İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

6 SERBESTLİK DERECELİ İNSANSI ROBOT KOLU EMPEDANS KONTROLÜ BENZETİMİ VE ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hülya ERASLAN

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Mekatronik Mühendisliği Programı

OCAK 2017

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

6 SERBESTLİK DERECELİ İNSANSI ROBOT KOLU EMPEDANS KONTROLÜ BENZETİMİ VE ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hülya ERASLAN
(518131026)

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Mekatronik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Şeniz ERTUĞRUL

OCAK 2017

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 518131026 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Hülya ERASLAN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "6 SERBESTLİK DERECELİ İNSANSI ROBOT KOLU EMPEDANS KONTROLÜ BENZETİMİ VE ANALİZİ" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Şeniz ERTUĞRUL** .....
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Zeki Yağız BAYRAKTAROĞLU** .....
İstanbul Teknik Üniversitesi

Yard. Doç. Dr. Janset DAŞDEMİR .....
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 25 Kasım 2016
Savunma Tarihi : 3 Ocak 2016

Aileme,

ÖNSÖZ

Bu tezin hazırlanma aşamasında öncelikle desteklerini benden esirgemeyen, ilk tanıdığım günden bu yana güleryüzlü, iyi niyetli, anlayışlı bakış açısıyla motivasyonumu sağlayan, bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan çok değerli Prof.Dr. Şeniz ERTUĞRUL hocama teşekkürlerimi sunmak isterim.
Her zaman önceliğini çocuklarına veren, onları daha iyi şartlarda yetiştirmek, eğitmek için elinden geleni yapan canım anneme; sevgisini, ilgisini, desteğini her daim yanımda hissettiğim, hayata bakışıyla beni kendine hayran bırakan, sevgi dolu, hayatımın ilk erkeği canım babama ve her biri birbirinden değerli kalbimde apayrı yerlere sahip, bana dünyanın en güzel duygularından olan teyzeliği çoğu kez tattıran canım ablalarıma çok teşekkür ederim.
İki yıldır aynı odada uyumla çalıştığımız, iş arkadaşlığının en güzel örneği değerli arkadaşım Burak BOYACIOĞLU' na, bilgisi ve tecrübesini esirgemeyen, yönlendirmeleri ve verdiği fikirlerle bana destek olan değerli arkadaşım Cihat Bora YİĞİT' e ve arkadaşım Dila TÜRKMEN' e teşekkürlerimi sunarım.
Son olarak tezim süresince, anlayışı ve sabrıyla yanımda olup, bana destek olan sevgili arkadaşım Ahmet GÜLTEKİN' e teşekkürlerimi sunmak istiyorum.

Ocak 2017

Hülya Eraslan
(Mekatronik Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **vii**
İÇİNDEKİLER ..... **ix**
KISALTMALAR ..... **xi**
SEMBOLLER ..... **xiii**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xv**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xvii**
ÖZET ..... **xix**
SUMMARY ..... **xxi**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Tezin Amacı 2
1.2 Literatür Araştırması 2
1.2.1 Katılık kontrolü 3
1.2.2 Empedans kontrol 5
1.2.3 Admitans Kontrol 6
1.2.4 Hibrit konum /kuvvet kontrolü 7
1.2.5 Hibrit empedans kontrol 9
1.2.6 Belirgin(Explicit) Kuvvet Kontrolü 10
1.2.7 Dolaylı(Implicit) Kuvvet Kontrolü 10
1.3 I-TECH İnsansı Robot Kolu Tanıtımı 12
1.4 Hipotez 13
2. I-TECH İNSANSI ROBOT KOLU MODELLENMESİ **15**
2.1 Kinematik Model 15
2.1.1 İleri kinematik çözüm 16
2.1.2 Denavit-Hartenberg parametreleri belirlenmesi 16
2.1.2.1 I-TECH robot koluna ait eksen takımları ve D-H parameterleri 18
2.1.3 Dönüşüm matrisi hesabı 19
2.1.4 Jakobiyen matrsinin hesaplanması 21
2.1.4.1 I-TECH robot kolu jakobiyen matrisi hesabı 23
2.1.5 Ters jakobiyen elde edilmesi 25
2.1.6 Sözde(Pseudo) ters jakobiyen 27
2.1.7 Jakobiyen Transpoze 29
2.2 Dinamik Model 30
3. EMPEDANS KONTROL ALGORİTMALARI **31**
3.1 Aktif Empedans Kontrol Yöntemi 31
3.1.1 Tek serbestlik dereceli sistemler için aktif empedans yöntemi 32
3.1.2 Birden çok serbestlik dereceli sistemler için aktif empedans yöntemi 34
3.2 Temel Empedans Kontrol 37
3.3 Konum Tabanlı Empedans Kontrol 38
4. I-TECH EMPEDANS KONTROL BENZETİM ÇALIŞMALARI **41**

4.1 Robot Kolu Simulink Modeli 41
4.2 Temel Empedans Kontrol Benzetimi 42
4.2.1 Katılık(Stiffness) ve sönüm(damping) katsayılarının belirlenmesi 43
4.2.2 Benzetim sonuçları 45
4.2.3 Kontrolcü katsayıları analizi 54
4.2.4 Bozucu etkisi analizi 57
4.3 Nelder-Mead Optimizasyon Yöntemi 62
4.3.1 Optimizasyonlu benzetim sonuçları 62
4.3.2 Sisteme bozuculu dahil edilen kontrolcü katsayı optimizasyonu 65
5. SONUÇ VE ÖNERİLER 69
KAYNAKLAR 73
ÖZGEÇMİŞ 81

KISALTMALAR

D-H	**:** Denavit-Hartenberg
kg	**:** kilogram
mm	**:** milimetre
mNm	**:** milinewton metre
Nm	**:** Newton metre
PD	**:** Proportional Derivative
PI	**:** Proportional Integral
PID	**:** Proportional Integral Derivative
RMS	**:** Root Mean Square
SD	**:** Serbestlik Derecesi

SEMBOLLER

$\mathbf{A}$	: Mekanik admitans
$\mathbf{B}$	: Viskoz sönüm matrisi
$\mathbf{C}$	: Coriolis ve merkezcil momentler vektörü
$\mathbf{D}$	: Sönüm matrisi
$\mathbf{D_d}$	: Arzu edilen sönüm matrisi
$\mathbf{d_a}$	: Sönüm katsayısı
$\mathbf{d_c}$	: Cismin sönüm katsayısı
$\mathbf{d_d}$	: Arzu edilen sönüm katsayısı
$\mathbf{E}$	: Young modülü
$\mathbf{e}$	: Hata vektörü
$\mathbf{F_D}$	: Arzu edilen temas kuvveti
$\mathbf{F_{harici}}$	: Harici kuvvet
$\mathbf{f_u}$	: Uygulanan kuvvet
$\mathbf{g}$	: Agırlık kuvvetleri vektörü
$\mathbf{h_N}$	: Eklem uzayında tanımlanan coriolis, merkezkaç kuvveti vd. etkiler
$\mathbf{h_y}$	: Eylem uzayında tanımlanan coriolis, merkezkaç kuvveti vd. etkiler
$\mathbf{J}$	: Jakobiyen matrisi
$\mathbf{J_A}$	: Sözde(pseudo) ters jakobiyen
$\mathbf{J_y}$	: Eylem uzayında tanımlı jakobiyen
$\mathbf{J^T}$	: Jakobiyen transpoze matrisi
$\mathbf{J^{-1}}$	: Ters jakobiyen matrisi
$\mathbf{K}$	: Katılık matrisi
$\mathbf{K_d}$	: Arzu edilen esneklik matrisi
$\mathbf{K_E}$	: Kuvvet uygulayan cismin katılık katsayısı
$\mathbf{K_{F1}}$	: Katılık kontrolcü katsayısı
$\mathbf{K_{F2}}$	: Sönümleme kontrolcü katsayısı
$\mathbf{K_P}$	: Oransal kontrolcü katsayısı
$\mathbf{K_r}$	: Eklem katılık(stiffness) değeri
$\mathbf{K_V}$	: Türevsel kontrolcü katsayısı
$\mathbf{k_a}$	: Esneklik katsayısı
$\mathbf{k_c}$	: Cismin esneklik katsayısı
$\mathbf{k_d}$	: Arzu edilen esneklik katsayısı
$\mathbf{L_A}$	: Üst kol uzunluğu
$\mathbf{L_E}$	: Uç eyleyici uzunluğu
$\mathbf{L_F}$	: Alt kol uzunluğu
$\mathbf{M}$	: Eylemsizlik matrisi
$\mathbf{M_d}$	: Arzu edilen atalet matrisi
$\mathbf{m_a}$	: Kütle
$\mathbf{m_d}$	: Arzu edilen atalet katsayısı
$\mathbf{p_i^{i-1}}$	: Ötelenme matrisi
$\mathbf{P_{yd}}$	: x-eksenindeki referans konum
$\mathbf{P_{yd}}$	: y-eksenindeki referans konum

$\mathbf{P_{yd}}$	: z-eksenindeki referans konum
$\mathbf{P_{xo}}$	: Uç eyleyici x-eksenindeki konumu
$\mathbf{P_{yo}}$	: Uç eyleyici y-eksenindeki konumu
$\mathbf{P_{zo}}$	: Uç eyleyici z-eksenindeki konumu
$\mathbf{q}$	: Eklem değişken vektörü
$\dot{\mathbf{q}}_{\mathbf{i}}$	: i numaralı eklem değişkeninin zamana göre birinci türevi
$\mathbf{R}_{\mathbf{i}}^{\mathbf{i-1}}$	: Dönme matrisi
$\mathbf{S}$	: Uyum seçim matrisi
$\mathbf{T}$	: Dönüşüm matrisi
$\mathbf{T}_{\mathbf{i}}^{\mathbf{i-1}}$	: i. eksen takımından (i-1). eksen takımına dönüşüm matrisi
$\boldsymbol{\tau}$	: Net eklem momenti vektörü
$\boldsymbol{\tau}_{\mathbf{f}}$	: Kuvvet kontrollü eklem moment vektörü
$\boldsymbol{\tau}_{\mathbf{p}}$	: Konum kontrollü eklem moment vektörü
$\mathbf{V(e)}$	: Lyapunov hata fonksiyonu
$\boldsymbol{\omega}_{\mathbf{n}}$	: Doğal frekans
$\boldsymbol{\omega}_{\mathbf{r}}$	: Rezonans modundaki frekans
$\mathbf{X_d}$	: Arzu edilen hareket referansı
$\dot{\mathbf{X}}_{\mathbf{d}}$	: Arzu edilen konumun türevi
$\mathbf{X_{pi}}$	: Konum altuzayındaki modifiye edilmiş konum yörüngesi
$\mathbf{X_{fi}}$	: Kuvvet altuzayındaki modifiye edilmiş kuvvet yörüngesi
$\mathbf{x_i}$	: i bileşenine ait eksen takımı x ekseni
$\mathbf{y}$	: Eylem uzayındaki konum vektörü
$\mathbf{y_d}$	: Arzu edilen konum vektörü
$\mathbf{Z_m}$	: Mekanik empedans
$\mathbf{Z_{mp}}$	: Konum altuzayındaki arzu edilen mekanik empedans
$\mathbf{Z_{mf}}$	: Kuvvet altuzayındaki arzu edilen mekanik empedans
$\boldsymbol{\alpha}_{\mathbf{i-1}}$	: Z_{i-1}'den Z_i'ye X_i ekseni etrafında ölçülen açı
$\mathbf{a}_{\mathbf{i-1}}$	: Z_{i-1}'den Z_i'ye Xi ekseni boyunca ölçülen uzaklık
$\mathbf{d_i}$	: X_{i-1}'den X_i'ye Z_i ekseni boyunca ölçülen uzaklık
$\boldsymbol{\theta}_{\mathbf{i}}$	: X_{i-1}'den X_i'ye Z_i ekseni etrafında ölçülen açı
$\boldsymbol{\theta}_{\mathbf{i}}$	: i numaralı eklem değişkeninin radyan cinsinden açısal değeri
$\boldsymbol{\xi}$	: Sönüm oranı
$\Delta\mathbf{P_x}$	: x-eksenindeki konum hatası
$\Delta\mathbf{P_y}$	: y-eksenindeki konum hatası
$\Delta\mathbf{P_z}$	: z-eksenindeki konum hatası
$\mathbf{s\theta}$	: sin(q)
$\mathbf{c\theta}$	: cos(q)
$\boldsymbol{\alpha}$	: Euler açıları, Z ekseni etrafındaki dönme açısı
$\boldsymbol{\beta}$	: Euler açıları, Y ekseni etrafındaki dönme açısı
$\boldsymbol{\gamma}$	: Euler açıları, X ekseni etrafındaki dönme açısı

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Kontrol algoritmaları karşılaştırması **11**
Çizelge 1.2 : Motor ve dişli mekanizmalarına ait özellikler..... **13**
Çizelge 2.1 : I-TECH robot koluna ait D-H parametreleri. **17**
Çizelge 4.1 : Hareketli levha üzerine çember çizdirme görevi deneme yanılma ve optimizasyon yöntemleriyle elde edilen parametrelerle ortalama konum hataları. **70**

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Aktif katılık kontrolü(1. tür), Zeng ve Hemami(1997)' den uyarlanmıştır.**4**
Şekil 1.2 : Aktif katılık kontrolü(2. tür),Zeng ve Hemami (1997)' den uyarlanmıştır.**4**
Şekil 1.3 : Temel empedans kontrol, Zeng ve Hemami (1997)' den uyarlanmıştır. ... **5**
Şekil 1.4 : Admitans kontrol, Zeng ve Hemami (1997)' den uyarlanmıştır. **7**
Şekil 1.5 : Yerçekimi kompanzasyonu dahil edilmiş model, Zeng ve Hemami (1997)' den uyarlanmıştır. **8**
Şekil 1.6 : Hibrit konum/kuvvet kontrolü şeması, Zeng ve Hemami (1997)' den uyarlanmıştır. **8**
Şekil 1.7 : Hibrit empedans kontrol, Zeng ve Hemami (1997)' den uyarlanmıştır. **9**
Şekil 1.8 : Belirgin kuvvet kontrolü, Zeng ve Hemami (1997)' den uyarlanmıştır... **10**
Şekil 1.9 : Dolaylı kuvvet kontrolü, Zeng ve Hemami (1997)' den uyarlanmıştır.... **11**
Şekil 1.10 : I-TECH İnsansı Robot Projesi kapsamında üretilen robot kolu görseli…**12**
Şekil 2.1 : Kinematik model geçişleri. **15**
Şekil 2.2 : Denavit-Hartenberg yöntemiyle eksen takımlarının belirlenmesi..... **17**
Şekil 2.3 : I-TECH robot kolu eksen takımları (Türkmen, 2016). **18**
Şekil 2.4 : Ters jakobiyen ile ters kinematik algoritmasının blok şeması(Sciavicco ve Sciliano,1999 uyarlanmıştır). **28**
Şekil 2.5 : Jakobiyen transpozesi ile ters kinematik blok şeması(Sciavicco ve Siciliano, 1999). **29**
Şekil 3.1: Tek serbestlik dereceli sistemde aktif empedans kontrol, Yoshikawa (1990)' dan uyarlanmıştır. **32**
Şekil 3.2 : Sabit bir cisim ile temas olması durumu modeli, Yoshikawa (1990)' dan uyarlanmıştır. **33**
Şekil 3.3 : Birden fazla serbestlik derecesi için aktif empedans yöntemi. **35**
Şekil 3.4 : Empedans kontrol blok diyagramı, Akdoğan(2007)' den uyarlanmıştır.. **37**
Şekil 3.5 : Temel empedans kontrol blok şeması, Zeng ve Hemami (1997)' den uyarlanmıştır. **38**
Şekil 3.6 : Konum tabanlı empedans kontrol bloğu, Zeng ve Hemami (1997)' den uyarlanmıştır. **39**
Şekil 4.1 : Matlab programında robot kolu bir bileşenine ait kütle özellikleri. **42**
Şekil 4.2 : Temel empedans kontrol bloğu. **42**
Şekil 4.3 : Temel empedans kontrol yöntemi ile hareketli levha üzerine çember çizimi üç boyutlu gösterimi. **45**
Şekil 4.4 : Çember çizimi referans girişine karşılık sistem cevabının 2 boyutlu gösterimi. **46**
Şekil 4.5 : Uç eyleyiciye etki eden $Ftemas$ kuvveti. **46**
Şekil 4.6 : Eklemlerdeki açı değerleri değişimi. **47**
Şekil 4.7 : Eklemlerdeki hız değişimleri. **47**
Şekil 4.8 : Uç eyleyici çizgisel ve açısal hızlar **48**
Şekil 4.9 : Referans giriş ve uç eyleyici yörünge karşılaştırmalı gösterimi. **48**

Şekil 4.10 : Referans yönelim girişleri ve uç eyleyici yönelim karşılaştırmalı. **49**
Şekil 4.11 : Levha hareketi varken ortalama konum hata değişimi gösterimi..... **49**
Şekil 4.12 : Ortalama konum hata değişimi gösterimi(Levha hareketsizken)..... **50**
Şekil 4.13 : Levha hareketi referans giriş ölçümüne dahil edilmiş ortalama konum hata grafiği. **50**
Şekil 4.14 : 0-3sn aralığında eklemlere etki eden tork değerleri. **51**
Şekil 4.15 : 3-9sn aralığında eklemlere etki eden tork değerleri. **51**
Şekil 4.16 : Arzu edilen ve uç eyleyici katılık(stiffness) değerleri değişimi..... **52**
Şekil 4.17 : Empedans değişimi grafiği. **52**
Şekil 4.18 : Uç eyleyici empedans değişimi grafikleri. **53**
Şekil 4.19 : Uç eyleyici Y-ekseni hızı. **53**
Şekil 4.20 : Farklı Kp değeri için çember çiziminin üç boyutlu gösterimi..... **54**
Şekil 4.21 : Farklı Kp değeri için çember çiziminin iki boyutlu gösterimi. **54**
Şekil 4.22 : Farklı Kv değeri için çember çiziminin üç boyutlu gösterimi..... **55**
Şekil 4.23 : Farklı Kv değeri için çember çiziminin iki boyutlu gösterimi. **55**
Şekil 4.24 : Farklı $KF1$ değeri için çember çiziminin üç boyutlu gösterimi..... **56**
Şekil 4.25 : Farklı $KF1$ değeri için çember çiziminin iki boyutlu gösterimi. **56**
Şekil 4.26 : Farklı $KF2$ değeri için çember çiziminin üç boyutlu gösterimi..... **57**
Şekil 4.27 : Farklı $KF2$ değeri için çember çiziminin iki boyutlu gösterimi. **57**
Şekil 4.28 : Bozucu etki ettiğinde çember çizimi cevabının üç boyutlu gösterimi. .. **58**
Şekil 4.29 : Bozucu etki ettiğinde çember çizimi cevabının iki boyutta gösterimi. .. **58**
Şekil 4.30 : Bozucu etki eden kontrollü çember çizimi üç boyutlu gösterimi..... **59**
Şekil 4.31 : Bozucu etki eden kontrollü çember çizimi iki boyutlu gösterimi. **59**
Şekil 4.32 : X-Y-Z eksenlerindeki konum hatası. **60**
Şekil 4.33 : Referans girişe levha hareketi dahil edilmiş hata grafiği. **60**
Şekil 4.34 : Referans girişe levha hareketi dahil edilmiş sistem cevabı grafiği. **61**
Şekil 4.35 : Referans girişe levha hareketi dahil edilmiş sistem cevabı iki boyutlu gösterimi. **61**
Şekil 4.36 : Optimize edilmiş parametrelerle çember çizimi üç boyutlu gösterimi. . **63**
Şekil 4.37 : Optimize edilmiş parametrelerle çember çizimi iki boyutlu gösterimi. . **63**
Şekil 4.38 : Referans konum ile uç eyleyici konum fark grafiği. **64**
Şekil 4.39 : Optimize edilmiş parametrelerle yapılan çizimde x-y-z eksenlerindeki konum hata değişimi. **64**
Şekil 4.40 : Bozucu kuvvet etki eden sistemde optimize edilmiş parametrelerle çember çizimi üç boyutlu gösterimi..... **65**
Şekil 4.41 : Bozucu kuvvet etki eden sistemde optimize edilmiş parametrelerle çember çizimi iki boyutlu gösterimi. **66**
Şekil 4.42 : Bozucu giriş dahil edilen optimizasyonlu parametrelerle yapılan çizimde konum hata grafiği..... **66**
Şekil 4.43 : Bozucu giriş dahil edilen optimizasyonlu parametrelerle yapılan çizimde ortalama konum hata grafiği..... **67**
Şekil A.1 : Robot kolu simulink modeli. **78**

6 SERBESTLİK DERECELİ İNSANSI ROBOT KOLU EMPEDANS KONTROLÜ BENZETİMİ VE ANALİZİ

ÖZET

Bu tez çalışması kapsamında 6 serbestlik dereceli bir insansı robot kolu konum ve kuvvet kontrolüne yer verilmiştir. Robotik alanında kullanılan kontrol yöntemleri incelenmiş, insansı robot kolu için yapılması istenebilecek görevler göz önünde bulundurularak en uygun yöntem olan Empedans Kontrol Yöntemi seçilip, belirlenen senaryolar ile benzetim çalışmaları üzerinde analiz edilmiştir.

Robot kol modeli Solidworks programı ile yapılan çizimi SimMechanics araç çubuğu ile Matlab Simulink ortamına aktarılmış, benzetim çalışmaları bu arayüzden yürütülmüştür. Gerçekleştirilme açısından değerlendirilip, en uygun görülen Temel Empedans Kontrol Yöntemi seçilmiştir. Görev olarak çember çizimi tanımlanmış ve robot kolunun hareketli bir levha üzerine çizim yapması istenmiştir. Konum ve kuvvet kontrolü, seçilen Temel Empedans Kontrol Yöntemi ile sağlanmıştır. Bu yöntemde hassas olarak belirlenmesi gereken katılık, sönüm, konum ve hız modifikasyon matrisleri bulunmaktadir. Bunlar kontrolcü katsayılardır. Katsayıların belirlenmesinde öncelikle deneme-yanılma yöntemi kullanılmış ve belli konum hatalarıyla uç eyleyici konum-kuvvet kontrolü gerçekleştirilmiştir.

Temel Empedans Kontrol Yöntemi katılık, sönüm, konum ve hız modifikasyon parametreleri analiz edilmek istenmiştir. Bu parametrelerin katsayı oranları değiştirilerek kontrolcüye etkisi gözlemlenmişir. Bozucu etki dahil edilmemiş sistemde, deneme yanılma yöntemi ile seçilen parametreler üzerinden gidilerek her bir parametre ayrı ayrı değiştirilip çember çizimleri gerçekleştirilerek sistem cevapları incelenmiştir. Parametrelerin artırılıp azaltılmalarının çember çizimi gerçekleşirken konum ve kuvvet kontrolünü hangi ölçüde gerçekleştirdiği analiz edilmiştir.

Konum ve kuvvet kontrolünün daha iyi yapılması için gerekli olan parametreleri iyileştirmek adına bir optimizasyon yöntemi aranmıştır. Matlab kütüphanesinden Nelder-Mead optimizasyon tabanlı komutlar kullanılarak kontrolcü katsayıları iyileştirilmiş ve konum hataları azaltılmıştır.

Bir sonraki aşamada sisteme levha hareketinden farklı bir yönde bozucu etki dahil edilmiştir. Bozucu kuvvet etkisinde yine hareketli levha üzerine çember çizdirme görevi verilerek sistem cevabı incelenmiştir. Sistemin bozucu etkisini karşılayamadığı ve çizilen çemberin bozucu etkisi olduğu süreler boyunca istenilen yörüngeden saptığı tespit edilmiştir. Bozucu etkisini yok etmek için yeni katsayı arayışına gidilmiş, öncelikle deneme-yanılma yöntemi kullanılarak belli konum hatasıyla çember çizimi gerçekleştirilmiştir. Sistem cevabını daha da iyileştirmek için optimizasyon yöntemi uygulanmış ve yeni elde edilen kontrolcü katsayılarıyla daha az hata ile görev gerçekleştirilmiştir.

Böylelikle bu çalışma insansı robot kollarında kontrolcü belirlenirken dikkat edilmesi gereken parametrelere dikkat çekmektedir.

6 DEGREES OF FREEDOM HUMANOID ROBOT ARM IMPEDANCE CONTROL SIMULATION AND ANALYSIS

SUMMARY

In the recent times, robots have many different shapes and features in many areas. Among these, the most advanced and complicated are the humanoid robots. The main purpose of these robots is to achieve the tasks that have been performed in the best possible way with the likeness of human. These tasks are mostly done by the robot arms. For this reason, I-TECH Humanoid Robot project is primarily aimed at realization of a humanoid robot arm.

One of the most important parameters is that the robot can be controlled to perform a desired task. It is essential that position or force control or both should be provided. There are various methods in the field of position and force control in robots and there are many studies about these methods in the literature. The selection of the control system depends on the purpose of the robot and the desired task.

In this thesis study, the position and the force control of a robot arm with 6 degrees of freedom are given. The control methods used in the field of robotics have been examined. The most suitable method has been selected for the humanoid robot arm by considering the tasks that can be done. Robot arm has been modelled using Solidworks® program and the model transferred to the MATLAB® Simulink interface through with SimMechanics toolbox. Simulation studies have been carried out on the Simulink model and the results have been evaluated.

Different methods in the literature are examined to select the controller and the "Impedance Control Method" which may be suitable for a desired task is selected and the simulation works are done. The impedance control is based on the principle of force and position control by adjusting the mechanical impedance which occur with the interaction of the robot arm end effector with the environment. This control takes place with parameters that can adjust the stiffness and damping values. On the basis of this principle, the impedance control method is generally preferred for tasks under the influence of external forces.

I-TECH robot arm is designed as a humanoid robot arm and while the control method is selected, it is considered that the robot will be interacting with the environment-external forces. For this reason, the impedance control method has been chosen and the robot arm has been expected to perform position and force control for the desired task. Drawing a circle is defined as the desired task and the motion of the end effector has been analyzed through some scenarios. Drawing process has been implemented on a plate. It has been assumed that the plate is either stationary or moving. There are 4 main coefficients (K_P, K_V, K_{F1} and K_{F2}) which determine the stiffness, damping, position and velocity modification ratios that should be determined sensitively in the impedance control method. When the coefficients have been determined, trial-and-error method has been used firstly and position-force control has been performed with certain positional errors. The robotic arm could be controlled with (0.0076mm)

position error in the circle plotting task with the coefficients selected by trial-and-error method. It is desired to analyze the stiffness, damping, position and velocity modification parameters of the Basic Impedance Control Method. By changing the coefficient ratios of these parameters, the effect on the controller is observed. Each parameter has been changed separately and the system responses have been examined by performing circle drawings. By increasing or decreasing the parameters, it has been analyzed to what extent the robotic arm position and force control has been performed when the circle task has been performed. The importance of these coefficient selections is emphasized. It is shown that each coefficient matrix is 6 × 6 diagonal matrices and how each parameter affects the control.

An optimization method has been investigated and proposed for making the control more robust. New coefficients are determined by applying certain lower and upper limits and applied on the simulation work, using "fminsearch" command which is available in MATLAB® library. The Nelder-Mead is an optimization method that operates on the 'fminsearch' command infrastructure is explained in the thesis. Stiffness, damping, position and velocity modification coefficients have been improved and the circle drawing task has been performed again. The average position error reduces to 0.0013mm.. The results obtained with the optimized parameters are better than those obtained with the parameters determined by the trial and error method. The position error is reduced by about 6 times.

In the desired task, only unidirectional force is applied to the robot arm end effector due to the plate motion. In the next stage, a different disturbance force has been applied and the circle task has been drawn again on the moving plate and the system response has been examined. The disturbance force is given in the range of 0-3 sec and the effect of the disturbance force is observed in the circle drawing made with the controller parameters which is determined without the disturbance effect. It has been determined that the controller has not been able to compensate for the system's disturbance effect. The desired trajectory has been detected during the period in which the system failed to compensate for the disturbing effect and had a destructive effect on the drawn circle. The stiffness, damping, position and velocity modification coefficients did not compensate for the disturbing effect and the trajectory error. This shows us that we need to make more precise control under different force effects. In order to eliminate the disturbance effect, new coefficients have been investigated and the circle drawing has been performed with certain position error using trial-and-error method. The average value of the position error was 0.2763mm. An optimization method has been applied to further improve the system response and the task has been performed with fewer errors with the newly obtained controller coefficients. The average position error is calculated as 0.0088 in the results obtained with the optimized parameters. In this case, the sensitivity of the controller has been increased 30 times by the optimization method.

Simulation studies show us how precise the stiffness and damping ratio should be when performing force and position control with the impedance control. The small changes in the parameters affect the robot arm control in a large extent. In addition, there are 24 variables in the matrix (K_P, K_V, K_{F1} and K_{F2}), which determine the stiffness, damping, modification of position and velocity, each of which is 6x6 diagonal matrices and these variables influence each other. The trial and error method takes a long time while 24 variable matrix values are determined and there is a possibility that it cannot give sufficient accuracy. For this reason, it has been shown that better results can be obtained by using an optimization method. Obviously,

position error rates are reduced in the control with optimized parameters. This showed us the necessity of optimization method.

Hybrid Impedance Control can be performed by including a separate force control in the system when the impedance control is performed. Hybrid Impedance Control allows the robotic system to gain more flexibility when determining the impedance. In this sense, hybrid impedance control is a method that can be applied in tasks where a separate force orbit is required to be monitored in future studies.

I-TECH Humanoid Robot Project aims to design and produce a second arm. In this case, it is necessary to control the arms while interacting with each other in the tasks to be carried out with the two arms. There are numerous studies which use double arms in the literature and impedance control is applied based on the same principle as it is in robots interacting with humans. In this sense, this thesis study constitutes the infrastructure for the future work to be done within the scope of the project.

1. GİRİŞ

İnsanlar kendilerine zor gelen işleri kolaylaştırmak veya yapamayacağı işleri yaptırmak için çeşitli yollar aramışlardır. Başlarda sömürebilecekleri insan gücünü kullanmışlardır. İnsan gücünün verimsiz ya da yetersiz kaldığı işlerle başetmek için ise ihtiyaçlar doğrultusunda çeşitli araç ve gereçler geliştirmeyi akıl etmişlerdir. Robotlar bu ihtiyaçları giderebilecek en gelişmiş araçlardır. İlk defa Çekoslovak yazar Karel Capek Rossum tarafından kullanılan "Robot" kelimesi de, Çekoslovakça' da "zorla çalıştırılan işçi" anlamına gelmektedir. Robot kelimesinin kökenine indiğimizde bile temel amacının insana hizmet etmek olduğunu anlamaktayız.

Robotlar günümüzde birçok alanda değişik şekil ve özelliklerde karşımıza çıkabilmektedirler. Bunların arasında en gelişmiş ve karmaşık olanları ise insansı robotlardır. Bu robotlarda temel amaç, insana benzetilmekle birlikte hedeflenen görev/leri en iyi şekilde yerine getirtmektir. Bu görevler çoğunlukla kollar tarafından yapılmaktadır. Bu nedenle I-TECH İnsansı Robot projesinde öncelikle robot kolu gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir.

Robotun istenen işlevi yerine getirebilmesi için gerekli olan en önemli parametrelerden biri iyi kontrol edilebilmesidir. Temel olarak konum veya kuvvet kontrolünün sağlanması gerekmektedir. Robotlarda konum ve kuvvet kontrolü alanında çeşitli yöntemler vardır ve literatürde bu yöntemler ile ilgili çok sayıda çalışmalar bulunmaktadır. Kontrol sisteminin seçimi robotun kullanım alanına, yapacağı işe göre değişmektedir. Manipülatörün çevre ile temasının zayıf olduğu sprey boyama, kaynak, paletleme gibi görevlerde konum kontrol yöntemleri yeterli olabilmektedir(Hogan, 1985-1987; Mills ve Goldenberg, 1989). Ancak manipülatörün çevre ile etkileşiminin daha güçlü olması gerektiği montaj, boyama, taşlama, çapak alma, medikal operasyonlar gibi görevleri kontrol etmek daha zordur. Bu tür görevler kuvvet kontrolü de gerektirmektedir(Hogan, 1985; Kazerooni ve diğ. 1986; De Shutter ve Van Brussel, 1988).

Bu tez çalışması kapsamında kontrol yöntemleri öncelikle genel olarak incelenip, dış çevre veya insan etkileşimi dahil olduğunda gerekli olan konum ve kuvvet kontrolünü birlikte sağlayacak en uygun yöntem olan Empedans Kontrol Yöntemi üzerinde durulacaktır. Belli bir görev verilip, seçilen kontrol yöntemi uygulanarak konum ve kuvvet kontrolü sağlanıp sistem cevabı incelenecektir. Elde edilen sonuçları iyileştirmek için çözümler arayıp, uygulayarak öneriler sunulup literatüre katkıda bulunulmaya çalışılacaktır.

1.1 Tezin Amacı

Bu tezin amacı, robotlarda kontrol yöntemlerini incelemek ve çevre veya insan etkileşimli görevlerin en verimli şekilde gerçekleştirilmesi için gerekli olan konum ve kuvvet kontrolünü sağlayacak en uygun kontrolcünün belirlenmesine katkıda bulunmaktır.

Robotlarda konum ve kuvvet kontrolü sağlamak için çok sayıda kontrol yöntemi vardır. Herbirinin farklı görevler için avantajları-dezavantajları mevcuttur. Önemli olan hangi görev için hangi yöntemin seçileceğidir. Bu anlamda, bu tez çalışmasında araştırılacak yöntemler belli görevler için uygun kontrol yöntemi seçimine ışık tutacaktır.

I-TECH İnsansı Robot projesi kapsamında üretimi gerçeklşetirilen robot kolunun, insan ya da çevre etkileşimli görevlerde konum ve kuvvet kontrolünü gerçekleştirmek için Empedans Kontrol Yöntemi seçilerek farklı senaryolar üzerinde benzetim çalışmaları yapılıp kontrolcü değişkenleri analiz edilerek iyileştirilmeye çalışılmıştır.

1.2 Literatür Araştırması

Robotlar kullanım alanlarında çevre ya da insanla etkileşimde olduklarından konum ve kuvvet kontrolüne ihtiyaç duyulmaktadır. Literatüre baktığımızda çeşitli konum/kuvvet kontrol algoritmaları bulunmaktadır. Temel olarak kuvvet kontrol algoritmaları, uygulanan kuvvet ve konum arasındaki ilişkiye göre ya da uygulanan kuvvet hız ilişkisine veya doğrudan kuvvet geri beslemeli kontrol ve türevleri olarak kategorilendirilebilir.

Robot kuvvet kontrolündeki temel amaç, kuvvetler arasındaki etkileşimin nasıl tanımlanacağını belirlemek ve istenilen kuvvet ile hareket sürdürülebilsin diye etkili geri besleme sinyalini kullanarak uygun olan giriş sinyalini kontrol etmektir.

Kuvvet kontrolünde temel değişkenler konum, hız, ivme ve kuvvettir. Mevcut temel kuvvet kontrol algoritmalarındaki farklılıklar bu değişkenleri ve aralarındaki ilişkileri ifade ederken farklı şekillerde yapılmasından kaynaklanmaktadır.

Konum ve uygulanan kuvvet arasındaki ilişkiyi içeren yöntemlerin başında katılık kontrolü gelmektedir. Katılık kontrolü sadece konum geri beslemesiyle yapılabildiği gibi kuvvet geri beslemesiyle de yapılabilmektedir.

1.2.1 Katılık kontrolü

Robota istediğimiz görevi yaptırmak için uç eyleyicinin işi yaptırabileceğimiz gerekli katılıkta olması gerekir. Uç eyleyicinin katılığı eklemlerin katılığına bağlıdır. Robot eklemlerindeki katılık ayarlandığında uç eyleyici de istediğimiz katılık değerinde olacaktır. Böylece arzu edilen yörünge takip edilirken, arzu edilen kuvvet uygulanabilir.

Konum kontrolünün iyi yapılabilmesi için uç eyleyicinin, robotun dinamik ve dış kuvvetlerini etkisiz hale getirecek oldukça katı bir kontrole ihtiyacı vardır. Bu katılık geri besleme kazancıyla sağlanır. Sistemin modeline bağlı olarak katılık sınırı belirlenir (Vukobratovic ve Stokic, 1989).

Kuvvet kontrolü konum kontrolünün aksine sistem katılığının olabildiğince düşük olmasını ister. Eklem katılığının azalıyor olması uç eyleyicinin uygun kuvvet kontrolünü gerçekleştirecek düşük sertliğe sahipmiş gibi davranmasını sağlayacaktır.

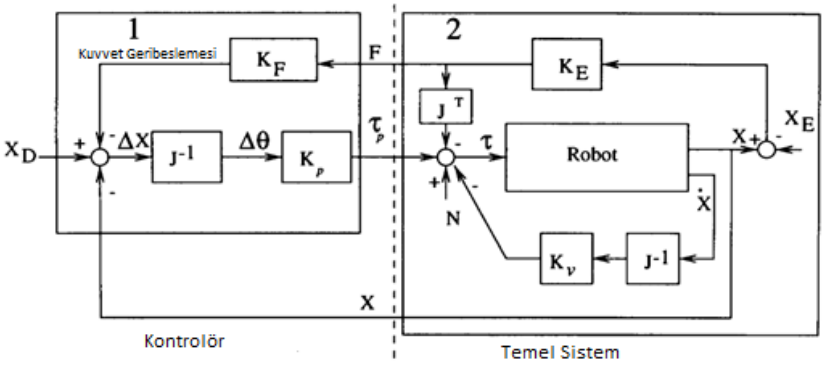
Katılık kontrolünün temel amacı belirli görevler için uç eyleyicinin sertliğini kontrol etmektir. Uç eyleyicinin sertliği çevreye uygulayacağı kuvveti belirler. Katılık kontrolü aktif ve pasif olmak üzere iki şekilde yapılır. Pasif kontrolde robot uç eyleyicisi yay ve sönümleyiciden oluşan bir mekanizma gibi davranır (Schiavi ve Bicchi, 2009). Aktif katılık kontrolde farklı olarak, bir kuvvet geribildirimi aracılığıyla kapalı döngü sistemin sertliğini değiştirdiği için programlanabilir bir yay olarak kabul edilebilir (Salisbury, 1980; Roberts ve diğ., 1985; De´goulange ve Dauchez 1994).

Aktif katılık kontrolü ilk versiyonu Şekil 1.1’ de gösterilmiştir. Daha iyi anlaşılması için 1. blok kontrolör, ve 2. blok temel sistem olmak üzere iki kısma bölünmüştür.

Temel sistem, bir robot ve çevresini içermektedir. hız geribeslemesi ve doğrusal olmayan kompanzasyon (robot dinamik sisteminin doğrusallaştırılması için) içerir (N, yerçekimi sürtünme ve merkezcil kuvvetler içeren kompanzasyon vektörüdür).

Birinci blokta kuvvet ve konum geribeslemeleri içeren katılık kontrol döngüsü, temas kuvveti etkisi ile oluşan eklem torklarını τ_p hesaplar. τ_p aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\tau_p = K_p \Delta\theta \tag{1.1}$$



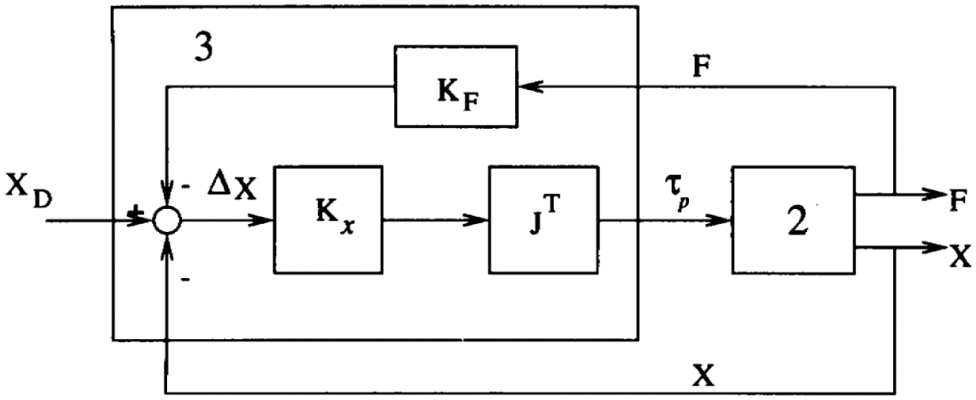
Şekil 1.1 : Aktif katılık kontrolü (birinci tür) , Zeng ve Hemami (1997)' den uyarlanmıştır.

Böylelikle aktif katılık kontrolü, K_p katılık matrisini farklı değerlerde seçerek manipülatörün farklı katılık değerlerinde olmasını sağlar.

Eğer Δx önceden hesaplanmış J^{-1} ile eklem yerdeğiştirmelerine dönüştürülmezse, katılık kontrolü bloğu Şekil 1.2' deki gibi olur.

$$\tau_p = J^T K_x \Delta x \tag{1.2}$$

K_x katılık matrisini temsil eder. $\Delta x = J\Delta\theta$ olduğundan $\tau_p = J^T K_x J \Delta\theta$ olur. Bu durumda $K_p = J^T K_x J$ olur.



Şekil 1.2 : Aktif katılık kontrolü (ikinci tür), Zeng ve Hemami (1997)' den uyarlanmıştır.

1.2.2 Empedans kontrol

Empedans kontrolün temel amacı, uç eyleyici konumu ve uygulanan kuvvet arasında dinamik ilişki kurmaktır. Hogan(1984-1985)' a göre manipülatör kontrol sistemi, sadece hareket yörüngesine göre değil, manipülatörün mekanik empedansına göre düzenlenmelidir. Empedans kontrolde robot kolu uç noktası mekanik empedansının ayarlanması yolu ile kuvvet ve konum kontrolü gerçekleştirilir (Kazerooni, 1989).

Hız $\dot{X}$ ve uygulanan kuvvet F arasındaki ilişki mekanik empedansı Z_m verir. Frekans domeninde aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$F(s) = Z_m(s)\dot{X}(s) \tag{1.3}$$

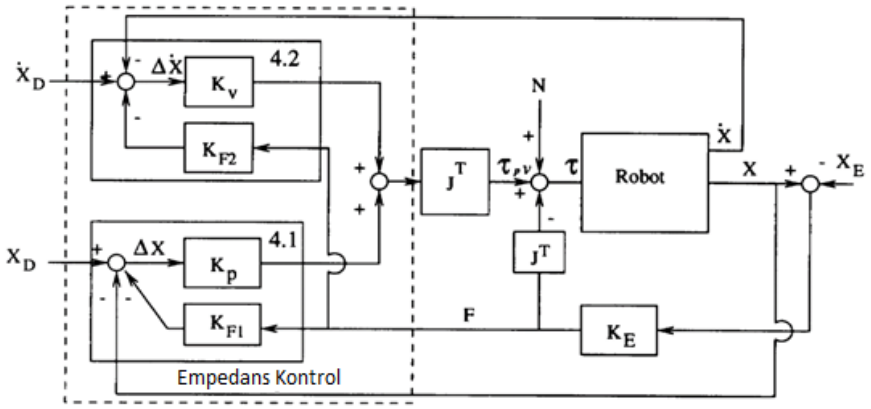
Konum $X(s)$ ifadesi kullanarak yazacak olursak;

$$F(s) = sZ_m(s)X(s) \tag{1.4}$$

Lineer durumlarda, istenen empedans ifadesi aşağıdaki gibidir.

$$sZ_m(s) = Ms^2 + Ds + K \tag{1.5}$$

Denklem(1.5)' te sabit matrislerden M, D ve K sırasıyla arzu edilen eylemsizlik matrisi, sönümleme matrisi ve katılık matrisidir. Bu anlamda empedans, lineer ikinci derece bir sistemin kütle-yay-damper dinamiğini taklit etmektedir. Empedans kontrol ölçülen sinyal türlerine (hız-konum ya da kuvvet) bağlı olarak farklı formlarda karşımıza çıkabilir (De´goulange ve Dauchez 1994; Roberts ve diğ. 1985; Whitney, 1977). Şekil 1.3, uygun bir $Z_m(s)$ değeri belirleyen bir temel empedans kontrol döngüsünün yapısını göstermektedir.



Şekil 1.3 : Temel empedans kontrol, Zeng ve Hemami (1997)' den uyarlanmıştır.

Şekil 1.3 esasında Şekil 1.1'e benzer olup; ek olarak hız üzerine, hız ve temas kuvveti geribeslemesi dahil edilerek başka bir geri bildirim döngüsü oluşturulmuştur. Bu bağlamda empedans kontrol, ölçülen kuvvetlerin konum ve hız için yapılacak değişikliğe neden olduğu oransal ve türevsel bir denetleyicidir. Konum modifikasyonu, ölçülen kuvvetlerin katılık kontrolünde olduğu gibi aynı role sahip K_{F1} matris çarpımıyla elde edilir.

Hız modifikasyonu, ölçülen kuvvetlerin K_{F2} matrisi ile çarpılmasıyla yapılmaktadır. Böylece eklem uzayında hata düzeltme denklemi aşağıdaki şekilde ifade edilir,

$$\tau_{pv} = J^T(K_p \Delta X + K_v \Delta \dot{X}) \tag{1.6}$$

Şekil 1.3'te, kutu 4.2' deki kontrol döngüsü, manipülatör çevre ile temas halindeyken sönüm katsayısını değiştirme imkanı verir. Empedans kontrol normalde bir robotun ortamının sönümleme özelliklerine uyum sağlamasına ihtiyaç duyulduğunda kullanılır.

1.2.3 Admitans Kontrol

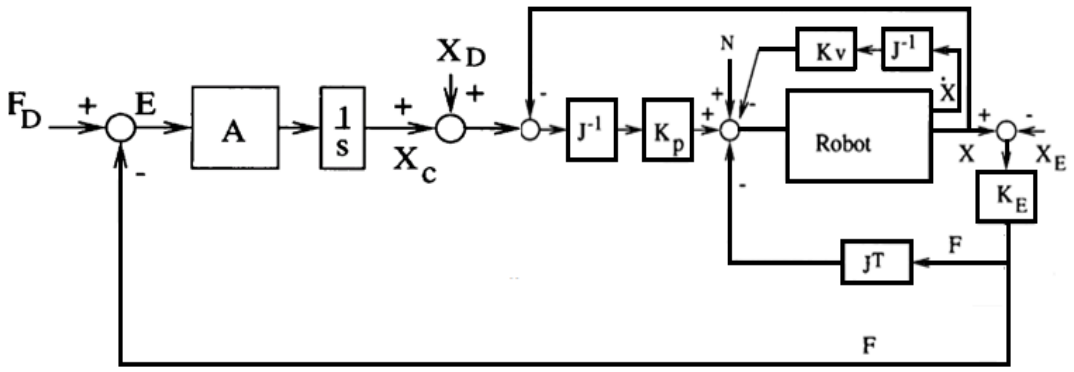
Admitans kontrol, istenilen bir kuvvet değeri ve bu değeri takip edecek bir kuvvet kompanzatörü içerir. Salt konum kontrolünün aksine, referans hareket yörüngesini takip etmek için bozucu kuvvetleri gidermeyi amaçlar, kuvvet kompanzatörü çevresel etkileşime uymaya çalışır ve referans hareket yörüngesini hızlı bir şekilde değiştirerek temas kuvvetlerine çabucak cevap verir (Seraji, 1994).

Mekanik admitans eşitliği denklem (1.7)' deki gibi tanımlanır.

$$A = \frac{\dot{X}}{F} \tag{1.7}$$

Denklem (1.2)'deki empedans tanımının tersidir.

Şekil 1.4 ortak bir admitans kontrolünün yapısını göstermektedir (Zeng ve Hemami, 1997). Şekilde admitans matrisi A, kuvvet hata vektörü E ($E = F_D - F$) uç eyleyici hız bozulmasıyla ilişkilendirir. Bilinen bir çevresel katılık için, küçük ya da sıfır kuvvet hata cevabı, düşük aşım ve hızlı yükselme süresi ile istenen bir kuvvet tepkisi elde etmek için bir A admitans yapılabilir.



Şekil 1.4 : Admitans kontrol, Zeng ve Hemami (1997)' den uyarlanmıştır.

X_c istenilen yörünge aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$X_c = \int A(F_D - F)dt \tag{1.8}$$

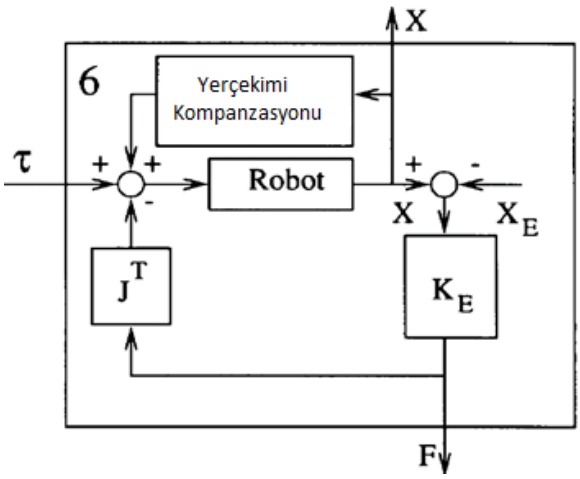
Admitans tanımından, admitans kavramının empedansın tersi olduğunu biliyoruz. Admitansı kullanarak, uyumlu hareket kontrolü altında yatan temel kavram, konum kontrollü robotu temel sistem olarak almak ve belirli görevlerin yürütülmesi için sistemde gerekli admitansı gerçekleştirmektir. Empedans kontrolü ile karşılaştırıldığında, admitans kontrol daha çok arzu edilen kuvvet izleme kontrolüne odaklanmaktadır.

1.2.4 Hibrit konum /kuvvet kontrolü

Hibrit konum/kuvvet kontrolü Raibert ve Craig(1981) tarafından ortaya atılmıştır. Bu kontrolde eklemler için konum/kuvvet kontrolü ayrı ayrı yapılabilir. Kuvvet ve tork bilgisini, yer değiştirme ve kuvvetin belirlediği konum verisi ile birleştirir (Mason, 1981). Hibrit kontrolde hem konum hem de kuvvet kontrolü yapılmaktadır.

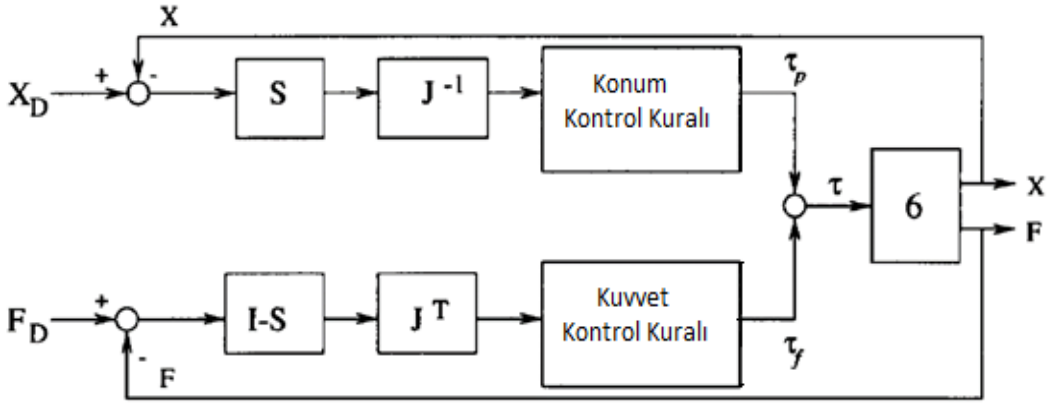
Hibrit konum/kuvvet kontrolünün diğer kontrol çeşitlerine göre avantajı, konum ve kuvvet bilgisini her biri için ayrı ayrı iyi bilinen kontrol tekniklerine göre bağımsız olarak çalıştırıp, son aşamada eklem torklarına dönüştürürken birleştirilmesidir (Fisher ve Mutjaba, 1991). Bu yöntemde uygulanan kuvvet ile uç eyleyicinin konumu arasında sabit bir ilişki olmadığı anlamına gelir. Şekil 1.5' te robot kolu ve çevresini içeren yerçekimi kompansatörü dahil edilmiş kontrol şeması gösterilmektedir.

Şekil 1.5' teki içerik bundan sonra takip eden diğer şekillerde 6 rakamlı kutu olarak verilecektir.



Şekil 1.5 : Yerçekimi kompanzasyonu dahil edilmiş model, Zeng ve Hemami (1997)' den uyarlanmıştır.

Şekil 1.6' da hibrit konum/kuvvet kontrol şeması gösterilmektedir. Hibrit kontrol yönteminin etkinliği ilk olarak Raibert ve Craig(1981) tarafından bir robot kolunda doğrulanmıştır.



Şekil 1.6 : Hibrit konum/kuvvet kontrolü şeması, Zeng ve Hemami (1997)' den uyarlanmıştır.

Şekil 1.6' da, S = diag (s_j) (j = 1 ... n), uyum seçim matrisini, n serbestlik derecesini ifade eder. S matrisi, kontrol edilecek olan kuvvet veya konumun alt uzayını belirler. s_j, 1 veya 0 olarak seçilir. $s_j = 0$ olduğunda, j. serbestlik derecesine ait kuvvet kontrolü, 1 olduğunda konum kontrolü uygulanır. S matrisi bir sabit olabilir ya da konfigürasyon veya zamanla değişen bir değişken olabilir (Fodor ve Tevesz, 1999). Kontrol edilen tork aşağıdaki şekilde tanımlanır.

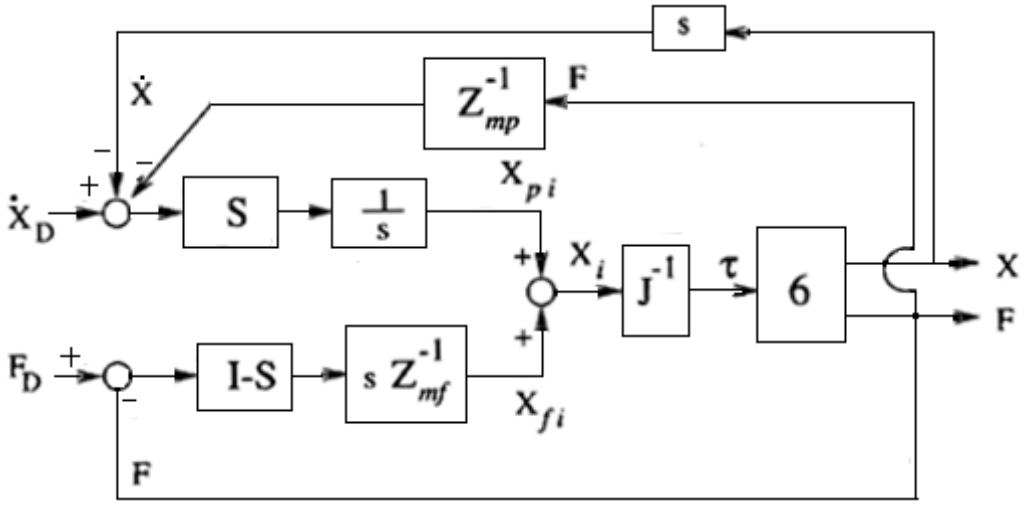
$$\tau = \tau_p + \tau_f \tag{1.9}$$

Burada, sırasıyla τ_p ve τ_f, konum ve kuvvet altuzaylarında hareket eden komut torklarıdır.

Bu şekilde, konum kontrolü ve kuvvet kontrolü ayrıştırılır. Her biri için kontrol yasaları bağımsız olarak tasarlanabilir, böylece arzulanan konum ve kuvvet yörüngelerinin izlenmesi için farklı kontrol performans gereksinimleri eşzamanlı olarak gerçekleştirilir. Normalde, Şekil 1.6' daki konum kontrolü yasası PD, kuvvet kontrol yasası bir PI kontrolörlerinden oluşur. Bunun nedeni, konum kontrolünün daha hızlı cevap vermesinin istenmesi, kuvvet kontrolünde ise hataların daha küçük olmasının istenmesidir.

1.2.5 Hibrit empedans kontrol

Anderson ve Spong(1988) hibrit kontrol ile empedans kontrol yaklaşımını birlikte içeren hibrit empedans kontrolünü öne sürmüşlerdir. Bu yöntem, kontrol edilen robotik sistemin istenen empedansı seçilirken daha fazla esneklik kazanmasını sağlar. Böylece kuvvet kontrollü ve konum kontrollü alt uzaylarda bir empedans ayrımı yapılabilir. Bu nedenle, hız veya konum gerekliliklerini sürdürmenin yanı sıra, kontrol edilen bir kuvvet yörüngesi de izlenebilir(Anderson ve Spong, 1988). Şekil 1.7, hibrit empedans kontrol blok diyagramını göstermektedir.



Şekil 1.7 : Hibrit empedans kontrol, Zeng ve Hemami (1997)' den uyarlanmıştır.

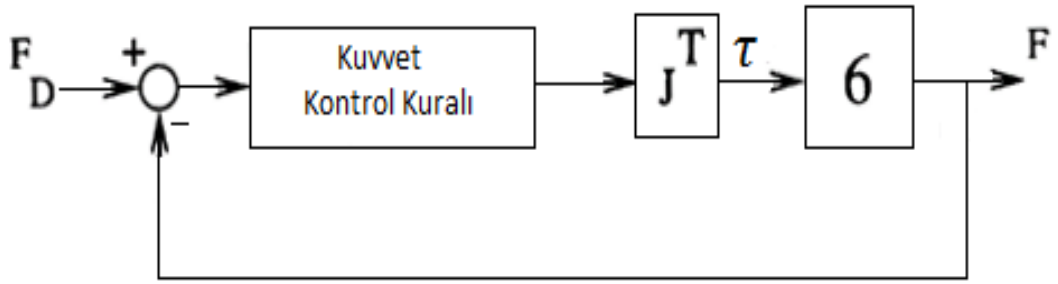
Şekil 1.7' de , Z_{mp} ve Z_{mf}, kullanıcı tarafından seçilen arzu edilen empedans terimleridir. Eğer bu terimler köşegen matrisler olarak seçilirse, matris elemanları her serbestlik derecesinin empedansını temsil eder. *S*, hibrit konum/kuvvet kontrolünde olduğu gibi uyum seçim matrisidir. Modifiye edilmiş arzu edilen yörünge X_i aşağıdaki gibidir.

$$X_i = X_{pi} + X_{fi} \tag{1.10}$$

Burada X_{pi} ve X_{fi} sırasıyla konum ve kuvvet altuzayında ifade edilen değiştirilmiş konum ve kuvvet yörüngeleridir.

1.2.6 Belirgin (Explicit) Kuvvet Kontrolü

Belirgin kuvvet kontrolünü araştırıp çeşitli yöntemler üzerinde çalışan Volpe ve Khosla(1992-1993) iki kategoriye ayırmışlardır. Biri kuvvet tabanlı, diğeri konum tabanlı belirgin kuvvet kontrolüdür. Ancak, konuma dayalı kuvvet kontrolü, daha önce açıklanan ve Şekil 1.4' te gösterilen admitans kontrolle aynı yapıdan oluşur. Bu yüzden bu bölümde sadece kuvvet tabanlı kontrol stratejisine yer verilecektir. Kuvvet tabanlı kontrolün şematik diyagramı Şekil 1.8' de gösterilmektedir (Volpe ve Khosla, 1992-1993).



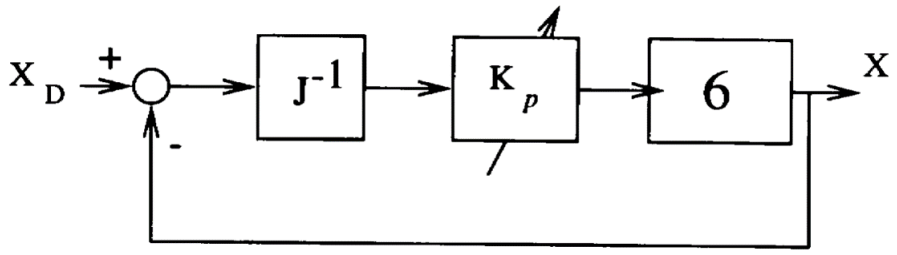
Şekil 1.8 : Belirgin kuvvet kontrolü, Zeng ve Hemami (1997)' den uyarlanmıştır.

Şekil 1.8' de, ölçülen kuvvet, kuvvet hata vektörünü oluşturmak için doğrudan geribesleme olarak kullanılır. Kuvvet kontrol kuralı olarak PID kontrolör kullanılır. Zorlu temas görevlerinde, PI açık kuvvet kontrolü uygulaması incelenmiş ve bu görevlerde kararlı bir açık kuvvet kontrolü elde etme yöntemleri belirtilmiştir **(**Alici ve Daniel, 1994**).** Başarılı bir kuvvet takip etmenin anahtarı, belirgin kuvvet kontrolü kuralının tasarımıdır.

P veya PD kontrolü durumunun aksine, integral kontrol yasası artan temas katılığı ile artan kararlılığı sağlamaktadır.

1.2.7 Dolaylı (Implicit) Kuvvet Kontrolü

Dolaylı kuvvet kontrolünde kuvvet geribeslemesi yoktur. Bunun yerine konum, arzu edilen kuvvet için konumun önceden tanımlanmasına dayalı olarak kontrol edilir. Konum geri besleme kazancı K_p, robot kolunun belirli bir katılık elde edebileceği şekilde önceden belirlenir. Şekil 1.9' da dolaylı kuvvet kontrolünü göstermektedir (Whitney, 1987).



Şekil 1.9 : Dolaylı kuvvet kontrolü, Zeng ve Hemami (1997)' den uyarlanmıştır.

Özetlemek gerekirse, Çizelge 1.1' de çeşitli kuvvet kontrol yöntemlerindeki benzerlik ve farklılıklar verilmektedir.

Çizelge 1.1 : Kontrol algoritmaları karşılaştırması, Zeng ve Hemami (1997)' den uyarlanmıştır.

Algoritma Sınıflandırma		Çalışma Uzayı	Ölçülebilen Değerler	Değiştirilebilen Parametreler	Uyarlanan Amaçlar
Aktif Katılık Kontrolü	1. Tür	Eklem Uzayı	Konum ve Kuvvet	Eklem yer değiştirmesi, Temas Kuvveti	Eklem Katılık Matrisi
	2. Tür	Eylem Uzayı[a]		Konum hatası, Temas Kuvveti	Katılık Matrisi
Empedans Kontrol	Temel Empedans Kontrol	Eylem Uzayı	Konum, Hız, Kuvvet	Konum ve Hız Hatası, Temas Kuvveti	Empedans
	Konum Tabanlı Empedans Kontrol			Modifiye Edilmiş Arzu Edilen Yörünge ve Temas Kuvveti	
Admitans Kontrol			Kuvvet	Kuvvet Hatası	Admitans
Hibrit Kontrol	Hibrit Konum/Kuvvet Kontrolü	{P}[b]	Konum	Konum Hatası	Konum
		{F}[c]	Kuvvet	Kuvvet Hatası	Kuvvet
	Hibrit Empedans Kontrol	{P}	Kuvvet	Hız Hatası	Z_{mp}[d]
		{F}		Kuvvet Hatası	Z_{mf}[e]
Belirgin Kuvvet Kontrolü	PI, PD, PID vb.	Eylem Uzayı	Kuvvet	Kuvvet Hatası	Arzu Edilen Kuvvet F_D
Dolaylı Kuvvet Kontrolü		Eylem Uzayı	Konum	Konum Hatası	Önceden Belirlenmiş Katılık

Eylem uzayı[a]={P},{F},

$\{P\}^b$=Konum altuzayı; $\{F\}^c$=Kuvvet altuzayı,

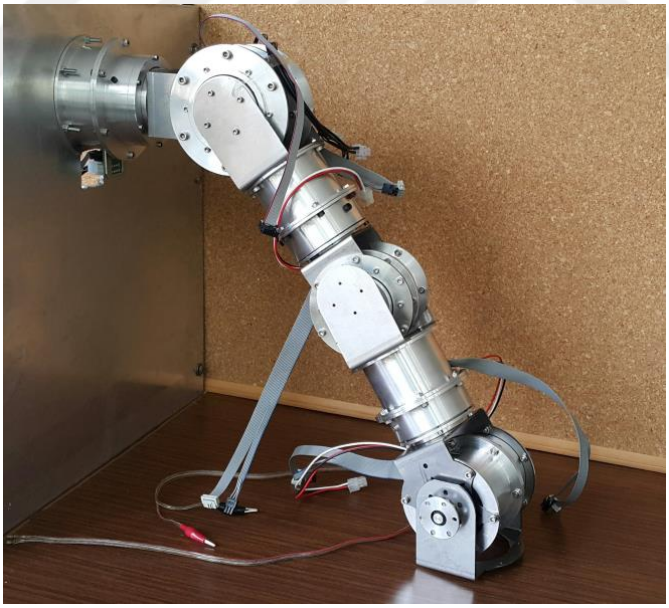
$\{Z_{mp}\}^d$=Empedansta bahsedilen konum altuzayı,

$\{Z_{mf}\}^e$=Empedansta bahsedilen kuvvet altuzayıdır.

1.3 I-TECH İnsansı Robot Kolu Tanıtımı

I-TECH insansı robot kolu, İstanbul Teknik Üniversitesi, Otomatik Kontrol Labaratuvarı bünyesinde yürütülen insansı robot projesi kampamında üretilen 6 serbestlik dereceli ve sadece döner eklemlerden oluşan bir robot koludur.

I-TECH robot kolu tasarlanırken, insansı robot kolları tasarımındaki temel amaçlardan biri olan insan koluna benzetme amacı güdülmüştür. Bu sebeple eklem dizilimleri, boyutlandırılması insan kolunun yapabileceği hareketleri taklit edebilecek şekilde yapılmıştır. İnsandaki omuz eklemi küresel eklem şeklindedir. Bu küresel eklem robot kolu modelimizde üç eklemle(ayrı üç serbestlik derecesiyle) temsil edilip 3 ardışık dönel motor kullanılmıştır. İnsanda dirsek ekleminde bulunan iki serbestlik derecesi de yine benzer şekilde iki eklemle-iki ardışık dönel motor kullanılarak benzetilmeye çalışılmıştır. İki serbestlik dereceli bilek ise tek serbestlik dercesiyle-tek dönel motor ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 1.10' da robot kolu eklemlerinin dizilimleri gösterilmiştir. Robot kolu mekanik tasarımı ile ilgili detaylar ilgili tezlerde yer almaktadır (Meşeli, 2013; Güleç, 2013).



Şekil 1.10 : I-TECH İnsansı Robot Projesi kapsamında üretilen robot kolu görseli.

Motor seçimleri yapılırken robot kolu ağırlığı, yapacağı işler sırasında maruz kalacağı yükler, boyut kısıtları göz önünde bulundurulmuştur. Bütün eklemlerde Maxon marka fırçasız doğru akım motorları kullanılmıştır. İlk iki eklem için iki adet EC90 model fırçasız motor ve sonraki eklemler için ise dört adet EC60 model fırçasız motor seçilmiştir (Url-1,Url-2). Aynı kısıtlar gözönünde bulundurularak, motorlardan çıkan

gücü kola aktarırken yüksek çevrim oranına sahip Harmonic Drive marka dişli mekanizmaları kullanılmıştır. İlk iki eklem için iki adet CPL-20-2A model harmonik dişlisi, sonraki eklemler için ise dört adet CPL-17-2A model harmanic dişlisi seçilmiştir (Url-3). Robot uç noktasına yerleştirilen bir adet 6 eksenli ATI mini45 kuvvet/moment sensörü kullanılarak kuvvet/moment ölçümü gerçekleştirilmektedir (Url-4). Çizelge 1.2' de motor ve dişli mekanizmaları özellikleri verilmiştir.

Çizelge 1.2 : Motor ve dişli mekanizmalarına ait özellikler (Güleç, 2014).

Eklem, *j*	Motor			Harmonic Drive^R Dişli Mekanizması		
	Model	En Yüksek Sürekli Tork [Nm]	Ağırlık [kg]	Model	En Yüksek Giriş Torku [Nm]	Ağırlık [kg]
1-2	EC 90 Flat	0,444	0,6	CPL-20A-(1:160)	0,575	0,14
3-4	EC 60 Flat	0,264	0,47	CPL-17A-(1:120)	0,45	0,1

1.4 Hipotez

Bu tez çalışmasında 6 serbestlik dereceli insansı robot kolunda konum ve kuvvet kontrolü yapılarak, belirli bir görev için seçilen kontrol algoritmasının benzetim çalışması gerçekleştirilip sonuçları analiz edilecektir. Seçilen görev, kalem olarak belirlenen uç eyleyiciyle sabit ve hareket eden bir levha üzerine çember çizdirmek olacaktır. Seçilen görev için temel bir empedans kontrol algoritması üzerinde durulacak, kontrolcü katsayıları değiştirilerek incelenecek ve bozucu kuvvet etkisi analizi yapılacaktır. Bir optimizasyon yöntemi önerilerek katsayı seçimi iyileştirilip konum hatası azaltılmaya çalışılacaktır. Empedans kontrol seçiminin sebebi, insansı robot koluna yaptırılabilecek işlerde harici kuvvetler etkisinde kalınabileceği ve bu kuvvetlerin önceden belirlenememesi durumu göz önünde bulundurulduğunda en uygun kontrol yöntemi olmasıdır. Özellikle herhangi bir nesneyi tutma/taşıma/etkileşimli olarak iş yaptırma gibi görevli çift kol çalışmalarında empedans kontrol algoritmalarından yararlanılmaktadır **(**Caccavale ve diğ., 2008**).**

İstanbul Teknik Üniversitesi, Otomatik Kontrol Labaratuvarı, I-TECH İnsansı Robot Projesi kapsamında yürütülen çalışmalarda ileride ikinci kol üretimi gerçekleştirilmesi planlanmaktadır. Bu tez çalışması aynı zamanda çift kollu görevlerde de tercih edilen empedans kontrol tekniğini yakından tanıtarak, kol üretimleri tamamlandığında gerçek zamanlı çalışmalara altyapı hazırlamış olacaktır.

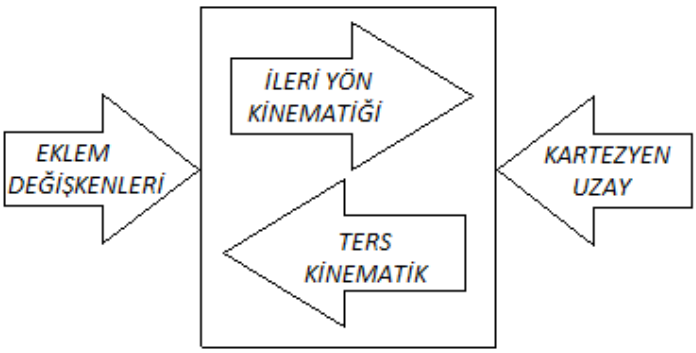
2. I-TECH İNSANSI ROBOT KOLU MODELLENMESİ

Bir robot koluna verilen komutun yerine getirilmesi için her bir eklemde bulunan motorların tahrik edilmesi gerekmektedir. Motorların hareketi için gerekli olan girişler ve ihtiyaç duyulan çıkışlara ulaşabilmek için robot kolunun modellenmesi gerekmektedir. Modelleme bize eklemler arasındaki kinematik, dinamik ilişkiyi verecektir. Bu ilişkiler gerçekleştirmek istediğimiz kontrol yönteminde kullanmak üzere bulunacaktır.

2.1 Kinematik Model

Robotların kinematik modellerinin çıkarılması robot çalışmalarının en önemli ve en temel aşamalarından biridir. Kinematik modelleme robot çalışmalarında mekanizmanın hareketinden algılayıcıları modelleme ve kontrol uygulamalarına kadar birçok alanda kullanılmaktadır.

Kinematik modelleme, ileri kinematik ve ters kinematik modelleme olarak olarak iki şekilde yapılabilir. İleri kinematik model, eklem parametreleri bilinen manipülatörün çalışma uzayındaki yörünge ve konumunun belirlenmesini sağlar. Ters kinematik modelde ise robotun uç eyleyicisinin ana çerçeveye göre konumu ve yönelimi verildiğinde manipülatörün bu konuma ve yönelime gidebilmesi için gerekli eklem değişkenlerinin bulunmasını sağlar. Diğer bir ifadeyle uç eyleyicinin konum ve yönelimini kartezyen koordinat sisteminden eklem koordinat sistemine dönüştürme işlemi de diyebiliriz.



Şekil 2.1 : Kinematik model geçişleri.

Robot kinematik modelini çıkarmak için çeşitli yöntemler vardır. Ancak literatüre bakıldığında, ileri yön kinematiği doğrudan çıkaran ve basit gösterime sahip olan Denavit-Hartenberg(D-H) (Denavit, 1955) en çok tercih edilen yöntemdir. Bu çalışmada D-H Yöntemi kullanılarak ileri kinematik model çıkarılmıştır.

2.1.1 İleri kinematik çözüm

İleri kinematik model için öncelikle eksen takımları yerleştirilir ve bu eksen takımlarına göre her bir eksenin birbirine göre hareketi tanımlanır. Eklemlerin nasıl hareket ettiği (döner eklem/kayar eklem olduğu) belirlenir. Döner eklemler için uzuvlar arasındaki açılar, kayar eklemler için uzvun uzama miktarı eklem değişkeni olarak belirlenir. Daha sonra dönüşüm matrisleri yazılarak ileri kinematik model çıkarılmış olur. Dönüşüm matrisleri, uç eyleyicinin konumunu ve yönelimini referans koordinat çerçevesine göre ifade eder.

Eklemlere eksen takımları yerleştirildikten sonra, komşu iki eklem arasındaki ilişki ${}^{i-1}_{i}T$ dönüşüm matrisi ile elde edilir. İlk eklemin dönüşüm matrisi ilk eklem ile referans çerçeve arasındaki ilişkiyi tanımlarken, son ekleme ait dönüşüm matrisi uç eyleyici ile son eklem arasındaki ilişkiyi bize verir. Eklemlerin dönüşüm matrisleri sırasıyla birbirine göre yazılıp çarpıldığında referans koordinat çerçevesi ile araç koordinat çerçevesi arasındaki ilişkiyi verir.

$$ {}^{0}_{N}T = {}^{0}_{1}T\,{}^{1}_{2}T \dots\dots\dots {}^{N-1}_{N}T \tag{2.1} $$

Dönüşüm matrisleri yazılımı her eklem için ayrı ayrı koordinat sistemi tanımlayıp hesaplanması karmaşık olduğu için Denavit ve Hertanberg' in önerdiği sistematik yöntem kullanılmıştır.

2.1.2 Denavit-Hartenberg parametreleri belirlenmesi

Bu yöntemde öncelikle robot uzuvlarına eksen takımları yerleştirilir, daha sonra uzuv ve eklem parametreleri bulunur. Bu parametreler eksen takımlarının birbiri ile ilişkilerini ve robot uzuvlarının geometrilerini tanımlar.

Koordinat çerçeveleri aşağıdaki kurallara göre atanır.

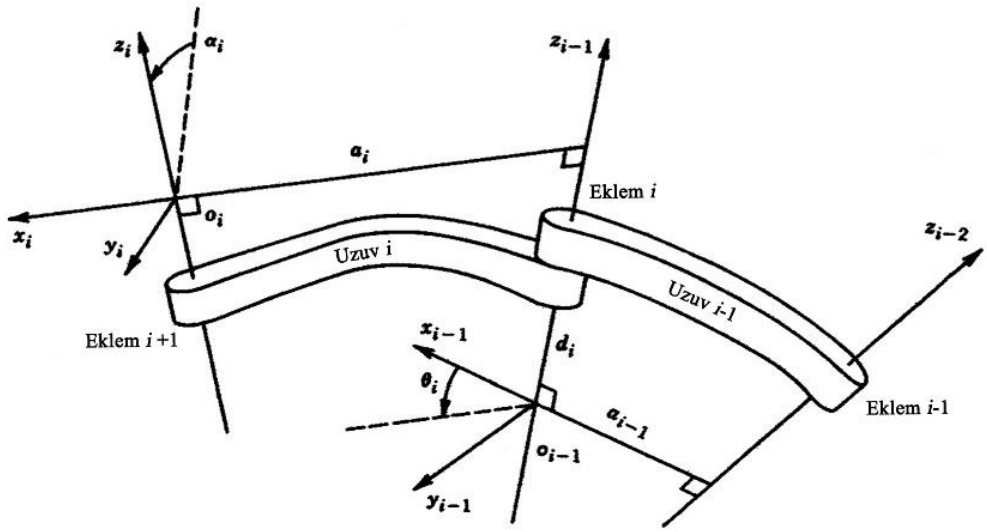
- Öncelikle eklemlerin eksenlerinin dönme veya kayma yönleri belirlenir ve bu eksenlere paralel doğrular çizilir.

- Döner eksenler için dönme yönü Z, prizmatik eklemler için kayma yönü Z ekseni olarak belirlenir.
- Z eksenine dik ve kol boyunca olan uzuv uzunluğu X ekseni olarak kabul edilir.
- Z ve X eksenleri belirlendikten sonra sağ el kuralına göre Y ekseni yerleştirilir.
- Eğer arka arkaya gelen 2 eklemin dönme veya kayma yönleri aynı ise Z ekseni belirlendikten sonra kol boyunca X ekseni belirlenir. Son olarak sağ el kuralına göre Y ekseni belirlenir.
- 0 ve 1. eksenler üst üste kabul edilebilir.
- Bir seri robotun eklemine koordinat sistemleri yerleştirilirken 1. eksenin dönme yönü Z ekseni olarak belirlendikten sonra genellikle bu eksene X eksenince döndürüldüğünde komşu iki Z ekseni çakışacak şekilde bir X ekseni yerleştirilir.

Bu kurallara göre eksen takımları atandıktan sonra eksen takımları arasındaki ilişkiyi tanımlayan eklem ve uzuv parametreleri belirlenir. Dört ana parametre vardır. Bunlar;

- a_{i-1}: x_i ekseni boyunca z_{i-1}' den z_i' ye olan uzaklık,
- α_{i-1}: x_i ekseni etrafında z_{i-1}' den z_i' ye ölçülen açı,
- d_i: z_i ekseni boyunca x_{i-1}' den x_i' ye olan uzaklık,
- θ_i: z_i ekseni etrafında x_{i-1}' den x_i' ye ölçülen açıdır.

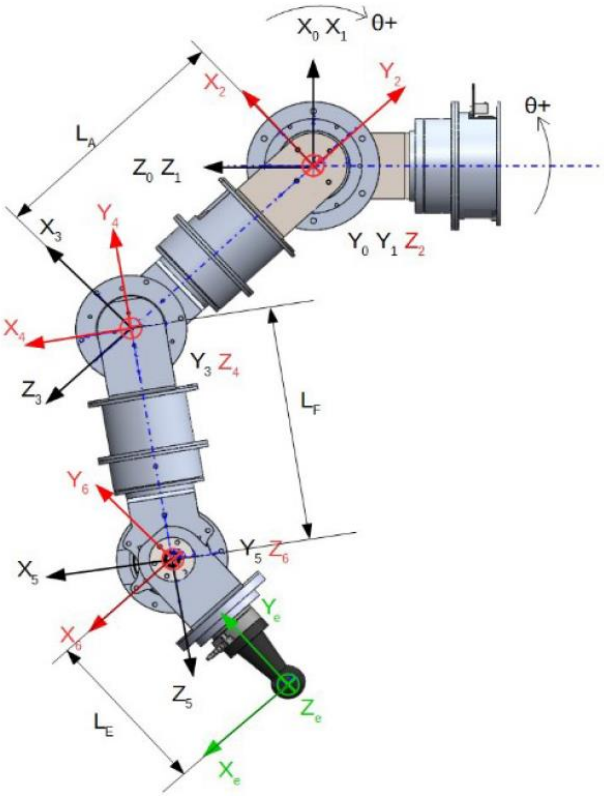
Şekil 2.2' de eksen takımları, eklem ve uzuv parametreleri belirlenişi gösterilmiştir.



Şekil 2.2 : Denavit-Hartenberg yöntemiyle eksen takımlarının belirlenmesi.

2.1.2.1 I-TECH robot koluna ait eksen takımları ve D-H parameterleri

I-TECH İnsansı Robot Kolu modeli üzerine D-H yöntemi kullanılarak yerleştirilen eksen takımları Şekil 2.3' te verilmiştir. Eklem ve uzuv parametreleri de belirlenerek Çizelge 2.1' de gösterilmiştir.



Şekil 2.3 : I-TECH robot kolu üzerine yerleştirilen eksen takımları(Türkmen, 2016).

Çizelge 2.1 : I-TECH robot koluna ait D-H parametreleri.

i	a_{i-1}	α_{i-1}	d_i	θ_i
1	0	0	0	θ_1
2	0	-π/2	0	θ_2
3	0	π/2	L_A	θ_3
4	0	-π/2	0	θ_4
5	0	π/2	L_F	θ_5
6	0	-π/2	0	θ_6

L_A = 219mm,

L_F = 213mm,

L_F = 153mm,

L_{Toplam} = 585mm.

2.1.3 Dönüşüm matrisi hesabı

D-H yöntemine göre belirlenmiş koordinat çerçevelerini birbirine göre ifade etmek için homojen dönüşüm matrisleri kullanılır. Bu matrisler aşağıdaki genel ifadeden elde edilir.

$$T_i^{i-1} = \begin{bmatrix} R_i^{i-1} & p_i^{i-1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2.2}$$

T_i^{i-1} boyutları 4x4 olan, i.eksen takımının i-1' e göre konumunu ve yönelimini tanımlayan homojen dönüşüm matrisidir. R_i^{i-1} boyutları 3x3 olan rotasyon(dönme) matrisi, p_i^{i-1} boyutları 3x1 translasyon(ötelenme) matrisidir. Homojen dönüşüm matrisi eldesi aşağıdaki gibidir.

$$T_i^{i-1} = Rot_{x_{i-1}}(\alpha_{i-1}).Trans_{x_{i-1}}(a_{i-1}).Rot_{z_i}(\theta_i).Trans_{z_i}(d_i) \tag{2.3}$$

$$Rot_{x_{i-1}}(\alpha_{i-1}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha_{i-1} & -\sin\alpha_{i-1} & 0 \\ 0 & \sin\alpha_{i-1} & \sin\alpha_{i-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2.4}$$

$$Trans_{x_{i-1}}(a_{i-1}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_{i-1} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2.5}$$

$$Rot_{z_i}(\theta_i) = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & 0 \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2.6}$$

$$Trans_{z_i}(d_i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \tag{2.7}$$

$$T_i^{i-1} = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i\cos\alpha_i & \sin\theta_i\sin\alpha_i & a_i\cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i\cos\alpha_i & -\cos\theta_i\sin\alpha_i & a_i\sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2.8}$$

Uç eyleyicinin konum ve yönelimini bulmak için, uç noktanın koordinat çerçevesinin ana koordinat çerçevesine göre ifade edilmesi gerekmektedir. Bunu elde etmek için her eklem için elde edilen dönüşüm matrisleri sırasıyla çarpılır.

$$T_i^0 = T_1^0 T_2^1 \dots . T_i^{i-1} \tag{2.9}$$

Bu çalışmada 6 eksenli robot kolu olduğu için 6 tane dönüşüm matrisi oluşturulmuş ve peşpeşe çarpılarak uç koordinat çerçevesi ana koordinat çerçevesine göre tanımlanmıştır.

I-TECH robot kolu için hesaplanan dönüşüm matrisi aşağıdaki gibidir.

$$T_e^0 = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} & t_{14} \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} & t_{24} \\ t_{31} & t_{32} & t_{33} & t_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2.10}$$

$t_{11} = fsin\theta_6 - ccos\theta_6$

$t_{12} = fcos\theta_6 + csin\theta_6$

$t_{13} = ısin\theta_5 + jcos\theta_5$

$t_{14} = \frac{1097cos\theta_1 sin\theta_1}{5} - 154fcos\theta_6 - 154sin\theta_6 c - 213msin\theta_4 + 213cos\theta_1 cos\theta_4 sin\theta_2$

$t_{21} = bcos\theta_6 - esin\theta_6$

$t_{22} = -ecos\theta_6 - bsin\theta_6$

$t_{23} = hcos\theta_5 - gsin\theta_5$

$t_{24} = \frac{1097sin\theta_1 sin\theta_2}{5} - 154ecos\theta_6 - 154bsin\theta_6 - 213lsin\theta_4 + 213cos\theta_4 sin\theta_1 sin\theta_2$

$t_{31} = -dcos\theta_6 - asin\theta_6$

$t_{32} = -dsin\theta_6 - acos\theta_6$

$t_{33} = ksin\theta_5 + cos\theta_5 sin\theta_2 sin\theta_3$

$t_{34} = \frac{1097cos\theta_2}{5} - 154dsin\theta_6 + 154acos\theta_6 + 213cos\theta_2 cos\theta_4 - 213cos\theta_3 sin\theta_2 sin\theta_4$

$a = cos\theta_2 cos\theta_4 - cos\theta_3 sin\theta_2 sin\theta_4$

$b = gcos\theta_5 - hsin\theta_5$

$c = \imath cos\theta_5 + jsin\theta_5$

$d = kcos\theta_5 + sin\theta_5 sin\theta_2 sin\theta_3$

$e = lsin\theta_4 + cos\theta_4 sin\theta_2 sin\theta_1$

$f = msin\theta_4 - cos\theta_1 sin\theta_2 cos\theta_4$

$g = lcos\theta_4 - sin\theta_1 sin\theta_2 sin\theta_4$

$h = cos\theta_1 cos\theta_3 - cos\theta_2 sin\theta_1 sin\theta_3$

$\imath = mcos\theta_4 + cos\theta_1 sin\theta_2 sin\theta_4$

$j = cos\theta_3 sin\theta_1 + cos\theta_1 cos\theta_2 sin\theta_3$

$k = cos\theta_2 sin\theta_4 + cos\theta_3 cos\theta_4 sin\theta_2$

$l = cos\theta_1 sin\theta_3 + cos\theta_2 sin\theta_1 cos\theta_3$

$m = sin\theta_3 sin\theta_1 - cos\theta_1 cos\theta_2 cos\theta_3$

Robot dönüşüm matrisi, robotun konum ve duruş bilgisini içeren x vektörü olarak düzenlenebilir. X vektörü elemanları aşağıdaki gibidir.

$$X = \begin{bmatrix} px \\ py \\ pz \\ t_{11} \\ t_{12} \\ t_{13} \\ t_{21} \\ t_{22} \\ t_{23} \\ t_{31} \\ t_{32} \\ t_{33} \end{bmatrix} \tag{2.11}$$

X vektörünün ilk üç elemanı uç eyleyicinin kartezyen koordinatlarını vermektedir. Diğer 9 eleman ise duruş bilgisini içermektedir.

2.1.4 Jakobiyen matrsinin hesaplanması

Robot kolunun uzaydaki konumunu belirlemek için serbestlik dercesi kadar koordinat bilgisine ihtiyaç vardır. I-TECH insansı robot kolunun her eklemde bir serbestlik derecesi vardır ve her bir eklem konumu bir adet değişken parametre ile ifade edilir. Bu durumda 6 eklem için 6 adet değişken parametre vardır. Bütün eklemler dönel

olduğu için bu değişkenler eklem açılarıdır. Bu açılar her eklemin eksen takımına göre tanımlanmış olup bir önceki eksen takımına göre dönme miktarını temsil etmektedir. D-H parametrelerindeki θ_i skaleri genelleştirilmiş koordinatlarda eklem değişkeni q_i skaleri ile ifade edilecektir. Bu durumda x vektörü q genelleştirilmiş koordinatlar vektörüne göre aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$x = x(q) \tag{2.12}$$

Herhangi bir cismin çizgisel ya da açısal konum veya hız değişmini zamana göre ifade etmek için $\frac{\partial x}{\partial t}$ kullanılır. Robotun konum ve duruş bilgilerini içeren ve q_i değişkenlerine bağlı olan x vektörünün zamana göre değişimini aşağıdaki gibi ifade edebiliriz.

$$\frac{\partial x}{\partial t} = \frac{\partial x}{\partial q} \cdot \frac{\partial q}{\partial t} \tag{2.13}$$

x ve q ‘nun vektör olduğu durumlarda;

$$\begin{aligned}
\frac{\partial x_1}{\partial t} &= \frac{\partial x_1}{\partial q_1}\frac{\partial q_1}{\partial t} + \frac{\partial x_1}{\partial q_2}\frac{\partial q_2}{\partial t} + \cdots + \frac{\partial x_1}{\partial q_6}\frac{\partial q_6}{\partial t} \\
\frac{\partial x_2}{\partial t} &= \frac{\partial x_2}{\partial q_1}\frac{\partial q_1}{\partial t} + \frac{\partial x_2}{\partial q_2}\frac{\partial q_2}{\partial t} + \cdots + \frac{\partial x_2}{\partial q_6}\frac{\partial q_6}{\partial t} \\
&\cdot \\
&\cdot \\
&\cdot \\
\frac{\partial x_n}{\partial t} &= \frac{\partial x_n}{\partial q_1}\frac{\partial q_1}{\partial t} + \frac{\partial x_n}{\partial q_2}\frac{\partial q_2}{\partial t} + \cdots + \frac{\partial x_n}{\partial q_6}\frac{\partial q_6}{\partial t}
\end{aligned} \tag{2.14}$$

Formunu alır.

Burada $\frac{dx}{dq}$ ifadesi, denklem (2.16)’ de gösterildiği gibi bir Jakobiyen matrisi olarak tanımlanır. Böylelikle denklem 2.13 aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\dot{x} = J.\dot{q} \tag{2.15}$$

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_1}{\partial q_1} & \frac{\partial x_1}{\partial q_2} & \cdots & \frac{\partial x_1}{\partial q_6} \\ \frac{\partial x_2}{\partial q_1} & \frac{\partial x_2}{\partial q_2} & \cdots & \frac{\partial x_2}{\partial q_6} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \frac{\partial x_n}{\partial q_1} & \frac{\partial x_n}{\partial q_2} & \cdots & \frac{\partial x_n}{\partial q_6} \end{bmatrix} \tag{2.16}$$

x vektörü nx1 ve q vektörü 6x1 boyutunda olması durumunda Jakobiyen matrisi nx6 boyutunda olur.

2.1.4.1 I-TECH robot kolu jakobiyen matrisi hesabı

Jakobiyen matrisi ile eklemlerdeki konum değişimlerinden robot uç eyleyicisindeki konum ve duruş değişimlerine geçiş sağlanır. Çizgisel hız dönüşümleri için konum türevleri kullanılabilirken, açısal hız için gerekli olan değişkenler duruş bilgisinde yer almaktadır.

I-TECH robot kolu için hesaplanan Jakobiyen matrisi 6x6 boyutunda olup aşağıdaki gibidir.

$$J = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} & J_{14} & J_{15} & J_{16} \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} & J_{24} & J_{25} & J_{26} \\ J_{31} & J_{32} & J_{33} & J_{34} & J_{35} & J_{36} \\ J_{41} & J_{42} & J_{43} & J_{44} & J_{45} & J_{46} \\ J_{51} & J_{52} & J_{53} & J_{54} & J_{55} & J_{56} \\ J_{61} & J_{62} & J_{63} & J_{64} & J_{65} & J_{66} \end{bmatrix} \tag{2.17}$$

Matris elemanları aşağıdaki denklemlerde verilecektir. ‘sin’ fonksiyonu ‘s’ ile ‘cos’ fonksiyonu ‘c’ ile kısaltılarak yazılmıştır.

$$J_{11} = -\frac{1097 s\theta_1 s\theta_2}{5} - 154 c\theta_6 B - 154 c\theta_6 G - 213 c\theta_4 R - 213 c\theta_4 s\theta_1 s\theta_2$$

$$J_{12} = \frac{1097 c\theta_1 c\theta_2}{5} + 154 c\theta_6 c\theta_1 c\theta_2 c\theta_4 - c\theta_1 c\theta_3 s\theta_2 s\theta_4 - 154 s\theta_6 c\theta_5 c\theta_1 c\theta_2 s\theta_4 + c\theta_1 c\theta_3 c\theta_4 s\theta_2 - c\theta_1 s\theta_2 s\theta_3 s\theta_5 + 213 c\theta_1 c\theta_2 c\theta_4 - 213 c\theta_1 c\theta_3 s\theta_2 s\theta_4$$

$$J_{13} = s\theta_6 s\theta_5 P - c\theta_4 c\theta_5 K + 154 J - 213 s\theta_4 K + J - 154 c\theta_6 s\theta_4 K + J$$

$$J_{14} = 154 c\theta_5 s\theta_6 C - 213 c\theta_4 P + 154 J - 213 c\theta_1 s\theta_2 s\theta_4 - 154 c\theta_6 I$$

$$J_{15} = 154s\theta_6 D$$

$$J_{16} = 154s\theta_6 C - 154c\theta_6 E$$

$$J_{21} = \frac{1097c\theta_1 s\theta_2}{5} - 154c\theta_6 C - 154s\theta_6 E - 213s\theta_4 P + 213c\theta_1 c\theta_4 s\theta_2$$

$$J_{22} = \frac{1097c\theta_2 s\theta_1}{5} - 154s\theta_6 c\theta_5 c\theta_2 s\theta_1 s\theta_4 + c\theta_3 c\theta_4 s\theta_1 s\theta_2 - s\theta_1 s\theta_2 s\theta_3 s\theta_5 + 154c\theta_6 c\theta_2 c\theta_4 s\theta_1 - c\theta_3 s\theta_1 s\theta_2 s\theta_4 + 213c\theta_2 c\theta_4 s\theta_1 - 213c\theta_3 s\theta_1 s\theta_2 s\theta_4$$

$$J_{23} = 213s\theta_4 M - s\theta_6 s\theta_5 R - 154c\theta_4 c\theta_5 M + 154c\theta_6 s\theta_4 M$$

$$J_{24} = 154c\theta_6 N + 213c\theta_4 R + 154J - 213s\theta_1 s\theta_2 s\theta_4 - 154c\theta_5 s\theta_6 B$$

$$J_{25} = -s\theta_6 s\theta_5 N - 154c\theta_5 M$$

$$J_{26} = 154c\theta_6 G - 154s\theta_6 B$$

$$J_{31} = 0$$

$$J_{32} = 154s\theta_6 c\theta_5 s\theta_2 s\theta_4 - c\theta_2 c\theta_3 c\theta_4 + c\theta_2 s\theta_3 s\theta_5 - 213c\theta_4 s\theta_2 - \frac{1097s\theta_2}{5} - 154c\theta_6 c\theta_4 s\theta_2 + c\theta_2 c\theta_3 s\theta_4 - 213c\theta_2 c\theta_3 s\theta_4$$

$$J_{33} = 213s\theta_2 s\theta_3 s\theta_4 + 154c\theta_6 s\theta_3 s\theta_4 + 154c\theta_3 s\theta_5 s\theta_6 + 154c\theta_4 c\theta_5 s\theta_3 s\theta_6$$

$$J_{34} = -213c\theta_2 s\theta_4 - 154c\theta_6 L - 154c\theta_5 s\theta_6 A - 213c\theta_3 c\theta_4 s\theta_2$$

$$J_{35} = 154s\theta_6 F$$

$$J_{36} = -c\theta_6 c\theta_5 L - 154s\theta_2 s\theta_3 s\theta_5 - 154s\theta_6 A$$

$$J_{41} = 0$$

$$J_{42} = -s\theta_1$$

$$J_{43} = c\theta_1 s\theta_2$$

$$J_{44} = -c\theta_3 s\theta_1 - c\theta_1 c\theta_2 s\theta_3$$

$$J_{45} = c\theta_1 c\theta_4 s\theta_2 - s\theta_4 (s\theta_1 s\theta_3 - c\theta_1 c\theta_2 c\theta_3)$$

$$J_{46} = s\theta_5 I - c\theta_5 K + c\theta_1 c\theta_2 s\theta_3$$

$$J_{51} = 0$$

$$J_{52} = c\theta_1$$

$$J_{53} = s\theta_1 s\theta_2$$

$$J_{54} = c\theta_1 c\theta_3 - c\theta_2 s\theta_1 s\theta_3$$

$$J_{55} = s\theta_4 R + c\theta_4 s\theta_1 s\theta_2$$

$$J_{56} = c\theta_5 (c\theta_1 c\theta_3 - c\theta_2 s\theta_1 s\theta_3) - s\theta_5 (c\theta_4 R - s\theta_1 s\theta_2 s\theta_4)$$

$$J_{61} = 1$$

$$J_{62} = 0$$

$$J_{63} = c\theta_2$$

$$J_{64} = s\theta_2 s\theta_3$$

$$J_{65} = c\theta_2 c\theta_4 - c\theta_3 s\theta_2 s\theta_4$$

$$J_{66} = s\theta_5 (c\theta_2 s\theta_4 + c\theta_3 c\theta_4 s\theta_2) + c\theta_5 s\theta_2 s\theta_3$$

$$A = c\theta_2 c\theta_4 - c\theta_3 s\theta_2 s\theta_4$$

$B = s\theta_4 R + c\theta_4 s\theta_1 s\theta_2$

$C = s\theta_4 P - H$

$D = s\theta_5 I - c\theta_5 K + J$

$E = c\theta_5 I + s\theta_5 K + J$

$F = s\theta_5 L + c\theta_5 s\theta_2 s\theta_3$

$G = c\theta_5 N + s\theta_5 M$

$H = c\theta_1 c\theta_4 s\theta_2$

$I = c\theta_4 P + c\theta_1 s\theta_2 s\theta_4$

$J = c\theta_1 c\theta_2 s\theta_3$

$K = c\theta_3 s\theta_1$

$L = c\theta_2 s\theta_4 + c\theta_3 c\theta_4 s\theta_2$

$M = c\theta_1 c\theta_3 - c\theta_2 s\theta_1 s\theta_3$

$N = c\theta_4 R - s\theta_1 s\theta_2 s\theta_4$

$P = s\theta_1 s\theta_3 - c\theta_1 c\theta_2 c\theta_3$

$R = c\theta_1 s\theta_3 + c\theta_2 c\theta_3 s\theta_1$

2.1.5 Ters jakobiyen elde edilmesi

İleri kinematik çözüm, denklem (2.9) diğer ifadesiyle denklem (2.12) eklem değişkenleri ve uç eyleyicinin konum ve yönelimi arasındaki ilişkiyi ortaya koyar. Ters kinematik problem ise belirli bir uç eyleyici konum ve yönelimine karşılık gelen eklem değişkenlerinin belirlenmesinden oluşur. Bu problemin çözümü, eylem uzayında uç eyleyiciye atanan hareket özelliklerini istenilen hareketin yürütülmesini sağlayan eklem hareketlerine(değişkenlerine) dönüştürmek için önemlidir.

Denklem (2.9)' daki ileri kinematik çözümde eklem değişkenleri bilindiği taktirde uç eyleyici konum ve yönelimini hesaplamak kolaydır. Ancak ters kinematik problem oldukça karmaşıktır. Ters kinematikte çözülecek denklemler genelde doğrusal değildir ve bu nedenle kapalı formlu bir çözüm bulmak her zaman mümkün değildir. Birden çok çözüm bulunabilir. Kinematik olarak artıksıl manipülatör durumunda sonsuz çözümler mevcut olabilir. Manipülatörün kinematik yapısı göz önüne alındığında kabul edilebilir bir çözüm bulunmayabilir(Sciavicco ve Siciliano, 1999).

Aynı zamanda çoklu çözüm problemi sadece serbestlik derecesine değil, sıfır olmayan Denavit-Hartenberg parametrelerine de bağlıdır. Sıfır olmayan değişken sayısı ne kadar fazla ise çözüm o kadar fazla olur. Mekanik eklem sınırlamaları olmaksızın, altı serbestlik dereceli bir manipülatör için genel olarak kabul edilebilir 16 çözüm vardır. Böyle bir durumda kabul edilebilir çözümler arasından seçim yapmak için bazı

kriterler göz önünde bulundurulmalıdır. Örneği Sciavicco ve Sciliano(1999) örnek 2.6' da mevcuttur.

Ters kinematik problemi çözmek için diferansiyel kinematik denklem kullanımı önerilmektedir. Diferansiyel kinematik denklemi, eklem uzayı ile eylem uzayı arasındaki doğrusal bir haritalamayı temsil eder (Sciavicco ve Siciliano, 1999).

Hareket yörüngesi, konum ve yönelimin başlangıç koşulları ve hız uç eyleyiciye atanır. Amaç, verilen hareket yörüngesini oluşturacak olası eklem yörüngesini (q (t), $\dot{q}$ (t)) belirlemektir. Eklem hızları denklem (2.16)' dan, Jakobiyen matrisinin tersi ile elde edilebilir.

$$\dot{q} = J^{-1}(q)\dot{x} \tag{2.18}$$

Başlangıçtaki manipülatör duruşu q (0) biliniyorsa, eklem konumları zaman boyunca hızları integrasyonuyla hesaplanabilir.

$$q(t) = \int_0^t \dot{q}\,(x)dx + q(0) \tag{2.19}$$

İntegrasyon, sayısal tekniklerle ayrık zamanda yapılabilir. En basit teknik, Euler integrasyon yöntemine dayanmaktadır. Bir integrasyon aralığı verildiğinde: Δt, eğer t_k zamanındaki eklem konumları ve hızları biliniyorsa, $t_{k+1} = t_k + \Delta t$ zamanındaki eklem konumları şu şekilde hesaplanabilir;

$$q(t_{k+1}) = q(t_k) + \dot{q}(t_k)\Delta t \tag{2.20}$$

Ters kinematik için kullanılan bu teknik, kinematik yapının çözülebilirliğinden bağımsızdır. Bununla birlikte, Jakobiyenin tam ve kare olması gereklidir. Bu teknikte, artıksıl manipülatör ve kinematik tekillik oluşumu durumlarına ilişkin daha fazla bilgi gerektirir. Artıksıllık manipülatörün eklem uzayındaki serbestlik derecesinin uç eyleyicinin ulaşabilir hareketlerinin tanımlı olduğu uzayın boyutundan fazla olduğu durumlarda ortaya çıkar. Kinematik tekillik, Jakobiyen matrisin determinantının 0 olduğu eklem değişkenleriyle denk gelinen noktadır.

Buraya kadar, diferansiyel kinematik eşitlikleri kullanılarak ters kinematiğin nasıl yazılacağı gösterildi. Denklem (2.21)' de eklem hızları hesabı, Jakobiyen' in tersi bir önceki zamana göre türetilip kullanılarak elde edilmiştir.

$$q(t_{k+1}) = q(t_k) + J^{-1}(q(t_k))\dot{x}(t_k)\Delta t \tag{2.21}$$

Hesaplanan eklem hızları ($\dot{q}$), denklem (2.18)' deki hızlarla uyuşmayacaktır. Bu nedenle, eklem değişkenlerinin (q) yeniden oluşturulması gerekir. Hesaplanan eklem değişkenlerine karşılık gelen uç eyleyici konumu, arzu edilenlerden farklıdır. Bu fark, uç eyleyicinin gerçek konum ve yönelimi ile arzu edilen konum ve yönelim arasındaki hatanın eylem uzayında hesaplanmasıyla çözülebilir.

$$e = x_d - x \tag{2.22}$$

Zaman göre türevi;

$$\dot{e} = \dot{x}_d - \dot{x} \tag{2.23}$$

$\dot{x} = J(q)\dot{q}$ yazılabildiğine göre, hatanın türevi aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\dot{e} = \dot{x_d} - J(q)\dot{q} \tag{2.24}$$

Eylem uzayında gerçekleşen hesaplamada, geometrik Jakobiyen yerine analitik Jakobiyen kullanıldığı unutulmamalıdır. Denklem (2.24)'ün ters kinematik algoritmaya ulaşması için hesaplanan eklem hız vektörünü($\dot{q}$) hatasıyla(e) ilişkilendirmek gerekir, böylece bu denklem hata oluşumunu zamanla tanımlayan bir diferansiyel denklem verir. Ayrıca bu ilişki hatayı sıfıra yakınsamayı sağlamalıdır.

2.1.6 Sözde (Pseudo) ters jakobiyen

Jakobiyen matrisinin kare olmadığı ve manipülatörün kinematik olarak artıksıl olduğu(yani manipülatörün eklem uzayındaki serbestlik derecesinin uç eyleyicinin ulaşabilir hareketlerinin tanımlı olduğu uzayın boyutundan fazla olduğu) durumlar ile tekil noktaların söz konusu olduğu durumlarda jakobiyen matrisinin tersi yerine sözde(pseudo) jakobiyen kullanılır. Bizim sistemimizde artıksıllık ve kare olmayan jakobiyen matrisi bulunmamaktadır. Ancak tekil noktalara çok yaklaşılan durumlarda jakobiyen tersi alınması için ihtiyaç duyulan determinant terimi sıfıra çok yaklaştığı için jakobiyen tersi de sonsuza gitmektedir. Bu durumdan kaçınılması için ihtiyaç duyulan çözümlerde sözde ters jakobiyen kullanılabilir.

Jakobiyen matrisinin kare ve tekil olmadığı durumlarda;

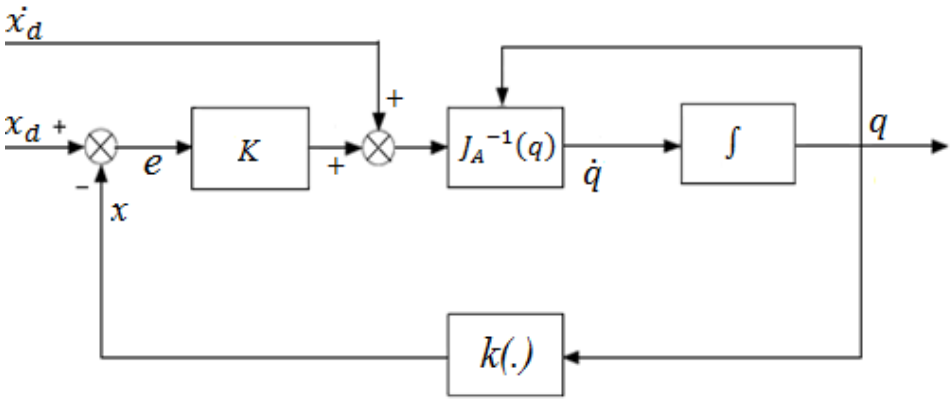
$$\dot{q} = J_A{}^{-1}(q)(\dot{x}_d + Ke) \tag{2.25}$$

$$\dot{e} + Ke = 0 \tag{2.26}$$

K, pozitif tanımlı(genellikle diyagonal) bir matris ise, sistem asimptotik olarak kararlıdır. Hata, K matrisinin özdeğerlerine bağlı bir yakınsama oranı ile yörünge boyunca sıfır eğilimi gösterir; özdeğerler ne kadar büyük olursa, yakınsama da o kadar hızlı olur.

Şema pratik olarak ayrık zamanlı bir sistem olarak uygulandığından, özdeğerlerde bir üst sınır bulunduğunu tahmin etmek mantıklıdır; Örnekleme zamanına bağlı olarak, hata sisteminin asimptotik kararlılığının garanti edildiği K'nin maksimum özdeğerinin bir sınırı olacaktır (Sciavicco ve Sciliano,1999).

Denklem (2.25)' te ters kinematik algoritmasına karşılık gelen blok şeması Şekil 2.4' te gösterilmiştir, burada k (.) ileri kinematik fonksiyonunu göstermektedir. Bu şema, genel geri bildirim kontrol şemaları açısından tekrar gözden geçirilebilir. Özellikle, J_A(q)' yu telafi etmek ve sistemi doğrusal hale getirmek için $J_A{}^{-1}$ bloğu getirilirken, doğrusal olmayan k(.) bloğu x(konumu) ve dolayısıyla e(hatayı) hesaplamak için gereklidir.



Şekil 2.4 : Ters jakobiyen ile ters kinematik algoritmasının blok şeması(Sciavicco ve Sciliano,1999 uyarlanmıştır).

Şekil 2.4' teki blok şeması, ileri döngüde integratör bulunduğunu ve sabit bir referans için ($\dot{x}_d$ = 0), kalıcı durum hatasını garanti eder. Ayrıca, $\dot{x}_d$ ile sağlanan ileri besleme hareketi zamanla değişen bir referans için, arzu edilen konum referansın x_d(t) türüne bağlı olmaksızın, hatanın tüm yörünge boyunca sıfır (e(0) = 0 olduğu durumda) tutulmasını sağlar.

2.1.7 Jakobiyen Transpoze

Jakobiyen transpozesi ilk olarak Wolovich ve Elliot(1984) ile Balestrino, Maria ve Sciavicco(1984) tarafından ters kinematik yerine kullanılmıştır. Temel fikir olarak Jakobiyen matris tersi yerine transpozesi getirilmiştir.

Hesaplama açısından daha basit bir algoritma ile, denklem (2.24)' ün doğrusallaştırılmasına ihtiyaç duyulmadan hata yakınsamasını sıfıra indiren q ile e arasında bir ilişki bulunarak türetilebilir. Sonuç olarak, hata dinamiği doğrusal olmayan bir diferansiyel denklem ile yönetilir. Lyapunov yöntemi, sisteminin asimptotik kararlılığını sağlayan bir $\dot{q}$ (e) belirlemek için kullanılabilir. Lyapunov fonksiyonu aşağıdaki gibi seçilir.

$$V(e) = \frac{1}{2} e^T K e \tag{2.27}$$

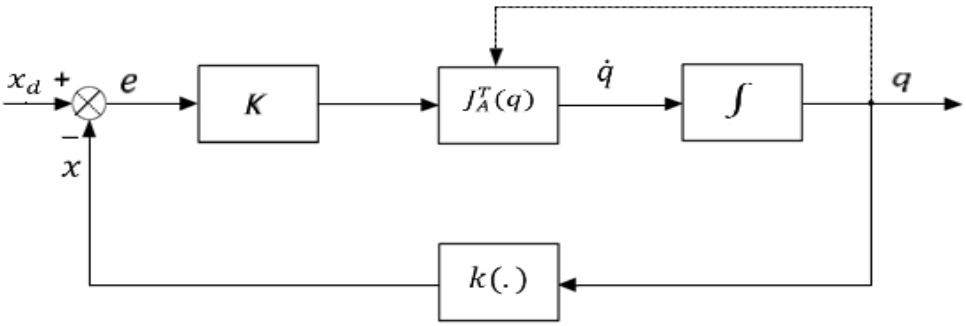
Burada K simetrik pozitif tanımlı matristir. Bu denklemde; $V(e) > 0 \quad \forall e \neq 0$, $V(0) = 0$ olur.

Zamana göre türevi alınan denklem (2.27), denklem (2.23) ile hesaplanarak aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\dot{V} = e^T K \dot{x}_d - e^T K \dot{x} \tag{2.28}$$

"$\dot{x} = J_A(q)\dot{q}$" ile düzenlersek aşağıdaki ifade oluşur.

$$\dot{V} = e^T K \dot{x}_d - e^T K J_A(q) \dot{q} \tag{2.29}$$



Şekil 2.5 : Jakobiyen transpozesi ile ters kinematik blok şeması (Sciavicco ve Siciliano, 1999).

Burada eklem hızları şu şekildedir;

$$\dot{q} = J_A^T(q) K e \tag{2.30}$$

Böylece aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\dot{V} = e^T K \dot{x}_d - e^T K J_A(q) J_A^T(q) K e \tag{2.31}$$

$\dot{x}_d$=0 olduğu sabit bir referans durumunda; denklem (2.31) negatif tanımlı olur. $\dot{V} < 0$ ile $V > 0$ koşulu sistem yörüngelerinin $e = 0$' a yaklaştığını, yani sistemin asimptotik kararlı olduğunu gösterir.

2.2 Dinamik Model

Robot kol dinamiği, robot koluna etki eden kuvvet ve momentler ile robot kolu hareketi arasındaki ilişkiyi tanımlar. Manipülatörün hareketinin dinamik denklemleri, manipülatörün dinamik davranışını tanımlayan matematiksel ifadeden oluşur. Bu dinamik denklemler, robot kolu tasarımında, benzetim çalışmalarında ve kontrolünde kullanılabilmektedir. Yaygın olarak kullanılan dinamik model denklemi aşağıdaki gibidir.

$$\tau = M(q).\ddot{q} + c(q,\dot{q}) + B.\dot{q} + g(q) \tag{2.32}$$

Bu denklemde,

τ: eklem bazında eyleyici moment vektörünü,

q: eklem değişken vektörünü,

M: 6x6 boyutunda simetrik ve pozitif atalet matrisini,

c: 6x1 boyutunda Coriolis ve merkezcil moment vektörünü,

B: 6x6 boyutunda eklemlerin viskoz sönüm katsayılarını içeren diyagonal matrisini,

g: 6x1 boyutunda yer çekimi vektörünü ifade eder.

Bu tez çalışması kapsamında yapılan benzetim çalışmalarında robotun ileri dinamik modeli olarak Solidworks programı kullanılarak çizilen katı cisim modelinden Simulink modeli ile oluşturulan dinamik modelden yararlanılacaktır.

3. EMPEDANS KONTROL ALGORİTMALARI

Robotlarda konum ve kuvvet kontrolüne baktığımızda, sadece konum kontrolünün yeterli olmadığı kuvvet kontrolüne de ihtiyaç duyulan görevlerde önerilen iki tür kontrol yöntemi vardır. Bunlardan biri hibrit konum/kuvvet kontrol yöntemi diğeri empedans kontrol yöntemidir. Bu bölümde, tez kapsamındaki benzetim çalışmalarında uygulanacak olan empedans kontrol yöntemi detaylı olarak incelenip türlerine yer verilecektir.

Empedans kontrol yöntemi, kuvvet ve konum kontrolü gerçekleştirilirken robot kolu uç noktası mekanik empedansının ayarlanması temeline dayanır. Uç noktada oluşan bu mekanik empedans, robot kolunun çevresi ile olan etkileşimi sonucunda ortaya çıkan harici kuvvetlerden kaynaklanır ve bu harici kuvvetlere karşı mekanizmanın esnekliği olarak tanımlanabilir(Akdoğan, 2007).

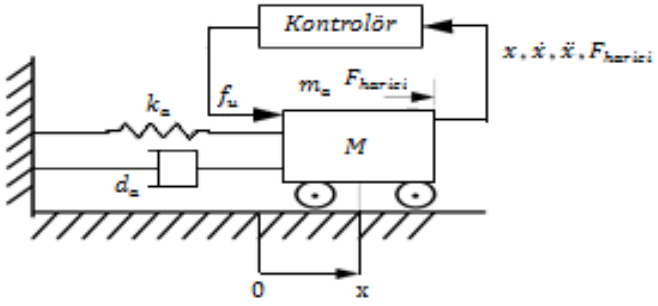
Empedans kontrol yöntemi pasif ve aktif olmak üzere iki farklı türe ayrılır. Pasif empedans, uç noktada istenilen mekanik empedansın, sadece mekanik elemanlar (yaylar ve sönümleyiciler) tarafından sağlandığı empedans kontrol yöntemidir. Bu yöntemde kuvvet kontrol çevrimi gerekmez. Kontrol sistemi basit yapıdadır. Ancak farklı görevleri gerçekleştirmek için yardımcı farklı donanımlara ihtiyaç duyduğu için çok yönlülüğü yoktur (Yoshikawa, 1990). Bu kısıtlama , sürekli donanım değişikliği olmadan çok yönlü bir manipülatör yapmak için sanal mekanik empedans değiştirme fikrine neden olmuştur. Mekanik empedans değişimi, uç eyleyici konumu ve hızı, harici kuvvet ve benzeri ölçümlere dayalı uygun bir geribesleme kontrol yasası kullanılarak sürdürülebilir. Bu yaklaşım, kontrolör geribesleme yasası değiştirilerek çeşitli görevlerde uygulanabilir. Böylelikle aktif empedans kontrol yapılmış olur.

3.1 Aktif Empedans Kontrol Yöntemi

Aktif empedans kontrol yöntemi uç noktada istenen mekanik empedansı sağlarken; robot uç noktasının konum, hız, temas kuvveti gibi parametrelerini geri besleme yaparak eklemlerin kontrol edilmesini sağlar.

3.1.1 Tek serbestlik dereceli sistemler için aktif empedans yöntemi

Aktif empedans yöntemi Yoshikawa(1990) referans alınarak genel olarak anlatılacaktır.



Şekil 3.1: Tek serbestlik dereceli sistemin aktif empedans kontrolü, Yoshikawa (1990)' dan uyarlanmıştır.

Sistemin hareket denklemi ve değişkenler aşağıdaki gibidir.

$$m_a\ddot{x} + d_a\dot{x} + k_a x = f_u + F_{harici} \tag{3.1}$$

m_a: kütle,

d_a: sönüm katsayısı,

k_a: esneklik katsayısı,

f_u: uygulanan kuvvet,

F_{harici}: harici kuvvet.

Şekil 3.1' deki sisteme harici kuvvet uygulandığında arzu edilen empedans değeriyle hareket etmesi durumundaki hareket denklemi aşağıdaki gibidir.

$$m_d\ddot{x} + d_d(\dot{x} - \dot{x}_d) + k_d(x - x_d) = F_{harici} \tag{3.2}$$

m_d: arzu edilen atalet katsayısı,

d_d: arzu edilen sönüm katsayısı,

k_d: arzu edilen esneklik katsayısı,

x_d: arzu edilen yörünge.

Sistemde konum, hız ve ivme ölçülebilir ise kontrol kuralı aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$(m_a - m_d)\ddot{x} + (d_a - d_d)\dot{x} + (k_a - k_d)x + d_d\dot{x}_d + k_d x_d = f_u \tag{3.3}$$

Harici kuvvet ölçülebilir olduğunda yukarıdaki denklem aşağıdaki gibi düzenlenebilir.

$$f_u = (d_a - m_a {m_d}^{-1} d_d)\dot{x} + (k_a - m_a {m_d}^{-1} k_d)x \\ - (1 - m_a {m_d}^{-1}) F_{harici} + m_a {m_d}^{-1}(d_d \dot{x}_d + k_d x_d) \tag{3.4}$$

m_a ve m_d birbirien eşit olduğunda basitleştirilmiş hız ve konum geri besleme kuralı aşağıdaki gibi olur.

$$f_u = (d_a - d_d)\dot{x} + (k_a - k_d)x + d_d \dot{x}_d + k_d x_d \tag{3.5}$$

Sistemin kararlılığının sağlanması için m_d, k_d ve d_d katsayılarının belirlenmesi gerekir. Öncelikle sistemin çevre ile temasının olmadığını varsayıp ($F_{harici} = 0$) doğal frekans hesaplanır. Doğal frekans ve sönüm oranı sırasıyla aşağıdaki gibidir.

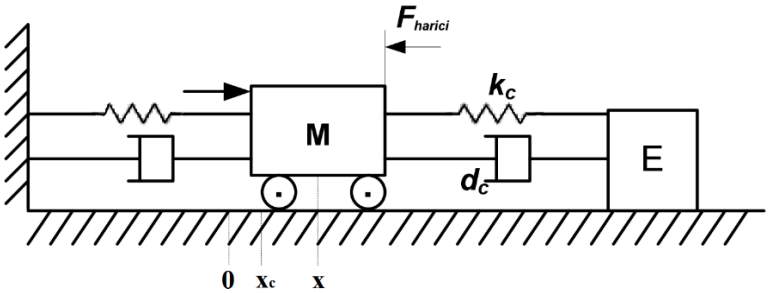
$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_d}{m_d}} \tag{3.6}$$

$$\xi = \frac{d_d}{2\sqrt{m_d k_d}} \tag{3.7}$$

m_d, k_d ve d_d pozitif tanımlı olmak üzere kalıcı durum konum ve hız hatası herhangi istenilen yörünge(x_d) için bir noktada sıfır olur.

Bir cisim ile temas halinde olması durumunda;

M kütlesine sabit bir E cismi Şekil 3.2' deki gibi bağlansın.



Şekil 3.2 : Sabit bir cisim ile temas olması durumu, Yoshikawa (1990)' dan uyarlanmıştır.

Sistemi hareket denklemi aşağıdaki gibidir.

$$d_c \dot{x} + k_c(x - x_c) = -F_{harici} \tag{3.8}$$

x_c: Harici kuvvetin sıfır olduğu durumdaki denge konumudur.

k_c değeri M ve E cisimlerinin temas yüzeylerinin elastisitesine bağlıdır. Cisim yüzeylerinden herhangi biri veya ikisi elastik olur ise bu değer küçüktür. İki yüzey de katı ise k_c büyük olur. d_c değeri cisimlerin materyallerine bağlıdır. Denklem (3.2) ve (3.8) toplanarak istenilen empedans değeriyle sistemin hareket denklemi aşağıdaki gibi olur.

$$d_d\dot{x}_d + k_d x_d + k_c x_c = m_d\ddot{x} + (d_d + d_c)\dot{x} + (k_d + k_c)x \tag{3.8}$$

Bu sistemin doğal frekansı ve sönüm oranı sırasıyla aşağıdaki gibidir.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_d + k_c}{m_d}} \tag{3.9}$$

$$\xi = \frac{d_d + d_c}{2\sqrt{m_d(k_d + k_c)}} \tag{3.10}$$

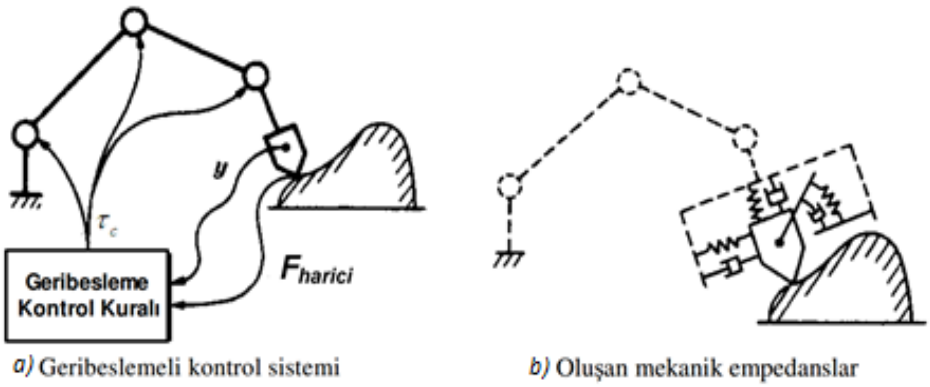
Cismin katılık ve sönüm katsayıları k_c ve d_c biliniyorsa m_d, k_d ve d_d hesaplanabilir. Ancak k_c ve d_c genelde bilinmez. Eğer k_c' nin değeri çok büyük d_c çok küçük ise, sistemin sönüm oranı denklem (3.10)' dan hesaplanamayabilir. Bu durumda d_d' nin çok büyük seçilmesi gerekir. m_d, ve k_d küçük seçilirse M ve E kütlelerine zarar verebilecek aşırı temas kuvvetinden kaçınılmış olur. Böylelikle M cismi, E cismi tarafından verilen kısıtlara daha iyi uyum sağlayacaktır. Aktif empedans kontrolün avantajı, çevre ile etkileşimli ya da etkileşimsiz görevler gerçekleştirilirken m_d, k_d ve d_d değerlerinin değiştirilerek sistemin istenilen empedans değerine uyarlanabilmesidir.

Buraya kadar tek serbestlik dereceli sistem için aktif empedans kontrol yönteminden bahsedildi. Çok serbestlik dereceli sistemler için empedans kontrol kuralı sıradaki bölümde çıkarılacaktır.

3.1.2 Birden çok serbestlik dereceli sistemler için aktif empedans yöntemi

Birden çok serbestlik derecesine sahip sistemler için aktif empedans kontrol yöntemi anlatılırken yine Yoshikawa(1990) referansından yararlanılacaktır. Şekil 3.2' de manipülatörün konum(y) vektörü, uç noktaya etki eden harici kuvvet ve eklemlerdeki motorları sürmesi için gerekli olan geribesleme kontrol kuralı gösterilmiştir. Kontrol kuralını seçilirken, uç noktanın arzu edilen empedans değerinde hareket etmesi ve uç

noktaya etki eden harici kuvvetlerden etkilenmeden istenilen yörüngeyi takip etmesini istenir. Oluşan mekanik empedans Şekil 3.2.b' de gösterilmiştir.



Şekil 3.3: Birden fazla serbestlik derecesi için aktif empedans yöntemi.

Manipülatörün 6 eksenli olduğu düşünüldüğünde uç eyleyici için arzu edilen mekanik empedans aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$F_{harici} = M_d\ddot{y} + D_d\dot{y}_e + K_d y_e \tag{3.6}$$

$$y_e = y - y_d \tag{3.7}$$

Bu denklemlerde;

y: robot kolunun çalışma uzayındaki konum vektörü,

y_d: arzu edilen konum verktörü,

F_{harici}: robot uç noktasına etki eden harici kuvvet,

M_d: boyutları 6x6 olan arzu edilen atalet matrisi,

D_d: boyutları 6x6 olan arzu edilen sönüm katsayısı matrisi,

K_d: boyutları 6x6 olan arzu edilen esneklik katsayısı matrisidir.

M_d, D_d ve K_d pozitif diyagonal matrisler olarak belirlenir. Bir sonraki adım denklem (3.6)' daki kontrol kuralını istenilen empedans değerine ulaşmak için geliştirmektir. Çevre ile temas halinde olan robot kolunun eklem uzayında tanımlanan dinamik denklemi aşağıdaki gibidir.

$$\tau = \mathrm{M}(\mathrm{q})\ddot{\mathrm{q}} + h_N(\mathrm{q}, \dot{\mathrm{q}}) \tag{3.8}$$

y ve q arasındaki ilişki yazılır;

$$y = f_y(q) \tag{3.9}$$

$$\dot{y} = J_y(q)\dot{q} \tag{3.10}$$

$$\ddot{y} = \dot{J}_y\dot{q} + J_y\ddot{q} \tag{3.11}$$

$$J_y = \frac{\partial y}{\partial q^T} \tag{3.12}$$

Harici kuvvetin oluşturacağı eklem torkları ise aşağıdaki gibi olur.

$$\tau_F = {J_y}^T(q)F_{harici} \tag{3.13}$$

Uç noktaya etki eden harici kuvvet ile birlikte manipülatörün dinamik denklemi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\tau + J^T(q)F_{harici} = M(q)\ddot{q} + h_N(q,\dot{q}) \tag{3.14}$$

τ: eklem tork matrisi,

$J(q)$: Jakobiyen vektörü

$M(q)$: 6x6 boyutlu atalet matrisi,

$h_N(q,\dot{q})$: eklem uzayında tanımlanan coriolis, merkezkaç kuvveti vd. etkiler,

q: eklem değişkenleri ,($q^T = [\theta_1\ \theta_2\ \ \theta_3\ \theta_4\ \theta_5\ \theta_6]$)

Robot kolunun çevresi ile olan ilişkisine(empedansına) ulaşmak için eklem uzayında tanımlanan denklem (3.8)' i eylem uzayında ifade etmek gerekir.

$${J_y}^{-T}(q)\tau + F_{harici} = M_y(q)\ddot{y} + h_y(q,\dot{q}) \tag{3.15}$$

$J_y(q)$: eylem uzayında tanımlı jakobiyen vektörü,

$h_y(q,\dot{q})$: eylem uzayında tanımlanan coriolis, merkezkaç kuvveti vd. etkiler,

Eylem uzayında tanımlanan atalet matrisi $M_y(q)$ ve lineer olmayan terimlerden oluşan $h_y(q,\dot{q})$ vektörünü eklem uzayındaki $M(q)$ ve $h_N(q,\dot{q})$ cinsinden ifade edersek;

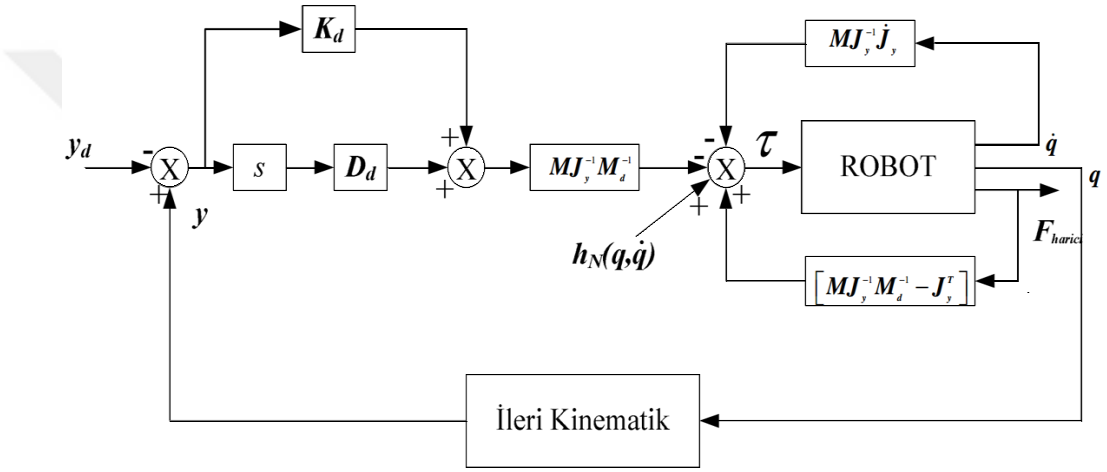
$$M_y(q) = {J_y}^{-T}M(q)\,J_y^{-1}(q) \tag{3.16}$$

$$h_y(q,\dot{q}) = J_y{}^{-T} h_N(q,\dot{q}) - M_y(q)\,\dot{J}_y(q)\dot{q} \tag{3.17}$$

Yukarıdaki denklemler düzenlenerek arzu edilen empedans parametrelerine ulaşmak için gereken eklem torkları aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{aligned}\tau = h_N(q,\dot{q}) - \ & M\ \ (q)\,J_y^{-1}(q)\,\dot{J}_y(q)\dot{q} \\ & + M(q)\,J_y^{-1}(q)M_d^{-1}(D_d\dot{y}_e + K_d y_e) \\ & + [M(q)\,J_y^{-1}(q)M_d^{-1} - \ J_y^T\ (q)]F_{harici}\end{aligned} \tag{3.18}$$

Elde edilen denklemin blok diyagramı Şekil 3.3' te verilmiştir.



Şekil 3.4: Empedans kontrol blok diyagramı, Akdoğan(2007)' den uyarlanmıştır.

3.2 Temel Empedans Kontrol

Empedans kontrolün temel amacı uç eyleyicinin konumu ve uygulanan kuvvet arasındaki istenilen dinamik ilişkiyi kurmaktır. Manipülatör kontrol sistemi, konum kontrolü yaparken aynı zamanda manipülatörün mekanik empedansını da düzenler. Bunu hız ve kuvvet arasındaki ilişkiyi düzenleyerek sağlar. Çünkü hız ve uygulanan kuvvet arasındaki ilişki bize mekanik empedansı verir. Bu ilişki aşağıdaki gibi yazılır.

$$Z_m(s) = \frac{F(s)}{\dot{X}(s)} \tag{3.19}$$

Konum $X(s)$ ifadesi kullanarak yazacak olursak;

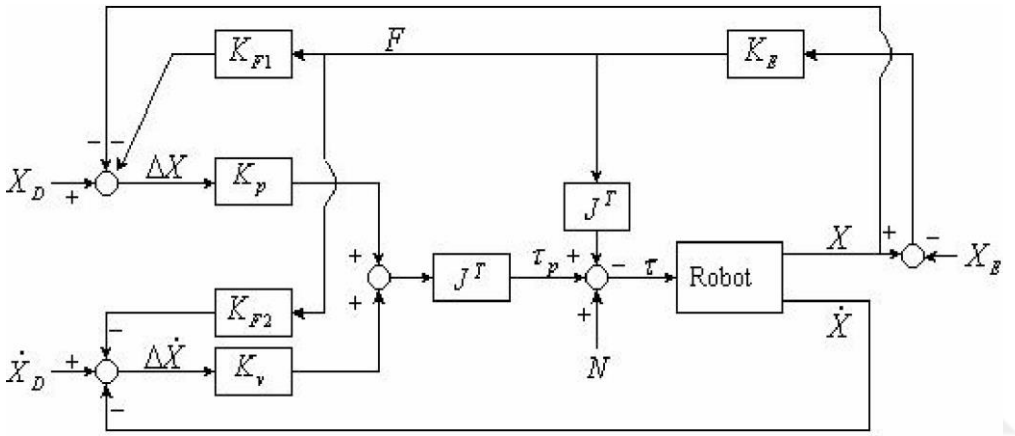
$$sZ_m(s) = \frac{F(s)}{X(s)} \tag{3.20}$$

Lineer durumlarda istenilen empedans aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$sZ_m(s) = Ms^2 + Ds + K \tag{3.21}$$

Denklem(1.5)' te sabit matrislerden M, D ve K sırasıyla arzu edilen eylemsizlik matrisi, sönümleme matrisi ve katılık matrisidir. Bu anlamda empedans, lineer ikinci derece bir sistemin kütle-yay-damper dinamiğini taklit etmektedir.

Bu anlamda en temel şekilde bir empedans kontrol yöntemi uygulanabilir. Şekil 3.5' te temel empedans kontrol şeması gösterilmiştir. Bu tez çalışmasında temel empedans kontrol yöntemi uygulanacaktır.



Şekil 3.5: Temel empedans kontrol şeması, Zeng ve Hemami (1997)' den uyarlanmıştır.

Burada ölçülen uç eyleyici kuvvetiyle çarpılan K_{F1} ve K_{F2} matrisleri arzu edilen konum ve hıza geri beslenerek, konum ve hız modifikasyonlarını sağlar. Manipülatörün katılık ve sönümleme değerleri K_p ve K_v kontrol kazançları değiştirilerek sağlanır.

3.3 Konum Tabanlı Empedans Kontrol

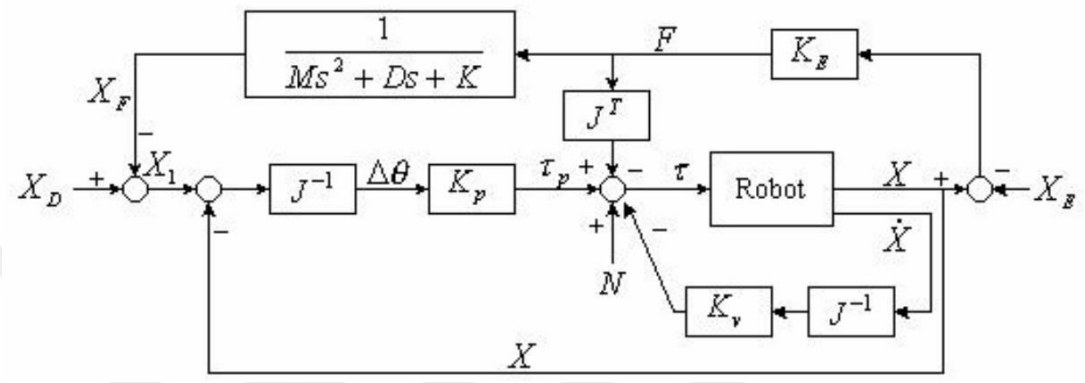
Empedans kontrol yöntemi, Şekil 3.5' te gösterildiği gibi farklı bir yolla da uygulanabilir, burada X_F eşdeğer kuvvet geri besleme yörüngesini temsil eder, X_I arzu edilen yörüngedir, diferansiyel denklem(3.22)' de ifade edilmiştir.

$$M\ddot{X}_I + D\dot{X}_I + KX_I = -F + M\ddot{X}_D + D\dot{X}_D + KX_D \tag{3.22}$$

$X_I(0) = X_D(0)$, $\dot{X}_I(0) = \dot{X}_D(0)$ iken; M, D ve K daha önce tanımlandığı gibi arzu edilen atalet, sönüm ve katılık matrisleridir. Denklem (3.22) Şekil 3.5' ten kontrol

edilerek elde edilebilir. Denklem (3.19) ve (3.20)' te olduğu gibi aynı empedans tanımını içerir. Empedans kontrol formülasyonunda X_I, X_D girişinin ve ölçülen temas kuvveti (F)' nin bir fonksiyonudur.

Şekil 3.5' te konum kontrollü alt sistem(X_F), uç eyleyici konumu olan X'in, denklem (3.22) 'de tanımlanan X_I' yı yakından takip etmesini sağlar, böylelikle manipülatörün hedef empedansı elde edilir(Pelletier ve Doyon, 1994).



Şekil 3.6: Konum tabanlı empedans kontrol bloğu, Zeng ve Hemami (1997)' den uyarlanmıştır.

Sensör tabanlı çevre ile etkileşimli geribeslemeli kontrol, empedansın en fazla ikinci dereceden olmasını ister. Bunun nedeni Volpe ve Khosla(1993) tarafından ortaya koyulmuştur. Bu nedenlerden ilki ikinci derece sistem dinamiğinin anlaşılır ve bilindik olmasıdır. İkinci neden ise yüksek dereceli sistemler için durum değişkenlerine karşılık gelen ölçümleri elde etmenin zor olmasıdır.

Belirli bir çevre için seçilen empedans değeri, manipülatörün çevreye uyguladığı kuvvetin hassas kontrolünün sağlanması için başka bir ortamda kullanıldığında tekrar düşünülmelidir. Bu problem empedans kontrolüne uyarlanmış algoritmalarla çözülebilir.

4. I-TECH EMPEDANS KONTROL BENZETİM ÇALIŞMALARI

4.1 Robot Kolu Simulink Modeli

Benzetim modeli çalışmalarında Matlab yazılımı, Simulink ve Simmechanics Multibody Toolbox kullanılmıştır. Robot kolu dinamik modeli hesap ve çözümlerinde aşağıdaki denklem kullanılmıştır.

$$\tau = M(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q}) + B\dot{q} + g(q) \tag{4.1}$$

Bu denklemde;

τ: eklem uzayında eyleyici net moment vektörü,

q: eklem değişkenleri vektörü,

M: 6x6 boyutlu atalet matrisi,

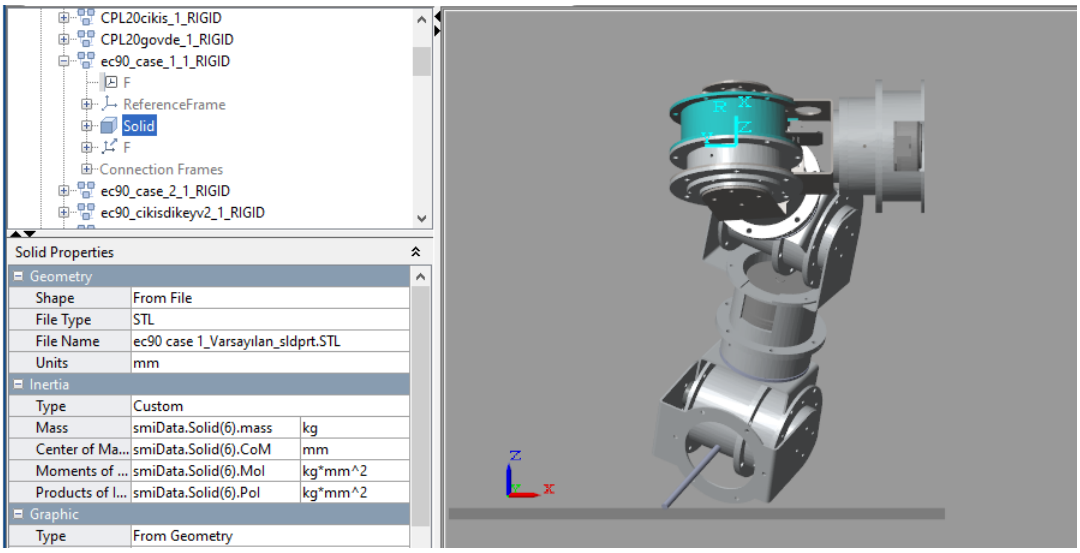
C: 6x1 boyutlu Coriolis, merkezkaç kuvvetleri vd.,

B: 6x6 boyutlu eklem sürtünme sönüm matrisi,

g: 6x1 boyutlu yerçekimi vektörünü temsil eder.

Robot kolu ileri dinamik modeli için Simmechanics aracılığı ile Solidworks programından Matlab Simulink ortamına aktarılan katı modelden yararlanılmıştır. Benzetim çalışması yapılacak kontrol sisteminin kontrol kuralına göre ekstra ileri-ters dinamik model hesabına gerek duyulmadığı yerlerde ileri dinamik model olarak robot kolu simulink modeli kullanılacaktır. Bu durumda M ve C matrislerinin hesaplanmasına gerek yoktur.

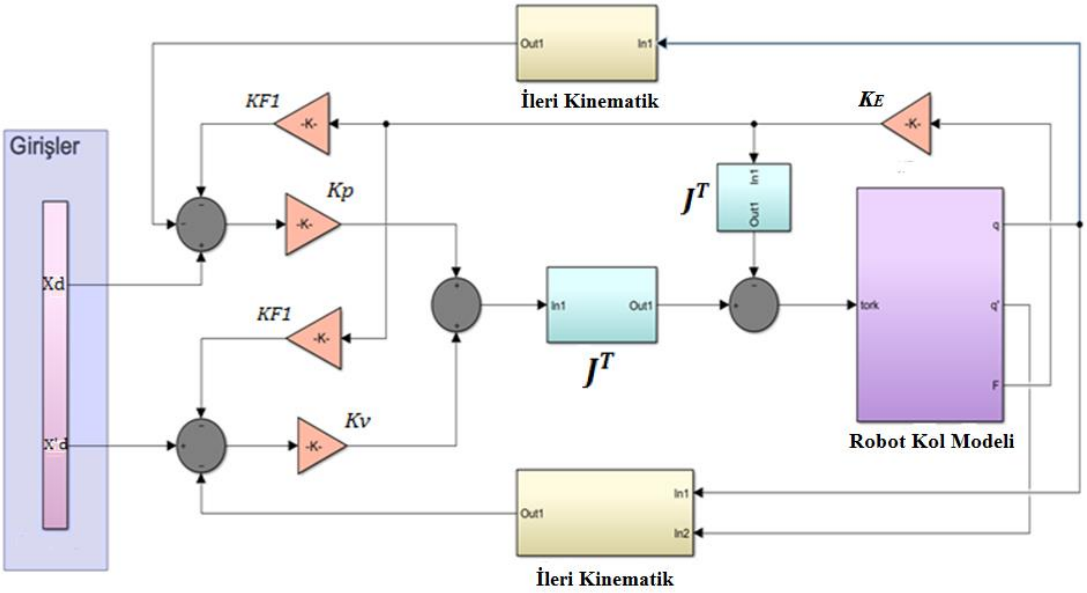
Robot kolu modeli SolidWorks programından aktarılırken otomatik olarak oluşturulan veri dosyaları içinde ihtiyacımız olan kol bileşenlerinin geometrik ve kütlesel özellikleri yer almaktadır. Dinamik denklemleri yazarken ihtiyaç duyacağımız kütle, eylemsizlik momenti, sürtünme parametrelerine buradan ulaşabiliriz. Şekil 4.1' de robot kolu bileşenlerinden birine ait data dosyasından alınan kütle özellikleri gösterilmiştir.



Şekil 4.1 : Matlab programında robot kolu bir bileşenine ait kütle özellikleri.

4.2 Temel Empedans Kontrol Benzetimi

Empedans kontrolde temel amaç, çevrenin uyguladığı kuvveti ve uç eyleyici konum kontrolünü gerçekleştirirken manipülatörün istenilen empedans değeriyle hareket etmesini sağlamaktır. Bölüm 3.2, Şekil 3.4' te blok diyagramı verilen temel empedans kontrol algoritması, simulink modeli Şekil 4.2' te verildiği gibi uygulanarak, uç eyleyiciye verilen çember çizdirme görevine karşılık sonuçlar analiz edilmiştir.



Şekil 4.2 : Temel empedans kontrol bloğu.

Şekil 4.2' teki kontrol şemasında konum modifikasyonu ölçülen kuvvetlerin K_{F1} matrisi ile çarpılarak geri besleme yapılmasıyla sağlanır, tıpkı katılık(stiffness) kontrolünde olduğu gibidir. Hız modifikasyonu ise ölçülen kuvvetlerin K_{F2} matrisi ile

çarpılıp geri beslenmesiyle oluşturulur. Eklem uzayında hata düzeltme denklemi aşağıdaki gibidir.

$$\tau_p = J^T(K_p \Delta X + K_v \Delta \dot{X}) \tag{4.2}$$

Şekil 4.3' teki kontrol döngüsü, manipülatör çevreyle temas halindeyken sönümleme sabitini değiştirme etkisine sahiptir. Bu tür empedansa birinci derceden empedans denir. Birinci derece empedans kontrolde, manipülatörün sönümlenmesi(damping) ve katılığı(stiffness) dikkate alınır. Empedans kontrol harici kuvvetlere karşı sönümleme etkisine ihtiyaç duyulduğunda kullanılır. Katılık ve sönümleme değerleri K_p ve K_v kontrol kazançlarını değiştirerek ayarlanır. K_p ve K_v 6x6 boyutlarında pozitif diyagonal matrisler olarak seçilir.

4.2.1 Katılık(Stiffness) ve sönüm(damping) katsayılarının belirlenmesi

Doğal frekans her hata bileşenindeki sistem cevabı hızını düzenler. Hızlı cevaplar için büyük olmalı ve performans hedeflerine bağlı olarak seçilmelidir. Dolayısıyla doğal frekans seçiminde istenen yörünge dikkate alınarak seçim yapılmalıdır. Bu seçimde bazı ilave faktörler vardır. Seçim konusun da bazı üst limitler vardır (Paul, 1981). Çoğu endüstriyel robot eklemleri büyük olsa da, bazı esneklikler gösterebilir. Bir eklemin esnek veya rezonans modundaki frekansını yazacak olursak;

$$\omega_r = \sqrt{\frac{K_r}{J}} \tag{4.3}$$

K_r eklem katılık(stiffness) değeri, J ise eklem atalet(inertia) terimidir. Rezonans modundan kaçınmak için doğal frekans, $\omega_n < \omega_r/2$ olacak şekilde seçilmelidir. Eklem ataleti robot kolu konfigürasyonuna göre değişir, bu yüzden maksimum değerinin hesaplanması sağlıklı olur (Lewis ve diğ.,1993).

I-TECH robot kolu öteleme hareketi yapan rijit bir cisim olduğu için J yerine kütle alınacaktır.Doğal frekans belirlenirken öncelikle robot kolu K_r katılık katsayısının belirlenmesi gerekir.

$$K_r = \frac{AE}{L} \tag{4.4}$$

A uç eyleyici yüzey alanı, E young modülü ve L ise robot kolu uzunluğudur.

I-Tech Robot Kolu uç eyleyicisinin bir kalem olduğu düşünülür ve materyalinin kauçuk olduğu kabul edildiğinde;

$E_{kauçuk} = 10 * 10^6 N/m^2$,

A=28,27*$10^{-6} m^2$,

$L = 101mm$ olduğundan,

$K_r = 2799N/m$ hesaplanır.

$J = M = 8{,}514kg$(kol ağırlığı) olduğundan, denklem (4.3)'ten $\omega_r = 18.13rad/sn$ olarak hesaplanır.

$$\omega_n \leq \frac{\omega_r}{2} \tag{4.5}$$

Rezonans durumunda kaçınılması için denklem (4.5)' e göre $\omega_n \leq 9.06rad/sn$ olmalıdır.

Denklem (3.9) ve (3.10) kullanılarak doğal frekans(ω_n) ve sönüm oranı(ξ) denklemlerinden, arzu edilen katılık(stiffness-k_d) ve sönüm katsayısı(d_d) hesaplanır.

ω_n =4rad/sn olarak seçilir. k_c levhanın katılık katsayısıdır. Ve değeri 3000N/m olarak kabul edilmiştir. Temas edilen nesne sertlik katsayısı tahmini ile ilgili detaylı çalışmalar Erickson(2003) ve Tsetserukuo(2008) kaynaklarında yer almaktadır.

$$4 = \sqrt{\frac{k_d + 3000}{m_d}} \tag{4.6}$$

$m_d = 10kg$ olarak belirlenmiş ve denklem(4.6)' dan $k_d = 1000N/m$ olarak hesaplanmıştır.

Sönüm oranı olarak kritik nokta $\xi = 1$, d_c levhanın sönüm katsayısı 300Nsn/m olarak alınmıştır.

$$1 = \frac{d_d + 300}{2\sqrt{10(1000 + 3000)}} \tag{4.7}$$

Denklem(4.7)' den $d_d = 100Nsn/m$ olarak hesaplanmıştır.

4.2.2 Benzetim sonuçları

Robot kol modeline farklı kazanç değerleriyle temel empedans kontrol yöntemi uygulanarak, sonuçları aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir. Şekil 4.3' te sırasıyla katılık, sönüm, konum ve hız modifikasyon matrisleri olan K_p, K_v, K_{F1} ve K_{F2} ve değerleri aşağıdaki gibi seçilerek benzetim çalışması yaplmıştır. K_E matrisi levhanın katılık(stiffness) katsayısı olarak belirlenmiştir. $K_{F1} = \frac{1}{k_d}$ ve $K_{F2} = \frac{1}{d_d}$ şeklinde hesaplanmıştır.

$K_P = 0.01 * diag(I_{6x6})$,

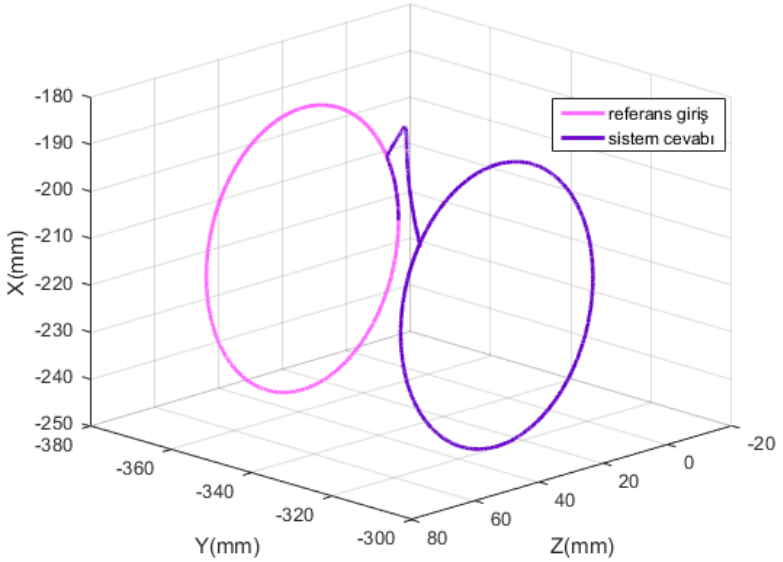
$K_V = 0.0001 * diag(I_{6x6})$,

$K_{F1} = 0.001 * diag(I_{6x6})$,

$K_{F2} = 0.01 * diag(I_{6x6})$,

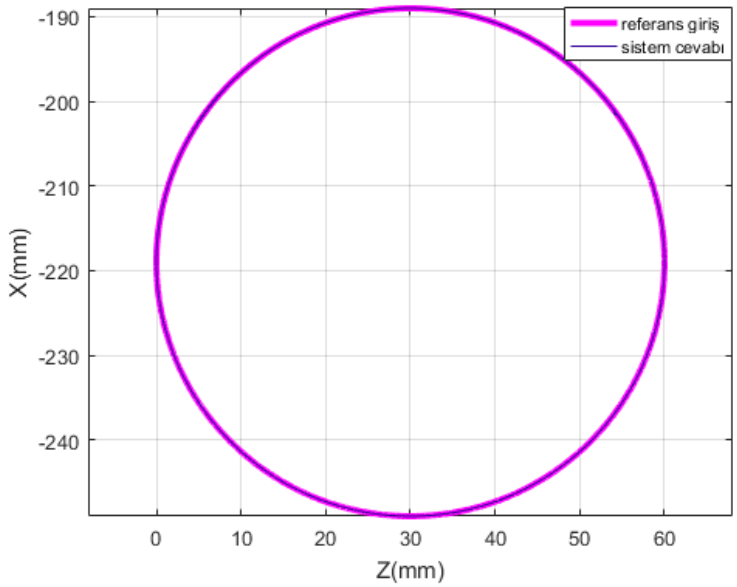
$K_E = 3000 * diag(I_{6x6})$.

Şekil 4.3' te temel empedans kontrol yöntemi ile referans giriş olarak verilen çember çizdirme görevinin robot kolu tarafından hareket eden bir levha üzerine çizimi gösterilmiştir.



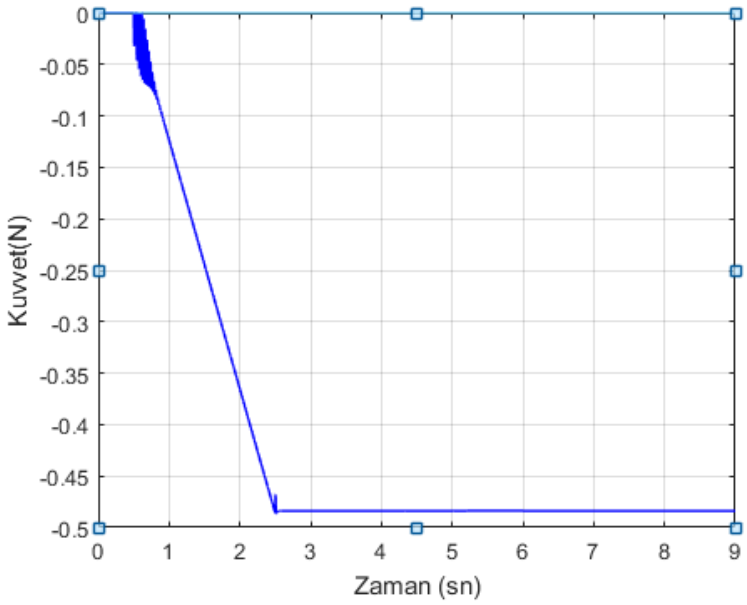
Şekil 4.3 : Temel empedans kontrol yöntemi ile hareketli levha üzerine çember çizimi üç boyutlu gösterimi.

Şekil 4.4'te çember çiziminin iki boyutta gösterimi mevcuttur. Üstüste görünen referans çizim ve robot kolu uç eyleyicisinin çizimindeki örtüşme katsayılarımızın istenilen görevi gerçekleştirmek için ne kadar uygun olduğunu göstermektedir.



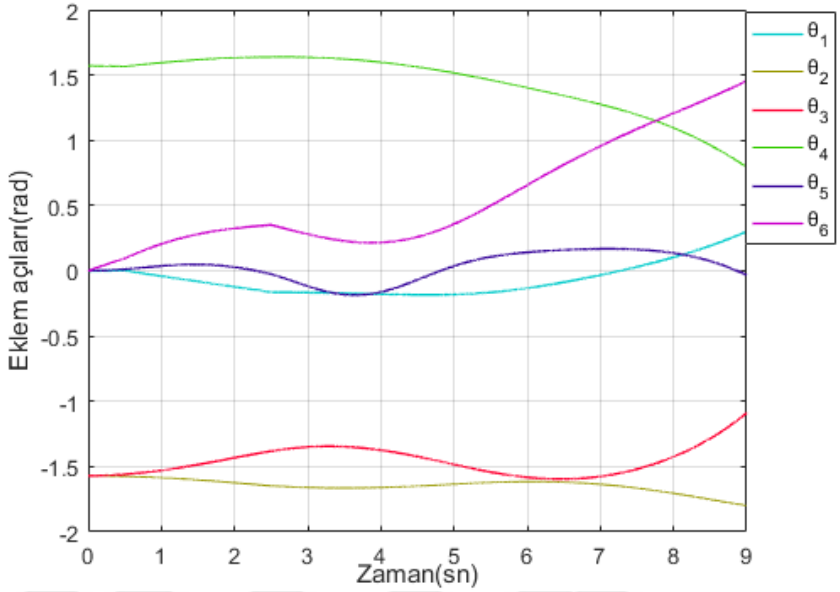
Şekil 4.4 : Çember çizimi referans girişine karşılık sistem cevabının 2 boyutlu gösterimi.

Şekil 4.5' deki grafikte temas kuvvetinin(F_{temas}) tepkisi gösterilmektedir. Temas kuvvetinin sabitlendiği noktaya kadar levha hareketinin etkisini görmekteyiz. Levha hareketi 0.5sn den başlayarak 2.5sn' ye kadar devam etmektedir. Levha belli bir konuma(50mm ileriye) geldikten sonra durur ve temas kuvveti sabit 0.48N' luk etki ile çizim işlemi gerçekleşmeye devam eder. Levha hareketinin başladığı 0.5sn civarındaki titreşimler bize uç eyleyicinin kuvvete uyum sağlama sürecindeki geçişi göstermektedir. Benzeri, daha küçük bir titreşim ise levha hareketi bittiğinde(2.5sn) civarında görülmektedir.



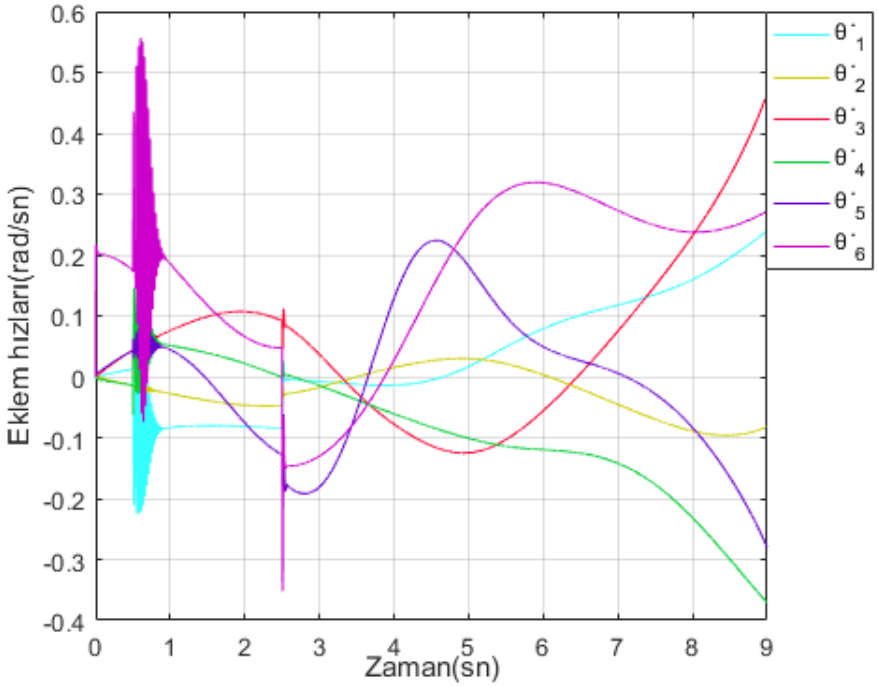
Şekil 4.5 : Uç eyleyiciye etki eden F_{temas} kuvveti.

Şekil 4.6' de eklemlerdeki açı değerlerinin değişimini görmekteyiz. Açı değerlerindeki değişimler verilen görevin gerçekleştirilmesini sağlarken robot yönelimlerinin düzgün olduğunu göstermektedir.



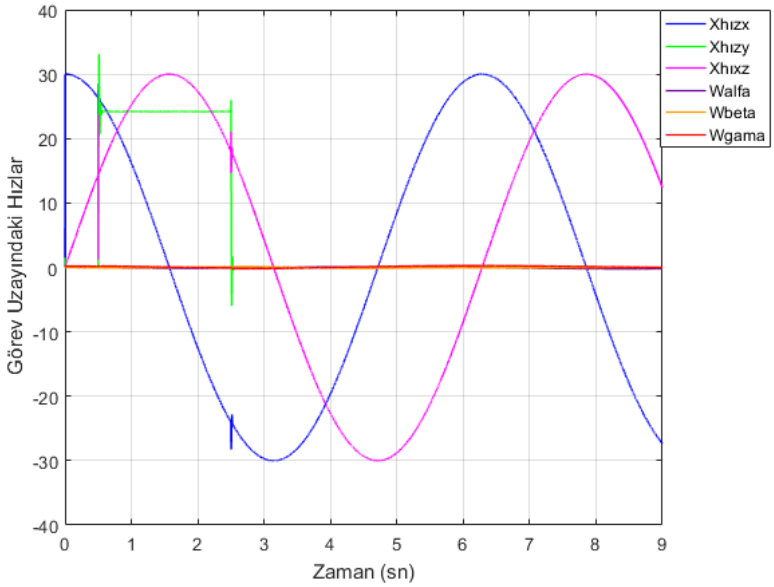
Şekil 4.6 : Eklemlerdeki açı değerleri değişimi.

Şekil 4.7' de robot kolu eklemlerine ait hız değişim grafiğini görmekteyiz. Başlangıçtaki 0-1sn aralığında hızdaki ani değişimler levha hareketinin başlamasından kaynaklı olup, 2.5sn' de levha hareketinin bitmesiyle hızlarda tekrar ani bir değişim olup sonrasında düzelmektedir.



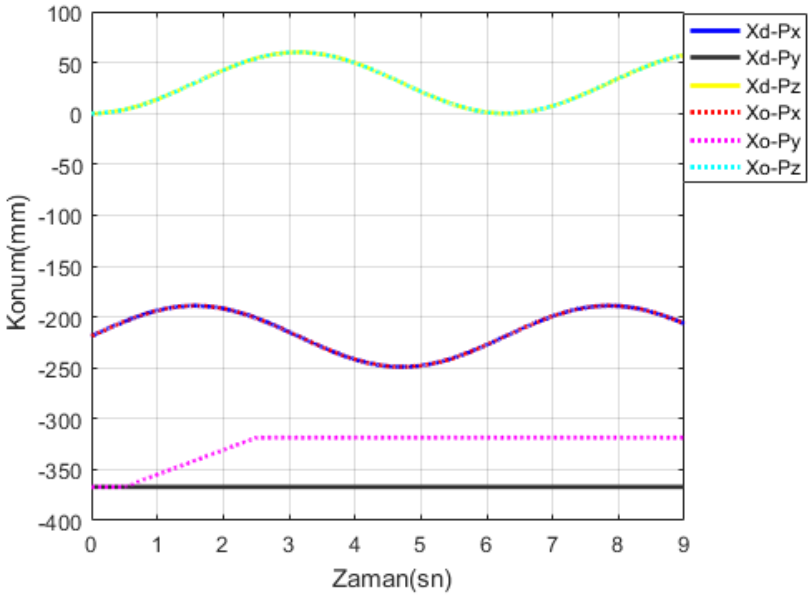
Şekil 4.7 : Eklemlerdeki hız değişimleri.

Şekil 4.8’ de eylem uzayında ifade edilen açısal ve çizgisel hızları görmekteyiz. X ve Z eksenlerindeki hızlar çember çiziminin bu eksenlerde olduğunu, Y eksenindeki 0.5-2.5sn aralığındaki hız ise levha hareketi hızını göstermektedir. Açısal hızların çok düşük değerlerde olduğu-0 etrafında salındığı görülmektedir.



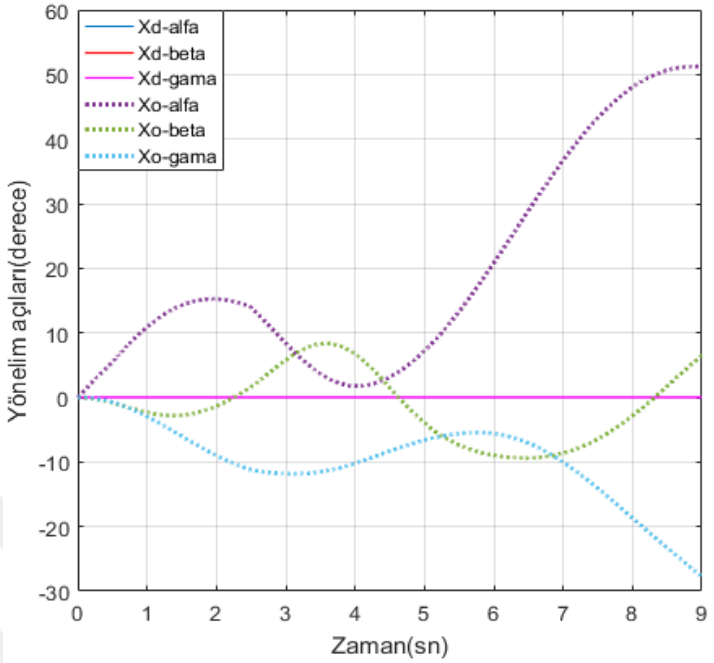
Şekil 4.8 : Uç eyleyici çizgisel ve açısal hızlar

Şekil 4.9 ve 4.10’ da çember çizimi referans girişi ile uç eyleyici çıkış değerleri üst üste çizdirilerek yörünge takibi gözlemlenmiştir. Sonraki çizimlerde hata değeri hesaplanıp çizdirilerek daha hassas bir gözlem yapılacaktır. Şekil 4.10’ da referans konumun(Xd-P) X-Y-Z eksenlerinde çizimi yapılıp, uç eyleyicinin(Xo-P) X-Y-Z eksenleri boyunca yaptığı çember çizimi yapılarak karşılaştırılmıştır.



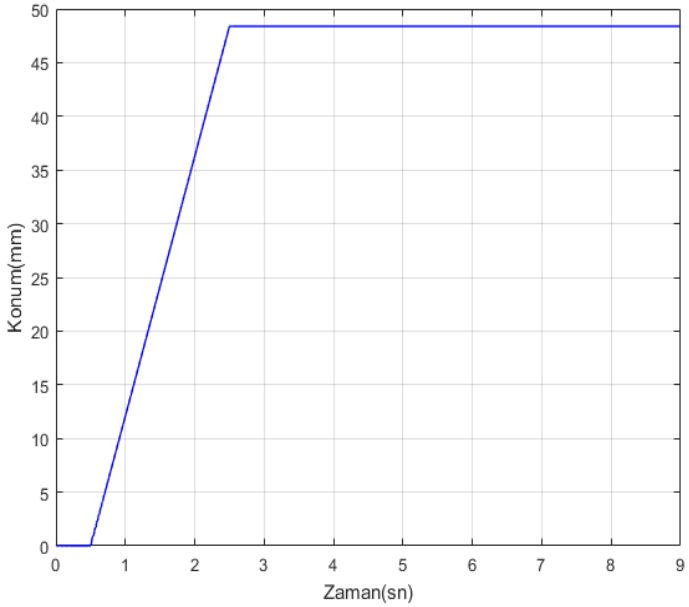
Şekil 4.9 : Referans giriş ve uç eyleyici yörünge karşılaştırmalı gösterimi.

Şekil 4.10’ da referans açı girişlerine(Xd-alfa/beta/gama,) karşılık gelen uç noktanın açı değerlerini(Xo-alfa/beta/gama) üst üste çizdirerek aynı grafikte görmekteyiz.



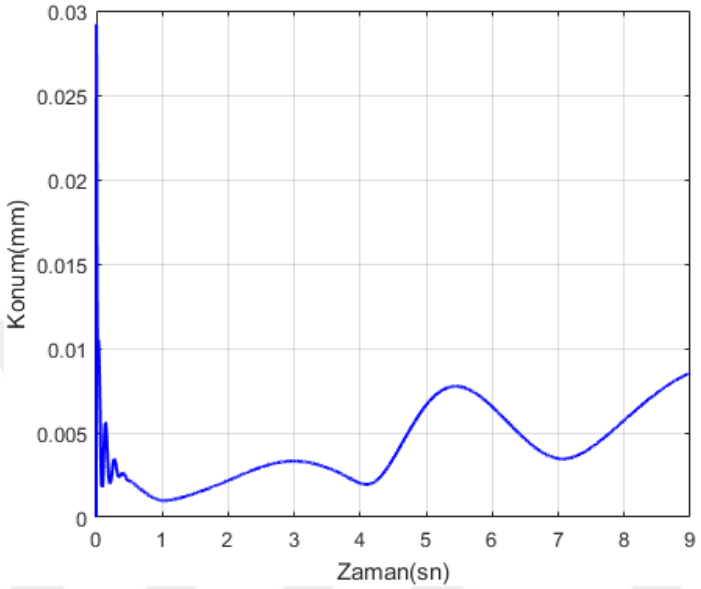
Şekil 4.10 : Referans yönelim girişleri ve uç eyleyici yönelim karşılaştırmalı.

Şekil 4.11’ de ortalama konum hata değişim grafiğini görmekteyiz. 0.5-2.5sn aralığındaki yaklaşık 48mm olan değişim levha hareketinden kaynaklanmaktadır. Kontrolcü hata oranının daha iyi gözlemlenmesi için levha hareketsiz halde iken bir çizim yaptırılarak hata değişimi gözlemlenmiştir ve gösterimine Şekil 4.12’ de yer verilmiştir.



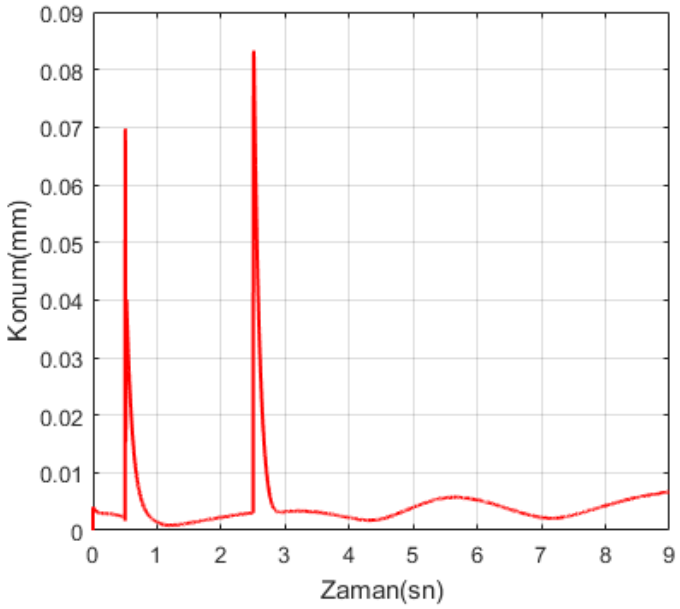
Şekil 4.11 : Levha hareketi varken ortalama konum hata değişimi gösterimi.

Levha sabit tutularak çember çizimi referans girişine karşılık gelen uç eyleyici konumu arasındaki hata hesabı yapılarak grafiği Şekil 4.12' de verilmiştir. Bu grafik, referans alınan girişten sapma miktarını(mm) olarak göstermektedir. Grafikte görüldüğü gibi başlangıçtaki hata oranının fazla görünmesi robot uç eyleyicisinin hareketin başlatılması istenen referans noktasına gelinceye kadar aldığı mesafedir. Sonrasında kabul edilebilir hata değerleriyle hareket yörüngesi takip edilebilmektedir.



Şekil 4.12 : Ortalama konum hata değişimi gösterimi(Levha hareketsizken).

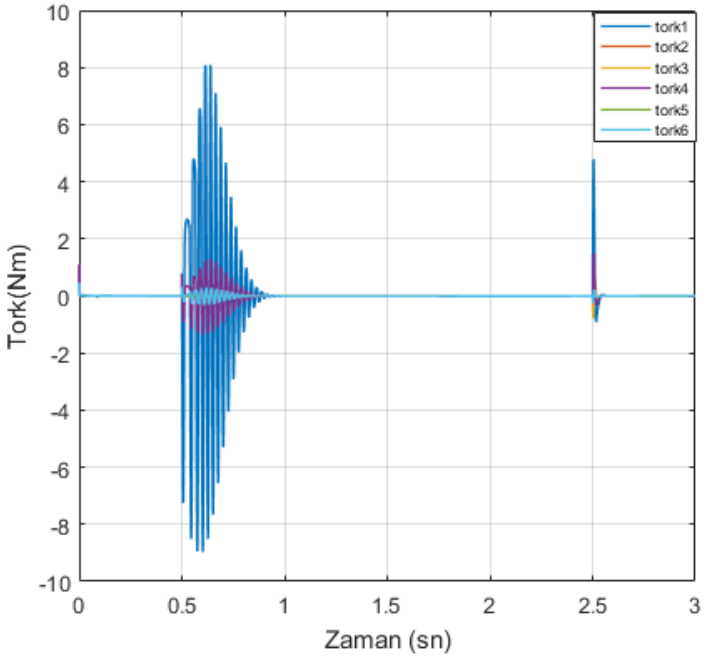
Şekil 4.13' te referans giriş ölçümüne levha hareketi dahil edilerek X-Y-Z eksenlerindeki referans ve uç eyleyici konumu arasındaki ortalama hata değeri verilmiştir.



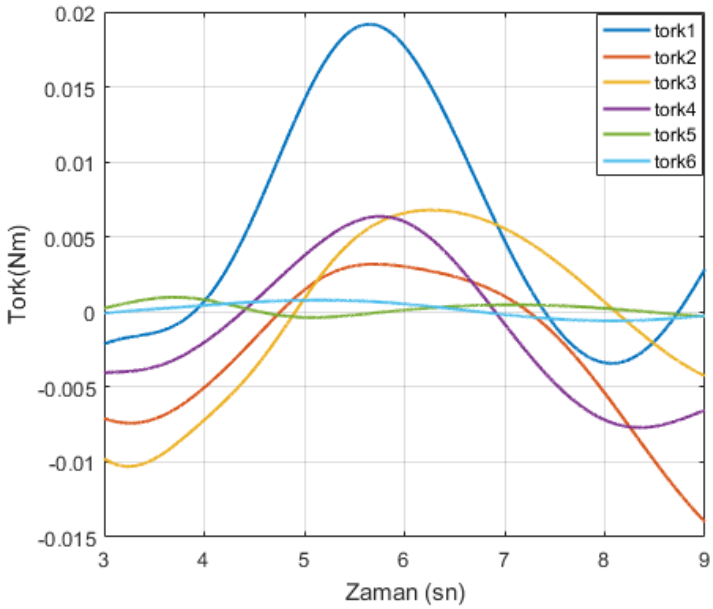
Şekil 4.13 : Levha hareketi referans giriş ölçüme dahil edilmiş ortalama konum hata grafiği.

X-Y-Z eksenlerindeki ortalama konum hatası RMS(Root Mean Square) ölçütü ile hesaplanıp 0.0076 olarak bulunmuştur.

Şekil 4.14 ve 4.15' deki grafiklerde robot kolu eklemlerine etki eden torklardaki değişim gösterilmiştir. Levha hareketi olduğu anlarda eklem torklarındaki değişim oranı levha durduğundakinden çok fazla olduğu için tork grafiği 2 ye bölünerek verilmiştir. Şekil 4.14' deki 0.5 ve 2.5sn civarlarındaki artışlar levha hareketi başlama ve bitişinden kaynaklanmaktadır.

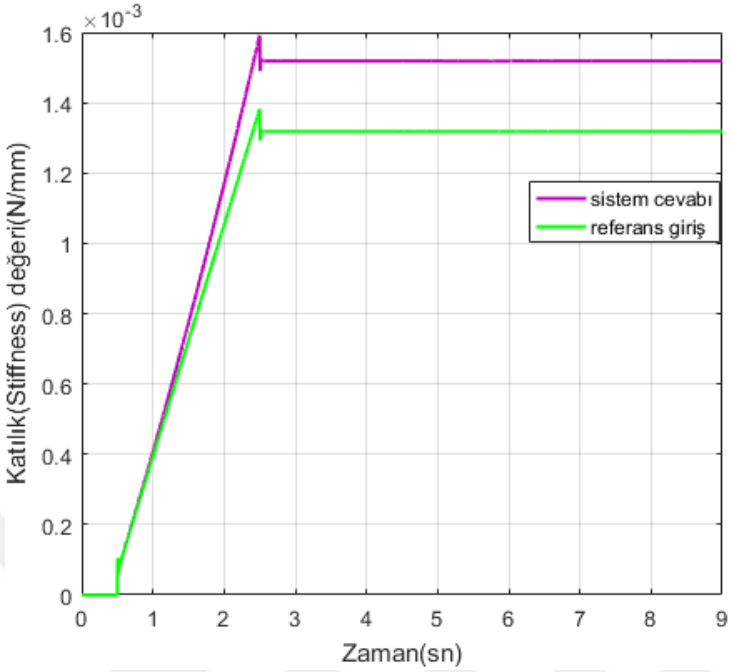


Şekil 4.14 : 0-3sn aralığında eklemlere etki eden tork değerleri.



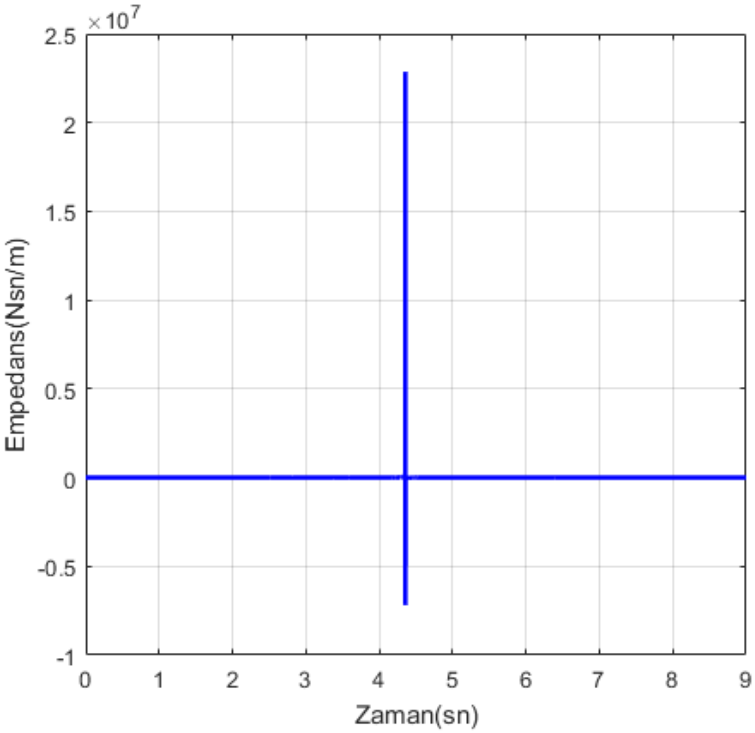
Şekil 4.15 : 3-9sn aralığında eklemlere etki eden tork değerleri.

Şekil 4.16' da referans girişe göre hesaplanan katılık değeri ile uç eyleyici konumuna göre hesaplanan katılık değerleri aynı grafikte çizdirilmiştir.



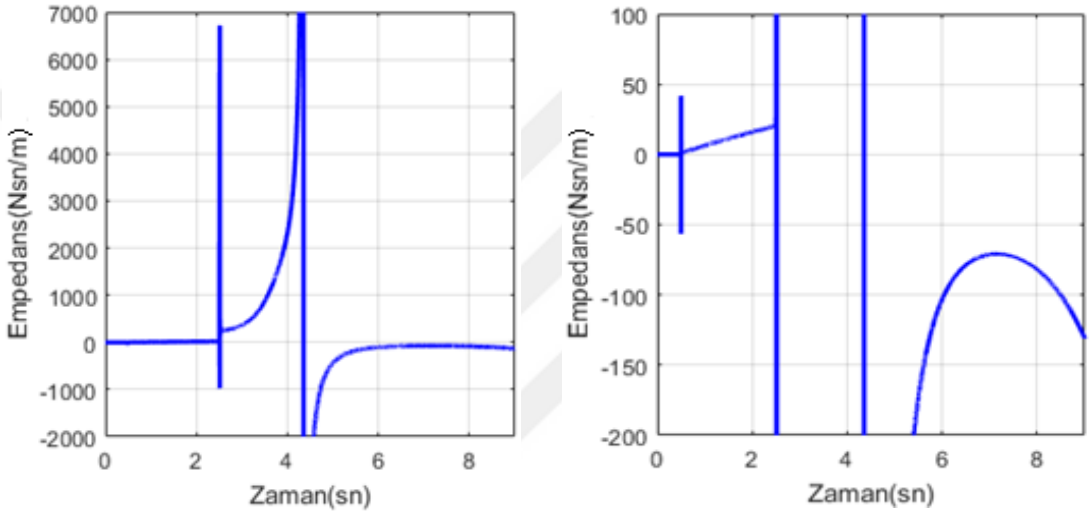
Şekil 4.16 : Arzu edilen ve uç eyleyici katılık(stiffness) değerleri değişimi.

Şekil 4.17' de uç eyleyici empedans grafiği yer almaktadır. Uç eyleyiciye etki eden kuvvet ve uç eyleyici hızı arasındaki empedans ilişkisi denklem (3.19)' a göre yazılarak hesaplanmıştır.



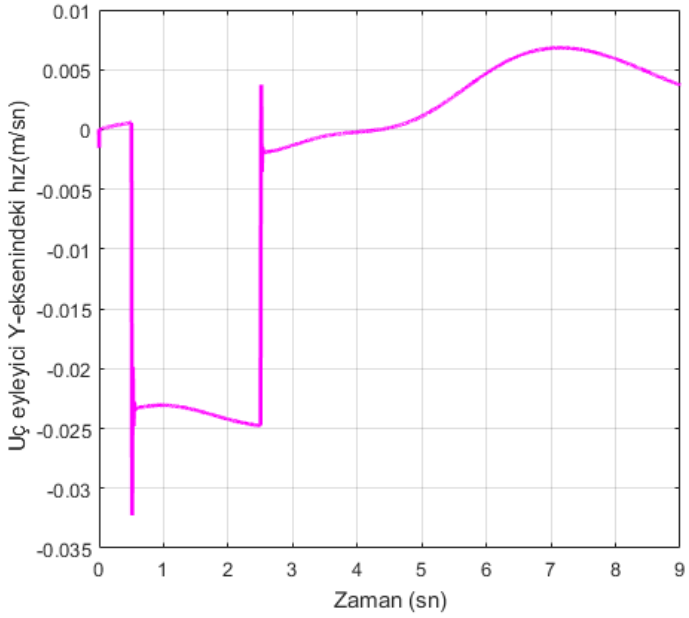
Şekil 4.17 : Empedans değişimi grafiği.

Şekil 4.17' de 4.3sn civarındaki yükselme kuvvet/hız oranının sonusuza gitmesi durumunda, yani hızın sıfıra çok yakın olduğu zamanlarda ortaya çıkmaktadır. Bu noktada Şekil 4.19' de görüldüğü gibi uç eyleyici Y-eksenindeki hız değişimi sıfıra çok yaklaşarak yön değiştirmektedir. Aynı etkiyi levha hareketinin başladığı ve bittiği zamanlar olan 0.5sn ve 2.5sn civarlarında da görmemiz gerekmektedir. Bu saniyeler civarındaki etkiyi görmek için, grafiğin y-eksenindeki oranlar değiştirilerek grafik tekrar çizilmiş ve Şekil 4.18'deki grafikler elde edilmiştir. Şekil 4.18 a)' da 2.5sn civarında, Şekil 4.18 b)' de 2.5sn civarında aynı yükselmeleri görmekteyiz. Bu artışların nedeni Şekil 4.19' daki hız grafiğindeki değişimlerden kaynaklanmaktadır.



a) b)

Şekil 4.18 : Uç eyleyici empedans değişimi grafikleri.



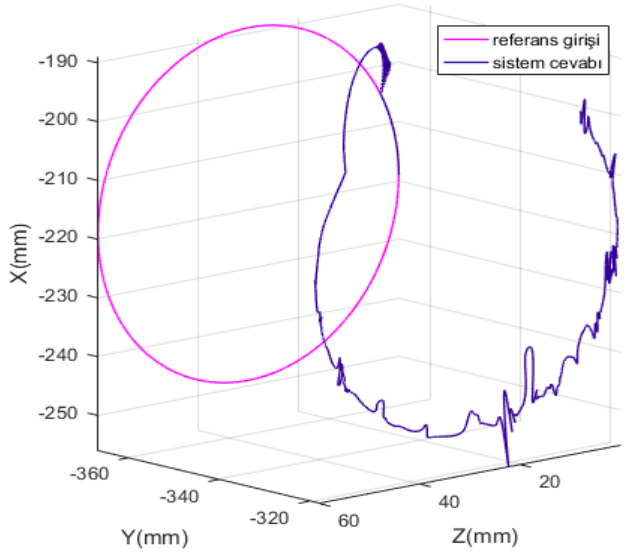
Şekil 4.19 : Uç eyleyici Y-ekseni hızı.

4.2.3 Kontrolcü katsayıları analizi

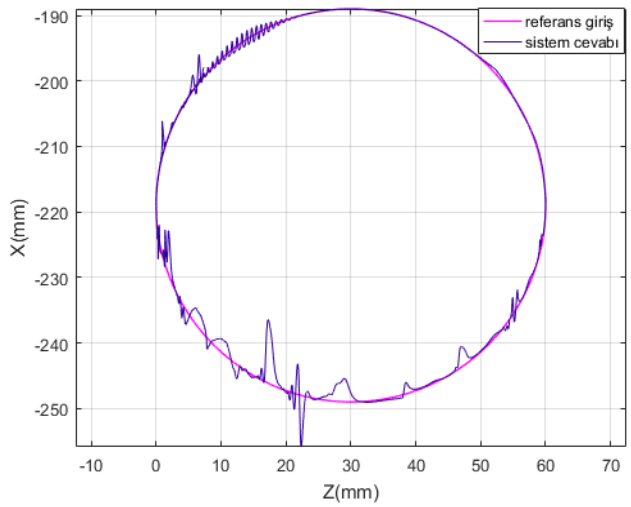
Buraya kadar verilen görevi gerçekleştirebilecek kontrolcü katsayıları seçilerek benzetim çalışması sonuçları gösterilmiştir. Bu bölümde K_p, K_v, K_{F1} ve K_{F2} katsayılarına farklı değerler verilerek sistem cevabına etkileri incelenecektir.

K_p katılık matrisi değişkenleri aşağıdaki gibi seçilerek sistem cevabı çizdirilmiş ve üç boyutlu grafiği Şekil 4.20' de gösterilmiştir. Şekil 4.21' de iki boyutlu gösterimi mevcuttur.

$K_P = 0.01 * diag(0.04\ \ 0.01\ \ 1\ \ 0.4\ \ 1\ \ 0.5)$,



Şekil 4.20 : Farklı K_p değeri için çember çiziminin üç boyutlu gösterimi.



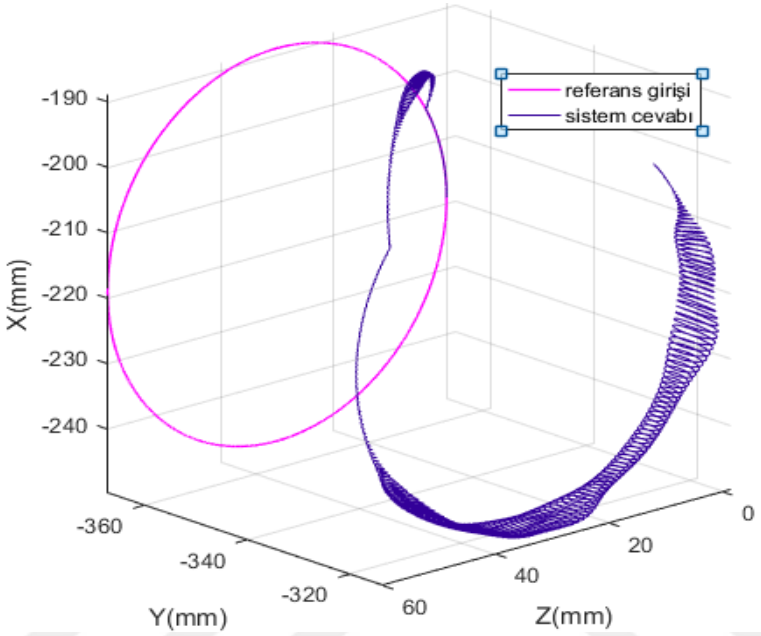
Şekil 4.21 : Farklı K_p değeri için çember çiziminin iki boyutlu gösterimi.

Şekillerden de anlaşıldığı gibi $\boldsymbol{K_p}$ matris değişkenlerini artırdığımızda robot kolu katılığını artırmış olmaktayız. Bu sebeple kuvveti karşılayacak yeterli sönüme sahip

olmayan robot kolu titreşimlerle çizim yapmaktadır. Artırılan $\boldsymbol{K_p}$ değerine karşılık sönüm katsayısı ($\boldsymbol{K_v}$) artırıldığında bu titreşimler belirli ölçüde azalmaktadır.

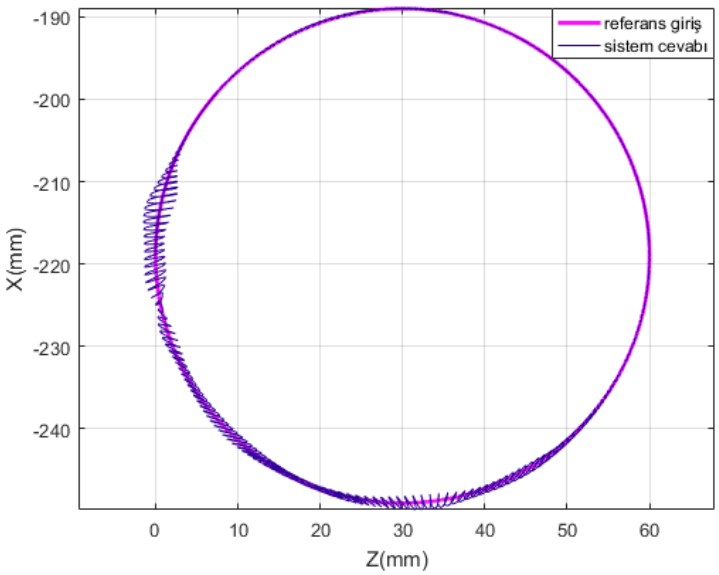
$\boldsymbol{K_v}$ sönüm matrisi aşağıdaki gibi değiştirildiğinde referans girişe karşılık uç eyleyici hareketi Şekil 4.22' de üç boyutlu, Şekil 4.23' te iki boyutlu çizimiyle gösterilmiştir.

$K_v = 0.0001 * diag(5\ \ 2\ \ 2\ \ 2\ \ 1\ \ 100)$,



Şekil 4.22 : Farklı K_v değeri için çember çiziminin üç boyutlu gösterimi.

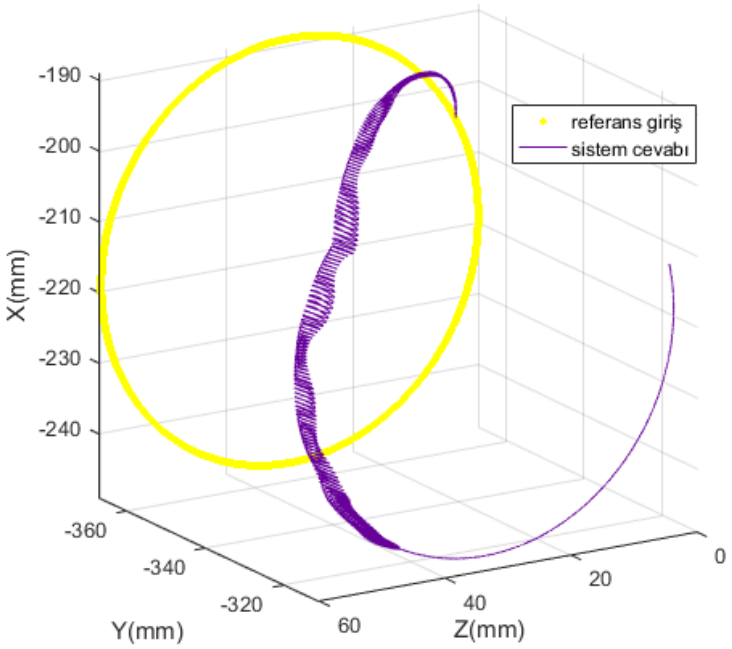
K_v sönüm katsayı matrisi değerlerini azalttığımızda robot uç eyleyicisi levha hareketiyle karşılaştığı temas kuvvetine yeterli sönümü sağlayamadığı için titreşimler meydana gelmektedir. Bu nedenle sönüm katsayı matrisi seçimi daha iyi yapılmalıdır.



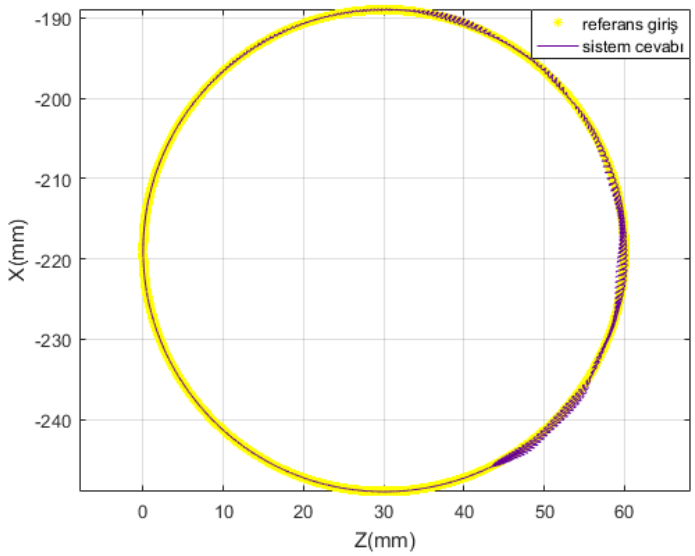
Şekil 4.23 : Farklı K_v değeri için çember çiziminin iki boyutlu gösterimi.

K_{F1} matrisi konum modifikasyon matrisidir. Matris değerleri aşağıdaki gibi değiştirildiğinde, sistem cevabının nasıl etkilendiği Şekil 4.24' te üç boyutlu gösterimiyle, Şekil 4.25' te iki boyutlu gösterimiyle yer almaktadır.

$K_{F1} = 5000 * diag(I_{6x6})$,



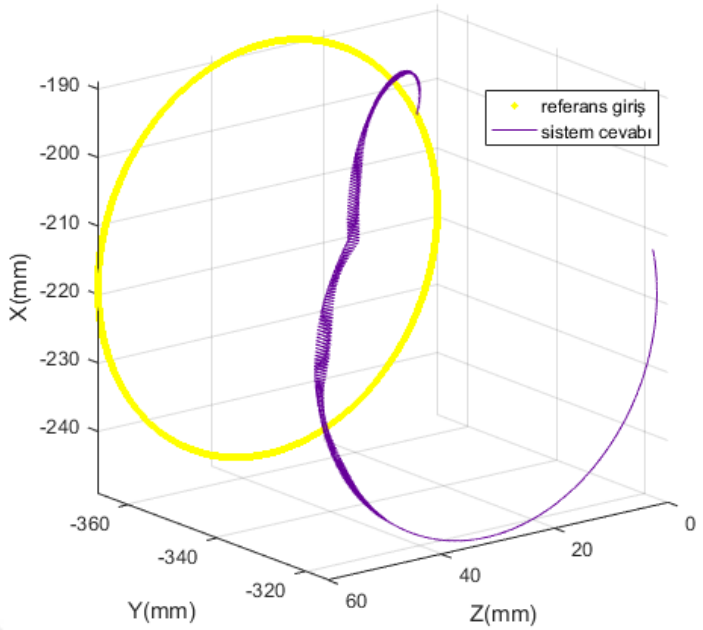
Şekil 4.24 : Farklı K_{F1} değeri için çember çiziminin üç boyutlu gösterimi.



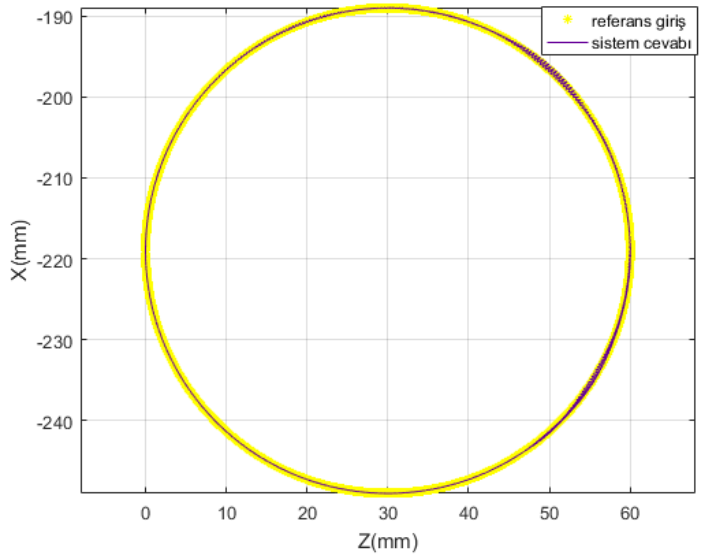
Şekil 4.25 : Farklı K_{F1} değeri için çember çiziminin iki boyutlu gösterimi.

K_{F2} hız sönüm katsayı matrisi aşağıdaki gibi seçildiğinde referans giriş ve sistem cevabı çizimi Şekil 4.26 ve Şekil 4.27' de verilmiştir.

$K_{F2} = 10000 * diag(I_{6x6})$,



Şekil 4.26 : Farklı K_{F2} değeri için çember çiziminin üç boyutlu gösterimi.

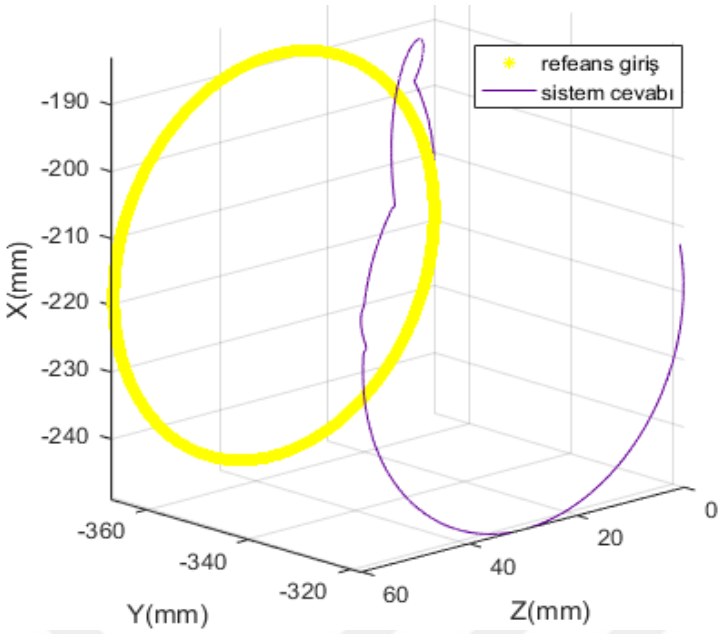


Şekil 4.27 : Farklı K_{F2} değeri için çember çiziminin iki boyutlu gösterimi.

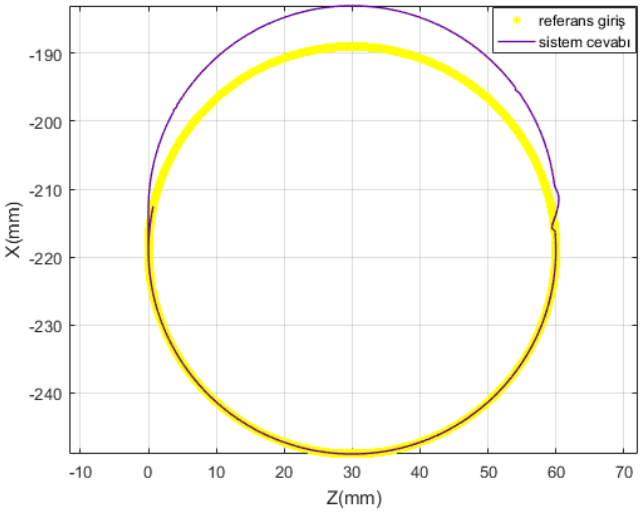
K_{F1} ve K_{F2} modifikasyon matrisleri değişim oranlarına bakıldığında çok büyük değerlere kadar sistem cevabını etkilemediği görülmüştür.

4.2.4 Bozucu etkisi analizi

Robot koluna X-ekseni boyunca bozucu bir kuvvet uygulanmıştır. Hareketli levha üzerine yapılacak olan çember çizimi referansına karşılık uç eyleyici konumu aşağıdaki gibi olur. Etki eden bozucu kuvveti 0.1N büyüklüğünde olup 0-3sn aralığında uygulanmaktadır. Şekil 4.28' de üç boyutlu, Şekil 4.29' da iki boyutlu çizimler yer almaktadır.



Şekil 4.28 : Bozucu etki ettiğinde çember çizimi cevabının üç boyutlu gösterimi.



Şekil 4.29 : Bozucu etki ettiğinde çember çizimi cevabının iki boyutta gösterimi.

Şekil 4.28 ve 4.29' da görüldüğü gibi bozucu etkisi olmadan belirlenen katsayılarla bozucu etki ettiğinde sistem cevabı referans yörüngeyi takip edememekte ve bozucu etkisi kadar sapma olmaktadır. Bu sapmayı gidermek için yeni kontrolcü katsayı matris değerleri aranıp kontrol tekrar gerçekleştirilmiştir. Deneme-yanılma yöntemi kullanılarak belirlenen yeni katsayı matrisleri aşağıda verildiği gibidir.

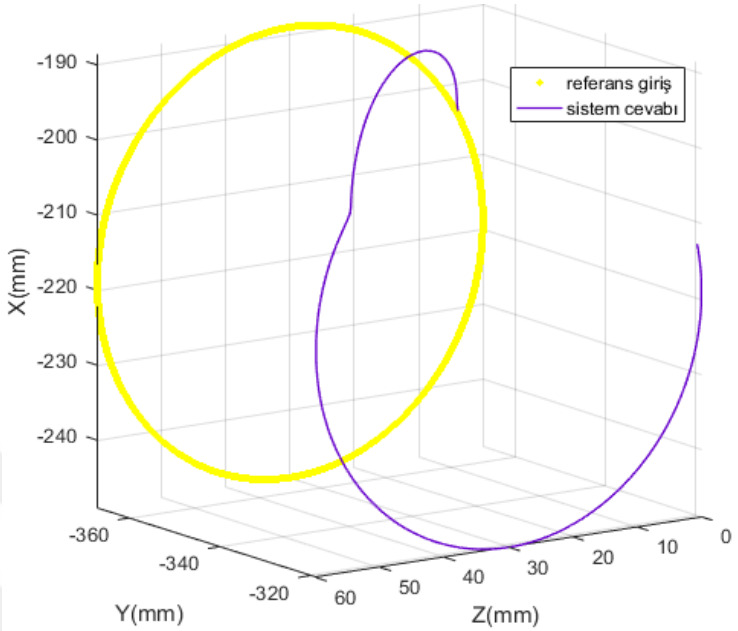
$K_P = 0.01 * diag(7\ \ 1\ \ 1\ \ 1\ \ 1\ \ 1),$

$K_V = 0.001 * diag(10\ \ 10\ \ 0.1\ \ 0.1\ \ 0.1\ \ 0.1),$

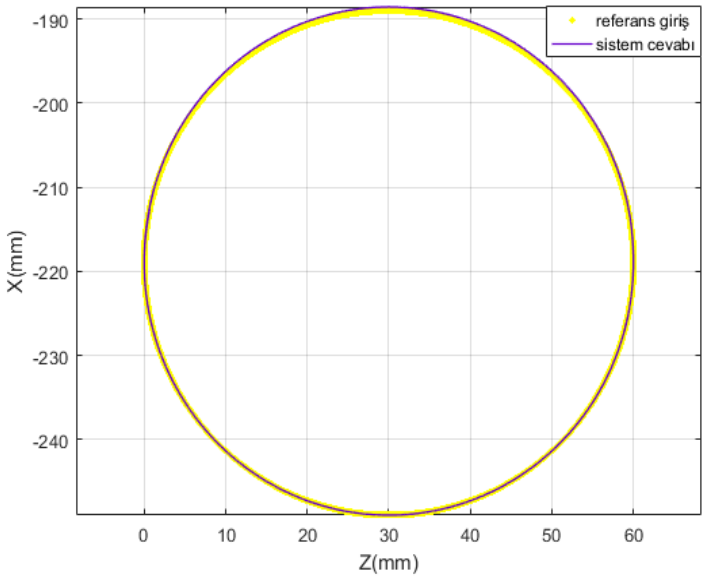
$K_{F1} = 0.01 * diag(7\ \ 1\ \ 1\ \ 1\ \ 1\ \ 1),$

$K_{F2} = 0.001 * diag(I_{6x6}),$

Yukarıdaki gibi seçilen matris değerleriyle hareketli levha üzerine çember çizimi referans girişine karşılık sistem cevabı, Şekil 4.30 ve 4.31' de sırasıyla üç ve iki boyutlu çizimleriyle yer almaktadır.



Şekil 4.30 : Bozucu etki eden kontrollü çember çizimi üç boyutlu gösterimi.

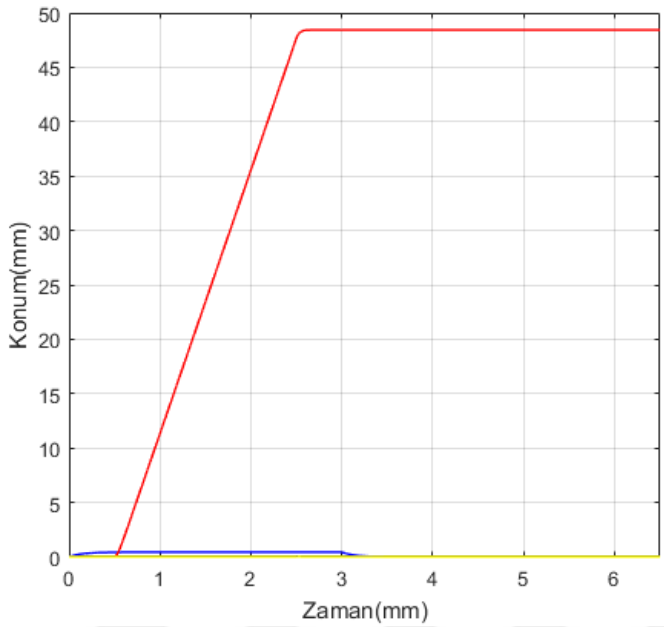


Şekil 4.31 : Bozucu etki eden kontrollü çember çizimi iki boyutlu gösterimi.

Şekil 4.31' de X-ekseni boyunca uygulanan bozucu etkisini 0-3sn aralığına denk gelen çember üst kesitinde görebilmekteyiz. Bu etki hata oranı hesabıyla konum hata çizimi grafiğinde daha net görülecektir.

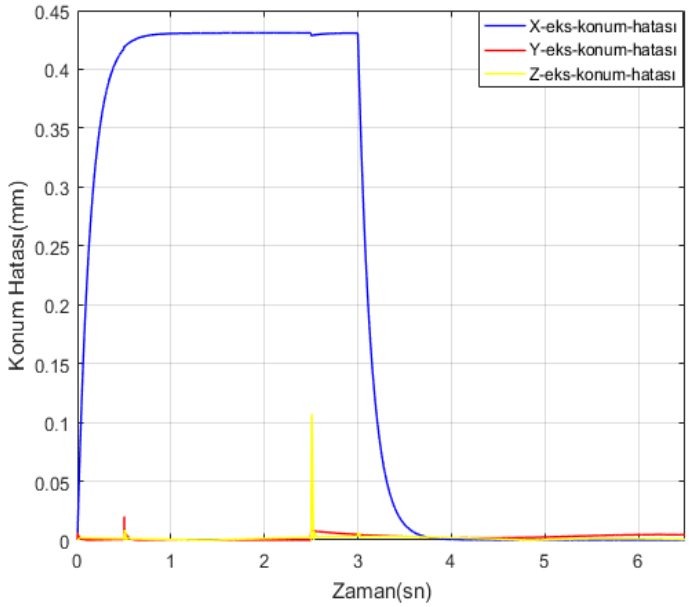
Şekil 4.32' de X-Y-Z eksenlerindeki çember referans girişine karşılık uç eyleyici çiziminin X-Y-Z eksenleri arasındaki fark alınarak hata grafiği gösterilmiştir. Kırmızı

renkli olan çizim Y eksenindeki hatayı göstermektedir. 0-50mm arasındaki yer değiştirme levha hareketinden kaynaklıdır. X ve Z eksenlerindeki hatanın daha net gösterilmesi için referans girişe levha hareketi dahil edilerek çizim yapılmıştır.



Şekil 4.32 : X-Y-Z eksenlerindeki konum hatası.

Hatanın daha net görünmesi için ölçülen referans giriş üzerine levha hareketi dahil edilerek hata grafiği tekrar çizdirilmiş ve Şekil 4.33' te gösterilmiştir.

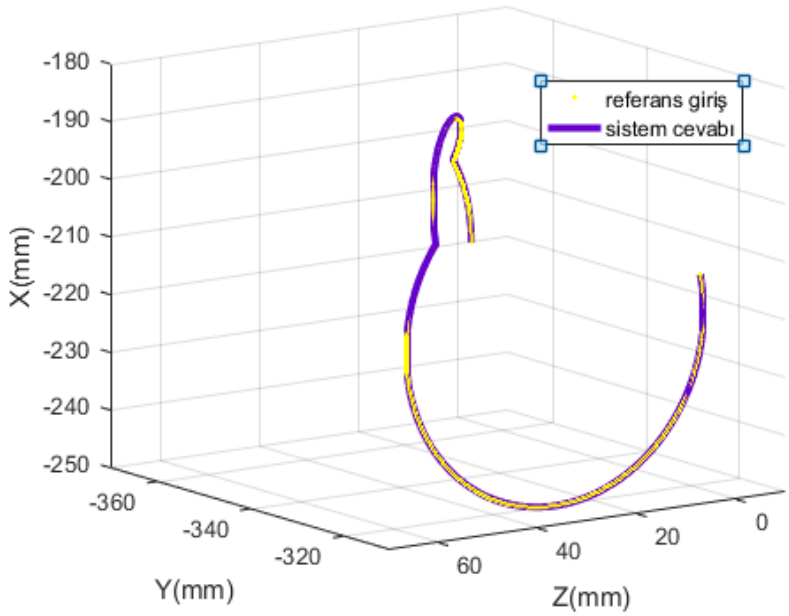


Şekil 4.33 : Referans girişe levha hareketi dahil edilmiş hata grafiği.

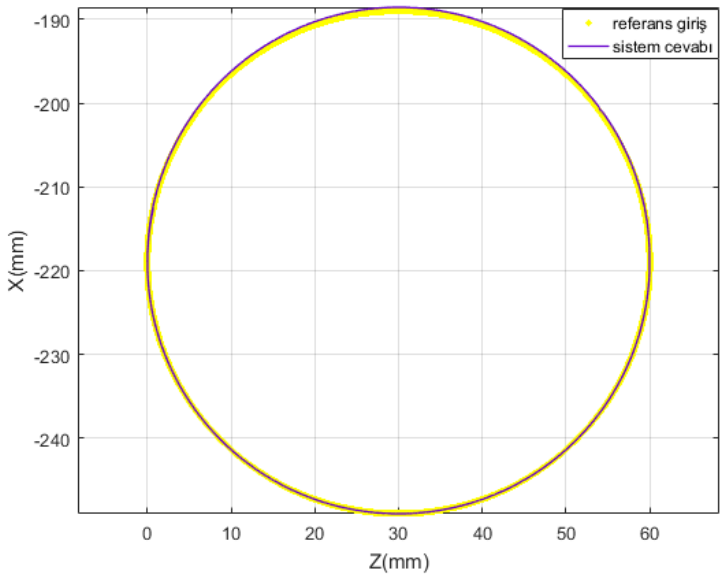
Şekil 4.33' teki grafikte Y ve Z eksenlerindeki hataların daha az olduğunu görmekteyiz. X- eksenindeki görece yüksek olan hata 0-3sn aralığında etki eden

bozucu kuvvetten, 0.5sn ve 2.5sn civarındaki artışlar ise levha hareketinden kaynaklanmaktadır. Eksenlerdeki ortalama konum hatası 0.2763 olarak hesaplanmıştır.

Referans girişe levha hareketi dahil edilmiş ölçümlerle yapılan çizimlerdeki grafikler Şekil 4.34 ve Şekil 4.35' te yer almaktadır.



Şekil 4.34 : Referans girişe levha hareketi dahil edilmiş sistem cevabı grafiği.



Şekil 4.35 : Referans girişe levha hareketi dahil edilmiş sistem cevabı iki boyutlu gösterimi.

4.3 Nelder-Mead Optimizasyon Yöntemi

Robot kolu empedans kontrolün daha iyi yapılabilmesi için kontrolcü katsayılarının daha iyi seçilebileceği yapılmış ve bu amaçla bir optimizasyon yöntemi aranmıştır. Matlab programı kütüphanesinden yararlanılarak "fminsearch" komutu kullanılıp yeni katsayı matrisleri belirlenmiştir. Bu komut arama yapacağı alt ve üst sınırlar ile başlangıç koşulu istemektedir. Kontrolcü alt sınırı, katsayı matrisleri negatif olamayacağı için 0 olarak, üst sınırı ise geniş bir aralıkta tarama yapılabilmesi için 100 olarak verilmiştir. Başlangıç koşulu deneme-yanılma yöntemi ile belirlenen katsayılar olarak girilmiş ve program çalıştırılmıştır. Hata fonksiyonu referans giriş ile sistem cevabı arasındaki konum farkı alınarak oluşturulmuş ve hatayı minimize eden parametreler program tarafından belirlenmiştir.

"fminsearch" komutu optimizasyonu Nelder-Mead yöntemi ile gerçekleştirir. Nelder-Mead tekniği John Nelder & Roger Mead (1965) tarafından önerilmiştir. Doğrudan aramaya dayalı bir optimizasyon yöntemidir. Çok boyutlu bir uzayda bir fonksiyonun minimum veya maksimum değerini bulmak için yaygın olarak uygulanan sayısal bir yöntemdir. Türevlerin bilinemediği doğrusal olmayan optimizasyon problemlerine uygulanır. Bununla birlikte, Nelder-Mead tekniği, alternatif yöntemlerle çözülebilen problemler üzerine durağan olmayan noktalara yakınsamayı sağlayan sezgisel bir arama yöntemidir. İki değişken için bir tek nokta üçgen olup, yöntem bir üçgenin üç köşesindeki işlev değerlerini karşılaştıran bir model araştırmasıdır. F (x, y) 'nin en büyük olduğu en kötü tepe noktası reddedilir ve yeni bir tepe ile değiştirilir. Yeni bir üçgen oluşur ve arama devam eder. İşlem, köşelerdeki fonksiyon değerlerinin giderek küçüldüğü bir dizi üçgen oluşturur (farklı şekillere sahip olabilir). Üçgenlerin boyutu azaltılır ve minimum noktanın koordinatları bulunur. Algoritma simplex terimi kullanılarak ifade edilmiştir ve N (genelleştirilmiş bir üçgen N boyutlarında) değişkeninin bir fonksiyonunun minimumunu bulacaktır. Bu yöntem oldukça verimlidir.

4.3.1 Optimizasyonlu benzetim sonuçları

Y–ekseni boyunca hareket eden levha üzerine yapılan çember çizimi görevli modelin kontrolcü katsayıları optimize edilerek elde edilen K_p, K_v, K_{F1} ve K_{F2} matris parametreleri aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

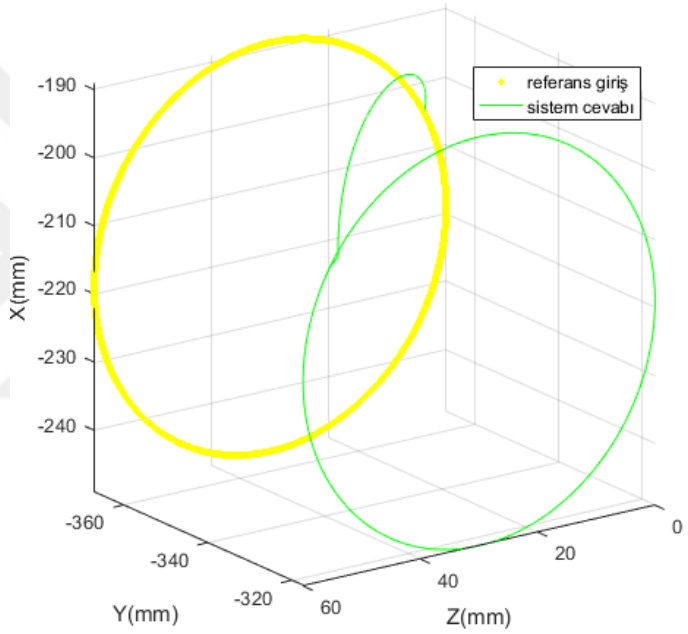
$K_P = 10^{-4} * diag(13\ \ 2\ \ 13\ \ 9\ \ 14\ \ 8)$,

$K_V = 10^{-4} * diag(391\ \ 4097\ \ 502\ \ 74\ \ 645\ \ 213)$,

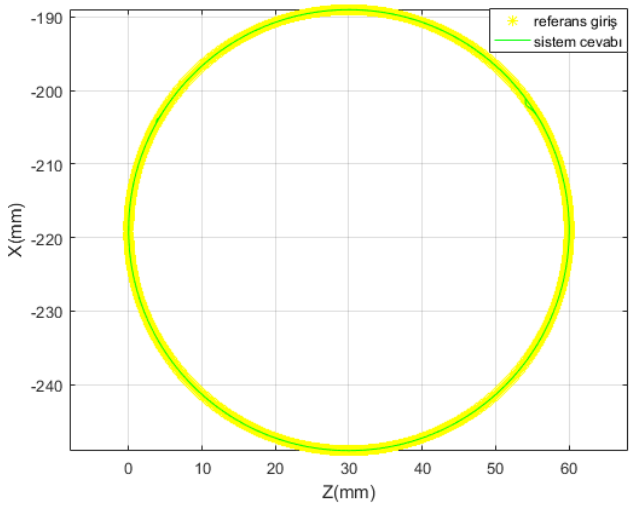
$K_{F1} = 10^{-4} * diag(11\ \ 12\ \ 10\ \ 11\ \ 12\ \ 12)$,

$K_{F2} = 10^{-4} * diag(8488\ \ 6111\ \ 9333\ \ 7367\ \ 5703\ \ 5570)$,

Belirlenen K_p, K_v, K_{F1} ve K_{F2} matrisleriyle yapılan çizimlerde sistem cevabı üç boyutlu gösterimi Şekil 4.36' da, iki boyutlu gösterimi Şekil 4.37' de yer almaktadır. Levha hareketliyken, optimize edilmiş parametrelerle yapılan ve deneme-yanılma yöntemiyle seçilen parametrelerle yapılan çizimler kıyaslandığında gözle görülür bir fark olmamaktadır. Ancak hata çizimlerini incelediğimizde optimize edilmiş parametrelerle yapılan çizimlerde hata oranının daha az olduğu görülmektedir.

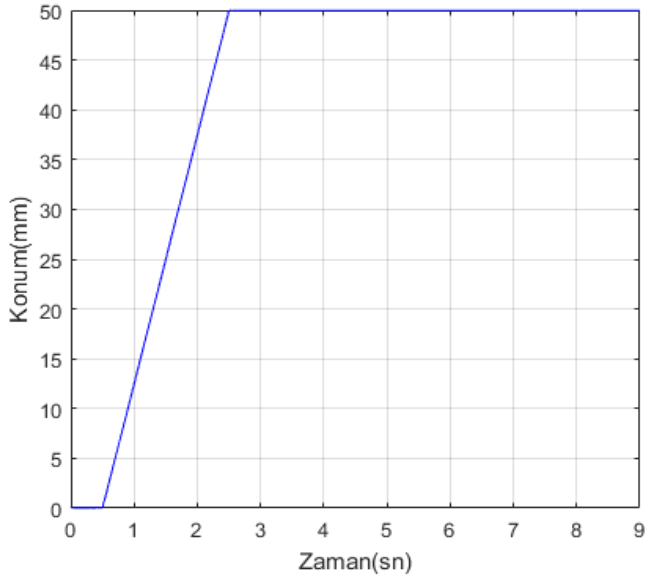


Şekil 4.36 : Optimize edilmiş parametrelerle çember çizimi üç boyutlu gösterimi.



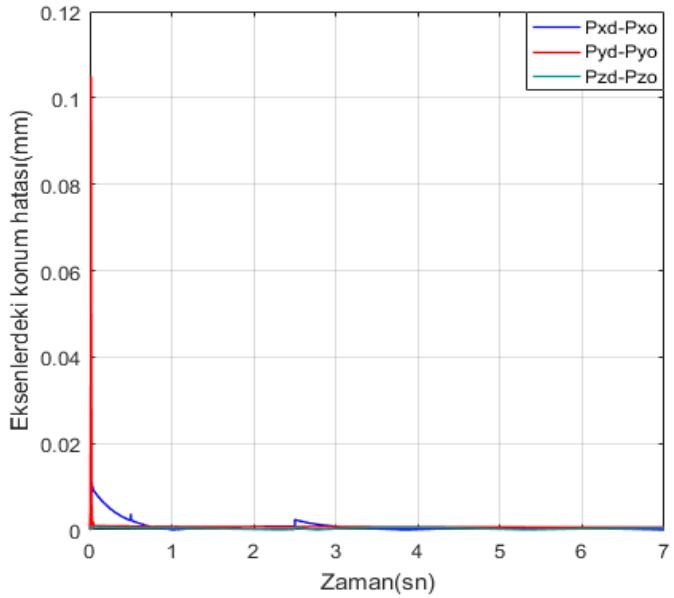
Şekil 4.37 : Optimize edilmiş parametrelerle çember çizimi iki boyutlu gösterimi.

Levha hareketliyken referans konum ile uç eyleyici konum hata grafiği Şekil 4.38' de görülmektedir. 0.5-2.5sn arasındaki değişim levha hareketinden kaynaklanmaktadır. Şekilde görüldüğü gibi 50mm kadar hareket eden levha yüzeyine yapılan çizimde optimize edilmiş parametrelerle hata daha küçük olmuştur.



Şekil 4.38 : Levha hareketliyken referans konum ile uç eyleyici konum fark grafiği.

Optimize edilmiş parametrelerle hareketli levha üzerine yapılan çizimde konum hata oranı hesaplanması için referans giriş ölçümüne levha hareketi dahil edilmiş ve konum hata grafiğine Şekil 4.39' da yer verilmiştir. Pxd, Pyd ve Pzd, x-y-z eksenleri referans konumları; Pxo, Pyo ve Pzo, x-y-z eksenleri uç eyleyicinin konumlarıdır.



Şekil 4.39 : Optimize edilmiş parametrelerle x-y-z eksenlerindeki konum hata değişimi.

X-Y-Z eksenlerindeki ortalama konum hatası RMS(Root Mean Square) ölçütü ile hesaplanıp 0.0013 olarak bulunmuştur. Bu durumda deneyerek belirlenen katsayılarla yapılan kontrolde eksenlerdeki konum hata ortalaması değerinin 0.0076 olduğunu hatırlarsak kontrolcünün yaklaşık 6 kat daha iyileştirildiğini söylememiz mümkün.

4.3.2 Sisteme bozuculu dahil edilen kontrolcü katsayı optimizasyonu

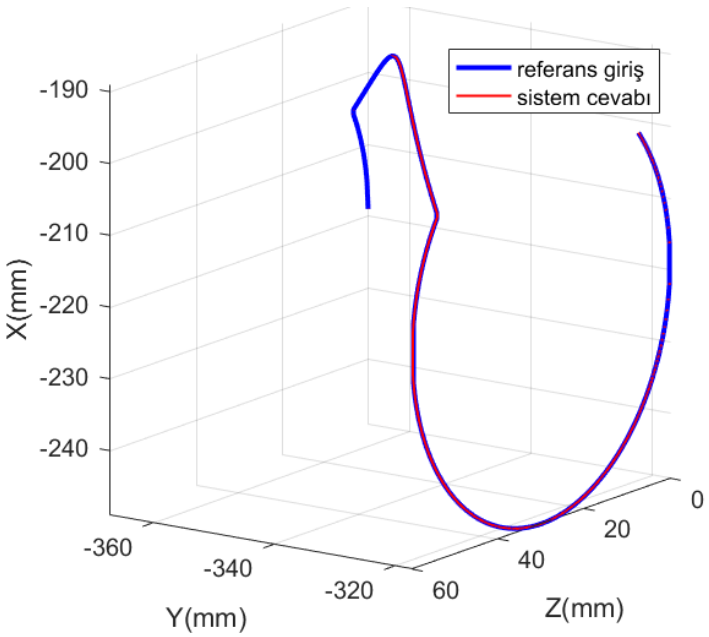
Sisteme bozucu bir kuvvet girişi dahil edildiğinde çember çizdirme görevi gerçekleştirilirken, kontrolcü katsayılarının bozucu kuvvet etkisini karşılayamadığı Şekil 4.29' da açıkça görülmektedir. Bu etkiyi yok etmek için deneme-yanılma yöntemiyle bulunan parametrelerle çizimler yapılmış ve bozucu etkisi bir miktar hata oranı ile karşılanmıştır. Şekil 4.31' deki grafikte yörünge hareketindeki sapmanın ne kadar azaldığı görülmektedir. Bu etkiyi daha da azaltmak için, matris parametreleri optimizasyon yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Belirlenen parametrelerle yapılan benzetim çalışması sonuçları, Şekil 4.40 ve 4.41' de sırasıyla üç ve iki boyutlu gösterimleyle yer almaktadır.

$K_P = 10^{-4} * diag(22619\ \ 883\ \ 847\ \ 24\ \ 260\ \ 39),$

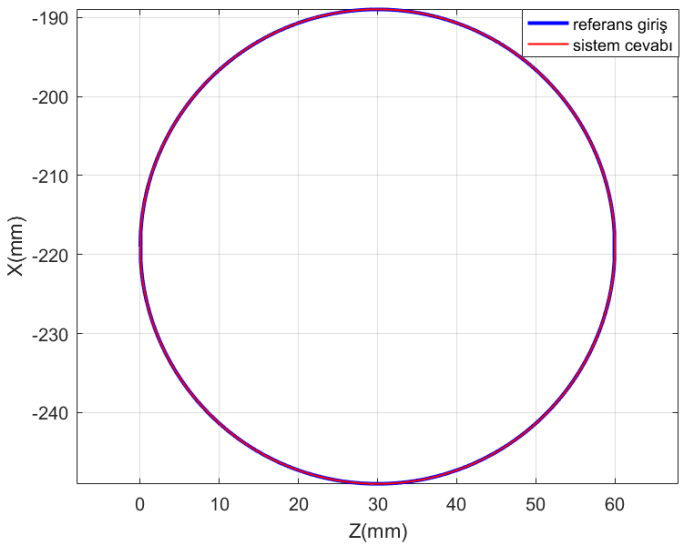
$K_V = 10^{-4} * diag(496\ \ 416\ \ 720\ \ 104\ \ 87\ \ 6),$

$K_{F1} = 10^{-4} * diag(1\ \ 810\ \ 732\ \ 190\ \ 125\ \ 70),$

$K_{F2} = 10^{-4} * diag(39\ \ 14\ \ 2\ \ 23\ \ 0\ \ 3),$



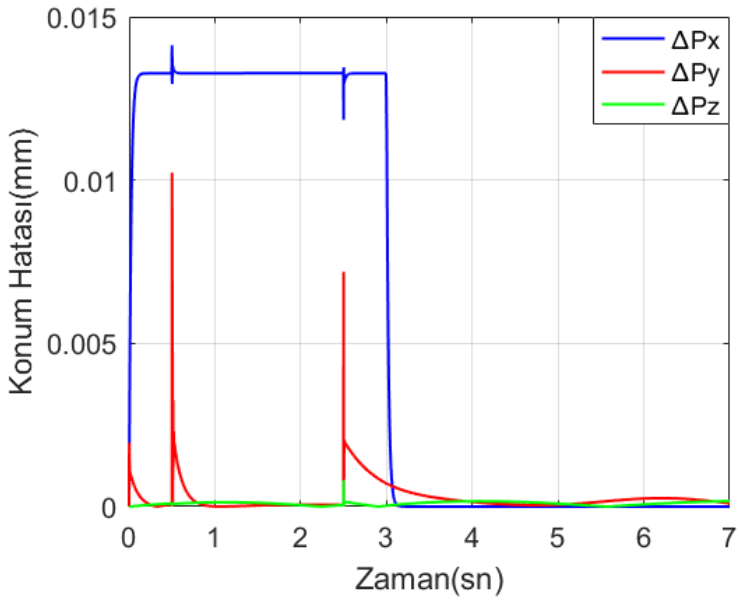
Şekil 4.40 : Bozucu kuvvet etki eden sistemde optimize edilmiş parametrelerle çember çizimi üç boyutlu gösterimi.



Şekil 4.41 : Bozucu kuvvet etki eden sistemde optimize edilmiş parametrelerle çember çizimi iki boyutlu gösterimi.

Optimize edilmiş parametrelerle yapılan çizimler şekillerden de görüldüğü gibi deneme yanılma yöntemiyle belirlenen parametrelerle yapılan çizimlerden daha iyi olmuştur.

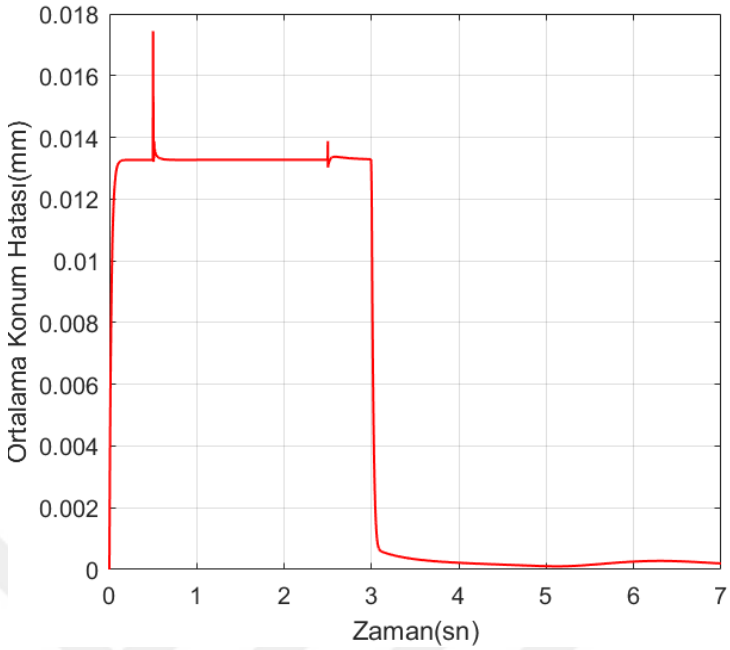
X-Y-Z eksenlerindeki referans giriş ve sistem cevabı arasındaki konum hatası grafiğine Şekil 4.42' de yer verilmiştir.



Şekil 4.42 : Bozucu dahil edilen optimizasyonlu parametrelerle yapılan çizimde konum hata grafiği.

Yukarıdaki şekilde görüldüğü gibi 0-3sn aralığındaki artış(mavi çizgi) X ekseni yönünde etki eden bozucu kuvveti, 0.5 ve 2.5sn' deki artış(kırmızı çizgi) Y ekseni boyunca uygulanan levha hareketi etkisini göstermektedir.

Ortalama konum hata grafiği Şekil 4.43' te yer almaktadır.



Şekil 4.43 : Bozucu dahil edilen optimizasyonlu parametrelerle yapılan çizimde ortalama konum hata grafiği.

Hesaplanan ortalama konum hata değeri 0.0088 olmuştur. Deneme yanılma yöntemi ile belirlenen parametrelerle yapılan çizimde ortalama konum hatasının 0.2763(mm) olduğunu hatırlarsak sonucun yaklaşık 30 kat iyileştirildiğini görmekteyiz.

Çizelge 4.1' de yöntemler ortalama konum hata değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.1: Hareketli levha üzerine çember çizdirme görevi deneme yanılma ve optimize edilmiş yöntemlerle bulunan parametrelerle ortalama konum hataları.

	Bozucu Giriş Olmadan	Bozucu Giriş Dahil Edilen
Deneme-Yanılma Yöntemi Parametreleri	0.0076(mm)	0.2763(mm)
Optimize Edilmiş Parametreler	0.0013(mm)	0.0088(mm)

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında 6 eksenli bir robot kolu konum ve kuvvet kontrolüne yer verilmiştir. Robot kolu modeli MATLAB® programında Simulink arayüzünde gerçekleştirilmiştir. Simulink modeli üzerinde benzetim çalışmaları yapılarak sonuçlar değerlendirilmiştir. Kontrolcü seçiminde literatürdeki farklı yöntemler incelenip, tanımlayacağımız görev için uygun olan "Empedans Kontrol Yöntemi" seçilerek benzetim çalışmaları yapılmıştır.

Empedans kontrolü, robot kolu uç noktasının çevresiyle etkileşimi sonucu oluşturacağı mekanik empedansının ayarlanması yoluyla kuvvet ve konum kontrolünün gerçekleştirilmesi prensibine dayanır. Bu kontrolü katılık ve sönümleme değerlerini ayarlayabilen parametrelerle yapar. Bu prensibe dayalı olarak genellikle empedans kontrol yöntemi dış kuvvetler etkisi altında olan görevler için tercih edilir. I-TECH robot kolu insansı robot kolu olarak tasarlanmıştır ve kontrol yöntemi seçilirken çevre ile etkileşimde olacağı göz önünde bulundurulmuştur. Bu sebeple empedans kontrol yöntemi seçilerek robot kolundan konum ve kuvvet kontrolü gerçekleştirilmesi beklenmiştir. Görev olarak tanımlanan uç eyleyiciye çember çizdirme eylemi çeşitli senaryolar üzerinden gidilerek analiz edilmiştir. Çizim işlemi bir levha üzerine yapılmaktadır. Levhanın sabit ve hareketli olduğu durumlar incelenmiştir. Empedans kontrol yöntemiyle her iki durum için de konum ve kuvvet kontrolü sağlanmıştır.

Benzetim çalışması üzerinde uygulanan empedans kontrol yöntemindeki katılık, sönüm, konum ve hız modifikasyon oranlarını belirleyen 4 ana katsayı(K_p, K_v, K_{F1} ve K_{F2}) değerleri ayrı ayrı değiştirilerek kontrolcüye etkileri incelenmiş ve bu katsayı seçimlerindeki önem vurgulanmıştır. Her bir katsayı matrisinin 6x6 boyutunda diyogonal matrisler olduğu ve her bir paremetrenin kontrolü nasıl etkiledi ortaya koyulmuştur. Bu katsayılar öncelikle deneme-yanılma yöntemi ile seçilerek robot kolu bir miktar(0.0076mm) konum hatası ile kontrol edilebilmiştir. Hatayı daha da azaltmak için bir optimizasyon yöntemi aranmış ve Matlab programı kütüphanesi "fminsearch" komutundan yararlanılıp, katsayılar için belli alt ve üst sınırlar verilerek yeni katsayılar belirlenmiş ve benzetim çalışması üzerinde uygulanmıştır. Bu komut

alt yapısında çalışan Nelder-Mead optimizasyon yöntemi anlatılmıştır. Konum hatası ortalaması 0.0013mm olmuştur.

Optimize edilmiş parametrelerle elde edilen sonuçlar deneme yanılma yöntemi ile belirlenen parametrelerle elde edilen sonuçlardan daha iyi olmuştur. Konum hatası yaklaşık 6 kat azalmıştır.

Tanımlanan görevde robot kolu uç noktasına levha hareketinden kaynaklı sadece tek yönlü kuvvet uygulanmış olmuştur. Bir sonraki aşamada farklı bir yönden bozucu kuvvet dahil edilmiş ve yine hareketli levha üzerine çember çizdirme görevi gerçekleştirilmiştir. Bozucu kuvvet 0-3 sn aralığında verilmiş ve bozucu etkisi olmadan belirlenen kontrolcü parametreleriyle yapılan çizimlerde etkisi gözlemlenmiştir. Bu katsayıların bozucu etkisini karşılayamadığı ve yörüngeden bir miktar saparak çemberi çizdiği görülmüştür. Bu da bize farklı kuvvet etkisi altında daha hassas bir kontrol yapmamız gerektiğini göstermektedir. Bu noktada deneme yanılma yöntemi kullanarak yeni parametreler belirlenmiş ve bozucu etkisini karşılayabilecek katılık ve sönüm belli bir konum hatası ile elde edilmiştir. Konum hatası ortalama değeri 0.2763mm olmuştur. Bu hatayı minimize etmek için optimizasyon yöntemi kullanılarak yeni parametreler belirlenmiş ve benzetim çalışması üzerinde uygulanmıştır. Optimize edilmiş parametrelerle elde edilen sonuçlarda ortalama konum hatası 0.0088 olarak hesaplanmıştır. Bu durumda optimizasyon yöntemi ile kontrolcü hassasiyeti 30 kat artırılmış olmuştur.

Yapılan benzetim çalışmaları, empedans kontrolü ile kuvvet ve konum kontrolü gerçekleştirilirken katılık ve sönüm oranlarının ne kadar hassas yapılması gerektiğini ortaya koymaktadır. Parametrelerdeki küçük değişimler robot kolu kontrolünü büyük oranda etkilemektedir. Ayrıca katılık, sönüm, konum ve hız modifikasyon oranlarını belirleyen matrislerin(K_p, K_v, K_{F1} ve K_{F2}) herbiri 6x6 boyutunda diyagonal matrisler olduğundan 24 değişken mevcuttur ve bu değişkenler birbirini etkilemektedir. 24 değişkenli matris değerlerinin belirlenmesinde deneme yanılma yöntemi kullanımı uzun süre almakta ve yeterli doğruluğu verememe ihtimali olmaktadır. Bu sebeple bir optimizasyon yöntemi seçilerek daha iyi sonuçların elde edilebileceği ortaya koyulmuştur. Optimize edilmiş parametrelerle gerçekleştirilen kontrolde konum hata oranlarındaki azalmalar bize optimizasyon yöntemi gerekliliğini göstermiştir.

Empedans kontrolü gerçekleştirilirken sisteme ayrı bir kuvvet kontrolü de dahil edilerek Hibrit Empedans Kontrolü gerçekleştirilebilir. Hibrit Empedans Kontrol robotik sistemin empedansı belirlenirken daha fazla esneklik kazanmasını sağlar. Bu

anlamda ileriki çalışmalarda ayrı bir kuvvet yörüngesi izlenmesi istenilen görevlerde uygulanabilecek bir yöntemdir.

I-TECH İnsansı Robot Projesi kapsamında ikinci bir kol tasarlanıp üretimi yapılması hedeflenmektedir. Bu durumda iki kol ile gerçekleştirilecek görevlerde kolların birbirleriyle etkileşimli olarak çalırken kontrolü sağlanması gerekmektedir. Literatüre baktığımızda çift kol çalışmalarında da insan ile etkileşim halinde olan robotlarda olduğu gibi aynı prensibe dayalı olarak empedans kontrol uygulanmaktadır. Bu anlamda bu tez çalışması, proje kapsamında ileride yapılacak olan çalışmalara alt yapı oluşturmaktadır.

KAYNAKLAR

Akdoğan, **E.** **(**2007). Rehabilitasyon Amaçlı Bir Robot Kolunun Kuvvet ve Konumunun Zeki Kontrolü.

Anderson R., Spong R.W. (1988). Hybrid Impedance Control of Robotic Manipulators, IEEE J. of Robotics and Automat. 4(5), 549–556

Balestrino A., Maria G. and Sciavicco L. (1984). Robust control of robotic manipulators, in Proceedings of the 9th IFAC World Congress, Vol. 5, pp. 2435–2440.

Cai L., Goldenberg A.A. (1989). An Approach to Force and Position Control of Robot Manipulators, IEEE Int. Conf. on Control and Application, Israel, pp. 86–90.

Caccavale, F., Chiacchio, P., Marino, A. and Villani, L. (2008). Six-DOF Impedance Control of Dual-Arm ooperative Manipulators

De´goulange E., Dauchez P. (1994). External Force Control of an Industrial PUMA 560 Robot'' J. of Robotics Sys. 11(6), 523–540

Denavit, J. (1955). A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices., Trans. of the ASME. Journal of Applied Mechanics, 22,215–221.

De Shutter, J., Van Brussel, H.(1988). Compliant Robot Motion. Part I-II. IEEE International Journal of Robotics Research, Vol 7, N.4, 3-33.

Erickson, D., Weber, M., Sharf, I.(2003). Contact Stiffness and Damping Estimation for Robotic Systems, The İnternational Journal of Robotics Research, Vol. 22, No. 1,January, pp.41-57.

Fisher W. D. and Mutjaba M. S. (1991). "Hybrid Position/force Control: A Correct Formulation", Hewlett-Packard Company.

Fodor G. and Tevesz G. (1999). "Hybrid Position and Force Control Algorithm Expansion of a Robot Control System", Periodica Polytechnica Ser. El. Eng., Vol. 43, No. 4, pp. 251-261.

Güleç, M.Ö. (2013). ˙İnsansı robot kolu tasarımı ve yorunge kontrolu.

Hogan N. (1984). Impedance Control, An Approach to Manipulation, American Control Conference, pp. 304 – 314.

Hogan N. (1985). Impedance Control, An Approach to Manipulation: Part I, II, Int. Journal of Robotics Res. 107, 1–24

Hogan N. (1987). Stable Execution of Contact Tasks Using Impedance Control. Proc. IEEE International Conference on Robotics Automation Impedance Control, 1047-1050

Kazerooni, H., Sheridan, T. B., Houpt, P. K. (1986). Robust Compliant Motion for Manipulators. Part I-II. IEEE Transactions on Robotics and Outomation, Vol 2, N.2 83-95

Kazerooni, H. (1989). On the Roobot Compliant Motion Control. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol 111, N.2 416-425

Khatib O. (1987). A Unified Approach for Motion and Force Control of Robot Manipulators: The Operational Space Formulation'' IEEE J. of Robotics and Automat. RA-3(1), 43–53

Khatib O. (1995). Inertial Properties in Robotic Manipulation: An Object-Level Framework, International Journal of Robotics Research, vol.14, no.1, pp: 19-36

Lewis, F.L., Abdallah C.T., Dawson D.M. (1993). Control of Robot Manipulators Book: page:129.

Lee, J., Chang, P. H., Jamisola, R. S. (2014). Relative Impedance Control for Dual-Arm Robots Performing Asymmetrics Bimanual Tasks, IEEE Transactions on Idustrial Electronics, Vol. 61, N. 7, July.

Mason, M. (1981). Compliance and Force Control for Computer Controlled Manipulators'' IEEE Trans. on Sys. Man. Cyber SMC-11(6), 418–432

Meşeli, I. (2013). ˙İnsansı robot kolu ön tasarımı ve analizi.

Mills, J. K., Goldenberg, A.A. (1989). Force and Position Control of Manipulators During Constrained Motion Tasks. IEEE Transactions on Robotics and Outomation, Vol 5, N.1 30-46

Nelder, J and Mead, R. (1965) A Simplex MEthod for Function Minimization.

Nilsson, R. (2009). Inverse Kinematics, Master's Thesis.

Paul, R. P.,(1981). Robot Manipulators. Cambiridge, MA:MIT Press.

Pelletier M. and Doyon M. (1994). "On the Implementation and Performance off Impedance Control on Posistion Controlled Robots", IEEE Int. Conference on Robotics and Automation, pp. 1228–1233.

Raibert M. H., Craig J. J. (1981). Hybrid Position/Force Control of Manipulators, ASME J. of Dync. Sys. Meas. Contr. 102, 126–133

Roberts R. K., Paul R. P., Hillberg B. M. (1985). The Effect of Wrist Force Sensor Stiffness on the Control of Robot Manipulators, IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Louis, pp. 269–274.

Salisbury K. J. (1980). Active Stiffness Control of a Manipulator in Cartesian Coordinates, The 19th IEEE Conference on Decision and Control, Albuquerque , pp. 95–100.

Schiavi R. and Bicchi A. (2009). Integration of Active and Passive Compliance Control for Safe Human- Robot Coexistence, IEEE International Conference on Robotics and Automation, Kobe, Japan, pp. 259- 264

Sciavicco L. and Siciliano B. (1999). Modeling and Control of Robot Manipulators, p. 104- 106

Seraji H. (1994). Adaptive Admittance Control: An Approach to Explicit Force Control in Compliant Motion, IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 2705–2712.

Seraji H., Colbaugh, R.(1997). Force Tracking in Impedance Control. The International Journal of Robotics Research, Vol 16, N.1, 97-117.

Tsetserukou, D., Kawakami, N., Tachi, S. (2008). Obstacle Avoidance Control of Humanoid Robot Arm through Tactile Interaction, The 8 th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, Daejeon, Korea.

Volpe R., Khosla P. (1992). An Experimental Evaluation and Comparison of Explicit Force Control Strategies for Robotic Manipulators. American Control Conference, Chicago IL, pp. 758–764.

Volpe R., Khosla P. (1993). A Theoretical and Experimental Investigation of Explicit Force Control Strategies for Manipulators'' IEEE Trans. on Auto. Contr. 38(11), 1634–1650

Volpe, R., Khosla, P., 1993. A Therotical and Environment Investigation of Explicit Force Control Strategies for Manipulators, *IEEE Trans. On Auto. Contr.*, Volume: 11 , Pages:3261 – 3266

Vukobratovic M. andStokic, D. (1989). "Applied Control of Manipulation Robots", Springer-Verlag, Berlin, pp. 353-358.

Whitney D. E. (1977). Force Feedback Control of Manipulator Fine MotionsASME Journal of Dync. Sys. Meas. Contr. 99, 91–97

Whitney D. E. (1987). Historical Perspective and State of the Art in Robot Force Control, Int. J. of Robotics Res. 6(1), 3–14

Wolovich W.A. and Elliot H. (1984 A computational technique for inverse kinematics, in Proc. 23rd IEEE Conference on Decision and Control, pp. 1359–1363.

Yoshikawa, T. (1990). "Foundations of Robotics-Analysis and Control", The MIT Pres. London, England, pp. 81-88.

Zeng G. and Hemami A. (1997). "An Overview of Robot Force Control", Robotica, Vol. 15, pp. 473-482.

URL-1. < http://www.maxonmotor.com/maxon/view/product/motor/ecmotor/ecflat/ecflat90/323772>, erişim tarihi 16.11.2016.

URL-2. < http://www.maxonmotor.com/maxon/view/product/motor/ecmotor/ecflat/ecflat60/412821>, erişim tarihi 16.11.2016.

URL-3. < http://harmonicdrive.de/en/products/component-sets/cpl-2a.html>,erişim tarihi 16.11.2016.

URL-4. < http://www.ati-ia.com/products/ft/ft_models.aspx?id=Mini45>, erişim tr. 16.Aralık.2016.

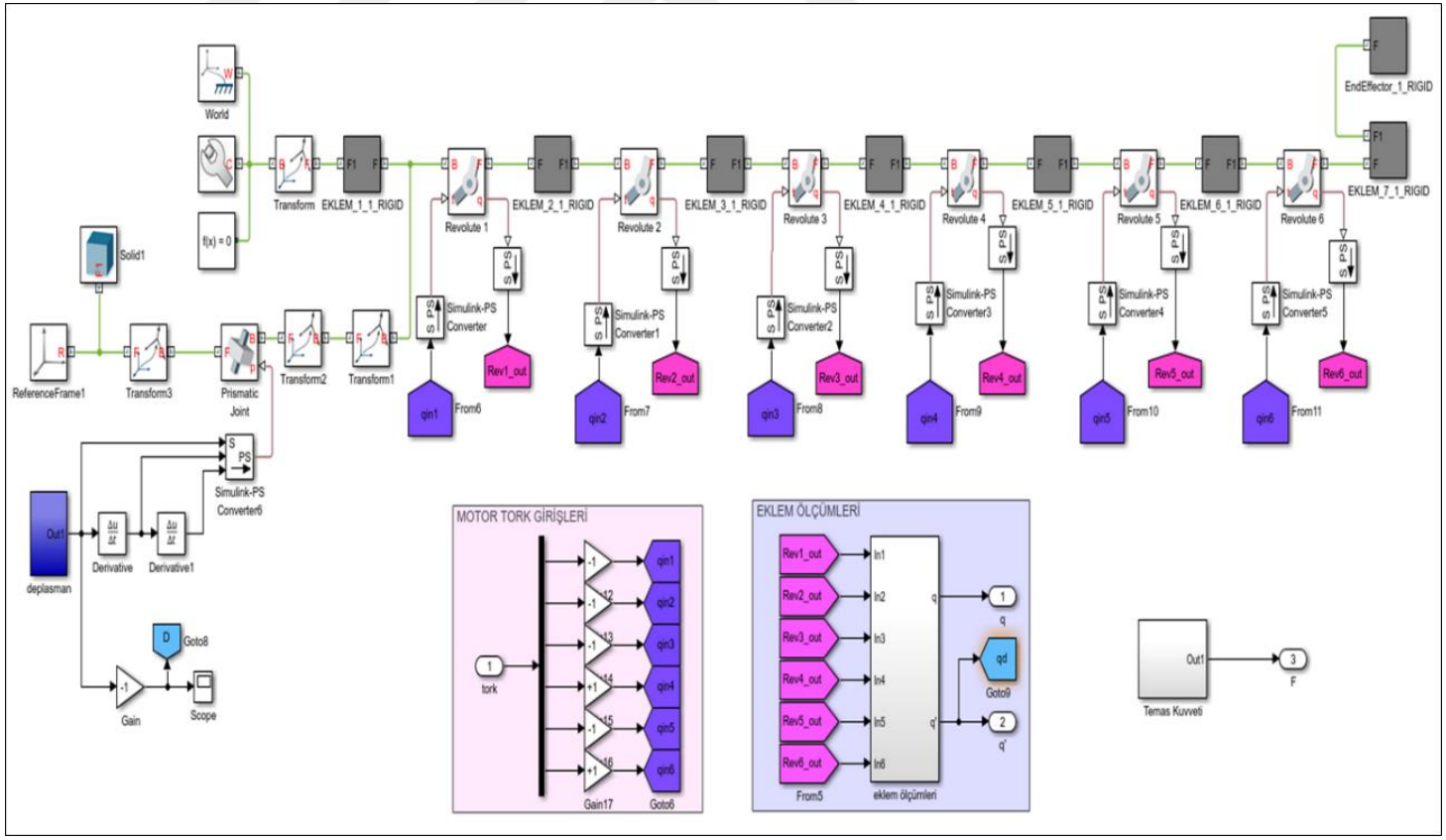
URL-5. < https://en.wikipedia.org/wiki/Stiffness>, erişim tarihi 20.Aralık.2016.

URL-6. < https://en.wikipedia.org/wiki/Young's modulus>, erişim tr. 20.Aralık.2016.

EKLER

EK A: Robot Kolu Simulink Modeli
EK B: EC 90 flat ve EC 60 flat motorlarına ait kataloglar (Güleç, 2014)

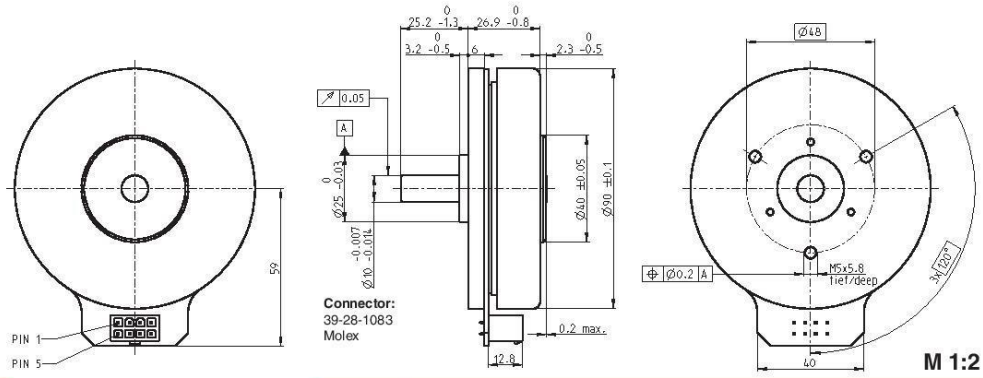
EK A



Şekil A.1: Robot kolu simulink modeli.

EK B

EC 90 flat ∅90 mm, brushless, 90 Watt



Stock program
Standard program
Special program (on request)

Part Numbers

with Hall sensors		323772	429271	244879
Motor Data				
Values at nominal voltage				
1 Nominal voltage	V	24	36	48
2 No load speed	rpm	3190	3120	2080
3 No load current	mA	544	348	135
4 Nominal speed	rpm	2590	2510	1610
5 Nominal torque (max. continuous torque)	mNm	444	560	533
6 Nominal current (max. continuous current)	A	6.06	4.76	2.27
7 Stall torque	mNm	4690	5730	4460
8 Starting current	A	70	69	21.1
9 Max. efficiency	%	84	87	85
Characteristics				
10 Terminal resistance phase to phase	Ω	0.343	0.522	2.28
11 Terminal inductance phase to phase	mH	0.264	0.625	2.5
12 Torque constant	mNm/A	70.5	109	217
13 Speed constant	rpm/V	135	88	44
14 Speed/torque gradient	rpm/mNm	0.659	0.423	0.462
15 Mechanical time constant	ms	21.1	13.6	14.8
16 Rotor inertia	gcm^2	3060	3060	3060

Specifications

Thermal data

17	Thermal resistance housing-ambient	1.91 K/W
18	Thermal resistance winding-housing	2.6 K/W
19	Thermal time constant winding	46.6 s
20	Thermal time constant motor	283 s
21	Ambient temperature	-40…+100°C
22	Max. permissible winding temperature	+125°C

Mechanical data (preloaded ball bearings)

23	Max. permissible speed	5000 rpm
24	Axial play at axial load < 15 N	0 mm
	> 15 N	0.14 mm
25	Radial play	preloaded
26	Max. axial load (dynamic)	12 N
27	Max. force for press fits (static)	183 N
	(static, shaft supported)	8000 N
28	Max. radial loading, 7.5 mm from flange	60 N

Other specifications

29	Number of pole pairs	12
30	Number of phases	3
31	Weight of motor	600 g

Values listed in the table are nominal.

Connection

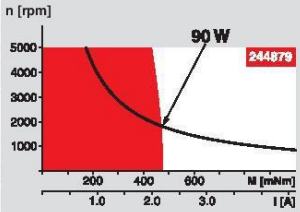
Pin 1	Hall sensor 1
Pin 2	Hall sensor 2
Pin 3	V_{Hall} 4.5…18 VDC
Pin 4	Motor winding 3
Pin 5	Hall sensor 3
Pin 6	GND
Pin 7	Motor winding 1
Pin 8	Motor winding 2

Wiring diagram for Hall sensors see p. 31

Cable

Connection cable Universal, L = 500 mm	**339380**
Connection cable to EPOS2, L = 500 mm	**354045**

Operating Range



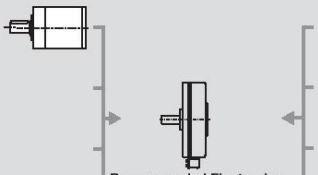
Comments

Continuous operation
In observation of above listed thermal resistance (lines 17 and 18) the maximum permissible winding temperature will be reached during continuous operation at 25°C ambient.
= Thermal limit.

Short term operation
The motor may be briefly overloaded (recurring).

Assigned power rating

maxon Modular System Overview on page 20 - 25



Planetary Gearhead
∅52 mm
4 - 30 Nm
Page 274

Encoder MILE
800 - 6400 CPT,
2 channels
Page 294

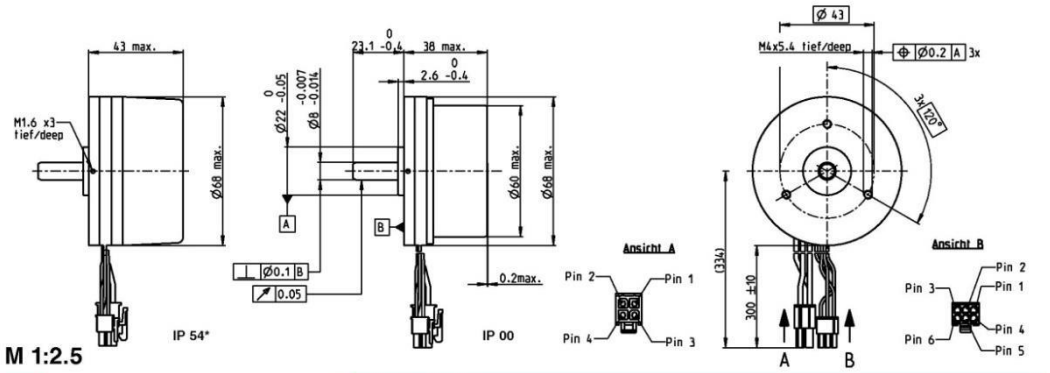
Recommended Electronics:

ESCON 50/5	Page 321
ESCON Module 50/5	321
ESCON 70/10	321
DECS 50/5	324
DEC Module 50/5	325
EPOS2 24/5, 50/5, 70/10	331
EPOS2 P 24/5	334
EPOS3 70/10 EtherCAT	337
Notes	**24**

maxon flat motor

EC 60 flat ∅60 mm, brushless, 100 Watt

NEW



Stock program
Standard program
Special program (on request)

Article numbers						
IP 54* (with cover)	412819		408057		412821	
IP 00 (without cover)		412823		411678		412825

Motor Data (provisional)							
Values at nominal voltage							
1 Nominal voltage	V	12	12	24	24	48	48
2 No load speed	rpm	3710	3710	4250	4250	3970	3970
3 No load current	mA	671	671	419	419	187	187
4 Nominal speed	rpm	3290	3190	3850	3740	3580	3500
5 Nominal torque (max. continuous torque)	mNm	216	267	221	284	255	317
6 Nominal current (max. continuous current)	A	7.37	8.88	4.33	5.39	2.28	2.77
7 Stall torque	mNm	2820	2820	3740	3740	4190	4190
8 Starting current	A	93.5	93.5	78.2	78.2	43.8	43.8
9 Max. efficiency	%	84	84	86	86	88	88
Characteristics							
10 Terminal resistance phase to phase	Ω	0.128	0.128	0.307	0.307	1.1	1.1
11 Terminal inductance phase to phase	mH	0.0615	0.0615	0.188	0.188	0.864	0.864
12 Torque constant	mNm/A	30.5	30.5	53.4	53.4	114	114
13 Speed constant	rpm/V	313	313	179	179	83.4	83.4
14 Speed/torque gradient	rpm/mNm	1.32	1.32	1.03	1.03	0.798	0.798
15 Mechanical time constant	ms	16.7	16.7	13	13	10.1	10.1
16 Rotor inertia	gcm²	1210	1210	1210	1210	1210	1210

Specifications

Thermal data

17	Thermal resistance housing-ambient	4.31 (2.41) K/W
18	Thermal resistance winding-housing	3.8 K/W
19	Thermal time constant winding	40 s
20	Thermal time constant motor	155 (86.9) s
21	Ambient temperature	-40…+100°C
22	Max. permissible winding temperature	+125°C

Mechanical data (preloaded ball bearings)

23	Max. permissible speed	6000 rpm
24	Axial play at axial load < 15.0 N	0 mm
	> 15.0 N	0.14 mm
25	Radial play	preloaded
26	Max. axial load (dynamic)	12 N
27	Max. force for press fits (static)	170 N
	(static, shaft supported)	6000 N
28	Max. radial loading, 7.5 mm from flange	100 N

Other specifications

29	Number of pole pairs	7
30	Number of phases	3
31	Weight of motor	470 g

Values listed in the table are nominal.

Connection motor (Cable AWG 16)

red	Motor winding 1	Pin 1
black	Motor winding 2	Pin 2
white	Motor winding 3	Pin 3
	N.C.	Pin 4

Connector	Article number
Molex	39-01-2040

Connection Sensors (Cable AWG 26)

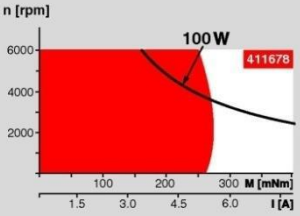
grey	Hall sensor 1	Pin 1
grey	Hall sensor 2	Pin 2
grey	Hall sensor 3	Pin 3
grey	GND	Pin 4
blue	V_{Hall} 4.5…18 VDC	Pin 5
	N.C.	Pin 6

Connector	Article number
Molex	430-25-0600

Wiring diagram for Hall sensors see p. 29

* Protection level only when installed with flange-side seal.

Operating Range



Comments

Continuous operation
In observation of above listed thermal resistance (lines 17 and 18) the maximum permissible winding temperature will be reached during continuous operation at 25°C ambient.
= Thermal limit.

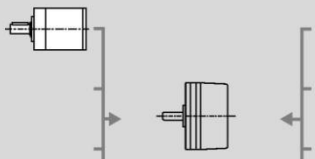
Short term operation
The motor may be briefly overloaded (recurring).

Assigned power rating

maxon Modular System

Overview on page 16 - 21

Planetary Gearhead
∅52 mm
4 - 30 Nm
Page 246



Encoder MILE
512 - 2048 CPT,
2 channels
Page 263

Recommended Electronics:

ESCON 50/5	Page 292
DEC Module 50/5	299
DEC 70/10	305
EPOS2 24/5	313
EPOS2 50/5	313
EPOS2 70/10	313
EPOS2 P 24/5	316
EPOS3 70/10	319
Notes	**20**

May 2012 edition / subject to change

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad **:** Hülya Eraslan

Doğum Tarihi ve Yeri **:** 05.05.1988 / Samsun

E-posta **:** eraslanhuly@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** **:** 2012, Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü