde edildi.

$$\tau = N(q, \dot{q}) + M(q)(K_i \varepsilon + K_p e + K_d \dot{e} + \ddot{q}_d) \quad (5.25)$$

$$\ddot{e}(t) = -K_i \varepsilon - K_p e - K_d \dot{e} + w(t) \quad (5.26)$$

5.26'daki denklemden bozucu fonksiyon yalnız bırakılarak aşağıdaki denklem edildi.

$$w(t) = \ddot{e}(t) + K_d \dot{e} + K_p e + K_i \varepsilon \quad (5.27)$$

Sistemin karakteristik polinomu denklem 5.28 'de gösterildi.

$$\Delta(s) = s^3 I + K_d s^2 + K_p s + K_i \quad (5.28)$$

Yukarıdaki denklemde sistemin kararlılığı için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu çalışmada Routh-Hurwitz yöntemi kullanıldı.

5.7.1. Routh-Hurwitz kriteri:

Sabit katsayılı karakteristik denkleme sahip lineer sistemlerin mutlak kararlılığı hakkında bilgi verir. Gerekli fakat yeterli olmayan şart,

$$F(s) = a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_{n-1} s + a_n = 0 \quad (5.29)$$

1- Polinomun bütün katsayıları aynı işaret olmak zorundadır.

2- Katsayılardan hiçbiri sıfır olmamalıdır.

Gerekli ve yeterli şart Routh Tablosunun 1. kolonun aynı işarete sahip olmasıdır.

Tablo 5.4. Routh Tablosunu oluşturma

	$a_0s^n + a_1s^{n-1} + a_2s^{n-2} + a_3s^{n-3} + \dots + a_{n-1}s + a_n$			
S^6	a_0	a_2	a_4	a_6
S^5	a_1	a_3	a_5	$a_7 = 0$
S^4	$\frac{a_1 \cdot a_2 - a_0 \cdot a_3}{a_1} = A$	$\frac{a_1 a_4 - a_0 a_5}{a_1} = B$	$\frac{a_1 a_6 - a_0 \cdot 0}{a_1} = a_6$	0
S^3	$\frac{A \cdot a_3 - a_1 \cdot B}{A} = C$	$\frac{A \cdot a_5 - a_1 \cdot a_6}{A} = D$	$\frac{A \cdot 0 - a_1 \cdot 0}{A} = 0$	0
S^2	$\frac{B \cdot C - A \cdot D}{C} = E$	$\frac{C \cdot a_6 - A \cdot 0}{C}$	$\frac{C \cdot 0 - A \cdot 0}{C} = 0$	0
S^1	$\frac{E \cdot D - C \cdot a_6}{E} = F$	0	0	0
S^0	$\frac{F \cdot a_6 - E \cdot 0}{F} = a_6$	0	0	0

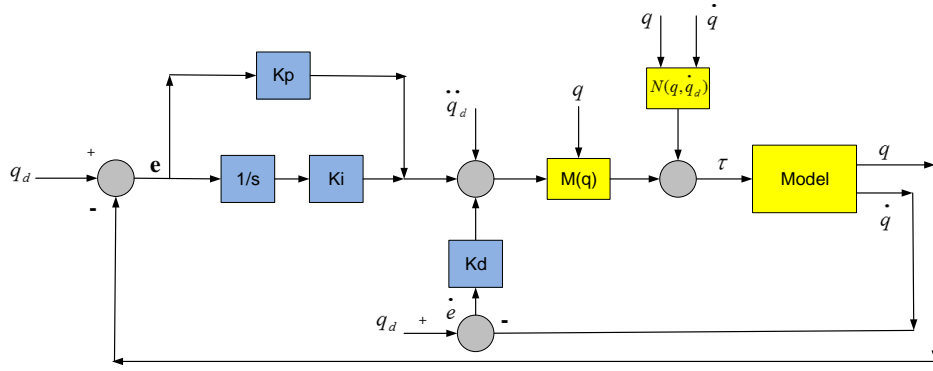
1- kolondaki elemanların işaret değiştirme sayısı sağ kompleks düzlemdeki kök sayısına eşittir[191].

$$a_3=1, a_2=K_d, a_1=K_p, a_0=K_i \quad (5.30)$$

$$\frac{a_2 \cdot a_1 - a_0 \cdot a_3}{a_2} = b_1 \quad \frac{b_1 a_0}{b_1} = a_0 \quad (5.31)$$

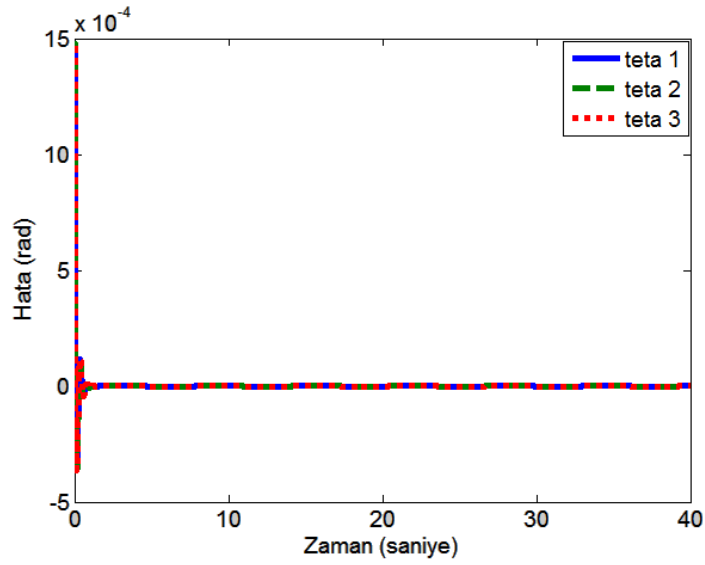
$$a_2 \cdot a_1 - a_0 \cdot a_3 > 0 \quad (5.32)$$

$$K_d \cdot K_p > K_i \quad (5.33)$$



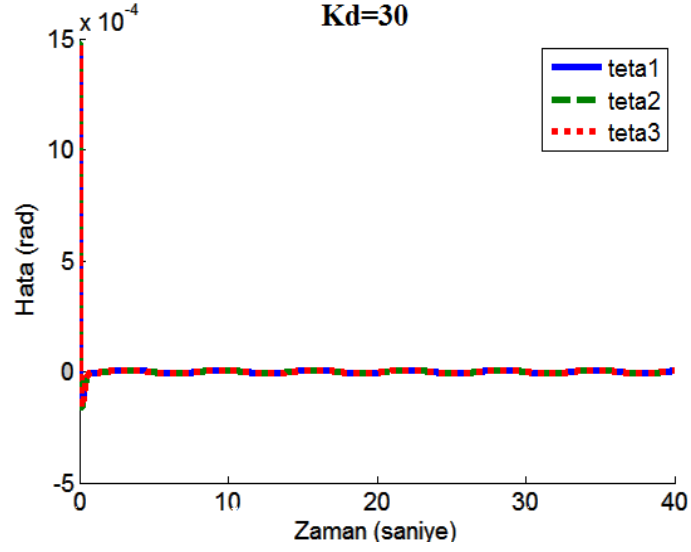
Şekil 5.7. PID kontrol modeli

Kontrol modelindeki en önemli husus integratör çarpanının konum hatası kullanılarak işlem yapılmasıdır.

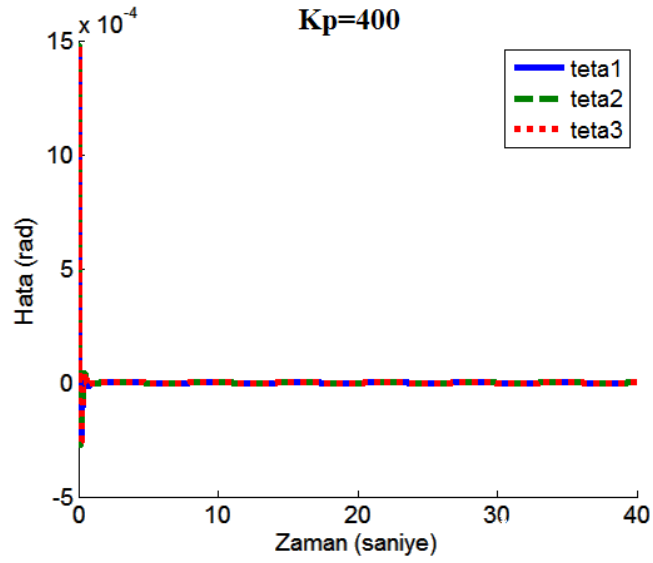


Şekil 5.8. $K_i=12000$ hata grafiği

$K_i=12000$ için 1.189 saniyede sıfırdan başlayacak şekilde sürekli bir hal hatası sirkülasyonuna girdiği görüldü. Bu sürekli hal hatasına girmeden önceki durumda da belli bir sirkülasyona sahiptir ve çok düşük hatalar içermektedir.



Şekil 5.9. Kd=30 hata grafiği



Şekil 5.10. Ki=400 hata grafiği

Kp=400, Kd=30, Ki=12000 en uygun değerler olduğu görüldü.

5.8. Kendinden Uyarlamalı (Adaptive) Kontrol

Adaptif (uyarlamalı) kontrol, endüstriyel kontrol sistemlerinde her geçen gün kullanımının artmasıyla son derece önemli bir çalışma alanı olmuştur. Bir adaptif kontrolör, sistem dinamiği ve bozucu etkideki değişime karşı kendi davranışını değiştirebilen bir kontrolör olarak tanımlanmaktadır. Birçok kaynakta (Aström ve

Wittenmark 1995;Aström 1993;Kumar 1985;Aström 1987;Ioannou ve Data 1991) adaptif kontrol detaylı olarak anlatılmaktadır. Gerçek çalışma şartlarında robotta ve iç ve dış bozucu etkilerin meydana geldiği görülmüştür. İşte bu gerçek şartlar altında bozucu etkileride hesaba katıp dayanıklı (robust) ve kendinden uyarlamalı kontrol bu çalışmada kullanıldı[192-193].

Bir kontrol sistemini tasarlariken yapılacak ilk şey kontrolü gerçekleştirilecek sistemin matematiksel modeli elde edilmesi olacaktır. Bu sistem gerçek zamanlı çalışma olduğu için matematiksel modellerle sistemi ifade edebilmek birçok tahmin ve yaklaşımı beraberinde getirmektedir. Ne kadar iyi bir matematiksel model oluşturulursa da yine de her zaman problemler meydana gelmektedir ve tam bir matematiksel model etmek zordur. Bütün bozucu etkilere rağmen sistemin verimli çalışabilmesi istenmektedir.

Robust kontrol teorisi bu etkilere karşı sistemi minimize etmek adına çalışmaktadır. Amaç daha stabil (kararlı) ve tutarlı bir sistem elde etmektir. Robust kontrolde teorisinde yaklaşım her zaman gerçek sistemle onun matematiksel modeli arasında kontrol tasarımı oluşturulurken tutarsız (uncertainty) parametreleri olduğu varsaymakla oluşturulur. Böylece bu tutarsız etmenleri veya hata faktörlerini, kontrol sisteminin tasarlanması sürecinde sisteme dahil edilmesi ile gerçekleşir fakat bu kararsızlık etmenlerinin ya da hatanın gerçek değeri bilinmediğinden, tahmini bir değer ataması yapılır ve sisteme dahil edilerek analizi gerçekleştirilir. Bu analiz sürecinde uygulanan en etkili yöntem ise H-infinity teorisidir. Gürbüz kontrolün amacı, hedef empedans gibi hedef dinamikleri başarmak ve robot ve çevresinde kesin olmayan sınırlı model bilgilerinin *-linklerin esnekliği, sürtünmeler, temas yüzey modeli-* (model hatası olarak ta bilinir) varlığı durumunda kararlı kontrolü sağlamaktır.

Adaptif kontrol, bilinmeyen parametre ve çevre şartlarında kontrol performansının yüksek tutulmasını amaçlamaktadır. Adaptif kontrolör, arzu edilen rijitlik, empedans, admitans v.b. parametreleri kararlı kılmak için adaptif stratejileri gerçekleştirir. Arzu edilen kuvvet ve konum yörüngeleri takibi garanti altına alınmaktadır.

5.8.1. Kendinden uyarlamalı hesaplanmış tork kontrol yöntemi (adaptive computed torque control method)

Robotik çalışmalarda parametrelerin belirsizliğini gidermek amacıyla uyarlamalı kontrol kullanılmaktadır. Bu belirsizlikleri önlemek veya minimum seviyeye indirebilmek için iyi bir adaptif kontrol sistemi oluşturulmalı ve bu belirsizlikler için sağlam bir güncelleme kuralı oluşturulmalıdır. Adaptif algoritma ile değişen veya yanlış belirlenen model değişkenlerini sürekli olarak kontrol ederek doğru ve tam olarak belirlenmesi hatayı sıfıra indirmektedir.

Bu adaptasyon işlemi hata kaybolana kadar doğrusal olmayan modeldeki değişkenleri teker teker güncelleyerek sistemin kendi dinamik özelliklerini öğretir. Adaptif hesaplanmış tork kontrol modeli uygulaması için hata sisteminin denklemi 5.34 'de gösterilmiştir.

$$\tau = W(q, \dot{q}, \ddot{q})\varphi \quad (5.34)$$

$W(q, \dot{q}, \ddot{q})$ zamana bağlı değişen bir fonksiyon, φ bilinmeyen parametreleri ifade etmektedir. Bu denklemi yukarıdaki bölümlerde ifade ettiğimiz tork denklemine uygulandığında 5.35 'teki denklem elde edildi.

$$W(q, \dot{q}, \ddot{q})\varphi = M(q)(\ddot{q}) + C(q, \dot{q})(\dot{q}) + F(\dot{q}_d) + G(q) \quad (5.35)$$

Denklem 5.35 'e hesaplanmış tork kontrol ifadeleri eklendiğinde 5.36' daki durum şekline dönmektedir.

$$W(q, \dot{q}, \ddot{q})\varphi = M(q)(\ddot{q}_d + K_d \dot{e} + K_p e) + C(q, \dot{q})(\dot{q}) + F(\dot{q}_d) + G(q) \quad (5.36)$$

Sisteme etki eden her türlü bozucu giriş sistemin dinamiğini etkileyecektir. Bu sebeple bu bozucu etki değerlerinin gerçek değerini bilinmediğinden tahminsel bir ifade denkleme eklendi. Bu nedenle denklem tekrar düzenlendiğinde son hali 5.37'de gösterildi.

$$W(q, \dot{q}, \ddot{q})\varphi = \hat{M}(q)(\ddot{q}_d + K_d \dot{e} + K_p e) + \hat{C}(q, \dot{q})(\dot{q}) + \hat{F}(\dot{q}_d) + \hat{G}(q) \quad (5.37)$$

Denklemden tahmin edilen değerlere ‘^’ işareti bırakıldı. Hata ifadesi istene durum konum ve gerçek konum arasındaki farktan meydana gelmektedir. Bu denklem düzenlendiğinde 5.38 ‘de son hali gösterildi.

$$\ddot{q}_d = \ddot{e} + \ddot{q} \quad (5.38)$$

Bu durumda 5.37 nolu denklemde gösterilen tork denkleminde yukarıda gösterilen hata ifadesi eklendiğinde 5.39 ‘daki denklem, ayrıca 5.35 deki denkleme 5.39’daki denklem eklendiğinde 5.40 ‘daki denklemler elde edildi.

$$\tau = \hat{M}(q)(\ddot{e} + K_d \dot{e} + K_p e) + \hat{M}(q)(\ddot{q}) + \hat{C}(q, \dot{q})(\dot{q}) + \hat{F}(\dot{q}_d) + \hat{G}(q) \quad (5.39)$$

$$\tau = \hat{M}(q)(\ddot{e} + K_d \dot{e} + K_p e) + W(q, \dot{q}, \ddot{q})\hat{\varphi} \quad (5.40)$$

Denklemlerde görüldüğü gibi bilinmeyen parametre hataları tahmin edilerek denklemlerin içine eklendi. Parametre hataları 5.41 ‘deki ifade ile elde edildi.

$$\vec{\varphi} = \varphi - \hat{\varphi} \quad (5.41)$$

φ gerçek parametre değerlerini $\hat{\varphi}$ tahmin edilen parametre değerlerini iki ifadenin farkı ise $\vec{\varphi}$ parametre hatalarını ifade etmektedir. 5.34 ve 5.40 ‘daki denklemler birleştirildiğinde 5.42, 5.43, 5.44 ‘deki denklemler elde edildi.

$$M(q)(\ddot{e} + K_d \dot{e} + K_p e) + W(q, \dot{q}, \ddot{q})\hat{\varphi} = W(q, \dot{q}, \ddot{q})\varphi \quad (5.42)$$

$$\ddot{e} + K_d \dot{e} + K_p e = \hat{M}^{-1}(q)W(q, \dot{q}, \ddot{q})(\varphi - \hat{\varphi}) \quad (5.43)$$

$$\ddot{e} + K_d \dot{e} + K_p e = \hat{M}^{-1}(q)W(q, \dot{q}, \ddot{q})\vec{\varphi} \quad (5.44)$$

5.44'deki denklem durum uzayı formunda yazıldığında denklem, hata vektörü ve A, B katsayıları 5.45 ve 5.46'da gösterildiği gibi olacaktır. I_n birim matris ve Q_n sıfır matrisi olarak alındı.

$$\dot{e} = Ae + B M^{-1} (q) W(q, \dot{q}, \ddot{q}) \varphi \quad (5.45)$$

$$e = \begin{bmatrix} e \\ \dot{e} \\ e \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} I_n \\ Q_n \end{bmatrix} \quad A = \begin{bmatrix} Q_n & I_n \\ -K_p & -K_d \end{bmatrix} \quad (5.46)$$

Hata vektörünün kararlı olup olmadığı bakılmalıdır. Bunun için Lyapunov kararlılık analizi yapılmalıdır. Lyapunov kararlılık analizi yapılırken öncelikle $V(x)$ şeklinde bir Lyapunov fonksiyonu belirlenmelidir. Bu denklemler $x=0$ için aşağıdaki eşitliklere uyuyorsa sistemin kararlı olduğu anlaşılır.

$$\begin{aligned} x \neq 0 \text{ için } V(x) &> 0 \\ x \neq 0 \text{ için } \dot{V}(x) &< 0 \\ \|x\| \rightarrow \infty \text{ için } V(x) &\rightarrow \infty \\ V(0) &= 0 \end{aligned} \quad (5.47)$$

Sistemin kararlı olabilmesi için gerekli durumlar Lyapunov metoduyla uyarlamalı kontrol sistemi içine yerleştirilebilir ki bu sistem 4 adımda aşağıda anlatılmıştır; İlk olarak hata eşitliklerinin türevi alındı. İkinci olarak, parametre hataları (sistemin iç dinamiğinden gelen hatalar) ve sinyal hatalarını (iç dinamiklerin hatasız kabul edildiği kontrol sisteminden kaynaklanan hatalar) ifade eden bir denklem oluşturuldu. Sinyal hatasını “e” ve parametre hatalarını “ $\vec{\varphi}$ ” ile aşağıdaki formül seçilerek işlem gerçekleştirildi.

$$V = e^T P e + \vec{\varphi}^T \Gamma^{-1} \vec{\varphi} \quad (5.48)$$

Yukarıdaki denklemde V'nin Lyapunov analizine uygun bir yapıda olabilmesi için P pozitif, sabit ve simetrik bir matris ve Γ köşegen ve pozitif bir matris olmalıdır.”

γ “ pozitif ve sabit olmak koşuluyla ” Γ “ matrisini aşağıdaki gibi yazmak mümkündür.

$$\Gamma = \text{diag}(\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_r) \quad (5.49)$$

Üçüncü adımda ise yukarıda seçilmiş olan Lyapunov fonksiyonunun zamana göre türevi alınır. Eğer ki türev “ – “ ise kararlılık belirlenmiş olur.

$$\dot{V} = -e^T Q e + \text{parametre hatasına bağlı terimler} \quad (5.50)$$

P ve Q matrisleri Lyapunov analizi ile belirlenebilir. Q matrisi pozitif tanımlı, simetrik bir matristir. Pozitif bir Q matrisi Lyapunov eşitliklerinden çıkarımla beraberinde pozitif simetrik bir P matrisi getirecektir.

$$A^T P + P A = -Q \quad (5.51)$$

Dördüncü adımda ise bazı ekstra eklentiler yardımıyla da ifade edilebilmektedir ki bu eklentiler sıfıra eşit olmalıdır. Kararlı uyarlamalı kontrol modeli elde etmek için bazı değişikliklere ihtiyaç duyulmaktadır. ε durum hatasının elementlerinin lineer bir kombinasyonunu ifade etmektedir. ξ ise w vektörüne bağlıdır.

$$\dot{\theta} = -\Gamma \varepsilon \xi \quad (5.52)$$

Sistemimizi Lyapunov teorisi kullanarak kararlılık analizine tabi tuttuğumuzda zaman bağlı türevlerinin alınması gerekmektedir. Bu nedenle zamana bağlı türevleri alındığında 5.53 ‘teki hali alacaktır.

$$\dot{V} = e^T P \dot{e} + \dot{e}^T P e + 2 \varphi^T \Gamma^{-1} \dot{\varphi} \quad (5.53)$$

5.54’teki eşitlikten yararlanılarak 5.53 teki denklem elde edildi.

$$\left[\begin{array}{c} \varphi^T \Gamma^{-1} \varphi \\ \varphi^T \Gamma^{-1} \dot{\varphi} \end{array} \right]^T = \varphi^T \Gamma^{-1} \dot{\varphi} \quad (5.54)$$

5.45' te verilen durum uzay modeli 5.53 ' te yerine yerleştirildiğinde 5.55 ve 5.56'daki denklemler elde edildi.

$$\dot{V} = e^T P (Ae + B M^{-1} \dot{\varphi}) W(q, \dot{q}, \ddot{q}) \varphi + (Ae + B M^{-1} \dot{\varphi}) W(q, \dot{q}, \ddot{q})^T P e + 2 \varphi^T \Gamma^{-1} \dot{\varphi} \quad (5.55)$$

$$\dot{V} = e^T Q e + 2 \varphi^T (\Gamma^{-1} \dot{\varphi} + W(q, \dot{q}, \ddot{q})^T \hat{M}^{-1}(q) B^T P e) \quad (5.56)$$

5.56 nolu denklem 5.55 nolu denklemin sadeleştirilmiş şeklidir. Bu denklem 5.50 nolu denkleme benzemekte ve 5.56 nolu denklemde “ $\dot{\varphi}$ “ yerine 5.57 nolu denklemdeki eşitlik yerine yazıldığında ve eklenti terimler çıkarıldığında 5.58 nolu denklem elde edildi.

$$\dot{\varphi} = -\Gamma W(q, \dot{q}, \ddot{q})^T \hat{M}^{-1}(q) B^T P e \quad (5.57)$$

$$\dot{V} = -e^T Q e \quad (5.58)$$

Güncelleme kuralı oluşturulabilmesi için 5.41 nolu denklemi 5.57 nolu denklemde yerine yazılarak 5.59 nolu denklem elde edilir. Bu kısımda dikkat edilmesi gereken durum gerçek parametrik değerlerin değişmediğidir. Gerçek parametre değerlerinin türevi sıfıra eşit olacaktır.

$$\dot{\varphi} = \dot{\varphi} - \dot{\varphi} \Rightarrow \dot{\varphi} = 0 - \dot{\varphi} \quad (5.59)$$

5.59 nolu denklem 5.57 nolu denklemde yerine yazıldığında 5.60 nolu denklem elde edildi.

$$\dot{\varphi} = -\Gamma W(q, \dot{q}, \ddot{q})^T \hat{M}^{-1}(q) B^T P e \quad (5.60)$$

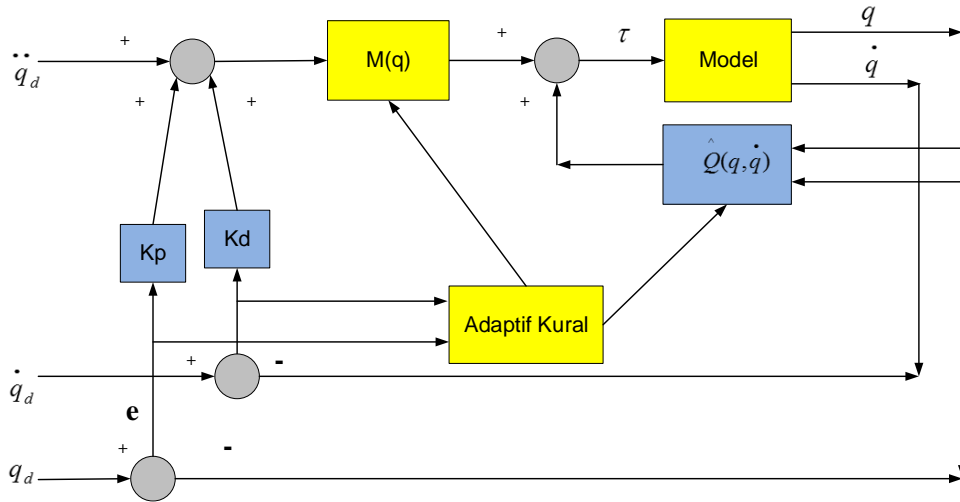
5.60 nolu denklem uyarlamalı güncelleme kuralı olarak seçildi ve sistemin içine eklendi. Sistem kararlılık analizine V fonksiyonu üzerinden devam edildiğinde sınır

koşulları sebebiyle aşağıdaki denklemlere ulaşılabacaktır ve sistemimizin kararlı olduğu görülmüş olacaktır.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} V = V_{\infty} \quad (5.61)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{V} = 0 \quad (5.62)$$

Son olarak tork kontrolcümüz kullanılacak ve güncelleme kuralımız 5.60 nolu elde edilen denklem kullanılacak ve diğer kuralların sağlanması gereklidir. Güncelleme kuralı oluşturulduktan sonra hesaplamalı tork sisteminin üzerinde değişiklikler yapılacaktır. Şekil 6.2’de görüldüğü gibi ters dinamik denklem birimlerinin içerisine adaptif kontrol bloğu üzerinden sistemin sürekli kendisini düzeltmesi için yeni parametre değerleri dahil edilerek kontrol hedeflenmektedir.



Şekil 5.11. Adaptif sistemin kontrol blok diyagramı

Bu sistemde bu değişken parametreler eklemlerin kuvvetleri ve çevresel kuvvetlerdir. Bu nedenle ters tork denklemlerinin içinde bulunan kütle değerleri değişken olarak tanımlanmıştır. Adaptif kontrol bloğunun içinde 5.60 nolu denklemde ifade edilen güncelleme kuralı kullanıldı.

“ Γ ” işareti ile gösterilen $(r \times r)$ boyutlu pozitif kazanç matrisi olup 600 olarak hesaplanmıştır. Oransal kontrol katsayısında olduğu gibi belli bir değerden sonra

bozuntuya sebebiyet vermeye başlamakta ve kalıcı durum hatasını olumsuz etkilemeye başlamaktadır. Robotumuzun ilk 3 eksenini kontrol edeceğimizden matrisin 5.63' te gösterildi.

$$\Gamma = 600 \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.63)$$

5.34 nolu denklemde gösterildiği gibi regresyon matrisi sistemin bilinmeyen parametrelere ile çarpıldığında tork'a eşit olmakta ve sistemimizin bilinmeyenleri kütleler ve çevresel kuvvetlerdir. Regresyon matrisi 5.34 nolu denklemin her iki tarafını bilinmeyen parametrelerin tersi ile çarpılarak elde edildi.

$$\tau\varphi^{-1} = W(q, \dot{q}, \ddot{q})\varphi\varphi^{-1} = W(q, \dot{q}, \ddot{q}) \quad (5.64)$$

\hat{M} kütle matrisinin içinde sürekli değişken bilinmeyen parametre değerlerini ifade etmektedir. Tahmin edilen parametre değerlerine göre değişmektedir. B ifadesi sistemi ve kontrol amaçlı P matrisi kullanılarak çarpma işlemine tabi tutulur. Bu ifadenin sonucu hata değeri ile anlık olarak çarpılarak güncelleme kuralı oluşturuldu. 5.51 nolu denklemde sistemin analizi için kullanılan denklem verilmiştir. 5.46 nolu denklemde verilen A matrisi denklemdeki şekilde alınmıştır. P ve Q matrisi 5.65 ve 5.66 nolu denklemlerde verilmiştir. Yapılan analizler sonucunda kullanılan denklemlerin doğruluğu gösterilmiştir.

$$P = \begin{bmatrix} P_1 I_n & P_2 I_n \\ P_2 I_n & P_3 I_n \end{bmatrix} = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} (2k_p + k_d) I_n & I_n \\ I_n & 2I_n \end{bmatrix} \quad (5.65)$$

$$Q = \begin{bmatrix} 0.5k_p I_n & 0_n \\ 0_n & 2I_n \end{bmatrix} \quad (5.66)$$

6. KUVVET KONTROLÜ

6.1. Giriş

Haptik cihazlar robot kontrol yöntemlerine benzer bir kaç yolla kontrol edilebilen manipulatörlerdir. Ancak haptik cihazlar haptik arayüzler dahil bütün bir sistemi dikkate almak zorundadır. Haptik arayüz kontrolü bu duruma göre yapılmalıdır. Çünkü haptik arayüzler kuvvet yansıtan sistemlerdir ve kuvvet kontrol edilen cihazlardır. Haptik cihazların kökeni 1950 yıllarına dayanır. Bu yıllarda master kollar radyoaktif uygulamalarda kullanılmıştır. Daha sonraları kuvvet hissetme yeteneği bu cihazlara eklendi.

Bilgisayarların hesaplama gücü ile daha karmaşık master kolları inşa edildi. Belli bir zamandan sonra, araştırmacılar bu cihazların kuvvet yansıtmak için sanal ve gerçek uygulamalarda kullanıldığını fark ettiler. Robot mekanizmaların bir sınıfına ait olan kuvvet yansıtan el kontrolcülerini haptik cihazlar olarak genellikle günümüze aktarıldı [194].

Kuvvet dönüştürücüleri ve bu sensörlerin sisteme uygulanma fiyatlarından dolayı piyasadaki haptik cihazların çoğu kuvvet hissetme yeteneğine sahip değildir. Bu nedenle bu cihazlara açık çevrim kuvvet kontrolü uygulanır. Bu metot cihaz dinamikleriyle uygulamanın dinamiklerinden etkilenmeyen hafif bir cihaz yapısı gerektirir. Daha geniş çalışma alanı ve kuvvet yeteneğine ihtiyaç duyulduğu zaman, cihaz yapısı daha fazla hantal olur. Bu durumda kuvvet geribildirim elzemdir [195]. Genel kontrol yöntemleri empedans(impedance) ve admittans (admittance) kontrol olarak isimlendirilir. Kontrol türü sanal/uzak çevrenin davranışına göre şekillenir. Eğer sanal/uzak çevre haptik cihazın hareketlerini algılar ve kullanıcıya yansıtmak üzere bir referans kuvveti üretirse; bu kontrol türüne empedans(impedance) kontrol denir. Tersine, sanal/uzak çevre cihaza uygulanan kuvveti algılar ve bir referans hareketi üretirse; bu kontrol türüne admittance tür kontrol denir [196].

Bu kısımda kuvvet gerçekleştirme ve empedans kuvvet kontrolü açıklanacaktır.

6.2. Kuvvet Gerçekleme

Birçok robotik uygulama manipülatörün çevresi ile temasını gerektirir tutma, kaldırma, boyama v.b. Bu işlemler robotun temasta olduğu bölgeye baskı uygulamasını veya yüzeye yumuşak dokunmasını gerektirir.

Bu nedenle kuvvet, konum ve hız gibi geri besleme parametrelerinin çevresel şartlarla beraber düşünülmesi ve robot eklemlerine uygulanacak tork değerlerinin buna göre ayarlanmasını gerekir.

Haptik arayüzlerin kontrol stratejisinin iyi bir tanımı Ueberle ve Buss[197] tarafından "Bir insanın sanal veya uzaktaki çevreyle çift yönlü etkileşiminin haptik simülasyonu, operatör ve robot arasında hareket-kuvvet kontrolü gerektirir." Robot ve haptik sistem kontrolleri arasındaki karşılaştırma şu şekilde yapılabilir: Robot kontrolü, kuvveti devam ettirmek için mikro kontrolör veya bilgisayarla verilen bir referans veriye ihtiyaç duyar ve sistem bu referansı takip etmeye çalışır. Bununla beraber haptik arayüzlerde, haptik kullanıcının hareketi referans olarak kabul edilir. Bu nedenle, bir kuvvet kullanıcıya yansıtılır ve sistem kullanıcı hareketine etki eder. Başka bir ifadeyle, haptik sistemlerde kullanıcı ve makine etkileşimi bulunur.

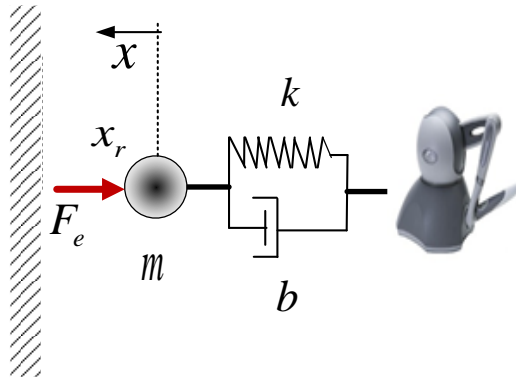
Robotların hareket kontrolünde, istenilen hareket yörüngesi yönetilir ve iç ve dış kuvvetler (çevreyle etkileşimli) istenmez. Bu kontrol türünde, bir nesneyle temas herhangi hareket hatasına yol açarsa, yüksek kazançla bu hatayı sönmülemeye çalışılır. Nesne gergin veya taşınmazsa, zarar görebilir. Diğer taraftan bozucu olarak iç ve dış kuvvetlerin dikkate alınmadığı kontrol algoritmaları vardır. Bu tür kontrol kuvvet kontrolü olarak adlandırılır. Kuvvet kontrol şeması belirgin kuvvet kontrolü ve impedance kontrolü olarak gruplandırılır.

Bugüne kadar yapılmış simülatörlerin çoğu sanal çevre modellemede yoğunlaşmış ve bunlarda kısmen basit kontrol algoritmaları kullanılmıştır. Haptik kontrolde yoğun kullanılan iki adet yöntem vardır. Bu yöntemler impedance kontrol (impedance display mode) ve admittance kontrol (admittance display mode) dür. Sınıflandırma sanal çevrenin davranışına göre yapılmıştır. Admittance hareketi sağlamak için kuvvet dönüştürmedir ve kuvvet geribildirimini söz konusudur. Ancak empedans kontrolde kuvvet geribildirimine gerek yoktur.

6.3. Empedans (Impedance) Kontrol

Empedans kontrol yöntemi Hogan (1985) tarafından önerilen ve uygulamada ilk olarak başarılı performans gösteren bir yöntemdir[198]. Hogan'a göre empedans kontrol sadece yörünge takibine göre değil aynı zamanda mekanik empedansa göre tasarlanmalıdır. Mekanik empedans robotun hızı ile kuvvet arasındaki ilişki olarak tanımlanmaktadır. Empedans kontrol, manipülatör ve çevre arasındaki dinamik etkileşim kontrolüne dayalı bir yaklaşımdır. Bu kontrol türü çevreyle etkileşim ve nesne manipülasyonu için sık kullanılan bir yöntemdir. Genellikle, istenen empedans bir kütle-yay-sönüm sisteminde olduğu gibi, doğrusal ve ikinci dereceden seçilir. Yüksek mertebeden empedansları az bilinen davranış ve ek durum değişkenlerini gerektirir[199-200].

Empedans kontrol problemi, meydana gelen kuvvetlerinin hedef empedans kuralına göre robotun referans konumuyla gerçek konumu arasında bir fark oluşacak biçimde bir kontrol yöntemi tasarımı gerekliliğidir. Kuvvet hareket ilişkisine göre tasarlanmaktadır. Şekil 6.1 de master robot ile sanal duvar arasındaki sanal kütle-yay-damper sistemi gösterildi.

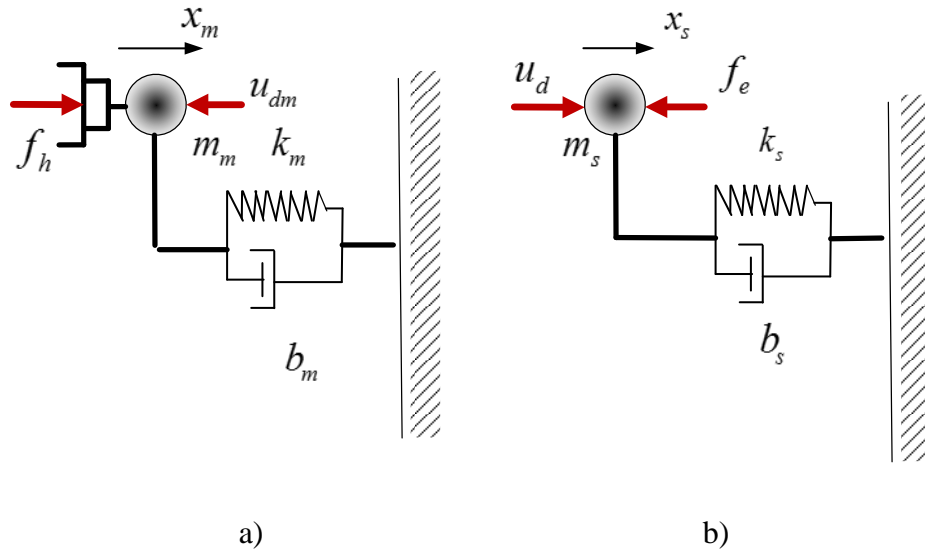


Şekil 6.1. Master Robot ile duvar arasındaki sanal kütle-yay-damper sistemi

Burada m , b , k sabitleri sırasıyla istenen atalet, sönüm ve yay katsayılarıdır. Burada m kütle, b sönüm katsayısını ve k yay sabitini F_e ise ortaya çıkan kuvveti temsil etmektedir. x_r robotun referans konumunu x ise gerçek konumunu ifade etmektedir.

$$m(\ddot{x} - \ddot{x}_r) + b(\dot{x} - \dot{x}_r) + k(x - x_r) = F_e \quad (6.1)$$

Literatürde empedans kuvvet kontrolü için çeşitli yöntemler kullanılmıştır[201-202]. Bu çalışmada konum ve kuvvet kontrolü m, b ve k değerleri sabit seçildi. Bu nedenle farklı bir etkileşim davranışında ve güncelleme kuralları dikkate alınmamıştır. $m=0.2$ kg , $b=0.3$ Ns/m ve $k=300$ N/m



Şekil 6.2. a) Master ve b) Slave robotların mekaniksel modeli

$$f_h - u_{dm} = m_m \cdot \ddot{x}_m + b_m \cdot \dot{x}_m + k_m \cdot x_m$$

$$u_d - f_e = m_s \cdot \ddot{x}_s + b_s \cdot \dot{x}_s + k_s \cdot x_s$$

(6.2)

Şekil 6.2'de master robot ile slave robotların kuvvet kontrolünün daha iyi ifade etmek için fiziksel modelleri gösterildi. Burada f_h kuvvet sensörünü f_e meydana gelen kuvveti u_d kontrol sinyalinini m_m , m_s , b_m , b_s , k_m , k_s sırasıyla kütle, sönüm ve katılık katsayılarının ifade etmektedir.

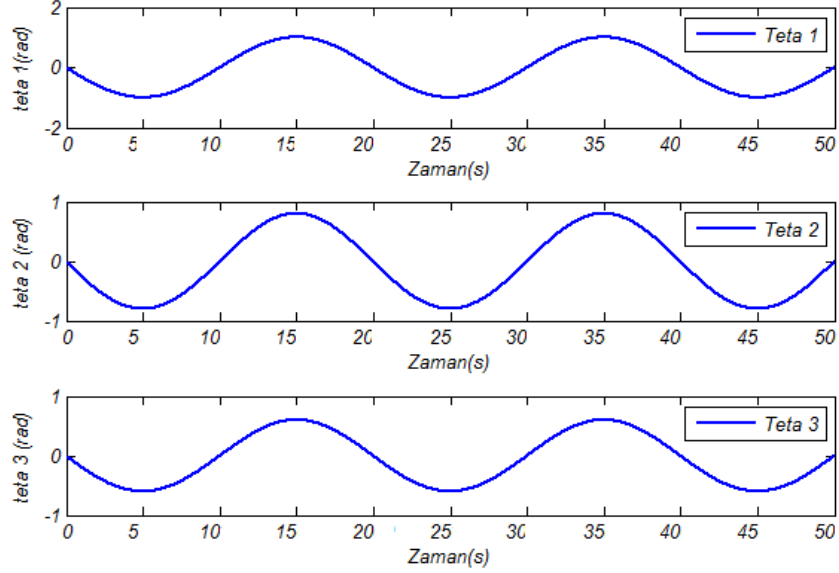
7. TELEOPERASYON SİSTEMİNDE KULLANILAN ROBOTLARIN VE SİSTEMİN SİMULASYONU

7.1. Giriş

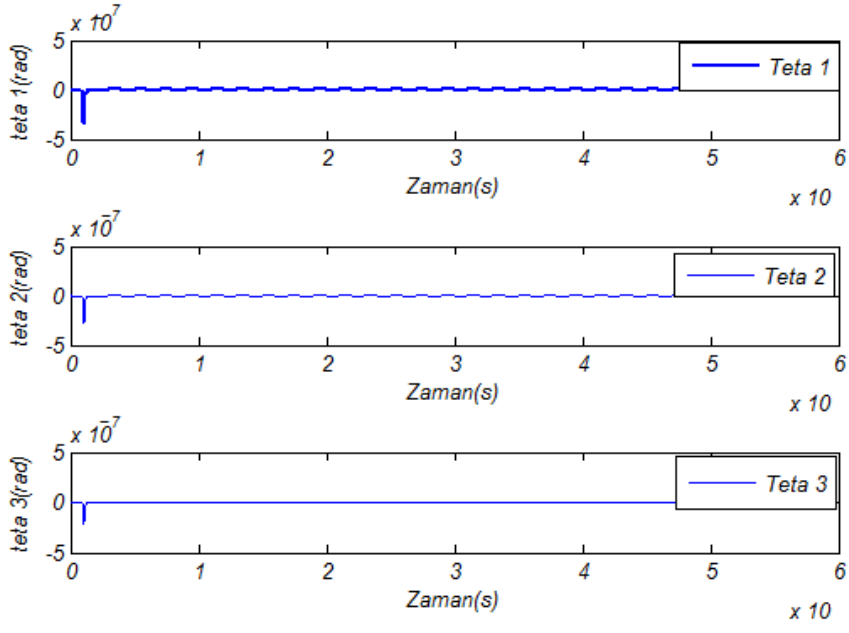
Bu bölümde Phantom Omni (master) haptik robotun PID denetimi, 6 serbestlik dereceli sanal slave robotun hesaplanmış tork kontrol yöntemi ve adaptif hesaplanmış tork kontrol yöntemi ile kontrolü simülasyonları anlatılmış sonuçları tartışılmıştır. Master ve slave robotun teleoperasyon ile hareket kontrolü simule edilecek ve sonuçları irdelenecektir.

7.2. Phantom Omni Haptik Robotun PID İle Denetimi

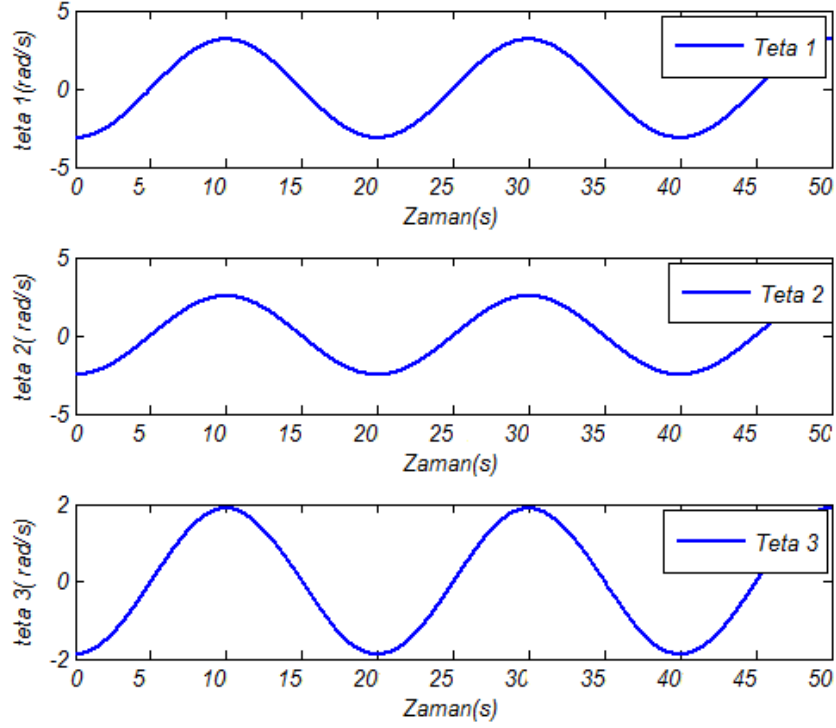
Bu bölümde sistem farklı büyüklükte ve farklı girişler verilerek sistemin denetim performansı incelenecektir. İlk olarak sisteme sinüs girişi verilerek sistemin performansı incelenmiştir.



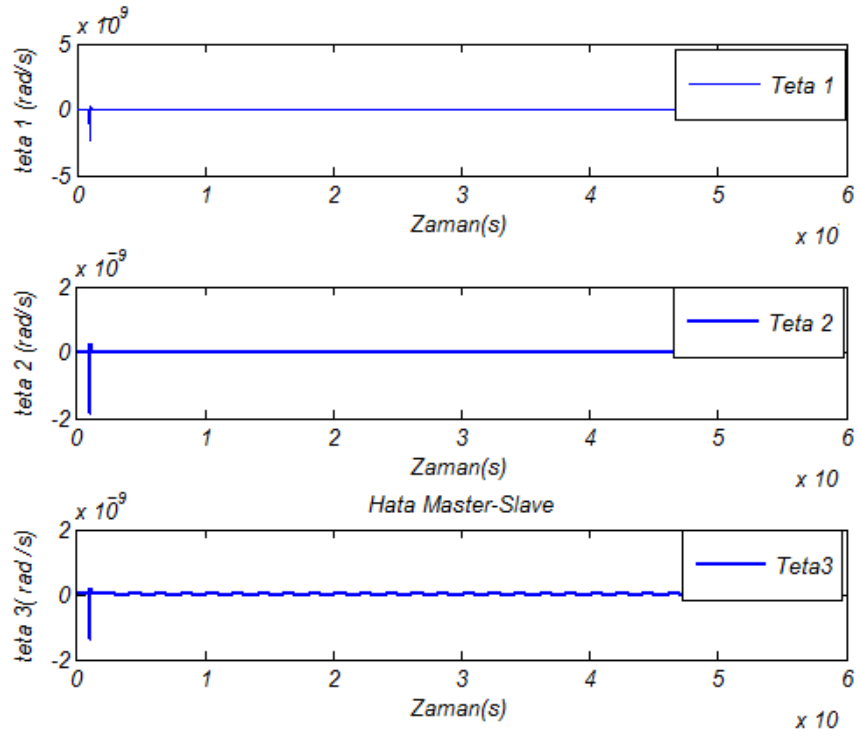
Şekil 7.1. Master robotun sinüs girişine karşı konum grafiği



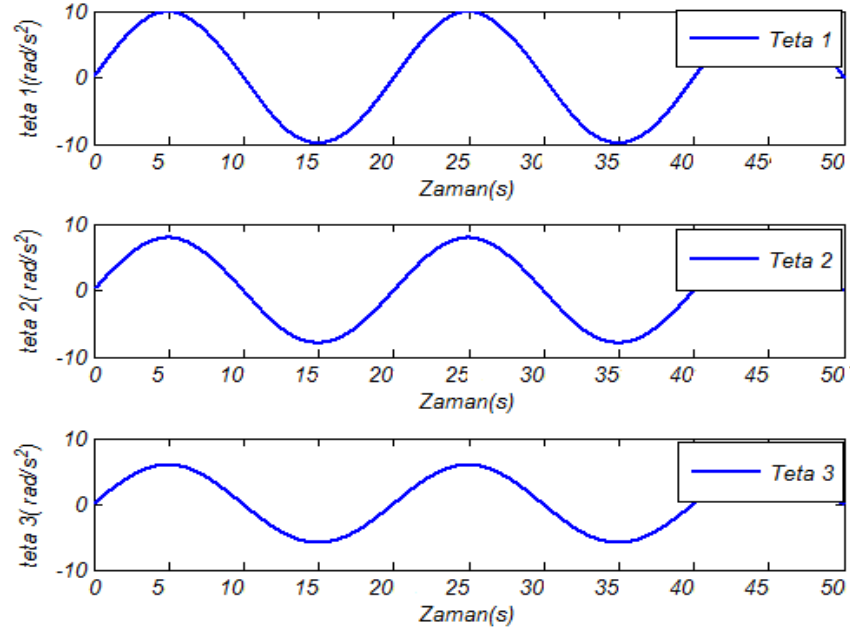
Şekil 7.2. Master robotun sinüs girişine karşı konum hata grafiği



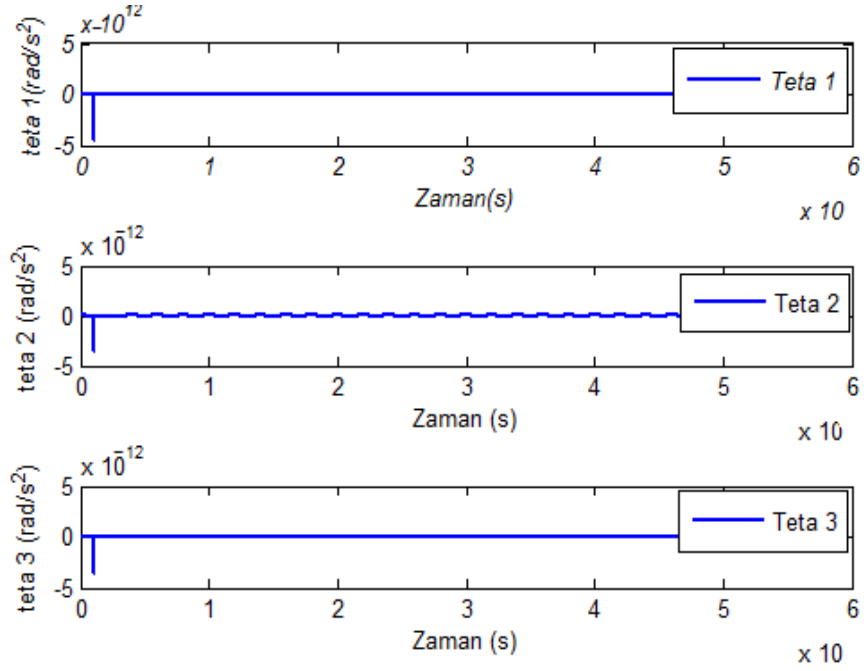
Şekil 7.3. Master robotun sinüs girişine karşı hız sonuçları



Şekil 7.4. Master robotun sinüs girişine karşı hız hata grafiği

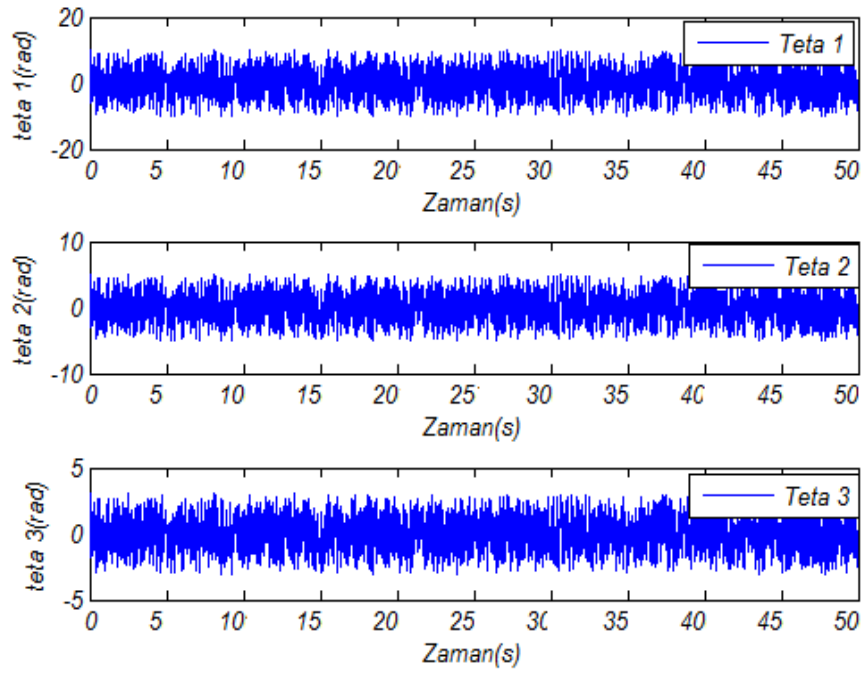


Şekil 7.5. Master robotun sinüs girişine karşı ivme grafiği

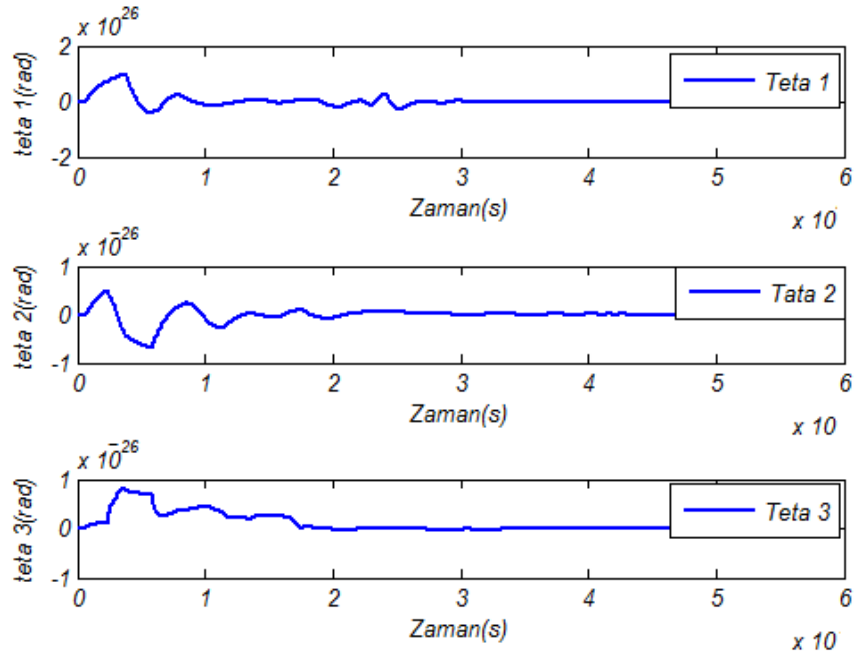


Şekil 7.6. Master robotun sinüs girişine karşı ivme hata grafiği

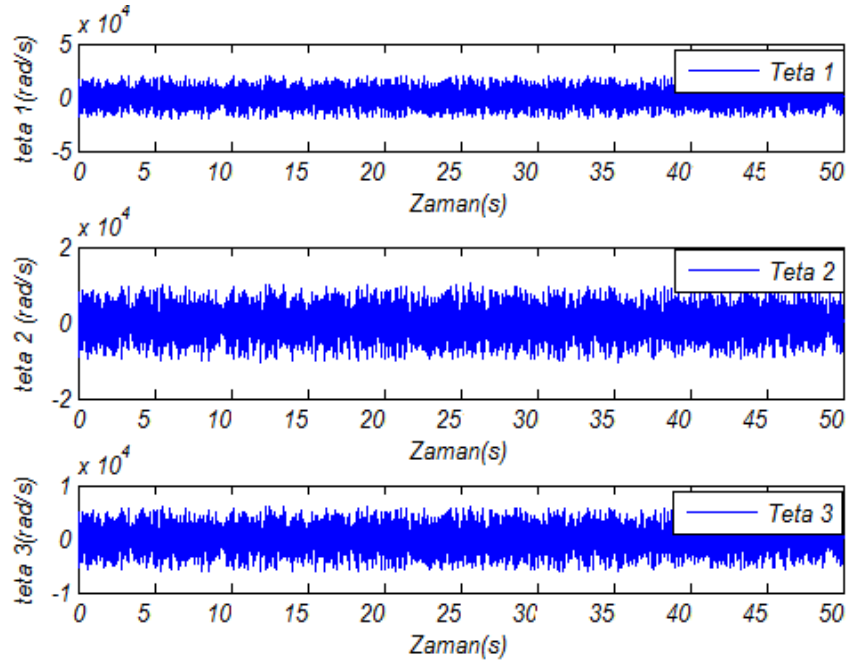
Sistemin konum-hız ve ivme cevapları incelenmiş ve sisteme verilen referans sinyalini büyük ölçüde takip ettiği görülmüştür. Konum takibinde hata oranı $5 \cdot 10^{-7}$ seviyesindedir, hız takibinde bu oran $5 \cdot 10^{-9}$ oranında ivme takibinde ise $5 \cdot 10^{-12}$ oranındadır. Sisteme random girişi verilerek sistemin gerçek şartlarda performansı incelenmiştir.



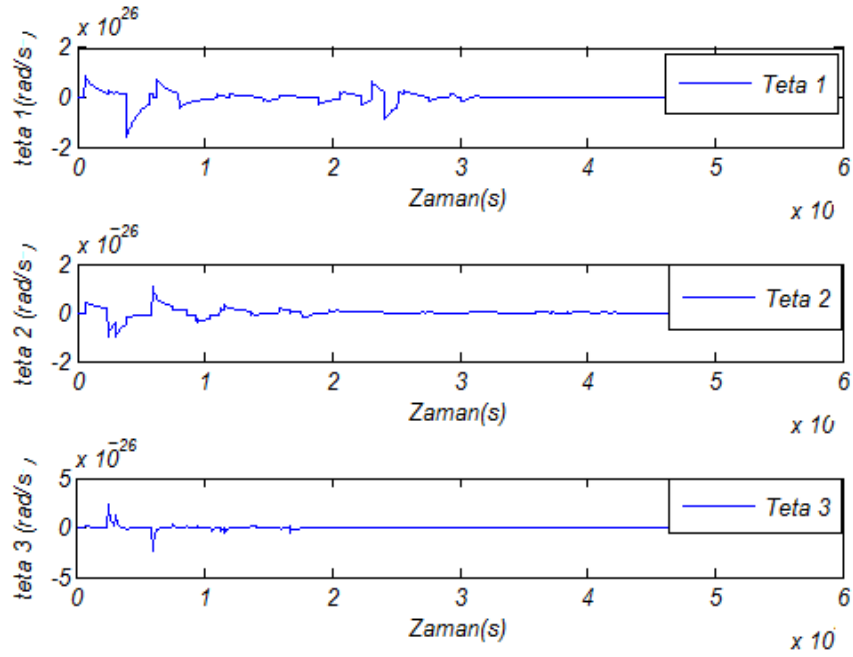
Şekil 7.7. Master robotun random girişine karşı konum sonuçları



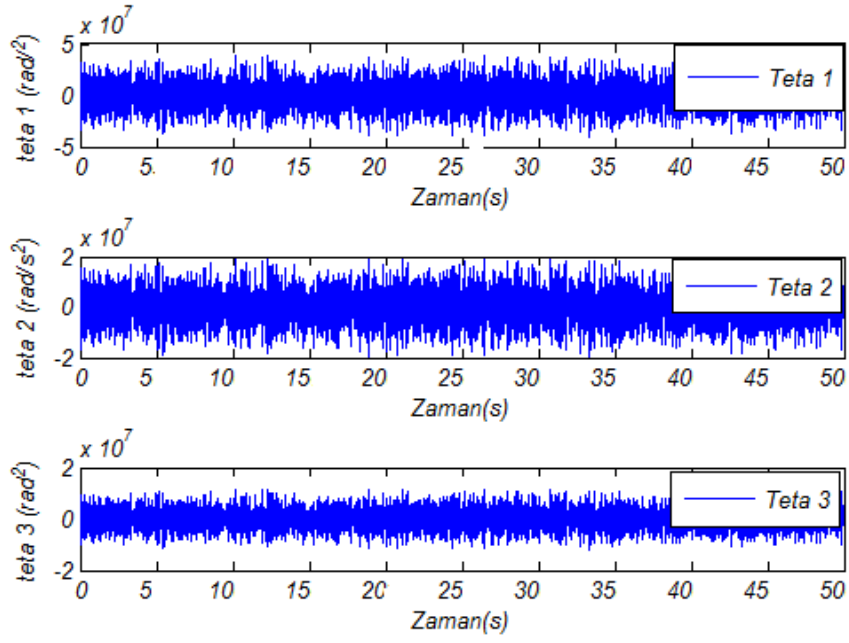
Şekil 7.8. Master robotun random girişine karşı konum hata grafiği



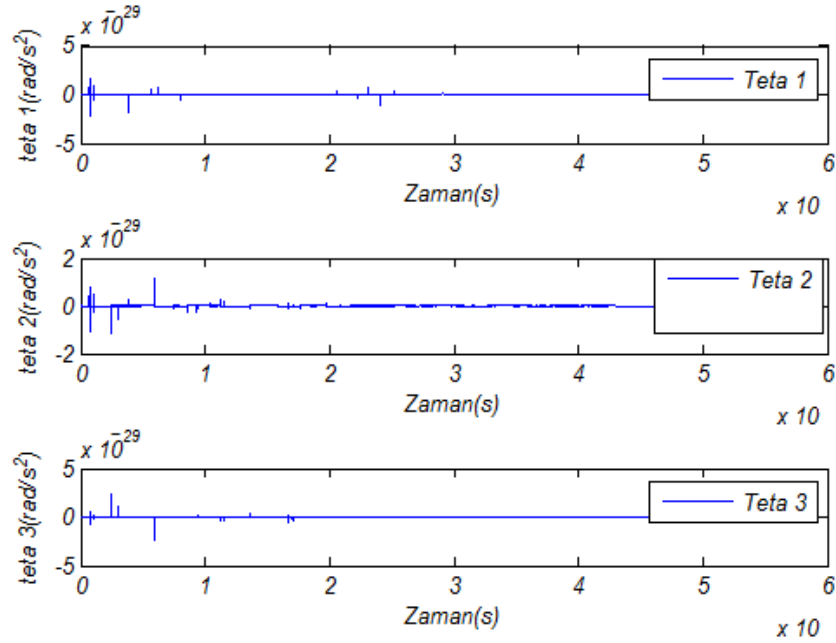
Şekil 7.9. Master robotun random girişine karşı hız sonuçları



Şekil 7.10. Master robotun random girişine karşı hız hata grafiği



Şekil 7.11. Master robotun random girişine karşı ivme sonuçları

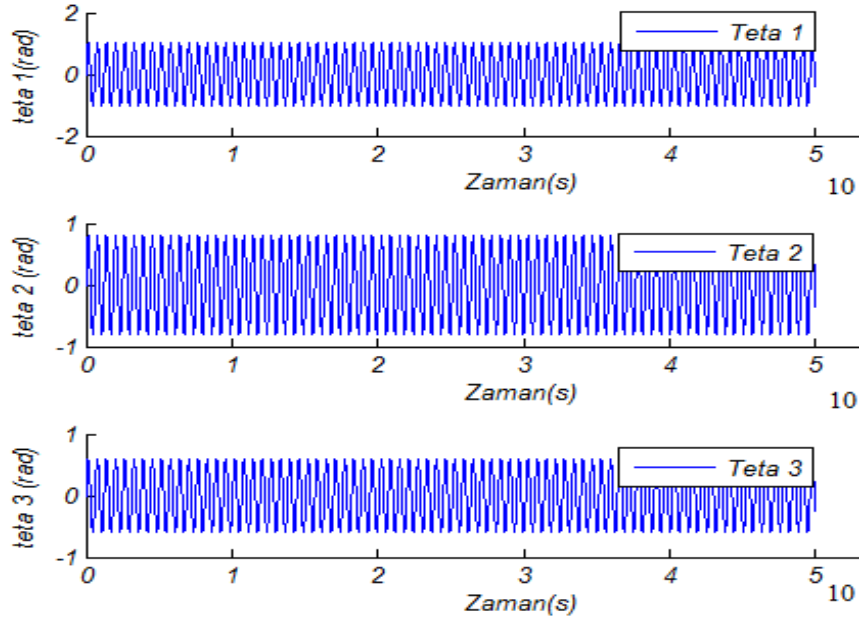


Şekil 7.12. Master robotun random girişine karşı ivme hata grafiği

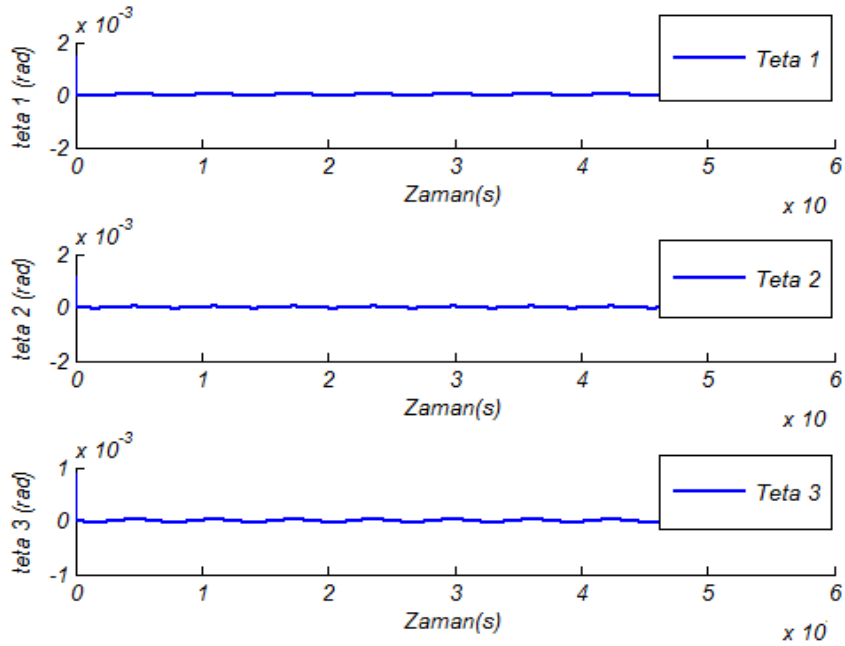
Sistemin konum-hız ve ivme cevapları incelenmiş ve sisteme verilen referans sinyalini büyük ölçüde takip ettiği görülmüştür. Konum takibinde hata oranı $5 \cdot 10^{-26}$ seviyesindedir, hız takibinde bu oran $5 \cdot 10^{-26}$ oranında ivme takibinde ise $5 \cdot 10^{-29}$ oranındadır.

7.3. 6 Serbestlik Dereceli Slave Robotun PD Tabanlı Hesaplanmış Tork Methodu (CTC) İle Denetimi

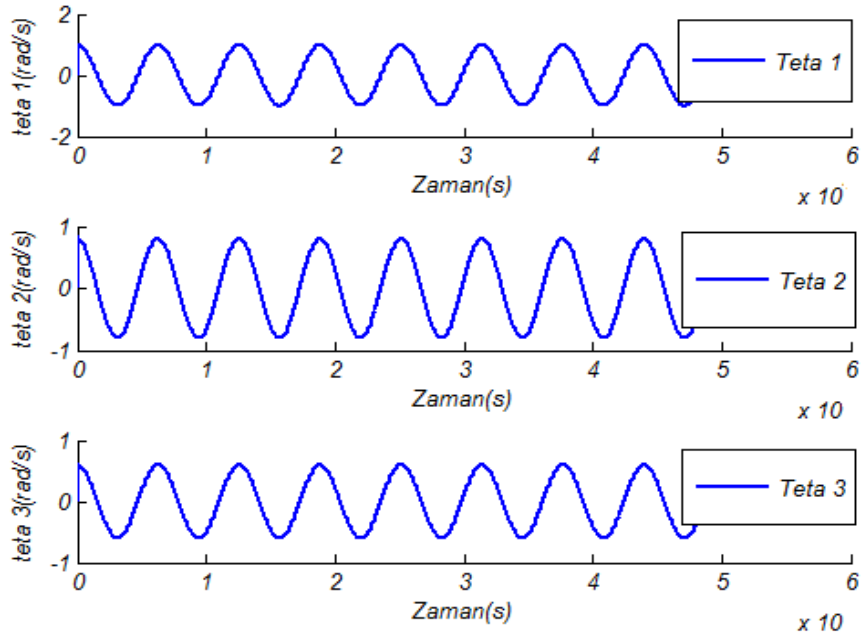
Bu bölümde sistem farklı girişler verilerek sistemin kontrolcüsünün performansı incelenecektir.



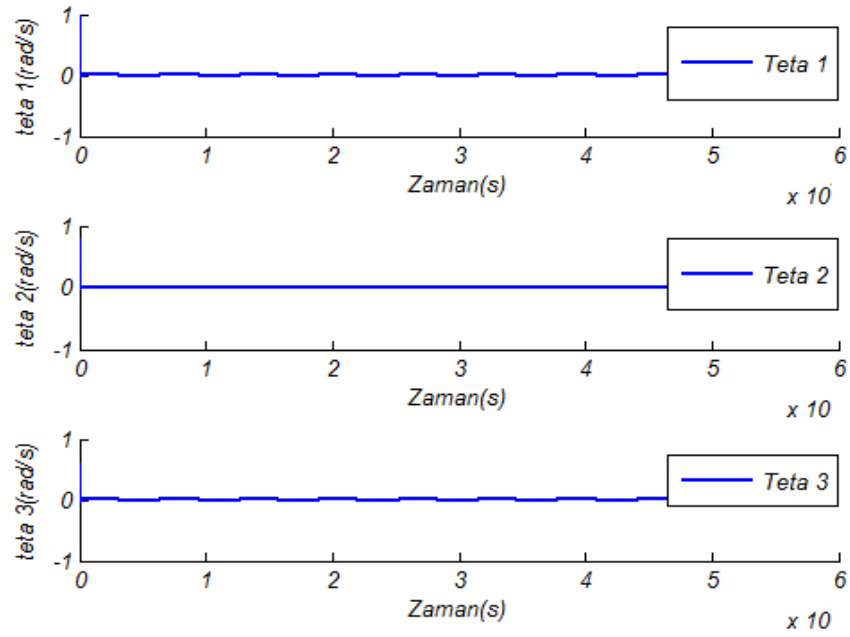
Şekil 7.13. Slave robotun sinüs girişine karşı konum sonuçları



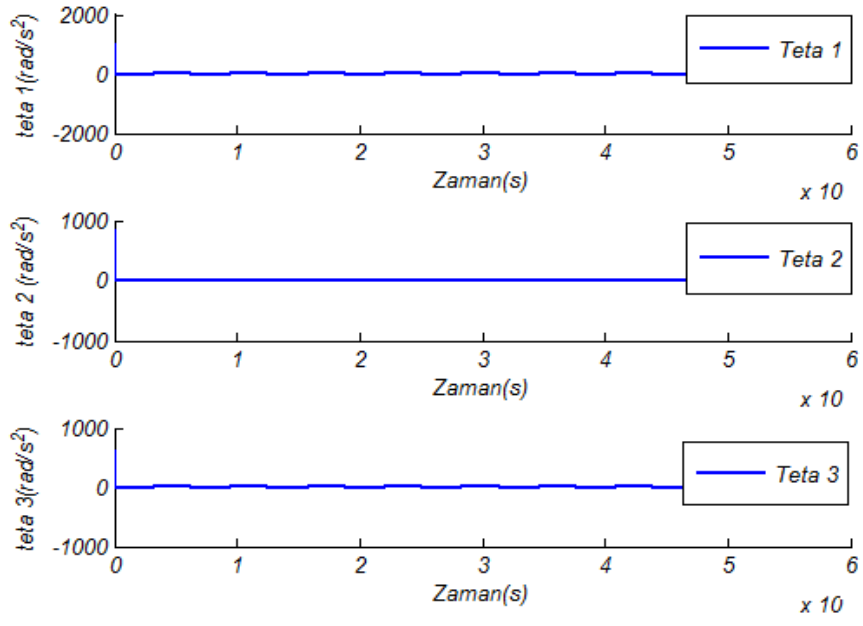
Şekil 7.14. Slave robotun sinüs girişine karşı konum hata grafiği



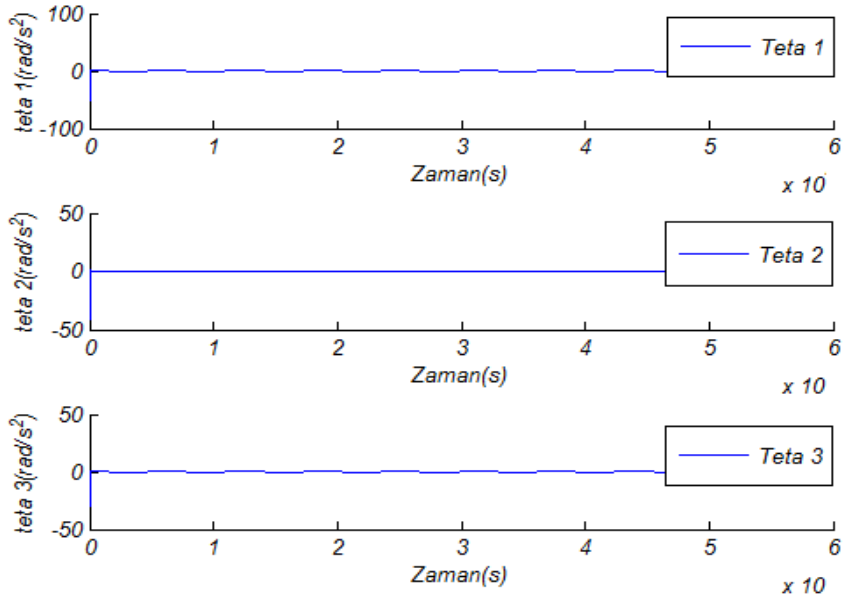
Şekil 7.15. Slave robotun sinüs girişine karşı hız sonuçları



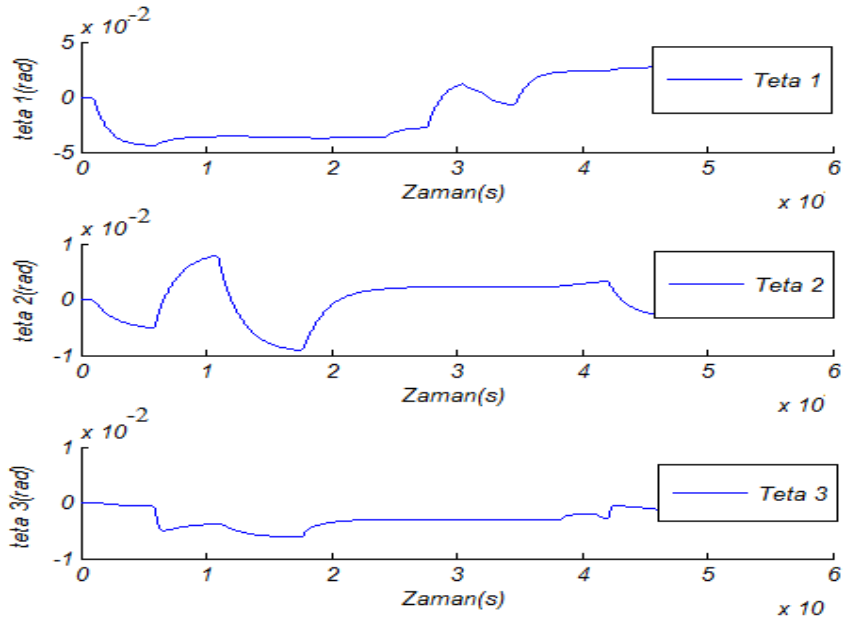
Şekil 7.16. Slave robotun sinüs girişine karşı hız hata grafiği



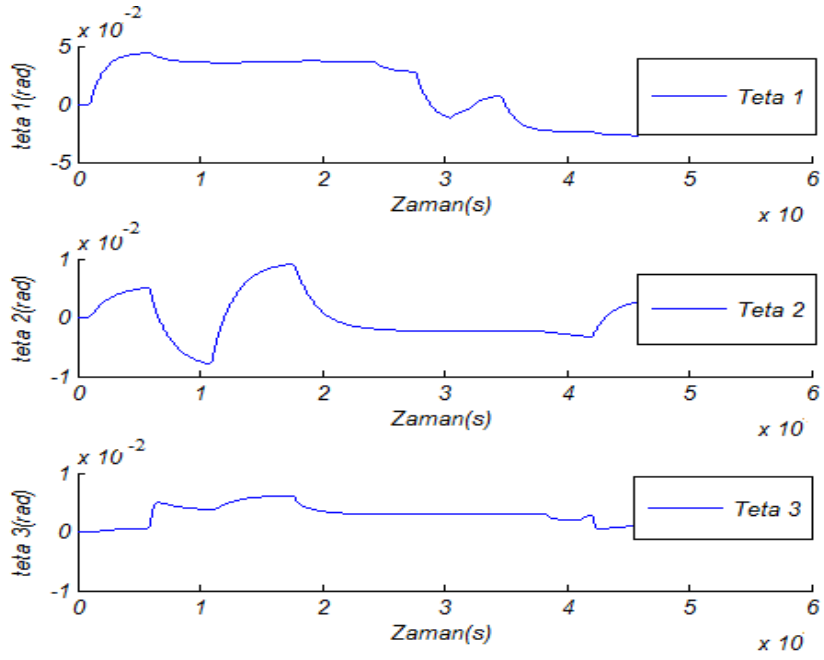
Şekil 7.17. Slave robotun sinüs girişine karşı ivme grafiği



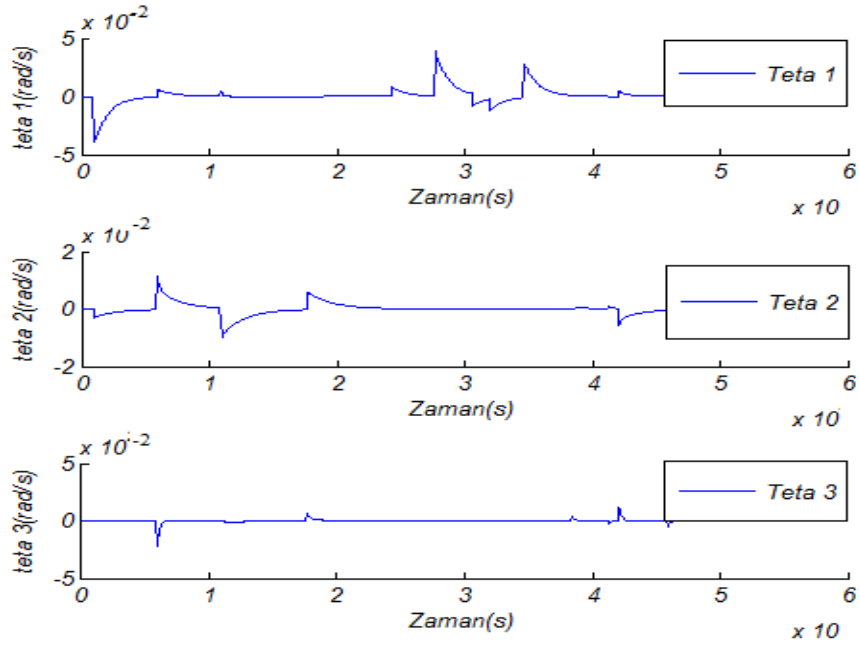
Şekil 7.18. Slave robotun sinüs girişine karşı ivme hata grafiği



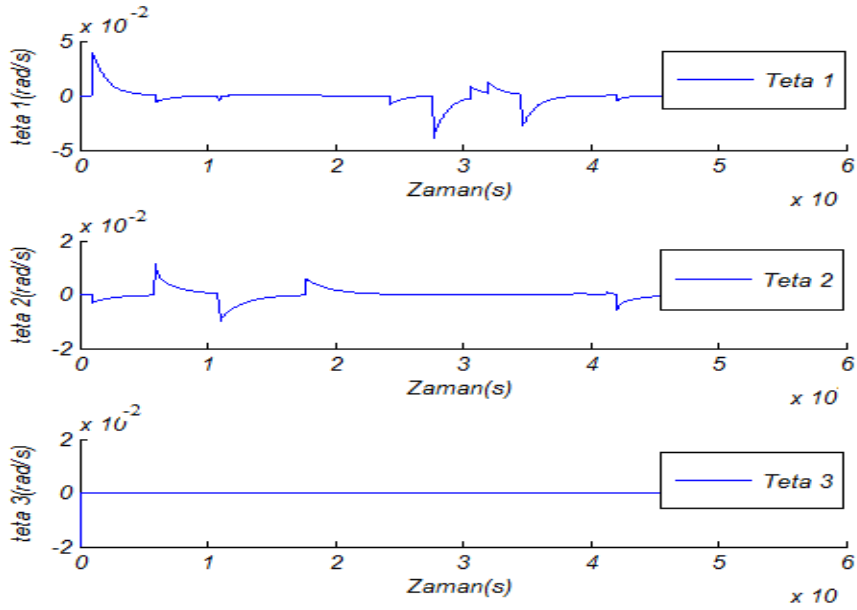
Şekil 7.19. Slave robotun random girişine karşı konum grafiği



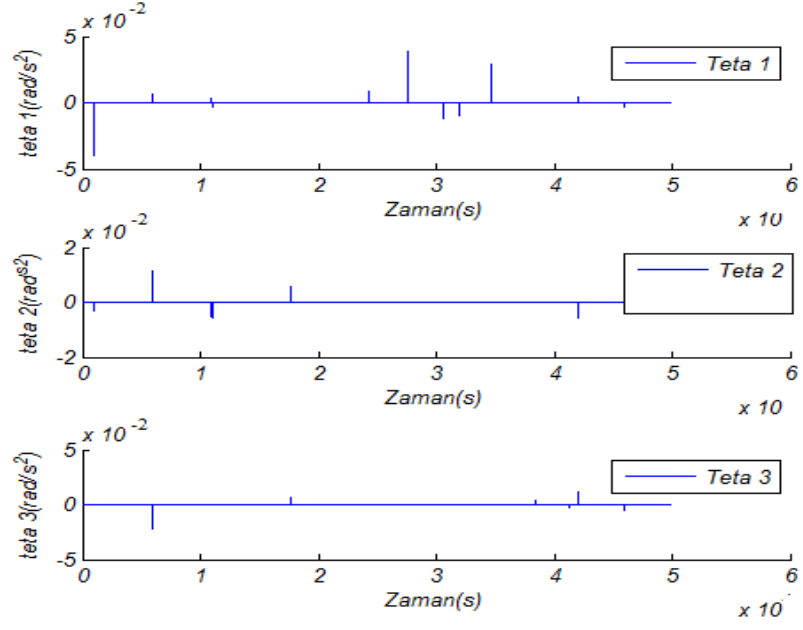
Şekil 7.20. Slave robotun random girişine karşı konum hata grafiği



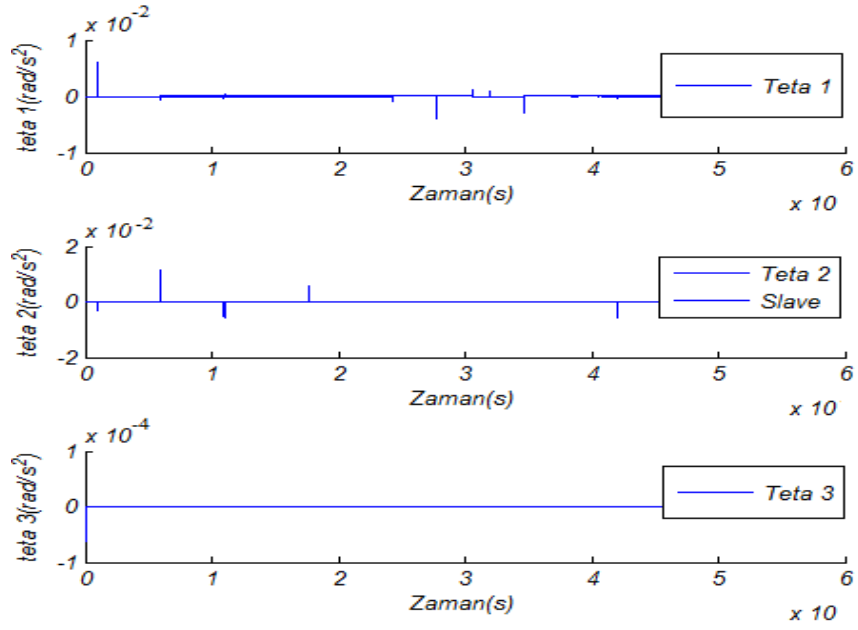
Şekil 7.21. Slave robotun random girişine karşı hız grafiği



Şekil 7.22. Slave robotun random girişine karşı hız hata grafiği



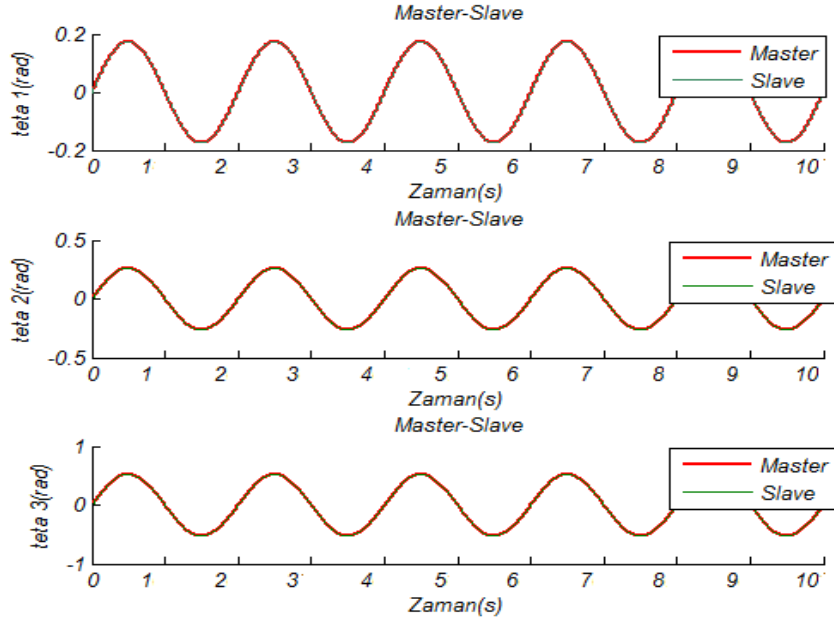
Şekil 7.23. Slave robotun random girişine karşı ivme grafiği



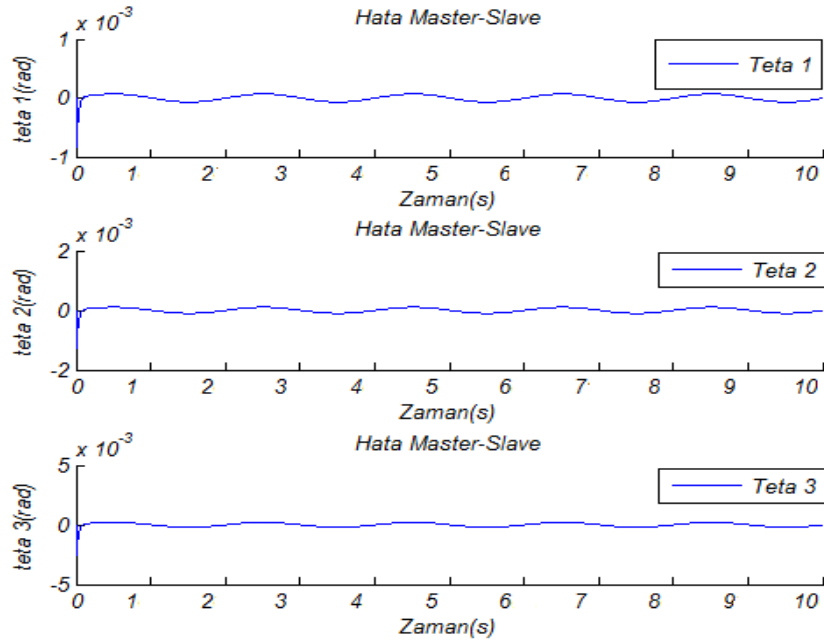
Şekil 7.24. Slave robotun random girişine karşı ivme hata grafiği

7.4. Master-PID ve Slave-PD-CTC ile Robotun Denetimi

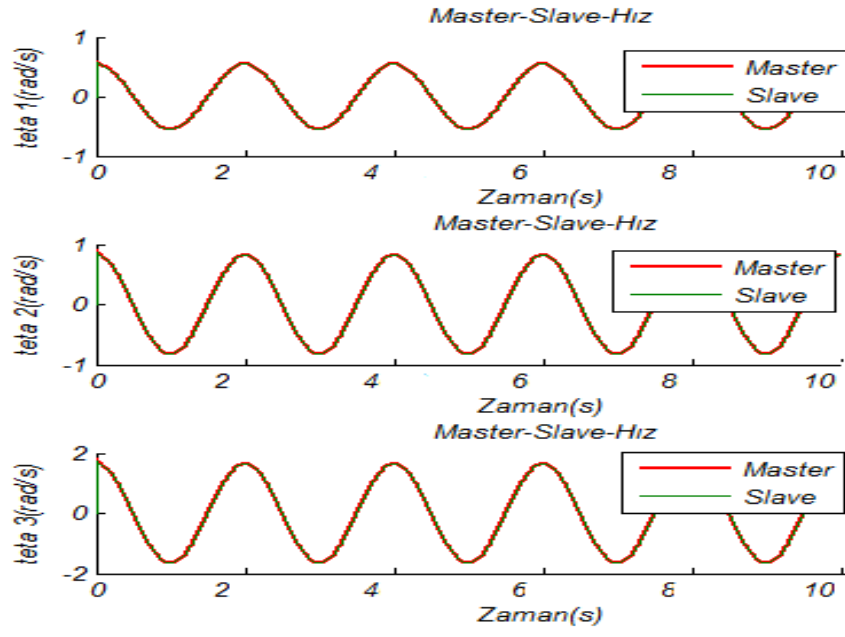
Bu bölümde master ve slave robottan oluşan sisteme farklı girişler verilerek sistemin kontrolcüsünün performansı incelenecektir.



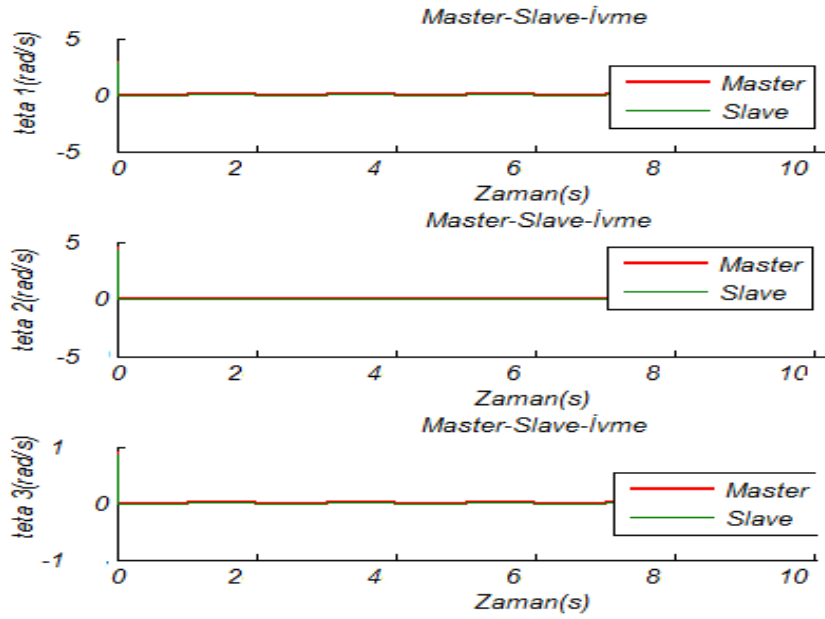
Şekil 7.25. Master-Slave robotun sinüs girişine karşı konum grafiği



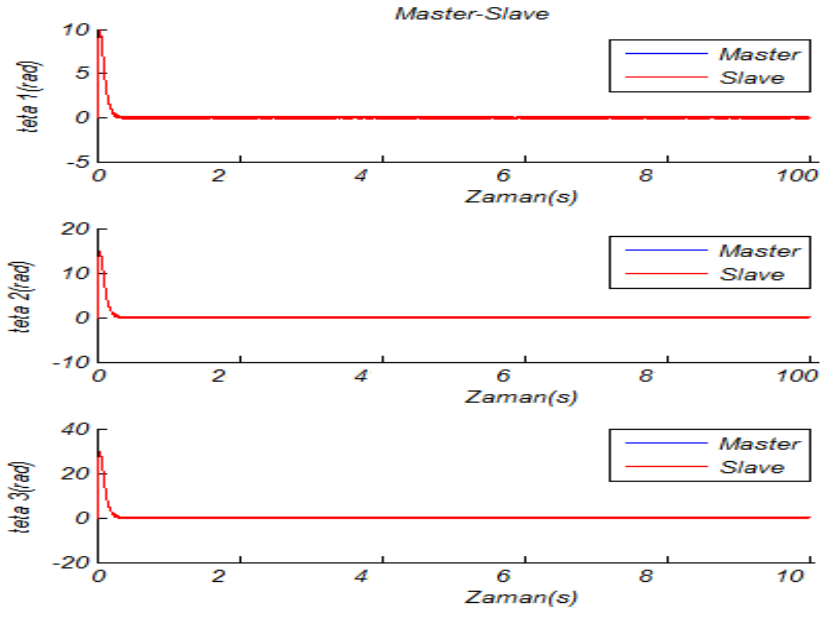
Şekil 7.8. Master-Slave robotun sinüs girişine karşı konum hata grafiği



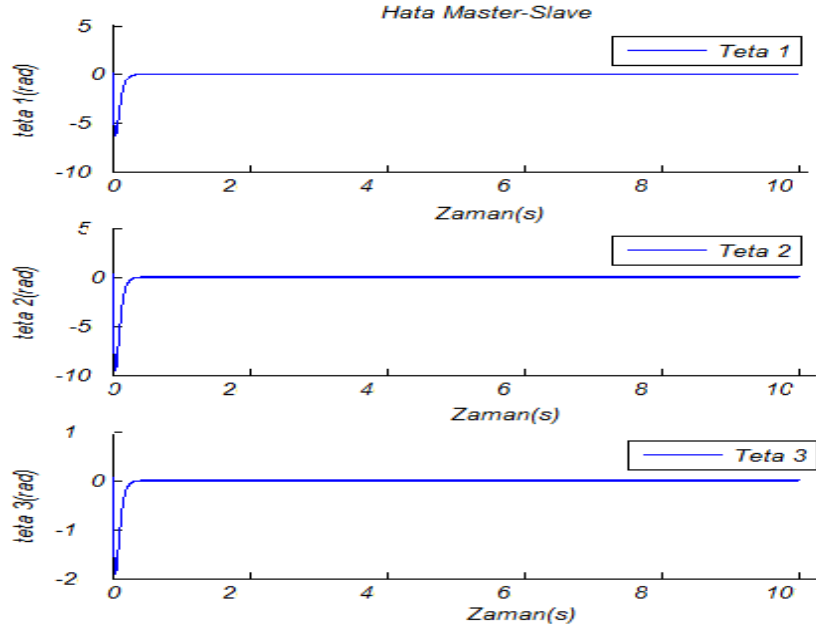
Şekil 7.27. Master-Slave robotun sinüs girişine karşı hız sonuçları



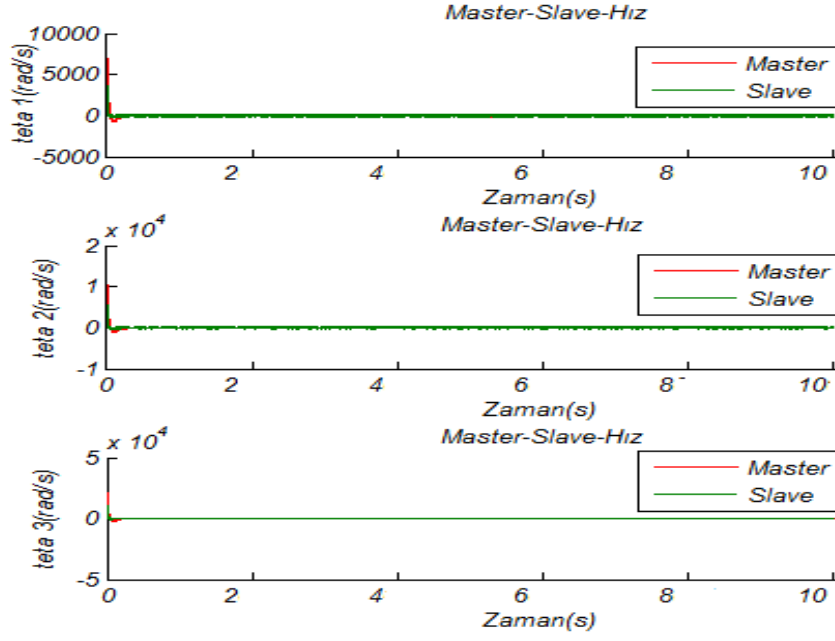
Şekil 7.28. Master-Slave robotun sinüs girişine karşı hız hata grafiği



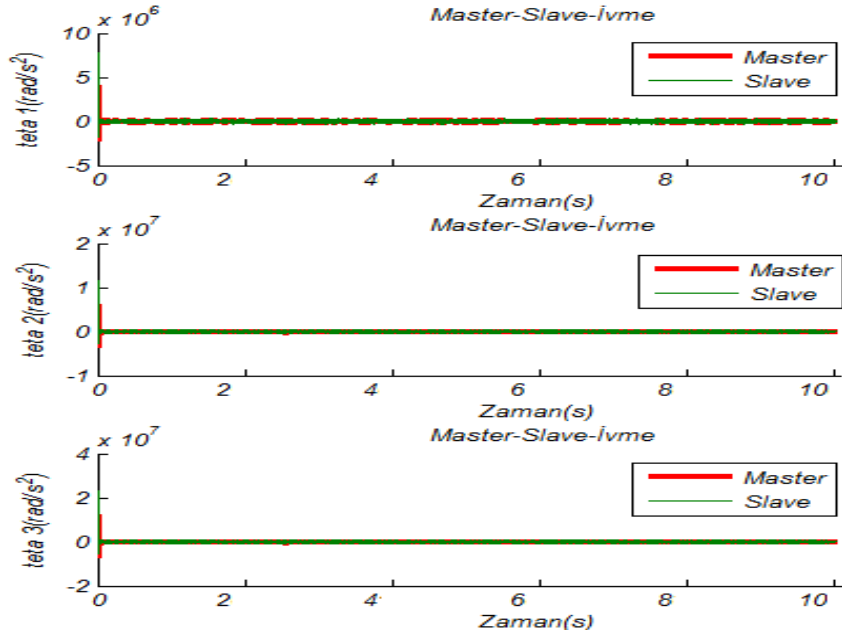
Şekil 7.29. Master-Slave robotun random girişine karşı konum sonuçları



Şekil 7.30. Master-Slave robotun random girişine karşı konum hata grafiği



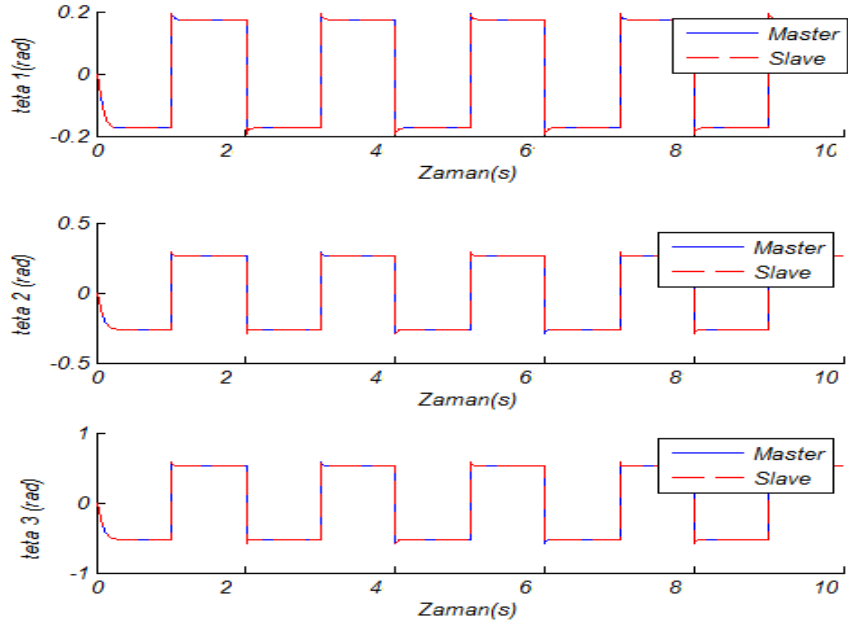
Şekil 7.31. Master-Slave robotun random girişine karşı hız grafiği



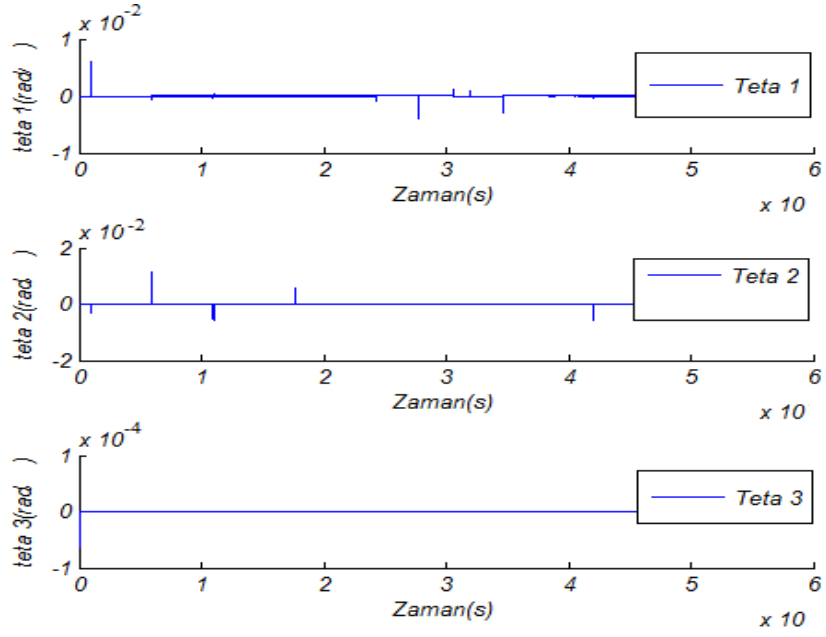
Şekil 7.32. Master-Slave robotun random girişine karşı ivme sonuçları

7.5. Master-PID ve Slave-Adaptif PD-CTC ile Robotun Denetimi

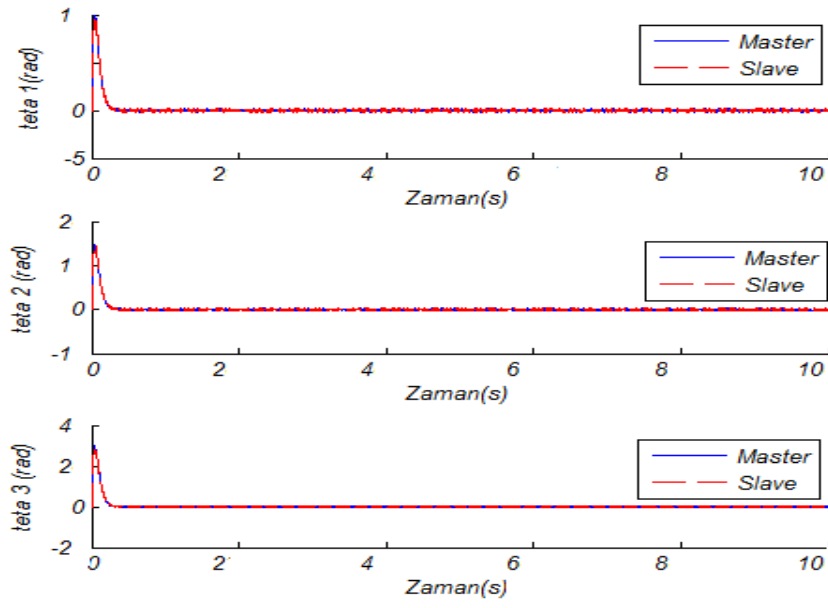
Bu kısımda Master robot PID denetiminde Slave Robot ise PD-CTC ile denetim gerçekleştirilmiştir. Simülasyon başlangıcında takip performansı her ne kadar iyi olsa da arada performans düşüklüğüne görülmüş fakat daha sonra sistem kendini toparlamıştır.



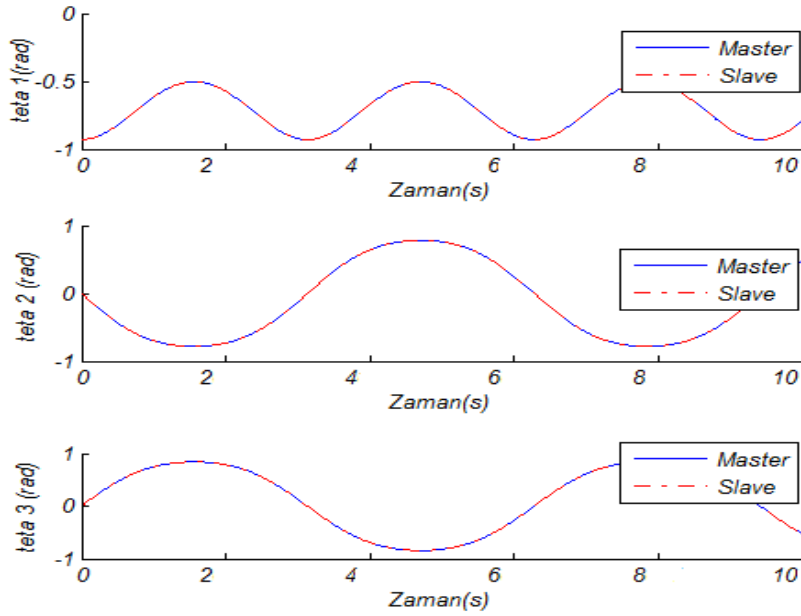
Şekil 7.33. Master-Slave robotun kare girişine karşı konum sonuçları



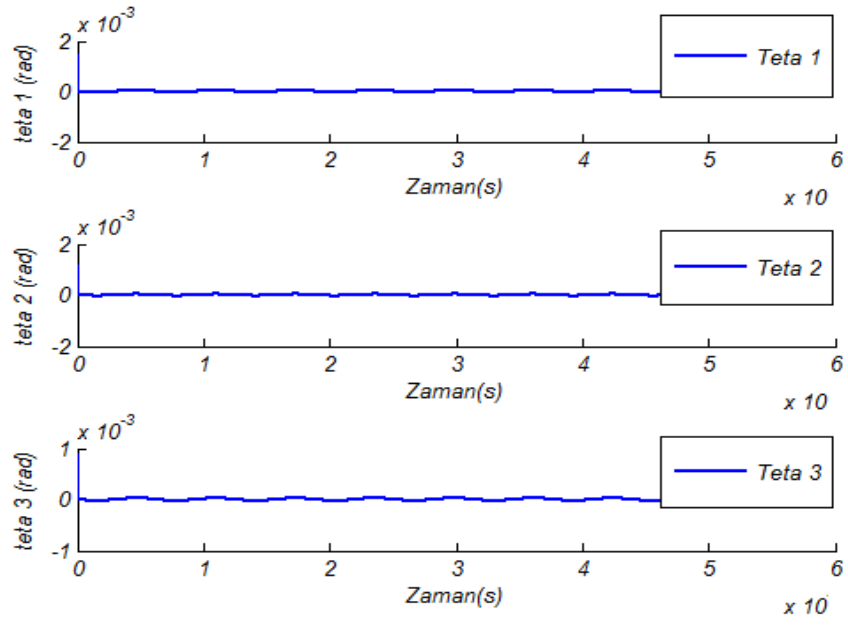
Şekil 7.34. Master-Slave robotun kare girişine karşı konum hata grafiği



Şekil 7.35. Master-Slave robotun random girişine karşı konum sonuçları



Şekil 7.36. Master-Slave robotun sinüs girişine karşı konum sonuçları



Şekil 7.37. Master-Slave robotun sinüs girişine karşı konum hata grafiği

8. DENEYSEL SONUÇLAR

8.1. Giriş

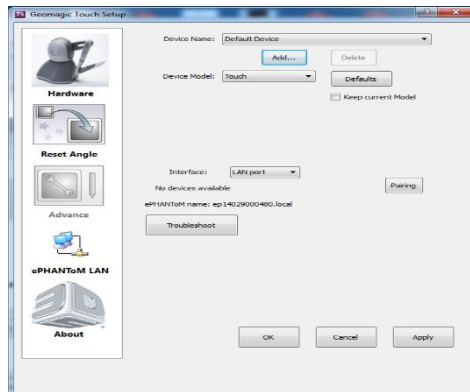
Bu bölümde, deneysel olarak parametre tanımlama çalışmaları ile teleoperasyon çalışmaları verilmiş ve sonuçları irdelenmiştir. Bu bölüm iki kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısımda deney düzeneğinin kurulumu ve Phantom Omni haptik robotun deneysel olarak düz kinematik, ters kinematik, jakobiyen matrisi ve yörünge oluşturulması uygulamaları verilmiştir. İkinci kısımda ise teleoperasyon ile tek yönlü hareket kontrolü ile iki yönlü kuvvet ve konum kontrolü verilmiş ve sonuçları irdelenmiştir.

8.2. Sistemin Kurulumu

Bu kısımda öncelikle Phantom Omni haptik robotun kurulumu ve daha sonra slave robotun kurulumu anlatılacaktır.

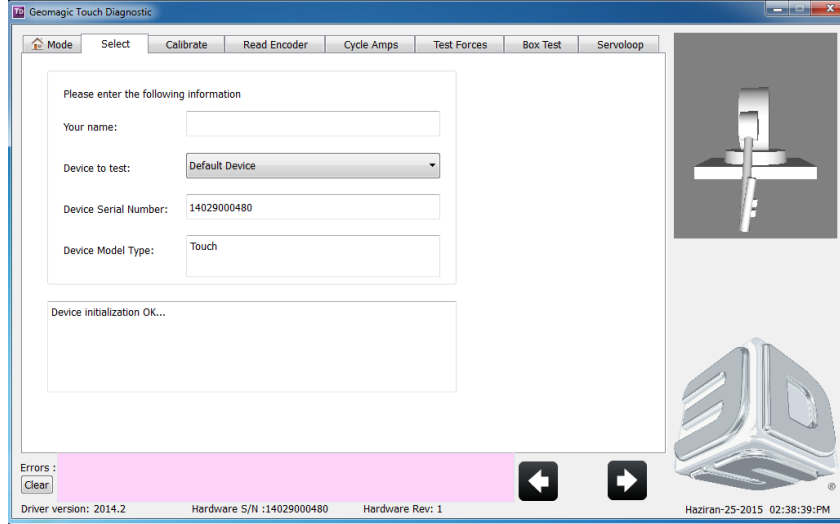
Bu uygulamanın kurulumunda bir bilgisayar ve 6 serbestlik dereceli Phantom Omni gerçek zamanlı açık mimari haptik robotu kullanılmıştır. Bilgisayar ile haptik robotun iletişimi ethernet USB cihazı ile elde gerçekleştirilmiştir. Bu cihaz ile uygulamalar MATLAB paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

İlk olarak Phantom Omni haptik cihazı için gerekli programlar kurularak cihaz kurulumu gerçekleştirilmiştir. Cihaz üzerinde gönderilen Geomagic Touch Setup programı kullanılarak cihaz kullanılacak bilgisayara tanıtılır.



Şekil 8.1. Geomagic Touch Setup programı arayüzü

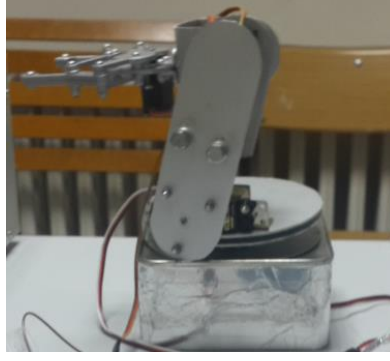
Bundan sonra dokunsal cihazın kalibrasyonu gerçekleştirilecektir. Kalibrasyon işlemi cihaz üzerinde gelen ikinci bir program olan Geomagic Touch Diagnostic programı ile cihaz kalibre edilir. Cihaz kalibre edilmeden önce home konumuna getirilir ve kalibrasyon gerçekleştirilmiş olur.



Şekil 8.2. Geomagic Touch Diagnostic Programı arayüzü

Uygulama Matlab 2012 64-bit programı çalıştırıldıktan sonra Matlab-simulink ortamında oluşturulan programların çalıştırılmasıyla başlatılır. Bu programların arka kısmında Microsoft Visual Studio IDE C / C ++ programı vasıtasıyla OpenHaptics SDK kullanılarak elde edilir.

Haptik cihaz kurulduktan sonra ikinci deney robotu olan gerçek slave robot kurulur. Şekil 8.3 de görülen robotumuz 3 serbestlik dereceli robot kol deneyimizde kullandığımız gerçek slave robotumuzdur. Bu robotumuz 3 adet ULTRA TORQUE HITECH HS-645Mg servo motor ile tahrik edilmektedir. Şekil 8.4 de HITECH HS-645Mg servo motor gösterilmiştir.

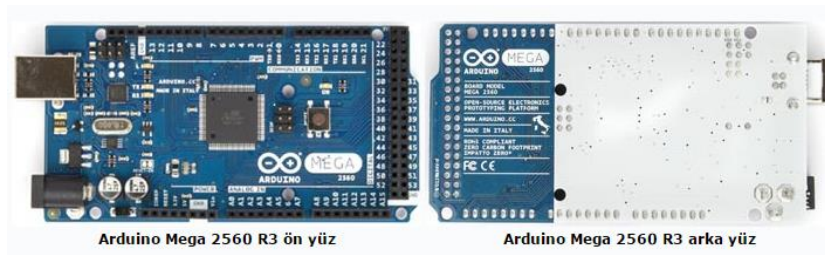


Şekil 8.3. 3 serbestlik dereceli robot kol



Şekil 8.4. HİTECH HS-645Mg servo motor

Gerçek slave robotumuz kontrolü için Arduino Mega kullanılmıştır. Arduino açık kaynak kodlu elektronik bir platformdur. Yani donanımlara verdiğiniz ücretler dışında herhangi bir masrafı yoktur. Devre şemaları, PCB'leri vs. tamamen açıktır. Ayrıca donanımsal bir derleyici gerektirmez. Yazılan programı derlemek için gerekli olan Arduino yazılımı ücretsizdir ve kendi sitesinden son sürümünü indirme imkanı tanımaktadır. Arduino'nun birçok geliştirme kiti bulunmaktadır. Aynı şekilde Arduino platformunun çeşit çeşit modelleri de bulunmaktadır. Arduino Mega 2560 modelinde ATmega 2560 mikro denetleyicisi kullanılmıştır.

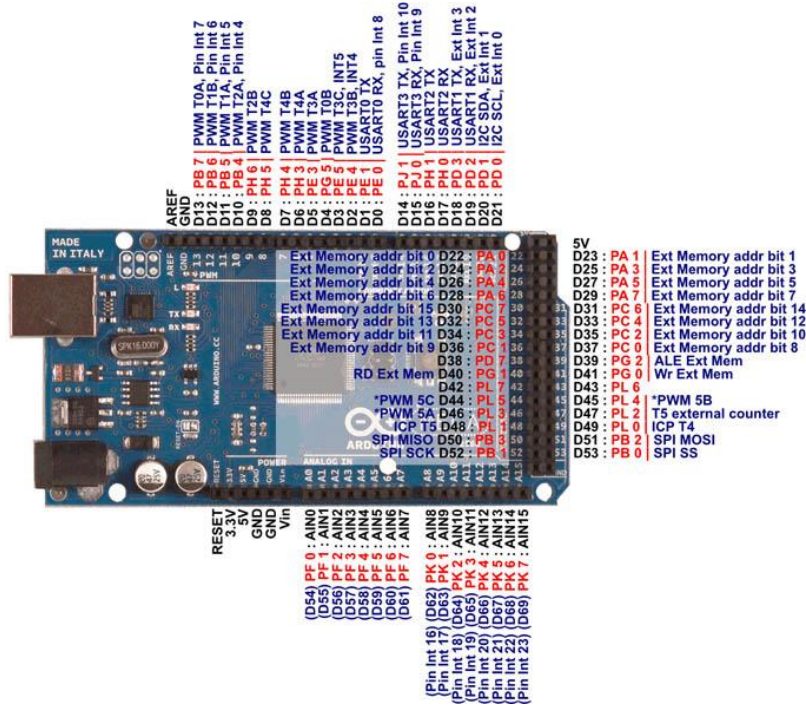


Şekil 8.5. Arduino Mega 2560 R3

Arduino Mega 2560 'ta 54 tane dijital giriş / çıkış pini vardır. Bunlardan 15 tanesi PWM çıkışı olarak kullanılabilir. Ayrıca 16 adet analog girişi, 4 UART (donanım seri port), bir adet 16 MHz kristal osilatörü, USB bağlantısı, power jakı (2.1mm), ICSP başlığı

ve reset butonu bulunmaktadır. Arduino Mega 2560 bir mikrodenetleyiciyi desteklemek için gerekli bileşenlerin hepsini içerir. Arduino Mega 2560 bir bilgisayara bağlanarak, bir adaptör ile ya da pil ile çalıştırılabilir. Arduino Mega, tasarlanan shield lerin çoğu ile kullanılabilir.

Şekil 8.6’ da Arduino Mega 2560 pinleri gösterilmektedir. Arduino Mega 2560 USB ‘den ve harici bir adaptör veya batarya ile beslenebilir. Güç kaynağı otomatik olarak seçilir. Arduino Mega2560 ‘ın diğer kartlardan farkı FTDI USB-to-serial sürücü entegresi kullanılmamış olmasıdır. USB-to-Serial entegresi yerine ATmega16U2 USB-to-serial dönüştürücü olarak programlanmıştır. Mega2560’ın maksimum boy ve eni 100mmx50mmdir. Uno, Diecimila ve Duemilanove için tasarlanan tüm eklentilere uyumludur.



Şekil 8.6. Arduino Mega 2560 R3 pinlerinin gösterimi

- Mikrodenetleyici : ATmega2560
- Çalışma gerilimi : +5 V DC
- Tavsiye edilen besleme gerilimi : 7 - 12 V DC
- Besleme gerilimi limitleri : 6 - 20 V
- Dijital giriş / çıkış pinleri : 54 tane (15 tanesi PWM çıkışını destekler)
- Analog giriş pinleri : 16 tane
- Giriş / çıkış pini başına düşen DC akım : 40 mA

- 3,3 V pini için akım : 50 mA
- Flash hafıza : 256 KB (8 KB bootloader için kullanılır)
- SRAM : 8 KB
- EEPROM : 4 KB
- Saat frekansı : 16 MHz

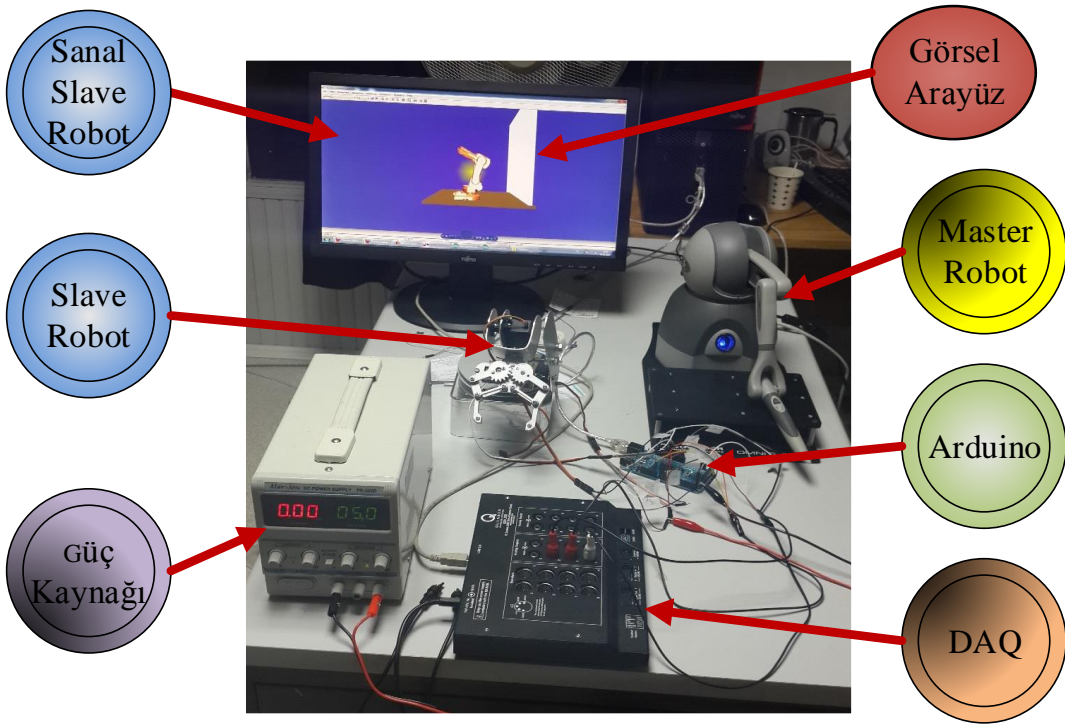
MATLAB Real-Time Workshop™ Toolbox ile kullanılan bir Quanser Q8 USB veri toplama yönetim kurulu ve WinCon™ / RTX™ gerçek zamanlı kontrol sistemi kullanıldı. Quanser USB veri toplama teknolojisi ,Usb ile veri toplamada çığır adeta açmıştır , USB arabirimi üzerinden güvenilir ve gerçek zamanlı performans sunar. Q8-USB veri toplama cihaz donanım özellikleri ve yazılım desteği yetenekleri ile geniş bir kullanım yelpazesi sunar. Standart bağlantı arayüzleri ile birlikte Quanser DAQ teknolojisi sinyalleri kolay ve hızlı erişim sağlamaktadır.. Eğer 2 kHz kapalı çevrim kontrol oranı kadar elde edebilirsiniz düşük I / O dönüşüm süreleri ve kolay bağlantı ile Q8-USB, eğitim-öğretim kontrol kavramları için idealdir. Bu kontrol oranı diğer herhangi bir piyasada mevcut USB DAQ teknolojisine göre üstün bir durumdadır.

Quanser güç amplifikatörü ve kontrol tasarım yazılımı ile kombine edildiğinde, Q8-USB uygun hızlı prototipleme ve Donanım-In-Döngü (HIL) geliştirme ortamı sağlar. Tek yönetim kurulu ile tüm - girişlerin ve çıkışların geniş bir yelpazede ile kolayca bağlanabilir ve analog ve enkoderler dahil olmak üzere dijital sensörler ile cihazların kontrolünde kullanıcıya iyi bir performans verir.

Q8-USB Simulink® içinde Quarc blockset, LabVIEW™ RCP Toolkit ve C, C ++, ActiveX, NET ve MATLAB® komut dosyası için API'ler sağlar HIL SDK tarafından desteklenmektedir.



Şekil 8.7. Q8 USB data acqusition card (DAQ)



Şekil 8.8. Deney düzeneği şekli

8.3. Deneysel Çalışmalar 1

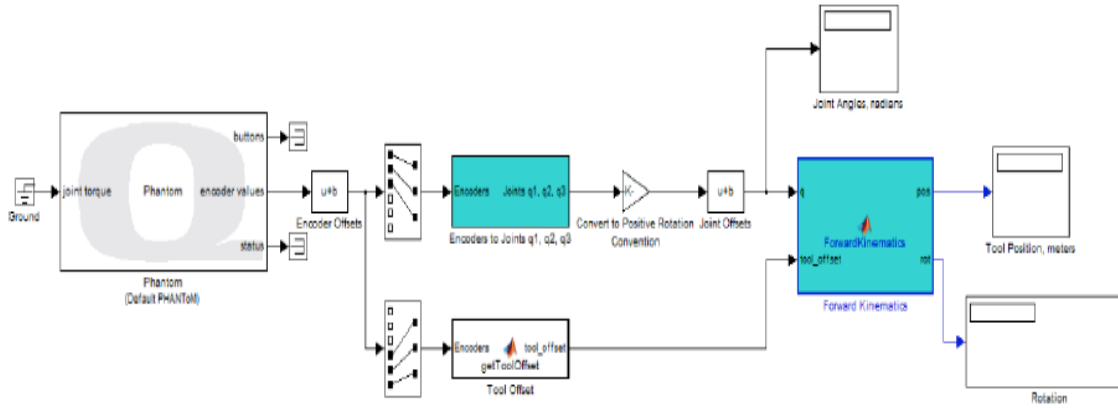
8.3.1. Düz kinematik analiz

Bu çalışmada robot kinematığı deneysel olarak elde edilmesi hedeflenmiştir. Haptik robotun ilk üç ekseninin her birinin konumunu okumak için DH(Denavit-Hertanbag) methodu ile DH tablosu çıkarıldı.

Tablo 8.1. Phantom Omni haptik robotun DH parametreleri

θ (rad)	d (m)	a (m)	α (rad)
θ_1	0	0	$-\pi / 2$
θ_2	0	L_1	0
$\theta_3 - \pi / 2$	0	L_2	0

Robotun düz kinematik analizi için her bir uzuv için rotasyon matrisleri yazılarak Ana dönüşüm matrisi elde edildi. Düz kinematik analiz robotun son efektörünün konumunu ve yönünü elde etmek için uygulanmıştır. Bu çalışmada Quarc Targets Continuous Library yazılımının kütüphanesi kullanılarak Matlab simulink model dosyaları oluşturuldu. DH.m dosyası ve ForwardKinematics.m dosyaları Matlab simulink model dosyasına bir blok ekleyerek final dosyası oluşturuldu.



Şekil 8.9. Düz kinematik simulink modeli

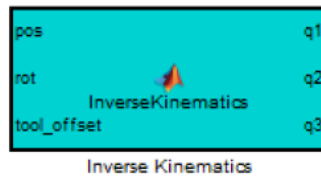
Yukarıdaki şekilde gösterilen model dosyası oluşturulduktan sonra gerçek zamanlı olarak son efektör belirli pozisyonlarda konumlandırılarak konum ve rotasyon değerleri elde edildi. Aşağıdaki tabloda elde edilen değerler gösterilmiştir.

Tablo 8.2. Düz kinematik ile elde edilen değerler

Eklemlerin açıları(rad)	Konum (m)	Rotasyon Matrisleri
$q_1 = 0.05$ $q_2 = -0.272$ $q_3 = 3.78$	$X = 0.042$ $Y = -0.0038$ $Z = -0.097$	$\begin{bmatrix} -0.3663 & -0.92 & -0.057 \\ -0.0210 & -0.053 & 0.998 \\ -0.93 & -0.0306 & 0.123 \end{bmatrix}$
$q_1 = 0.8$ $q_2 = -0.3$ $q_3 = 3.3$	$X = 0.101$ $Y = 0.104$ $Z = -0.0917$	$\begin{bmatrix} 0.0983 & -0.69 & -0.717 \\ 0.101 & -0.71 & 0.697 \\ -0.99 & -0.141 & 0 \end{bmatrix}$
$q_1 = -0.099$ $q_2 = 0.038$ $q_3 = -0.0951$	$X = 0.46$ $Y = -0.48$ $Z = 3.495$	$\begin{bmatrix} 0.1143 & -0.8885 & -0.4444 \\ 0.0567 & -0.4408 & 0.8957 \\ -0.9918 & -0.1276 & 0 \end{bmatrix}$
$q_1 = -0.65$ $q_2 = -1.00$ $q_3 = 3.78$	$X = 0.083$ $Y = 0.039$ $Z = -0.075$	$\begin{bmatrix} 0.1136 & -0.8860 & -0.4496 \\ 0.0572 & -0.4459 & 0.8932 \\ -0.9919 & -0.1272 & 0 \end{bmatrix}$
$q_1 = 0.8$ $q_2 = -0.3$ $q_3 = 3.3$	$X = 0.038$ $Y = -0.021$ $Z = -0.053$	$\begin{bmatrix} 0.1012 & -0.8524 & -0.5130 \\ 0.0605 & -0.5094 & 0.8584 \\ -0.9930 & -0.1179 & 0 \end{bmatrix}$

8.3.2. Ters kinematik analiz

Ters kinematik analiz için daha önce elde edilen ters kinematik formülleri Matlab simulink de oluşturulan model dosyasına eklendi.

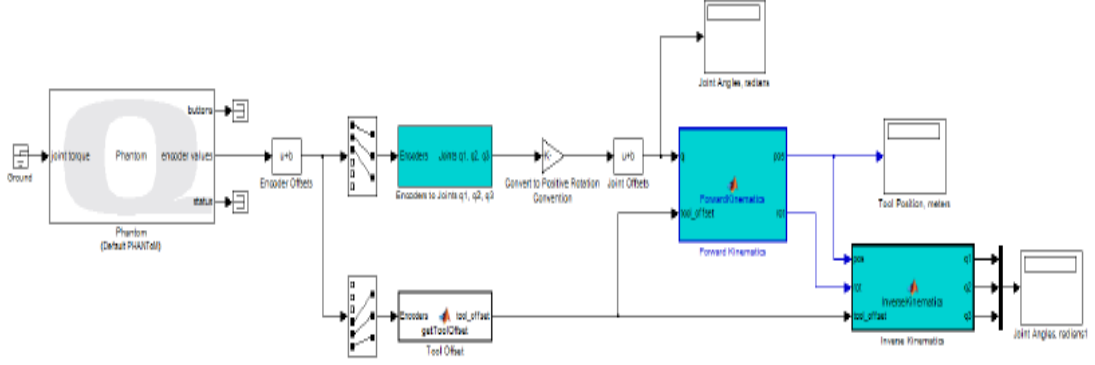


Şekil 8.10. Deneysel olarak oluşturulan ters kinematik bloğu

Tablo 8.3. Ters kinematik giriş değerleri

Konum	$\theta_1(rad)$	$\theta_2(rad)$	$\theta_3(rad)$
Konum 1	0.8	-0.3	3.3
Konum 2	-0.92	-0.25	3.14
Konum 3	-0.65	-1.00	3.78

Bir önceki uygulamada kullanılan Forward_Kinematics.mdl dosyası kullanılan model dosyasına eklenerek ve bazı değişikliklerle bulunarak yeni model dosyası oluşturuldu.



Şekil 8.11. Oluşturulan ters kinematik ve düz kinematik model dosyası

Tablo 8.4. Ters kinematik sonuç değerleri

Konum	Eklemlerin açıları(rad)	Robotun ucunun konumu (m)
Konum 1	$q_1 = 0.6131$ $q_2 = -0.29$ $q_3 = 3.33$	$X = 0.108$ $Y = -0.076$ $Z = -0.131$
Konum 2	$q_1 = 0.64$ $q_2 = -0.27$ $q_3 = 3.32$	$X = 0.106$ $Y = 0.079$ $Z = -0.135$
Konum 3	$q_1 = -0.35$ $q_2 = -0.07$ $q_3 = 2.59$	$X = 0.208$ $Y = -0.08$ $Z = -0.14$
Konum 4	$q_1 = 0.38$ $q_2 = -0.05$ $q_3 = 2.57$	$X = 0.206$ $Y = 0.08$ $Z = -0.14$

8.3.3. Jakobiyen matrisi

Jakobiyen matrisi cihazın gerçek çalışma alanının belirleyen tekil noktalardan kurtaran ve cihazın uygulanabilirliğini göstermektedir.

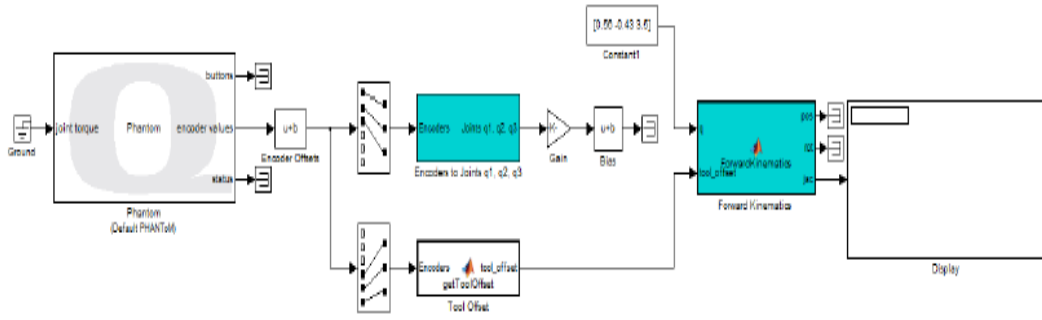
$$\begin{bmatrix} v \\ w \end{bmatrix} = [J] \cdot \dot{q}$$

Bu kısımda düz kinematik analizden faydalanılmıştır. Öncelikle düz kinematik analiz için oluşturulan Forward_Kinematics.mdl dosyası açıldıktan sonra birtakım değişiklikler yapılarak dosya kaydedilir. Burada yapılan en önemli değişiklik düz kinematik bloğuna elde edilen jakobiyen matrisi hesaplamalarını katılmasıyla elde edilen yeni blok modelidir.



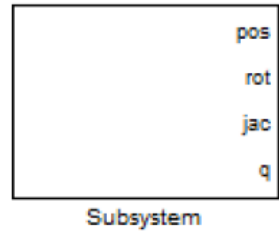
Şekil 8.12. Modifiye edilmiş düz kinematik bloğu

Elde edilen yeni blok ile model ile elde edilen simulink model dosyası aşağıdaki şekilde verilmiştir.



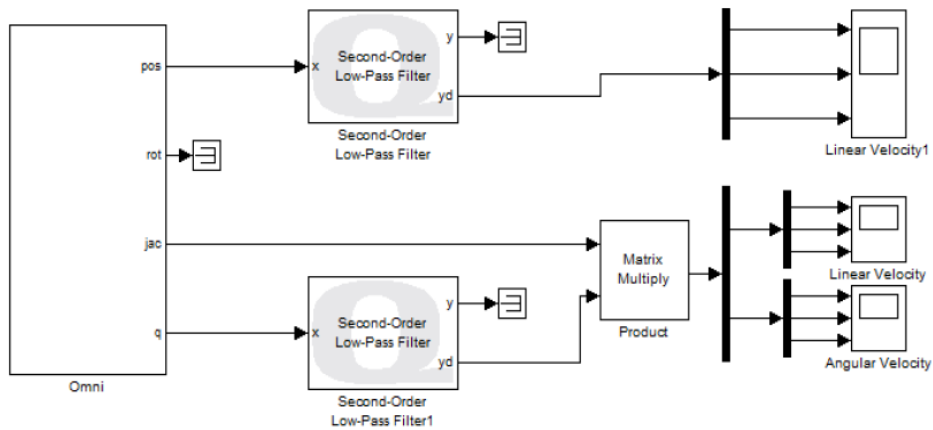
Şekil 8.13. Modifiye edilmiş model dosyası

Yukarıdaki model dosyası subsystem bloğu oluşturuldu. Oluşturulan blokta sırasıyla çıkışlar konum, dönme , jakobiyen ve açılar 'dır.



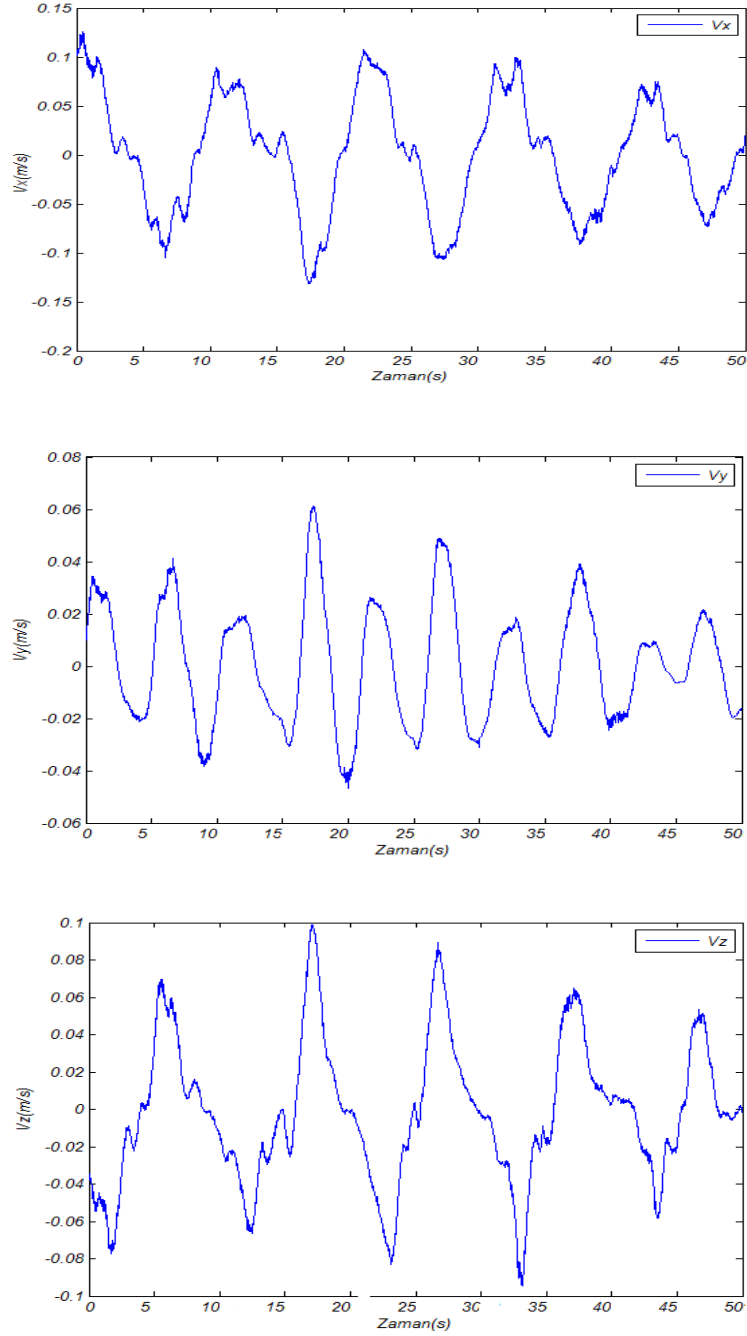
Şekil 8.14. Modifiye edilmiş model dosyası subsystem hali

Ayrıca konum ve açı çıkışlarına Quarc Targets Continuous kütüphanesinden 2. dereceden alacak geçiren filtre(Second Order Low-Pass Filter) kullanıldı. Filitrenin kesme frekansı 200 Hz ve sönümlleme oranı 1 seçilmiştir.

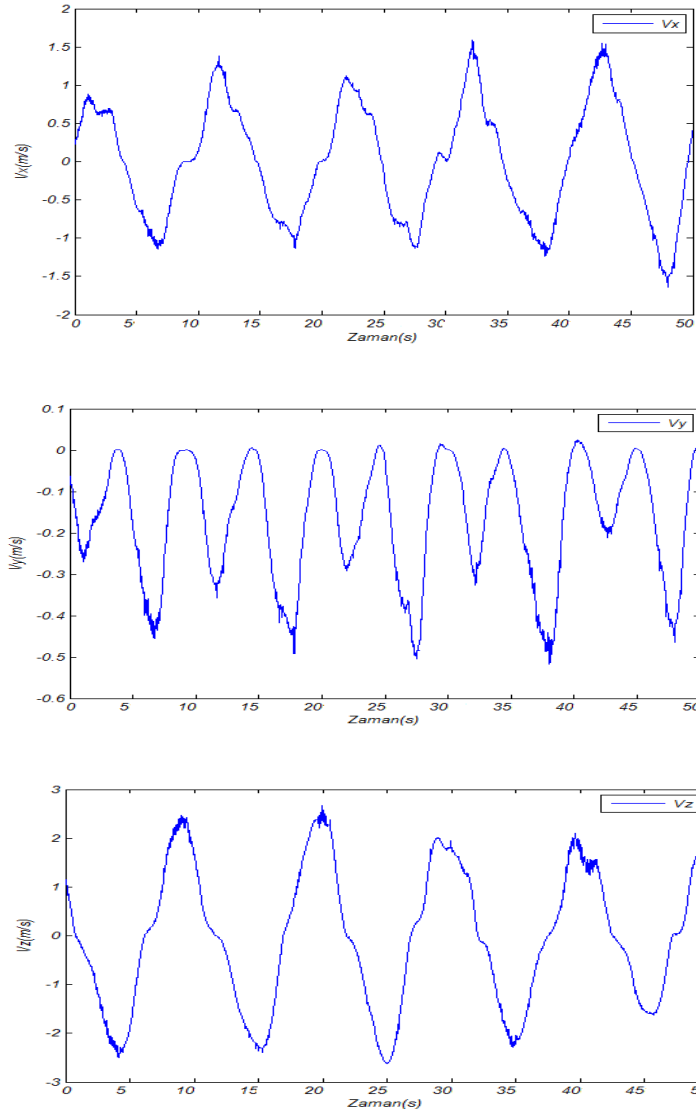


Şekil 8.15. Lineer ve açısal hız model dosyası

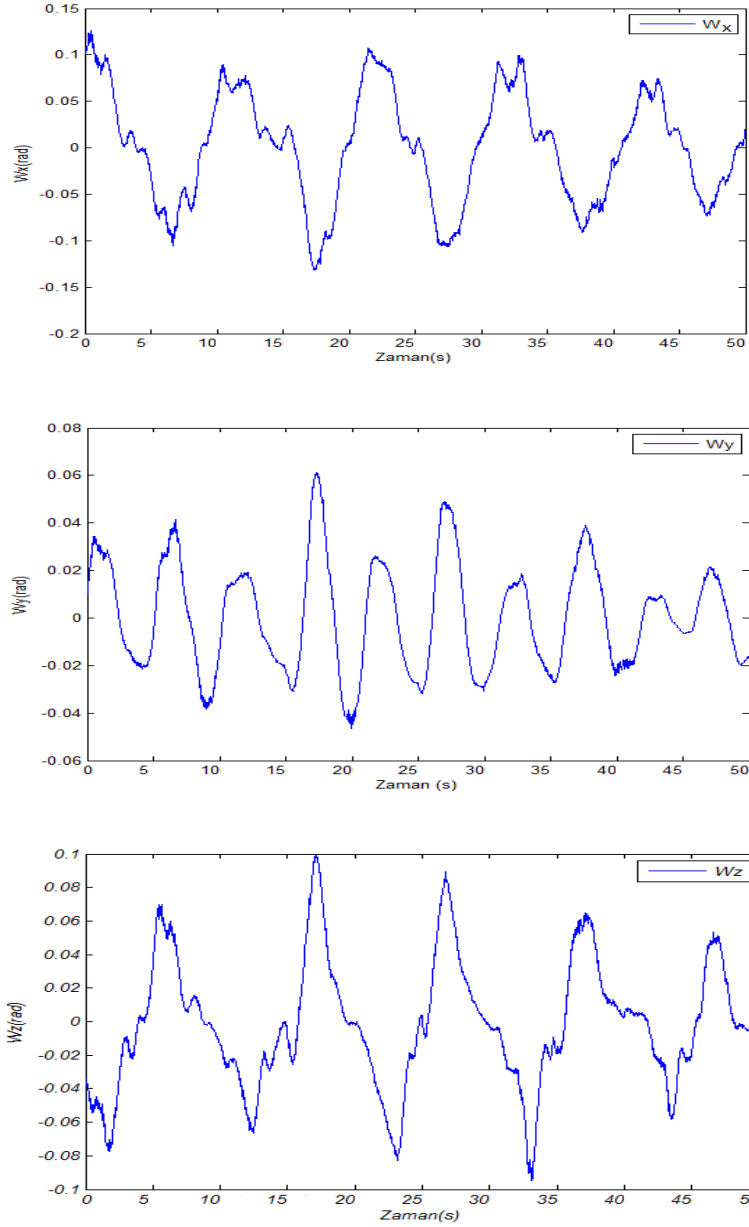
Grafiksel sonuçlar hesaplanan matematiksel modellerden oluşturulan simulink ile sistemin kendi verileriyle oluşturulan simulink ve bir adet m-file dosyasından elde edilmiştir. Aşağıdaki grafikler robotun uç efektörünün ve eklemlerin hız grafikleridir.



Şekil 8.16. Ölçülen lineer V_x, V_y ve V_z hız sonuçları



Şekil 8.17. Jakobiyen matrisi kullanılarak hesaplanan V_x , V_y ve V_z lineer hız sonuçları

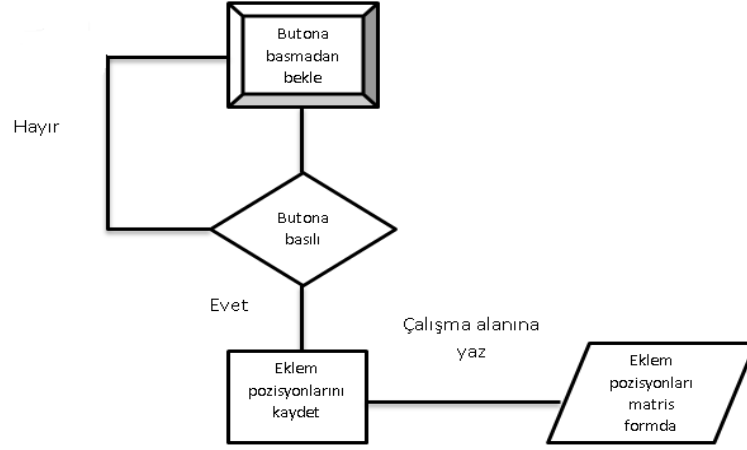


Şekil 8.18. Grafikler sırasıyla 1. 2.ve 3.ekleme ait açısız hız sonuçları

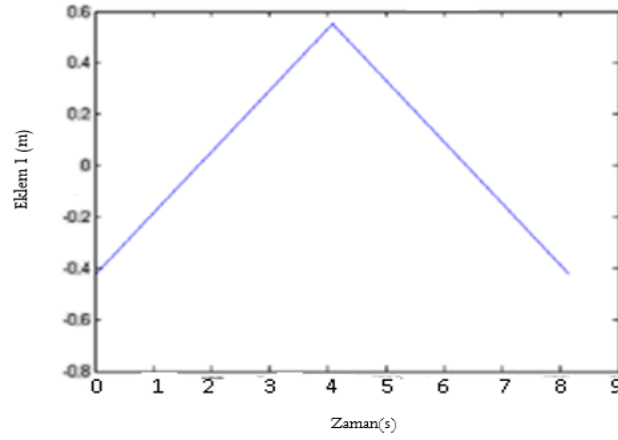
8.3.4. Yörünge takibi

İlk çalışmamızda pendant üzerinde noktalar belirleyip eklemlerin lineer yörünge takibi dikkate alınmıştır. Bu kapsamda sistemimiz iki ana program ve bir adet simulink programından oluşmaktadır. Bu ana programlar ve alt program sürekli eş zamanlı olarak birbirleri ile veri alış verişinde bulunarak ilişkili çalışmaktadırlar. Ana programlarda sisteme ait başlangıç değerleri, robot parametreleri, dinamik denklemleri ve simülasyona ait grafik komutları mevcuttur.

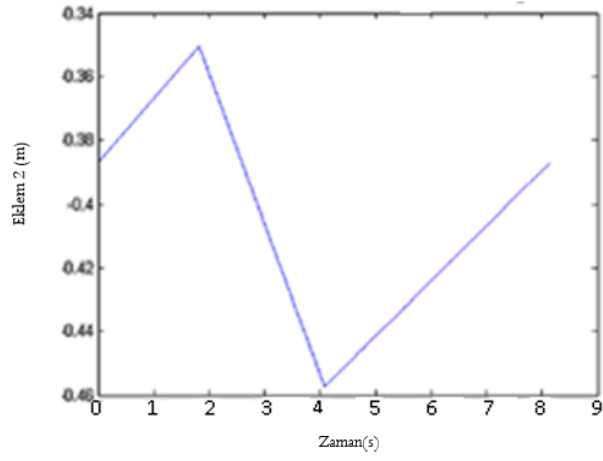
Öncelikle pendant üzerindeki 4 noktasının 2-3 cm üzerinde uç efektör tutularak butona basılır daha sonra aynı şekilde 8 ve 3 noktalarında aynı işlem gerçekleştirilerek eklemlere lineer yörünge öğretilmeye çalışıldı.



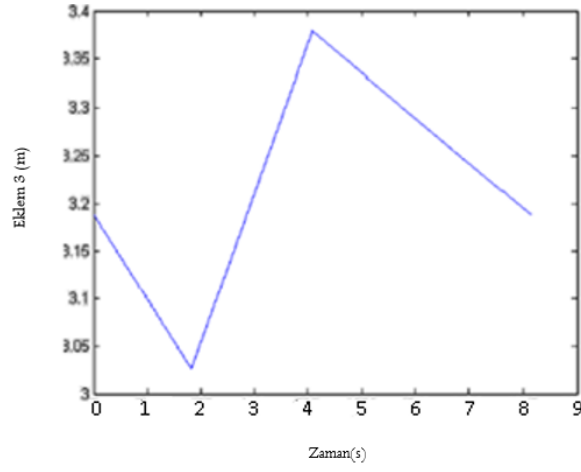
Şekil 8.19. Noktaların öğretilmesi için kullanılan akış şeması



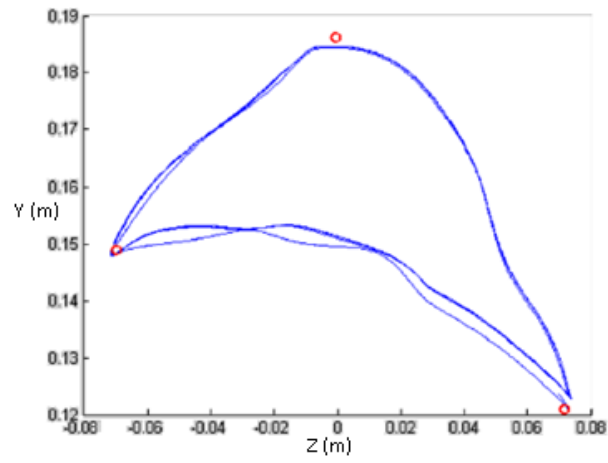
Şekil 8.20. 1.eklem için oluşturulan yörünge



Şekil 8.21. 2.eklem için oluşturulan yörünge

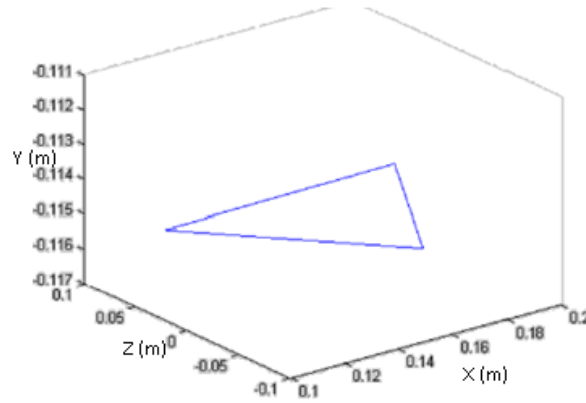


Şekil 8.22. 3.eklem için oluşturulan yörünge

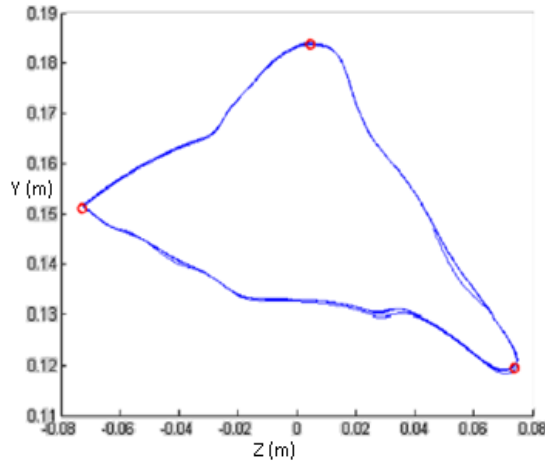


Şekil 8.23. Robotun uç efektör noktasının izlediği yörünge

Bu çalışmamızda ise çalışma uzayında noktalar belirleyip lineer yörünge takibi dikkate alınmıştır. Bu kapsamda sistemimiz iki ana program ve bir adet simulink programından oluşmaktadır. Bu ana programlar ve alt program sürekli eş zamanlı olarak birbirleri ile veri alış verişinde bulunarak ilişkili çalışmaktadırlar. Ana programlarda sisteme ait başlangıç değerleri, robot parametreleri, dinamik denklemleri ve simülasyona ait grafik komutları mevcuttur.



Şekil 8.24. Çalışma uzayında 3B oluşturulan yörünge



Şekil 8.25. Çalışma uzayında izlenen yörünge

8.4. Deneysel Çalışmalar 2

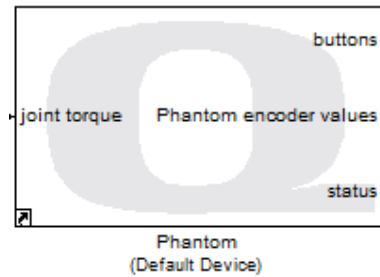
8.4.1. Giriş

Bu bölüm üç kısımdan oluşmaktadır. İlk olarak Phantom Omni haptik robot(Master robot) ile 6 serbestlik dereceli Sanal slave robot arasındaki hareket kontrolü anlatılacak ve sonuçları verilecektir. İkinci olarak Master robot, sanal slave robot ve 3 serbestlik dereceli

robot (gerçek slave) ile gerçekleştirilen Gerçek Master-Sanal Slave-Gerçek Slave (Real Master-Virtual Slave-Real Slave) uygulaması anlatılacak ve sonuçları verilecektir. Bu iki bölümde tek yönlü (unilateral) kontrol gerçekleştirilecektir. Üçüncü kısım olarak Master robot ile Sanal slave robot arasında gerçekleştirilen iki yönlü (bilateral) konum ve kuvvet kontrolü grafikleri verilecek ve sonuçları irdelenecektir.

8.4.2. Phantom omni haptik robot(master) ile sanal robotun (virtual slave) hareket kontrolü

Bu kısımda haptik robot ile oluşturulan sanal slave robotun hareket kontrolü anlatılacaktır. İlk olarak Matlab simulink ortamında yeni bir model dosyası açıldı ve bu dosya üzerinde gerçek zamanlı çalışma yapabilmek için gerekli opsiyonlar yapıldı. Bundan sonra Quarc kütüphanesinden Phantom Omni haptik cihaz bloğu model dosyasına eklendi. Haptik robotun elde edilen dinamik denklemleri Matlab simulink dosyasında Matlab fonksiyon (Matlab function) dosyasına gömüldü. Haptik robot motorları için gerekli offset ayarları yapıldı.

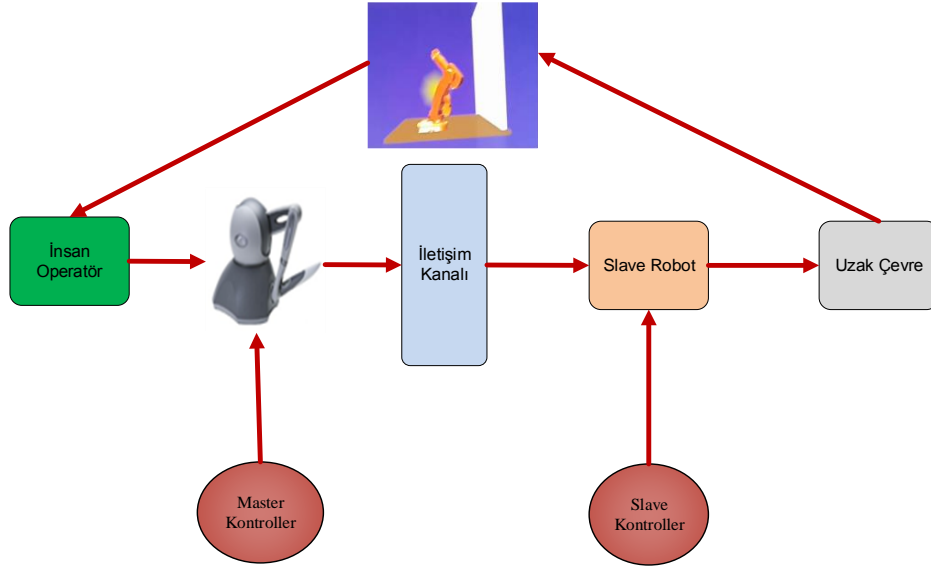


Şekil 8.26. Phantom Omni haptik cihaz bloğu

Böylece haptik robot (Master robot) için gerekli düzenlemeler gerçekleştirildi. 6 serbestlik dereceli (sanal slave robot) için de elde edilen dinamik denklemler model dosyasına Matlab fonksiyon bloğu olarak eklendi. Daha sonra Matlab Sanal Gerçeklik (Virtual Reality Toolbox) araç kutusu kullanılarak elde edilen sanal slave robot modeli model dosyasına eklendi.

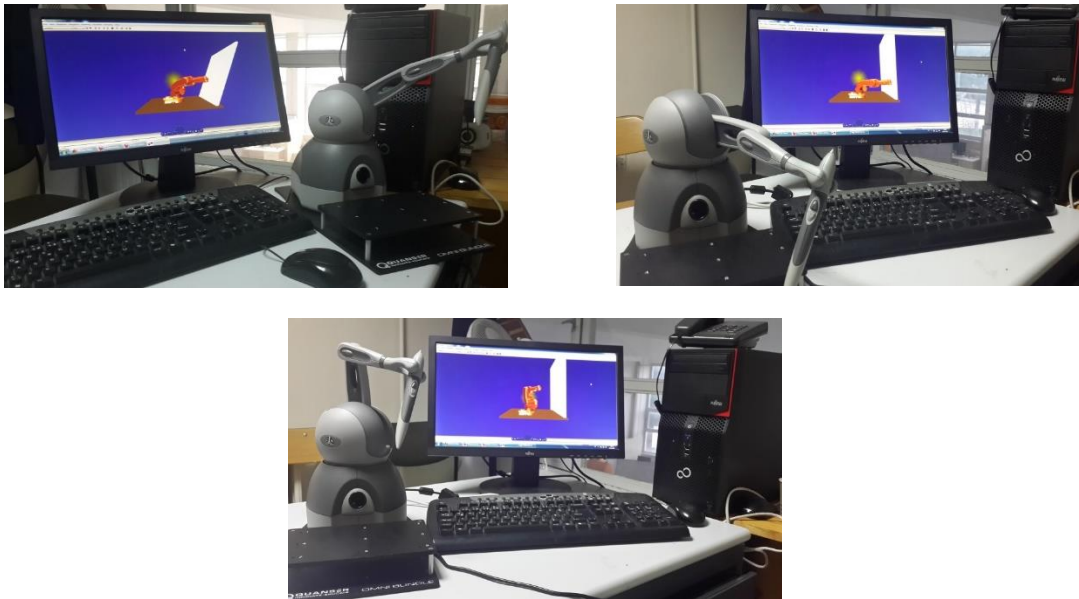
Gerçek zamanlı çalışma öncesinde gerek dinamik denklemlerin gömüldüğü Matlab fonksiyon dosyası gerek VR Sink bloğu içinde bulunan sanal robot dosyasında ayarlar gerçekleştirildi. Bu çalışmada tek yönlü hareket kontrolü hareket kontrolü anlatılacaktır.

Tek yönlü teleoperasyon sisteminde herhangi bir geri besleme yoktur. Bu çalışmada farklı olarak tek yönlü kontrol sistemine görsel geri besleme sağlamak amacıyla sanal slave robot oluşturuldu.

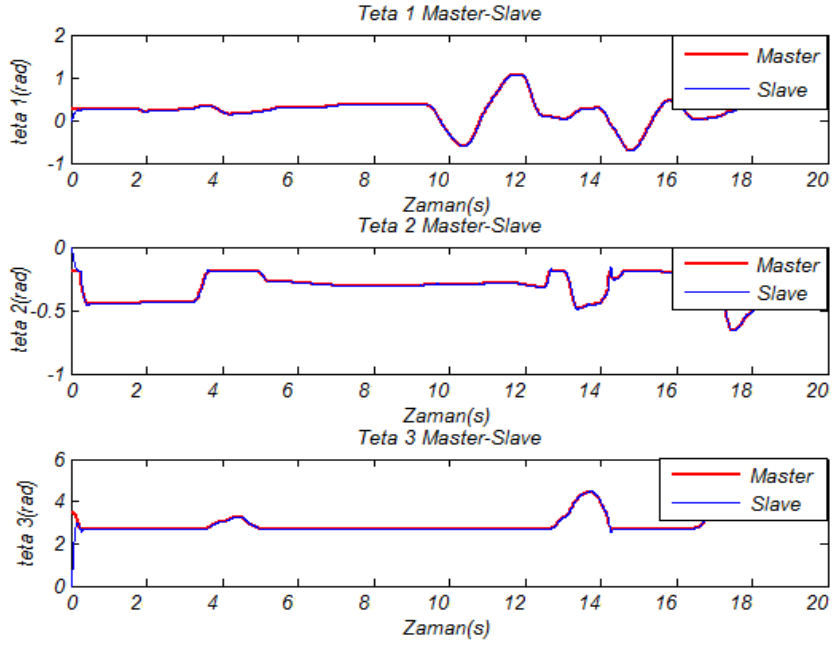


Şekil 8.27. Tek yönlü teleoperasyon sistemimizin unsurları

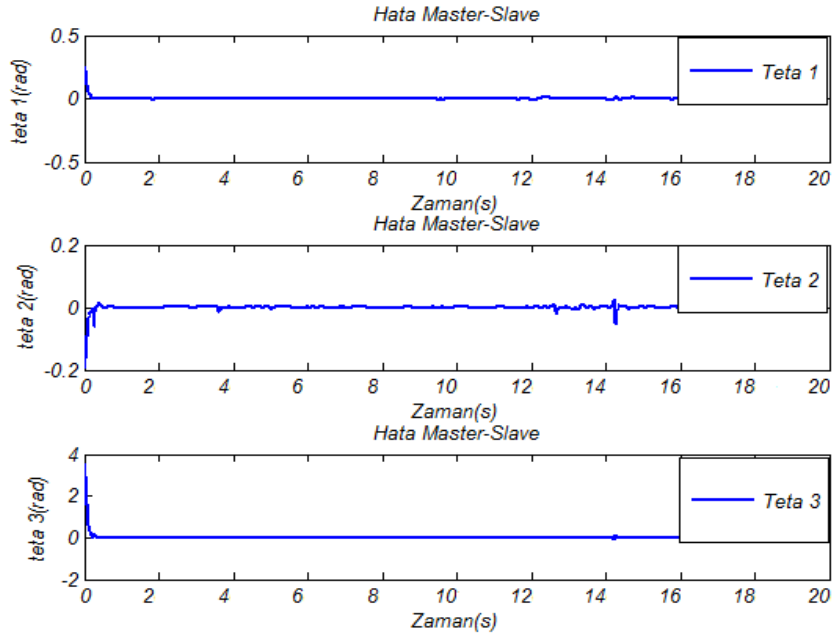
Bu çalışmada operatör master robot ile referans hareket oluşturulurken sanal slave robot operatörün verdiği komutlar vasıtasıyla referansı takip etmeye çalışmaktadır. Referansı takip sırasında oluşacak zaman gecikmesi göz önüne alınmamıştır. Robotlar ile farklı yörüngelerde teleoperasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Robotların uzuv açılarının takip ve hata grafikleri aşağıda verilmiştir.



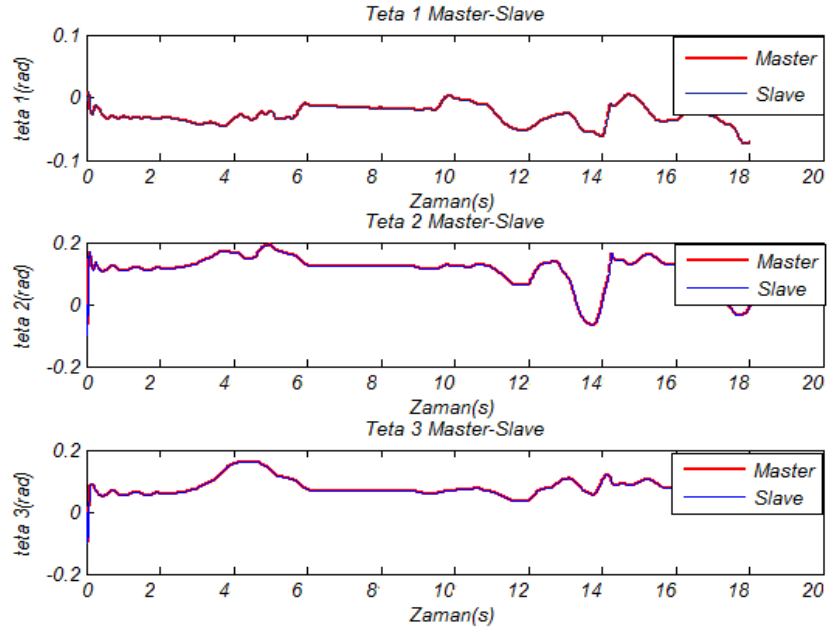
Şekil 8.28. Deney düzeneği fotoğrafları



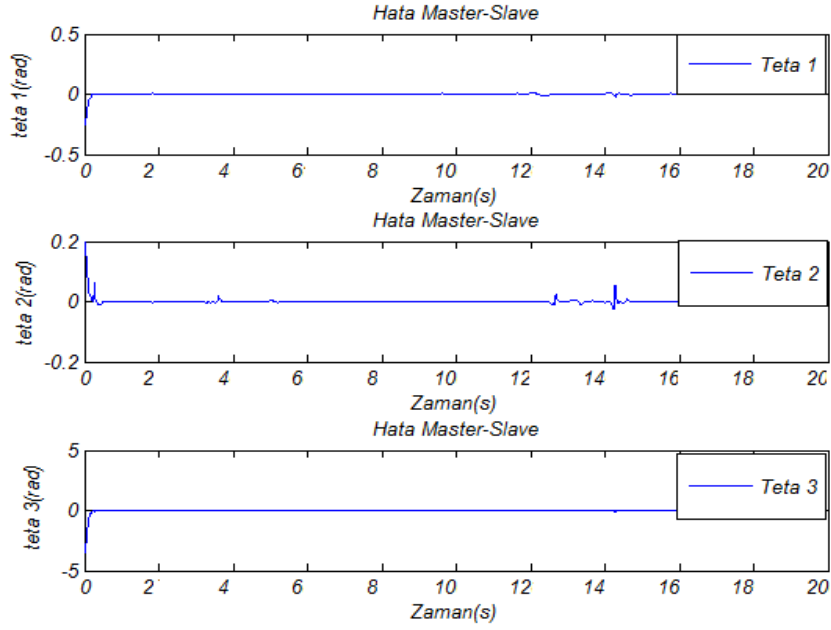
Şekil 8.29. Teta1, teta 2 ve teta 3 için konum deney sonuçları



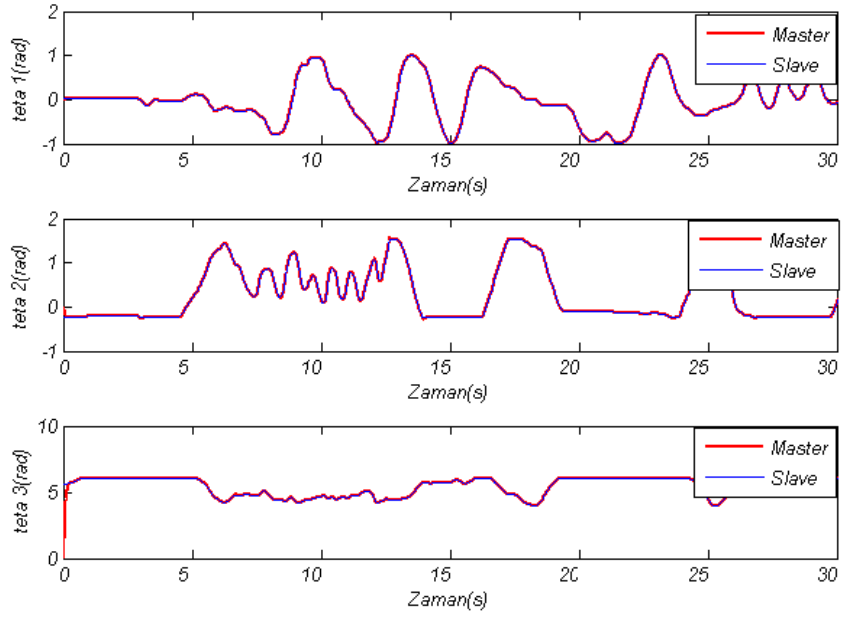
Şekil 8.30. Teta1, teta 2 ve teta 3 için konum hata grafikleri



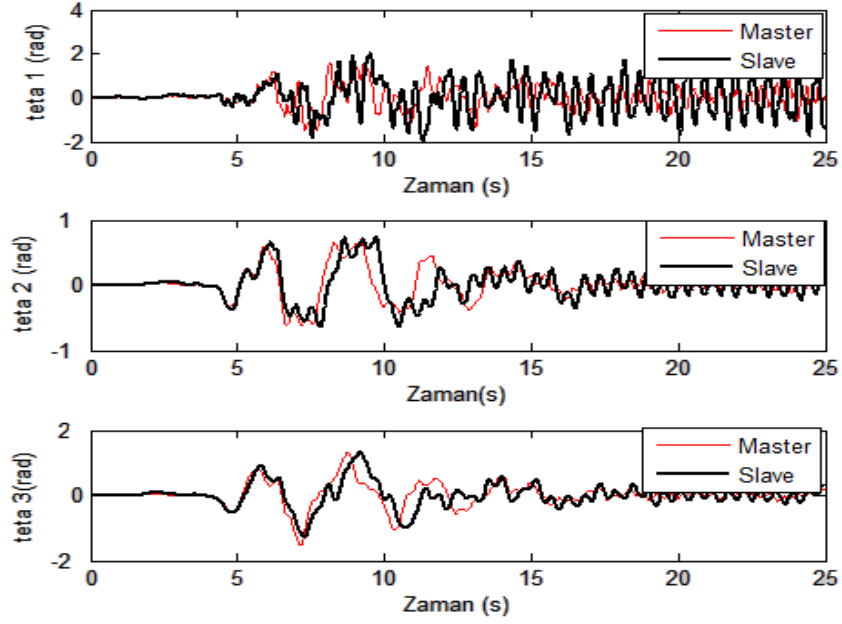
Şekil 8.31. Teta1, teta 2 ve teta 3 için konum deney sonuçları



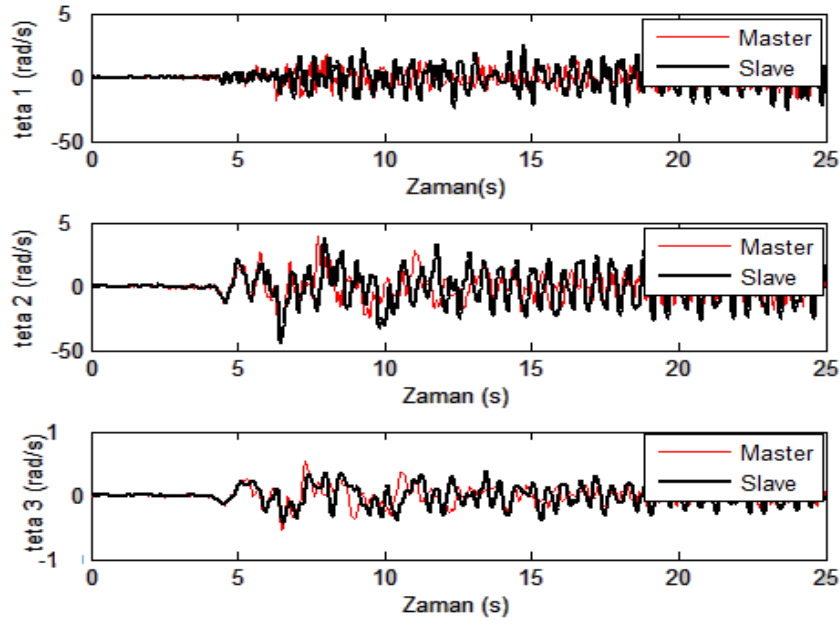
Şekil 8.32. Teta1, teta 2 ve teta 3 için konum hata grafikleri



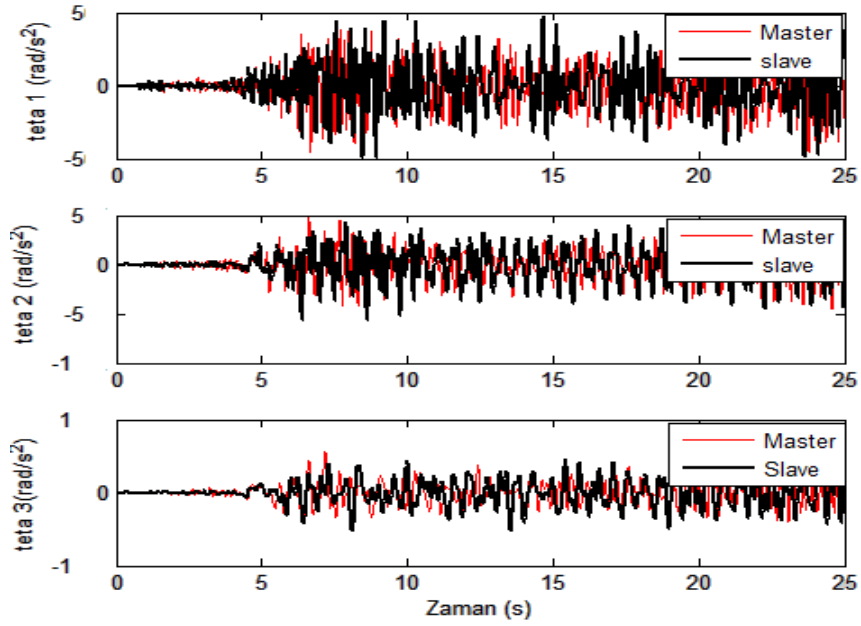
Şekil 8.33. Teta1, teta 2 ve teta 3 için konum grafikleri



Şekil 8.34. Master-Slave robotun teta1, teta 2 ve teta 3 için konum deney sonuçları



Şekil 8.35. Master-Slave robotun teta1, teta 2 ve teta 3 için hız deney sonuçları

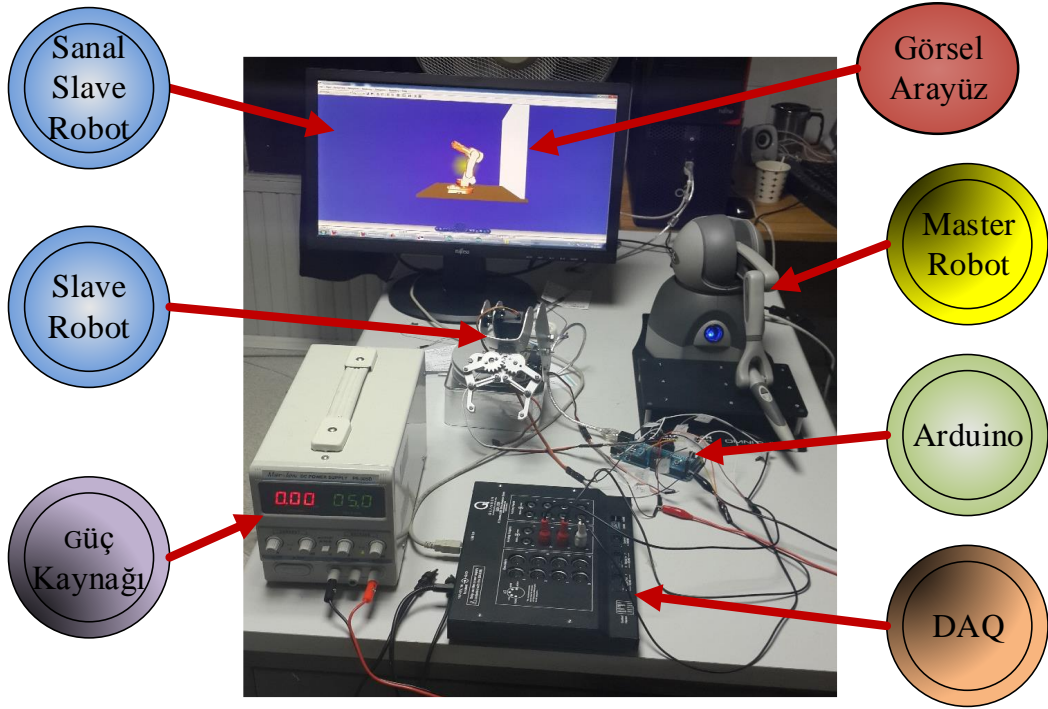


Şekil 8.36. Master-Slave robotun teta1, teta 2 ve teta 3 için ivme deney sonuçları

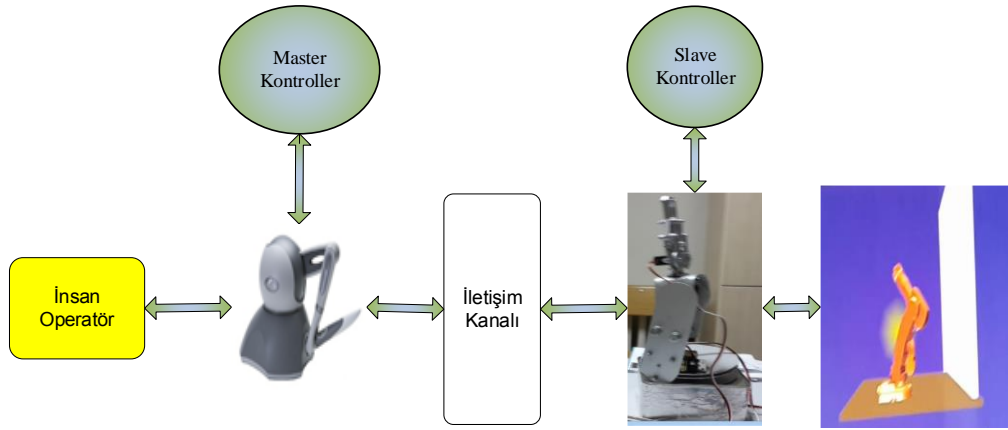
8.4.3. Master robot ile gerçek slave ve sanal slave (real master-virtual slave-real slave) robotun hareket kontrolü

Bu bölümde master robot ile sanal ve gerçek slave robot arasındaki konum kontrolü gerçekleştirildi. Deney düzeneğinden gerçek slave öncelikle 3 adet servo motorla tahrik edilir.

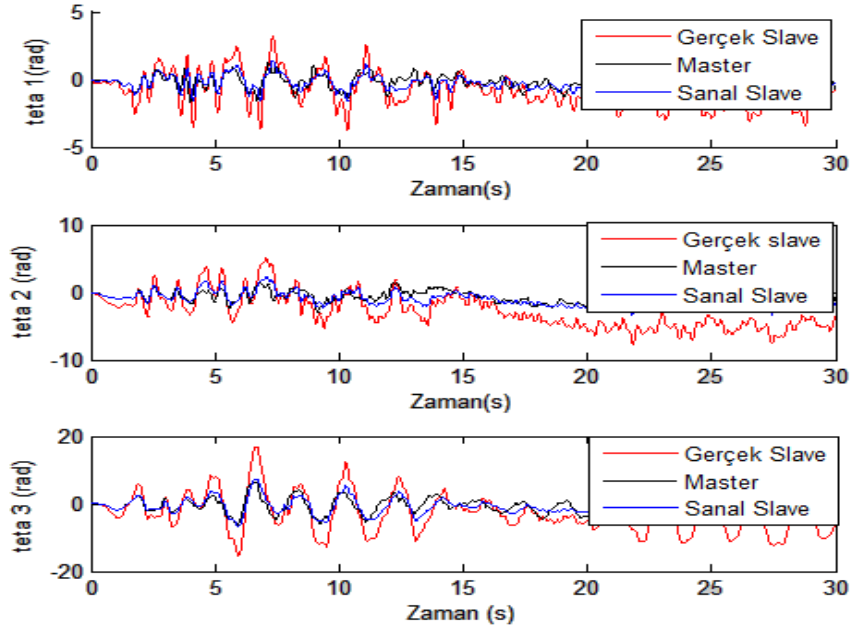
Öncelikle robotun kurulumu için güç kaynağı, mikroişlemci ve data toplamak için data toplama kartı bir araya getirildi. Gerekli bağlantılar gerçekleştirildikten sonra master robot ile referans konum üretilirken sanal slave robot ve gerçek robot bu konumu takip etmeye çalışmaktadır. Master tarafından oluşturulan konum sanal slave robotun dinamiği üzerinden slave robot kontrol edildi. Gerçek slave robot ise ters kinematik üzerinden kontrol edildi. Gerçek slave robota gelen sinyal mikroişlemci olarak Arduino kullanıldığından 0-5 V volt arasına çevrildi ve data toplama kartı input bölümünden robota gelen sinyal yazdırıldı. Mikroişlemcinin çıkışından sonra bölümünden tekrar dönüşüm yapılarak gerçek değeri okundu. Servo motorlardan alınan geri besleme ise yine data toplama kartının çıkış bölümünden okunarak robota giriş ve çıkış değerleri okundu. Deney düzeneği şekil 8.36'de ve kullanılan tek yönlü kontrol blok diyagramı Şekil 8.37'de verilmiştir.



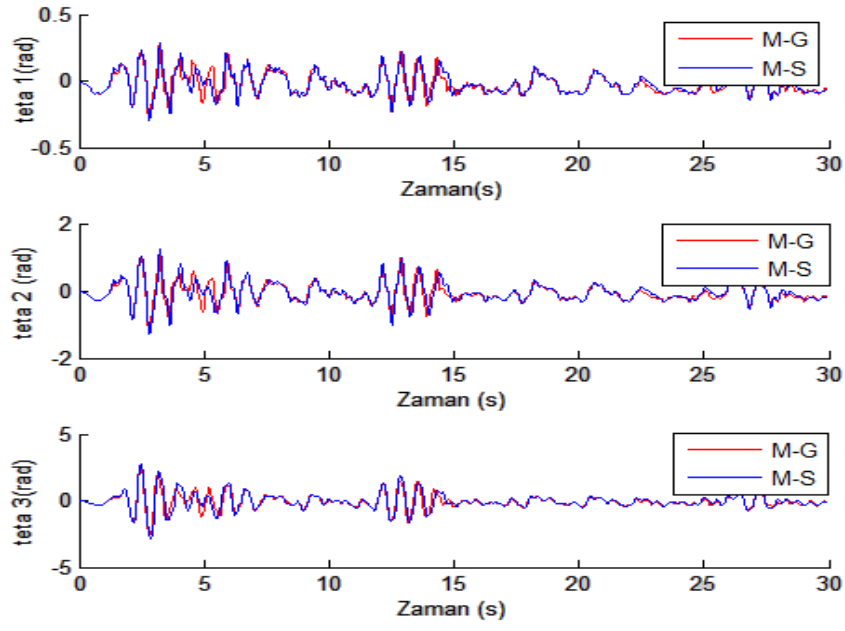
Şekil 8.37. Deney düzeneği Real-Virtual-Real(R-V-R)



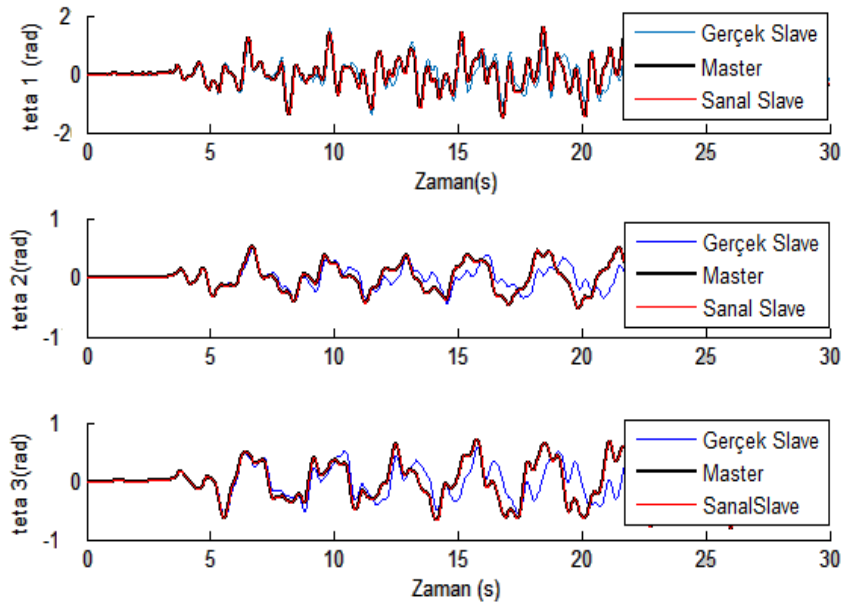
Şekil 8.38. Kullandığımız tek yönlü (unilateral) teleoperasyon sisteminin blok diyagramı



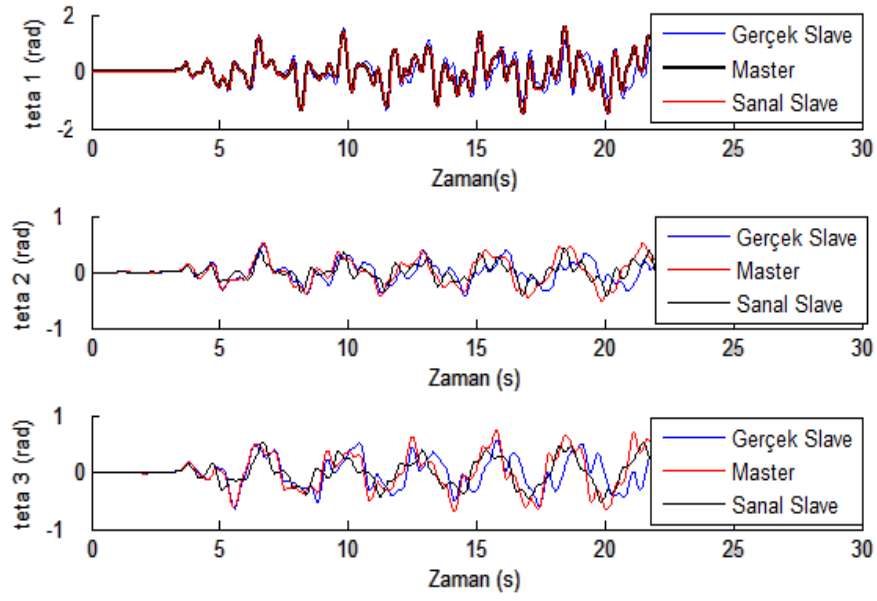
Şekil 8.39. Teta1, teta 2 ve teta 3 için konum grafikleri



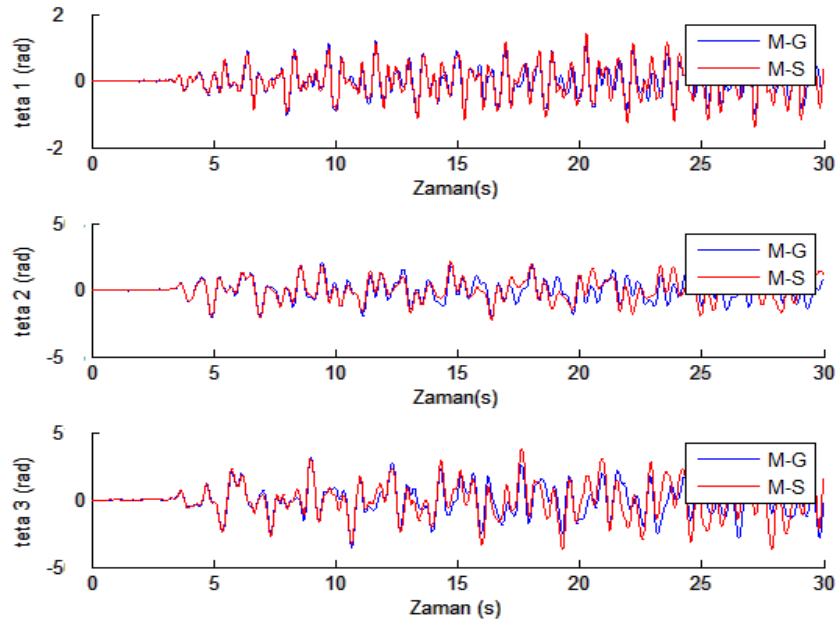
Şekil 8.40. Teta1, teta 2 ve teta 3 için konum hata grafikleri



Şekil 8.41. Teta1, teta 2 ve teta 3 için konum grafikleri



Şekil 8.42. Teta1, teta 2 ve teta 3 için konum grafikleri

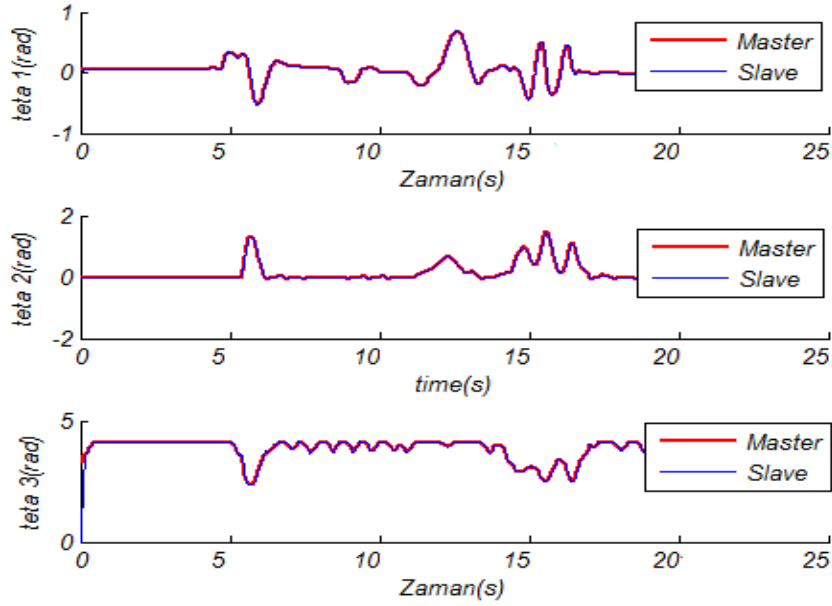


Şekil 8.43. Teta1, teta 2 ve teta 3 için hata grafikleri

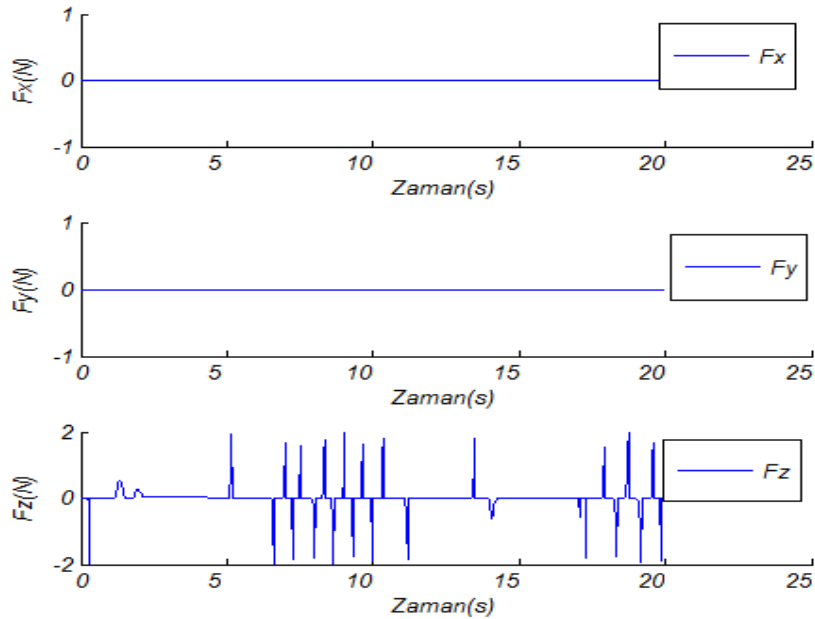
Deneysel çalışmalar sonucunda gerçek –sanal-gerçek uygulamasında referans değerleri büyük ölçüde takip ettiği elde edilen grafiklerden görülmektedir.

8.4.4. Master robot ile sanal slave robotun iki yönlü konum ve kuvvet kontrolü

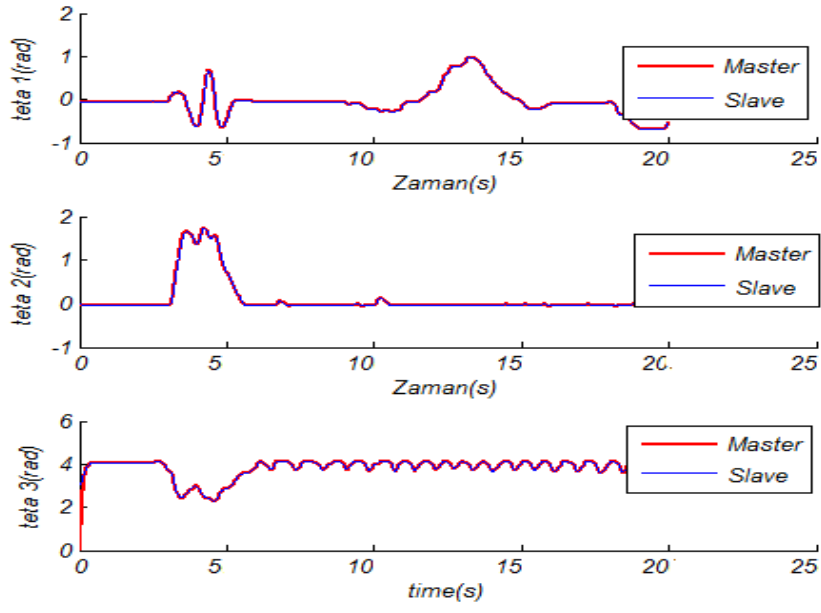
Bu bölümde master robot ile sanal slave robot arasında iki yönlü (kuvvet ve konum kontrolü gerçekleştirildi. Bu kısımda önemli kısmı kuvvet gerçekleştirme kısmı bölüm 6'da ifade edildiği gibi sanal duvar ile robot arasında kütle-yay-damper sistemi tasarlanarak kuvvet geribildirimi gerçekleştirildi.



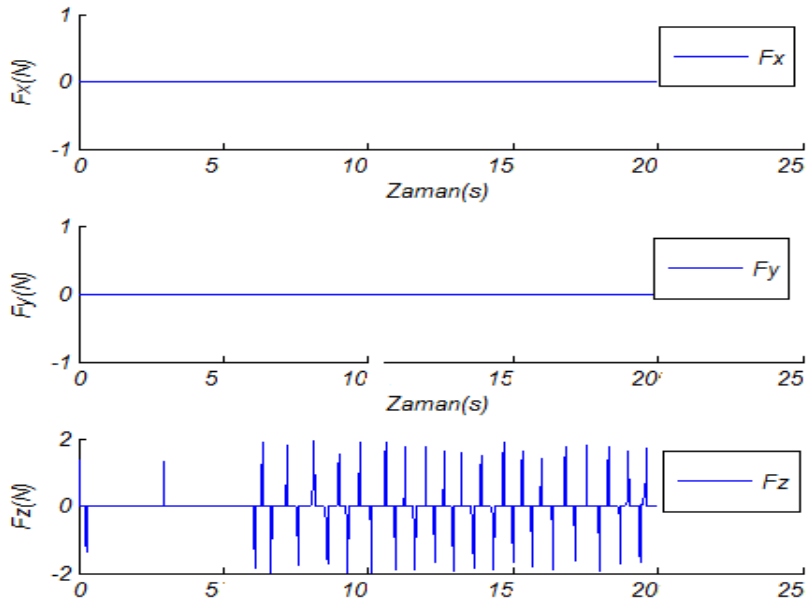
Şekil 8.44. Teta1, teta 2 ve teta 3 için konum deney sonuçları



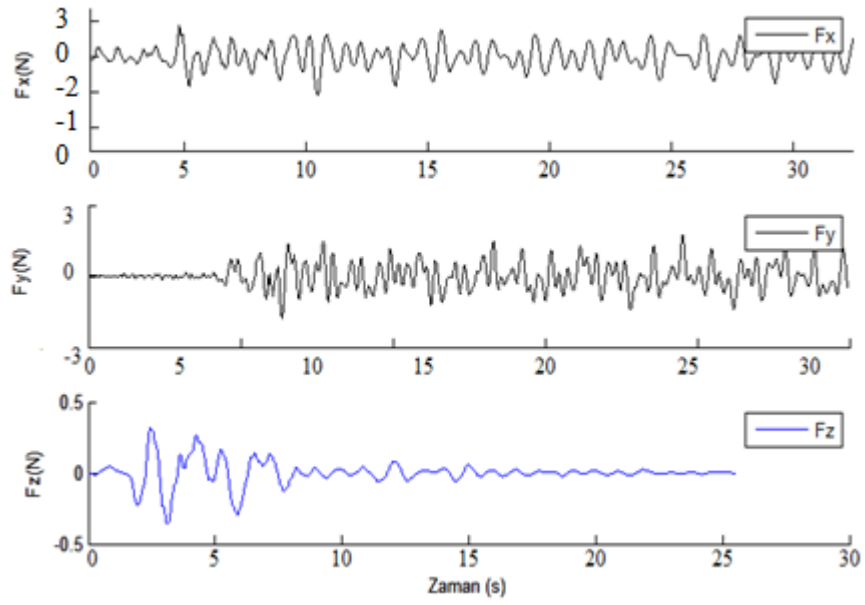
Şekil 8.45. Fx, Fy ve Fz için deney sonuçları



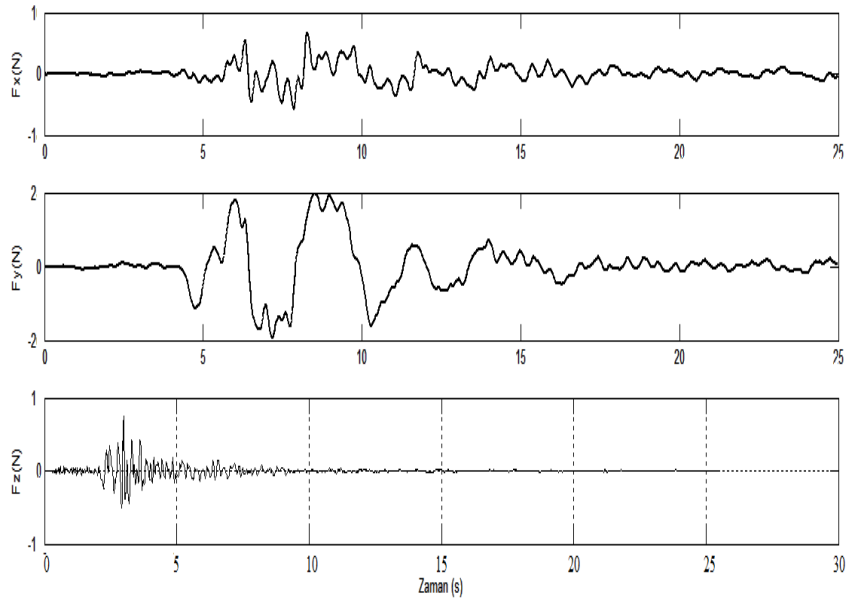
Şekil 8.46. Teta1, teta 2 ve teta 3 için deney sonuçları



Şekil 8.47. Fx, Fy ve Fz için deney sonuçları



Şekil 8.48. F_x , F_y ve F_z için deney sonuçları



Şekil 8.49. F_x , F_y ve F_z için deney sonuçları

Sonuç olarak bu çalışmada ilk başta z yönünde kuvvet geri bildirimini hedeflenmiş ve sonuçlar elde edilmiştir. 2. Deney çalışmasında ise F_x , F_y , F_z yönünde grafikler elde edilmiştir. İki yönlü kuvvet ve konum kontrolü gerçekleştirmiştir.

9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

9.1. Sonuçlar

Bu tezde hedeflerden biri olan sanal ve gerçek zamanlı robotların tele operasyonunu gerçekleştirildi. Bu kapsamda Phantom Omni haptik 6 serbestlik dereceli cihaz kullanılarak 6 serbestlik dereceli endüstriyel robotun 3 serbestlik dereceli sanal modeli ile etkileşim sağlayabilen bir arayüz geliştirildi. Kullanıcı haptik arayüz noktasını hareketlendirerek sistem için pozisyon, hız ve ivme girdisi oluşturularak kullanıcıya geri besleme olarak kuvvet ve sanal robotun görsel hareketi elde edildi. Kuvvet geri beslemesi endüstriyel robotun oluşturulan dinamik modeli aracılığı ile hesaplanmaktadır. Sanal robot hareketlerinin kullanıcıya görsel geri besleme olarak sağlanması için bir görsel arayüz tasarlandı. Tasarlanan görsel arayüz, içerisinde endüstriyel robotun katı modelinin konumlandığı sanal bir ortamı göstermektedir. Oluşturulan sanal ortam ve görsel arayüz Matlab paket programı kullanılarak geliştirilmiştir. Sanal endüstriyel robotun gerçek boyutları fabrika üretim tesislerinden elde edilerek CAD modeli katı modelleme paket programında oluşturulmuş ve sanal ortam oluşturmak için Matlab paket programında bulunan sanal gerçeklik araç kutusu (VR) kullanılmıştır. Phantom Omni haptik robot ve sanal 6 serbestlik dereceli endüstriyel robot için kinematik, ters kinematik, dinamik ve ters dinamik modelleri elde edilmiş ve robotların kontrolünde aktif olarak kullanılmıştır.

Bu tezin hedeflerinden ikincisi tek yönlü(unilateral) hareket kontrolünü gerçekleştirmektir. Bu kapsamda 3 serbestlik dereceli robot kol için kinematik, ters kinematik ve jakobiyen matrisleri elde edilmiştir. Bu kısımda Phantom Omni haptik robot ile sanal endüstriyel robot ve 3 serbestlik dereceli robot kol ile hareket kontrolü gerçekleştirilmiş ve sonuçları irdelenmiştir. Hedeflenen çalışmalardan biri olan sanal robot ve teleoperasyon ile iki yönlü (bilateral) kuvvet ve hareket kontrolü gerçekleştirilmiş, benzetim ve gerçek ortamda uygulanmış, sonuçları irdelenmiştir.

Sonuçlar grafiksel olarak elde edilmiş ve değerler tablo haline getirilerek irdelenmiştir. Sonuç olarak, denetim algoritmalarının performansları dikkate alındığında Kendinden Uyarlamalı (Adaptive) Hesaplanmış tork (Adaptive Based –CTC) denetim algoritmasının kullanılan denetim algoritmalarından daha iyi bir performans elde edildiği

ve daha iyi uygulanabilir oldukları görülmüştür. Bu tez kapsamında geliştirilen programlar, sanal robot ve haptik cihaz hakkında gelecekteki çalışmalar için kullanılabilir.

9.2. Öneriler

Bu tez kapsamında geliştirilen programlar, sanal robot ve haptik cihaz hakkında gelecekteki çalışmalar için kullanılabilir. İki yönlü kuvvet ve konum kontrolü çalışmalarında, sistemin kararlılığı (stability) , kapalı çevrim kuvvet kontrolü, passivity konuları ayrıca zaman gecikmesi ve iletişim kesintisi gibi konuları çalışılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Robot Institute of America**, 1979
- [2] **S.L. Delp, et. al.**, 1997. Surgical simulation : an Emerging Technology for Emergency Medical Training , Presence: Teleoperation and Virtual Environments(Special issue on Virtual Environments in Medicine) *MIT Press. Vol. 6.No. 4, 1997*, 147-159.
- [3] **Tang, B., Hanna, G. B., & Cuschieri, A.** (2005). Analysis of errors enacted by surgical trainees during skills training courses. *Surgery, 138*, 14-20.
- [4] **Hayward, V., Choksi, J., Lanvin, G. and Ramstein, C.** (1994), "Design and multi-objective optimization of a linkage for a haptic interface", in Lenarcic, J. and Ravan, B. (Eds), *Advances in Robot Kinematics*, Kluwer Academic, Dordrecht, pp. 352-9.
- [5] **Seiichiro, K., Wataru, I., Kouhei, O.**, 2005. Medical mechatronics An application to haptic forceps, *Annual Reviews in Control*, **29**(2), 237-245.
- [6] **Seiichiro, K., Wataru, I., Kouhei, O.**, 2005. Medical mechatronics An application to haptic forceps, *Annual Reviews in Control*, **29**(2), 237-245.
- [7] **Maurina, B., Piccin, O., Bayle, B., Gangloff, J. de Mathelin M., Soler L., Gangi A.**, 2004. A new robotic system for CTguided percutaneous procedures with haptic feedback, *International Congress Series Computer Assisted Radiology and Surgery. Proceedings of the 18th International Congress and Exhibition*, 515-520.
- [8] **Shahram, P., Temei, L.**, 2004. Toward new designs of haptic devices for minimally invasive surgery, *International Congress Series Computer Assisted Radiology and Surgery. Proceedings of the 17th International Congress and Exhibition*, 775-781.
- [9] **Franck, P., Vidala, Nicholas, C., Derek, A., Gould A. E., Healey, N.W., J.**, 2005. Developing a needle guidance virtual environment with patient-specific data and force feedback, *International Congress Series Computer Assisted Radiology and Surgery*, 418-423.
- [10] **Stephen, S., Kevin, M., Andrea, S., Giancarlo, L.**, 2005. A surgical simulator for planning and performing repair of cleft lips, *Journal of cranio-maxillo-facial surgery*, **33**, 223-228.
- [11] **Wang, P., Becker, A.A., Jones, I.A., Glover, A.T., Benford, S.D., Greenhalgh C.M., Vloeberghs M.**, 2006. A virtual reality surgery simulation of cutting and retraction in neurosurgery with force-feedback, *Computer methods and programs in biomedicine*, **84**, 11-18.
- [12] **Maass, H., Cakmak, H.K., Kuehnappel, U.G., Trantakis, C., Strauss, G.**, 2005. Providing more possibilities for haptic devices in surgery simulation, *International Congress Series Computer Assisted Radiology and Surgery*, 725-729.
- [13] **Kevin, M., LeRoy H., Cynthia, B., Simon, W., Christopher, H., Stephanie, O., David, B.**, 2001. Surgical simulator for diagnostic and operative hysteroscopy, *Proceedings of the conference on Visualization*, 449-452, San Diego, California.
- [14] **Tatsushi, T., Tadashi, K., Genichi, S., Masashi, K.**, 2005. Development of a simulation system with a haptic device for cardiac muscle palpation, *International Congress Series*
- [15] **Heiland, M., Petersik, A., Pflesser, B., Tiede, U., Schmelzle, R., Hohne, K.-H., Handels, H.**, 2004. Realistic haptic interaction for computer simulation of dental

- surgery, *International Congress Series Computer Assisted Radiology and Surgery. Proceedings of the 18th International Congress and Exhibition*, 1226-1229.
- [16] **Sohmura, T., Hojo, H., Nakajima, M., Wakabayashi, K., Nagao, M., Iida, S., Kitagawa, T., Kogo, M., Kojima, T., Matsumura, K., Nakamura, T., Takahashi, J.**, 2004. Prototype of simulation of orthognathic surgery using a virtual reality haptic device, *International journal of oral and maxillofacial surgery*, **33**, 740- 750.
- [17] **Fahlbusch, St., Mazerolle, S., Breguet, J.-M., Steinecker, A., Agnus, J., P´erez R. , Michler, J.**, 2005. Nanomanipulation in a scanning electron microscope, *Journal of Materials Processing Technology*, **167**(2-3), 371- 382.
- [18] **Andrew, M., Wollacott, Kenneth, M., Merz, Jr.**, 2007. Haptic applications for molecular structure manipulation, *Journal of Molecular Graphics and Modelling* **25**(6), 801-805.
- [19] **Monica, B., Giorgio, C., Luca, F.**, 2006. Haptic Technologies for the conceptual and validation phases of product design, *Computers & Graphics*, **30**(3), 377-390.
- [20] **Zhan, G., Ian, G.**, 2008. Haptic sculpting of multi-resolution B-spline surfaces with shaped tools, *Computer-Aided Design archive*, **40**(10-11), 1055 1066.
- [21] **Xuejian, H.**, Yonghua C., Haptic-aided robot path planning based on virtual teleoperation, in press in *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*.
- [22] **Kyihwan, P.**, 2004. Byunghoon B., Taeoh K., A haptic device for PC video game application, *Mechatronics*, **14**(2), 227-235.
- [17] **Bambang, R.**, 2007. Development of Architectures for Internet Telerobotics Systems' *ICIUS 2007*, Bali, Indonesia
- [18] **Dede, M. I. C., and Tosunoglu, S.**, 2006. Virtual Rapid Robot Prototyping, in *ASME Early Career Technical Journal*, **5**(1), 7.1-7.8.
- [19] **Burdea, G.C.**, 1996. Force and Touch Feedback for Virtual Reality. *John Wiley & Sons*, Inc. USA.
- [20] **Bejczy**, 1996. Antal Virtual Reality in Telerobotics, *ICAR*, Barcelona, Spain, 3 - 12.
- [21] **Burdea, G.**, 1999. Invited Review: The Synergy between Virtual Reality and Robotics. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. **15**(3), pp 400 – 410.
- [22] **Bonyuet, D & Monferrer, A.**, 1998. Designing Virtual Interfaces for Teleoperated Robots. *The 2nd World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics: ISAS' 98 – SCI'98*, Orlando, 08/.
- [23] **Cavusoglu, M.C.**, 2000. Telesurgery and Surgical Simulation: Design Modeling, and Evaluation of Haptic Interfaces to Real and Virtual Surgical Environments, *Ph.D. Dissertation*, UC at Berkeley, Berkeley, California.
- [24] **Burdea, G.C.**, 1999. The Synergy Between Virtual Reality and Robotics. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, **15**(3), 400{411 }
- [25] **Raneda, A.**, 2004. 2601050 Robotics and Teleoperation Lecture notes: Teleoperation. Tampere University of Technology.
- [26] **Whitney, D.**, 1985. Historical perspective and state of the art in robot force control. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 262- 268.
- [27] **Vertut, J. and Coiffet, P.**, Teleoperation and Robotics: Evolution and Development, *Hermes Publishing*, ISBN: 1-85121-002, 3A, pp23-63.
- [28] **Sheridan, T.B.**, 1992. Telerobotics, Automation and Human Supervisory Control, *MIT Press*, ISBN: 0-262-19316-7.
- [29] **Bayraktar E., Kaleli F.** ‘Sanal gerçeklik ve uygulama alanları’ Akademik Bilişim 2007 Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya, 31 Ocak-2 Şubat 2007

- [30] **Ferrell, W.R., and Sheridan, T.B.**, 1967. Supervisory Control of Remote Manipulation, *IEEE Spectrum*, 4(10), October, pp 81-88.
- [31] **Sheridan, T.B.**, 1993. Space teleoperation through time delay: review and prognosis, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 9(5), October 1993, 592-606.
- [32] **Sheridan, T.B.**, 1989. Telerobotics. *Automatica.*: 487-507.
- [33] **Hokayem, P.F., and Spong, M.W.**, 2006. Bilateral Teleoperation: An Historical Survey. *Automatica.* 2035-2057.
- [34] **Hashtrudi-Zaad, K. and Salcudean, S. E.**, 2002. Transparency in time-delayed systems and the effect of local force feedback for transparent teleoperation. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 108-114.
- [35] **Yokokohji, Y., and Yoshikawa, T.**, 1994. Bilateral control of master-slave manipulators for ideal kinematics coupling formulation and experiment. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 605-620.
- [36] **Katsura, S., Matsumoto, Y., Ohnishi, K.**, 2005. Realization of Law of action and reaction by multilateral control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1196- 1205.
- [37] **Anderson R.J., Spong, M.W.**, 1989. Bilateral Control of Operators with Time Delay. *IEEE Transactions on Automation Control*, 494-501.
- [38] **Yan, J., and Salcudean, S.E.**, 1996. Teleoperation Controller Design using H_{∞} -Optimization with Application to Motion-Scaling. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 244-258.
- [39] **Kikuchi, J., Takeo, K., and Kosuge, K.**, 1998. Teleoperation System via Computer network of Dynamic Environment. *IEEE International Conference on Robotics and Automation* 3534-3539.
- [40] **Zhu W.H., and Salcudean, S.E.**, 1999. Teleoperation with Adaptive Motion/Force Control. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 231-237.
- [39] **Ando, N., Lee J.H., and Hashimoto, H.**, 1999. A Study on Influence of Time Delay in Teleoperation. *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, 317-322.
- [40] **Elhajj, I., Hummert, H., Xi, N., Fung W.K., and Liu, Y.H.**, 2000. Real-time bilateral control of Internet-based teleoperation. *The 3rd World Congress Intelligent Control and Automation*, 3761-3766.
- [41] **Itoh, T. , Yudate, K. , Ito S., and Matsui, T.**, 2003. New Predictive Display Method of Motion and Force Information for Network Teleoperation Without Using Virtual Environment Model. *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2815 - 2822.
- [42] **Shahdi, S. A., and Sirouspour, S.**, 2005. Multiple Model Control for Teleoperation in Unknown Environments. *IEEE International Conference on Robotics and Automation.* 703-708.
- [43] **Smith, A.C., and Van Hashtrudi-Zaad, 2005. K.**, Neural Network-Based Teleoperation using Smith Predictors. *International Conference on Mechatronics & Automation*, 1654 - 1659.
- [44] **I.G. Polushin, P.X. Liu, and C.H. Lung.** 2005. A Control Scheme for Stable Force-Reflecting Teleoperation over IP Networks. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2731-2736.
- [45] **Taylor, K. and Dalton, B.**, 1997. Issues in Internet Telerobotics, FSR97 *International Conference on Field and Service Robotics*, Canberra, Australia 8-10.
- [46] <http://telerobot.mech.uwa.edu.au>, The Tel labs Project. 27.07.2005

- [48] <http://pumapaint.rwu.edu>, Puma Paint Project. 27.07.2005
- [49] http://ranier.oact.hq.nasa.gov/telerobotics_page/realrobots.html, Real Robots on the Web. 27.07.2005
- [50] **Oboe, R.**, 2003. Force-Reflecting Teleoperation Over the Internet: *The JBIT Project, Proceedings of the IEEE*, **91**(3); 449–462.
- [51] **Liu, P. X., Meng, M. O.-H., and Yang, S. X.**, 2003. Data Communications for Internet Robots, *Autonomous Robots*, **15**, 213-223.
- [52] **Khamis, A. M., Rodriguez, F. J., and Salichs., M. A.**, 2003. Remote Interaction with Mobile Robots, *Autonomous Robots*, **15**, 267-281.
- [53] **Maass, H., Cakmak, H.K., Kuehnappel, U.G., Trantakis, C., Strauss, G.**, 2005. Providing more possibilities for haptic devices in surgery simulation, *International Congress Series* 1281, pp.725-729.
- [54] **Nakagawara, S., Kajimoto, H., Kawakami, N. and Tachi, S., Kawabuchi, I.**, 2005. An Encounter-Type Multi-Fingered Master Hand Using Circuitous Joints, *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation* Barcelona, Spain, April.
- [55] Haptic Telexistence / Katsunari Sato / The University of Tokyo
- [56] **Hirukawa, H, Matsui, T., Onda, H.**, 1997. Prototypes of Teleoperation Systems via a Standard Protocol with a Standard Human Interface, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*.
- [57] **Michel, O., Saucy, P., and Mondada, F.**, 1997. KhepOnTheWeb: An Experimental Demonstrator in Telerobotics and Virtual Reality, *Proc. of IEEE VSMM 1997*, Switzerland.
- [58] **Taylor, K., Dalton, D.**, 1997. Issues in Internet Telerobotics, *International Conference on Field and Service Robotics*, ANU, Canberra, Australia.
- [59] **Bambang R. & A. Aditya** , 2000. Java 3D Simulation for Internet Telerobotics System, *Int. Conf. Modeling and Simulation*, Pittsburgh, USA.
- [60] **Taylor, K, and Dalton, D.**, 2000. Internet Robots : A New Robotics Niche, *IEEE Robotics and Automation Magazine*.
- [61] **Wang, D., Ma, X., Dai, X.**, 2004. Web-based robotic control system with flexible framework, *Proceedings of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Pages:3351 – 3356.
- [62] **Wang, D., Ma, X., Dai, X.**, 2004. Multimedia transmission strategy in Web-based robotic system, *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robotics and Systems*, 2544 – 2549.
- [63] **Abut T., Soygüder S., Alli H.** 2015. Gerçek Zamanlı Gerçek Zamanlı Altı Serbestlik Dereceli Haptik Bir Robot İle Sanal Robotun Teleoperasyonu' *UMTS Ulusal Makine Teorisi Sempozyumu* İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü İYTE .
- [64] **Abut T., Soygüder S., Alli H.**, 2015. Motion control in virtual reality based teleoperation system' *Signal Processing and Communications Applications Conference SIU, 23th Proceedings of the IEEE 23th 1-* 2682 – 2685
- [65] **Bambang R.**, Internet Telerobotics Systems, *Proc. ISMRC*, France, 2002
- [66] **Dede, M. I. C., and Tosunoglu, S.**, 2006. Development of a Real- Time Force-Reflecting Teleoperation System Based on Matlab© Simulations, in *Proceedings of the 19th Florida Conference on Recent Advances in Robotics*, Miami, Florida, May 25-26.
- [67] **Dede, M. I. C., and Tosunoglu, S.**, 2007. Control of Teleoperation Systems Experiencing Communication Loss, submitted to *Robotics and Autonomous Systems*.
- [68] <http://www.sensable.com/> Sensable Technologies Corporation.

- [69] **Cavusoglu, M. C., Sherman, A., and Tendick, F.**, 2002. Design of bilateral teleoperation controllers for haptic exploration and telemanipulation of soft environments, *IEEE Trans. Rob. & Auto.*, **18**, 641–647.
- [70] **Mobasser F., and Hashtrudi-Zaad, K.**, 2004. Implementation of a rate mode impedance reflecting teleoperation controller on a haptic simulation system, *Proc. IEEE Intl. Conf. Rob. & Auto.*, 1974–1979.
- [71] **Tavakoli, M., Patel, R. V., and Moallem, M.**, 2004. Design issues in a haptics-based master-slave system for minimally invasive surgery, *Proc. IEEE Intl. Conf. Rob. & Auto.*, 371–376.
- [72] **Cavusoglu, M. C., Feygin, D., and Tendick F.**, 2002. A critical study of the mechanical and electrical properties of the phantom haptic interface and improvements for high performance control, *PRESENCE Rev.*, **11**, 555–568.
- [73] **H. Mayeda, K. Osuka, and A. Kangawa**, 1984. A new identification method for serial manipulator arms, *Proc. 9th IFAC World Congress*, 2429–2434.
- [74] **Mayeda, H., Yoshida, K. and Osuka, K.**, 1988. Base parameter of manipulator dynamic models, *Proc. IEEE Int. Conf. Rob. & Auto.*, 312–321.
- [75] **Nakamura Y., and Ghodoussi, M.**, 1989. Base parameter analysis of open and closed link mechanism using covariance matrix of nonlinearity, *Proc. IEEE Int. Conf. Rob. & Auto.*, 294–302.
- [76] **P. K. Khosla and T. Kanade**, 1985. Parameter identification of robot dynamics, *Proc. IEEE Conf. Dec. & Cont.*, 1754–1760.
- [77] **Yoshida K., Ikeda N., and Mayeda H.**, 1991. Experimental identification methods for an industrial robot manipulator, *IEEE/RSJ Intl. Conf. Intel. Rob. Syst.*, 546–560.
- [78] **Diolaiti, N., Melchiorri, C.**, 2002. Teleoperation of a mobile robot through haptic feedback, *IEEE Int. Workshop on Haptic Virtual Environments and Their Applications*, 67-72.
- [79] **Yoshida K., Ikeda N., and Mayeda H.**, 1991. Experimental identification methods for an industrial robot manipulator, *IEEE/RSJ Intl. Conf. Intel. Rob. Syst.*, 546–560.
- [80] **Dominguez-Ramirez, O. A. and Parra-Vega V.**, 2003. Texture, Roughness and Shape Haptic Perception of Deformable Virtual Objects with Constrained Lagrangian Formulation, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Proceedings of IROS 2003* ISBN 0-7803-7861-X, 4, 3106-311.
- [81] **Cavusoglu, M.C., & Feygin, D. (2001)**. Kinematics and dynamics of PHANToM(TM) model 1.5 haptic interface. (Tech. Rep.). University of California at Berkeley, Electronics Research Laboratory Memo M01/15.
- [82] **M. Cavusoglu, D. Feygin, And F. Tendick**. A Critical Study of the Mechanical and Electrical Properties of the PHANToM Haptic Interface and Improvements for High Performance Control. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 11(6):555--568, 2002.
- [83] **N.Diolaiti, C.Melchiorri**, “Teleoperation of a mobile robot through haptic feedback”, *IEEE Int. Workshop on Haptic Virtual Environments and Their Applications*, pp.67-72, 2002.
- [84] **A. Nygaard**, “High-Level Control System for Remote Controlled Surgical Robots Haptic Guidance of Surgical Robot, Master thesis of Science in Engineering Cybernetics, Department of Engineering Cybernetics, Norwegian University of Science and Technology, 2008.

- [85] **Dominguez-Ramirez, O. A. and V. Parra-Vega**, Texture, Roughness and Shape Haptic Perception of Deformable Virtual Objects with Constrained Lagrangian Formulation, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Proceedings of IROS 2003 ISBN 0-7803-7861-X, Vol. 4, pp. 3106-3111, 2003.
- [86] **Eduardo V., Karan K., Redwan A., and Rajiv D.**, 2009. Scaled telerobotic control of a manipulator in real time with laser assistance for adl tasks. *Mechatronics and its Applications*, 2009. *International Symposium on Mechatronics and its Applications*.
- [87] **Gang S. and Shuxiang G.**, 2006. Development of a novel tele-rehabilitation system. Proceedings of the 2006 *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, 785- 789.
- [88] **Henning H., and Dieter S.**, 2009. Control concept for a hydraulic mobile machine using a haptic operating device. *2009 Second International Conferences on Advances in Computer-Human Interaction*, 348 -353,.
- [89] **Cavusoglu M C, Feygin D. (2001)**. Kinematics and Dynamics of Phantom(TM) Model 1.5 Haptic Interface. [R]. Berkeley: University of California at Berkeley, Electronics Research Laboratory Memo M01/15.
- [90] **Denavit J. and Hartenberg R. S.**, 1955. A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices. *J. Appl. Mechanics*, **22**, 215-221.
- [91] **Jarillo-Silva A., Dominguez-Ramirez A., Vicente Parra-Vega, and J. Patricio Ordaz-Oliver.**, 2009. Phantom omni haptic device: Kinematic and manipulability. 2009 Electronics, *Robotics and Automotive Mechanics Conference*, pages 193-198.
- [92] **Abut T., Soygüder S., Alli H.**, 2014. Alti serbestlik dereceli haptik robotun performans analizi *Otomatik Kontrol Türk Milli Komitesi TOK Ulusal Toplantisi*, Kocaeli Üniversitesi,1010-1015.
- [93] **Bingül Z., Küçük S.**, 2005. Robot Tekniği I, Birsen Yayınevi, 104-200.
- [94] **Asada H. and Slotine J.J.E.**, 1986. Robot Analysis and Control, *Wiley-Interscience Publication*, USA.
- [95] Quanser Innovate, Educate Omni Bundle Workbook, Inverse Kinematics Section 2-2
- [96] **Sciavicco L. and Sciclano B.**. Modelling and Control of Robot Manipulators. Springer, 2nd edition,
- [97] www.abb.com, ABB.
- [98] **ABB Automation Technologies AB**, 2004. Robotics. Product Specification – Articulated Robot, *3HAC904*, 1-1.
- [99] ABB Robotics. Product specification for IRB 140, Retrieved September 21, 2010.
- [100] <http://www.abb.com/product/seitp327/7c4717912301eb02c1256efc00278a26.aspx?productLanguage=no&country=00>, ABB Robotics. ABB Product Guide for IRB 140, 14.06.2011
- [101] ABB Automation Technologies AB, Robotics. *Operator's Manual – IRC5 with FlexPendant*, 2005.
- [102] **Denavit J. and Hartenberg R. S.**, 1955. A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices. *J. Appl. Mechanics*, **22**, 215-221.
- [103] **Shah S.V., Saha S.K., Dutt J.K.**, 2012, April. Denavit-Hartenberg Parameterization of Euler Angles, *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, **7**, 021006 1-10.
- [104] **Salisbury J. K., and Srinivasan M. A.**, 1997, Phantom-based Haptic Interaction with Virtual Objects, *IEEE Computer Graphics and Applications*, **17**(5), 6-10.

- [105] **Turevskiy A.**, Danek J. Virtual reality toolbox animate visualize and interact with dynamic systems in three dimensions. *MathWorks Webinar*
- [106] **Manseur R.**, 2004. Visualization Tools for Robotics Education. *Proceedings of the 2004 International Conference on Engineering Education*. Gaineville, Florida October 17-21.
- [107] **Manseur R.**, 2004. Interactive Visualization Tools for Robotics. *Proceedings of the Florida Recent Advances in Robotics*. Orlando, FL.
- [108] **Burder S., Wedeward K.**, An Interactive Online Robotics Course. USA, 2007
- [109] **Rodriguez-Angeles A.**, 2010. Guzman-Gutierrez J. L. , Cruz C., Villar *Unilateral Master-Slave Robot Teleoperation By Means Of A User Wearable Interface Based On Inertial Sensors* LatinO.
- [110] **Hashimoto W., Ogawa H.**, Toshiya Umeda, Masao Obama, Kyoichi Tatsuno, An Unilateral Master-Slave Hand System with Force-Controlled Slave Hand *IEEE International Conference on Robotics and Automation* 61995 IEEE
- [111] **Abut T., Soygüder S., Alli H.**, 2015. Gerçek Zamanlı Alti Serbestlik Dereceli Haptik Bir Robot ile Sanal Robotun Teleoperasyonu *Ulusal Makine Teorisi Sempozyumu UMTS Bildiri Kitabı* 1(189), Izmir
- [112] **Abut T., Soygüder S.**, 2015. Motion Control in Virtual Reality Based Teleoperation System *Signal Processing and Communications Applications Conference SIU*, 23th 1 -2682 – 2685 Proceedings of the IEEE 23th
- [113] **Walker K., Pan Y.-J., Gu J.**, 2007 Control gain design for bilateral teleoperation systems using linear matrix inequalities, *Systems, Man and Cybernetics, IEEE International Conference on*, 2588-2593.
- [114] **Ünel M., Şabanoviç A.**, 2010. Zamansal gecikme telafili iki yönlü kontrol sistemleri *TÜBİTAK Proje No: 106M533*, Istanbul
- [115] **Nohmi M., Ando M., Bock T.**, 2005. Contact task by space teleoperation using force reflection of communication time delay, *Computational Intelligence in Robotics and Automation, IEEE International Symposium on* , 193-198.
- [116] **Barros P.G., Lindeman R.W., Ward M.O.**, 2011. Enhancing robot teleoperator situation awareness and performance using vibro-tactile and graphical feedback, *3D User Interfaces, IEEE Symposium on* 47-54.
- [117] **Griffin, W.B.**, 2003. Shared Control for Dexterous Telem Manipulation with Haptic Feedback, *Ph.D. Dissertation*, Stanford University, Palo Alto, CA.
- [118] **Hokayem, P. F., Spong, M. W.**, 2006. Bilateral Teleoperation: An Historical Survey, *Automatica*, **42**, 2035-2057.
- [119] **Sheridan, T. B., Ferrell, W. R.**, 1963. Remote Manipulative Control with Transmission Delay, *IEEE Transactions on Human Factors in Electronics*, **4**, 25-29.
- [120] **Ferrell, W. R.**, 1965. Remote Manipulation with Transmission Delay, *IEEE Transactions on Human Factors in Electronics*, **6**, 24-32.
- [121] **Ferrell, W. R.**, 1966. Delayed Force Feedback, *Human Factors and Ergonomics Society*, **8**(5), 449-455.
- [122] **Leung, G. M. H., Francis, B.A.**, 1995. Apkarian, J., Bilateral Controller for Teleoperators with Time Delay via μ -Synthesis, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, **11**(1), 105-116.
- [123] **Lin, R., Namerikawa, T.**, 2005. Robust Control of Master-Slave Robot System Considering Environmental Uncertainties, *IEEE/ASME International Conference on AIM*, 1299-1304.

- [124] **Anderson, R. J., Spong, M. W.**, 1988. Bilateral Control of Teleoperators with Time Delay, *IEEE Conference on Decision and Control*, 167-173.
- [125] **Anderson, R. J., Spong, M. W.**, 1989a. Asymptotic Stability for Force Reflecting Teleoperators with Time Delay, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1618-1625.
- [126] **Anderson, R. J., Spong, M. W.**, 1989b. Bilateral Control of Teleoperators with Time Delay, *IEEE Transactions on Automatic Control*, **34**(5), 494-501.
- [127] **Niemeyer, G., Slotine, J. J. E.**, 1991a. Stable Adaptive Teleoperation, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, **16**(1), 152-162.
- [128] **Niemeyer, G., Slotine, J. J. E.**, 1997a. Using Wave Variables for System Analysis and Robot Control, *Int. Conf. Robotics and Automation*, Albuquerque, NM, 1619-1625,
- [129] **Colgate, J. E.**, 1991. Power and Impedance Scaling in Bilateral Telemanipulation, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Sacramento, California, 2292-2297.
- [130] **Kosuge, K., Itah, T., Fukuda, T.**, 1996. Scaled Telemanipulation with Communication Time Delay, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Minneapolis, Minnesota, 2019-2024.
- [131] **Niemeyer, G., Slotine, J. J. E.**, 1991b. Transient Shaping in Force Reflecting Teleoperation, *IEEE International Conference on Advanced Robotics*, 261-266.
- [132] **Hirche, S., Buss, M.**, 2004. Telepresence Control in Packet Switched Communication Networks, *IEEE International Conference on Control Applications*, Taipei, Taiwan, 236-241.
- [133] **Oboe, R., Fiorini, P.**, 1997a. Internet-Based Telerobotics: Problems and Approaches, *International Conference of Advanced Robotics ICAR 97*, Monterey, CA, USA, 765-770.
- [134] **Oboe, R., Fiorini, P.**, 1997b. Issues on Internet Based Teleoperation, *Syrocco'97*, Nantes, France, 611-617.
- [135] **Oboe, R., Fiorini, P.**, 1998. A Design and Control Environment for Internet-Based Telerobotics, *International Journal of Robotics Research*, **17**, 433-449.
- [136] **Lozano, R., Chopra, N., Spong, M.**, 2002. Passivation of Force Reflecting Bilateral Teleoperators with Time Varying Delay, *Mechatronics 02*, Enschede, *The Netherlands*, 24-29.
- [137] **Chopra, N., Spong, S., Hirche, S., Buss, M.**, 2003. Bilateral Teleoperation Over the Internet: The Time Varying Delay Problem, *The American Control Conference*, 155-160.
- [138] **Niemeyer, G., Slotine, J. J. E.**, 1998. Towards Force Reflecting Teleoperation Over the Internet, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Leuven, Belgium, 1909-1915.
- [139] **Abut T., Soygüder S., Alli H.**, 2015. Gerçek Zamanli Alti Serbestlik Dereceli Haptik Bir Robot ile Sanal Robotun Teleoperasyonu *Ulusal Makine Teorisi Sempozyumu UMTS Bildiri Kitabi* **1**(189), Izmir
- [140] **Chopra, N., Berestesky, P., Spong, M. W.**, 2008. Bilateral Teleoperation Over Unreliable Communication Networks, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, **16**(2), 304-313.
- [141] **Benedetti, C., Franchini, M., Fiorini, P.**, 2001. Stable Tracking in Variable Time Delay Teleoperation, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Maui, Hawaii, USA, 2252-2257.

- [142] **Chopra, N., Spong, M. W., Ortega, R., Barabanov, N. E.**, 2004. On Position Tracking in Bilateral Teleoperation, *The American Control Conference*, 5244-5249.
- [143] **Chopra, N., Spong, M. W., Ortega, R., Barabanov, N. E.**, 2006. On Tracking Performance in Bilateral Teleoperation, *IEEE Transactions on Robotics*, **22**(4), 861-866.
- [144] **Munir, S., Book, W.**, 2003. Control Techniques and Programming Issues for Time Delayed Internet Based Teleoperation, *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, **125**(2), 157-277.
- [145] **Namerikawa, T., Kawada, H.**, 2006. Symmetric Impedance Matched Teleoperation with Position Tracking, *IEEE Conference on Decision and Control*, 4496-4501.
- [146] **Lee, D. J., Spong, M. W.**, 2005. Passive Bilateral Control of Teleoperators Under Constant Time Delay, *IFAC World Congress*,
- [147] **Lee, D. J., Spong, M. W.**, 2006. Passive Bilateral Teleoperation with Constant Time Delay, *IEEE Transactions on Robotics* , **22**(2), 269-281.
- [148] **Nuno, E., Ortega, R., Barabanov, N. E., Basanez, L.**, 2008. A Globally Stable PD Controller for Bilateral Teleoperators, *IEEE Transactions on Robotics*, **23**(3), 753-758.
- [149] **Nuno, E., Basanez, L., Ortega, R., Spong, M. W.**, 2009. Position Tracking for Nonlinear Teleoperators with Variable Time Delay, *International Journal of Robotics Research*, **28**(7), 895-910.
- [150] **Andriot, C., Fournier, R., Vuillemeys, J.**, 1991. On the Bilateral Control of Teleoperators with Flexible Joints and Time Delay by the Passive Approach, *5th International Conference on Advanced Robotics*, 231-236.
- [151] **Kazerooni, H., Tsay, T. I., Hollerbach, K.**, 1993. A Controller Design Framework for Telerobotic Systems, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, **1**(1), 50-62.
- [152] **Tsay, T. I., Kazerooni, H.**, 1992. A Design Framework for Telerobotics Using the H_{∞} Approach, *American Control Conference*, Chicago, IL, USA, 2931-2935.
- [153] **Leung, G. M. H., Francis, B.A., Apkarian, J.**, 1995. Bilateral Controller for Teleoperators with Time Delay via μ -Synthesis, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, **11**(1), 105-116.
- [154] **Sano, A., Fujimoto, H., Tanaka, M.**, 1998. Gain Scheduled Compensation for Time Delay of Bilateral Teleoperation Systems, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1916-1923.
- [155] **Kikuchi, J., Takeo, K., Kosuge, K.**, 1998. Teleoperation System via Computer Network for Dynamic Environment, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 3534-3539.
- [156] **Park, J.H., Cho, H. C.**, 1999. Sliding Mode Controller for Bilateral Teleoperation with Varying Time Delay, *IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, 311-316.
- [157] **Smith, O. J. M.**, 1959. A Controller to Overcome Dead Time, *ISA. Journal*, **6**(2), 28-33.
- [158] **Ariou, H., Mammar, S., Hamel, T.**, 2002. A Smith Prediction Based Haptic Feedback Controller for Time Delayed Virtual Environments Systems, *The American Control Conference*, 4303-4308.
- [159] **Munir, S., Book, W. J.**, 2001. Wave-Based Teleoperation with Prediction, *The American Control Conference*, 4605-4610.

- [160] **Munir, S., Book, W. J.**, 2002. Internet-Based Teleoperation Using Wave Variables with Prediction, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, **7**(2),124-133.
- [161] **Ganjefar, S., Momeni, H., Janabi-Sharifi, F.**, 2002. Teleoperation Systems Design Using Augmented Wave-Variables and Smith Predictor Method for Reducing Time-Delay Effects, *IEEE International Symposium on Intelligent Control*, 333-338.
- [162] **Smith, A.C., Zaad, K. H.**, 2006. Smith Predictor Type Control Architectures for Time Delayed Teleoperation, *International Journal of Robotics Research*, **25**(8), 797-818.
- [163] **Natori, K., Tsuji, T., Ohnishi, K., Hace, A., Jezernik, K.**, 2004. Robust Bilateral Control with Internet Communication, *30th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Busan, Korea, 2321-2326.
- [164] **Natori, K., Oboe, R., Ohnishi, K.**, 2007. Analysis and Design of Time Delayed Control Systems with Communication Disturbance Observer, *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Vigo, Spain, 3132-3137.
- [165] **Iida, W., Ohnishi, K.**, 2004. Reproducibility and Operationality in Bilateral Teleoperation, *IEEE 8th International Workshop on Advanced Motion Control, AMC'04*, Kawasaki, Japan, 217-222.
- [166] **Rahman, A. A., Natori, K., Ohnishi, K.**, 2009. Disturbance Decomposition of Time Delay System by Shadow Robot Based on Network Disturbance Concept, *IEEE International Conference on Industrial Technology*, Gippsland, 1-6.
- [167] **Iiyama, N., Natori, K., Ohnishi, K.**, 2009. Bilateral Teleoperation Under Time-Varying Communication Time Delay Considering Contact with Environment, *Electronics and Communications in Japan*, **92**(7), 1050-1056.
- [168] **Murakami, T., Yu, F., Ohnishi, K.**, 1993. Torque Sensorless Control in Multi Degree Of Freedom manipulator, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **40**(2), 259-265.
- [169] **Lawrence, D.A.**, 1993. Stability and Transparency ,in Bilateral Teleoperation, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, **9**(5), 624-637.
- [170] **Yokokohji, Y., Yoshikawa, T.**, 1994. Bilateral Control of Master Slave Manipulators for Ideal Kinesthetic Couplink Formulation and Experiment, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, **10**(5), 605-620.
- [171] **Zhu, M., Salcudean, S. E.**, 1995. Achieving Transperancy for Teleoperator Systems Under Position and Rate Control, *IEEE/RSJ In ternational Conference on Intelligent Robots and Systems*, 7-12.
- [172] **Zhu, W. H., Salcudean, S. E.**, 1999. Teleoperation with Adaptive Motion/Force Control, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Detroit, MI, 231-237.
- [173] **Niemeyer, G., Slotine, J. J. E.**, 1997b. Designing Force Reflecting Teleoperation with Large Time Delays to Appear as Virtual Tools, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2212-2218.
- [174] **Niemeyer, G., Slotine, J. J. E.**, 1998. Towards Force Reflecting Teleoperation Over the Internet, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Leuven, Belgium, 1909-1915.
- [175] **Kawashima, K., Tadano, K., Sankaranarayanan, G., Hannaford, B.**, 2009. Bilateral Teleoperation with Time Delay Using Modified Wave Variables, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Kobe, Japan, 4326-4331.
- [176] **Bingül Z. Ve Küçük S.** 2008. Robot Dinamiği ve Kontrolü. Birsen Yayınevi.

- [177] **Abut, T., Soygüder, S., Alli, H.**, 2013. Yılan Benzeri Robotun Kinematik , Dinamik Modeli, Bulanik Mantik Ile Kontrolü TOK 2013 Bildiri Kitabı, Malatya cilt :1 bildiri no :967-973
- [178] **N. Yağız ve C. Ertal**, "Evaluation of Control Methods on a Structural System", *Mathematical & Computational Applications*, Cilt: 8, No: 3, s:369-376, 2003.
- [179] **M. Ünal, H. Erdal, ve V. Topuz**, "Trajectory Tracking Performance Comparison Between Genetic Algorithm and Ant Colony Optimization For PID Controller Tuning on Pressure Process", *Computer Applications in Engineering Education*, Cilt: 20, No: 3, s:518-528, 2012
- [180] **O. Karasakal, E. Yeşil, M. Güzelkaya ve İ. Eksin**, "Implementation of a New Self-Tuning Fuzzy PID Controller on PLC", *Turk J Elec Engin*, Cilt: 13, No:2, s:277-286, 2005
- [181] **L. Liang**, "The application of fuzzy PID controller in coupled-tank liquid-level control system," *International Conference on Electronics, Communications and Control (ICECC)*, Ningbo, China, 2011, pp. 2894–2897
- [182] **P.Chalupa, J. Novak, V. Bobal**, "Comprehensive Model of DTS200 Three Tank system in Simulink", *International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*, Issue 2, Volume 6, 2012.
- [183] **N. Bayhan, M.T. Söylemez**, "Katsayı Diyagram Metodu Tabanlı Bir PI-PD Kontrolör Katsayı Ayarlama Yöntemi," *TOK'07*, 5-7 Eylül, İstanbul, 2007
- [184] **B.D. Tyreus ve W.L.Luyben**, "Tuning PI Controllers for Integrator/Dead Time Processes," *Ind. Eng. Chem.*, Vol: 31, pp. 2625-2628, 1992
- [185] **K.H. Cohen ve G.A. Coon**, "Theoretical Consideration. of Retarded Control", *Transactions of ASME*, Vol: 75, pp. 827-834, 1953.
- [186] **K.J. Åström ve T. Hägglund**, "Automatic Tuning of Simple Regulators With Specifications on Phase and Ampliturde Margins," *Automatica*, Vol: 25, pp. 645-651, 1984
- [187] **M. Zhuang ve D.P. Atherton**, "Tuning PID Controllers With Integral Performance Criteria," *Proc. of IEE Conference on Control*, Vol: 1, No: 332, pp. 481-486, 1991.
- [188] **J.G.Ziegler ve N.B. Nichols**, "Optimum Settings for Automatic Controllers," *Transactions of ASME*, Vol: 64, pp. 759-768, 1942
- [189] **Ogata K.** (2002). *Modern Control Engineering*. Prentice Hall.
- [190] **Piltan F., Mirzaei M., Shahriari F., Nazari I., Emamzadeh S.** (2012). *Design Baseline Computed Torque Controller*, *International Journal of Engineering*, 6, 129-141.
- [191] http://www.cems.uvm.edu/~tlakoba/08_fall/EE_295/Routh_Hurwitz_Criterion.pdf
- [192] **Raibert, M. H. and Craig, J.J.**, 1981. Hybrid position/force control of manipulators, *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement & Control*, **126**(2), 126.
- [193] **Kazerooni, H.**, 1989. On the Robot Compliant Motion Control. *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, **111**, 416-425
- [194] **Zeng G., Hemami A.**, An overviev of robot force control , *Robotica* ,1997, 15, 473-482.
- [195] **Patel R. V., Talebi H. A., Jaynder J. , Shadpey F.**, A Robust Position and Force Control Strategy for 7-DOF Redundant Manipulators , *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*,2009 ,14 ,575-589.
- [196] **Bonilla I., Gonzalez-Galvan E. J., Chavez-Olivares C., Mendoza M., Loredoflores A., Reyes F., Zhang B.**, A vision-based, Impedance control strategy for

- industrial robot manipulators, IEEE conference on Automation Science and Engineering ,Toronto ,Canada ,21-24 August 2010
- [197] **Ueberle, M., Buss, M.**, 2002. Design, Control, and Evaluation of a new 6 DOF Haptic Device, Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems,EPFL, Lausanne, Switzerland, October, 2949-2954.
- [198] **Hogan, N.**, 1985 Impedance Control: an Approach to Manipulation: Part I-III. *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, **107**, 1-24
- [199] [http://www.dii.unisi.it/~sirslab/teaching/RoboticaL2/download/UeberleBu04-Control Kinesthetic Haptic Interfaces. pdf](http://www.dii.unisi.it/~sirslab/teaching/RoboticaL2/download/UeberleBu04-Control%20Kinesthetic%20Haptic%20Interfaces.pdf) Siena Robotics and Systems Lab - University of Siena, Control of Kinesthetic Haptic Interfaces, 2005.
- [200] **Craig R. Carignan, Kevin R. Cleary**, 2000. Closed-loop force control for haptic simulation of virtual environments, Haptics-s, 12.
- [201] **Hogan, N.**, 1987 Stable Execution of Contact Tasks Using Impedance Control. Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1047-1054.
- [202] **Yuayen C., Ji Z., Bidou W., Shuang H.**, High Precision Fuzzy Impedance Control Algorithm and Application in Robotic Arm, International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics ,Monterey ,California ,USA, 24-28 July 2005

EKLER

Ek_A

$${}^0_1T = \begin{bmatrix} c\theta_1 & -s\theta_1 & 0 & 0 \\ s\theta_1 & c\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{B.1})$$

$${}^1_2T = \begin{bmatrix} c\theta_2 & -s\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ s\theta_2 & c\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{B.2})$$

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} c\theta_3 & -s\theta_3 & 0 & L_1 \\ s\theta_3 & c\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{B.3})$$

$${}^3_4T = \begin{bmatrix} c\theta_4 & -s\theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ s\theta_4 & c\theta_4 & 0 & -L_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{B.4})$$

..

$${}^4_5T = \begin{bmatrix} s\theta_5 & -c\theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ c\theta_5 & s\theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{B.5})$$

$${}^5_6T = \begin{bmatrix} -s\theta_6 & -c\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ -c\theta_6 & s\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{B.6})$$

$${}^6_tT = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -L_t \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{B.7})$$

$${}^0_3T = {}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T = \begin{bmatrix} c\theta_1(c\theta_2c\theta_3 - s\theta_2s\theta_3) & -c\theta_1(s\theta_2c\theta_3 + c\theta_2s\theta_3) & s\theta_1 & c\theta_1c\theta_2L_1 \\ s\theta_1(c\theta_2c\theta_3 - s\theta_2s\theta_3) & -s\theta_1(s\theta_2c\theta_3 + c\theta_2s\theta_3) & -c\theta_1 & s\theta_1c\theta_2L_1 \\ s\theta_2c\theta_3 + c\theta_2s\theta_3 & c\theta_2c\theta_3 + s\theta_2s\theta_3 & 0 & s\theta_2L_1 + L_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{B.8})$$

$$\cos(\theta_1 + \theta_2) = c\theta_{1+2} \quad (\text{B.9})$$

$$\sin(\theta_1 + \theta_2) = s\theta_{1+2} \quad (\text{B.10})$$

$${}^0_3T = {}^0_1T_1^1 T_2^2 T_3^3 T = \begin{bmatrix} c\theta_1 c\theta_{2+3} & -c\theta_1 s\theta_{2+3} & s\theta_1 & c\theta_1 c\theta_2 L_1 \\ s\theta_1 c\theta_{2+3} & -s\theta_1 s\theta_{2+3} & -c\theta_1 & s\theta_1 c\theta_2 L_1 \\ s\theta_{2+3} & c\theta_{2+3} & 0 & s\theta_2 L_1 + L_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{B.11})$$

$${}^3_6T = {}^3_4T_4^4 T_5^5 T_6^6 T = \begin{bmatrix} -c\theta_4 s\theta_5 s\theta_6 + s\theta_4 c\theta_6 & -c\theta_4 s\theta_5 c\theta_6 - s\theta_4 s\theta_6 & c\theta_4 c\theta_5 & 0 \\ c\theta_5 s\theta_6 & c\theta_5 c\theta_6 & s\theta_5 & -L_2 \\ -s\theta_4 s\theta_5 s\theta_6 - c\theta_4 c\theta_6 & -s\theta_4 s\theta_5 c\theta_6 + c\theta_4 s\theta_6 & s\theta_4 c\theta_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{B.12})$$

$${}^0_6T = {}^0_3T_6^3 T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{22} & r_{33} & P_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & P_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{B.13})$$

$$r_{11} = c\theta_1 (-c\theta_{2+3} (-c\theta_4 s\theta_5 s\theta_6 + s\theta_4 c\theta_6) - s\theta_{2+3} c\theta_5 s\theta_6) + \quad (\text{B.14})$$

$$s\theta_1 (-s\theta_4 s\theta_5 s\theta_6 - c\theta_4 c\theta_6)$$

$$r_{21} = s\theta_1 (-c\theta_{2+3} (-c\theta_4 s\theta_5 s\theta_6 + s\theta_4 c\theta_6) - s\theta_{2+3} c\theta_5 s\theta_6) +$$

$$c\theta_1 (-s\theta_4 s\theta_5 s\theta_6 - c\theta_4 c\theta_6)$$

$$r_{31} = s\theta_{2+3} (-c\theta_4 s\theta_5 s\theta_6 + s\theta_4 c\theta_6) + c\theta_{2+3} c\theta_5 s\theta_6$$

$$r_{12} = c\theta_1 (-c\theta_{2+3} (-c\theta_4 s\theta_5 c\theta_6 + s\theta_4 s\theta_6) - s\theta_{2+3} c\theta_5 c\theta_6) +$$

$$s\theta_1 (-s\theta_4 s\theta_5 c\theta_6 - c\theta_4 s\theta_6)$$

$$r_{22} = s\theta_1 (-c\theta_{2+3} (-c\theta_4 s\theta_5 c\theta_6 + s\theta_4 s\theta_6) - s\theta_{2+3} c\theta_5 c\theta_6) +$$

$$c\theta_1 (-s\theta_4 s\theta_5 c\theta_6 - c\theta_4 s\theta_6)$$

$$r_{32} = s\theta_{2+3} (-c\theta_4 s\theta_5 c\theta_6 + s\theta_4 s\theta_6) + c\theta_{2+3} c\theta_5 c\theta_6$$

$$r_{13} = c\theta_1 (c\theta_{2+3} c\theta_4 c\theta_5 - s\theta_{2+3} s\theta_5) + s\theta_1 s\theta_4 c\theta_5$$

$$r_{23} = s\theta_1 (c\theta_{2+3} c\theta_4 c\theta_5 - s\theta_{2+3} s\theta_5) - c\theta_1 s\theta_4 c\theta_5$$

$$r_{33} = s\theta_{2+3} c\theta_4 c\theta_5 + c\theta_{2+3} s\theta_5$$

$$P_x = c\theta_1 s\theta_{2+3} L_2 + c\theta_1 c\theta_2 L_1$$

$$P_y = s\theta_1 s\theta_{2+3} L_2 + s\theta_1 c\theta_2 L_1$$

$$P_z = -c\theta_{2+3} L_2 + s\theta_2 L_1 + L_0$$

Ek_B

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_{1,1} & m_{1,2} & m_{1,3} \\ m_{2,1} & m_{2,2} & m_{2,3} \\ m_{3,1} & m_{3,2} & m_{3,3} \end{bmatrix} \quad (\text{A.2})$$

$$\begin{aligned} m_{1,1} &= k_1 + k_2 \cos(2\theta_2) + k_3 \cos(2\theta_3) + k_4 \cos(\theta_2) \sin(\theta_3) \\ m_{1,2} &= k_5 \sin(\theta_2) \\ m_{1,3} &= 0 \\ m_{2,1} &= k_5 \sin(\theta_2) \\ m_{2,2} &= k_6 \\ m_{2,3} &= -0.5k_4 \sin(\theta_2 - \theta_3) \\ m_{3,1} &= 0 \\ m_{3,2} &= -0.5k_4 \sin(\theta_2 - \theta_3) \\ m_{3,3} &= k_7 \end{aligned}$$

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} v_{1,1} & v_{1,2} & v_{1,3} \\ v_{2,1} & v_{2,2} & v_{2,3} \\ v_{3,1} & v_{3,2} & v_{3,3} \end{bmatrix} \quad (\text{A.3})$$

$$\begin{aligned} v_{1,1} &= -k_2 \dot{\theta}_2 \sin(2\theta_2) - k_3 \dot{\theta}_3 \sin(2\theta_3) - 0.5k_4 \dot{\theta}_2 \sin(\theta_2) \sin(\theta_3) \\ &\quad + 0.5k_4 \dot{\theta}_3 \cos(\theta_2) \cos(\theta_3) \\ v_{1,2} &= -k_2 \dot{\theta}_1 \sin(2\theta_2) - 0.5k_4 \dot{\theta}_1 \sin(\theta_2) \sin(\theta_3) + k_5 \dot{\theta}_2 \cos(\theta_2) \\ v_{1,3} &= -k_3 \dot{\theta}_1 \sin(2\theta_3) + 0.5k_4 \dot{\theta}_1 \cos(\theta_2) \cos(\theta_3) \\ v_{2,1} &= k_2 \dot{\theta}_1 \sin(2\theta_2) + 0.5k_4 \dot{\theta}_1 \sin(\theta_2) \sin(\theta_3) \\ v_{2,2} &= 0 \\ v_{2,3} &= 0.5k_4 \dot{\theta}_3 \cos(\theta_2 - \theta_3) \\ v_{3,1} &= k_3 \dot{\theta}_1 \sin(2\theta_3) + 0.5k_4 \dot{\theta}_1 \cos(\theta_2) \cos(\theta_3) \\ v_{3,2} &= -0.5k_4 \dot{\theta}_2 \cos(\theta_2 - \theta_3) \\ v_{3,3} &= 0 \end{aligned}$$

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{bmatrix} \quad (\text{A.4})$$

$$\begin{aligned} n_1 &= 0 \\ n_2 &= k_8 \cos(\theta_2) + k_{10}(\theta_2 - 0.5\pi) \\ n_3 &= k_9 \sin(\theta_3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
k_1 &= I_{C_{yy}} + 0.5I_{A_{yy}} + 0.5I_{B_{yy}} + 0.5I_{A_{zz}} + 0.5I_{B_{zz}} \\
&\quad + 0.125m_A l_2^2 + 0.125m_B l_1^2 + 0.5m_A l_1^2 + m_B l_3^2 \\
k_2 &= 0.5I_{B_{yy}} - 0.5I_{B_{zz}} + 0.125m_B l_1^2 + 0.5m_A l_1^2 \\
k_3 &= 0.5I_{A_{yy}} - 0.5I_{A_{zz}} - 0.125m_A l_2^2 \\
k_4 &= m_A l_1 l_2 \\
k_5 &= 0.5m_B l_1 l_3 \\
k_6 &= I_{B_{xx}} + m_A l_1^2 + 0.25m_B l_1^2 \\
k_7 &= I_{A_{xx}} + 0.25m_A l_2^2 \\
k_8 &= 0.5m_B l_1 g + m_A l_1 g \\
k_9 &= 0.5m_A l_2 g \\
k_{10} &= K_2
\end{aligned}$$

Robotics

IRB 140 Industrial Robot

Main Applications

Arc welding
Assembly
Cleaning/Spraying
Machine tending
Material handling
Packing
Deburring



Small, Powerful and Fast

Compact, powerful IRB 140 industrial robot. Six axis multipurpose robot that handles payload of 6 kg, with long reach (β 10 mm). The IRB 140 can be floor mounted, inverted or on the wall in any angle. Available as Standard, FoundryPlus, Clean Room and Wash versions, all mechanical arms completely IP67 protected, making IRB 140 easy to integrate in and suitable for a variety of applications. Uniquely extended radius of working area due to bend-back mechanism of upper arm, axis 1 rotation of 360 degrees even as wall mounted. The compact, robust design with integrated cabling adds to overall flexibility. The Collision Detection option with full path retraction makes robot reliable and safe.

Using IRB 140T, cycle-times are considerably reduced where axis 1 and 2 predominantly are used.

Reductions between 15-20 % are possible using pure axis 1 and 2 movements. This faster versions is well suited for packing applications and guided operations together with PickMaster.

IRB Foundry Plus and Wash versions are suitable for operating in extreme foundry environments and other harsh environments with high requirements on corrosion resistance and tightness. In addition to the IP67 protection, excellent surface treatment makes the robot high pressure steam washable. The white-finish Clean Room version meets Clean Room class 10 regulations, making it especially suited for environments with stringent cleanliness standards.

IRB 140

Specification

Robot versions	Handling capacity	Reach of 6th axis	Remarks
IRB 140/IRB 140T	6 kg	810 mm	
IRB 140F/IRB 140TF	6 kg	810 mm	Foundry Plus Protection
IRB 140CRV			
IRB 140TCR	6 kg	810 mm	Clean Room
IRB 140W			
IRB 140TW	6 kg	810 mm	Wash Protection
Supplementary load (on upper arm all wrist)			
on upper arm		1 kg	
on wrist		0.5 kg	
Number of axes			
Robot manipulator		6	
External devices		6	
Integrated signal supply		12 signals on upper arm	
Integrated air supply		Max. 8 bar on upper arm	

Performance

Position repeatability	0.03 mm (average result from ISO test)	
Axis movement	Axis	Working range
	1, C Rotation	360°
	2, B Arm	200°
	3, A Arm	280°
	4, D Wrist	Unlimited (400° default)
	5, E Bend	240°
	6, P Turn	Unlimited (800° default)
Max. TCP velocity	2.5 m/s	
Max. TCP acceleration	20 m/s ²	
Acceleration time 0-1 m/s	0.15 sec	

Velocity

Axis no.	IRB 140	IRB 140T
1	200°/s	250°/s
2	200°/s	250°/s
3	260°/s	260°/s
4	360°/s	360°/s
5	360°/s	360°/s
6	450°/s	450°/s

Cycle time

5 kg Picking side	IRB 140	IRB 140T
cycle 25 x 300 x 25 mm	0,85s	0,77s

Electrical Connections

Supply voltage	200-600 V, 50/60 Hz
Rated power	
Transformer rating	4.5 kVA
Power consumption typology	0,4 kW

Physical

Robot mounting	Any angle
Dimensions	
Robot base	400 x 450 mm
Robot controller H x W x D	950 x 800 x 620 mm
Weight	
Robot manipulator	98 kg

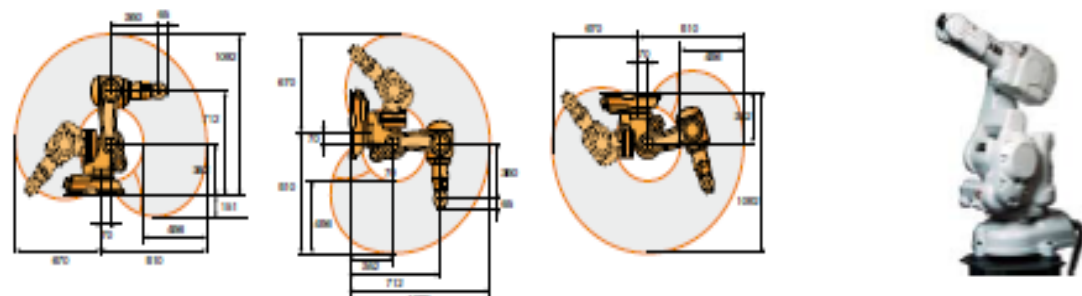
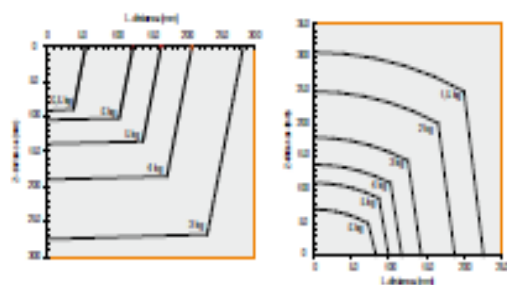
Environment

Ambient temperature for	
Robot manipulator	5 – 45°C
Relative humidity	Max. 95%
Degree of protection,	
Manipulator	IP57
Options	
	Foundry
	Wash (High pressure steam washable)
	Clean Room, class 6
	(certified by IFA)



Noise level	Max. 70 dB (A)
Safety	Double circuits with supervision, emergency stops and safety functions, 3-position enable device
Emission	EMC/EMI-shielded
Data and dimensions may be changed without notice	

Working range



Ek_D

$${}^0_1T = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & 0 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A.1})$$

$${}^1_2T = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_2 & -\cos \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A.2})$$

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & a_2 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A.3})$$

$${}^3_4T = \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & -\sin \theta_4 & 0 & a_3 \\ 0 & 0 & 1 & d_4 \\ -\sin \theta_4 & -\cos \theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A.4})$$

$${}^4_5T = \begin{bmatrix} \cos \theta_5 & -\sin \theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin \theta_5 & \cos \theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A.5})$$

$${}^5_6T = \begin{bmatrix} \cos \theta_6 & -\sin \theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_6 & -\cos \theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A.6})$$

$${}^0_6T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A.8})$$

$$r_{11} = c_1 [c_{23}(c_4c_5c_6 - s_4s_5) - s_{23}s_5c_5] + s_1(s_4c_5c_6 + c_4s_6) \quad (\text{A.9})$$

$$r_{21} = s_1 [c_{23}(c_4c_5c_6 - s_4s_6) - s_{23}s_5c_6] - c_1(s_4c_5c_6 + c_4s_6)$$

$$r_{31} = -s_{23}(c_4c_5c_6 - s_4s_6) - c_{23}s_5c_6$$

$$r_{12} = c_1 [c_{23}(-c_4c_5s_6 - s_4c_6) + s_{23}s_5s_6] + s_1(c_4c_6 - s_4c_5s_6)$$

$$r_{22} = s_1 [c_{23}(-c_4c_5s_6 - s_4c_6) + s_{23}s_5s_6] - c_1(c_4c_6 - s_4c_5s_6)$$

$$r_{32} = -s_{23}(-c_4c_5s_6 - s_4c_6) + c_{23}s_5s_6$$

$$r_{13} = -c_1(c_{23}c_4s_5 + s_{23}c_5) - s_1s_4s_5$$

$$r_{23} = -s_1(c_{23}c_4s_5 + s_{23}c_5) - c_1s_4s_5$$

$$r_{33} = s_{23}c_4s_5 - c_{23}c_5$$

$$p_x = c_1(a_2c_2 + a_3c_{23} - d_4s_{23}) - d_3s_1$$

$$p_y = s_1(a_2c_2 + a_3c_{23} - d_4s_{23}) + d_3c_1$$

$$p_z = -a_3s_{23} - a_2s_2 - d_4c_{23}$$

Ek_E

$$\begin{aligned}
 \tau_x := & \left(-1.28749007982654 \cdot 10^{-19} \sin\left(q_2(t) + \frac{3\pi}{2} + 3q_3(t) + 2q_5(t) + q_4(t)\right) + 1.28749007982654 \cdot 10^{-19} \sin\left(3q_2(t) \right. \\
 & \left. + \frac{\pi}{2} + 2q_5(t) + q_4(t) + q_3(t)\right) + 1.72794721239877 \cdot 10^{-19} \sin\left(-3q_2(t) + \frac{7\pi}{2} - 3q_3(t) + 2q_5(t) + 2q_4(t)\right) \\
 & + 1.08420217248550 \cdot 10^{-19} \sin\left(-3q_2(t) + \frac{5\pi}{2} - 3q_3(t) + q_5(t) + q_4(t)\right) + 1.32137139771671 \cdot 10^{-19} \sin\left(-q_4(t) \right. \\
 & \left. + \frac{3\pi}{2} + 2q_5(t) + q_3(t) + q_2(t)\right) + 2.59192081859816 \cdot 10^{-19} \sin\left(2q_5(t) + \frac{3\pi}{2} - 2q_4(t) + q_3(t) + q_2(t)\right) \\
 & + 2.60886147754325 \cdot 10^{-19} \sin\left(-q_2(t) + \frac{5\pi}{2} - 3q_3(t) + q_4(t) + 2q_5(t)\right) + 1.08420217248550 \cdot 10^{-19} \sin\left(-q_3(t) \right. \\
 & \left. + q_5(t) + \frac{\pi}{2} + q_4(t) + q_2(t)\right) + 1.08420217248550 \cdot 10^{-19} \sin\left(q_3(t) + q_5(t) + \frac{3\pi}{2} - q_4(t) - q_2(t)\right) \\
 & - 1.72794721239877 \cdot 10^{-19} \sin\left(2q_5(t) + \frac{5\pi}{2} + 2q_4(t) - q_3(t) - q_2(t)\right) + 2.60886147754325 \cdot 10^{-19} \sin\left(2q_5(t) \right. \\
 & \left. + \frac{5\pi}{2} - q_3(t) - q_2(t)\right) - 1.08420217248550 \cdot 10^{-19} \sin\left(q_5(t) + \frac{3\pi}{2} - 2q_4(t) - q_3(t) - q_2(t)\right) \\
 & - 1.08420217248550 \cdot 10^{-19} \sin\left(-3q_2(t) + \frac{\pi}{2} - 3q_3(t) - q_5(t) + 2q_4(t)\right) + 1.08420217248550 \cdot 10^{-19} \sin\left(-3q_2(t) \right. \\
 & \left. + \frac{\pi}{2} - 3q_3(t) - q_5(t) - q_4(t)\right) + 4.40457132572236 \cdot 10^{-20} \sin\left(2q_4(t) + 2q_5(t) + \frac{3\pi}{2} + q_3(t) + q_2(t)\right) \\
 & + 4.40457132572236 \cdot 10^{-20} \sin\left(q_2(t) + \frac{3\pi}{2} + 3q_3(t) + 2q_5(t) + 2q_4(t)\right) - 4.40457132572236 \cdot 10^{-20} \sin\left(3q_2(t) \right. \\
 & \left. + \frac{\pi}{2} + 3q_3(t) + 2q_5(t) + 2q_4(t)\right) - 4.23516473627150 \cdot 10^{-20} \sin\left(3q_2(t) + \frac{\pi}{2} + 2q_5(t) + q_3(t)\right) \\
 & + 4.23516473627150 \cdot 10^{-20} \sin\left(q_2(t) + \frac{3\pi}{2} + 3q_3(t) + 2q_5(t)\right) + 3.03237795117040 \cdot 10^{-19} \sin\left(3q_2(t) + \frac{\pi}{2} \right. \\
 & \left. + 3q_3(t) + 2q_5(t)\right) - 8.80914265144472 \cdot 10^{-20} \sin\left(-2q_4(t) + 2q_5(t) + \frac{5\pi}{2} - q_3(t) - q_2(t)\right) \\
 & - 3.81503639443337 \cdot 10^{-18} \sin\left(-2q_4(t) - q_3(t) - q_2(t) + \frac{\pi}{2}\right) + 8.80914265144472 \cdot 10^{-20} \sin\left(-3q_2(t) + \frac{7\pi}{2} \right. \\
 & \left. - 3q_3(t) + 2q_5(t) - 2q_4(t)\right) - 3.03237795117040 \cdot 10^{-19} \sin\left(2q_5(t) + \frac{3\pi}{2} + q_3(t) + q_2(t)\right) \\
 & - 1.08420217248550 \cdot 10^{-19} \sin\left(q_5(t) + \frac{\pi}{2} + q_3(t) + q_2(t) - q_4(t)\right) + 1.08420217248550 \cdot 10^{-19} \sin\left(q_5(t) + \frac{\pi}{2} \right. \\
 & \left. + q_3(t) + q_2(t) + q_4(t)\right) - 2.60886147754325 \cdot 10^{-19} \sin\left(-3q_2(t) + \frac{7\pi}{2} - 3q_3(t) + 2q_5(t)\right) \\
 & - 1.08420217248550 \cdot 10^{-19} \sin\left(-q_3(t) + q_5(t) + \frac{\pi}{2} - q_4(t) + q_2(t)\right) - 1.08420217248550 \cdot 10^{-19} \sin\left(q_3(t) + q_5(t) \right. \\
 & \left. + \frac{3\pi}{2} + q_4(t) - q_2(t)\right) - 2.16840434497101 \cdot 10^{-19} \cos\left(q_5(t) + \frac{\pi}{2} + q_4(t) + q_2(t)\right) \\
 & + 2.16840434497101 \cdot 10^{-19} \cos\left(q_5(t) + \frac{3\pi}{2} - q_4(t) - q_2(t)\right) + 3.93023287525995 \cdot 10^{-19} \sin\left(3q_2(t) + \frac{\pi}{2} + 3q_3(t) \right. \\
 & \left. + 2q_5(t) + q_4(t)\right) + 1.08420217248550 \cdot 10^{-19} \sin\left(-3q_2(t) + \frac{5\pi}{2} - 3q_3(t) - 2q_4(t) + q_5(t)\right) \\
 & - 2.60886147754325 \cdot 10^{-19} \sin\left(-3q_2(t) + \frac{7\pi}{2} - 3q_3(t) + q_4(t) + 2q_5(t)\right) - 1.28749007982654 \cdot 10^{-19} \sin\left(3q_2(t) \right. \\
 & \left. + \frac{\pi}{2} + 2q_5(t) - q_4(t) + q_3(t)\right) + 1.28749007982654 \cdot 10^{-19} \sin\left(q_2(t) + \frac{3\pi}{2} + 3q_3(t) - q_4(t) + 2q_5(t)\right) \\
 & - 8.47032947254300 \cdot 10^{-20} \sin\left(-q_2(t) + \frac{5\pi}{2} + 2q_5(t) + q_4(t) + q_3(t)\right) + 8.47032947254300 \cdot 10^{-20} \sin\left(-q_2(t) \right. \\
 & \left. + \frac{5\pi}{2} + 2q_5(t) - q_4(t) + q_3(t)\right) + 1.08420217248550 \cdot 10^{-19} \sin\left(2q_4(t) - q_3(t) - q_2(t) + \frac{3\pi}{2} + q_5(t)\right) \\
 & - 6.93889390390723 \cdot 10^{-18} \sin\left(-q_2(t) + \frac{\pi}{2} - 3q_3(t)\right) + 3.46944695195361 \cdot 10^{-18} \sin\left(-q_2(t) + \frac{\pi}{2} - 3q_3(t) \right. \\
 & \left. - 2q_4(t)\right) - 1.57853060050311 \cdot 10^{-17} \sin\left(-3q_2(t) + \frac{3\pi}{2} - 2q_4(t) - q_3(t)\right) - 1.08420217248550 \cdot 10^{-19} \sin\left(\right. \\
 & \left. -3q_2(t) + \frac{5\pi}{2} - 3q_3(t) + 2q_4(t) + q_5(t)\right) + 1.08420217248550 \cdot 10^{-19} \sin\left(2q_4(t) + \frac{\pi}{2} + q_5(t) + q_3(t) + q_2(t)\right) \\
 & - 3.93023287525995 \cdot 10^{-19} \sin\left(3q_2(t) + \frac{\pi}{2} + 3q_3(t) - q_4(t) + 2q_5(t)\right) - 1.08420217248550 \cdot 10^{-19} \sin\left(q_5(t) + \frac{\pi}{2} \right. \\
 & \left. - 2q_4(t) + q_3(t) + q_2(t)\right) - 6.59330446142747 \cdot 10^{-18} \sin\left(-3q_2(t) + \frac{3\pi}{2} - 3q_3(t) - 2q_4(t)\right) \\
 & + 1.08420217248550 \cdot 10^{-19} \sin\left(-3q_2(t) + \frac{\pi}{2} - 3q_3(t) - 2q_4(t) - q_5(t)\right) + 8.47032947254300 \cdot 10^{-20} \sin\left(q_2(t) \right. \\
 & \left. + \frac{3\pi}{2} + 2q_5(t) + q_4(t) - q_3(t)\right) - 3.46944695195361 \cdot 10^{-18} \sin\left(-q_2(t) + \frac{\pi}{2} - 3q_3(t) + 2q_4(t)\right)
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
& + 6.93889390390723 \cdot 10^{-18} \sin\left(-3q_2(t) + \frac{3\pi}{2} - q_3(t)\right) + 2.16840434497101 \cdot 10^{-19} \cos\left(q_5(t) + \frac{\pi}{2} - q_4(t) \right. \\
& \left. + q_2(t)\right) - 2.16840434497101 \cdot 10^{-19} \cos\left(q_5(t) + \frac{3\pi}{2} + q_4(t) - q_2(t)\right) - 2.60886147754325 \cdot 10^{-19} \sin\left(-3q_2(t) \right. \\
& \left. + \frac{7\pi}{2} + 2q_5(t) + q_4(t) - q_3(t)\right) - 1.08420217248550 \cdot 10^{-19} \sin\left(-3q_2(t) + \frac{\pi}{2} - 3q_3(t) - q_5(t) + q_4(t)\right) \\
& - 4.40457132572236 \cdot 10^{-20} \sin\left(3q_2(t) + \frac{\pi}{2} + q_3(t) + 2q_5(t) + 2q_4(t)\right) - 1.32137139771671 \cdot 10^{-19} \sin\left(2q_5(t) \right. \\
& \left. + \frac{3\pi}{2} + q_4(t) + q_3(t) + q_2(t)\right) + 2.60886147754325 \cdot 10^{-19} \sin\left(-3q_2(t) + \frac{7\pi}{2} - 3q_3(t) - q_4(t) + 2q_5(t)\right) \\
& - 8.63973606199386 \cdot 10^{-20} \sin\left(q_2(t) + \frac{3\pi}{2} + 3q_3(t) + 2q_5(t) - 2q_4(t)\right) - 2.59192081859816 \cdot 10^{-19} \sin\left(3q_2(t) \right. \\
& \left. + \frac{\pi}{2} + 3q_3(t) + 2q_5(t) - 2q_4(t)\right) - 1.08420217248550 \cdot 10^{-19} \sin\left(-3q_2(t) + \frac{5\pi}{2} - 3q_3(t) + q_5(t) - q_4(t)\right) \\
& - 8.47032947254300 \cdot 10^{-20} \sin\left(q_2(t) + \frac{3\pi}{2} + 2q_5(t) - q_4(t) - q_3(t)\right) + 8.63973606199386 \cdot 10^{-20} \sin\left(3q_2(t) + \frac{\pi}{2} \right. \\
& \left. + q_3(t) + 2q_5(t) - 2q_4(t)\right) + 6.93889390390723 \cdot 10^{-18} \sin\left(2q_4(t) - q_3(t) - q_2(t) + \frac{\pi}{2}\right) \\
& + 1.23158590530775 \cdot 10^{-17} \sin\left(-3q_2(t) + \frac{3\pi}{2} + 2q_4(t) - q_3(t)\right) + 2.60886147754325 \cdot 10^{-19} \sin\left(-3q_2(t) + \frac{7\pi}{2} \right. \\
& \left. + 2q_5(t) - q_4(t) - q_3(t)\right) - 1.08420217248550 \cdot 10^{-19} \sin\left(q_5(t) + \frac{3\pi}{2} - q_3(t) - q_2(t) + q_4(t)\right) \\
& + 1.08420217248550 \cdot 10^{-19} \sin\left(q_5(t) + \frac{3\pi}{2} - q_3(t) - q_2(t) - q_4(t)\right) - 2.60886147754325 \cdot 10^{-19} \sin\left(-q_2(t) + \frac{5\pi}{2} \right. \\
& \left. - 3q_3(t) - q_4(t) + 2q_5(t)\right) - 3.45589442479755 \cdot 10^{-19} \sin\left(-3q_2(t) + \frac{3\pi}{2} - 3q_3(t) + 2q_4(t)\right) \dot{q}^2 \\
& + \left(\left(6.50521303491303 \cdot 10^{-19} \sin(2q_4(t) + q_5(t) + 2\pi - 2q_3(t) - 2q_2(t)) + 4.49054400000000 \sin(-2q_2(t) + \pi) \right. \right. \\
& \left. \left. - 0.99931100000000 \sin(-2q_3(t) - 2q_2(t) + \pi) + 0.00013600000000 \sin(2q_5(t) + \pi + q_4(t) + 2q_3(t) + 2q_2(t)) \right. \right. \\
& \left. \left. + 0.00003400000000000005 \sin(2q_5(t) + \pi - 2q_4(t) + 2q_3(t) + 2q_2(t)) + 0.005220000000000000 \cos(q_5(t) + q_4(t) \right. \right. \\
& \left. \left. + q_3(t) + 2q_2(t)) - 0.005220000000000000 \cos(q_5(t) + 2\pi - q_4(t) - q_3(t) - 2q_2(t)) \right. \right. \\
& \left. \left. + 0.010440000000000000 \cos(q_5(t) + q_3(t) + 2q_2(t)) + 0.010440000000000000 \cos(q_5(t) + 2\pi - q_3(t) - 2q_2(t)) \right. \right. \\
& \left. \left. - 0.011020000000000000 \sin(q_5(t) + 2q_3(t) + 2q_2(t)) + 0.0000679999999999722 \sin(2q_4(t) - 2q_3(t) - 2q_2(t) + \pi) \right. \right. \\
& \left. \left. + 6.50521303491303 \cdot 10^{-19} \sin(-2q_4(t) + q_5(t) + 2\pi - 2q_3(t) - 2q_2(t)) - 0.0002039999999999999 \sin(2q_5(t) + 3\pi \right. \right. \\
& \left. \left. - 2q_3(t) - 2q_2(t)) - 1.7136000000000000 \cos(-q_3(t) - 2q_2(t) + \pi) + 8.67361737988404 \cdot 10^{-19} \cos(q_5(t) + \pi \right. \right. \\
& \left. \left. - q_3(t)) + 8.67361737988404 \cdot 10^{-19} \cos(q_5(t) + \pi + q_3(t)) + 0.005220000000000000 \cos(q_5(t) - q_4(t) + q_3(t) \right. \right. \\
& \left. \left. + 2q_2(t)) - 0.005220000000000000 \cos(q_5(t) + 2\pi + q_4(t) - q_3(t) - 2q_2(t)) - 0.005510000000000000 \sin(q_5(t) \right. \right. \\
& \left. \left. + 2\pi - 2q_3(t) - 2q_2(t) + q_4(t)) + 0.00013600000000 \sin(q_4(t) + 2q_5(t) + 3\pi - 2q_3(t) - 2q_2(t)) \right. \right. \\
& \left. \left. + 1.9294800000000000 \sin\left(-q_2(t) + \frac{\pi}{2}\right) - 4.33680868994202 \cdot 10^{-19} \sin(2q_4(t) + q_5(t) + 2q_3(t) + 2q_2(t)) \right. \right. \\
& \left. \left. - 1.76182853028894 \cdot 10^{-19} \sin(2\pi + 2q_3(t) + 2q_5(t)) + 2.77555756156289 \cdot 10^{-17} \sin(2q_3(t) - 2q_4(t)) \right. \right.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + 1.72794721239877 \cdot 10^{-19} \sin(-2 \varphi^d(t) + 2 \pi + 2 \varphi^5(t)) + 1.11022302462516 \cdot 10^{-18} \cos(\varphi^3(t)) \\
& + 0.00006800000000 \sin(-2 \varphi^d(t) - 2 \varphi^3(t) - 2 \varphi^2(t) + \pi) + 0.0020300000000000 \cos\left(\varphi^5(t) + \frac{3 \pi}{2} - \varphi^3(t) \right. \\
& \left. - \varphi^2(t)\right) - 0.000034000000000007 \sin(2 \varphi^5(t) + 3 \pi - 2 \varphi^3(t) - 2 \varphi^2(t) - 2 \varphi^d(t)) \\
& + 0.0000340000000000007 \sin(2 \varphi^5(t) + \pi + 2 \varphi^3(t) + 2 \varphi^2(t) + 2 \varphi^d(t)) + 2.16840434497101 \cdot 10^{-19} \sin(-2 \varphi^2(t) \\
& + 2 \pi + 2 \varphi^d(t) + \varphi^3(t)) + 1.73472347597681 \cdot 10^{-18} \sin(\varphi^5(t) + \pi) + 1.72794721239877 \cdot 10^{-19} \sin(2 \pi + 2 \varphi^3(t) \\
& + 2 \varphi^5(t) - 2 \varphi^d(t)) + 1.76182853028894 \cdot 10^{-19} \sin(2 \varphi^2(t) + \pi + 2 \varphi^5(t)) + 0.00013600000000 \sin(-\varphi^d(t) + 2 \varphi^5(t) \\
& + \pi + 2 \varphi^3(t) + 2 \varphi^2(t)) + 0.001015000000000000 \cos\left(\varphi^5(t) + \frac{\pi}{2} + \varphi^3(t) + \varphi^2(t) - \varphi^d(t)\right) \\
& - 0.001015000000000000 \cos\left(\varphi^5(t) + \frac{3 \pi}{2} - \varphi^3(t) - \varphi^2(t) + \varphi^d(t)\right) + 0.001015000000000000 \cos\left(\varphi^5(t) + \frac{\pi}{2} + \varphi^3(t) \right. \\
& \left. + \varphi^2(t) + \varphi^d(t)\right) - 0.001015000000000000 \cos\left(\varphi^5(t) + \frac{3 \pi}{2} - \varphi^3(t) - \varphi^2(t) - \varphi^d(t)\right) \\
& - 4.33680868994202 \cdot 10^{-19} \sin(\varphi^5(t) - 2 \varphi^d(t) + 2 \varphi^3(t) + 2 \varphi^2(t)) - 1.76182853028894 \cdot 10^{-19} \sin(2 \pi + 2 \varphi^5(t)) \\
& + 0.00020399999999999999 \sin(2 \varphi^5(t) + \pi + 2 \varphi^3(t) + 2 \varphi^2(t)) - 4.33680868994202 \cdot 10^{-19} \cos(\varphi^5(t) + \pi - \varphi^d(t) \\
& - \varphi^3(t)) + 4.33680868994202 \cdot 10^{-19} \cos(\varphi^5(t) + \pi + \varphi^d(t) + \varphi^3(t)) - 4.33680868994202 \cdot 10^{-19} \cos(\varphi^5(t) + \pi + \varphi^d(t) \\
& - \varphi^3(t)) + 4.33680868994202 \cdot 10^{-19} \cos(\varphi^5(t) + \pi - \varphi^d(t) + \varphi^3(t)) - 0.005510000000000000 \sin(\varphi^5(t) + 2 \pi \\
& - 2 \varphi^3(t) - 2 \varphi^2(t) - \varphi^d(t)) - 0.3332000000000000 \cos\left(-\varphi^3(t) - \varphi^2(t) + \frac{\pi}{2}\right) + 0.002030000000000000 \cos\left(\varphi^5(t) \right. \\
& \left. + \frac{\pi}{2} + \varphi^3(t) + \varphi^2(t)\right) + 2.16840434497101 \cdot 10^{-19} \sin(\pi - 2 \varphi^3(t) + \varphi^5(t) - 2 \varphi^d(t)) - 2.16840434497101 \cdot 10^{-19} \sin(\\
& - 2 \varphi^2(t) + 2 \pi - 2 \varphi^d(t) + \varphi^5(t)) - 1.72794721239877 \cdot 10^{-19} \sin(2 \varphi^2(t) + \pi + 2 \varphi^5(t) - 2 \varphi^d(t)) \\
& - 2.16840434497101 \cdot 10^{-19} \sin(\pi - 2 \varphi^3(t) + 2 \varphi^d(t) + \varphi^5(t)) - 2.15078605966812 \cdot 10^{-17} \sin(-2 \varphi^2(t) + \pi - 2 \varphi^d(t)) \\
& + 0.011020000000000000 \sin(\varphi^5(t) + 2 \pi - 2 \varphi^3(t) - 2 \varphi^2(t)) - 2.16840434497101 \cdot 10^{-19} \sin(\varphi^5(t) + \pi - 2 \varphi^d(t)) \\
& - 0.005510000000000000 \sin(\varphi^5(t) + 2 \varphi^3(t) + 2 \varphi^2(t) - \varphi^d(t)) - 0.005510000000000000 \sin(\varphi^5(t) + 2 \varphi^3(t) + 2 \varphi^2(t) \\
& + \varphi^d(t)) - 0.0000340000000000007 \sin(2 \varphi^3(t) + 3 \pi + 2 \varphi^d(t) - 2 \varphi^3(t) - 2 \varphi^2(t)) \\
& - 2.16840434497101 \cdot 10^{-19} \sin(2 \varphi^d(t) + \pi + \varphi^5(t)) - 2.15078605966812 \cdot 10^{-17} \sin(-2 \varphi^2(t) + \pi + 2 \varphi^d(t)) \\
& + 0.00013600000000 \sin(-\varphi^d(t) + 2 \varphi^5(t) + 3 \pi - 2 \varphi^3(t) - 2 \varphi^2(t)) \varphi^2(t) + \left(6.50521303491303 \cdot 10^{-18} \sin(2 \varphi^d(t) \right. \\
& \left. + \varphi^5(t) + 2 \pi - 2 \varphi^3(t) - 2 \varphi^2(t)) - 0.9993110000000000 \sin(-2 \varphi^3(t) - 2 \varphi^2(t) + \pi) + 0.00013600000000 \sin(2 \varphi^5(t) \right. \\
& \left. + \pi + \varphi^d(t) + 2 \varphi^3(t) + 2 \varphi^2(t)) + 0.0000340000000000005 \sin(2 \varphi^5(t) + \pi - 2 \varphi^d(t) + 2 \varphi^3(t) + 2 \varphi^2(t)) \right. \\
& \left. + 0.002610000000000000 \cos(\varphi^5(t) + \varphi^d(t) + \varphi^3(t) + 2 \varphi^2(t)) - 0.002610000000000000 \cos(\varphi^5(t) + 2 \pi - \varphi^d(t) \right. \\
& \left. - \varphi^3(t) - 2 \varphi^2(t)) + 1.72794721239877 \cdot 10^{-19} \sin(2 \varphi^5(t) + 2 \pi + 2 \varphi^d(t)) + 0.005220000000000000 \cos(\varphi^5(t) + \varphi^3(t)) \right)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + 2 q^2(t) + 0.0052200000000000 \cos(q^5(t) + 2 \pi - q^3(t) - 2 q^2(t)) - 0.0110200000000000 \sin(q^5(t) + 2 q^3(t) \\
& + 2 q^2(t) + 0.00006800000000000278 \sin(2 q^4(t) - 2 q^3(t) - 2 q^2(t) + \pi) + 6.50521303491303 10^{-19} \sin(-2 q^4(t) \\
& + q^5(t) + 2 \pi - 2 q^3(t) - 2 q^2(t)) - 0.00020399999999999999 \sin(2 q^5(t) + 3 \pi - 2 q^3(t) - 2 q^2(t)) \\
& - 0.8568000000000000 \cos(-q^3(t) - 2 q^2(t) + \pi) - 2.77555756156289 10^{-17} \sin(2 q^3(t) + 2 q^4(t)) \\
& + 0.005220000000000000 \cos(q^5(t) + \pi - q^3(t)) + 0.005220000000000000 \cos(q^5(t) + \pi + q^3(t)) \\
& + 0.002610000000000000 \cos(q^5(t) - q^4(t) + q^3(t) + 2 q^2(t)) - 0.002610000000000000 \cos(q^5(t) + 2 \pi + q^4(t) \\
& - q^3(t) - 2 q^2(t)) - 0.005510000000000000 \sin(q^5(t) + 2 \pi - 2 q^3(t) - 2 q^2(t) + q^4(t)) + 0.00013600000000 \sin(q^4(t) \\
& + 2 q^5(t) + 3 \pi - 2 q^3(t) - 2 q^2(t)) - 4.33680868994202 10^{-19} \sin(2 q^4(t) + q^5(t) + 2 q^3(t) + 2 q^2(t)) \\
& + 1.62630325872826 10^{-19} \sin(2 \pi + 2 q^3(t) + 2 q^5(t)) + 2.77555756156289 10^{-17} \sin(2 q^3(t) - 2 q^4(t)) \\
& - 1.72794721239877 10^{-19} \sin(2 \pi - 2 q^3(t) + 2 q^3(t) + 2 q^4(t)) + 1.72794721239877 10^{-19} \sin(-2 q^2(t) + 3 \pi \\
& + 2 q^5(t) + 2 q^4(t)) - 0.8568000000000000 \cos(q^3(t)) + 0.00006800000000000278 \sin(-2 q^4(t) - 2 q^3(t) - 2 q^2(t) \\
& + \pi) + 0.002030000000000000 \cos\left(q^5(t) + \frac{3 \pi}{2} - q^3(t) - q^2(t)\right) - 0.00003400000000000005 \sin(2 q^5(t) + 3 \pi \\
& - 2 q^3(t) - 2 q^2(t) - 2 q^4(t)) + 0.00003400000000000003 \sin(2 q^5(t) + \pi + 2 q^3(t) + 2 q^2(t) + 2 q^4(t)) \\
& - 2.16840434497101 10^{-19} \sin(-2 q^2(t) + 2 \pi + 2 q^4(t) + q^5(t)) + 8.67361737988404 10^{-19} \sin(q^5(t) + \pi) \\
& - 1.72794721239877 10^{-19} \sin(2 \pi - 2 q^3(t) - 2 q^4(t) + 2 q^5(t)) + 1.72794721239877 10^{-19} \sin(-2 q^2(t) + 3 \pi \\
& - 2 q^4(t) + 2 q^5(t)) - 1.72794721239877 10^{-19} \sin(2 \pi + 2 q^3(t) + 2 q^5(t) - 2 q^4(t)) \\
& - 1.62630325872826 10^{-19} \sin(2 q^2(t) + \pi + 2 q^5(t)) + 0.00013600000000 \sin(-q^4(t) + 2 q^5(t) + \pi + 2 q^3(t) \\
& + 2 q^2(t) + 0.001015000000000000 \cos\left(q^5(t) + \frac{\pi}{2} + q^3(t) + q^2(t) - q^4(t)\right) - 0.001015000000000000 \cos\left(q^5(t) \\
& + \frac{3 \pi}{2} - q^3(t) - q^2(t) + q^4(t)\right) + 0.001015000000000000 \cos\left(q^5(t) + \frac{\pi}{2} + q^3(t) + q^2(t) + q^4(t)\right) \\
& - 0.001015000000000000 \cos\left(q^5(t) + \frac{3 \pi}{2} - q^3(t) - q^2(t) - q^4(t)\right) - 4.33680868994202 10^{-19} \sin(q^5(t) - 2 q^4(t) \\
& + 2 q^3(t) + 2 q^2(t)) + 3.38813178901720 10^{-19} \sin(2 \pi - 2 q^3(t) + 2 q^5(t)) - 3.38813178901720 10^{-19} \sin(-2 q^2(t) \\
& + 3 \pi + 2 q^5(t)) - 1.76182853028894 10^{-19} \sin(2 \pi + 2 q^5(t)) + 0.00020399999999999999 \sin(2 q^5(t) + \pi + 2 q^3(t) \\
& + 2 q^2(t)) - 0.002610000000000000 \cos(q^5(t) + \pi - q^4(t) - q^3(t)) + 0.002610000000000000 \cos(q^5(t) + \pi + q^4(t) \\
& + q^3(t)) - 0.002610000000000000 \cos(q^5(t) + \pi + q^4(t) - q^3(t)) + 0.002610000000000000 \cos(q^5(t) + \pi - q^4(t) \\
& + q^3(t)) - 8.67361737988404 10^{-19} \sin(\pi - 2 q^3(t) + q^5(t)) + 8.67361737988404 10^{-19} \sin(-2 q^2(t) + 2 \pi + q^5(t)) \\
& - 0.005510000000000000 \sin(q^5(t) + 2 \pi - 2 q^3(t) - 2 q^2(t) - q^4(t)) - 0.3332000000000000 \cos\left(-q^3(t) - q^2(t)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{\pi}{2} \Big) + 0.0020300000000000 \cos\left(q^5(t) + \frac{\pi}{2} + q^3(t) + q^2(t)\right) + 2.16840434497101 \cdot 10^{-19} \sin(\pi - 2q^3(t) + q^5(t) \\
& - 2q^4(t)) - 2.16840434497101 \cdot 10^{-19} \sin(-2q^2(t) + 2\pi - 2q^4(t) + q^5(t)) + 1.72794721239877 \cdot 10^{-19} \sin(2q^2(t) \\
& + \pi + 2q^5(t) - 2q^4(t)) + 2.16840434497101 \cdot 10^{-19} \sin(\pi - 2q^3(t) + 2q^4(t) + q^5(t)) \\
& - 2.77555756156289 \cdot 10^{-17} \sin(-2q^2(t) + \pi - 2q^4(t)) + 0.0110200000000000 \sin(q^5(t) + 2\pi - 2q^3(t) - 2q^2(t)) \\
& - 2.16840434497101 \cdot 10^{-19} \sin(q^5(t) + \pi - 2q^4(t)) - 0.0055100000000000 \sin(q^5(t) + 2q^3(t) + 2q^2(t) - q^4(t)) \\
& - 0.0055100000000000 \sin(q^5(t) + 2q^3(t) + 2q^2(t) + q^4(t)) - 0.000034000000000005 \sin(2q^5(t) + 3\pi + 2q^4(t) \\
& - 2q^3(t) - 2q^2(t)) - 2.16840434497101 \cdot 10^{-19} \sin(2q^4(t) + \pi + q^5(t)) + 2.77555756156289 \cdot 10^{-17} \sin(-2q^2(t) + \pi \\
& + 2q^4(t)) + 0.00013600000000 \sin(-q^4(t) + 2q^5(t) + 3\pi - 2q^3(t) - 2q^2(t)) \dot{q}^3(t) \\
& + \left(1.08420217248550 \cdot 10^{-19} \sin(2q^4(t) + q^5(t) + 2\pi - 2q^3(t) - 2q^2(t)) + 0.0000680000000000 \sin(2q^5(t) + \pi \right. \\
& + q^4(t) + 2q^3(t) + 2q^2(t)) - 0.0000340000000000 \sin(2q^5(t) + \pi - 2q^4(t) + 2q^3(t) + 2q^2(t)) \\
& + 0.002610000000000000 \cos(q^5(t) + q^4(t) + q^3(t) + 2q^2(t)) - 0.002610000000000000 \cos(q^5(t) + 2\pi - q^4(t) \\
& - q^3(t) - 2q^2(t)) - 0.0000680000000000 \sin(2q^5(t) + 2\pi + 2q^4(t)) - 0.0000680000000000 \sin(2q^4(t) - 2q^3(t) \\
& - 2q^2(t) + \pi) - 1.08420217248550 \cdot 10^{-19} \sin(-2q^4(t) + q^5(t) + 2\pi - 2q^3(t) - 2q^2(t)) \\
& - 0.002610000000000000 \cos(q^5(t) - q^4(t) + q^3(t) + 2q^2(t)) + 0.002610000000000000 \cos(q^5(t) + 2\pi + q^4(t) \\
& - q^3(t) - 2q^2(t)) + 0.002755000000000000 \sin(q^5(t) + 2\pi - 2q^3(t) - 2q^2(t) + q^4(t)) \\
& - 0.0000680000000000 \sin(q^4(t) + 2q^5(t) + 3\pi - 2q^3(t) - 2q^2(t)) + 1.08420217248550 \cdot 10^{-19} \sin(2q^4(t) + q^5(t) \\
& + 2q^3(t) + 2q^2(t)) + 0.0000680000000000 \sin(-2q^4(t) + 2\pi + 2q^5(t)) + 0.0000680000000000 \sin(-2q^4(t) - 2q^3(t) \\
& - 2q^2(t) + \pi) - 0.0000340000000000 \sin(2q^5(t) + 3\pi - 2q^3(t) - 2q^2(t) - 2q^4(t)) + 0.0000340000000000 \sin(2q^5(t) \\
& + \pi + 2q^3(t) + 2q^2(t) + 2q^4(t)) - 0.0000680000000000 \sin(-q^4(t) + 2q^5(t) + \pi + 2q^3(t) + 2q^2(t)) \\
& - 0.001015000000000000 \cos\left(q^5(t) + \frac{\pi}{2} + q^3(t) + q^2(t) - q^4(t)\right) + 0.001015000000000000 \cos\left(q^5(t) + \frac{3\pi}{2} - q^3(t) \right. \\
& \left. - q^2(t) + q^4(t)\right) + 0.001015000000000000 \cos\left(q^5(t) + \frac{\pi}{2} + q^3(t) + q^2(t) + q^4(t)\right) \\
& - 0.001015000000000000 \cos\left(q^5(t) + \frac{3\pi}{2} - q^3(t) - q^2(t) - q^4(t)\right) - 1.08420217248550 \cdot 10^{-19} \sin(q^5(t) - 2q^4(t) \\
& + 2q^3(t) + 2q^2(t)) - 0.002610000000000000 \cos(q^5(t) + \pi - q^4(t) - q^3(t)) + 0.002610000000000000 \cos(q^5(t) + \pi \\
& + q^4(t) + q^3(t)) + 0.002610000000000000 \cos(q^5(t) + \pi + q^4(t) - q^3(t)) - 0.002610000000000000 \cos(q^5(t) + \pi \\
& - q^4(t) + q^3(t)) - 0.002755000000000000 \sin(q^5(t) + 2\pi - 2q^3(t) - 2q^2(t) - q^4(t)) \\
& + 0.00013600000000 \sin(2q^4(t)) + 2.16840434497101 \cdot 10^{-19} \sin(q^5(t) + \pi - 2q^4(t))
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + 0.0027550000000000 \sin(q^5(t) + 2q^3(t) + 2q^2(t) - q^4(t)) - 0.0027550000000000 \sin(q^5(t) + 2q^3(t) + 2q^2(t) \\
& + q^4(t)) + 0.00003400000000 \sin(2q^5(t) + 3\pi + 2q^4(t) - 2q^3(t) - 2q^2(t)) - 2.16840434497101 \cdot 10^{-19} \sin(2q^4(t) \\
& + \pi + q^5(t)) + 0.00006800000000 \sin(-q^4(t) + 2q^5(t) + 3\pi - 2q^3(t) - 2q^2(t)) q^4(t) \\
& + \left(2.16840434497101 \cdot 10^{-19} \sin(2q^4(t) + q^5(t) + 2\pi - 2q^3(t) - 2q^2(t)) + 0.00013600000000 \sin(2q^5(t) + \pi \right. \\
& + q^4(t) + 2q^3(t) + 2q^2(t)) + 0.00003400000000 \sin(2q^5(t) + \pi - 2q^4(t) + 2q^3(t) + 2q^2(t)) \\
& + 0.0026100000000000 \cos(q^5(t) + q^4(t) + q^3(t) + 2q^2(t)) + 0.0026100000000000 \cos(q^5(t) + 2\pi - q^4(t) \\
& - q^3(t) - 2q^2(t)) - 0.00006800000000 \sin(2q^5(t) + 2\pi + 2q^4(t)) + 0.0052200000000000 \cos(q^5(t) + q^3(t) \\
& + 2q^2(t)) - 0.0052200000000000 \cos(q^5(t) + 2\pi - q^3(t) - 2q^2(t)) - 0.0055100000000000 \sin(q^5(t) + 2q^3(t) \\
& + 2q^2(t)) + 2.16840434497101 \cdot 10^{-19} \sin(-2q^4(t) + q^5(t) + 2\pi - 2q^3(t) - 2q^2(t)) + 0.00020400000000 \sin(2q^5(t) \\
& + 3\pi - 2q^3(t) - 2q^2(t)) - 0.0052200000000000 \cos(q^5(t) + \pi - q^3(t)) + 0.0052200000000000 \cos(q^5(t) + \pi \\
& + q^3(t)) + 0.0026100000000000 \cos(q^5(t) - q^4(t) + q^3(t) + 2q^2(t)) + 0.0026100000000000 \cos(q^5(t) + 2\pi \\
& + q^4(t) - q^3(t) - 2q^2(t)) + 0.0027550000000000 \sin(q^5(t) + 2\pi - 2q^3(t) - 2q^2(t) + q^4(t)) \\
& - 0.00013600000000 \sin(q^4(t) + 2q^5(t) + 3\pi - 2q^3(t) - 2q^2(t)) + 2.16840434497101 \cdot 10^{-19} \sin(2q^4(t) + q^5(t) \\
& + 2q^3(t) + 2q^2(t)) - 0.00006800000000 \sin(-2q^4(t) + 2\pi + 2q^5(t)) - 0.0020300000000000 \cos\left(q^5(t) + \frac{3\pi}{2} \right. \\
& \left. - q^3(t) - q^2(t)\right) + 0.00003400000000 \sin(2q^5(t) + 3\pi - 2q^3(t) - 2q^2(t) - 2q^4(t)) \\
& + 0.00003400000000 \sin(2q^5(t) + \pi + 2q^3(t) + 2q^2(t) + 2q^4(t)) + 0.0110200000000000 \sin(q^5(t) + \pi) \\
& + 0.00013600000000 \sin(-q^4(t) + 2q^5(t) + \pi + 2q^3(t) + 2q^2(t)) + 0.0010150000000000 \cos\left(q^3(t) + \frac{\pi}{2} + q^3(t) \right. \\
& \left. + q^2(t) - q^4(t)\right) + 0.0010150000000000 \cos\left(q^5(t) + \frac{3\pi}{2} - q^3(t) - q^2(t) + q^4(t)\right) \\
& + 0.0010150000000000 \cos\left(q^5(t) + \frac{\pi}{2} + q^3(t) + q^2(t) + q^4(t)\right) + 0.0010150000000000 \cos\left(q^5(t) + \frac{3\pi}{2} - q^3(t) \right. \\
& \left. - q^2(t) - q^4(t)\right) + 2.16840434497101 \cdot 10^{-19} \sin(q^5(t) - 2q^4(t) + 2q^3(t) + 2q^2(t)) + 0.00013600000000 \sin(2\pi \\
& + 2q^5(t)) + 0.00020400000000 \sin(2q^5(t) + \pi + 2q^3(t) + 2q^2(t)) + 0.0026100000000000 \cos(q^5(t) + \pi - q^4(t) \\
& - q^3(t)) + 0.0026100000000000 \cos(q^5(t) + \pi + q^4(t) + q^3(t)) + 0.0026100000000000 \cos(q^5(t) + \pi + q^4(t) \\
& - q^3(t)) + 0.0026100000000000 \cos(q^5(t) + \pi - q^4(t) + q^3(t)) + 0.0027550000000000 \sin(q^5(t) + 2\pi - 2q^3(t) \\
& - 2q^2(t) - q^4(t)) + 0.0020300000000000 \cos\left(q^3(t) + \frac{\pi}{2} + q^3(t) + q^2(t)\right) - 0.0055100000000000 \sin(q^5(t) + 2\pi \\
& - 2q^3(t) - 2q^2(t)) - 4.33680868994202 \cdot 10^{-19} \sin(q^5(t) + \pi - 2q^4(t)) - 0.0027550000000000 \sin(q^5(t) + 2q^3(t) \\
& + 2q^2(t) - q^4(t)) - 0.0027550000000000 \sin(q^5(t) + 2q^3(t) + 2q^2(t) + q^4(t)) + 0.00003400000000 \sin(2q^5(t) \\
& + 3\pi + 2q^4(t) - 2q^3(t) - 2q^2(t)) - 4.33680868994202 \cdot 10^{-19} \sin(2q^4(t) + \pi + q^5(t)) - 0.00013600000000 \sin(
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -q^4(t) + 2q^5(t) + 3\pi - 2q^3(t) - 2q^2(t)) \dot{q}^5(t) \dot{q}^3(t) + \left(0.002755000000000000 \sin\left(q^5(t) + \frac{3\pi}{2} - q^3(t) - q^2(t) \right. \right. \\
& \left. \left. + q^4(t) \right) + 0.002755000000000000 \sin\left(q^5(t) + \frac{\pi}{2} + q^3(t) + q^2(t) - q^4(t) \right) - 0.0000340000000000 \sin\left(-2q^4(t) \right. \right. \\
& \left. \left. + 2q^5(t) + \frac{5\pi}{2} - q^3(t) - q^2(t) \right) + 0.00006799999999999993 \sin\left(2q^5(t) + \frac{3\pi}{2} + q^4(t) + q^3(t) + q^2(t) \right) \right. \\
& \left. + 0.002610000000000000 \cos\left(q^5(t) + \frac{3\pi}{2} + q^4(t) - q^2(t) \right) + 0.0000340000000000 \sin\left(2q^4(t) + 2q^5(t) + \frac{3\pi}{2} + q^3(t) \right. \right. \\
& \left. \left. + q^2(t) \right) - 0.002755000000000000 \sin\left(q^5(t) + \frac{\pi}{2} + q^3(t) + q^2(t) + q^4(t) \right) - 0.002610000000000000 \cos\left(q^5(t) \right. \right. \\
& \left. \left. + \frac{3\pi}{2} - q^4(t) - q^2(t) \right) + 0.002610000000000000 \cos\left(q^5(t) + \frac{\pi}{2} + q^4(t) + q^2(t) \right) - 0.0000340000000000 \sin\left(2q^5(t) \right. \right. \\
& \left. \left. + \frac{3\pi}{2} - 2q^4(t) + q^3(t) + q^2(t) \right) - 0.309540 \cos\left(-q^2(t) + \frac{\pi}{2}\right) - 0.002755000000000000 \sin\left(q^5(t) + \frac{3\pi}{2} - q^3(t) \right. \right. \\
& \left. \left. - q^2(t) - q^4(t) \right) - 2.15078605966812 \cdot 10^{-17} \sin\left(-q^2(t) + \frac{\pi}{2} - 2q^4(t) + q^3(t) \right) + 0.00006799999999999993 \sin\left(\right. \\
& \left. -q^4(t) + \frac{5\pi}{2} + 2q^5(t) - q^3(t) - q^2(t) \right) - 0.0000679999999999785 \sin\left(2q^4(t) - q^3(t) - q^2(t) + \frac{\pi}{2}\right) \\
& - 0.00006799999999999993 \sin\left(2q^5(t) + \frac{5\pi}{2} + q^4(t) - q^3(t) - q^2(t) \right) + 0.00006800000000000000 \sin\left(-2q^4(t) \right. \\
& \left. - q^3(t) - q^2(t) + \frac{\pi}{2}\right) - 0.00006799999999999993 \sin\left(-q^4(t) + \frac{3\pi}{2} + 2q^5(t) + q^3(t) + q^2(t) \right) \\
& + 0.0000340000000000 \sin\left(2q^5(t) + \frac{5\pi}{2} + 2q^4(t) - q^3(t) - q^2(t) \right) - 0.002610000000000000 \cos\left(q^5(t) + \frac{\pi}{2} - q^4(t) \right. \\
& \left. + q^2(t) \right) \dot{q}^2(t)^2 + \left(\left(0.000068000000000000 \sin\left(2q^4(t) + 2q^5(t) + \frac{3\pi}{2} + q^3(t) + q^2(t) \right) \right. \right. \\
& \left. \left. - 0.00013599999999999999 \sin\left(-q^4(t) + \frac{3\pi}{2} + 2q^5(t) + q^3(t) + q^2(t) \right) - 0.0000680000000000 \sin\left(2q^5(t) + \frac{3\pi}{2} \right. \right. \\
& \left. \left. - 2q^4(t) + q^3(t) + q^2(t) \right) - 3.38813178901720 \cdot 10^{-19} \sin\left(-q^2(t) + \frac{5\pi}{2} + 2q^5(t) + q^4(t) + q^3(t) \right) \right. \\
& \left. - 3.38813178901720 \cdot 10^{-19} \sin\left(q^2(t) + \frac{3\pi}{2} + 2q^5(t) - q^4(t) - q^3(t) \right) + 0.0000680000000000 \sin\left(2q^5(t) + \frac{5\pi}{2} \right. \right. \\
& \left. \left. + 2q^4(t) - q^3(t) - q^2(t) \right) + 3.38813178901720 \cdot 10^{-19} \sin\left(q^2(t) + \frac{3\pi}{2} + 2q^5(t) + q^4(t) - q^3(t) \right) \right. \\
& \left. - 0.00013600000000 \sin\left(2q^4(t) - q^3(t) - q^2(t) + \frac{\pi}{2}\right) - 0.0000680000000000 \sin\left(-2q^4(t) + 2q^5(t) + \frac{5\pi}{2} - q^3(t) \right. \right. \\
& \left. \left. - q^2(t) \right) + 3.38813178901720 \cdot 10^{-19} \sin\left(-q^2(t) + \frac{5\pi}{2} + 2q^5(t) - q^4(t) + q^3(t) \right) + 0.00013600000000 \sin\left(-2q^4(t) \right. \\
& \left. - q^3(t) - q^2(t) + \frac{\pi}{2}\right) + 0.00013599999999999999 \sin\left(2q^5(t) + \frac{3\pi}{2} + q^4(t) + q^3(t) + q^2(t) \right) \\
& + 0.00013599999999999999 \sin\left(-q^4(t) + \frac{5\pi}{2} + 2q^5(t) - q^3(t) - q^2(t) \right) - 0.00013599999999999999 \sin\left(2q^5(t) + \frac{5\pi}{2} \right. \\
& \left. + q^4(t) - q^3(t) - q^2(t) \right) - 0.005510000000000000 \sin\left(q^5(t) + \frac{3\pi}{2} - q^3(t) - q^2(t) - q^4(t) \right) \\
& - 0.005510000000000000 \sin\left(q^5(t) + \frac{\pi}{2} + q^3(t) + q^2(t) + q^4(t) \right) + 0.005510000000000000 \sin\left(q^5(t) + \frac{3\pi}{2} - q^3(t) \right. \\
& \left. - q^2(t) + q^4(t) \right) + 0.005510000000000000 \sin\left(q^5(t) + \frac{\pi}{2} + q^3(t) + q^2(t) - q^4(t) \right) \dot{q}^3(t) + \left(\right. \\
& \left. -0.00013600000000 \sin\left(2q^5(t) + \frac{3\pi}{2} + q^3(t) + q^2(t) \right) - 0.0000680000000000 \sin\left(-2q^4(t) + 2q^5(t) + \frac{5\pi}{2} - q^3(t) \right. \right. \\
& \left. \left. - q^2(t) \right) + 0.00013600000000 \sin\left(2q^5(t) + \frac{5\pi}{2} - q^3(t) - q^2(t) \right) - 0.1121800000 \sin\left(-q^3(t) - q^2(t) + \frac{\pi}{2}\right) \right)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + 0.0001360000000 \sin\left(-2q^4(t) - q^3(t) - q^2(t) + \frac{\pi}{2}\right) + 0.0001360000000 \sin\left(2q^4(t) - q^3(t) - q^2(t) + \frac{\pi}{2}\right) \\
& + 0.0000680000000 \sin\left(2q^5(t) + \frac{3\pi}{2} - 2q^4(t) + q^3(t) + q^2(t)\right) - 0.0000680000000 \sin\left(2q^5(t) + \frac{5\pi}{2} + 2q^4(t) \right. \\
& \left. - q^3(t) - q^2(t)\right) + 0.0000680000000 \sin\left(2q^4(t) + 2q^5(t) + \frac{3\pi}{2} + q^3(t) + q^2(t)\right) \Big) \dot{q}^4(t) + \left(\right. \\
& - 0.0001360000000 \sin\left(-q^4(t) + \frac{5\pi}{2} + 2q^5(t) - q^3(t) - q^2(t)\right) - 0.0001360000000 \sin\left(-q^4(t) + \frac{3\pi}{2} + 2q^5(t) \right. \\
& \left. + q^3(t) + q^2(t)\right) - 0.0010010000000 \sin\left(q^4(t) - q^3(t) - q^2(t) + \frac{\pi}{2}\right) + 0.0000680000000 \sin\left(-2q^4(t) + 2q^3(t) \right. \\
& \left. + \frac{5\pi}{2} - q^2(t) - q^2(t)\right) - 0.0000680000000 \sin\left(2q^5(t) + \frac{5\pi}{2} + 2q^4(t) - q^3(t) - q^2(t)\right) \\
& + 0.0000680000000 \sin\left(2q^4(t) + 2q^5(t) + \frac{3\pi}{2} + q^3(t) + q^2(t)\right) + 4.33680868994202 \cdot 10^{-19} \sin\left(2q^4(t) - q^3(t) \right. \\
& \left. - q^2(t) + \frac{3\pi}{2} + q^5(t)\right) - 4.33680868994202 \cdot 10^{-19} \sin\left(2q^4(t) + \frac{\pi}{2} + q^5(t) + q^3(t) + q^2(t)\right) \\
& + 0.0001360000000 \sin\left(2q^5(t) + \frac{5\pi}{2} + q^4(t) - q^3(t) - q^2(t)\right) + 0.0001360000000 \sin\left(2q^5(t) + \frac{3\pi}{2} + q^4(t) \right. \\
& \left. + q^3(t) + q^2(t)\right) + 4.33680868994202 \cdot 10^{-19} \sin\left(q^5(t) + \frac{\pi}{2} - 2q^4(t) + q^3(t) + q^2(t)\right) + 0.0010010000000 \sin\left(\right. \\
& \left. -q^4(t) - q^3(t) - q^2(t) + \frac{\pi}{2}\right) - 0.0000680000000 \sin\left(2q^5(t) + \frac{3\pi}{2} - 2q^4(t) + q^3(t) + q^2(t)\right) \\
& - 4.33680868994202 \cdot 10^{-19} \sin\left(q^5(t) + \frac{3\pi}{2} - 2q^4(t) - q^3(t) - q^2(t)\right) \Big) \dot{q}^5(t) + \left(0.0007290000000 \sin\left(q^5(t) + \frac{3\pi}{2} \right. \right. \\
& \left. \left. - q^3(t) - q^2(t)\right) - 0.0007290000000 \sin\left(q^5(t) + \frac{\pi}{2} + q^3(t) + q^2(t)\right) - 0.0003645000000 \sin\left(q^5(t) + \frac{3\pi}{2} - q^3(t) \right. \\
& \left. - q^2(t) - q^4(t)\right) - 0.0003645000000 \sin\left(q^5(t) + \frac{\pi}{2} + q^3(t) + q^2(t) + q^4(t)\right) - 0.0003645000000 \sin\left(q^5(t) + \frac{3\pi}{2} \right. \\
& \left. - q^3(t) - q^2(t) + q^4(t)\right) - 0.0003645000000 \sin\left(q^5(t) + \frac{\pi}{2} + q^3(t) + q^2(t) - q^4(t)\right) \Big) \dot{q}^6(t) \dot{q}^7(t) + \left(\right. \\
& - 2.16840434497101 \cdot 10^{-19} \sin\left(q^3(t) + q^5(t) + \frac{3\pi}{2} - q^4(t) - q^2(t)\right) - 2.16840434497101 \cdot 10^{-19} \sin\left(-q^3(t) + q^5(t) \right. \\
& \left. + \frac{\pi}{2} + q^4(t) + q^2(t)\right) + 2.16840434497101 \cdot 10^{-19} \sin\left(-q^3(t) + q^5(t) + \frac{\pi}{2} - q^4(t) + q^2(t)\right) \\
& + 0.0000340000000 \sin\left(2q^4(t) + 2q^5(t) + \frac{3\pi}{2} + q^3(t) + q^2(t)\right) + 2.16840434497101 \cdot 10^{-19} \sin\left(q^3(t) + q^5(t) \right. \\
& \left. + \frac{3\pi}{2} + q^4(t) - q^2(t)\right) - 0.0000679999999999996 \sin\left(2q^5(t) + \frac{5\pi}{2} + q^4(t) - q^3(t) - q^2(t)\right) \\
& - 0.0000679999999999996 \sin\left(-q^4(t) + \frac{3\pi}{2} + 2q^5(t) + q^3(t) + q^2(t)\right) + 0.0000340000000 \sin\left(2q^5(t) + \frac{5\pi}{2} \right. \\
& \left. + 2q^4(t) - q^3(t) - q^2(t)\right) + 0.0000679999999999996 \sin\left(2q^5(t) + \frac{3\pi}{2} + q^4(t) + q^3(t) + q^2(t)\right) \\
& - 0.0000340000000 \sin\left(-2q^4(t) + 2q^5(t) + \frac{5\pi}{2} - q^3(t) - q^2(t)\right) - 0.0000340000000 \sin\left(2q^5(t) + \frac{3\pi}{2} \right. \\
& \left. - 2q^4(t) + q^3(t) + q^2(t)\right) + 0.00275500000000000 \sin\left(q^5(t) + \frac{3\pi}{2} - q^3(t) - q^2(t) + q^4(t)\right) \\
& - 0.00275500000000000 \sin\left(q^5(t) + \frac{3\pi}{2} - q^3(t) - q^2(t) - q^4(t)\right) + 0.00275500000000000 \sin\left(q^5(t) + \frac{\pi}{2} + q^3(t) \right. \\
& \left. + q^2(t) - q^4(t)\right) + 0.0000679999999999996 \sin\left(-q^4(t) + \frac{5\pi}{2} + 2q^5(t) - q^3(t) - q^2(t)\right) \\
& - 0.0000680000000 \sin\left(2q^4(t) - q^3(t) - q^2(t) + \frac{\pi}{2}\right) + 0.0000680000000 \sin\left(-2q^4(t) - q^3(t) - q^2(t) + \frac{\pi}{2}\right)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -0.0027550000000000 \sin\left(q^5(t) + \frac{\pi}{2} + q^3(t) + q^2(t) + q^4(t)\right) \dot{q}^3(t)^2 + \left(\left(-0.00013600000000 \sin\left(2q^5(t) + \frac{3\pi}{2} \right. \right. \right. \\
& \left. \left. \left. + q^3(t) + q^2(t)\right) - 0.00006800000000 \sin\left(-2q^4(t) + 2q^5(t) + \frac{5\pi}{2} - q^3(t) - q^2(t)\right) \right. \\
& \left. + 0.00013600000000 \sin\left(2q^5(t) + \frac{5\pi}{2} - q^3(t) - q^2(t)\right) - 0.1121800000 \sin\left(-q^3(t) - q^2(t) + \frac{\pi}{2}\right) \right. \\
& \left. + 0.00013600000000 \sin\left(-2q^4(t) - q^3(t) - q^2(t) + \frac{\pi}{2}\right) + 0.00013600000000 \sin\left(2q^4(t) - q^3(t) - q^2(t) + \frac{\pi}{2}\right) \right. \\
& \left. + 0.00006800000000 \sin\left(2q^5(t) + \frac{3\pi}{2} - 2q^4(t) + q^3(t) + q^2(t)\right) - 0.00006800000000 \sin\left(2q^5(t) + \frac{5\pi}{2} + 2q^4(t) \right. \right. \\
& \left. \left. - q^3(t) - q^2(t)\right) + 0.00006800000000 \sin\left(2q^4(t) + 2q^5(t) + \frac{3\pi}{2} + q^3(t) + q^2(t)\right) \right) \dot{q}^4(t) + \left(\right. \\
& -0.00013600000000 \sin\left(-q^4(t) + \frac{5\pi}{2} + 2q^5(t) - q^3(t) - q^2(t)\right) - 0.00013600000000 \sin\left(-q^4(t) + \frac{3\pi}{2} + 2q^5(t) \right. \\
& \left. + q^3(t) + q^2(t)\right) - 0.001001000000 \sin\left(q^4(t) - q^3(t) - q^2(t) + \frac{\pi}{2}\right) + 0.00006800000000 \sin\left(-2q^4(t) + 2q^5(t) \right. \\
& \left. + \frac{5\pi}{2} - q^3(t) - q^2(t)\right) - 0.00006800000000 \sin\left(2q^5(t) + \frac{5\pi}{2} + 2q^4(t) - q^3(t) - q^2(t)\right) \\
& \left. + 0.00006800000000 \sin\left(2q^4(t) + 2q^5(t) + \frac{3\pi}{2} + q^3(t) + q^2(t)\right) + 4.33680868994202 \cdot 10^{-19} \sin\left(2q^4(t) - q^3(t) \right. \right. \\
& \left. \left. - q^2(t) + \frac{3\pi}{2} + q^5(t)\right) - 4.33680868994202 \cdot 10^{-19} \sin\left(2q^4(t) + \frac{\pi}{2} + q^5(t) + q^3(t) + q^2(t)\right) \right. \\
& \left. + 0.00013600000000 \sin\left(2q^5(t) + \frac{5\pi}{2} + q^4(t) - q^3(t) - q^2(t)\right) + 0.00013600000000 \sin\left(2q^5(t) + \frac{3\pi}{2} + q^4(t) \right. \right. \\
& \left. \left. + q^3(t) + q^2(t)\right) + 4.33680868994202 \cdot 10^{-19} \sin\left(q^5(t) + \frac{\pi}{2} - 2q^4(t) + q^3(t) + q^2(t)\right) + 0.001001000000 \sin\left(\right. \\
& \left. -q^4(t) - q^3(t) - q^2(t) + \frac{\pi}{2}\right) - 0.00006800000000 \sin\left(2q^5(t) + \frac{3\pi}{2} - 2q^4(t) + q^3(t) + q^2(t)\right) \\
& \left. - 4.33680868994202 \cdot 10^{-19} \sin\left(q^5(t) + \frac{3\pi}{2} - 2q^4(t) - q^3(t) - q^2(t)\right) \right) \dot{q}^5(t) + \left(0.00072900000000 \sin\left(q^5(t) + \frac{3\pi}{2} \right. \right. \\
& \left. \left. - q^3(t) - q^2(t)\right) - 0.00072900000000 \sin\left(q^5(t) + \frac{\pi}{2} + q^3(t) + q^2(t)\right) - 0.00036450000000 \sin\left(q^5(t) + \frac{3\pi}{2} - q^3(t) \right. \right. \\
& \left. \left. - q^2(t) - q^4(t)\right) - 0.00036450000000 \sin\left(q^5(t) + \frac{\pi}{2} + q^3(t) + q^2(t) + q^4(t)\right) - 0.00036450000000 \sin\left(q^5(t) + \frac{3\pi}{2} \right. \right. \\
& \left. \left. - q^3(t) - q^2(t) + q^4(t)\right) - 0.00036450000000 \sin\left(q^5(t) + \frac{\pi}{2} + q^3(t) + q^2(t) - q^4(t)\right) \right) \dot{q}^6(t) \dot{q}^3(t) \\
& + \left(0.0026100000000000 \cos\left(q^5(t) + \frac{\pi}{2} - q^4(t) + q^2(t)\right) - 0.0026100000000000 \cos\left(q^5(t) + \frac{\pi}{2} + q^4(t) \right. \right. \\
& \left. \left. + q^2(t)\right) - 0.0026100000000000 \cos\left(q^5(t) + \frac{3\pi}{2} + q^4(t) - q^2(t)\right) - 0.0027550000000000 \sin\left(q^5(t) + \frac{\pi}{2} \right. \right. \\
& \left. \left. + q^3(t) + q^2(t) - q^4(t)\right) - 0.0027550000000000 \sin\left(q^5(t) + \frac{3\pi}{2} - q^3(t) - q^2(t) + q^4(t)\right) \right. \\
& \left. + 0.0026100000000000 \cos\left(q^5(t) + \frac{3\pi}{2} - q^4(t) - q^2(t)\right) + 0.0027550000000000 \sin\left(q^5(t) + \frac{3\pi}{2} - q^3(t) \right. \right. \\
& \left. \left. - q^2(t) - q^4(t)\right) + 0.00006800000000 \sin\left(-q^4(t) + \frac{3\pi}{2} + 2q^5(t) + q^3(t) + q^2(t)\right) + 0.00006800000000 \sin\left(2q^5(t) \right. \right. \\
& \left. \left. + \frac{5\pi}{2} + q^4(t) - q^3(t) - q^2(t)\right) + 0.0027550000000000 \sin\left(q^5(t) + \frac{\pi}{2} + q^3(t) + q^2(t) + q^4(t)\right) \right. \\
& \left. - 0.00006800000000 \sin\left(-q^4(t) + \frac{5\pi}{2} + 2q^5(t) - q^3(t) - q^2(t)\right) + 0.0010150000000000 \cos(q^5(t) + \pi - q^4(t)) \right. \\
& \left. - 0.0010150000000000 \cos(q^5(t) + \pi + q^4(t)) - 0.00006800000000 \sin\left(2q^5(t) + \frac{3\pi}{2} + q^4(t) + q^3(t) + q^2(t)\right) \right)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \dot{q}^4(t)^2 + \left(\left(-0.0002720000000 \sin\left(2q^5(t) + \frac{5\pi}{2} - q^3(t) - q^2(t)\right) - 0.00522000000000000 \cos\left(q^5(t) + \frac{\pi}{2} + q^4(t) \right. \right. \\
& \left. \left. + q^2(t)\right) - 0.00203000000000000 \cos(q^5(t) + \pi - q^4(t)) - 0.00203000000000000 \cos(q^5(t) + \pi + q^4(t)) \right. \\
& \left. - 0.0002720000000 \sin\left(2q^5(t) + \frac{3\pi}{2} + q^3(t) + q^2(t)\right) - 0.00522000000000000 \cos\left(q^5(t) + \frac{3\pi}{2} + q^4(t) - q^2(t)\right) \right. \\
& \left. + 0.00551000000000000 \sin\left(q^5(t) + \frac{\pi}{2} + q^3(t) + q^2(t) + q^4(t)\right) + 0.0010010000000 \sin\left(q^4(t) - q^3(t) - q^2(t) \right. \right. \\
& \left. \left. + \frac{\pi}{2}\right) + 0.00551000000000000 \sin\left(q^5(t) + \frac{\pi}{2} + q^3(t) + q^2(t) - q^4(t)\right) - 0.00551000000000000 \sin\left(q^5(t) + \frac{3\pi}{2} \right. \\
& \left. - q^3(t) - q^2(t) + q^4(t)\right) - 0.00522000000000000 \cos\left(q^5(t) + \frac{\pi}{2} - q^4(t) + q^2(t)\right) - 0.0001360000000 \sin\left(2q^5(t) \right. \\
& \left. + \frac{3\pi}{2} + q^4(t) + q^3(t) + q^2(t)\right) + 0.0001360000000 \sin\left(-q^4(t) + \frac{5\pi}{2} + 2q^5(t) - q^3(t) - q^2(t)\right) \\
& \left. - 0.0001360000000 \sin\left(-q^4(t) + \frac{3\pi}{2} + 2q^5(t) + q^3(t) + q^2(t)\right) - 0.00551000000000000 \sin\left(q^5(t) + \frac{3\pi}{2} - q^3(t) \right. \right. \\
& \left. \left. - q^2(t) - q^4(t)\right) - 0.00522000000000000 \cos\left(q^5(t) + \frac{3\pi}{2} - q^4(t) - q^2(t)\right) + 0.0010010000000 \sin\left(-q^4(t) - q^3(t) \right. \\
& \left. - q^2(t) + \frac{\pi}{2}\right) + 0.0001360000000 \sin\left(2q^5(t) + \frac{5\pi}{2} + q^4(t) - q^3(t) - q^2(t)\right) \Big) \dot{q}^5(t) \\
& + \left(0.0003645000000 \sin\left(q^5(t) + \frac{3\pi}{2} - q^3(t) - q^2(t) + q^4(t)\right) - 0.0003645000000 \sin\left(q^5(t) + \frac{3\pi}{2} - q^3(t) \right. \right. \\
& \left. \left. - q^2(t) - q^4(t)\right) - 0.0003645000000 \sin\left(q^5(t) + \frac{\pi}{2} + q^3(t) + q^2(t) + q^4(t)\right) + 0.0003645000000 \sin\left(q^5(t) + \frac{\pi}{2} \right. \right. \\
& \left. \left. + q^3(t) + q^2(t) - q^4(t)\right) \right) \dot{q}^6(t) \dot{q}^4(t) + \left(0.00261000000000000 \cos\left(q^5(t) + \frac{3\pi}{2} - q^4(t) - q^2(t)\right) \right. \\
& \left. + 0.00261000000000000 \cos\left(q^5(t) + \frac{\pi}{2} - q^4(t) + q^2(t)\right) - 0.00261000000000000 \cos\left(q^5(t) + \frac{\pi}{2} + q^4(t) + q^2(t)\right) \right. \\
& \left. - 0.00261000000000000 \cos\left(q^5(t) + \frac{3\pi}{2} + q^4(t) - q^2(t)\right) + 0.00275500000000000 \sin\left(q^5(t) + \frac{\pi}{2} + q^3(t) + q^2(t) \right. \right. \\
& \left. \left. + q^4(t)\right) + 0.00101500000000000 \cos(q^5(t) + \pi - q^4(t)) - 0.00101500000000000 \cos(q^5(t) + \pi + q^4(t)) \right. \\
& \left. + 0.00275500000000000 \sin\left(q^5(t) + \frac{3\pi}{2} - q^3(t) - q^2(t) - q^4(t)\right) - 0.00275500000000000 \sin\left(q^5(t) + \frac{\pi}{2} + q^3(t) \right. \right. \\
& \left. \left. + q^2(t) - q^4(t)\right) - 0.00275500000000000 \sin\left(q^5(t) + \frac{3\pi}{2} - q^3(t) - q^2(t) + q^4(t)\right) \right) \dot{q}^5(t)^2 + \left(\right. \\
& \left. - 0.0007290000000 \sin\left(q^5(t) + \frac{3\pi}{2} - q^3(t) - q^2(t)\right) - 0.0007290000000 \sin\left(q^5(t) + \frac{\pi}{2} + q^3(t) + q^2(t)\right) \right. \\
& \left. + 0.0003645000000 \sin\left(q^5(t) + \frac{3\pi}{2} - q^3(t) - q^2(t) - q^4(t)\right) - 0.0003645000000 \sin\left(q^5(t) + \frac{\pi}{2} + q^3(t) + q^2(t) \right. \right. \\
& \left. \left. - q^4(t)\right) - 0.0003645000000 \sin\left(q^5(t) + \frac{\pi}{2} + q^3(t) + q^2(t) + q^4(t)\right) + 0.0003645000000 \sin\left(q^5(t) + \frac{3\pi}{2} - q^3(t) \right. \right. \\
& \left. \left. - q^2(t) + q^4(t)\right) \right) \dot{q}^6(t) \dot{q}^5(t) + \left(0.000068000000000 \cos(-q^4(t) + 2q^5(t) + 3\pi - 2q^3(t) - 2q^2(t)) \right. \\
& \left. + 2.16840434497101 \cdot 10^{-10} \cos(-2q^4(t) + q^5(t) + 2\pi - 2q^3(t) - 2q^2(t)) - 0.000017000000000 \cos(2q^5(t) + \pi \right. \\
& \left. + 2q^3(t) + 2q^2(t) + 2q^4(t)) + 2.245272000000000 \cos(-2q^2(t) + \pi) + 0.000034000000000 \cos(2q^5(t) + 2\pi \right. \\
& \left. + 2q^4(t)) + 0.00275500000000000 \cos(q^5(t) + 2q^3(t) + 2q^2(t) + q^4(t)) - 0.00275500000000000 \cos(q^5(t) + 2\pi \right. \\
& \left. - 2q^3(t) - 2q^2(t) - q^4(t)) + 0.856800000000000 \sin(-q^3(t) - 2q^2(t) + \pi) + 0.00522000000000000 \sin(q^5(t) + \pi \right.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + q^3(t) - 0.0052200000000000 \sin(q^5(t) + \pi - q^3(t)) - 0.00068000000000 \cos(-q^4(t) + 2q^5(t) + \pi + 2q^3(t) \\
& + 2q^2(t)) - 0.00006800000000 \cos(2\pi + 2q^5(t)) - 4.33680868994202 \cdot 10^{-19} \cos(2q^4(t) + \pi + q^5(t)) \\
& + 0.0026100000000000 \sin(q^5(t) + \pi + q^4(t) + q^3(t)) + 0.0026100000000000 \sin(q^5(t) + \pi - q^4(t) - q^3(t)) \\
& + 1.92948000000000 \cos\left(-q^2(t) + \frac{\pi}{2}\right) + 0.0010150000000000 \sin\left(q^5(t) + \frac{\pi}{2} + q^3(t) + q^2(t) - q^4(t)\right) \\
& + 0.0010150000000000 \sin\left(q^5(t) + \frac{\pi}{2} + q^3(t) + q^2(t) + q^4(t)\right) + 0.0026100000000000 \sin(q^5(t) + \pi - q^4(t) \\
& + q^3(t)) + 0.0026100000000000 \sin(q^5(t) + \pi + q^4(t) - q^3(t)) + 0.0027550000000000 \cos(q^5(t) + 2q^3(t) \\
& + 2q^2(t) - q^4(t)) - 0.0027550000000000 \cos(q^5(t) + 2\pi - 2q^3(t) - 2q^2(t) + q^4(t)) \\
& + 2.16840434497101 \cdot 10^{-19} \cos(q^5(t) - 2q^4(t) + 2q^3(t) + 2q^2(t)) - 0.00001700000000 \cos(2q^5(t) + 3\pi + 2q^4(t) \\
& - 2q^3(t) - 2q^2(t)) - 0.85680000000000 \sin(q^3(t)) - 4.33680868994202 \cdot 10^{-19} \cos(q^5(t) + \pi - 2q^4(t)) \\
& - 0.00001700000000 \cos(2q^5(t) + 3\pi - 2q^3(t) - 2q^2(t) - 2q^4(t)) - 0.00010200000000 \cos(2q^5(t) + \pi + 2q^3(t) \\
& + 2q^2(t)) - 0.0110200000000000 \cos(q^5(t) + \pi) + 0.00003400000000 \cos(-2q^4(t) + 2\pi + 2q^5(t)) \\
& + 1.38777878078145 \cdot 10^{-17} \cos(-2q^2(t) + \pi - 2q^4(t)) + 2.16840434497101 \cdot 10^{-19} \cos(2q^4(t) + q^5(t) + 2q^3(t) \\
& + 2q^2(t)) + 0.0026100000000000 \sin(q^5(t) + 2\pi - q^4(t) - q^3(t) - 2q^2(t)) + 0.0026100000000000 \sin(q^5(t) \\
& + q^4(t) + q^3(t) + 2q^2(t)) + 0.0026100000000000 \sin(q^5(t) + 2\pi + q^4(t) - q^3(t) - 2q^2(t)) \\
& + 0.0026100000000000 \sin(q^5(t) - q^4(t) + q^3(t) + 2q^2(t)) + 0.000034000000000062 \cos(-2q^4(t) - 2q^3(t) \\
& - 2q^2(t) + \pi) + 0.00068000000000 \cos(q^4(t) + 2q^5(t) + 3\pi - 2q^3(t) - 2q^2(t)) - 0.00001700000000 \cos(2q^5(t) \\
& + \pi - 2q^4(t) + 2q^3(t) + 2q^2(t)) + 0.33320000000000 \sin\left(-q^3(t) - q^2(t) + \frac{\pi}{2}\right) \\
& + 2.16840434497101 \cdot 10^{-19} \cos(2q^4(t) + q^5(t) + 2\pi - 2q^3(t) - 2q^2(t)) + 3.74662800000000 \\
& - 0.0052200000000000 \sin(q^5(t) + 2\pi - q^3(t) - 2q^2(t)) + 0.0052200000000000 \sin(q^5(t) + q^3(t) + 2q^2(t)) \\
& + 0.0055100000000000 \cos(q^5(t) + 2q^3(t) + 2q^2(t)) + 0.0055100000000000 \cos(q^5(t) + 2\pi - 2q^3(t) - 2q^2(t)) \\
& - 0.000067999999999709 \cos(2q^4(t)) - 0.49965500000000 \cos(-2q^3(t) - 2q^2(t) + \pi) \\
& + 0.000033999999999785 \cos(2q^4(t) - 2q^3(t) - 2q^2(t) + \pi) + 0.0020300000000000 \sin\left(q^5(t) + \frac{\pi}{2} + q^3(t) \\
& + q^2(t)\right) - 0.0020300000000000 \sin\left(q^5(t) + \frac{3\pi}{2} - q^3(t) - q^2(t)\right) + 0.0010150000000000 \sin\left(q^5(t) + \frac{3\pi}{2} \\
& - q^3(t) - q^2(t) + q^4(t)\right) + 0.0010150000000000 \sin\left(q^5(t) + \frac{3\pi}{2} - q^3(t) - q^2(t) - q^4(t)\right) \\
& - 0.00006800000000 \cos(2q^5(t) + \pi + q^4(t) + 2q^3(t) + 2q^2(t)) - 0.00010200000000 \cos(2q^5(t) + 3\pi - 2q^3(t) \\
& - 2q^2(t)) \ddot{q}^7(t) + \left(4.33680868994202 \cdot 10^{-19} \cos\left(2q^4(t) + \frac{\pi}{2} + q^5(t) + q^3(t) + q^2(t)\right)\right)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -4.33680868994202 \cdot 10^{-19} \cos\left(2 q^4(t) - q^3(t) - q^2(t) + \frac{3\pi}{2} + q^5(t)\right) + 0.002610000000 \sin\left(q^5(t) + \frac{\pi}{2} + q^4(t) \right. \\
& \left. + q^2(t)\right) - 0.00006800000000 \cos\left(2 q^5(t) + \frac{5\pi}{2} + q^4(t) - q^3(t) - q^2(t)\right) + 0.002755000000 \cos\left(q^5(t) + \frac{\pi}{2} \right. \\
& \left. + q^3(t) + q^2(t) + q^4(t)\right) - 0.002610000000 \sin\left(q^5(t) + \frac{3\pi}{2} + q^4(t) - q^2(t)\right) - 0.00006800000000 \cos\left(2 q^5(t) \right. \\
& \left. + \frac{3\pi}{2} + q^4(t) + q^3(t) + q^2(t)\right) - 0.00003400000000 \cos\left(2 q^4(t) + 2 q^5(t) + \frac{3\pi}{2} + q^3(t) + q^2(t)\right) \\
& + 0.002755000000 \cos\left(q^5(t) + \frac{3\pi}{2} - q^3(t) - q^2(t) + q^4(t)\right) + 0.002610000000 \sin\left(q^5(t) + \frac{3\pi}{2} - q^4(t) - q^2(t)\right) \\
& - 0.002610000000 \sin\left(q^5(t) + \frac{\pi}{2} - q^4(t) + q^2(t)\right) + 0.309540 \sin\left(-q^2(t) + \frac{\pi}{2}\right) - 0.00003400000000 \cos\left(-2 q^4(t) \right. \\
& \left. + 2 q^5(t) + \frac{5\pi}{2} - q^3(t) - q^2(t)\right) - 0.002755000000 \cos\left(q^5(t) + \frac{3\pi}{2} - q^3(t) - q^2(t) - q^4(t)\right) \\
& + 0.00003400000000 \cos\left(2 q^5(t) + \frac{3\pi}{2} - 2 q^4(t) + q^3(t) + q^2(t)\right) + 0.00006800000000 \cos\left(-q^4(t) + \frac{5\pi}{2} + 2 q^5(t) \right. \\
& \left. - q^3(t) - q^2(t)\right) - 4.33680868994202 \cdot 10^{-19} \cos\left(q^5(t) + \frac{\pi}{2} - 2 q^4(t) + q^3(t) + q^2(t)\right) \\
& + 4.33680868994202 \cdot 10^{-19} \cos\left(q^5(t) + \frac{3\pi}{2} - 2 q^4(t) - q^3(t) - q^2(t)\right) + 0.00006800000000 \cos\left(-q^4(t) + \frac{3\pi}{2} \right. \\
& \left. + 2 q^5(t) + q^3(t) + q^2(t)\right) - 0.0000680000000000403 \cos\left(2 q^4(t) - q^3(t) - q^2(t) + \frac{\pi}{2}\right) \\
& - 2.77555756156289 \cdot 10^{-17} \cos\left(-q^2(t) + \frac{\pi}{2} - 2 q^4(t) + q^3(t)\right) + 0.00003400000000 \cos\left(2 q^5(t) + \frac{5\pi}{2} + 2 q^4(t) \right. \\
& \left. - q^3(t) - q^2(t)\right) + 0.0000680000000000125 \cos\left(-2 q^4(t) - q^3(t) - q^2(t) + \frac{\pi}{2}\right) - 0.002755000000 \cos\left(q^5(t) + \frac{\pi}{2} \right. \\
& \left. + q^3(t) + q^2(t) - q^4(t)\right) \ddot{q}^2(t) + \left(-0.002755000000 \cos\left(q^5(t) + \frac{\pi}{2} + q^3(t) + q^2(t) - q^4(t)\right) \right. \\
& \left. - 2.77555756156289 \cdot 10^{-17} \cos\left(-q^2(t) + \frac{\pi}{2} - 2 q^4(t) + q^3(t)\right) - 4.33680868994202 \cdot 10^{-19} \cos\left(q^5(t) + \frac{\pi}{2} - 2 q^4(t) \right. \right. \\
& \left. \left. + q^3(t) + q^2(t)\right) + 2.77555756156289 \cdot 10^{-17} \cos\left(-q^2(t) + \frac{\pi}{2} + 2 q^4(t) + q^3(t)\right) + 0.002755000000 \cos\left(q^5(t) \right. \right. \\
& \left. \left. + \frac{3\pi}{2} - q^3(t) - q^2(t) + q^4(t)\right) + 0.00006800000000 \cos\left(-q^4(t) + \frac{3\pi}{2} + 2 q^5(t) + q^3(t) + q^2(t)\right) \right. \\
& \left. - 0.002755000000 \cos\left(q^5(t) + \frac{3\pi}{2} - q^3(t) - q^2(t) - q^4(t)\right) + 0.0000679999999999847 \cos\left(-2 q^4(t) - q^3(t) \right. \right. \\
& \left. \left. - q^2(t) + \frac{\pi}{2}\right) - 0.0000679999999999847 \cos\left(2 q^4(t) - q^3(t) - q^2(t) + \frac{\pi}{2}\right) + 4.33680868994202 \cdot 10^{-19} \cos\left(2 q^4(t) \right. \right. \\
& \left. \left. + \frac{\pi}{2} + q^5(t) + q^3(t) + q^2(t)\right) + 0.00006800000000 \cos\left(-q^4(t) + \frac{5\pi}{2} + 2 q^5(t) - q^3(t) - q^2(t)\right) \right. \\
& \left. + 0.002755000000 \cos\left(q^5(t) + \frac{\pi}{2} + q^3(t) + q^2(t) + q^4(t)\right) + 0.00003400000000 \cos\left(2 q^5(t) + \frac{3\pi}{2} - 2 q^4(t) \right. \right. \\
& \left. \left. + q^3(t) + q^2(t)\right) - 0.00003400000000 \cos\left(-2 q^4(t) + 2 q^5(t) + \frac{5\pi}{2} - q^3(t) - q^2(t)\right) \right. \\
& \left. - 4.33680868994202 \cdot 10^{-19} \cos\left(2 q^4(t) - q^3(t) - q^2(t) + \frac{3\pi}{2} + q^5(t)\right) + 4.33680868994202 \cdot 10^{-19} \cos\left(q^5(t) + \frac{3\pi}{2} \right. \right. \\
& \left. \left. - 2 q^4(t) - q^3(t) - q^2(t)\right) - 0.00003400000000 \cos\left(2 q^4(t) + 2 q^5(t) + \frac{3\pi}{2} + q^3(t) + q^2(t)\right) \right. \\
& \left. + 0.00003400000000 \cos\left(2 q^5(t) + \frac{5\pi}{2} + 2 q^4(t) - q^3(t) - q^2(t)\right) - 0.00006800000000 \cos\left(2 q^5(t) + \frac{3\pi}{2} + q^4(t) \right. \right. \\
& \left. \left. + q^3(t) + q^2(t)\right) - 0.00006800000000 \cos\left(2 q^5(t) + \frac{5\pi}{2} + q^4(t) - q^3(t) - q^2(t)\right) \right) \ddot{q}^3(t) + \left(
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -0.0027550000000000 \cos\left(q^5(t) + \frac{\pi}{2} + q^3(t) + q^2(t) - q^4(t)\right) - 0.0026100000000000 \sin\left(q^5(t) + \frac{\pi}{2} - q^4(t) \right. \\
& \left. + q^2(t)\right) - 0.0010150000000000 \sin(q^5(t) + \pi - q^4(t)) - 0.0026100000000000 \sin\left(q^5(t) + \frac{3\pi}{2} + q^4(t) - q^2(t)\right) \\
& + 0.0027550000000000 \cos\left(q^5(t) + \frac{3\pi}{2} - q^3(t) - q^2(t) - q^4(t)\right) + 0.00013600000000 \cos\left(2q^5(t) + \frac{3\pi}{2} + q^3(t) \right. \\
& \left. + q^2(t)\right) + 0.00013600000000 \cos\left(2q^5(t) + \frac{5\pi}{2} - q^3(t) - q^2(t)\right) - 0.0026100000000000 \sin\left(q^5(t) + \frac{\pi}{2} + q^4(t) \right. \\
& \left. + q^2(t)\right) - 0.0026100000000000 \sin\left(q^5(t) + \frac{3\pi}{2} - q^4(t) - q^2(t)\right) - 0.1121800000 \cos\left(-q^3(t) - q^2(t) + \frac{\pi}{2}\right) \\
& + 0.00006800000000 \cos\left(2q^5(t) + \frac{3\pi}{2} + q^4(t) + q^3(t) + q^2(t)\right) - 0.00006800000000 \cos\left(2q^5(t) + \frac{5\pi}{2} + q^4(t) \right. \\
& \left. - q^3(t) - q^2(t)\right) + 0.00006800000000 \cos\left(-q^4(t) + \frac{3\pi}{2} + 2q^5(t) + q^3(t) + q^2(t)\right) - 0.00006800000000 \cos\left(\right. \\
& \left. -q^4(t) + \frac{5\pi}{2} + 2q^5(t) - q^3(t) - q^2(t)\right) - 0.0010150000000000 \sin(q^5(t) + \pi + q^4(t)) \\
& - 0.0027550000000000 \cos\left(q^5(t) + \frac{\pi}{2} + q^3(t) + q^2(t) + q^4(t)\right) + 0.0027550000000000 \cos\left(q^5(t) + \frac{3\pi}{2} - q^3(t) \right. \\
& \left. - q^2(t) + q^4(t)\right) \ddot{q}^4(t) + \left(0.0026100000000000 \sin\left(q^5(t) + \frac{\pi}{2} - q^4(t) + q^2(t)\right) \right. \\
& \left. - 0.0026100000000000 \sin\left(q^5(t) + \frac{\pi}{2} + q^4(t) + q^2(t)\right) - 0.001001000000 \cos\left(q^4(t) - q^3(t) - q^2(t) + \frac{\pi}{2}\right) \right. \\
& \left. + 0.001001000000 \cos\left(-q^4(t) - q^3(t) - q^2(t) + \frac{\pi}{2}\right) - 0.0026100000000000 \sin\left(q^5(t) + \frac{3\pi}{2} + q^4(t) - q^2(t)\right) \right. \\
& \left. - 0.0027550000000000 \cos\left(q^5(t) + \frac{3\pi}{2} - q^3(t) - q^2(t) - q^4(t)\right) + 0.0026100000000000 \sin\left(q^5(t) + \frac{3\pi}{2} \right. \right. \\
& \left. \left. - q^4(t) - q^2(t)\right) + 0.0010150000000000 \sin(q^5(t) + \pi - q^4(t)) + 0.0027550000000000 \cos\left(q^5(t) + \frac{\pi}{2} + q^3(t) \right. \right. \\
& \left. \left. + q^2(t) - q^4(t)\right) - 0.0027550000000000 \cos\left(q^5(t) + \frac{\pi}{2} + q^3(t) + q^2(t) + q^4(t)\right) \right. \\
& \left. + 0.0027550000000000 \cos\left(q^5(t) + \frac{3\pi}{2} - q^3(t) - q^2(t) + q^4(t)\right) - 0.0010150000000000 \sin(q^5(t) + \pi + q^4(t)) \right) \\
& \ddot{q}^3(t) + \left(0.00036450000000 \cos\left(q^5(t) + \frac{\pi}{2} + q^3(t) + q^2(t) - q^4(t)\right) - 0.00036450000000 \cos\left(q^5(t) + \frac{3\pi}{2} - q^3(t) \right. \right. \\
& \left. \left. - q^2(t) + q^4(t)\right) + 0.00072900000000 \cos\left(q^5(t) + \frac{\pi}{2} + q^3(t) + q^2(t)\right) + 0.00072900000000 \cos\left(q^5(t) + \frac{3\pi}{2} - q^3(t) \right. \right. \\
& \left. \left. - q^2(t)\right) + 0.00036450000000 \cos\left(q^5(t) + \frac{\pi}{2} + q^3(t) + q^2(t) + q^4(t)\right) - 0.00036450000000 \cos\left(q^5(t) + \frac{3\pi}{2} - q^3(t) \right. \right. \\
& \left. \left. - q^2(t) - q^4(t)\right) \right) \ddot{q}^2(t)
\end{aligned}$$

A) Akademik Konferanslarda Sunulan Bildiriler

Abut,T.,Soyguder, S., ve Alli, H., Altı Serbestlik Dereceli Haptik Robotun Performans Analizi, **Tok - Otomatik Kontrol Türk Milli Komitesi,** Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, Kocaeli Üniversitesi, 10-13 Ekim - Kocaeli, 2014.

Abut,T. ve ,Soyguder, S., Sanal Gerçeklik Tabanlı Teleoperasyon Sisteminde Hareket Kontrolü **Siu – 23. Sinyal İşleme Ve İletişim Uygulamaları Kurultayı,** İnönü Üniversitesi, 16-19 Mayıs- Malatya, 2015.

Abut,T.,Soyguder, S., ve Alli, H., Gerçek Zamanlı Altı Serbestlik Dereceli Haptik Robot ile Sanal Robotun Teleoperasyonu ,Umts - 17. **Ulusal Makina Teorisi Sempozyumu,** İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü İyte, 14 -17 Haziran - İzmir, 2015.

ÖZGEÇMİŞ

Tayfun ABUT, 1988 yılında doğdu. İlk ve orta öğrenimini Van'da tamamladıktan sonra 2008 yılında Fırat Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünü kazandı. Mezun olduğu 2012 yılında Yüksek Lisans eğitimine Fırat Üniversitesi, Makine Mühendisliği, Makine Teorisi ve Dinamiği ABD 'da yapmaya başladı. 2014 yılında Muş Alparslan Üniversitesi Makine Mühendisliği Makine Teorisi ve Dinamiği ABD 'a araştırma görevlisi olarak çalışmaya başladı ve halen görevini sürdürmektedir.