

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İKİ SERBESTLİK DERECELİ SERİ ROBOTUN KESİR  
DERECELİ EMPEDANS KONTROLÜ**

**ALI ALSHAWI**

**KOCAELİ 2019**

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ**  
**ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İKİ SERBESTLİK DERECELİ SERİ ROBOTUN KESİR**  
**DERECELİ EMPEDANS KONTROLÜ**

**ALI ALSHAWI**

**Dr.Öğr.Üyesi Selçuk KIZIR**  
Danışman, Kocaeli Üniversitesi  
**Prof.Dr. Zafer BİNGÜL**  
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi  
**Dr.Öğr.Üyesi Metin Toz**  
Jüri Üyesi, Düzce Üniversitesi

  
.....  
  
.....  
  
.....

**Tezin Savunulduğu Tarih: 11.01.2019**

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Empedans kontrolü robotik alanında 1984'ten bugüne geçen onlarca yıllık süre içinde önemli ilerlemeler kaydetmiştir. Empedans kontrolü ortamlarla istenen mekanik etkileşimin sağlanmasını amaçlamaktadır. İlave olarak, pek çok gerçek dinamik sistem 300 yıldan eski olan kesir dereceli hesaplamaya dayalı tam sayılı olmayan sıralı dinamik model kullanılarak daha iyi izah edilebilmektedir. Kesir dereceli hesaplamaların kullanıldığı uygulamaların sayısı her geçen gün artmaktadır. Bu tezde yeni bir kesir dereceli empedans kontrol yöntemi önerilmektedir. Önerilen yöntem farklı koşullar altında 2 serbestlik dereceli bir seri robot manipülatör üzerinde test edilerek sonuçlar sunulmuştur.

Öncelikli olarak bu araştırma çalışmasını üstlenip onu başarıyla azmederek tamamlamam için bana güç, bilgi, beceri ve imkân veren yüce ALLAH'a teşekkür etmek isterim. Onun nimetleri olmadan bu başarı mümkün olamazdı.

Tezi yazarken en çok zorlandığım yerlerden birisi de bana yardımcı olan her kişiye teşekkür etmemin mümkün olmamasıdır. Adını zikretmediğim ancak tezin hazırlanmasında katkısı bulunan herkese teşekkürlerimi sunarım.

Tez danışmanım olan Sn. Dr. Öğr. Üyesi Selçuk Kızır'e çalışmam sırasındaki desteği, rehberliği ve yardımcı olan tavsiyeleri için samimi takdirlerini sunmak benim için büyük bir onurdur ve Mekatronik Mühendisliği Bölümü otomasyon laboratuvarındaki tüm arkadaşlara ve mühendislere çalışmam sırasındaki sonsuz destek ve önerileri için derinden teşekkür etmek isterim.

Ailemdeki tüm fertlere çalışmam sırasındaki sonsuz teşvikleri, destekleri ve yardımları için içten takdirlerimi ifade etmek isterim.

Ocak-2019

Ali ALSHAWI

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR .....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	iv
TABLOLAR DİZİNİ.....	vi
SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR.....	vii
ÖZET .....	iix
ABSTRACT .....	x
GİRİŞ.....	1
1. GENEL BİLGİLER .....	4
1.1. Pozisyon/Kuvvet Kontrol Algoritmaları .....	4
1.1.1. Sertlik kontrolü.....	4
1.1.2. Empedans kontrolü .....	6
1.1.3. Admitans kontrolü .....	8
1.1.4. Hibrid konumu/kuvvet kontrolü.....	9
1.1.5. Hibrid empedans kontrolü.....	11
1.1.6. Belirgin kontrol .....	12
1.1.7. Tam kuvvet kontrolü.....	13
1.2. Kesir Dereceli Kontrol Algoritması .....	13
1.2.1. Kesir dereceli hesaplama .....	13
1.2.1.1. Kesirli derece ile ilgili cauchy entegral formülü .....	14
1.2.1.2. Grünwald-letnikov tanımlaması .....	14
1.2.1.3. Riemann-liouville tanımlaması.....	15
1.2.1.4. Caputo tanımlaması .....	15
1.2.2. Laplace dönüşümü .....	16
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	18
3. MODELLEME, KONTROL VE SİMÜLASYON.....	21
3.1. 2-DOF Robotik Manipülâtörün Modellenmesi.....	21
3.1.1. 2-DOF Robotik manipülâtörün ileri ve ters kinematiği.....	22
3.1.2. 2-DOF Robot manipülâtörün dinamiği.....	26
3.2. Pozisyon Kontrolü.....	29
3.3. Ortam Ve Temas Kuvvetleri.....	30
3.4. Empedans Kontrolü .....	31
3.5. Kesir Dereceli Empedans Kontrolü.....	33
3.6. 2-DOF Robotik Manipülâtör Ve Kontrol Sisteminin Simülasyonu.....	35
3.6.1. 2-DOF Robot manipülâtörün ters kinematik modeli. ....	40
3.6.2. Pozisyon kontrol modeli (hesaplanan tork kontrolü). ....	40
3.6.3. Ortam modeli.....	42
3.6.4. Kesir dereceli empedans kontrolör modeli .....	43
3.6.4.1. KEK, KDEK Kontrolörlerinin parametresinin optimize edilmesi .....	46
3.7. Kesirli Mertebeden Türevlerin Yaklaşımları.....	50
3.7.1. Crone yaklaşımı.....	51
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	55

4.1. Sistemdeki KDEK Ve KEK Performansını Düz Duvar Etkileşimli Bir Ortamda Test Etmek. ....	55
4.2. Sistemdeki KDEK Ve KEK Performansını Düz Olmayan Duvar Etkileşimli Bir Ortamda Test Etmek. ....	59
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	64
KAYNAKLAR.....	66
EKLER.....	69
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER.....	73
ÖZGEÇMİŞ.....	74



## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Aktif Sertlik Kontrolü. ....	5
Şekil 1.2.	Temel empedans kontrolü. ....	7
Şekil 1.3.	Konum tabanlı empedans kontrolü. ....	8
Şekil 1.4.	Admitans Kontrolü .....	9
Şekil 1.5.	Hibrid konumunun/kuvvet kontrolünün kavramsal organizasyonu. ....	10
Şekil 1.6.	Hibrid empedans kontrolü. ....	11
Şekil 1.7.	Belirgin kuvvet kontrolü. ....	12
Şekil 1.8.	Tam kuvvet kontrolü. ....	13
Şekil 2.1.	Bilinmeyen ortamda robotun kuvvet izleme empedans kontrolü. ....	19
Şekil 2.2.	FOPID'e dayalı olarak Robot kolunun yapısı. ....	20
Şekil 3.1.	2-DOF Robot manipülatörü ve onun koordinat sistemleri .....	21
Şekil 3.2.	Lineer ve köşegen hızları arasındaki ilişkiyi. ....	25
Şekil 3.3.	Hesaplanan tork kontrol yönetimi. ....	29
Şekil 3.4.	Etkileşim modeli.(a) Robot ve ortam arasındaki herhangi bir temas olmadan; (b) temas olduğunda olan kritik nokta; (c) ortam ile sabit temas. ....	30
Şekil 3.5.	Robot ve ortam arasındaki temas .....	31
Şekil 3.6.	Empedans kontrolör yapısı. ....	33
Şekil 3.7.	Kesir dereceli empedans kontrolör düzlemi. ....	34
Şekil 3.8.	Kesir dereceli empedans kontrolörünün genel blok diyagramı. ....	34
Şekil 3.9.	SolidWorks'deki 2-DOF robot manipülatör modeli. ....	35
Şekil 3.10.	SolidWorks'deki SimMechanics bağlantısı Bu kurulum için XML .....	36
Şekil 3.11.	Matlab / SimMechanical'da 2-Dof robot manipülatörünün mekanik modeli. ....	37
Şekil 3.12.	Yapının diyalog kutusu .....	38
Şekil 3.13.	İkinci döner birleşim yerinin diyalog kutusu .....	39
Şekil 3.14.	Robot manipülatörün ters kinematığının Simulink bloğu. ....	40
Şekil 3.15.	Simulink/Matlab' ta ki pozisyon kontrolü (Hesaplanan tork kontrolü) .....	41
Şekil 3.16.	Simulink/Matlab' ta ki 2-DOF robot manipülatörün dinamik modeli .....	41
Şekil 3.17.	Simulink/Matlab' ta bir eksenindeki çevre modeli. ....	42
Şekil 3.18.	Simulink/Matlab' ta çevre modeli ve temas torku .....	42
Şekil 3.19.	Sinyal oluşturucunun/duvarın diyalog kutusu .....	43
Şekil 3.20.	Klasik empedans kontrol şeması. ....	44
Şekil 3.21.	KDEK'in Simulink bloğu .....	45
Şekil 3.22.	FOTF modelinin diyalog kutusu .....	45
Şekil 3.23.	X ve Y eksenlerindeki istenen robot yörüngesi. ....	46
Şekil 3.24.	Referans Bloğuna Karşı Kontrol ile ilgili diyalog kutusu .....	47
Şekil 3.25.	Yanıt Optimizasyonunun diyalog kutusu. ....	48
Şekil 3.26.	MATLAB / Simulink'te modellenen komple kontrol sistemi .....	50
Şekil 3.27.	Durum II' de kutup ve sıfır haritası .....	52
Şekil 3.28.	Durum III' te kutup ve sıfır haritası. ....	53

Şekil 4.1.	Robot yörüngesi (solda) ve temas kuvvetinin tepkisi (sağda), ( $Y_e, Y_d$ )=(130,180) mm, $K_e=100\text{N/m}$ .....	56
Şekil 4.2.	Robot kontrol sinyalleri, tork 1 (solda) ve tork 2 (sağda), $K_e=100\text{N/m}$ .....	57
Şekil 4.3.	Robot yörüngesi (solda) ve temas kuvvetinin tepkisi (sağda), ( $Y_e, Y_d$ )=(130,180) mm, $K_e=200\text{N/m}$ .....	58
Şekil 4.4.	Robot kontrol sinyalleri, tork 1 (solda) ve tork 2 (sağda), $K_e=200\text{N/m}$ .....	59
Şekil 4.5.	Robot yörüngesi (solda) ve temas kuvvetinin tepkisi (sağda) düz olmayan ortamda ( $Y_e, Y_d$ )=(130,180) mm, $K_e=100\text{N/m}$ .....	60
Şekil 4.6.	Robot kontrol sinyalleri, tork 1 (solda) ve tork 2 (sağda), düz olmayan ortamda $K_e=100\text{N/m}$ .....	61
Şekil 4.7.	Robot yörüngesi (solda) ve temas kuvvetinin tepkisi (sağda) düz olmayan ortamda ( $Y_e, Y_d$ )=(130,180) mm, $K_e=100\text{N/m}$ .....	62
Şekil 4.8.	Robot kontrol sinyalleri, tork 1 (solda) ve tork 2 (sağda), düz olmayan ortamda $K_e=200\text{N/m}$ .....	63

## TABLULAR DİZİNİ

Tablo 3.1. Robot manipülatörün D-H değişkenleri.....	19
Tablo 3.2. Durum I' de kontrolör parametreleri.....	45
Tablo 3.3. Durum II' de kontrolör parametreleri.....	46
Tablo 3.4. Durum III' te kontrolör parametreleri.....	46
Tablo 4.1. Temas kuvvet hataları RMSE, MSE ve MAS ile $K_e=100$ N/m.....	56
Tablo 4.2. Temas kuvvet hataları RMSE, MSE ve MAS ile $K_e=200$ N/m.....	58
Tablo 4.3. Temas kuvvet hataları RMSE, MSE ve MAS ile $K_e=100$ N/m.ve düz olmayan ortam.....	60
Tablo 4.4. Temas kuvvet hataları RMSE, MSE ve MAS ile $K_e=200$ N/m.ve düz olmayan ortam.....	61

## SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR

$J$	: Jakobiyen matrisi
$\dot{X}$	: Görev alanında uç işlevci hız vektörü
$\dot{X}_D$	: Görev alanında istenen hız vektörü
$\ddot{X}_D$	: Görev alanında istenen ivme vektörü
$\ddot{X}_I$	: Değiştirilmiş istenen ivme
$\dot{X}_I$	: Değiştirilmiş istenen hız
$\Delta X$	: Uç işlevci konum hatasının vektörü
$\Delta \theta$	: Eklem açısı deplasman hatası
$\mu, \lambda$	: Türev alıcının derecesi, ( $\mu, \lambda \geq 0$ ).
$B_e$	: Ortamın sönümlenme katsayısını
$D_t$	: İstenen sönümlenme matrisi
$F_D$	: İstenen kuvvet / tork vektörü
$K_E$	: Sensörlerin ve ortamın net sertliği
$K_e$	: Ortamın sertliğini
$K_F, K_{F1}$	: Uysallık matrisi konum komutunu değiştirmek için
$K_{F2}$	: Uysallık matrisi hız komutunu değiştirmek için
$k_i$	: İntegral kontrol kazancı
$K_p; k_p$	: Oransal kontrol kazancı
$K_v; k_v$	: Türevsel kontrol kazancı
$K_t$	: İstenen sertlik matrisi
$M_t$	: İstenen atalet matrisi
$s_j$	: Uyum seçim matrisinin değişkeni.
$X$	: Görev alanında son efektör konum vektörü
$X_C$	: Admitans kontrolünde komuta yörüngesi.
$X_D$	: Görev alanında istenen konum vektörü
$X_E$	: Temas ortamının konum vektörü
$X_e$	: Ortamın statik konumunu.
$X_F$	: Eşdeğer kuvvet-geri besleme yörüngesi
$X_I$	: Değiştirilmiş istenen konum
$X_i$	: Hibrid empedans kontrolünde Değiştirilmiş istenen yörünge
$X_{Pi}$	: Hibrid empedans kontrolünün konum alt uzayında değiştirilmiş konum yörüngesi
$X_{fi}$	: Hibrid empedans kontrolünün kuvvet alt uzayında değiştirilmiş kuvvet yörüngesi
$Z_m$	: Mekanik empedans
$Z_{mp}$	: Hibrid empedans kontrolünün konum alt alanında istenen empedans
$Z_{mf}$	: Hibrid empedans kontrolünün kuvvet alt alanında istenen empedans
$\Gamma^\lambda, \Gamma^\mu$	: Kesir dereceli türevi
$\tau_p$	: Sertlik kontrolü ile ilişkili eklemelere komuta girişi vektörü
$\tau_{pp}$	: Hibrid konum/kuvvet kontrolünde konum alt uzay komut torku
$\tau_{pf}$	: Hibrid konum/kuvvet kontrolünde kuvvet alt uzay komut torku

A	: Mekanik admitans matrisi
E	: Kuvvet hata vektörü
F	: Görev alanındaki temas kuvvet / tork vektörü
f	: Temas kuvveti
K	: Kuvvet kompensatör
N	: Yer çekimi, santrifüj ve Coriolis kuvvetleri için doğrusal olmayan ileri beslemeli denkleme vektörü
S	: Uyum seçimi matrisi
X	: Temas noktasındaki son efektör konumunu
$\Gamma$	: Doğrusal operatör
$\tau$	: Toplam eklem tork / kuvvet giriş vektörü

### Kısaltmalar

D-H	: Denavit Hartenberg Parameters (Denavit Hartenberg Parametreleri)
DOF	: Degrees Of Freedom (Serbestlik Derecesi)
KDH	: Fractional-Order Calculas (Kesir Dereceli Hesaplaması)
KDEK	: Frctional-Order Impedsance Controller (Kesir Dereceli Empedans Kontrolör)
KEK	: Classical Impedamce Controller (Klasik Empedans Kontrolör)
MAE	: Mean Absolute Error (Ortalama Mutlak Hata)
MSE	: Mean Squared Error (Ortalama Kare Hata)
PID	: Proportional-Integral-Derivativ (Oransal-İntegral-Türevsel kontrolör)
RMSE	: Root Mean Squared Error (Kök Ortalama Kare Hata)

## İKİ SERBESTLİK DERECELİ SERİ ROBOTUN KESİR DERECELİ EMPEDANS KONTROLÜ

### ÖZET

Empedans kontrolü robotik araştırmalarında geniş çaplı kullanılan etkileşim ve kuvvet kontrol yöntemlerinden birisidir. Bu tezde yeni bir kesir dereceli empedans kontrol yöntemi sunulmuştur ve 2 serbestlik dereceli bir seri manipülatörüne uygulanmıştır. Matlab/Simulink kullanılarak bir RR robot manipülatörü ve ortamı tasarlanmıştır. Robotun dinamik modelindeki lineer olmayan durumların ortadan kaldırılması için manipülatörün pozisyon kontrolü hesaplanan tork kontrolüne dayandırılmıştır.

Klasik empedans kontrolörüne (KEK) ve sunulan kesir dereceli empedans kontrolörüne (KDEK) ait sonuçların mukayese edilmesi için optimize edilmiştir. I. durumda: KEK'nün M, D ve K parametreleri optimize edilmiştir ve II. durumda I. durumda ki parametreler kabul edildikten sonra sadece KDEK'in  $\lambda$  ve  $\mu$  parametreleri optimize edilmiştir ve III. durumda KDEK'in tüm parametreleri optimize edilmiştir.

Sunulan yöntemin etkinliğinin gösterilmesi için tüm durumlar için deneyler gerçekleştirilmiştir ve etkileşim kuvvetleri için performans endeksleri hesaplanmıştır.

Sonuçlar göstermiştir ki I. durumdan II. duruma geçişle %26,12'lik bir iyileşme sağlanmıştır ve I. durumdan III. duruma geçişle %47,21'lik bir iyileşme sağlanmıştır. Sunulan yöntem pek çok zorlayıcı robotik görevlerinde ve zeki mekatronik cihazlarında ihtiyaç duyulan empedans davranışını geliştirmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Empedans Kontrolü, Hesaplanan Tork Kontrolü, Kesir Dereceli Kontrol, Optimizasyon, Robot Manipülatör.

## FRACTIONAL-ORDER IMPEDANCE CONTROL OF 2-DOF SERI ROBOT

### ABSTRACT

Impedance control is one of interaction and force control methods that has been widely applied in the research of robotics. In this theses, a new fractional-order impedance control scheme is proposed and applied to a 2-DOF serial manipulator. An RR robot manipulator and its environment were designed using Matlab/Simulink. The position control of the manipulator was based on computed torque control to cancel out the nonlinearities existing on the dynamic model of the robot.

Classical impedance controller (CIC) and proposed fractional-order impedance controller (FOIC) were optimized for comparison of the results. In case I: M, D, and K parameters of the CIC were optimized, in case II: Only  $\lambda$  and  $\mu$  parameters of the FOIC were optimized after the parameters in case I had been accepted, and in case III: all parameters of the FOIC were optimized.

In order to show the effectiveness of the proposed method, experiments were conducted for all cases and performance indices were computed for the interaction forces.

Results showed that an improvement of 26.12% was achieved from case I to case II, and an improvement of 47.21% was achieved from case I to case III. The proposed scheme improves the impedance behavior, which is needed in many challenging robotic tasks and intelligent mechatronic devices.

**Keyword:** Impedance Control, Computed Torque Control, Fractional-Order Control, Optimization, Robot Manipulator.

## GİRİŞ

Sanayi ve üretimin farklı alanlarında geniş biçimde kullanılan endüstriyel robotların ortaya çıkmasına kadar robotik bilimi hızlı adımlarla başlangıcından itibaren gelişme gösterdi. Geçmiş yıllarda endüstriyel robotlar sadece uç işlevcinin konumsal kontrolünü (noktadan noktaya kontrol) gerektiren görevlerde geniş biçimde kullanılmıştı. Bunun en dikkat çekici örnek otomobilde nokta kaynak işlemidir ve burada sadece kaynak aletinin doğru yerleştirildiğinden sağlamak en önemlidir.

Robotların sonraki en kolay uygulama alanı uç işlevcinin sürekli pozisyon kontrolünü gerektiren işlerle ilgilidir. Tıp, nakliye, insan etkileşimleri vb. konularda kuvvet kontrol algoritması kullanan robotların mevcut uygulamaları şimdi çok fazladır.

Yakın yıllarda robotların etkin olarak uygulanabilecekleri üçüncü sınıf işlere daha fazla ilgi gösterilmiştir. Bunlar robot kontrol sisteminin aracı tam olarak konumlandırıp yönlendirmesi gereken ve aynı zamanda iş parçasına belirli bir kuvvet / moment kalıbı uygulamak için kullanılması gereken işlerdir.

Daha geniş görev sınıfına robot manipülatörlerin uygulanmasında, sadece manipülatörün konumu kontrol etmek değil aynı zamanda uç işlevcinin ortamda verdiği kuvvet kontrol etmek de gerekecektir. Bir robot manipülatör tarafından gerçekleştirilen pek çok işte, itme, kazıma, çapak giderme, taşlama, dövme, cilalama, çevirme, kesme, kazı yapma yollarıyla robotun ortamı ile temas etmesi gerekecektir. Tüm bu görevlerin yerine getirilmesi robotun belirlenen konumu gerçekleştirilmenin yanında çevreden gelen direncin üstesinden gelmek için veya ortama uyum göstermek için gereken gücü sağlamasını gerektirmektedir.

Ayrıca robotların kontrolüne kuvvet bilgisinin eklenmesi, çapak giderme, taşlama ve montaj işlerinde görüldüğü gibi belirsiz ortamlarda uygulanabilirliklerini arttırmaktadır ve aşırı temas kuvvetleri nedeniyle olabilecek kırılmaya karşı güvenli temin etmektedir.

Ortamlarındaki belirsizliklerin ve değişkenliklerin olduğu halde, manipülatörlerin tam olarak kontrol edilmeleri, robot manipülatörlerin sanayi ve uzay konularındaki karmaşık ele alma ve kurulum problemlerine karşı uygun şekilde uygulanması için gereklidir. Bu tür bir kontrolü sağlamanın önemli bir adımı ortam ve kuvvet/tork sensörleriyle olan etkileşimlerin gelişmesi hakkında bilgi sağlayan sensörlü manipülatörleri temin etmekle gerçekleştirilebilir.

Tıp, nakliye, insan etkileşimleri gibi alanlarda kullanılan robotlar ile otomatik kurulum işlerinin çoğu sadece pozisyon kontrolünden ziyade temas kuvvetlerinin kontrolünü gerektirmektedir. Pozisyon kontrolü sadece iyi bilinen bir şeklin tam olarak konumlandırılan iş parçaları, çok iyi konumlandırma yapabilen bir robot ve mükemmel araçlar olduğunda yeterlidir. Gerçek uygulamalarda bu şartları karşılamak mümkün değildir veya ekonomik değildir. Kuvvet kontrollü bir robot belirsizlikler ve toleranslarla baş edebilecektir.

Yakın yıllarda pozisyon/kuvvet kontrolü üzerine teoretik araştırmalar üzerinde iyi çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Pozisyon/uygulanan kuvvet veya hız/uygulanan kuvvet arasındaki ilişkinin uygulamasına dayalı olarak kontrol yöntemi sertlik kontrolü, etki kontrolü, empedans kontrolü, harici kuvvet kontrolü ve hibrid pozisyon/kuvvet kontrolü şeklinde olabilecektir. Ayrıca belirtilen pozisyon/güç kontrollerinin performansının artırılması için uygulanabilir, gelişmiş öğrenim algoritmaları uygulanmaktadır.

Mevcut durumda bilimsel teknolojinin hızla gelişmesi kontrol performansının artırılması için iki güç aracını sunmaktadır. Bunlardan ilki yeni sensörler, daha güçlü mikro işlemciler ve yüksek performanslı servo sistemleri gibi donanımlardır. Diğer ise kontrol tekniklerinin ve teorilerinin geliştirilmesidir.

Böylece pozisyon/kuvvet kontrolüne ek olarak kesir dereceli kontrole de sahibiz ve kesir dereceli hesaplama 300 yıllık eski bir konudur. Kesir dereceli hesaplamaların kullanıldığı uygulamaların sayısı hızla artmaktadır. Bu matematik kavramları gerçek bir nesnenin klasik “tamsayı düzen” yöntemlerine göre daha doğru olarak tanımlanmasını sağlamaktadır. Kontrol etmek istediğimiz tesis kesir dereceli olduğunda kesir dereceli kontrole neden ihtiyaç duyduğumuz aşikârdır. Diğer durumlarda kesir dereceli kontrol başka şekilde zor olacak olan (ve hatta imkânsız

olacak olan) bir performansın sağlanması için kullanılır. Bunun nedeni şöyledir ki farklılaşma düzeninin tamsayı şeklinde olması gerektiği bir yana bırakıldığında kontrol edilen tesisin davranışının şartnamelere uygun hale getirilmesi için daha fazla serbestlik sağlanmış olur. Ayrıca kesir dereceli türevler olmaksızın kesir dereceli kontrol normal olarak uygulanmaktadır. Bu tezde yapılan çalışmalar genel olarak 5 ana başlık altında incelenmiştir.

Bölüm 1'de, konum / kuvvet kontrol algoritmaları, empedans kontrolü, kesir dereceli kontrol algoritması ve kesir dereceli hesaplama için genel bilgiler, kontrol sistemleri ve matematiksel denklemler verilmiş.

Bölüm 2'deki girişten sonra, bu tez, kuvvet kontrolü ve kesir dereceli kontrol ile ilgili literatürde yapılan kontrol uygulamalarına değinilmiştir.

Bölüm 3'te, robotik manipülatörün dinamik modelleri farklı koşullar altında elde edilecek ve simüle edilecektir. Ayrıca klasik empedans kontrolü (KEK) ve yeni sunulan kontrolörümüz Kesir dereceli empedans kontrolü (KDEK) de gerçekleştirilmiş.

Bölüm 4'da Simülasyon sonuçları, I, II ve III durumları için önerilen kontrolör KDEK'nin verimliliğini ve ortam parametrelerin değıştırilmesini göstermek amacıyla sunulmuş.

Bölüm 5'ta bu tez çalışması kapsamında elde edilen tüm sonuçlar özet şeklinde anlatılarak genel bir sonuç elde edilmiştir. İlerde yapılabilecek iyileştirmeler ve bu konu ile ilgili yapılabilecek çalışmalar hakkında fikirler sunulmuş.

## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Pozisyon/Kuvvet Kontrol Algoritmaları

Robot uç kontrolündeki temel bir unsur etkileşim kuvvetlerinin nasıl belirleneceği ve geri bildirim sinyallerinin nasıl verimli şekilde kullanılacağı ile ilgilidir ve bu sayede uygun girdi sinyalleri sentezlenebilecek olup istenen hareket ve kuvvet elde edilebilecektir. Robot kuvvet kontrolü ile ilgili temel değişkenler konum, hız, hızlanma ve kuvvettir. Pozisyon ve uygulanan kuvvet veya hız ve uygulanan kuvvet arasındaki ilişkiye dayalı olan uygulama veya direkt kuvvet geri bildirim veya bunların birleşimlerine dayalı olan robot kuvvet kontrol algoritmalarının sınıflandırması şunları içermektedir [1]:

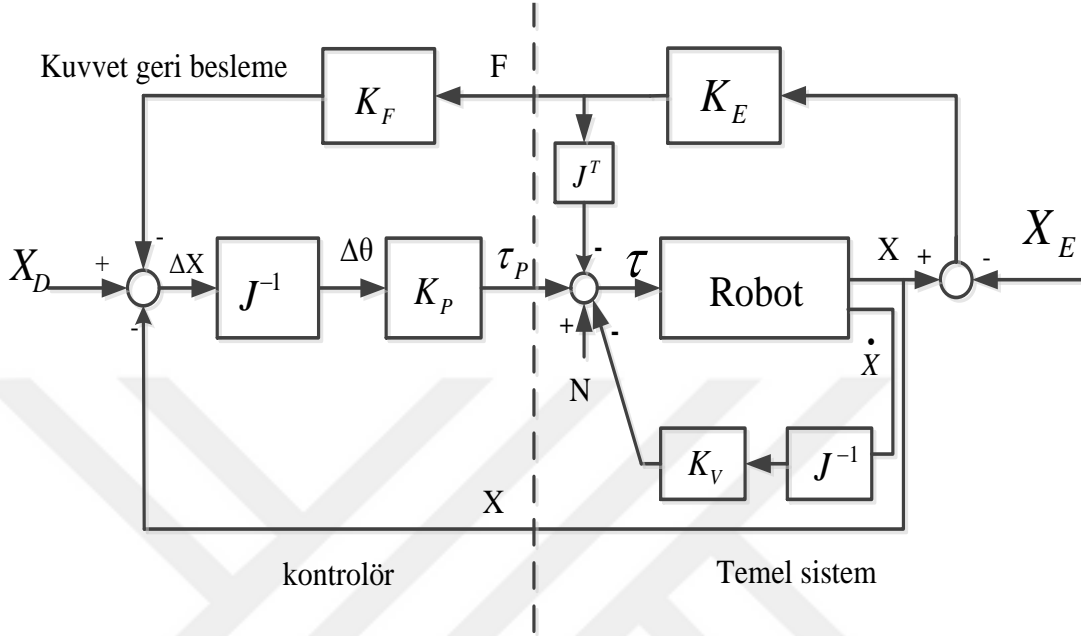
- Pozisyon ve uygulanan kuvvet arasındaki ilişkiye dayalı olan yöntemler: Sadece pozisyon geri bildirim veya pozisyon geri bildirim düzeltmesi ile sertlik kontrolü.
- Hız ve uygulanan kuvvet arasındaki ilişkiye dayalı olan yöntemler: Empedans kontrolü.
- Direkt pozisyon ve uygulanan kuvvete dayalı olan yöntemler: Hibrid konumu/kuvvet kontrolü ve hibrid empedans kontrolü.
- Direkt uygulanan kuvvet geri bildirimine dayalı olan yöntemler: Belirgin kuvvet kontrolü.

#### 1.1.1. Sertlik kontrolü

Uç işlevcinin sertliği eklentilerin sertliğine bağlıdır. Robot eklentilerindeki servoların sertliği ayarlanarak uç işlevcinin istenen sertliği sağlanabilir. Bu şekilde istenen pozisyon yörüngesi izlenirken ortamda istenen kuvvet uygulanabilir.

Sertlik kontrolü pasif veya aktif olabilir. Pasif sertlik kontrolünde [2], bir robot kolunun uç işlevcinin yaylardan veya yaylar ile amortisörlerden oluşan mekanik bir cihazla donatılmıştır.

Şekil 1.1, bir aktif sertlik kontrolünün temel prensibini göstermektedir [3]. Aksine aktif sertlik kontrolü [3-5] programlanabilir bir yay olarak görülebilir çünkü bir kuvvet geri bildirimini ile kapalı devre sistemi değiştirilebilir.



Şekil 1.1. Aktif Sertlik Kontrolü

Şekil 1.1 iki kısma ayrılmıştır ve bunlar kontrolör ile temel sistemdir.  $J$  robotun Jakobiyen matrisidir,  $X_D$  görev alanında vektörün istenen pozisyonudur,  $X$  ve  $\dot{X}$  görev alanındaki pozisyon ve hız vektörleridir,  $\Delta X$  pozisyon vektör hatasıdır,  $\Delta\theta$  mafsıl açısı yer değiştirme vektörü,  $\tau_P$  sertlik kontrolü ile ilgili olarak giriş vektörüdür,  $N$  yerçekimi ve santrifüj ile Koriyolis kuvvetlerinin lineer olmayan ön besleme takviye vektörüdür,  $\tau$  toplam birleşik tork/kuvvet girdi vektörüdür,  $X_E$  temas edilen ortamın konum vektörüdür,  $K_E$  sensörlerin ve ortamın net sertliğidir ve  $F$  çalışma alanında elde edilen temas kuvvet (veya tork) vektörüdür.  $K_P$  ve  $K_V$  genellikle diyagonal matrisler olarak seçilen kontrol kazanımlarıdır,  $K_F$  konum emrinin değiştirilmesi için uygunluk matrisidir.

Temel sistem, bir robot ile onun ortamını, hız geri bildirimini ve robot dinamik sisteminin doğrusallaştırılması için lineer olmayan düzenlemeyi içermektedir.

Kuvvet ve konumun orantısal geri bildirimini içeren sertlik kontrol devresi temas kuvvetine dayalı olan toplam birleşik torkun  $\tau$  birleşik torkunu  $\tau_P$  tanımlamaktadır.

Buna göre  $\tau_p$ 'i aşağıdaki denklem ile tanımlanmaktadır:

$$\tau_p = K_p \Delta\theta \quad (1.1)$$

Buna göre aktif sertlik kontrolü  $K_p$  matrisi için farklı değerler seçerek kullanıcının manipülatörün mekanik sertliğini isteğe göre belirlemesini sağlar.

### 1.1.2. Empedans kontrolü

Hogan'a göre empedans kontrolünün temel felsefesi açısından manipülatör kontrol sistemi sadece bir hareket yörüngesinin izlenmesi için tasarlanmamalıdır fakat manipülatörün mekanik empedansını düzenlemek için de tasarlanmalıdır [6, 7].

Hız olan  $\dot{X}$  ve uygulanan kuvvet olan  $F$  arasındaki ilişki mekanik empedans olan  $Z_m$  olarak tanımlanmaktadır. Frekans alanında bu şu şekilde temsil edilmektedir:

$$F(s)/\dot{X}(s) = Z_m(s) \quad (1.2)$$

Pozisyon  $X(s)$  açısından şu şekilde belirtebiliriz:

$$F(s)/\dot{X}(s) = sZ_m(s) \quad (1.3)$$

Lineer durumda istenen empedans aşağıdaki şekilde gösterilebilir:

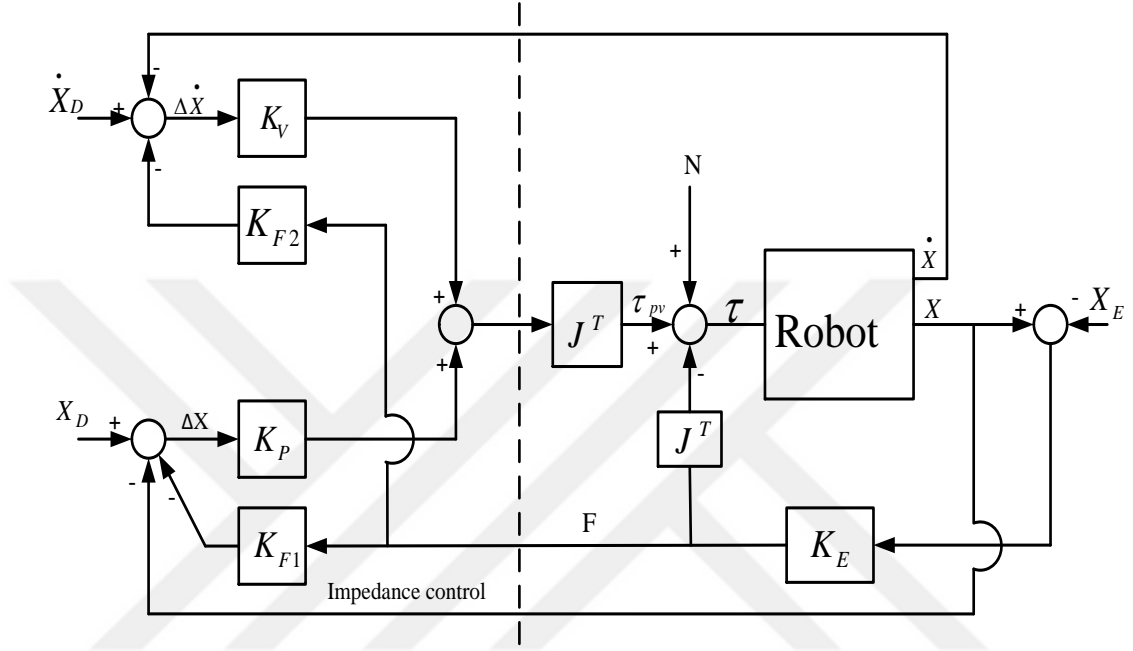
$$sZ_m = M_t s^2 + D_t s + K_t \quad (1.4)$$

Sabit matrisler olan  $M_t$ ,  $D_t$  ve  $K_t$  sırasıyla istenen hareketsizlik, bastırma ve sertlik değerlerini temsil etmektedir. Kontrol edilen sistemin davranışının denklem (1.3)'de belirtildiği gibi olmasını temin etmek empedans kontrolünün görevidir. Empedans kontrolü, hız, konum ve kuvvet gibi ölçülen sinyallerin nasıl kullanıldığına dayalı olarak farklı biçimlerde uygulanmıştır. [8-10]

Şekil 1.2'de  $Z_m(s)$  için uygun bir değer belirleyen temel empedans kontrol devresinin yapısı gösterilmektedir [8]. Şekil 1.2, esasen Şekil 1.1'e benzerdir. Sadece hızın ve hız ile ilgili temas kuvveti etkisinin dâhil edilmesi için başka bir geri bildirim devresi ilave edilmiştir. Bu bağlamda, empedans kontrolü orantısal ve türetilen bir kontrolördür ve burada algılanan kuvvetler konum ve hız için yapılması gereken değişikliklere yol açmaktadır. Pozisyon değişikliği, algılanan kuvvetlerin sertlik kontrolü ile aynı role

sahip olan  $K_{F1}$  matrisi ile çarpılması neticesinde oluşmaktadır. Hız değişikliği algılanan kuvvetlerin  $K_{F2}$  matrisi ile çarpılması sonucunda oluşur. Birleşik alanda, hata düzeltilmesi için emir kuvveti şu şekilde tanımlanmaktadır:

$$\tau_{PV} = J^T (K_P \Delta X + K_V \Delta \dot{X}) \quad (1.5)$$



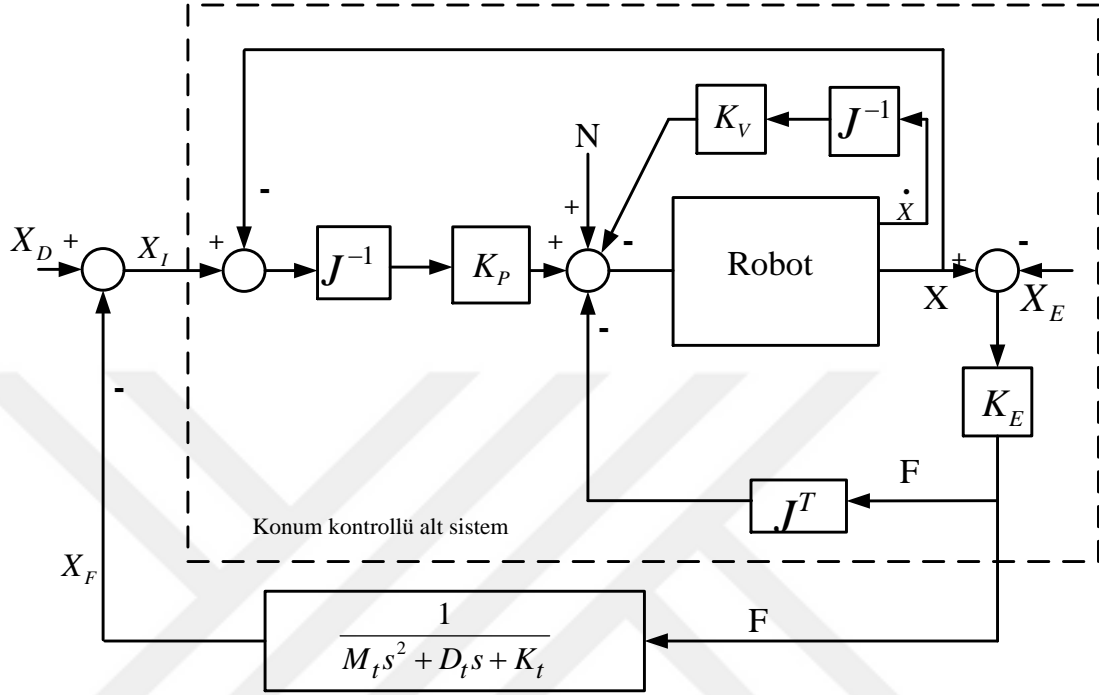
Şekil 1.2. Temel empedans kontrolü

Şekil 1.2’de kontrol devresi ortam ile temas halindeyken manipülatörün sönümlenme sabitini değiştirme etkisine sahiptir. Empedans kontrolü farklı biçimde de sunulabilir. Bu tip bir empedansa birinci düzen empedansı denilir. Birinci düzen empedans kontrolünde, manipülatörün sönümlenme ve sertliği dikkate alınır. Manipülatörün sertlik ve sönümlenme değerler  $K_P$  ve  $K_V$  kontrol kazanımları değiştirilerek düzenlenebilir. Düzensiz empedans sadece manipülatörün sertliği ile ilgilidir. Bu daha önce tartışıldığı gibi sertlik kontrolü olarak adlandırılır.

Şekil 1.3’te ikinci düzen empedans kontrolü konum tabanlı bir kontrol sistemine uygulanmıştır ve burada  $X_F$  eşdeğer kuvvet-geri bildirim yörüngesini temsil etmektedir ve  $X_I$  türevsel denklemin çözümü olarak tanımlanan değiştirilmiş istenen yörünge şeklinde temsil edilmektedir (2.6).

$$M\ddot{X}_I + D\dot{X}_I + KX_I = -F + M_t\ddot{X}_D + D_t\dot{X}_D + K_tX_D \quad (1.6)$$

$X_I(0)=X_D(0)$ ,  $\dot{X}_I(0)=\dot{X}_D(0)$ ,  $M_t$ ,  $D_t$  ve  $K_t$  aşağıda tanımlandığı gibidir. Denklem Şekil 1.3 incelenerek elde edilebilir. Burada (1.3) ve (1.4) denklemleri ile aynı empedans tanımlaması yer almaktadır.



Şekil 1.3. Konum tabanlı empedans kontrolü

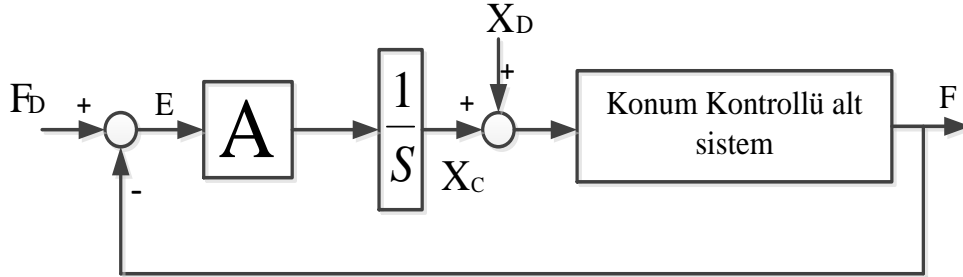
Konum kontrollü alt-sistem, uç işlevci konumu olan  $X$ 'in denklemde tanımlanan  $X_I$ 'i yakından izlemesini temin ettiğinden (1.6), manipülâtörün hedef empedansı elde edilebilmektedir. Ortam ile geri bildirim kontrollü etkileşim empedansın en fazla ikinci düzen içinde olmasını gerektirmektedir. [9] da izah edildiği gibi bunun iki nedeni vardır. İlk olarak ikinci düzen sisteminin dinamikleri iyi anlaşılmiş ve bilinmektedir. İkinci olarak daha üst düzen sistemleri durumu söz konusudur.

### 1.1.3. Admitans kontrolü

Admitans kontrolü bir kuvvet ayar noktasını tanımlamaktadır ve bu ayar noktası bir kuvvet dengeleyici ile izlenmektedir. Aksine verilen bir referans hareket yörüngesinin izlenmesi için bozulma kuvvetlerini reddeden saf konum kontrolü söz konusudur. Mekanik admitans [8, 10] (1.7) denklemindeki gibi tanımlanmaktadır.

$$A=\dot{X}/F \quad (1.7)$$

Bu (1.2) denklemindeki empedans tanımının tersi şeklindedir. Şekil (1.4) [11] bilinen admitans kontrol yapısını göstermektedir ve burada konum kontrollü alt-sistem açıkça Şekil 1.3'te gösterilmiştir (1.3).



Şekil 1.4. Admitans Kontrolü

Şekil 1.4'de admitans matrisi  $A$ , kuvvet hata vektörü  $E$  ( $E=F_D-F$ )'yi uç işlevci hız düzensizliği ile ilişkilendirmektedir. Bilinen bir ortak sertliği için küçük veya sıfır hata, düşük hedef aşımı ve az artan zaman ile birlikte istenen kuvvet yanıtının elde edilmesi için admitans faktörü  $A$  oluşturulabilir. Komut yörüngesi  $X_C$  şu şekilde tanımlanmaktadır:

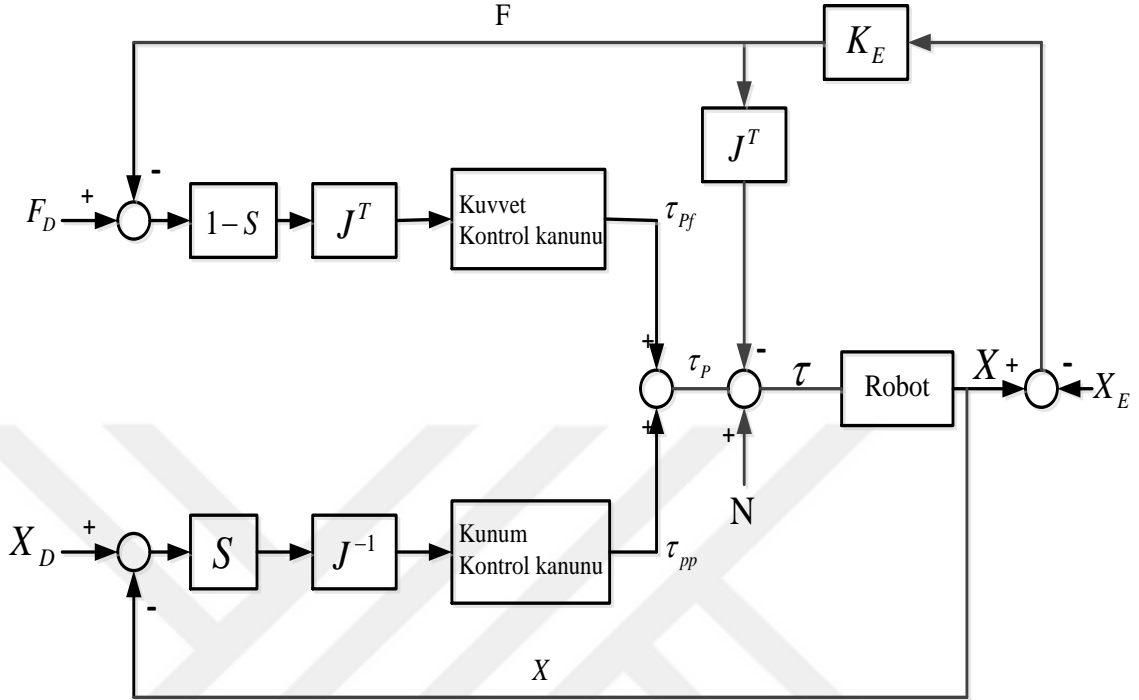
$$X_C = \int A(F_D - F) dt \quad (1.8)$$

Admitans tanımlamasından, admitans kavramının empedansın tersi olduğunu biliyoruz. Admitans kullanımı ile uygun hareket kontrolü altında yatan kavram sınırlandırılan görevlerin gerçekleştirilmesi için konum kontrollü bir robotun temel sistem olarak alınması ve bu sistem üzerinde admitans ile ilgili gerekli değişikliklerin yapılması ile ilgilidir. Empedans kontrolü ile karşılaştırılırsa, admitans kontrolü istenen kuvvet izleme kontrolüne daha fazla odaklanmaktadır.

#### 1.1.4. Hibrid konumu/kuvvet kontrolü

Hibrid konum/kuvvet kontrolü Mason'un kavramına dayalı olarak konumsal verilerle kuvvet ve tork bilgilerini birleştirmektedir ve bununla ilgili olan Mason'un kavramı [12] yerleşim ve kuvvet ile ilgili iki tamamlayıcı ortogonal çalışma yerini tanımlamaktadır. Diğerleriyle karşılaştırıldığında hibrid konum/kuvvet kontrolünün avantajı, pozisyon ve kuvvet bilgilerinin bağımsız olarak analiz edilmeleri ve her biri için iyi bilinen kontrol tekniklerinden istifade edilmesiyle ilgilidir ve bunlar her ikisi de birleşik torklara dönüştürüldüğünde son aşamada bir araya getirilirler. Bu durum

uygulanan kuvvet ile son efektörün konumu arasında sabit bir ilişki olmadığını göstermektedir.



Şekil 1.5. Hibrid konumun/kuvvet kontrolünün kavramsal organizasyonu

Şekil 1.5 [13]'de,  $S = \text{diag}(s_j)$  ( $j = 1 \dots n$ ) uygunluk seçim matrisi olarak adlandırılmaktadır ve  $n$  ise özgürlük derecesinin sayısıdır.  $S$  matrisi kuvvet ve konumun kontrol edilmesi gereken alt-alanları belirlemektedir ve  $s_j$  ise 1 veya 0 olarak seçilmektedir.  $s_j = 0$  olduğunda  $j$  numaralı dof kuvvet kontrollü olmalıdır. Aksi takdirde pozisyon kontrollü olması gerekecektir. Kumanda torku şu şekildedir:

$$\tau_p = \tau_{pp} + \tau_{pf} \quad (1.9)$$

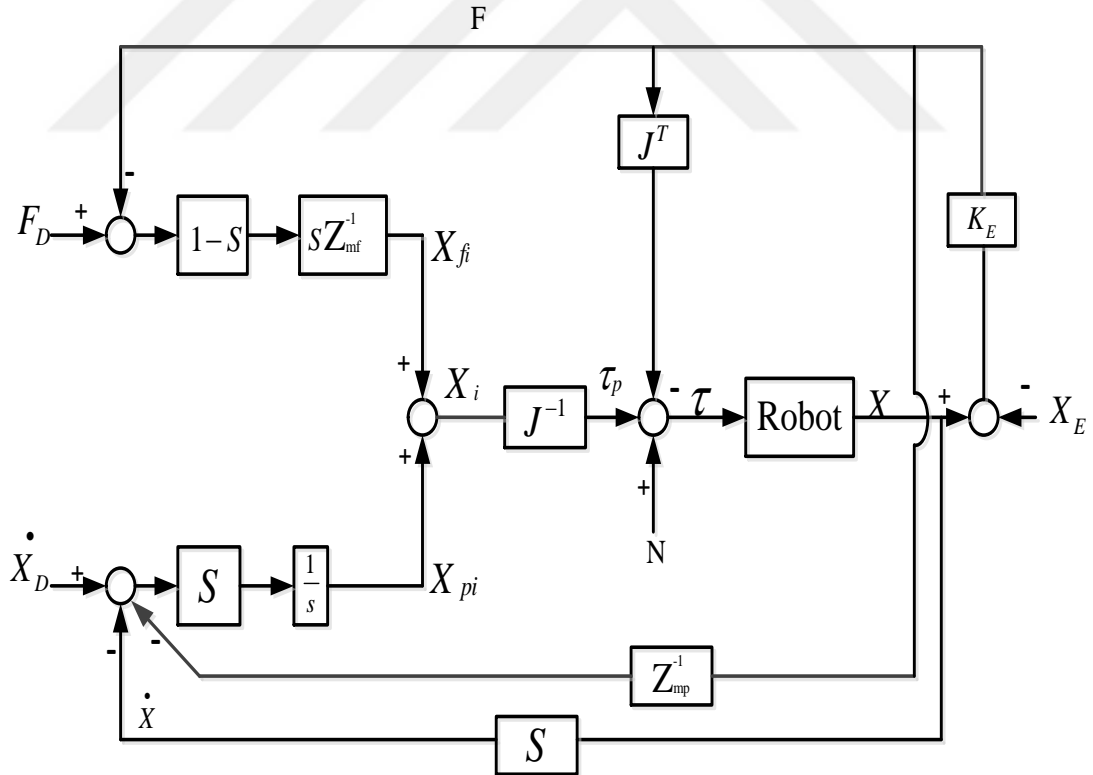
$\tau_{pp}$  ve  $\tau_{pf}$  sırasıyla konum ve kuvvet alt-alanlarında hareket eden kumanda torklarıdır. Bu şekilde pozisyon kontrolü ve kuvvet kontrolü ayrılmış olmaktadır.

Her biri için kontrol yasaları bağımsız olarak tasarlanabilecektir ve böylece istenen konum ve kuvvet yörünge takipleri için farklı kontrol performans gereklilikleri eş zamanlı olarak gerçekleştirilebilecektir. Normal olarak Şekil 1.5'te bulunan pozisyon kontrol yasası bir PD aksiyonundan oluşmaktadır ve kuvvet kontrol yasası bir PI aksiyonundan oluşmaktadır. Bunun nedeni şudur ki, pozisyon kontrolü için daha hızlı bir yanıt istenmektedir ve kuvvet kontrolü için daha ufak bir hata daha tercih edilir

olmaktadır. Fakat hibrid konumu/kuvvet kontrolü uygulamalarının bazılarında tam ve belirgin kuvvet kontrolü olarak kuvvet kontrollü alt-alan için farklı kuvvet kontrol algoritmaları kullanılmaktadır.

### 1.1.5. Hibrid empedans kontrolü

Hibrid empedans kontrolü Anderson ve Spong [14] tarafından ortaya atılmış olup, kendileri empedans kontrolü ile hibrid konumunu/kuvvet kontrolünü bir strateji şeklinde bir araya getirmişlerdir. Bu durum bir tasarımcıya kontrollü robotik sistemin istenen empedansının seçiminde daha fazla esneklik tanımaktadır. Buna göre kuvvet kontrollü ve pozisyon kontrollü alt-alanlarda empedansların ayrıştırılması sağlanabilmektedir. Bunun anlamı her alt-alan için farklı empedansların seçilebileceği şeklindedir. Hibrid empedans kontrolü, hibrid konumu/kuvvet kontrolüne göre daha karmaşık bir algoritmadır fakat aksine manipülatörün empedans değerlerinin tekrarlanması gereklidir çünkü manipülatör farklı ortamlarla karşılaşabilmektedir.



Şekil 1.6. Hibrid empedans kontrolü

Şekil 1.6'da,  $Z_{mp}$  ve  $Z_{mf}$  kullanıcı tarafından seçilmiş olan istenen empedans terimleridir. Eğer bunlar diyagonal matrisler olarak seçilirse, bunların elementleri her

özgürlük derecesinde empedansı temsil etmektedir. S uygunluk seçim matrisidir ve bu hibrid konumu/kuvvet kontrolündeki ile aynıdır.

Değiştirilmiş olan istenen yörünge  $X_i$  şu şekildedir:

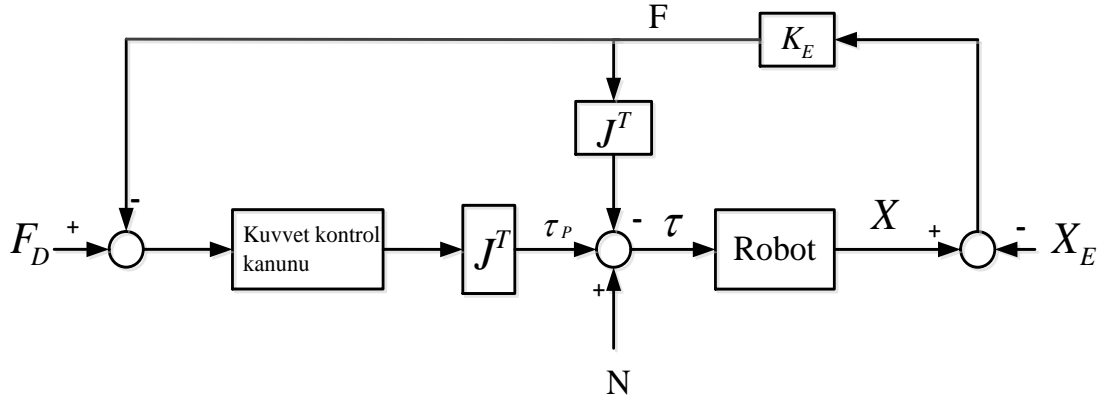
$$X_i = X_{p_i} + X_{f_i} \quad (1.10)$$

Burada  $X_{p_i}$  ve  $X_{f_i}$  sırasıyla pozisyon ve kuvvet alt-alanları olarak ifade edilen değiştirilmiş olan pozisyon ve kuvvet yörüngeleridir.

### 1.1.6. Belirgin kontrol

Bu konuyu inceleyen ve farklı yöntemler üzerinde çalışmalar yapan Volpe ve Khosla [15, 16]'ya göre robotun belirgin kuvvet kontrolü iki kategoriye içermektedir. Bunlardan biri kuvvet tabanlıdır ve diğeri ise pozisyon tabanlı olan belirgin kuvvet kontrolüdür. Fakat ikinci kategori daha önce izah edilmiş olan ve Şekil 1.4'te gösterilen admitans kontrolü ile aynı yapıya sahiptir.

Bu noktada, sadece kuvvet tabanlı kontrol stratejisi incelenecektir. Kuvvet kontrolünün yönetim diyagramı Şekil 1.7 [16]'de gösterilmiştir.

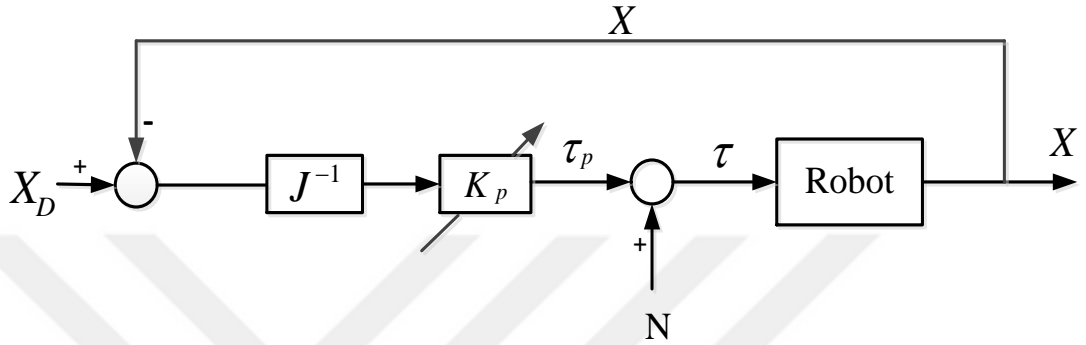


Şekil 1.7. Belirgin kuvvet kontrolü

Şekil 1.7'de kuvvet hata vektörünün oluşturulması için ölçülen kuvvet direkt olarak geri bildirim için kullanılmıştır. Kuvvet kontrol yasası normal olarak PID olarak seçilmektedir. Esasen belirgin kuvvet kontrolündeki kuvvet kontrol yasasının tasarımı başarılı kuvvet takibi için anahtar oluşturmaktadır.

### 1.1.7. Tam kuvvet kontrolü

Şekil 1.8’de tam kuvvet kontrolü görülmektedir [11]. Burada kuvvet geri bildirim yoktur. Aksine, pozisyon, istenen kuvvet için konumun yeniden tanımlanmasına dayalı şekilde kontrollüdür. Bunun için pozisyon geri bildirim kazanımı  $K_p$  belirlenmiştir ve buna göre robot kolu belirli bir sertliğe ulaşabilmektedir.



Şekil 1.8 Tam kuvvet kontrolü

## 1.2. Kesir Dereceli Kontrol Algoritması

$F(t)$  fonksiyonunun  $n$  sayılı türevinin matematiksel olarak  $d^n y/dy^n$  şeklinde tanımlanabileceği bilinmektedir. Biri şu soruyu sorabilir: “Formüldeki  $n=1/2$  ne anlama gelmektedir?” Esasen bu soru bir mektupla Fransız matematikçi Guillaume François Antoine L’Hopital tarafından hesaplamının mucitlerinden olan Fransız matematikçi Gottfried Wilhelm Leibnitz’e 300 yıldan evvel sorulmuştur. Bu mektuba cevap olarak Leibnitz şunu belirtmiştir: “Bu bir paradoksa neden olacaktır ve bir gün bundan yararlı sonuçlar çıkartılacaktır.” Bu kesir dereceli hesaplamının başlangıcını oluşturmuştur. Fakat daha önceki araştırmalar teoretik matematik konuları üzerine odaklı idi. Kesir dereceli hesaplama bugün farklı alanlarda geniş biçimde kullanılmaktadır. Örneğin otomatik kontrol disiplinde kesir dereceli kontrolü ümit vaat eden yeni bir konudur [17].

### 1.2.1. Kesir dereceli hesaplama

Kesir dereceli hesaplama, tam sayı düzen hesaplamasının geliştirilmesinden bu yana bilinmekteydi ve buna ilk atıf muhtemelen yarım düzen türevinden bahsedilen 1695 yılındaki Leibniz and L’Hopital’in ifadelerinde yer almaktaydı.

Kesir dereceli hesaplaması (KDH) tam sayı olmayan düzenleri içeren geleneksel ayrıştırma ve entegrasyonun genelleştirmesidir. Kesir dereceli entegrasyonunu ve diferansiyelini temsil eden temel operatör (1.11)'de verilmiştir ve burada  $\alpha$  gerçek bir sayıdır [18].

$${}_0\Gamma_t^\alpha = \begin{cases} \frac{d^\alpha}{dt^\alpha} & , \alpha > 0 \\ 1 & , \alpha = 0 \\ \int_a^t (d\tau)^\alpha & , \alpha < 0 \end{cases} \quad (1.11)$$

$\Gamma$  bir lineer operatördür ve bu  $\alpha$  negatife olduğunda bir entegratör olarak yorumlanmaktadır ve  $\alpha$  pozitif olduğunda bir farklılaştırıcı olarak algılanmaktadır. Diğer durumlarda  $\alpha$  sıfır olduğunda  $\Gamma$  bir birliktelik oluşturur [18] ve kesir dereceli hesaplama entegrasyon ve farklılaştırmanın tam sayı olmayan düzende genelleştirilmesidir. Ortak kullanılan tanımlamalar aşağıda özetlenmiştir.

#### 1.2.1.1. Kesirli derece ile ilgili cauchy integral formülü

Formül tam sayı düzen hesaplamasından genişletilmiştir.

$$\Gamma^\alpha f(t) = \frac{\Gamma(\alpha+1)}{j2\pi} \int_C \frac{f(\tau)}{(\tau-t)^{\alpha+1}} d\tau \quad (1.12)$$

Burada  $C$ ,  $f(t)$  fonksiyonun kutuplarını çevreleyen kapalı bir yoldur. Sinüsoidal ve kosinüs fonksiyonlarının entegraller ve türevler şu şekilde ifade edilebilecektir:

$$\frac{d^k}{dt^k} [\sin at] = a^k \sin \left( at + \frac{k\pi}{2} \right), \quad \frac{d^k}{dt^k} [\cos at] = a^k \cos \left( at + \frac{k\pi}{2} \right) \quad (1.13)$$

Cauchy'nin formülü ile de,  $k$ 'nin tam sayı olmaması halinde yukarıdaki formülün yine de geçerli olacağı gösterilebilmektedir.

#### 1.2.1.2. Grünwald-letnikov tanımlaması

Kesir dereceli farklılaşması ve entegral birleşik yolla şu şekilde tanımlanabilecektir:

$${}_a\Gamma_t^\alpha f(t) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h^\alpha} \sum_{j=0}^{\lfloor (t-a)/h \rfloor} (-1)^j \binom{\alpha}{j} f(t-jh) \quad (1.14)$$

Burada  $\binom{\alpha}{j}$  binom katsayılarıdır ve  $\Gamma$ 'nin sol ve sağındaki altsimgeler entegralin alt ve

üst sınırlarıdır.  $\alpha$  değeri sırasıyla farklılaşmaya ve entegrasyona karşılık gelecek şekilde pozitif veya negatife olabilecektir ve  $\alpha$  tam sayı olmayacaktır.

### 1.2.1.3. Riemann-liouville tanımlaması

Kesir dereceli entegrali şu şekilde tanımlanmaktadır:

$${}_a\Gamma_t^{-\alpha}f(t) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_a^t (t-\tau)^{\alpha-1} f(\tau) d\tau \quad (1.15)$$

Burada  $0 < \alpha < 1$  şeklindedir ve  $a$  başlangıç değeridir.  $a = 0$  olduğunda, entegral formülü  $\Gamma_t^{-\alpha}f(t)$  şeklinde basitleştirilebilir. Riemann-Liouville tanımlaması kesir dereceli farklılaşması ve entegrali için geniş biçimde kullanılan bir tanımlamadır. Benzer şekilde Kesir dereceli farklılaşması şu şekilde tanımlanmaktadır:

$${}_a\Gamma_t^{\alpha}f(t) = \frac{d^n}{dt^n} [{}_a\Gamma_t^{-(n-\alpha)}f(t)] = \frac{1}{\Gamma(n-\alpha)} \frac{d^n}{dt^n} \left[ \int_a^t \frac{f(\tau)}{(t-\tau)^{\alpha-n+1}} d\tau \right] \quad (1.16)$$

Burada  $n-1 < \alpha \leq n$  şeklindedir.

### 1.2.1.4. Caputo tanımlaması

Caputo kesir dereceli türevlimesin şu şekilde tanımlanmaktadır:

$${}_0\Gamma_t^{\alpha}f(t) = \frac{1}{\Gamma(1-\gamma)} \int_0^t \frac{f^{(m+1)}(\tau)}{(t-\tau)^{\gamma}} d\tau \quad (1.17)$$

Burada  $\alpha = m + \gamma$  ile ilgili olarak  $m$  bir tam sayıdır ve şu durum geçerlidir:  $0 < \gamma \leq 1$ . Benzer şekilde, Caputo tanımlamasıyla entegral şöyle tanımlanmaktadır:

$${}_0\Gamma_t^{-\gamma}f(t) = \frac{1}{\Gamma(\gamma)} \int_0^t \frac{f(\tau)}{(t-\tau)^{1-\gamma}} d\tau, \gamma > 0 \quad (1.18)$$

Kesirli hesaplamann özellikleri aşağıdaki gibi özetlenmektedir [19]:

- Eğer  $f(t)$ ,  $t$ 'nin bir analitik fonksiyonu ise bunun kesir dereceli türevi olan  ${}_0\Gamma_t^{\alpha}f(t)$ ,  $t$  ve  $\alpha$ 'nin analitik bir fonksiyonudur.
- $\alpha = n$  olduğunda ve  $n$  bir tam sayı iken,  ${}_0\Gamma_t^{\alpha}f(t)$  işlemi tam sayı düzeni olan  $n$  ile ilgili klasik türevleme ile aynı sonucu vermektedir.
- $\alpha = n$ , olduğunda  ${}_0\Gamma_t^{\alpha}f(t)$  işlemi tanımlama operatörüdür:

$${}_0\Gamma_t^{\alpha}f(t) = f(t)$$

- kesir dereceli türevleme ve kesirli entegrasyon lineer işlemlerdir:

$${}_0\Gamma_t^\alpha (af(t)+bg(t))=a {}_0\Gamma_t^\alpha f(t)+b {}_0\Gamma_t^\alpha g(t)$$

- İlave endeks yasası (yarı grup özelliği)

$${}_0\Gamma_t^\alpha {}_0\Gamma_t^\alpha f(t)={}_0\Gamma_t^\alpha {}_0\Gamma_t^\alpha f(t)={}_0\Gamma_t^{\alpha+\alpha} f(t)$$

### 1.2.2. Laplace dönüşümü

Laplace dönüşüm yöntemi lineer diferansiyel denklemlerin çözümü için cebire dayalı olan bir sistemdir (hesaba dayalı olan yöntemler yerine). Bu devamsız kuvvet fonksiyonlarıyla lineer diferansiyel denklemleri ele almamızı sağlayan çok güçlü bir araçtır.

Aşağıdaki şekilde verilen lineer kesir dereceli diferansiyel denklemini dikkate alınız:

$$\begin{aligned} a_1\Gamma^{\mu_1}y(t)+a_2\Gamma^{\mu_2}y(t)+\dots+a_{n-1}\Gamma^{\mu_{n-1}}y(t)+a_n\Gamma^{\mu_n}y(t) \\ =b_1\Gamma^{\gamma_1}u(t)+b_2\Gamma^{\gamma_2}u(t)+\dots+b_m\Gamma^{\gamma_m}u(t) \end{aligned} \quad (1.19)$$

Eğer girdi ve çıktılarda tüm başlangıç değerleri sıfır ise, Laplace dönüşümü uygulanabilir ve böylece diferansiyel denklem bir cebir denklemine dönüştürülebilir ve buradan kesir dereceli transfer fonksiyonu tanımlanabilecektir.

$$G(s)=\frac{L[y(t)]}{L[u(t)]}=\frac{b_1s^{\gamma_1}+b_2s^{\gamma_2}+\dots+b_ms^{\gamma_m}}{a_1s^{\mu_1}+a_2s^{\mu_2}+\dots+a_{n-1}s^{\mu_{n-1}}+a_ns^{\mu_n}} \quad (1.20)$$

Bir kesir dereceli integralinin Laplace dönüşümü şu şekilde ifade edilebilecektir

$$L[\Gamma_t^{-\gamma}f(t)]=s^{-\gamma}L[f(t)] \quad (1.21)$$

ve bir kesir dereceli türevi (Riemann-liouville tanımı) için dönüşüm aşağıdaki denklemlerle değerlendirilebilecektir:

$$L[{}_a\Gamma_t^\alpha f(t)]=s^\alpha L[f(t)]-\sum_{k=0}^{n-1} s^k [{}_a\Gamma_t^{\alpha-k-1} f(t)]_{t=a} \quad (1.22)$$

Burada,  $n-1 \leq \alpha < n$  şeklindedir.

Aşağıdaki durum-alan modeli aynı zamanda kesir dereceli ile ilgili lineer ve zamana göre sabit olan sistemi de temsil edebilecektir

$${}_0\Gamma_t^\alpha x(t) = Ax(t) + Bu(t)$$

$$y(t) = Cx(t)$$

(1.23)

Burada  $x \in \mathbb{R}^n$ ,  $u \in \mathbb{R}^r$  ve  $y \in \mathbb{R}^p$  sistemin durum, giriş ve çıkış vektörleridir ve  $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ,  $B \in \mathbb{R}^{n \times r}$ ,  $C \in \mathbb{R}^{p \times n}$ ,  $q$  kesir orantılı düzeni göstermektedir [18].



## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Çalıştığımız alandaki (Empedans kontrol ve kesir dereceli kontrol) projeleri ve araştırmaları inceledikten sonra, literatürde yaptığımız işe benzer bir çalışma bulunmamıştır. Bu tezde yeni bir kesir dereceli empedans kontrolörü (KDEK) önerilmiştir.

Ganwen ZENG ve Ahmad HEMAMI [20], robot kuvvet kontrol algoritmalarını temel ve gelişmiş kuvvet kontrol olarak iki ana gruba sınıflandırmışlardır. Temel kuvvet kontrol algoritmaları pozisyon ve uygulama kuvveti ya da hız ve uygulama kuvveti veya direkt kuvvet geri bildirim uygulaması ya da bunların birleşimleri arasındaki ilişkinin uygulanmasına dayalı olarak kategorize edilebilmektedir.

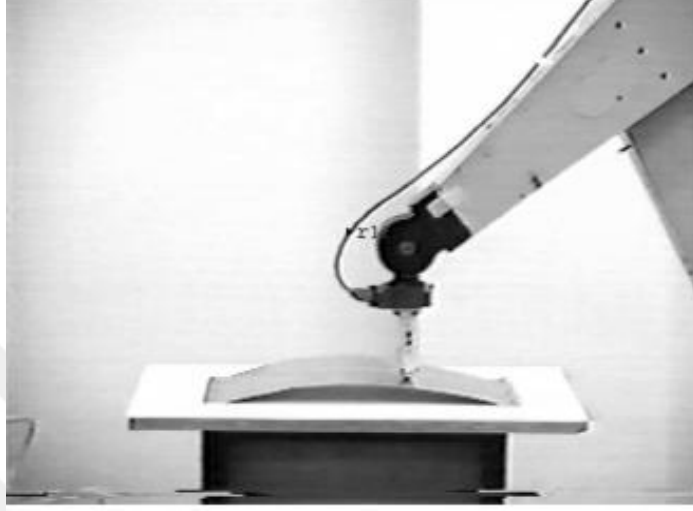
1985 yılındaki HOGAN [21]'in beyanına göre, manipülatör kontrol sistemi sadece hareket yörüngesini izlemek için tasarlanmamalıdır ve daha ziyade hız ile uygulanan kuvvet arasındaki ilişkinin mekanik empedans olarak anıldığı manipülatörün mekanik empedansını düzenlemek için tasarlanmalıdır.

Zhao-Hui Jiang [22] yukarıda belirtilen direkt empedans kontrol yönteminden ziyade bir yörünge izleme yöntemini kullanarak bir empedans kontrol sistemini oluşturdu. Kendisi esnek robotun son efektörünün istenen davranışına odaklandı.

1998 yılında Jong H.park ve Hyun C.cho [24] in 1998 paralel bağlantılı manipülatörler için olan değişken bir sertlik matrisine dayalı yeni empedans kontrol algoritmasını kullandı. Bu çalışmanın düşüncesi dinamik model parametreleri hatalarını düzeltmek için sertlik matrisinin değiştirilmesi şeklindedir.

2011 yılında Yanan Li, Shuzhi Sam Ge, Chenguang Yang, Xinyang Li ve Keng Peng Tee [25], güvenli insan-robot etkileşimi için modelden bağımsız empedans kontrolü tasarlandı. Önerilen yöntem, sistem matrisinin üst sınırları dışında herhangi bir model bilgisi gerektirmemektedir. Bu nedenle pratik uygulamaya konulması kolaydır.

Seul Jung, T.C. Hsia, ve Robert G.Bonitz [27], yeni bir empedans kontrolörünü kullandılar. Buna göre ortam konumu bilinmediğinde, daha iyi kuvvet takibi sağlanması için ortamın hız profilinin tahmin edilmesi gerekiyordu. Bu nedenle kuvvet hatasına dayalı olan uygulama kontrol kavramını kullandılar.



Şekil 2.1. Bilinmeyen ortamda robotun kuvvet izleme empedans kontrolü [27]

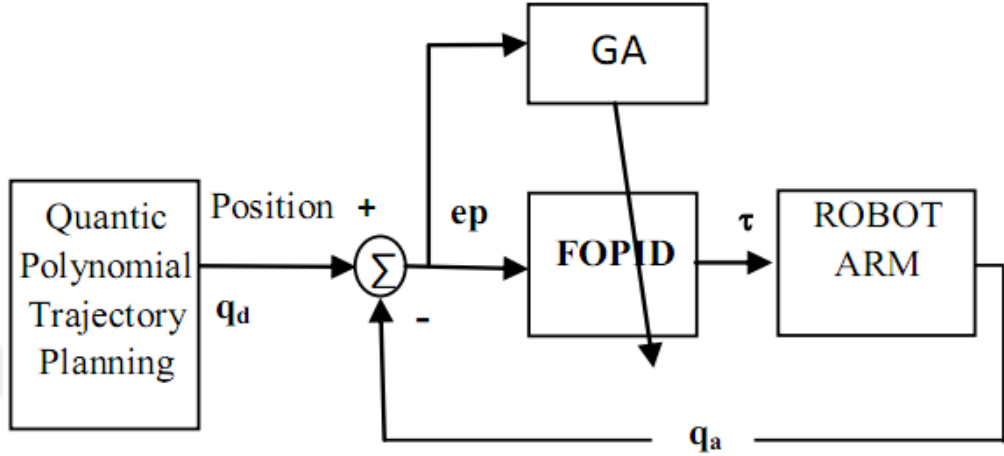
Wei He, Yiting Dong ve Changyin Sun [28], nöral ağları kullanarak girdi doyumu ile bir n-bağlantılı robotik manipülatör için uygulanabilir empedans kontrolünü geliştirdiler. Lyapunov'un yöntemini kullanarak uygulanabilir nöral empedans kontrolörlerini tasarladılar.

Tamas Haidegger, Balazs Benyo, Levente Kovacs, ve Zoltan Benyo [29], cerrahi robotiğini ve güç kontrolünün temellerini sundular. Ayrıca geleneksel sistemlerle geliştirilen farklı algoritmalar ve kontrol paradigmaları ile ilgili bir inceleme sundular.

Concepcion A. Monjea, Blas M. Vinagreb, Vicente Feliuc ve YangQuan Chen [30], kesir dereceli PID kontrolörleri ile ilgilendirler ve bu tip kontrolörler için bir otomatik ayarlama yöntemini sundular.

YangQuan Chen, Ivo Petras ve Dingyü Xue [31], kontrollerle ilgili kesir dereceli hesaplamalar, kesir dereceli hesaplamaların temel tanımlamaları, kesir dereceli dinamik sistemleri ve kontrolleri için öğretici sunum yaptılar.

Reham H. Mohammed, Fahmy Bendary, Kamel Elserafi [32], asgari hata ile iyi beşinci dereceden polinom yörüngesini elde edebilmek amacıyla PUMA 560 robot kolunun ilk üç birleşim pozisyonunu kontrol etmek için kesir dereceli belirsiz orantılı entegre türetilmiş kontrolörü (FO-FUZZY-PID) uyguladılar.



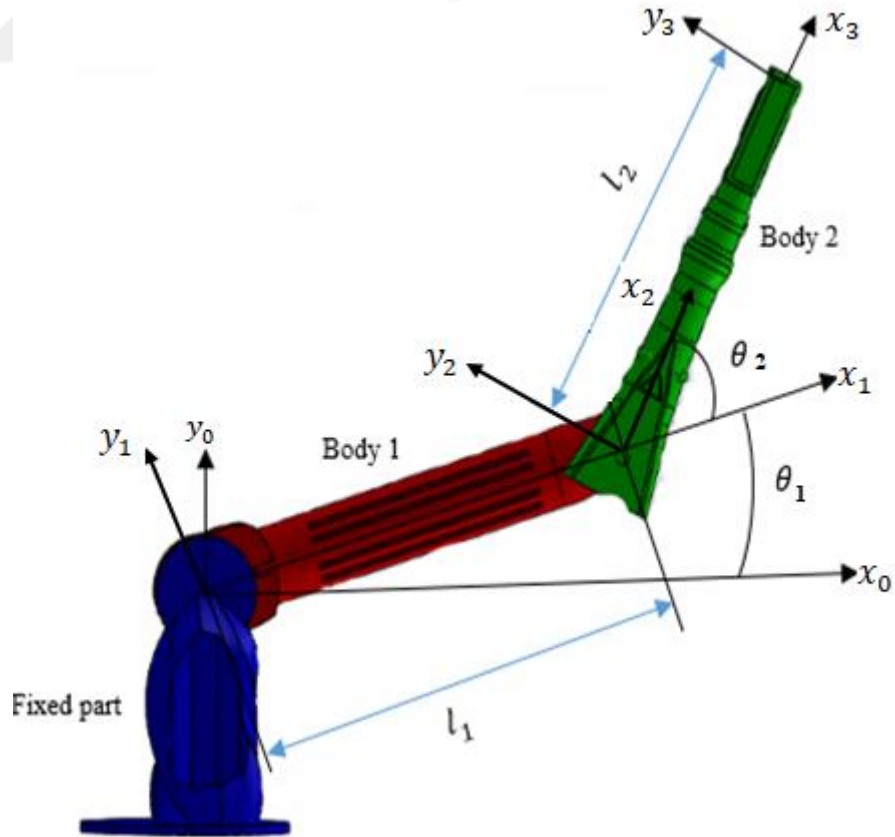
Şekil 2.2. FOPID'e dayalı olarak Robot kolunun yapısı

### 3. MODELLEME, KONTROL VE SİMÜLASYON

Bu bölümde robotik manipulatörün dinamik modelleri farklı koşullar altında elde edilecek ve simüle edilecektir. Ayrıca klasik empedans kontrolü (KEK) ve yeni sunulan kontrolörümüz Kesir dereceli empedans kontrolü (KDEK) de gerçekleştirilecektir.

#### 3.1. 2-DOF Robotik Manipulatörün Modellenmesi

Bu bölümde kullanılan robot kolu Şekil 3.1’de gösterilmiştir ve şekilde serbestlik derecesine göre 3 boyutlu programla (SolidWorks) çizilen robot manipulatörün mekanik modeli ve koordinat sistemleri gösterilmektedir. Bunun kinetik ve dinamik denklemleri aşağıda türetilenektir. Model sabit kısım, iki beden ve iki döner eklemden oluşmaktadır.



Şekil 3.1. 2-DOF Robot manipulatörü ve koordinat sistemleri

### 3.1.1. 2-DOF Robotik manipülatörün ileri ve ters kinematığı

Önce Şekil 3.1’de gösterildiği gibi robot manipülatörün koordinat sistemlerini tayin edeceğiz. Sonra robot manipülatörün ileri kinematığı Denavit-Hartenberg parametreleri olarak adlandırılan bir grup parametrenin belirlenmesi ile ilgili olacaktır. Bu parametreler manipülatör yapısında tayin edilen farklı koordinatlar arasında homojen dönüşüm matrislerinin türetilmesi için önemlidir. Robot manipülatörün D-H parametreleri Şekil 3.1’de gösterilmiştir.

Tablo 3.1. Robot manipülatörün D-H değişkenleri.

i	$\alpha_{i-1}$	$a_{i-1}$	$d_i$	$\theta_i$	Değişken
1	0	0	0	$\theta_1$	$\theta_1$
2	0	$l_1$	0	$\theta_2$	$\theta_2$
3	0	$l_2$	0	0	0

Bireysel sıra elemanlarının şuna (3.1) direkt yerleştirilmesi

$${}_{i-1}T_i = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} d_i \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Dönüşüm matrisleri şuralarda verilmiştir (3.2, 3.3 ve 3.4)

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} c\theta_1 & -s\theta_1 & 0 & 0 \\ s\theta_1 & c\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} c\theta_2 & -s\theta_2 & 0 & l_1 \\ s\theta_2 & c\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Şekil 3.1'deki 2-DOF robot manipülatörün ileri kinematığı (3.5) denklemi şeklinde yukarıdaki  ${}^i-1T_i$  matrisleri ile ilgili dönüşümün çarpılmasıyla belirlenebilir ve burada  $i=1,2, \dots, 3$  şeklinde olacaktır.

$${}^0T_3 = {}^0T_1 T_1^2 T_2^3 T_3^2 T \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} {}^0T_3 &= \begin{bmatrix} c\theta_1 & -s\theta_1 & 0 & 0 \\ s\theta_1 & c\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\theta_2 & -s\theta_2 & 0 & l_1 \\ s\theta_2 & c\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} c\theta_1\theta_2 & -s\theta_1\theta_2 & 0 & l_2c\theta_1\theta_2+l_1c\theta_1 \\ s\theta_1\theta_2 & c\theta_1\theta_2 & 0 & l_2s\theta_1\theta_2+l_1s\theta_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Yukarıda (3.3) kısmında hesaplanan dönüşüm matrisi  ${}^0T_3$ 'den (3.4) kısmında robotumuzun konum vektörü gösterilmektedir.

$$\begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_2c\theta_1\theta_2+l_1c\theta_1 \\ l_2s\theta_1\theta_2+l_1s\theta_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Endüstriyel manipülatörlerin çoğunda direkt olarak robota tork komutlarının gönderilme olasılığı mevcut değildir. Çözüm bulmak ve kontrol mühendisinin görevlerini kolaylaştırmak için bu endüstriyel robotlarda gereken ters kinematik algoritmaları ile birlikte dâhili bir ortak denetleyici de bulunmaktadır. Tasarımcı, robota doğrudan mafsal açısı komutları göndermeyi veya Kartezyen koordinatlarda bir uç işlevci konum veya oryantasyon komutu göndermeyi seçebilir. Bu nedenle 2-DOF manipülatörün ters kinematığını çözmek için (3.5) denklemini kullanalım.

$${}^0T_3 = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & P_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & P_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = {}^0T_1 T_1^2 T_2^3 T \quad (3.8)$$

(3.8) denkleminin her kenarını  ${}^0T_1^{-1}$  ile çarpın.

$${}^0T_1^{-1} {}^0T_3 = {}^0T_1^{-1} T_1^2 T_2^3 T \quad (3.9)$$

ve burada

$${}^0_1T^{-1} = \begin{bmatrix} {}^0_1R^T & -{}^0_1R^T P_1 \\ 000 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

(3.10) Denkleminde  ${}^0_1R^T$  ve  ${}^0P_1$  sırasıyla  ${}^0_1T$  ile ilgili rotasyon değişimi ve konum vektörünü ifade etmektedir.  ${}^0_1T^{-1}{}^0_1T = I$  şeklinde olduğundan, (3.10) denklemi şu şekilde yazılabilir.

$${}^0_1T^{-1}{}^0_3T = {}^1_2T^2T \quad (3.11)$$

Bağlantı dönüşüm matrislerinin (3.11) denkleminde yerleştirilmesi şunları sağlamaktadır:

$$\begin{bmatrix} c\theta_1 & -s\theta_1 & 0 & 0 \\ s\theta_1 & c\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & P_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & P_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\theta_2 & -s\theta_2 & 0 & l_1 \\ s\theta_2 & c\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & c\theta_1 P_x + s\theta_1 P_y \\ \cdot & \cdot & \cdot & -s\theta_1 P_x + c\theta_1 P_y \\ \cdot & \cdot & \cdot & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & l_2 c\theta_2 + l_1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & l_2 s\theta_2 \\ \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

(3.12) denkleminde her kenarda (1,4) ve (2,4) matris elemanlarının karelerinin alınmasıyla şunlar elde edilir.

$$c^2\theta_1 P_x^2 + s^2\theta_1 P_y^2 + 2P_x P_y c\theta_1 s\theta_1 = l_2^2 c^2\theta_2 + 2l_1 l_2 c\theta_2 + l_1^2$$

$$s^2\theta_1 P_x^2 + c^2\theta_1 P_y^2 - 2P_x P_y c\theta_1 s\theta_1 = l_2^2 s^2\theta_2$$

Ve sonra sonuç denklemlerinin toplanmasıyla şu elde edilir.

$$P_x^2 (c^2\theta_1 + s^2\theta_1) + P_y^2 (s^2\theta_1 + c^2\theta_1) = l_2^2 (c^2\theta_2 + s^2\theta_2) + 2l_1 l_2 c\theta_2 + l_1^2$$

$$P_x^2 + P_y^2 = l_2^2 + 2l_1 l_2 c\theta_2 + l_1^2$$

$$c\theta_2 = \frac{P_x^2 + P_y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1 l_2}$$

Son olarak,  $\theta_2$  ile ilgili iki muhtemel çözüm aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\theta_2 = \text{Atan2} \left( \pm \sqrt{1 - \left[ \frac{P_x^2 + P_y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1 l_2} \right]^2}, \frac{P_x^2 + P_y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1 l_2} \right) \quad (3.13)$$

Şimdi ikinci dönel eklem değişkeni  $\theta_2$  bilinen bir değişken olduğuna göre. İlk eklem değişken  $\theta_1$ , (3.12) denkleminde her kenarda (1,4) elemanlarını eşitleyerek şu şekilde elde edilebilir.

$$\theta_1 = \text{Atan2}(P_y, P_x) \pm \text{Atan2}(\sqrt{P_y^2 + P_x^2 - (l_2 \cos \theta_2 + l_1)^2}, l_2 \cos \theta_2 + l_1) \quad (3.14)$$

Burada  $P_y, P_x$  uç işlevci konumunu oluşturur ve  $l_1$  ile  $l_2$  sırasıyla 1 ve 2 bağlantılarının uzunluklarıdır.

Her zaman matematiksel çözüm fiziksel çözümü temsil etmez. Elde edilen çözüm kümelerine göre robotun uç işlevcisinin dört farklı konumu bulunmuştur. Bu çözüm kümesinde bulunan olası sonuçlar robotun doğru konuma birden fazla konfigürasyonda ulaşmasına yardımcı olur. Çözüm kümesinde bulunan olası sonuçlar içinde pozitif olan  $\theta_1$  ve  $\theta_2$  çözümlerinin ileri kinematikteki konum vektöründe yerlerine yazılması ile doğruluğu görülmüş ve modelde kullanılmıştır.

$$\begin{array}{ccc} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_4 \\ \dot{\theta}_5 \\ \dot{\theta}_6 \end{bmatrix} & \begin{array}{c} \dot{X} = J(\theta) \dot{\theta} \\ \longrightarrow \\ \longleftarrow \\ \dot{\theta} = J^{-1}(\theta) \dot{X} \end{array} & \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \end{array}$$

Eklem alanı

Görev alanı

Şekil 3.2. lineer ve köşegen hızları arasındaki ilişkiyi.

Şekil 3.2' de bir robotik manipülâtörün Jakobiyen matrisi, manipülâtörün uç işlevcisi ile birleşik hızlarının lineer ve köşegen hızları arasındaki ilişkiyi tanımlar. Şekil 3.1'de gösterilen 2-DOF robotik manipülâtörü için olan Jakobiyen matrisi (3.5) kısmında gösterilen yinelemeli yöntem kullanılarak elde edilir.

Basit olması için Jakobiyen, uç işlevcinin doğrusal ve açısal hızını temsil eden  $J_v$  ve  $J_w$  olmak üzere iki kısma ayrılacaktır.

Jakobiyen 'in doğrusal hız kısmı:

$$J_v(\theta) = \begin{bmatrix} -l_1 s\theta_1 - l_2 s\theta_1 \theta_2 & -l_2 s\theta_1 \theta_2 \\ l_1 c\theta_1 + l_2 c\theta_1 \theta_2 & l_2 c\theta_1 \theta_2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Jakobiyen 'in açısal hız kısmı:

$$J_w(\theta) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Uç işlevci için Jakobiyen matrisi (3.15) şu şekilde gösterilebilir:

$$J(\theta) = \begin{bmatrix} J_v(\theta) \\ J_w(\theta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_1 s\theta_1 - l_2 s\theta_1 \theta_2 & -l_2 s\theta_1 \theta_2 \\ l_1 c\theta_1 + l_2 c\theta_1 \theta_2 & l_2 c\theta_1 \theta_2 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Det  $[J(\theta)] = 0$  olduğunda Jakobiyen matrisinin tersi hesaplanamaz, bu nedenle tekil noktalar  $J$  Jakobiyen 'in determinantının sıfıra neden olan  $\theta$  değerleridir.

### 3.1.2. 2-DOF Robot manipülatörün dinamiği

Bir robot manipülatörün dinamikleri, dinamik modellemedeki problemlerin açıklanması için ve dinamik modelin mekanik yapı üzerinde etkili kuvvetler sonuç yer değişimi, hızlar ve hızlanmalarla ilişkilendirmesine dayalı olarak açık şekilde Lagrange-Euler formülasyonu tabanlı olarak türetilmektedir. Burada bu kuvvetler mekanik bağlantıların hareketsizliği, motorların ürettiği torklar, sürtünme kuvvetleri ve robot üzerinde ortamdan üretilen muhtemel kuvvetler gibi farklı kaynaklardan oluşabilirler.

Bu model de aktüatör dinamiği (motorlar ve Dişli kutuları) ve sürtünme kuvvetleri ihmal edilmiştir. Ayrıca robotun rijit, bağlantılarda ve eklemlerde ise esneklik olmadığı kabul edilmiştir. Basit model olduğu için atalet matrisi ( $I$ ) sıfır olarak

dinamik denklemde hesaplanmıştır. Matlab/Simulink benzetim ortamında modelin atalet matrisi Simmechanics ara yüzünde hesaplanmış ve sisteme uygulanmıştır.

$$I = \begin{bmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{yx} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{zx} & I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix} = 0$$

3.1 Şeklindeki robot manipülatörümüz için hareket denkleminizi elde etmek için sistem için enerji denklemini oluşturmak ve sonrasında (3.16) denklemlerine göre Lagrangian farklılaştırmasını yapmak önemlidir.

$$u_i = \frac{d}{dt} \left( \frac{dL}{d\dot{\theta}_i} \right) \cdot \left( \frac{dL}{d\theta_i} \right) \quad (3.16)$$

Burada  $u_i$  bir dönüşüm hareketi üzerindeki tüm harici dönme momentini ifade eder.

$$L = K - P \quad (3.17)$$

Önce sistemin kinetik ve potansiyel enerjileri hesaplanır.

$$K = K_1 - K_2 \quad (3.18)$$

$$K_1 = \frac{1}{2} m_1 l_1^2 \dot{\theta}_1^2 \quad (3.19)$$

$$K_2 = \frac{1}{2} m_2 [(l_1^2 + 2l_1 l_2 c\theta_2 + l_2^2) \dot{\theta}_1^2 + 2(l_2^2 + l_1 l_2 c\theta_2) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + l_2^2 \dot{\theta}_2^2] \quad (3.20)$$

Ve toplam kinetik enerji şudur:

$$K = \frac{1}{2} m_1 l_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 [(l_1^2 + 2l_1 l_2 c\theta_2 + l_2^2) \dot{\theta}_1^2 + 2(l_2^2 + l_1 l_2 c\theta_2) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + l_2^2 \dot{\theta}_2^2] \quad (3.21)$$

Sistemin potansiyel enerjisi şu şekilde yazılabilir:

$$P_1 = m_1 g l_1 s\theta_1 \quad (3.22)$$

$$P_2 = m_2 g (l_1 s\theta_1 + l_2 s\theta_1 \theta_2) \quad (3.23)$$

$$P = P_1 + P_2 = (m_1 + m_2) g l_1 s\theta_1 + m_2 g l_2 s\theta_1 \theta_2 \quad (3.24)$$

Sistem ile ilgili Lagrangian şudur:

$$L = \frac{1}{2} m_1 l_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 \left[ (l_1^2 + 2l_1 l_2 c\theta_2 + l_2^2) \dot{\theta}_1^2 + 2(l_2^2 + l_1 l_2 c\theta_2) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + l_2^2 \dot{\theta}_2^2 \right] - (m_1 + m_2) g l_1 s\theta_1 - m_2 g l_2 s\theta_1 \theta_2 \quad (3.25)$$

Lagrangian'ı türetilip (3.16) denkleminde kullandıktan sonra ilk hareket denklemi şöyledir:

$$u_1 = \left( m_1 l_1^2 + m_2 (l_1^2 + 2l_1 l_2 c\theta_2 + l_2^2) \right) \ddot{\theta}_1 + m_2 (l_1 l_2 c\theta_2 + l_2^2) \ddot{\theta}_2 - m_2 l_1 l_2 s\theta_2 (2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2^2) + (m_1 + m_2) g l_1 c\theta_1 + m_2 g l_2 c\theta_1 \theta_2 \quad (3.26)$$

$$u_2 = m_2 (l_1 l_2 c\theta_2 + l_2^2) \ddot{\theta}_1 + m_2 l_2^2 \ddot{\theta}_2 + m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_1^2 s\theta_2 + m_2 g l_2 c\theta_1 \theta_2 \quad (3.27)$$

Bu gözlemlerle birlikte hareketin vektör denklemini şu şekilde yazabiliriz:

$$M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) = u$$

$$M(\theta) \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} + C(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

Burada:

$M(\theta)$  : Manipülâtörün kütle ve atalet matrisidir.

$C(\theta, \dot{\theta})$  : Coriolis vemerkezci vektörüdür.

$G(\theta)$  : Yer çekimi vektörüdür.

$u$  : Giriş tork.

$$M(\theta) = \begin{bmatrix} (m_1 + m_2)l_1^2 + m_2 l_2^2 + 2m_2 l_1 l_2 \cos\theta_2 & m_2 l_2^2 + m_2 l_1 l_2 \cos\theta_2 \\ m_2 l_2^2 + m_2 l_1 l_2 \cos\theta_2 & m_2 l_2^2 \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

$$C(\theta, \dot{\theta}) = \begin{bmatrix} -m_2 l_1 l_2 s\theta_2 (2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2^2) \\ m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_1^2 s\theta_2 \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

$$G(\theta) = \begin{bmatrix} (m_1 + m_2) g l_1 \cos\theta_1 + m_2 g l_2 c\theta_1 \theta_2 \\ m_2 g l_2 c\theta_1 \theta_2 \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

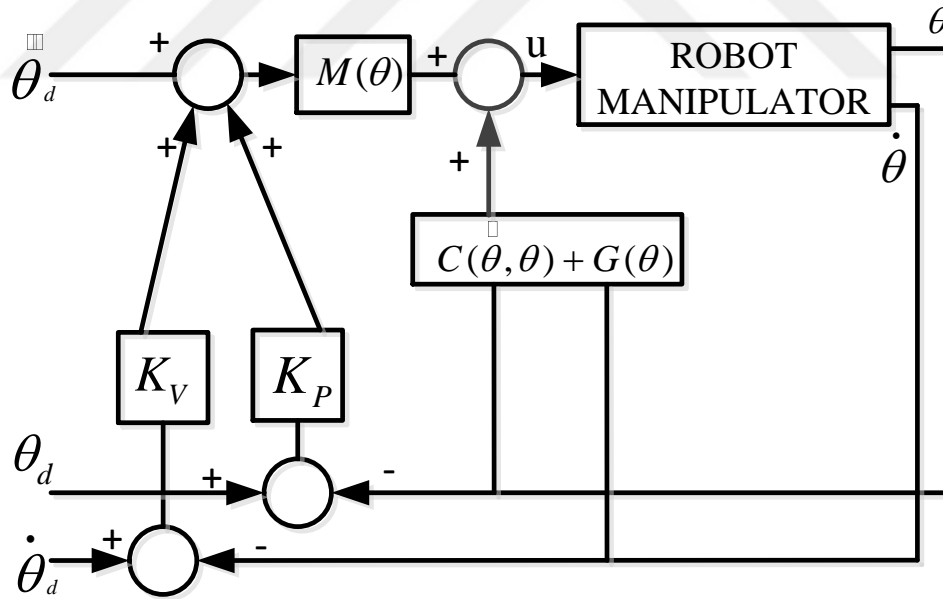
$l_1$  ve  $l_2$  terimleri 1 ve 2 bağlantılarının uzunluklarıdır ve  $m_1$ ,  $m_2$  sırasıyla bunların kütleleridir. Bu çalışmada basitlik için  $l_1 = l_2 = 0.16m$  ve  $m_1 = m_2 = 1kg$  şeklindedir. Denklem (1) 'te basitleştirmek için her zaman gerçek bir robot manipülâtöründe bulunan sürtünme torklarını alınmamıştı.

### 3.2. Pozisyon Kontrolü

Sistemin modeli doğrusal değildir ve yüksek derecede bağlı. 3.1 şeklinde gösterilen şekilde 2-DOF robot manipulatörün konumunu kontrol etmek için hesaplanan dönüş moment kontrolörü kullanılacaktır. Hesaplanan dönüş moment yöntemi, robotik manipulatörlerin yörünge izleme kontrol performansının artırılması için düzensizlik tork yöntemi olarak literatürde kapsamlı olarak kullanılmıştır. Bu yönetim robotik manipulatörün dinamik denklemleri kullanılarak eklem torklar için tahmini değerlerin hesaplanması fikrine dayanmaktadır. Sonrasında hesaplanan tork değerleri ortadan kaldırılmaları için eklemelerin mevcut negatife torklarına ilave edilebilirler. Şekil 3.3'te hesaplanan tork şeması konfigürasyonu gösterilmektedir. Kontrol yasası denklemi (3.31) hesaplanan tork kontrol stratejisinin standart yapısını temsil etmektedir.

$$u = M(\theta) [\ddot{\theta}_d + K_v \dot{e} + K_p e] + C(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) \quad (3.31)$$

Burada  $\ddot{\theta}_d$ ,  $\dot{\theta}_d$  ve  $\theta_d$  sırasıyla istenen hızlanma, hız ve konum vektörleridir.



Şekil 3.3. Hesaplanan tork kontrol yönetimi

Eklem konum hatası ve hız hatası (3.32) denklemindeki vektörlerle gösterilmiştir.

$$e = \theta_d - \theta \quad \& \quad \dot{e} = \dot{\theta}_d - \dot{\theta} \quad (3.32)$$

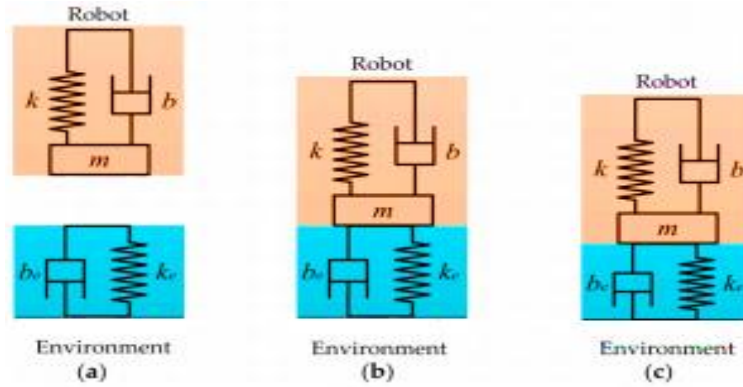
(3.31)'deki hesaplanan tork kontrolü orantısal ve türev kazançlar olan  $K_p$  ve  $K_v$  olmak üzere iki parametreye sahiptir.

### 3.3. Ortam Ve Temas Kuvvetleri

Dinamik model, robot manipülâtörün dinamik davranışını değiştirebilecek olan ve robot üzerinde etkili olabilen muhtemel harici kuvvetleri dikkate almamaktadır. Bu nedenle bir ortam modeli sisteme ilave edilecektir. Robot sabit ortamlarla temas ettiğinde robot ikincil bir düzen kütle yay sönümleyici sistemle temsil edilebilecektir ve ortam da  $K_e$  sertliği ile bir yay modeli şeklinde modellendirilebilecektir. Geniş aralıktaki ortamları kapsamak için yayla  $B_e$  sönümleme katsayısını dâhil edeceğiz ve böylece gerekli olan araştırma veya çalışmada sunulacak olan nesnelerin dinamiklerini tanımlamak için ortam farklı modellere bürünebilecektir. Sistemin etkileşim modeli Şekil 3.3'te gösterilmiştir. Ortam (3.33) denkleminde modellenmiştir:

$$f = K_e (X - X_e) + B_e (\dot{X} - \dot{X}_e) \quad (3.33)$$

$K_e$  Ortamın sertliğini,  $B_e$  ortamın sönümleme katsayısını,  $f$  temas kuvveti,  $X_e$  ortamın statik konumunu ve  $X$  temas noktasındaki uç işlevci konumunu ifade etmektedir.

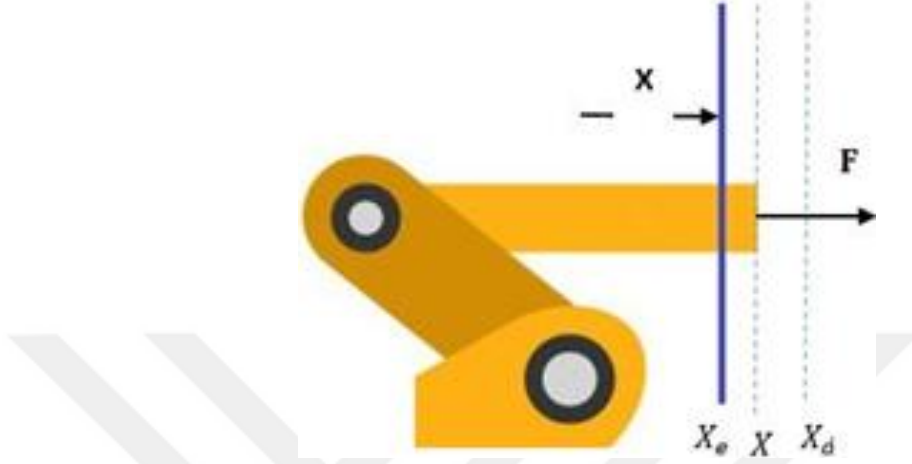


Şekil 3.4. Etkileşim modeli. (a) Robot ve ortam arasındaki herhangi bir temas olmadan; (b) temas olduğunda olan kritik nokta; (c) ortam ile sabit temas [26]

İstenen  $X_d$  konumuna erişmeye çalışan robot ile  $X_e$  konumundaki ortam arasındaki etkileşim 3.5 şeklinde gösterilmiştir. Sistemimizin dinamik denklemini (3.23)'te tanımlanmıştır. Burada,  $u$  robot manipülâtör üzerinde etkili olan genelleştirilmiş kuvvetlerin vektörüdür. Bu nedenle sistemin daha gerçek ve net olması için (3.23)

denklemini bu kuvvet etkisini gösterecek şekilde değiştirilmiştir ve dinamik denklem (3.34) denklemini şeklinde tanımlanabilir.

$$M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) = u - J^T(\theta) f \quad (3.34)$$



Şekil 3.5. Robot ve ortam arasındaki temas

$J^T(\theta) f$  terimi görev alan kuvvetlerini birleşim yeri için dönüştürür. Kuvvetler ve torklar arasındaki ilişki (3.35) denkleminde tanımlanmıştır

$$\tau_c = J^T(\theta) f \quad (3.35)$$

Burada  $\tau_c$  temas torklarıdır,  $J^T$  2-DOF manipülatörünün Jakobiyen matrisinin aktarımıdır. Bu çalışmada iki boyutlu bir durumu dikkate alıyoruz ve burada temas kuvveti X ve Y eksenleri üzerinde etkilidir.

### 3.4. Empedans Kontrolü

Robotun bir yörüngeyi izlediği düşünülürse ve aniden yoluna bir nesne veya engel çıkarsa robot onunla birlikte kayacaktır ve yörüngeyi istenen nihai pozisyona ulaşmaya çalışacaktır ve ortam üzerinde büyük bir kuvvet uygulayacaktır ve muhtemelen robot veya nesnelere zarar verecektir. Bu nedenle etkileşim yöntemlerinden biri empedans kontrol yöntemidir ve bu konularda kapsamlı olarak kullanılmaktadır. Empedans kontrolü pozisyonu izlemeye ve yörüngeyi doğrudan zorlamaya çalışmaz, fakat bundan ziyade temas kuvvetleriyle mekanik empedans olarak adlandırılan şekilde manipülatör konumu arasındaki dinamik ilişkiyi düzenler. Empedans kontrolü ortamdaki görülen şekliyle robot dinamik davranışının tasarımına

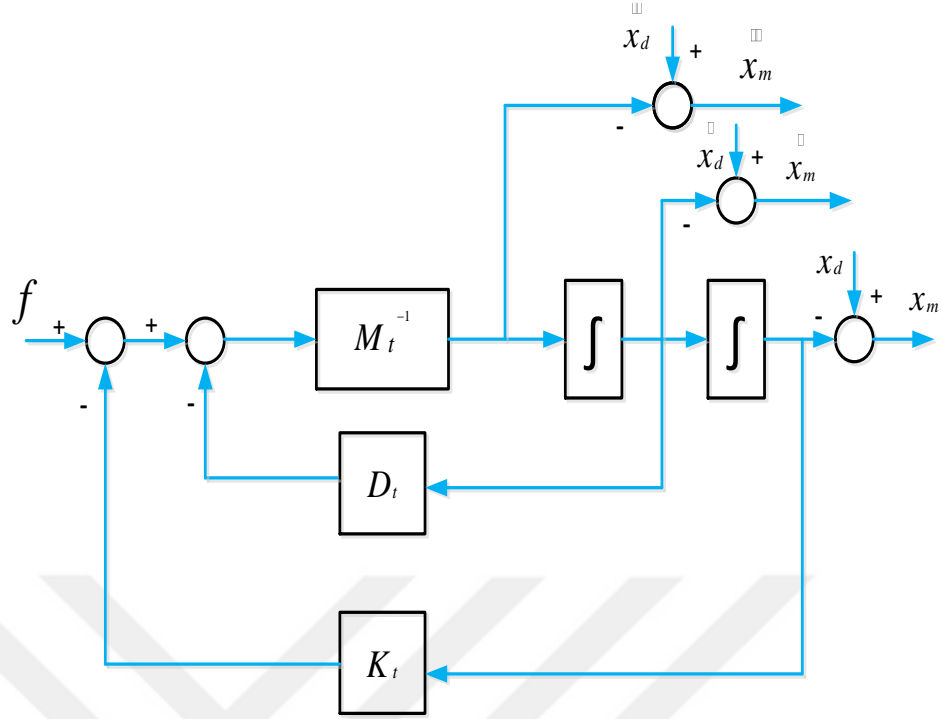
odaklanır (mekanik empedans). Bu kontrol stratejisinde robot serbest hareket alanından sınırlı alana doğru hareket ederken robotun kontrol sisteminde donanım veya yazılım şalteri gerekli değildir. Robot ortamla etkileşime geçer geçmez kuvvet geri bildirim döngüsü doğal olarak kapanır ve bu durum ortamdaki görünüşüyle robotun empedans durumunu değiştirir. Daha önce belirtildiği gibi empedans kontrolü Hogan tarafından sertlik ve sönümleme kontrolünün bir uzantısı olarak sunulmuştur ve bu nedenle onu Klasik Empedans Kontrolü (KEK) olarak adlandırabiliriz. Empedans kontrolünün bir avantajı var; Bu kontrol yönetimi mod değiştirmeden ya da kontrol parametrelerini değiştirmeden hem hareket kontrolü hem de uyumlu hareket kontrolü için uygundur. (3.36) denklemi klasik empedans kontrolörünün (KEK) kontrol yasasını ortaya koymaktadır.

$$M_t \ddot{e}_t + D_t \dot{e}_t + K_t e_t = f \quad (3.36)$$

Burada  $M_t$ ,  $D_t$  ve  $K_t$  sırasıyla atalet, sönümleme ve sertlik katsayılarıdır ve  $e_t$  (3.37) denkleminde verilen yörünge hatasıdır.

$$e_t = (x_d - x_m) \quad (3.37)$$

Burada  $x_d$  istenen giriş yörüngesidir ve  $x_m$  değiştirilen yörüngedir. Şekil 3.6 empedans kontrolörünün yapısını göstermektedir. Tezin simülasyon kısmında göreceğimiz gibi kontrolör parametreleri optimize edilmişlerdir.



Şekil 3.6. Empedans kontrolör yapısı

### 3.5. Kesir Dereceli Empedans Kontrolü

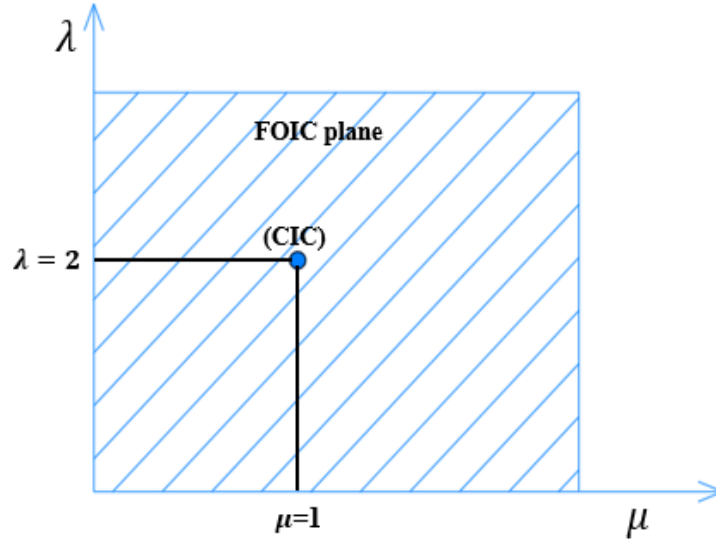
Bu tezde yeni bir kesirli derece empedans kontrolörü (KDEK) sunulacaktır. Daha önce klasik empedans kontrolörünü tartıştık. Fakat burada II. kısımda açıklanan kesir dereceli kontrol teorisini kullanarak yeni bir kontrol çeşidini tartışacağız. Kesir dereceli empedans kontrolörü, klasik empedans kontrolörünün bir uzatımı şeklindedir. Kesir dereceli kontrolörleri parametrelerdeki değişikliklere daha az duyarlıdır. KDEK ile ilgili diferansiyel denklem aşağıda verilmiştir:

$$M_t e(t) \Gamma^\lambda + D_t e(t) \Gamma^\mu + K_t e(t) = f(t) \quad (3.38)$$

Burada  $M_t$ ,  $D_t$  ve  $K_t$  atalet, sönümlenme ve sertlik katsayılarıdır;  $e(t)$  yörünge hatasıdır  $\Gamma^\lambda$  ve  $\Gamma^\mu$  sırasıyla kesir dereceli türevleridir. KDEK ile ilgili sürekli transfer fonksiyonu (3.39)'da gösterildiği gibi Laplace dönüşümü ile elde edilir:

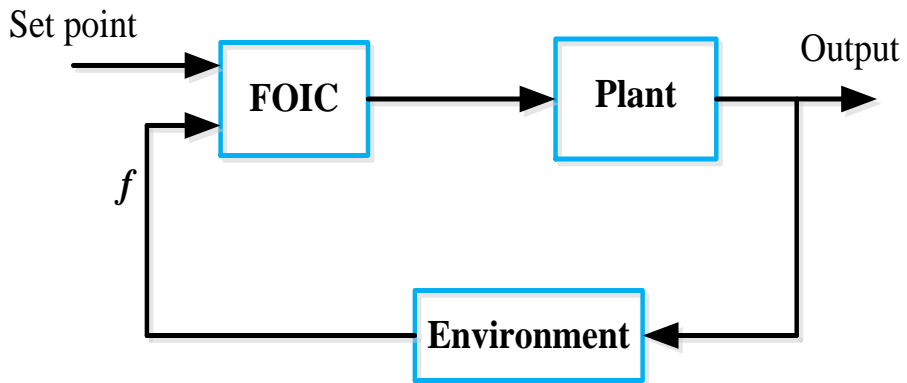
$$G(s) = M_t s^\lambda + D_t s^\mu + K_t \quad (3.39)$$

Burada,  $G(s)$  kontrolör çıktısıdır ve  $\lambda$  ile  $\mu$  farklılaştırıcının düzenini gösterir, ( $\lambda, \mu \geq 0$ ).



Şekil 3.7. Kesirli derece empedans kontrolör düzlemi

Şekil 3.7’de, klasik empedans kontrolörü (KEK) kesirli kontrolörün belirli durumlarını oluşturur ve burada  $\lambda$  ikiye eşittir ve  $\mu$  ise bire eşittir. Buna göre KDEK’de empedans sabitleri olan  $M_t$ ,  $D_t$  ve  $K_t$ ’nin yanında kesirli türevler olan  $\lambda$  ve  $\mu$  iki ilave parametreyi de belirlemeliyiz. Bunun anlamı şudur ki KDEK düzleminde KEK’i temsil eden sabit bir noktaya sabit olmak yerine bu düzlemde sürekli olarak hareket etmek mümkün olabilecektir. Burada  $\lambda$  ve  $\mu$  sonsuz değer sayısına sahiptir ve yüksek performanslı bir sistem elde edilmesi için gerçek sistemlere çok yakın olan dinamik ve kontrol sistemlerinin temsil edilmesi için geniş kapsamlı serbestlik tanımaktadır.

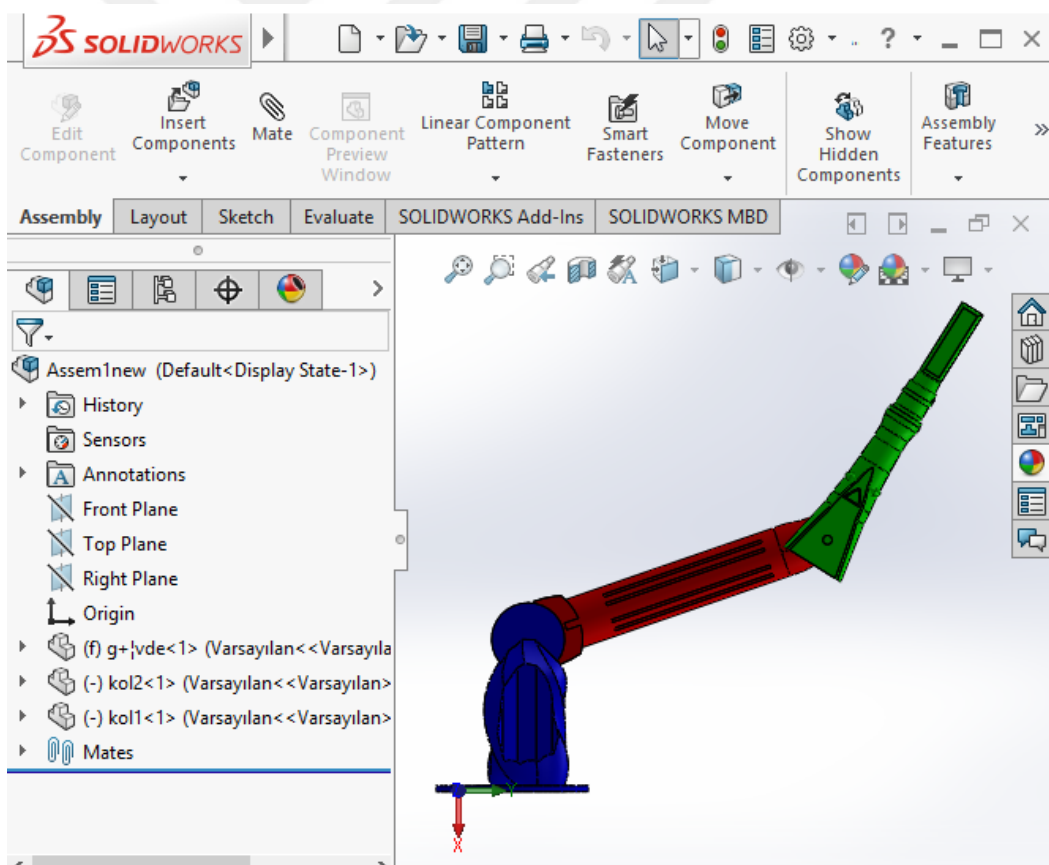


Şekil 3.8. Kesir dereceli empedans kontrolörünün genel blok diyagramı

Şekil 3.8 kesir dereceli empedans kontrolörünün kullanıldığı kapalı döngü sisteminin genel yapısını göstermektedir.

### 3.6. 2-DOF Robotik Manipülator Ve Kontrol Sisteminin Simülasyonu.

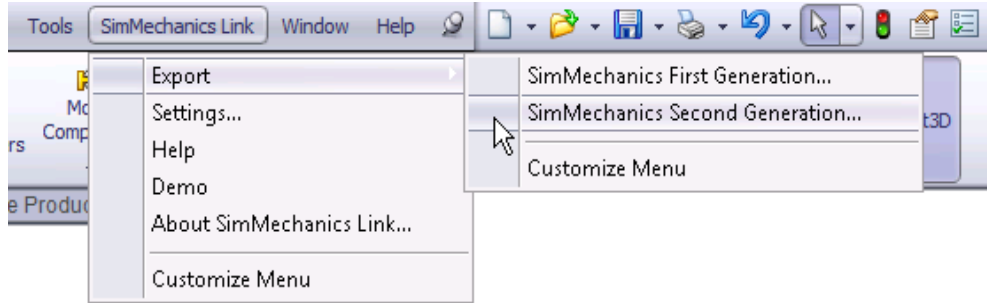
Yukarıdaki denklem MATLAB/SIMULINK ve m-dosyaları kullanılarak modellenmiş ve çözülmüştür ve bu durum sonraki paragraflarda tartışılacaktır. Simulink dinamik sistemlerin simüle edilmesi için çok yönlü bir programdır. Modeli oluşturan adımları izah etmeye başlamadan önce 3 boyutlu programla (SolidWorks) çizilmiş olan ve Şekil 3.1’de verilen 2-DOF robot manipülatorü bir SimMechanics modeline dönüştürülmüştür ve bu şekilde onun Simulink ile ara yüzünü oluşturabiliriz, pek çok CAD yazılımında olmayan geniş yelpazede analiz veya tasarım görevlerini gerçekleştirmek için kullanabiliriz. Önce SolidWorks içinde 2-DOF robot manipülatorün bir kurulumu yaparak başlayalım. Bu sabit bir kısımdan, iki bağlantıdan ve iki dönen birleşim yerinden oluşmaktadır. Bu bileşenler Şekil 3.9’de görüldüğü gibi aralarında eşlemeler kurularak oluşturulmaktadır.



Şekil 3.9. SolidWorks’deki 2-DOF robot manipülator modeli

SolidWorks kurulumunu SimMechanics’e aktarmak için, bu süreçte SimMechanics bağlantısının kullanımı gereklidir. SimMechanics bağlantısı başarıyla indirildikten

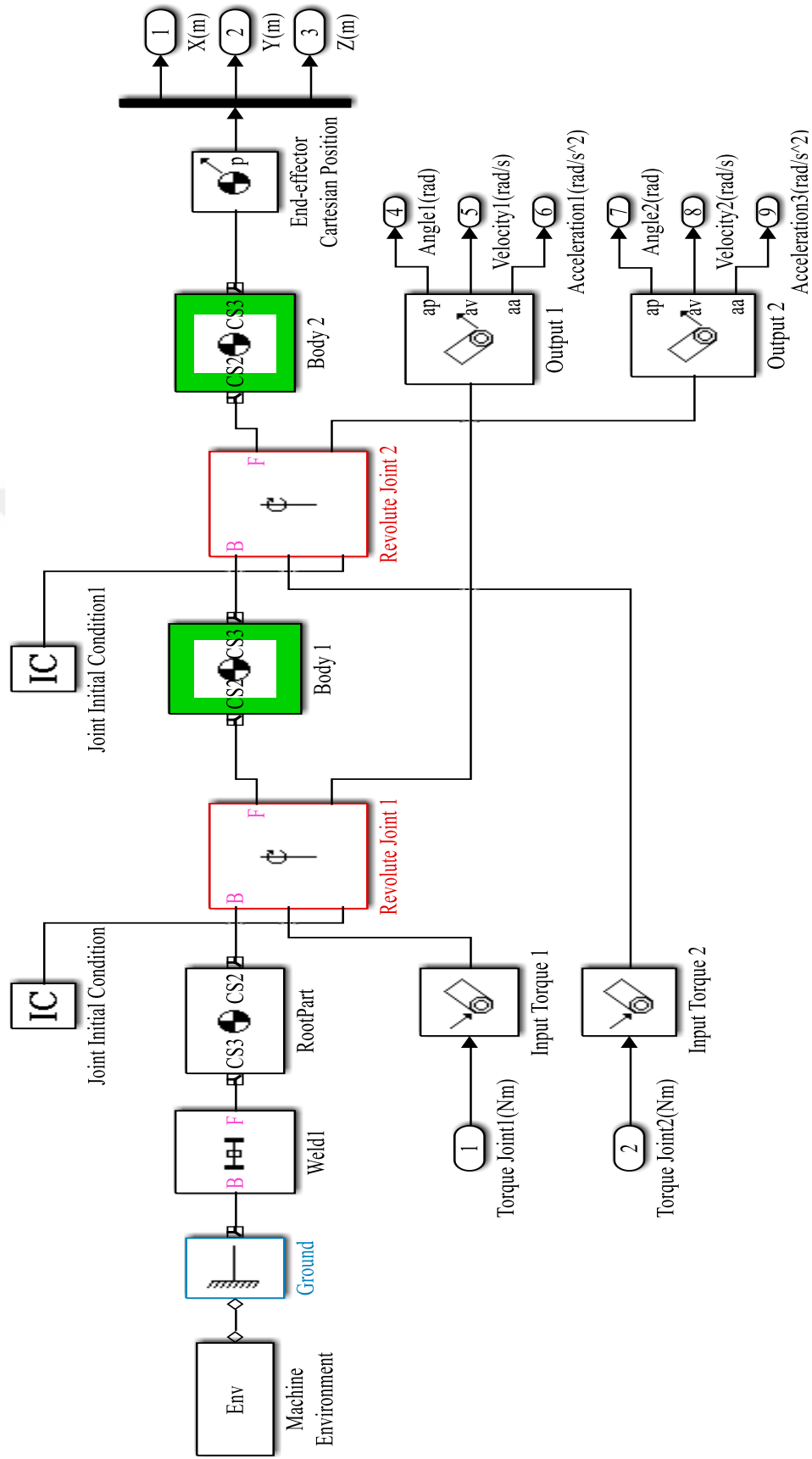
sonra onu SolidWorks'te kurup kaydetmemiz gereklidir. SimMechanics bağlantısını kaydettikten sonra Şekil 3.10'da görüleceği gibi SolidWorks'te yeni bir menü oluşacaktır. Şimdi kurulumu taşıyabiliriz.



Şekil 3.10. SolidWorks'de ki SimMechanics bağlantısı

Bu kurulum için XML dosyalarını yaratmaktadır ve geometri için de STL dosyalarını oluşturmaktadır. XML dosyası eşdeğerde bir SimMechanics modelinin üretilmesi için gereken referans çerçeveleri, STL dosya kısımlarının kütle, dinginlik, renk ve konumu ile ilgili olanlar gibi kısım parametrelerini içermektedir. 2-DOF robot manipülatorümüz için SimMechanics modelini üretebilmek için XML dosyası SolidWorks'ten çıkartıldıktan sonra (simimport('DoublePendulum.xml')) komutunu kullanarak onu Simulink'e dahil edebiliriz.

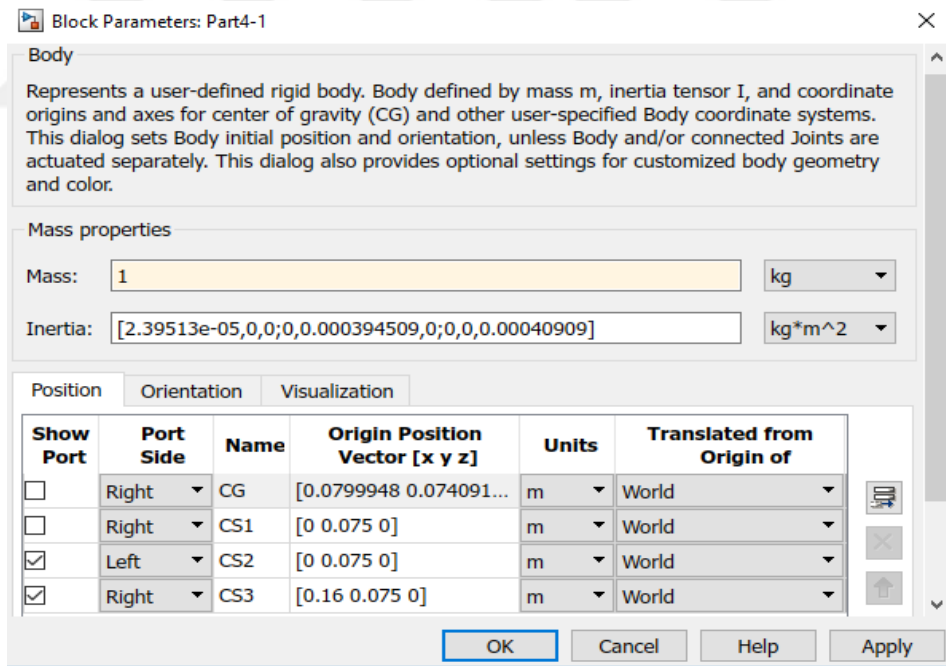
Şekil 3.11 SimMechanics'teki 2-DOF robot manipülatorün mekanik modelini göstermektedir. Simmechanics'in dâhili olarak tanımlanan sabit veya kesin koordinat sistemi (CS ve World CS olarak adlandırılan yapıyı ifade etmek önemlidir. Başnoktası (0,0,0) ve sağ elli ortogonal koordinat eksenlerinin üçlüsü bulunmaktadır ve bunlar Z sağa bakacak, Y yukarıya bakacak ve X ekrana bakacak şekilde tanımlanmışlardır. Dikey yön dünya eksenlerine göreceli olarak yer çekimi vektör yönüne göre (hızlanma-g) belirlenir. Yer çekimi modelin bir arka plan özelliğidir ve bunu bir simülasyona başlamadan önce ayarlayabiliriz. Model oluşturmanın birinci adımı makine modelinde zemin noktasını temsil eden bir zemin bloğunun konfigüre edilmesidir. Zemindeki CS eksenleri her zaman dünya CS eksenlerine paralel olarak sabitlenirler. Bu bloğun diyalog kutusunu açarak dünya CS'sine göre istediğimiz zemin noktasını belirleyebiliriz. 2-DOF robot manipülatorü için zemin noktası (0, 0, 0) şeklindedir. Yer çekimi, analiz modu ve toleranslar gibi sistemin mekanik simülasyon ortamını tanımlamak için modelde zemin bloğu makine ortam bloğuna bağlanmıştır.



Sekil 3.11. Matlab / SimMechanical'da 2-Dof robot manipulatorünün mekanik modeli.

Sonraki adım bağlantı ve birleşim yerlerinin tanımlanmasıdır. Şekil 3.11’de görüleceği gibi birinci bağlantı kök kısmı robot manipülatörün sabit kısmını temsil etmektedir ve bunun herhangi bir hareketi yoktur. Kaynak bloğu robot manipülatörün SimMechanics modeline ilk bağlantıyı sabitlemek için kullanılır. Model üzerindeki diğer beden blokları 1 ve 2 yapısı ve son olarak son efektör olarak adlandırılan robot manipülatörün bağlantılarını temsil etmektedir.

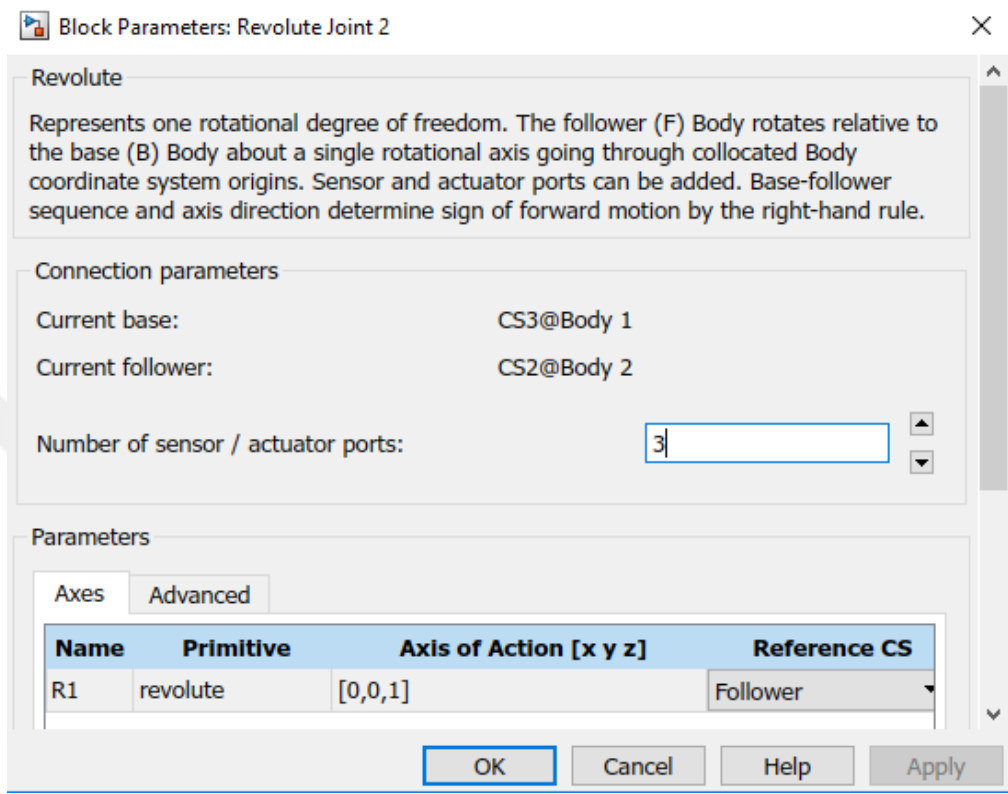
Bir yapı bloğunun ana özellikleri kütle özellikleri, pozisyonu, alandaki yönelimi ve ekli yapı koordinat sistemleridir (CS’ler). Yapı bloğundaki kütle özellikleri kütle ve atalet tensörü içermektedir. Koordinat sistem eksenlerine göre yapı ağırlık merkez konumu (CG) ve oryantasyon yapının nerede olduğunu ve hangi yöne döndüğünü gösterir. Bunlar model kurulumundaki yapının başlangıç koşullarını oluşturur ve biz simülasyonu başlattığımızda biz onları başlangıçta değiştirmedikçe bu şekilde kalırlar. Tüm bu değerleri ve ilgili koordinat sistemlerini Şekil 3.12’de görüldüğü şekilde 2-Dof robot manipülatörün XML dosyasına göre belirliyoruz.



Şekil 3.12. Yapının diyalog kutusu

Bir yapının muhtemel hareket yönlerine onun serbestlik dereceleri denilir (DOF), ve biz bunları Birleşik bloklar şeklinde temsil ediyoruz. Tüm birleşim yerleri robot manipülatörümüzde döner durumdadır ve böylece iki dönen birleşim bloğuyla tüm yapıları birbirine bağlayabiliyoruz.

Şekil 3.13’de görülebileceği gibi her eklem bloğun temel kenarını önceki yapının CS3 kısmına ve takip eden yapı bloğunun CS3 kısmının takip eden kenarına bağlıyoruz. Şekil 3.13, Z ekseninde dönen 2.dönen birleşimin diyalog kutusunu göstermektedir.



Şekil 3.13. İkinci döner birleşim yerinin diyalog kutusu

Parametre alanındaki rotasyon eksenini ve onun referans koordinat sistemini eksen düzleminde konfigüre edebiliriz. Ayrıca birleşim yerine bağlı olan sensor ve harekete geçiricilerin sayısını da belirtmeliyiz.

Sensor ve harekete geçirici bloklar bize SimMechanics modellerinden çıktı almamız ve bunlara giriş göndermemiz için Simulink sinyallerine sahip olma imkânı vermektedir. Simülasyona başladığımızda sensörler mekanik hareketi gözlemlememizi sağlarlar. Esasen bunlar yapıların ve birleşim yerlerinin hareketlerini veya Simulink’te kullanılan herhangi bir başka sinyal gibi Simulink sinyal çıktılarını tetkik ederler. Aktüatör blokları yapıların ve birleşim yerlerinin hareketlerini iki formatta tanımlamaktadır:

- Bunlar Simulink ’ten kuvvet/tork sinyalleri kabul ederler ve bu sinyallerden bir yapı veya birleşim yeri üzerine kuvvet/tork uygulayabilirler.

- Yapıların veya birleşim yerlerinin konumunu, hızını ve hızlanmalarını zamanın açık fonksiyonları olarak tanımlarlar.

Sensor ve aktüatörlere ek olarak Şekil 3.11’de robot manipülatör modelinde görüldüğü gibi tüm birleşim yerlerine bağlanan ve IC bloğu olarak adlandırılan ayrı bir blok’ta vardır ve böylece tekil şartlar ortadan kaldırılır.

### 3.6.1. 2-DOF Robot manipülatörün ters kinematik modeli.

Simulink modelinde Şekil 3.14’de görülen robot manipülatörümüzün ters kinematik bloğu (3.13) ve (3.14) uyum denklemleri kullanılarak oluşturulmuştur ve bunlar için Matlab fonksiyonunu kullandık ve kod üretimi için parametreleri düzenlemek açısından ayarlamaları seçtik EK-A’da.

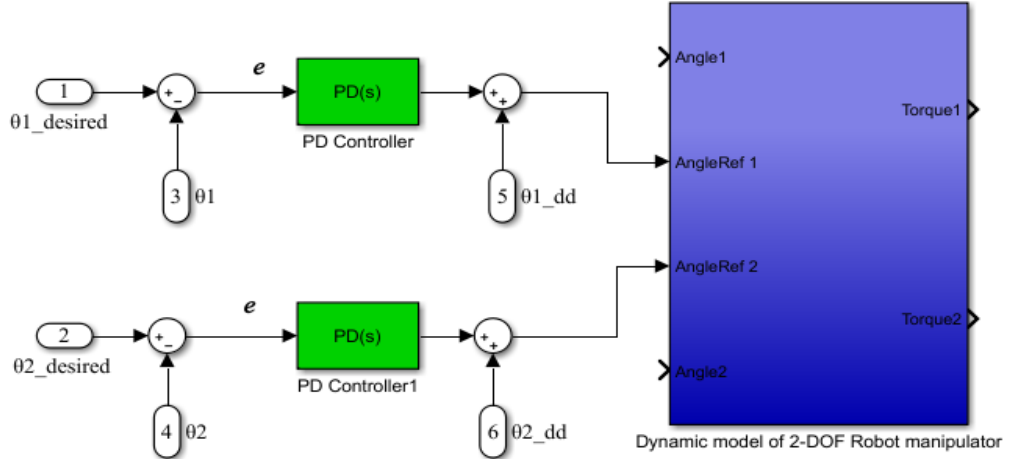


Şekil 3.14. Robot manipülatörün ters kinematığının Simulink bloğu

### 3.6.2. Pozisyon kontrol modeli (hesaplanan tork kontrolü).

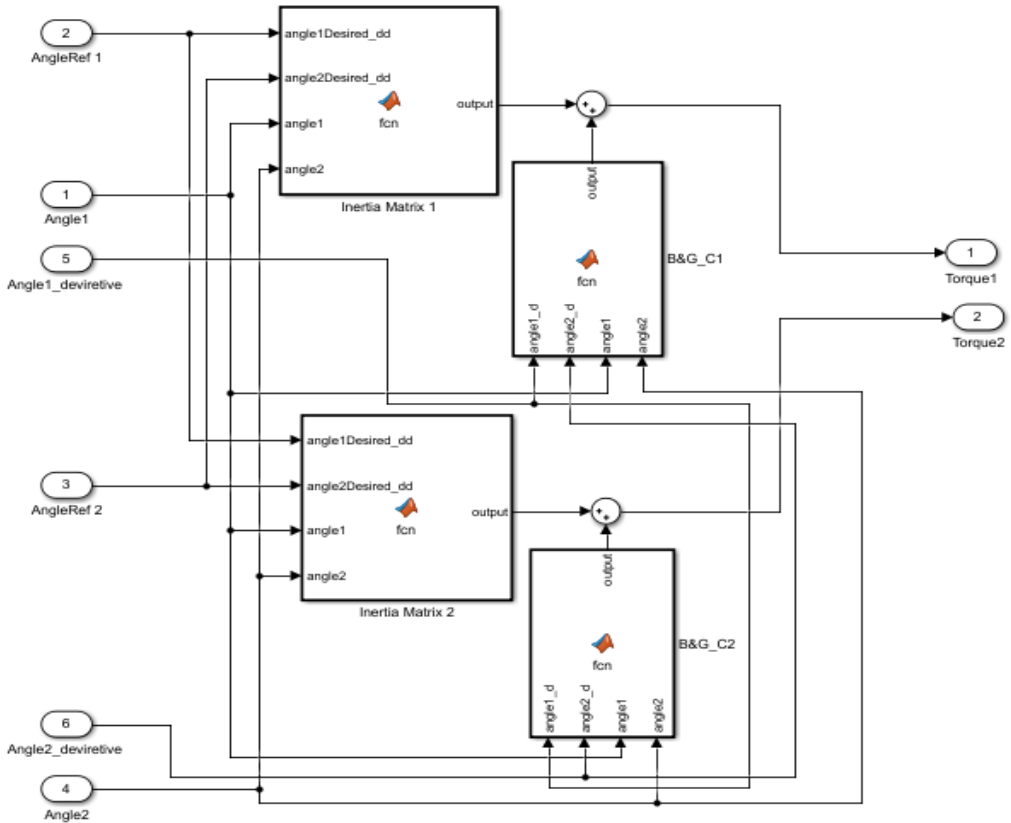
Daha önce izah edildiği gibi robot manipülatörümüzün hesaplanan tork kontrolörü şekil 3.15’te görüleceği şekilde Simulink modelinde (3.31) denkleminin uyarlanmasıyla oluşturulmuştur. Simulink’te, PD alet kutusu bloğu mevcut olup bu eklem açısını kontrol etmek için uygulanmıştır. Kontrol parametrelerinin ayarlanması PD ayarlayıcısı kullanılarak yapılır ve kontrolör parametre değerlerinin en iyi performansı ortaya konulabilir. Orantısal ve türevsel kazancıları şu şekilde elde edilmiştir:  $K_p=4000$ ,  $K_v=2000$ . Simülasyonda hesaplanan tork kontrolünün parametreleri Control System Tuner (Kontrol sistemi ayarlayıcı) yardımı ile ayarlandı.

Hatada meydana gelen değişim miktarı göz önüne alınarak kazanç parametrelerinin belli değerlere yakınsadığı görüldü. Bu kazançların sistem üzerindeki etkisi dikkate alınarak parametre değerleri artırılmıştır.



Şekil 3.15. Simulink/Matlab'ta ki pozisyon kontrolü (hesaplanan tork kontrolü)

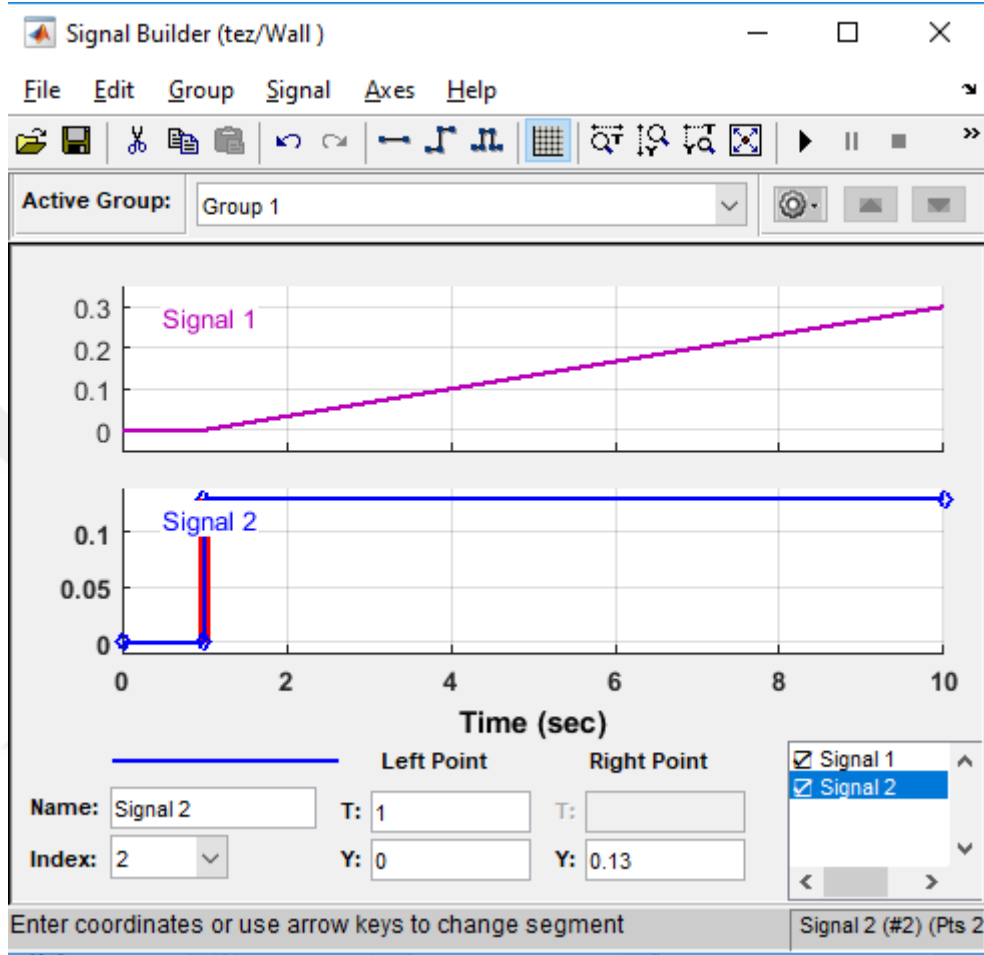
Şekil 3.15'te görülebileceği gibi robot manipütörümüzün dinamik model bloğu Şekil 3.16'de gösterilen (3.28) dinamik denklemleri uyarlanarak Simulink'te oluşturulmuştur.



Şekil 3.16. Simulink/Matlab' teki 2-DOF robot manipütörün dinamik modeli



oluşturabilmektedir ve böylece bunu kullanarak belirli kıvrımları olan bir duvar yüzeyi gibi ortamı nasıl şekillendireceğimizi belirleyebiliriz. Şekil 3.19’de Sinyal Oluşturucunun diyalog kutusu gösterilmektedir.



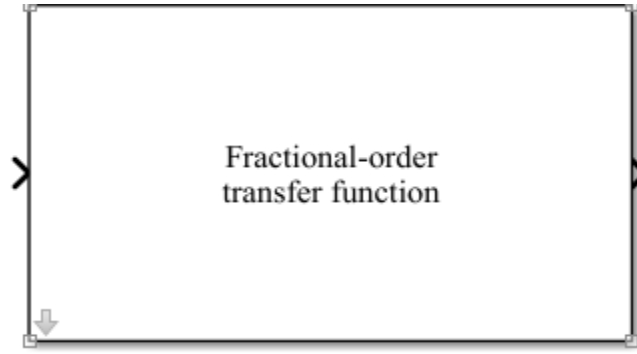
Şekil 3.19. Sinyal oluşturucunun/duvarın diyalog kutusu

#### 3.6.4. Kesir dereceli empedans kontrolör modeli

(3.36) denklemine göre, uç işlevci ortam üzerinde  $f$  gücünü uyguladığında, konum yer değişimi için eşdeğerde bir kütle-amortisör yay davranışını güçlendirmek için çevrimsel empedans denklemi seçilmiştir. Şekil 3.20’de çevrimsel klasik empedans kontrolör (KEK) yönetimi gösterilmektedir ve burada giriş ile ilgili kuvvet uygulanmaktadır ve çıkış konum, hız ve hızlanma ile ilgili değişim oluşturmaktadır.

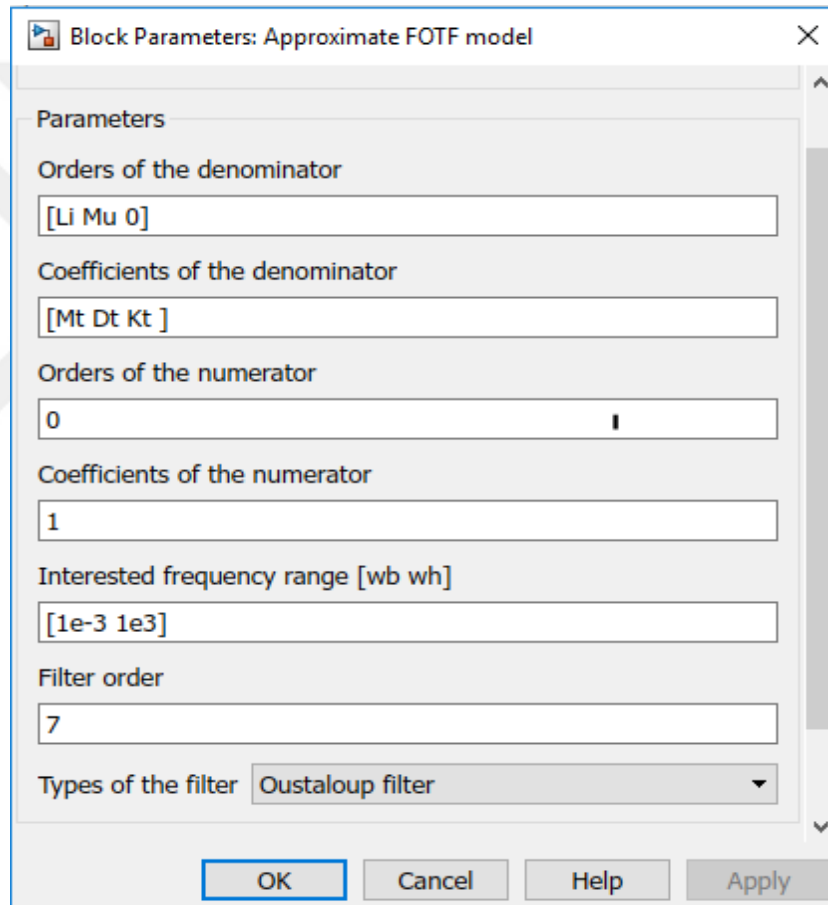
(3.19) Şeklindeki şemaya göre, empedans kontrolörü iç hareket kontrolü için referans pozisyonunu oluşturur.





FOTF model

Şekil 3.21. KDEK'in Simulink bloğu



Şekil 3.22. FOTF modelinin diyalog kutusu

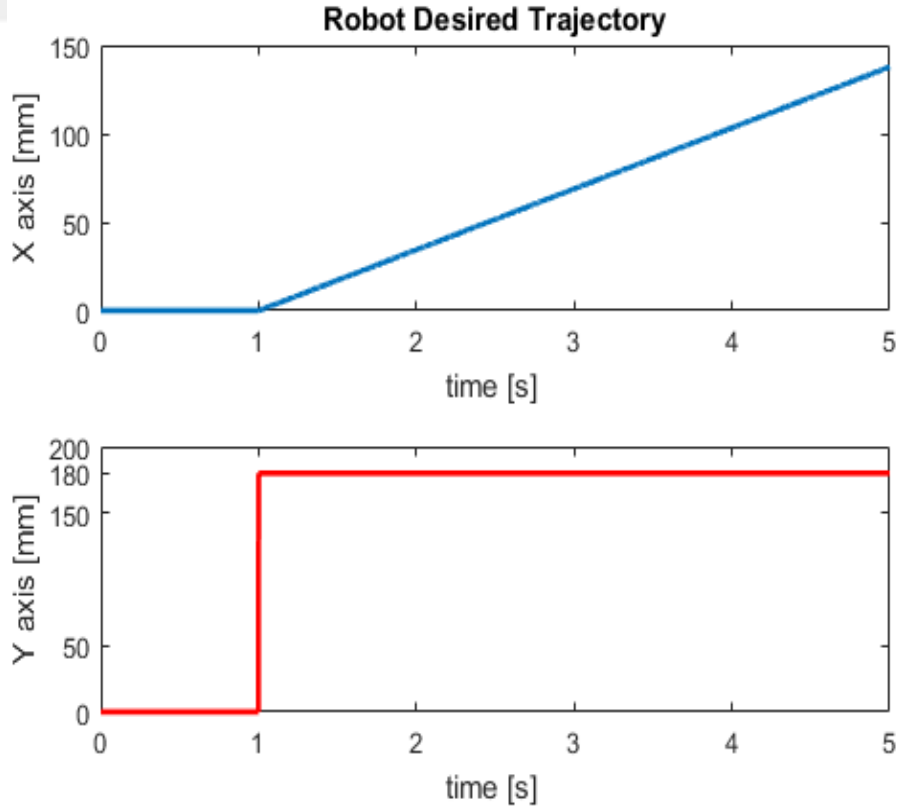
Şekil 3.22’de görülebileceği gibi, payda sıralamaları  $\lambda$  ve  $\mu$  kesir dereceli türevlerinin düzeni ile ilgilidir ve paydanın katsayıları empedans sabitleri olan  $M_t$ ,  $D_t$  ve  $K_t$ ’dir. Önceki parametrelerin değerleri Matlab’ta m-dosyasının çalıştırılmasıyla alınmaktadır. KEK ve KDEK kontrolörlerinin her ikisi için de parametre değerlerini seçmek için, sonraki paragrafta izah edileceği gibi tasarladığımız sistemden en iyi performansı elde

edebilmek için en uygun değerleri elde etmek üzere optimizasyon algoritmalarını kullandık.

#### 3.6.4.1. KEK ve KDEK Kontrolörlerinin parametresinin optimize edilmesi

Bu bölümde bir robot manipülöründe KEK ve KDEK tasarımı için optimizasyon algoritması kullanıldı ve pek çok deneyden sonra elde edilen sonuçlar sonuç kısmında sunulup tartışılacaktır. (3.36) ve (3.38) denklemlerinden beş adet parametrenin ( $M_t$ ,  $D_t$ ,  $K_t$ ,  $\lambda$  ve  $\mu$ ) tasarlanması gereklidir. Robota ve ortama herhangi bir zarar gelmeden güvenli temas sağlamak için, Simpleks araştırma optimizasyon algoritması sifıra eşit olan temas kuvvetlerini minimize etmek için gereken parametreleri optimize etmek için kullanılmıştır.

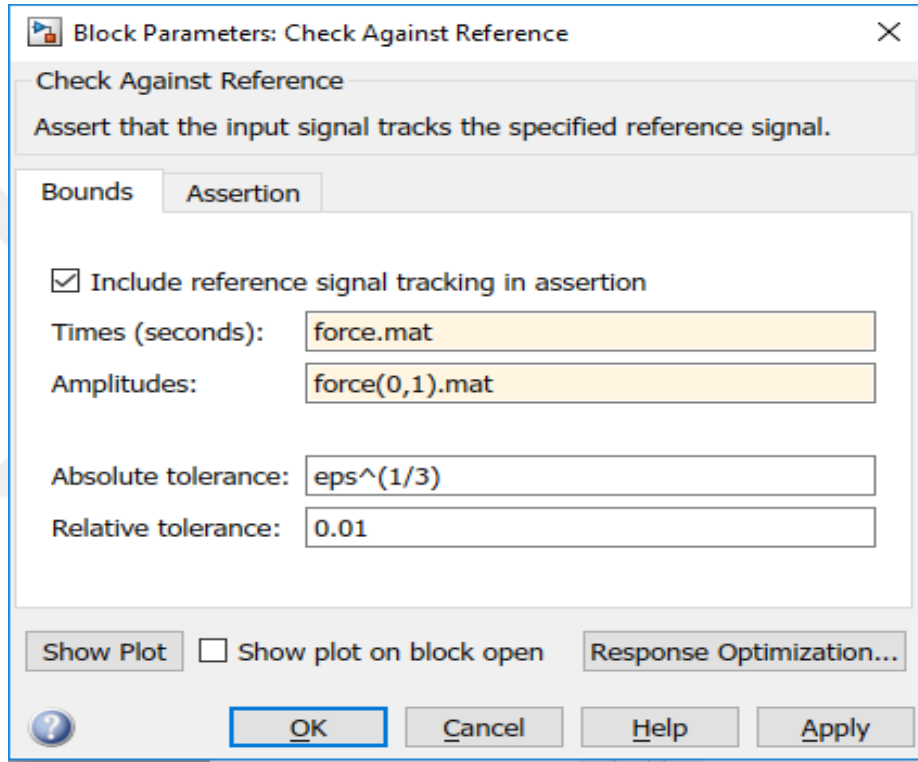
Simpleks algoritması yerel bilgileri kullanan ve en yakın optimal noktaya yuvarlama yapan bir algoritmadır [33]. Bu yerel asgari ve azami değerleri araştıran bir algoritmadır ve çok boyutlu optimizasyonlarda kullanılabilir. Gradyan yöntemlerinde olduğu gibi bir fonksiyon boyunca hareket etmek için türevler hesaplaması gerekli değildir.



Şekil 3.23. X ve Y eksenlerindeki istenen robot yörüngesi

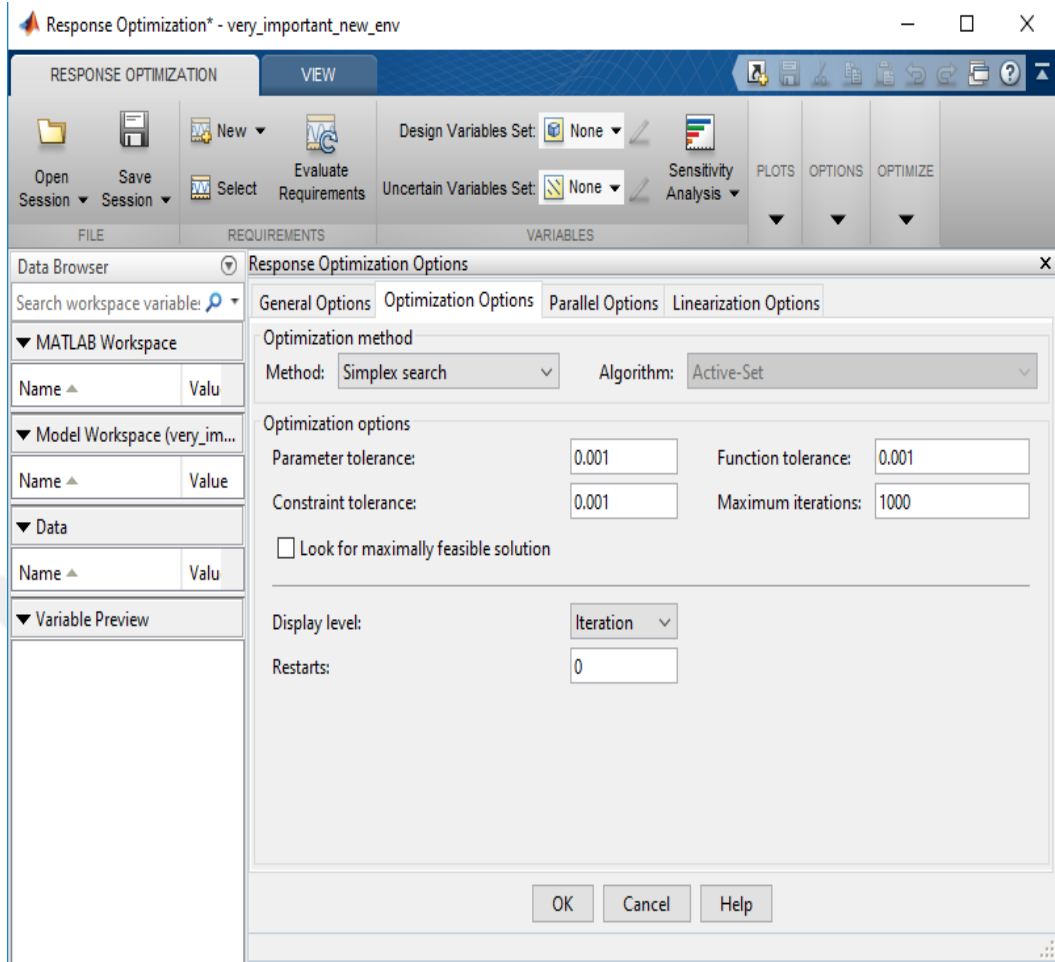
Optimizasyon Şekil 3.23'e dayalı olarak yapılmıştır. Burada istenen yörünge için X eksenine ve Y eksenine rampa ve basamak sinyalleri uygulanmıştır. Şekil 3.24'te görüldüğü gibi KEK ve KDEK parametreleri için optimal değerleri elde etmek için Simulink/Matlab' ta Optimizasyon Araç Kutusunu kullandık.

Şekil 3.24'te görüldüğü gibi referansa göre kontrol etmek bloğu kullanılmıştır ve burada kuvvet işareti giriş işaretidir. Temas kuvvetlerinin sıfıra minimize edilmesi için KDEK parametreleri optimize edilmiştir.



Şekil 3.24. Referans Bloğuna Karşı Kontrol ile ilgili diyalog kutusu

Sonra yanıt optimizasyon tuşuna tıklayarak, şekil 3.24'te gösterilen diyalog kutusunu girdik. Öncelikli olarak her parametrenin aralığı sıfır ile pozitif sonsuz arasında olacak şekilde optimize edilecek olan parametreleri tanımlıyoruz ve sonrasında daha önce izah edildiği gibi optimizasyon yöntemini seçiyoruz. Maksimum tekrarlama sayısı bine kadar seçilmiştir.



Şekil 3.25. Yanıt Optimizasyonunun diyalog kutusu

Klasik empedans kontrolörünün (KEK) sonuçları ile önerilen kesirli derece empedans kontrolör (KDEK) sonuçlarının karşılaştırılması için üç durumumuz bulunmaktadır.

Tablo 3.2. Durum I' de kontrolör parametreleri.

Durum I		
Kontrolör Parametreleri	Değer	Birim
$M_t$	1,5098	kg
$D_t$	20,1504	Ns/m
$K_t$	1,2485	N/m
$\Lambda$	2	-
$\mu$	1	-

Durum I' de, sadece KEK'nin parametrelerini optimize edilmiştir ve Tablo 3.2' de gösterildi.

Tablo 3.3. Durum II' de kontrolör parametreleri.

Durum II		
Kontrolör Parametreleri	Değer	Birim
$M_t$	1,5098	kg
$D_t$	20,1504	Ns/m
$K_t$	1,2485	N/m
$\lambda$	1,2803	-
$\mu$	1,0099	-

Durum II' da, birinci durumda olan klasik empedans kontrolörüne ait önceki değerleri koruduk ve model neticeleri üzerinde kesir dereceli kontrol algoritması kullanımının etkileri üzerinde çalışmak için sadece sunulan KDEK parametreleri olan  $\lambda$  ve  $\mu$ ' nun değerlerini optimize edilmiştir ve Tablo 3.3' de gösterildi.

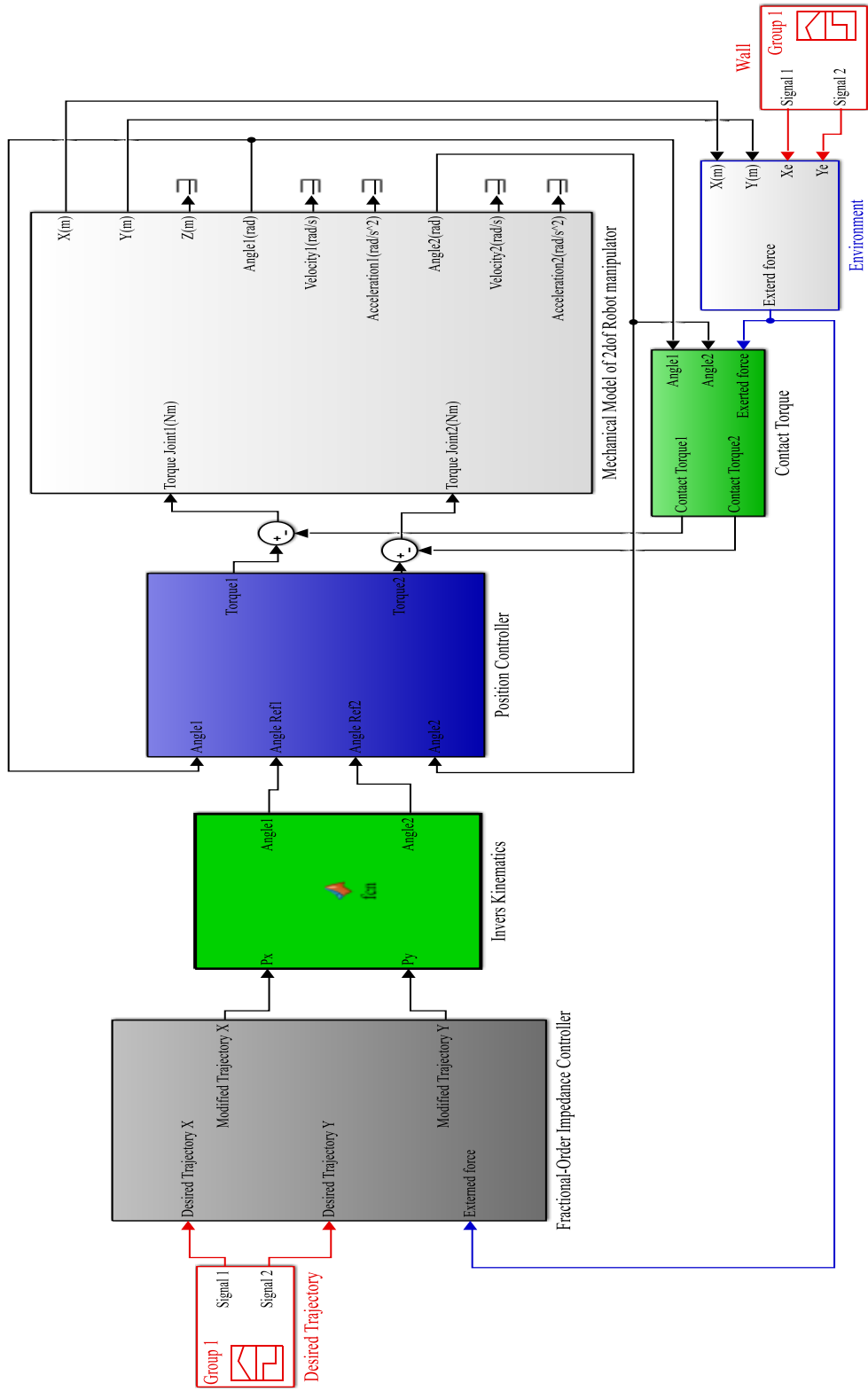
Tablo 3.4. Durum III' te kontrolör parametreleri.

Durum I		
Kontrolör Parametreleri	Değer	Birim
$M_t$	0,0019	kg
$D_t$	17,2355	Ns/m
$K_t$	0,0015	N/m
$\lambda$	0,3322	-
$\mu$	0,7462	-

Durum III' te KDEK'in tüm parametrelerini birlikte optimize edilmiştir ve Tablo 3.4' te gösterildi.

Üç durumda parametre ( $M_t$ ,  $D_t$ ,  $K_t$ ,  $\lambda$  ve  $\mu$ ) değerlerindeki değişiklikler aşağıdaki gibidir:

Durum I'den durum II'ye  $\lambda$  değerinde % 35,895'lik ve  $\mu$  değerinde % 0,98'lik değişiklik olmuştur. Durum II'den durum III'ye  $M_t$  değerinde % 99,87'lik,  $D_t$  değerinde % 14,46'lik,  $K_t$  değerinde % 87,51'lik,  $\lambda$  değerinde % 74,05'lik ve  $\mu$  değerinde % 35,33'lik değişiklik olmuştur. Şekil 3.26'da yukarıda tartışıldığı gibi bunların tüm bileşenlerinin tasarlanıp modellenmesinden sonra robot manipülatörü ile bu tezde sunulan kontrolörün tam simülasyon modeli gösterilmektedir. Bu mekanik modeli, robot manipülatörün test kinematığını, konum kontrolörünü, ortam modelini ve sunulan KDEK'i içermektedir.



Şekil 3.26. MATLAB/Simulink'te modellenen komple kontrol sistemi

### 3.7. Kesirli Mertebeden Türevlerin Yaklaşımları

Bu bölümde ele alınan fonksiyonlar, tamsayı dereceli frekans alanı veya kesirli içeren transfer fonksiyonlarının ayrık zamanlı alan yaklaşımları sağlar. s'nin (kesirli veya oransız) yetkileri.

#### 3.7.1. Crone yaklaşımı

Bu yaklaşım, aşağıdaki gibi bir transfer fonksiyonuna yol açan tekrarlayan bir N kutup ve N sıfır dağılımını kullanır:

$$C(s) = k' \prod_{n=1}^N \frac{1 + \frac{s}{w_{zn}}}{1 + \frac{s}{w_{pn}}} \quad (3.40)$$

k 'düzeltmiş bir kazançtır. Sıfırlar ve kutuplar  $[w_h; w_l]$  bir frekans aralığında bulunmalıdır. Bant genişliği iki numaralı bir vektör olmalıdır  $[w_h; w_l]$  rad /s cinsinden verilen limitleri içeren, frekans aralığı yaklaşımının geçerli olduğunda ve pozitif bir v için:

$$\alpha = \left(\frac{w_h}{w_l}\right)^{\frac{v}{N}}, \quad \eta = \left(\frac{w_h}{w_l}\right)^{\frac{1-v}{N}} \quad (3.41)$$

$$w_{pn} = w_{z,n-1} \alpha, \quad w_{zn} = w_{p,n-1} \eta \quad (3.42)$$

v'nin negatif değerleri için, sıfırların ve kutupların rolü birbiriyle değiştirilir.

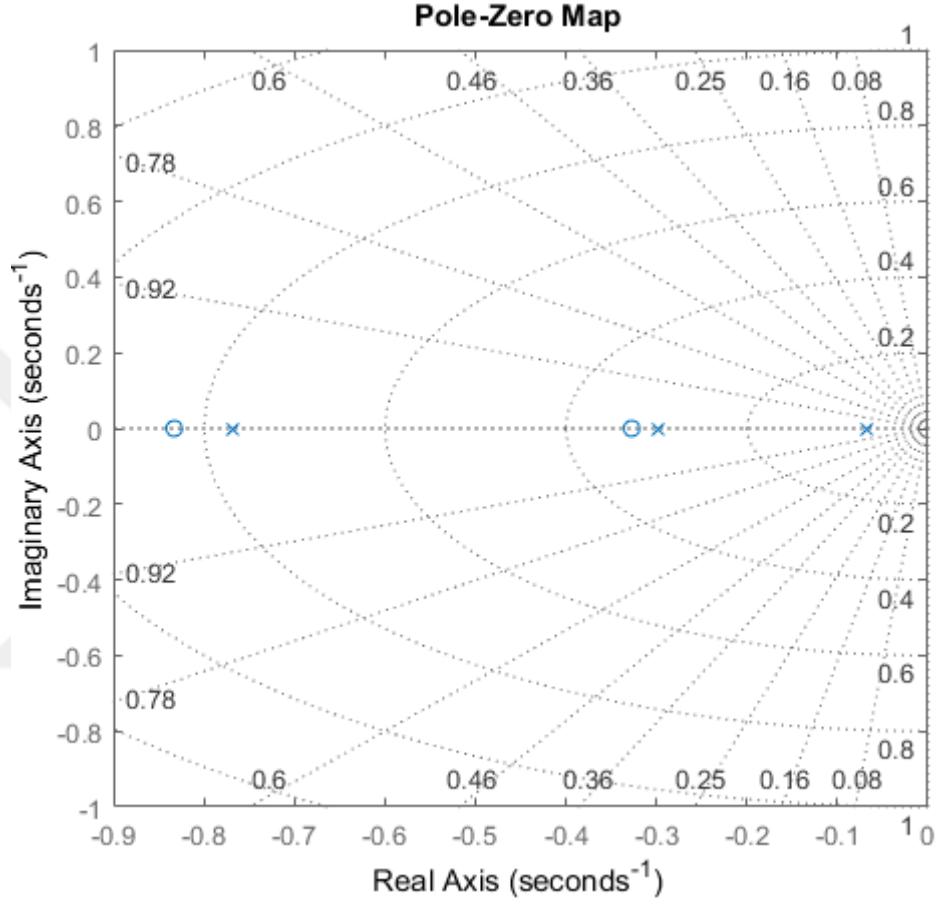
Bu tezde yüksek mertebeli kesirli empedans transfer fonksiyonu eşdeğeri bulmak için niped (non-integer) fonksiyonu kullanıldı EK-B'da, Bu fonksiyon frekans alanı transfer fonksiyonu ile verilen bir denetleyici uygulanması için uygundur.

$$C(s) = K_t + M_t s^\lambda + D_t s^\mu, \quad \lambda, \mu \in \mathbb{R}^+ \quad (3.43)$$

Bunların Crone yaklaşımlarını sağlayarak, bu kontrolörler, kesirli empedans kontrolör olarak bilinir. Duru II' den kesirli empedans transfer fonksiyonu niped kullanarak (gerekli dönüşüm yapılmıştır) ve transfer fonksiyonun sıfırları ve kutupları (3.44) ve (3.45) denklemlerinde gösterildi, Burada p ve z sırasıyla transfer fonksiyonun sıfırları ve kutuplarıdır.

$$C(s) = \frac{0,7692s^2 + 0,8922s + 0,2096}{17,1s^3 + 19,38s^2 + 5,141s + 0,2617} \quad (3.44)$$

$$p = \begin{bmatrix} -0,7683 \\ -0,2988 \\ -0,0667 \end{bmatrix} \quad z = \begin{bmatrix} -0,8326 \\ -0,3272 \end{bmatrix} \quad (3.45)$$

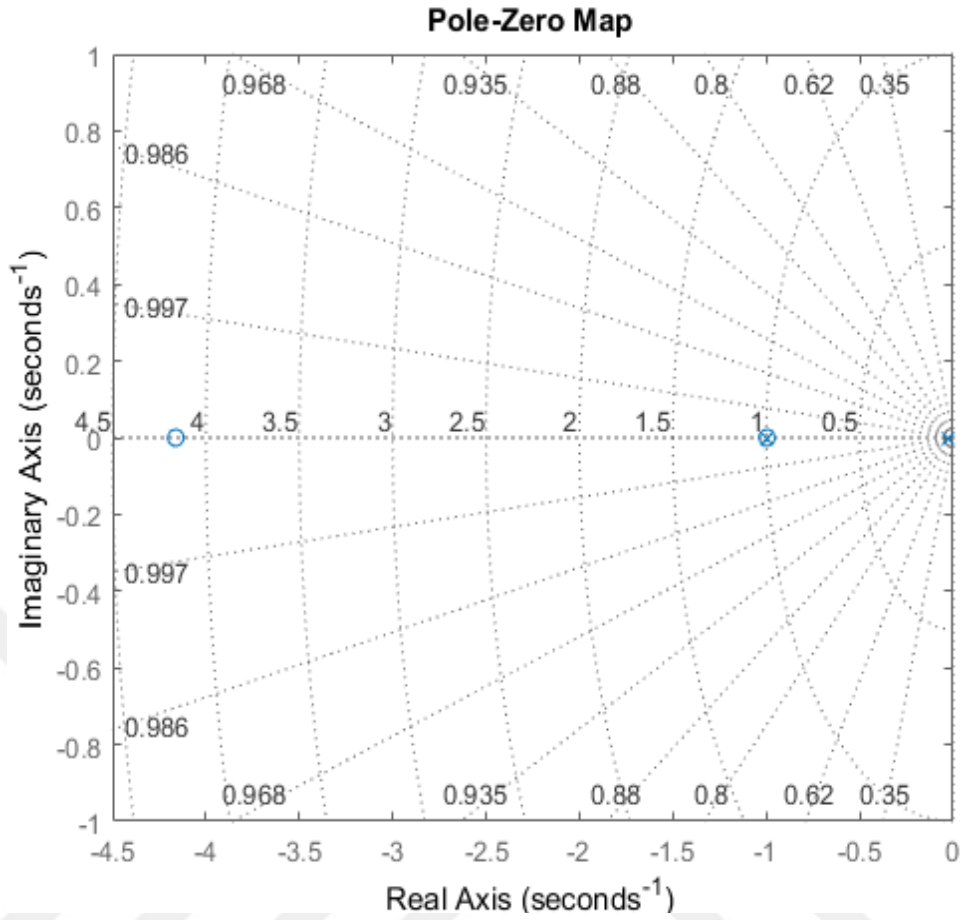


Şekil 3.27. Durum II' de kutup ve sıfır haritası

Benzer bir şekilde Duru III' den kesirli empedans transfer fonksiyonu niped kullanarak ve transfer fonksiyonun sıfırları ve kutupları (3.46) ve (3.47) denklemlerinde gösterildi, Burada p ve z sırasıyla transfer fonksiyonun sıfırları ve kutuplarıdır.

$$C(s) = \frac{0,1664s^2 + 0,8583s + 0,6898}{12,27s^2 + 12,25s + 0,2949} \quad (3.46)$$

$$p = \begin{bmatrix} -0,9962 \\ -0,0241 \end{bmatrix} \quad z = \begin{bmatrix} -4,1620 \\ -0,9961 \end{bmatrix} \quad (3.47)$$



Şekil 3.28. Durum III' te kutup ve sıfır haritası

Empedans kontrolörü iyi bilinen bir lineer ikinci dereceden sistemi temsil eder. İkinci dereceden sistemin doğal frekansı ve sönüm oranı sırasıyla aşağıda verilmiştir:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_t}{M_t}} \quad (3.47)$$

$$\xi = \frac{D_t}{2M_t\omega_n} \quad (3.48)$$

Konum tabanlı empedans kontrolünün kararlılığı incelenmiş ve kararlılık koşulları (3.49) denklem ile bulunmuştur.

$$\xi \geq 0,5(\sqrt{1+2k-1}) \quad (3.49)$$

$k = K_e/K_t \gg 1$  ve  $K_e$  ise ortamın veya cesiminin sertliğidir. İstenen sertlik  $K_t$ , ortam sertliğinden çok daha küçük olmalı ve istenen sönümlenme oranı bu kriter göre yeterince yüksek olmalıdır.

Durum II' nin kararlılığı belirlemek için, aşağıdaki gibi (3.47), (3.48) ve (3.49) denklemleri kullanılmıştı.

$$w_n = \sqrt{\frac{1,2485}{1,5098}} = 0,921 \quad \xi = \frac{20,1504}{2 \times 1,5098 \times 0,921} = 7,2456 \quad k = \frac{100}{1,2485} = 80,096 \gg 1$$

(3.49) denklemden Durum II' de KDEK kararlılık koşulları sağlamıştı.

$$7,2456 > 5,8480$$

Benzer bir şekilde Durum III için:

$$w_n = \sqrt{\frac{0,0015}{0,0019}} = 0,888 \quad \xi = \frac{17,2355}{2 \times 0,0019 \times 0,888} = 5107,7 \quad k = \frac{100}{0,0015} = 66,6 \times 10^3 \gg 1$$

(3.49) denklemden Durum III' de KDEK kararlılık koşulları sağlamıştı.

$$5107,73 > 181,98$$

Sonunda bu tezde sunulan kesir dereceli empedans kontrolörüne (KDEK) kararlıdır.

#### 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, klasik empedans kontrolör (KEK) ve önerilen keser dereceli empedans kontrolör (KDEK) sonuçlarının karşılaştırılması için, sistem yukarıda açıklanan üç duruma göre test edilmiştir.

İstenen yörünge için X eksen ve Y eksen üzerinde bir rampa ve birimi basamak sinyalleri uygulanmıştır.

Ayrıca, bu bölümde, diğer sonuçlara göre elde ettiğimiz en iyi sonuçları saptamak için Durum I, II ve III' de ki kontrol performansını görüntülemek için, kök ortalama kare hatası (RMSE), ortalama kare hatası (MSE) ve ortalama Mutlak hatası (MAE) denklem (5.1) 'de tanımlandığı gibi temas kuvvet hatalarının hesaplanmasında kullanılmıştır.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (e(t))^2}$$

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (e(t))^2$$

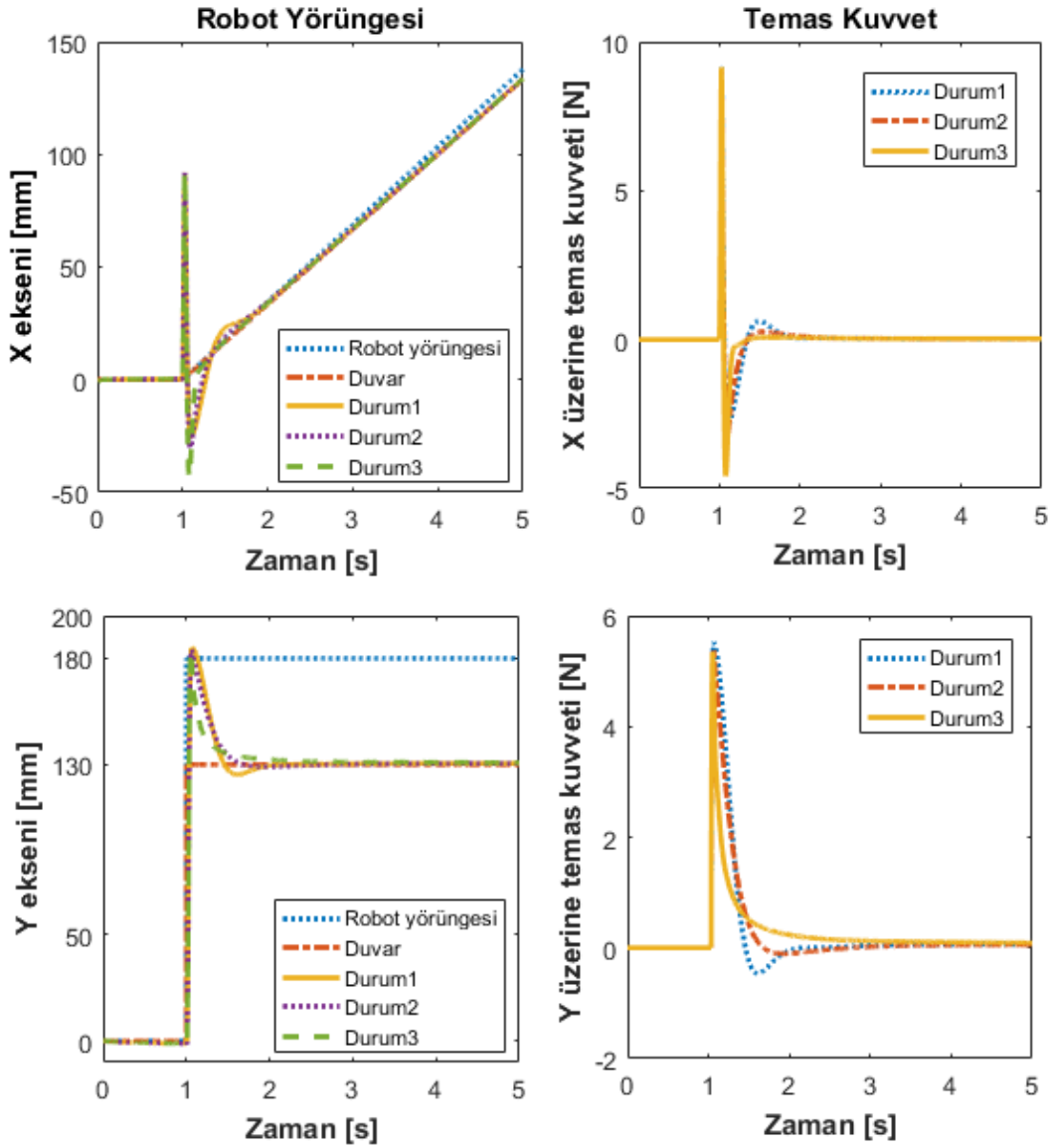
$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |e(t)| \quad (5.1)$$

##### 4.1. Sistemdeki KDEK ve KEK Performansını Düz Duvar Etkileşimli Bir Ortamda Test Etmek

Şekil 4.1, üç durumda durum yörüngelerini ve robot manipülatörü ile ortam arasındaki temas kuvvetlerini göstermektedir.

Robot, basamak yörüngesi istenen yörünge olarak uygulandığında ( $Y_d=180\text{mm}$ ) Y eksenine  $Y_e=130\text{mm}$  yerleştirilen düz bir duvarda bir yörüngeyi izler.  $K_e$  ortam sertliği ve  $B_e$  sönümleyici ortam tam olarak bilinmektedir ( $K_e=100\text{ N/m}$ ,  $B_e=0,1\text{ Ns/m}$ .)

Temas kuvvetinin, temasta  $t = 1$ 'de hızla arttığını not ediyoruz. Bununla birlikte, kontrolör, optimize edilmiş kontrolör parametrelerine bağlı olarak, yeni ortamı ile temas kuvvetini sıfıra eşit olacak şekilde yörüngeyi düzenlenmiştir.

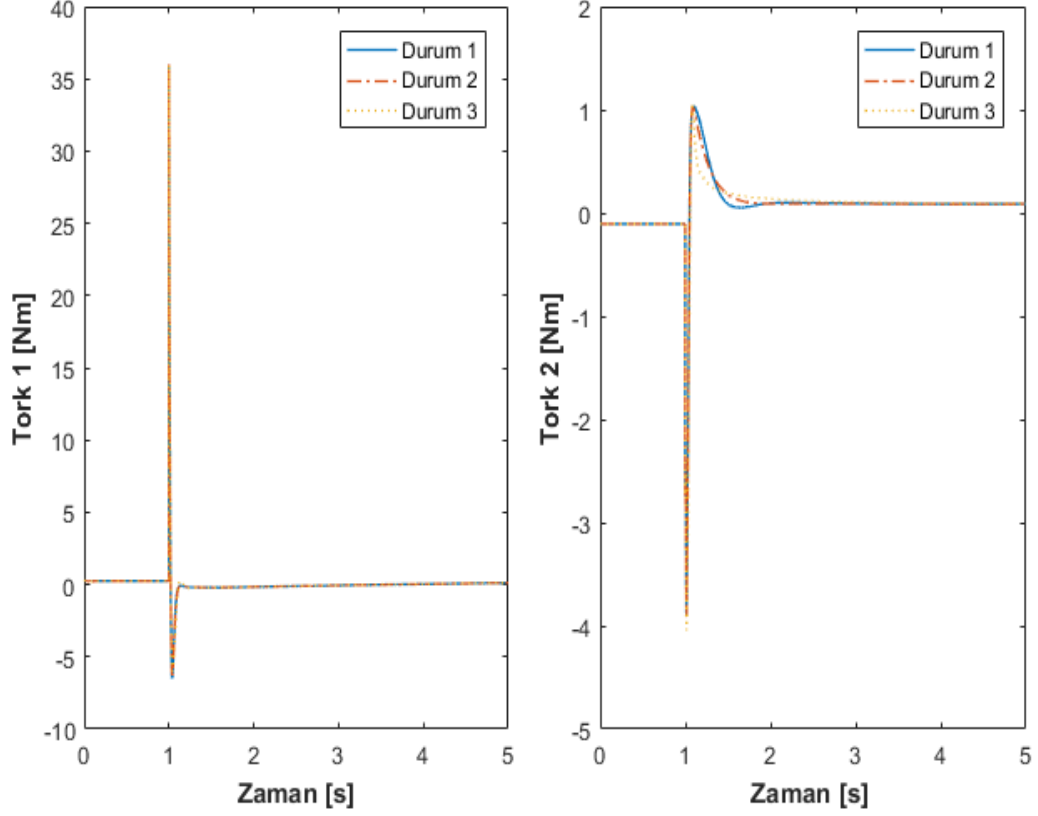


Şekil 4.1. Robot yörüngesi (solda) ve temas kuvvetinin tepkisi (sağda),  $K_e=100$ N/m,  $(Y_e, Y_d)=(130,180)$  mm

Tablo 4.1. Temas kuvvet hataları RMSE, MSE ve MAS ile  $K_e = 100$  N/m.

Ke=100 N/m	RMSE		MSE		MAS	
	X	Y	X	Y	X	Y
Durum I	0,7838	0,9919	0,6144	0,9839	0,2099	0,2966
Durum II	0,7530	0,8866	0,5670	0,7861	0,1828	0,2664
Durum III	<b>0,7355</b>	<b>0,6270</b>	<b>0,5409</b>	<b>0,3932</b>	<b>0,1412</b>	<b>0,2542</b>

Tablo 5.1'den elde edilen sonuçlar, RMSE' ye göre, X ekseninde % 4 ve Y ekseninde % 10,31 Durum I' den Durum II' ye ve X ekseninde % 6,16 ve Y ekseninde % 36,7'lik Durum I' den Durum III' ye, karşılaştırıldığında bir iyileşme elde edildiğini göstermiştir. En iyi sonuçlar tablolarda koyu metinle gösterildi.

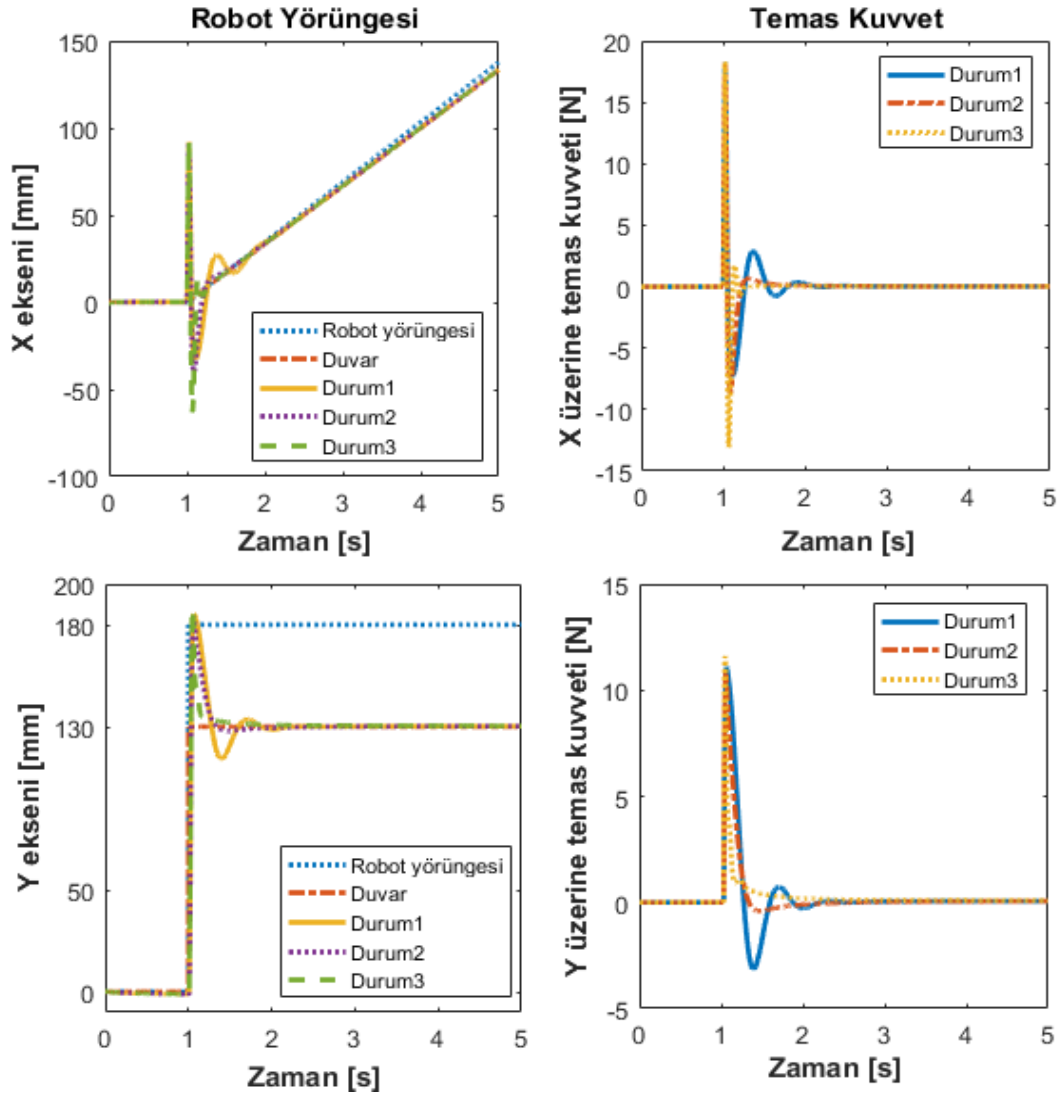


Şekil 4.2. Robot kontrol sinyalleri, tork 1 (solda) ve tork 2 (sağda),  $K_e=100\text{N/m}$

Şekil 4.2 robotun kontrol sinyalleri tork 1 ve tork 2 duvar ortamda  $K_e=100\text{N/m}$  ile göstermektedir.

Önceki simülasyona benzer, ancak ortam sertliği olan  $K_e=200\text{N/m}$ , kontrol cihazının performansını farklı ortam parametreleriyle test etmek için değiştirildi. Şekil 4.3 konum yörüngelerini ve temas kuvvetlerini göstermektedir.

Temas kuvvetleri, denklemde olduğu gibi  $K_e$  değerindeki değişim nedeniyle artmıştır (3.33).

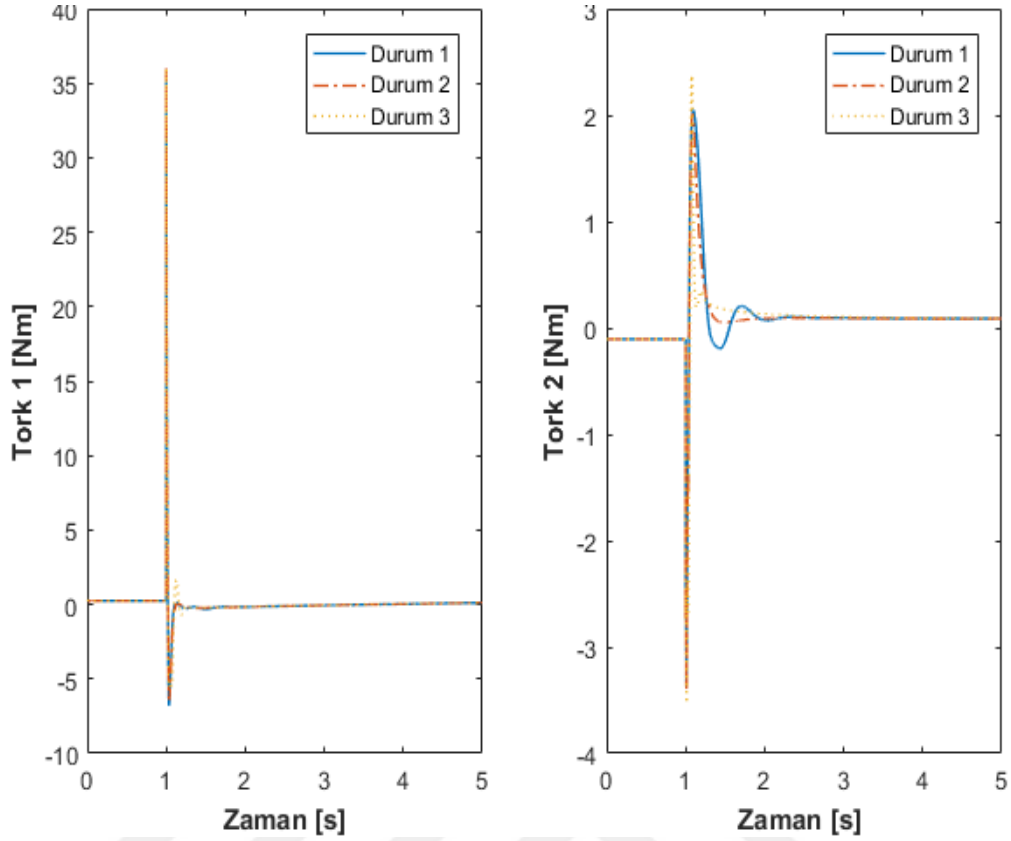


Şekil 4.3. Robot yörüngesi (solda) ve temas kuvvetinin tepkisi (sağda),  $K_e=200\text{N/m}$  ( $Y_e, Y_d$ ) = (130,180) mm

Tablo 4.2. Temas kuvvet hataları RMSE, MSE ve MAS ile  $K_e = 200\text{ N/m}$ .

Ke=200 N/m	RMSE		MSE		MAS	
	X	Y	X	Y	X	Y
Durum I	1,7060	1,7224	2,9106	2,9666	0,4581	0,5015
Durum II	1,5593	1,3467	2,4313	1,8137	0,3166	0,3180
Durum III	<b>1,5498</b>	<b>0,9271</b>	<b>2,3120</b>	<b>0,8596</b>	<b>0,2561</b>	<b>0,2590</b>

Tablo 4.2'den  $K_e=200\text{N/m}$  ile RMSE' ye göre elde edilen sonuçlar, X ekseninde % 8,59'lik ve Y ekseninde % 21,81'lik. Durum I' den Durum II' ye ve X ekseninde % 9,15'lik ve Y ekseninde % 46,17'lik Durum I' den Durum III' ye, karşılaştırıldığında bir iyileşme elde edildiğini göstermiştir.



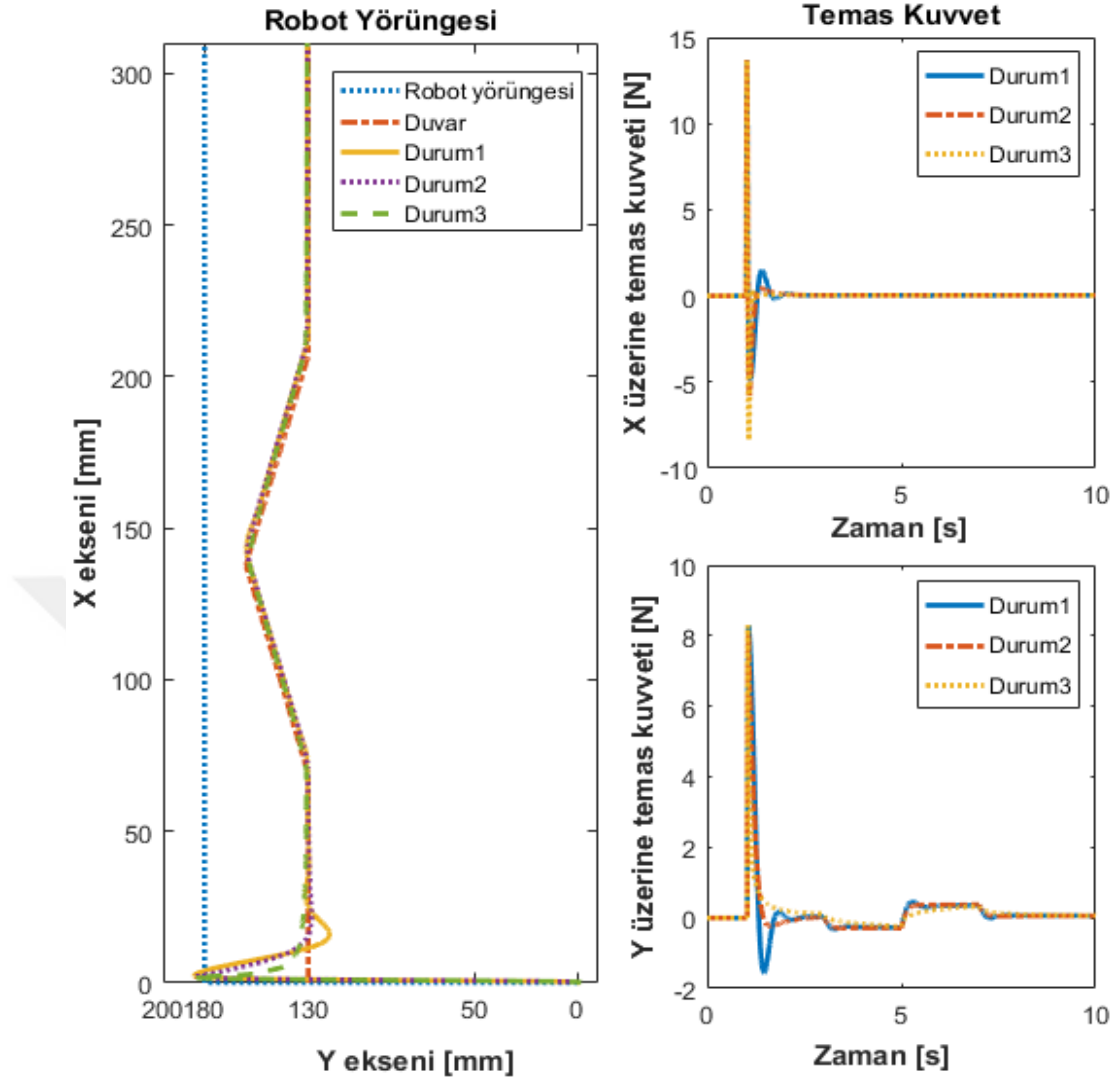
Şekil 4.4. Robot kontrol sinyalleri, tork 1 (solda) ve tork 2 (sağda),  $K_e=100\text{N/m}$

Şekil 4.4 robotun kontrol sinyalleri tork 1 ve tork 2 duvar ortamda  $K_e=200\text{N/m}$  ile göstermektedir.

#### 4.2. Sistemdeki KDEK ve KEK Performansını Düz Olmayan Duvar Etkileşimli Bir Ortamda Test Etmek

Genel durumlarda, bir duvar düz ve düzgün değildir; bu nedenle, kuvvet izleme kontrolü ortamın yüzey değişimini sağlamalıdır.

Bu testte, basamak yörüngesi KEK ve önerilen kontrolör KDEK' e istenen yörünge ( $Y_d=180\text{mm}$ ) olarak uygulandığında, ortam sertliği  $K_e$  ve  $B_e$  sönümlenme ortamı tam olarak bilinir ( $K_e=100\text{ N/m}$ ,  $B_e=0,1\text{ Ns/m}$ ). Bu simülasyonun sonuçları, üçgen tipini sağlamak için Şekil 4.5'te gösterilmektedir. Temas kuvveti, temasta  $t = 1\text{s}$ 'de hızla yükselmekte, daha sonra kontrolör yörüngeyi sifıra eşit temas kuvvetiyle hızlı bir şekilde düzenlemektedir.

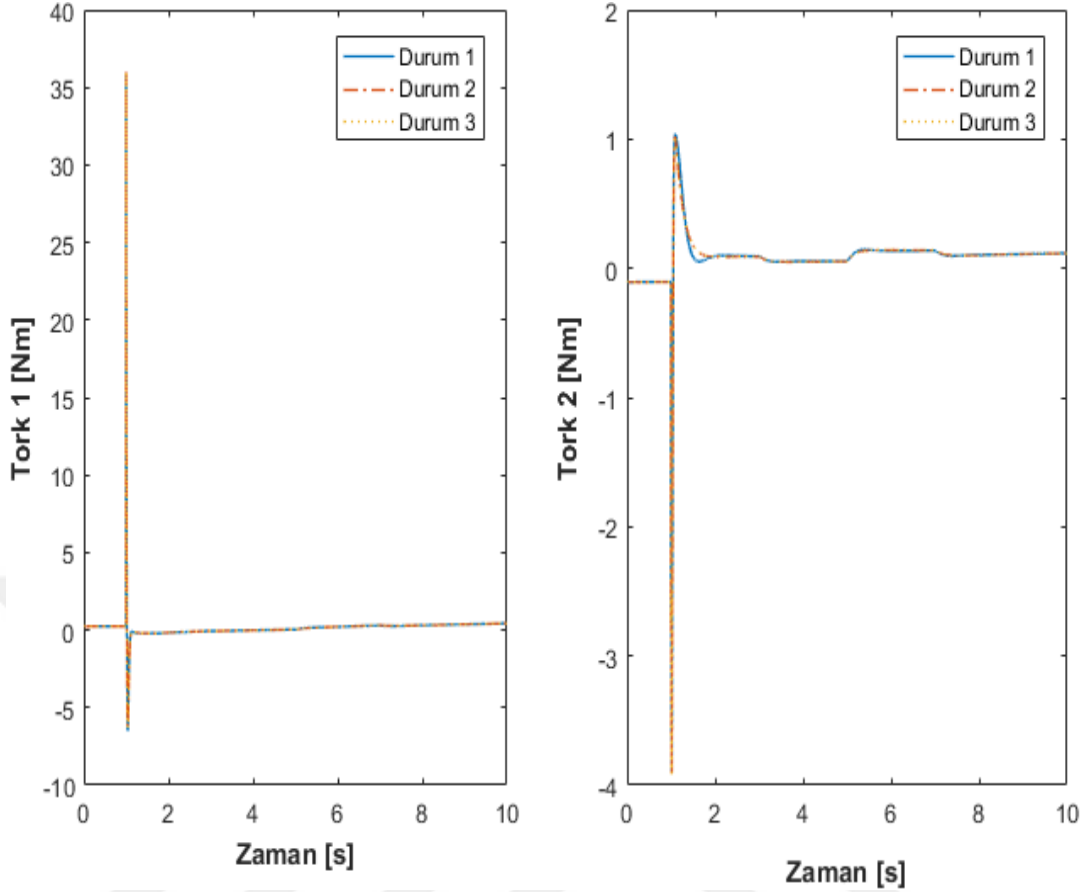


Şekil 4.5. Robot yörüngesi (solda) ve temas kuvvetinin tepkisi (sağda) düz olmayan ortamda  $(Y_e, Y_d)=(130,180)$  mm,  $K_e=100$ N/m

Tablo 5.3. Temas kuvvet hataları RMSE, MSE ve MAS ile  $K_e =100$  N/m.ve düz olmayan ortam.

Ke=100 N/m	RMSE		MSE		MAS	
	X	Y	X	Y	X	Y
Durum I	0,8653	0,9760	0,7456	0,9527	0,1723	0,3215
Durum II	0,8114	0,8237	0,6584	0,6785	0,1392	0,2801
Durum III	<b>0,8033</b>	<b>0,5634</b>	<b>0,6452</b>	<b>0,3174</b>	<b>0,1114</b>	<b>0,2151</b>

Tablo 5.3'den elde edilen sonuçlar RMSE'ye göre, Durum I 'den Durum II'ye X ekseninde % 6,22'lik ve Y ekseninde % 15,6'lik ve Durum I 'den Durum III'ye, X ekseninde % 7,16'lik ve Y ekseninde % 42,3'lik bir iyileşme elde edildiğini göstermiştir.



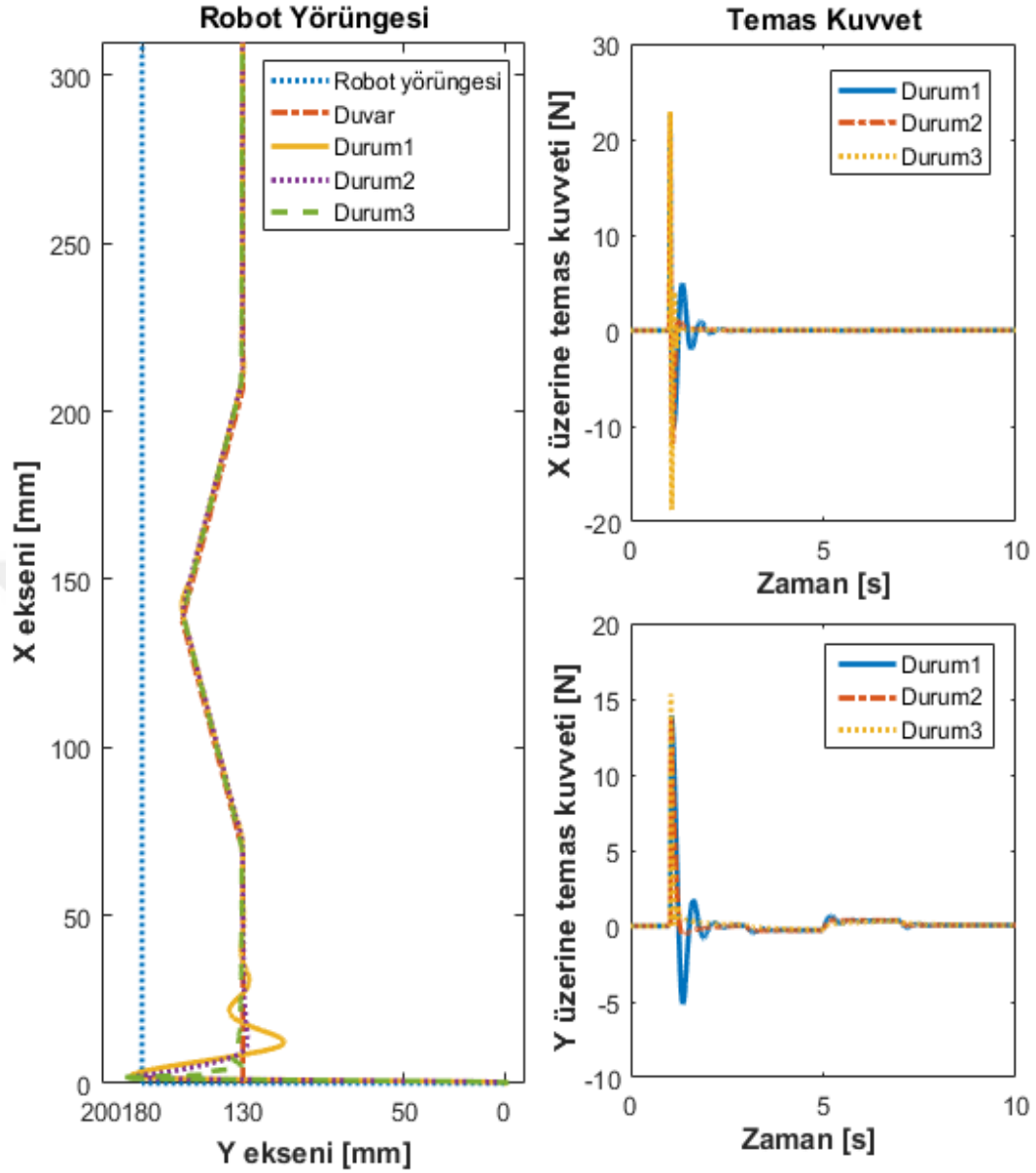
Şekil 4.6. Robot kontrol sinyalleri, tork 1 (solda) ve tork 2 (sağda), düz olmayan ortamda  $K_e=100\text{N/m}$

Şekil 4.6 robotun kontrol sinyalleri tork 1 ve tork 2 düz olmayan ortamda  $K_e=100\text{N/m}$  ile göstermektedir.

Şekil 4.7 önceki yörüngeye benzer şekilde konum yörüngelerini ve temas kuvvetlerini göstermektedir; duvar düz değildir, fakat ortam sertliği  $K_e=200\text{N/m}$  'dir.

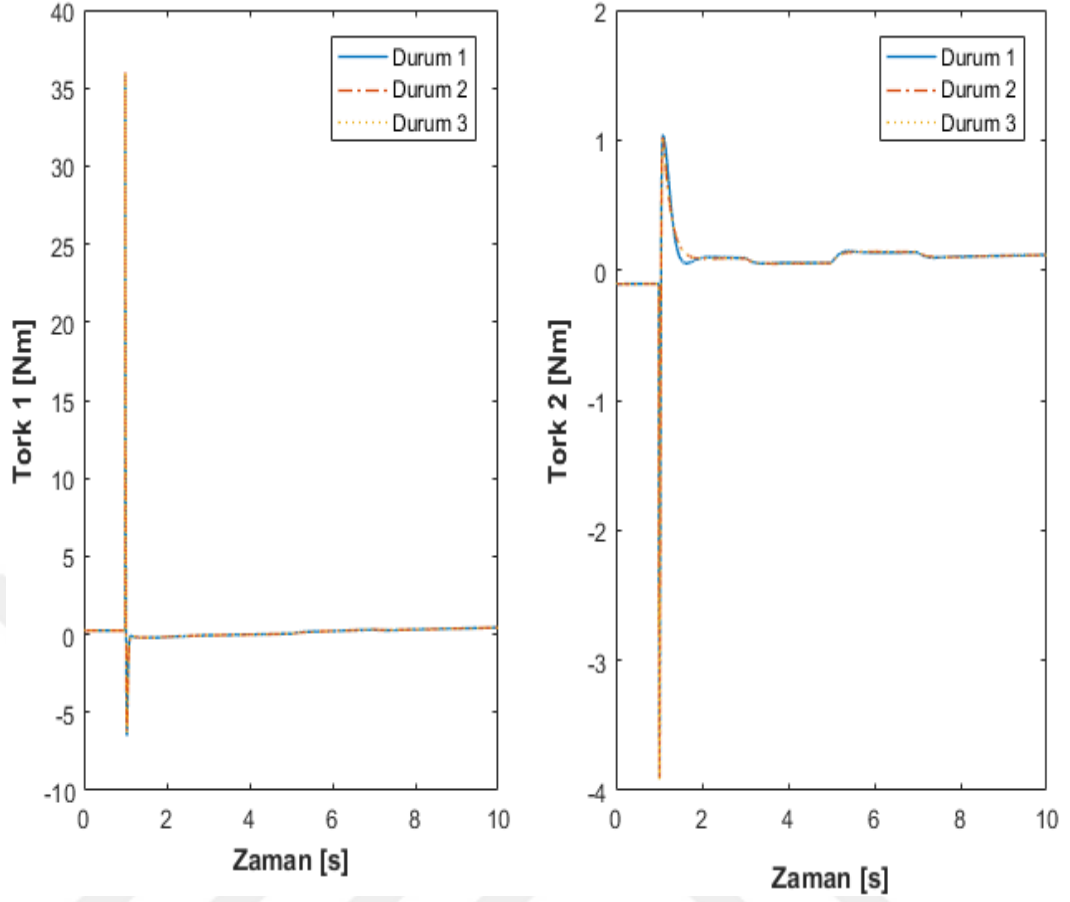
Tablo 5.3. Temas kuvvet hataları RMSE, MSE ve MAS ile  $K_e =100 \text{ N/m}$ .ve düz olmayan ortam.

$K_e=200$ N/m	RMSE		MSE		MAS	
	X	Y	X	Y	X	Y
Durum I	1,5968	1,5113	2,5499	2,2840	0,3387	0,4544
Durum II	1,4080	1,1165	<b>1,9825</b>	1,2465	0,2078	0,3069
Durum III	<b>1,4489</b>	<b>0,7977</b>	2,0992	<b>0,6363</b>	<b>0,1838</b>	<b>0,2199</b>



Şekil 4.7. Robot yörüngesi (solda) ve temas kuvvetinin tepkisi (sağda) düz olmayan ortamda  $(Y_e, Y_d)=(130,180)$  mm,  $K_e=200$ N/m

Tablo 5.4'den RMSE'ye göre elde edilen sonuçlar, Durum I' den Durum II'ye X ekseninde % 11,8'lik ve Y ekseninde % 26,12'lik, ayrıca Durum I' den Durum III'ye X ekseninde % 9,2'lik ve Y ekseninde % 47,21'lik bir iyileşme elde edildiğini göstermiştir. Ek olarak, Durum II' de ki Durum III' e MSE'ye göre olan hata sonuçları X ekseninde daha iyiydi, ama duvar Y ekseninde yerleştirildiği için bu fark dikkate alınmadı.



Şekil 4.8. Robot kontrol sinyalleri, tork 1 (solda) ve tork 2 (sağda),  $K_e=200\text{N/m}$ . düz olmayan ortamda

Şekil 4.8 robotun kontrol sinyalleri tork 1 ve tork 2 düz olmayan ortamda  $K_e=200\text{N/m}$  ile göstermektedir.

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez, bir robot manipülatörün modellenmesi sürecini ve bunun ortam ile olan etkileşimini açıklamaktadır. SimMechanics'in robot mekaniğini modellemek için bir araç olarak kullanılması, model tabanlı kontrol algoritmalarını doğrulama imkânı sağlamaktadır. Kesin mekanik model, gerçek bir uygulamada olduğu gibi, tasarımcı için bilinmemektedir, böylece algoritmanın gerçek modelle eşleşme yeteneği kolayca kanıtlanabilir. Bu, KEK ve yeni önerilen KDEK gibi tekniklerin test edilmesini sağlayacaktır.

Öte yandan, empedans kontrolünün kullanımıyla ilgili bir anlayışı, özellikle ortam tamamen veya kısmen bilinmeyen ve robotun uyumluluğunun önemli olduğu uygulamalarda, robot-ortam etkileşimini kontrol etme yeterliliğini göstermektedir.

Bu tez, robotlar ve ortamları arasındaki etkileşim kuvvetlerini geliştirmek için yeni bir KDEK yöntemi tanıtılmıştır. Deneyler, konum kontrolü için hesaplanan tork denetleyicisinin kullanıldığı bir RR tipi seri manipülatör üzerinde gerçekleştirilmiştir. KDEK ve KEK ile ilgili tüm parametreler simpleks arama optimizasyon algoritması kullanılarak belirlenmiştir. Önerilen KDEK' i incelemek için, farklı ortam sertliği değerleri kullanılmıştır. Ek olarak, KDEK' in sağlamlığı düz ve üçgen şekilli duvarlarda test edilmiştir. KDEK ve KEK' in performansını karşılaştırmak için temas kuvvet hatalarının hesaplanmasında üç farklı performans endeksi kullanılmıştır. Simülasyon deneylerine dayanarak, önerilen KDEK iyi ve güçlü bir performans göstererek sistem üzerinde daha geniş bir kontrol alanı sunmamıza izin verilmektedir. Sonuçlar, ilk düz olan ortamda I durumundan II durumuna göre % 10,31'lik bir iyileşme elde edildiğini ve III durumundan I durumuna kıyasla % 36,7'lik bir iyileşme elde edildiğini göstermiştir. Robot-ortam koşulları değiştiğinde, % 21,81'lik durum I' den durum II' ye ve durum I' den durum III' e % 46,17'lik bir iyileşme sağlanmıştır. Ayrıca düz olmayan ortamda I durumundan II durumuna göre % 15,6'lik bir iyileşme elde edildiğini ve III durumundan I durumuna kıyasla % 42,3'lik bir iyileşme elde

edildiğini göstermiştir. Robot-ortam koşulları değiştiğinde, % 26,12'lik durum I' den durum II' ye ve durum I' den durum III' e % 47,21'lik bir iyileşme sağlanmıştır.

Tasarladığımız KDEK' i kullanarak elde ettiğimiz sonuçlara göre, yapılacak çalışmalarda KDEK kontrolörü insanlarla doğrudan temas halinde olan robot ve tıbbi robot uygulamalarında kullanmaya ve robotun performans etkisi üzerindeki çalışmalara imkân tanıyacaktır. Ayrıca, KDEK' in parametrelerini elde etmek için Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) veya Ant Koloni Optimizasyonu (ACO) gibi yöntemleri kullanmayı düşünölmektedir.



## KAYNAKLAR

- [1] Vukobratovic M., Surdilovic D., Ekalo Y., Katic D., Dynamics and Robust Control of Robot-Environment Interaction, *New Frontiers in Robotics*, 2009, **4**(6), 17-25.
- [2] Schiavi R., Bicchi A., Integration of Active and Passive Compliance Control for Safe Human- Robot Coexistence, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, London , England, 25-27 May 2009.
- [3] Salisbury J., Active Stiffness Control of a Manipulator in Cartesian Coordinates, *the 19th IEEE Conference on Decision and Control*, New York, United State, 19 December 1980.
- [4] Roberts R. K., Paul R. P., Hillberg B. M., The Effect of Wrist Force Sensor Stiffness on the Control of Robot Manipulators, *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Berlin, Germany, 17-15 March 1985.
- [5] Degoulange E., Dauchez P., External Force Control of an Industrial Puma 560 Robot, *Journal of Robotics Sys*, 1994, **11**(6), 523–540.
- [6] Hogan N., Impedance Control an Approach to Manipulation, *American Control Conference*, New York, USA, 12-15 March 1984.
- [7] Hogan N., Impedance Control an Approach to Manipulation: Part I&II, *Int. Journal of Robotics Res*, 1985, **107**(3), 1–24
- [8] Degoulange E., Dauchez P., External Force Control of an Industrial Puma 560 Robot, *Journal of Robotics Sys*, 1994, **11**(6), 523–540.
- [9] Volpe R., Khosla P., The Equivalence of Second Order Impedance Control and Proportional Gain Explicit Force Control: Theory and Experiments, *Journal of Experimental Robotics II*, 1993, **14**(5), 3-24.
- [10] Seraji H., Adaptive Admittance Control: An Approach to Explicit Force Control in Compliant Motion, *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Washington, USD, 11-15 August 1994.
- [11] Whitney D. E., Historical Perspective and State of the Art in Robot Force Control, *Int. Journal of Robotics Res*, 1987, **6**(1), 3–14.
- [12] Mason M., Compliance and Force Control for Computer Controlled Manipulators, *IEEE Trans. on Sys Journal*, 1981, **11**(6), 418–432.

- [13] Raibert M., Craig J., Hybrid Position/Force Control of Manipulators, *ASME Journal of Dyn. Sys.*, 1981, **102**(42), 126–133.
- [14] Anderson R., Spong W., Hybrid Impedance Control of Robotic Manipulators, *IEEE Journal of Robotics and Automat.*, 1988, **4**(5), 549–556.
- [15] Volpe R., Khosla P., an Experimental Evaluation and Comparison of Explicit Force Control Strategies for Robotic Manipulators, *American Control Conference*, New York, USD, 12-16 April 1992.
- [16] Volpe R., Khosla P., A Theoretical and Experimental Investigation of Explicit Force Control Strategies for Manipulators, *Journal of IEEE Trans. on Auto. Contr.* 1993, **38**(11), 1634–1650.
- [17] Monje A., *Fractional-Order Systems and Controls: Fundamentals and Applications*, 1st ed., Springer Science & Business Media, New York, 2010.
- [18] Ying L., *Fractional Order Motion Controls*, 3rd ed., John Wiley & Sons, New York, 2012.
- [19] Podlubny I., *Fractional Differential Equations*, 1st ed., Academic Press, New York, 1999.
- [20] Zeng G., Hemami A., An Over View of Robot Force Control, *Robotica Journal*, 1997, **15**(9), 473-482.
- [21] Hogan N., Impedance Control: Approach to Manipulation: Part I-Theory, *Journal of Dynamic Systems, Measurements, and Control*, 1985, **107**(66), 1-7.
- [22] Zhao H., Impedance Control of Flexible Robot Manipulators, *InTech Journal*, 2008, **18**(11), 953-978.
- [23] Jong H., Hyun C., Impedance Control with Varying Stiffness for Parallel-Link Manipulators, *Proceedings of the American Control Conference*, Pennsylvania, United State, 16-18 June 1998.
- [24] Yanan L., Shuzhi S., Chenguang Y., Xinyang L., Keng P., Model-Free Impedance Control for Safe Human-Robot Interaction, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Shanghai, China, 9-13 May 2011.
- [25] KIZIR S., BİNGÜL Z., Fuzzy Impedance and Force Control of a Stewart Platform, *Turk J Elec Eng & Comp Sci*, DOI: 0.3906/elk-1208-54.
- [26] Hsia S., Bonitz G., Force Tracking Impedance Control of Robot Manipulators Under Unknown Environment, *Journal of IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2004, **12**(3), 24-32.
- [27] Yiting D., Changyin S., Adaptive Neural Impedance Control of a Robotic Manipulator with Input Saturation, *Journal of IEEE Transactions on Systems*, 2016, **46**(3), 334-344.

- [28] Haidegger H., Force Sensing and Force Control for Surgical Robots, *7th IFAC Symposium on Modeling and Control in Biomedical Systems*, Manchester, England, 12 August 2009.
- [29] Concepcion A., Tuning and Auto-Tuning of Fractional Order Controllers for Industry Applications, *Journal of Control engineering practice*, 2008, **16**(7), 798-812.
- [30] Yang Q., Ivo P., Dingyü X., Fractional Order Control-A Tutorial, *American Control Conference Hyatt Regency Riverfront*, Saint Louis, USA, 10-12 June 2009.
- [31] Reham H., Fahmy B., Kamel E., Trajectory Tracking Control for Robot Manipulator Using Fractional Order-Fuzzy-PID Controller, *International Journal of Computer Applications*, 2016, **134**(15), 887-912.
- [32] Duarte V., Costa J., A Noninteger Control Toolbox for Matlab, *CACSD 2000 IEEE International Symposium*, Hyderabad, India, 12-14 September 2000.
- [33] Weise T., Global Optimization Algorithms-Theory and Application, *Self-Published Journal*, 2009, **17**(3), 27-38.



**EKLER**

## EK-A

```
function [Angle1,Angle2] = fcn(Px,Py)

L1 = 0.160;
L2 = 0.160;
Py = Py - 0.075;
tmp= (Px^2 + Py^2 - L1^2 - L2^2)/(2*L1*L2);
x =1-tmp^2;
x(x>-1e-12 & x<0) = 0;
sinq2= sqrt(x);
cosq2= tmp;
Angle2 = atan2(-sinq2,cosq2);
cosq1= L2*cos(Angle2)+L1;
sinq1= sqrt(Px^2 + Py^2 -(cosq1)^2);
Angle1= atan2(Py,Px) + atan2(sinq1,cosq1);
```



## EK-B

```
function C = nipid(kp, kd, vd, ki, vi, bandwidth, n, formula,...
    expansion, decomposition)

% function C = nipid(kp, kd, vd, ki, vi, bandwidth, n, formula,...
%   expansion, decomposition)
% This function provides integer approximations of fractional PIDs,
% with transfer function  $kp + kd \cdot D^{vd} + ki \cdot D^{(-vi)}$ .
% Type help nid for information on parameters bandwidth to
decomposition.
% Duarte Valério 2004

if nargin < 10
    decomposition = 'frac';
end
if nargin < 9
    expansion = 'mcltime';
end
if isempty(expansion)
    expansion = 'mcltime';
end
switch formula
    case {'crone', 'carlson', 'cfehigh', 'cfelow'}
        C = kp + ...
            nid(kd, vd, bandwidth, ceil(n/2), formula, expansion,
decomposition) + ...
            nid(ki, -vi, bandwidth, ceil(n/2), formula, expansion,
decomposition);
    case 'matsuda'
        if length(bandwidth) < 2
            error('Variable bandwidth should consist of two
frequencies.')
        end
        % function to interpolate
        w = logspace(log10(bandwidth(1)), log10(bandwidth(2)), n+1);
        gain = 20 * log10(abs(kp + kd*(j*w).^vd + ki*(j*w).^(-vi)));
        % function matsudaCFE handles the rest
        C = matsudaCFE(w, gain);
    otherwise
        switch expansion
            case 'mcltime'
                C = kp + ...
                    nid(kd, vd, bandwidth, n, formula, expansion,
decomposition) + ...
                    nid(ki, -vi, bandwidth, n, formula, expansion,
decomposition);
            case 'cfe'
                C = kp + ...
                    nid(kd, vd, bandwidth, ceil(n/2), formula,
expansion, decomposition) + ...
                    nid(ki, -vi, bandwidth, ceil(n/2), formula,
expansion, decomposition);
            case 'mcltimeINV'
                C = kp + ...
                    nid(kd, vd, bandwidth, ceil(n/4), formula,
expansion, decomposition) + ...
                    nid(ki, -vi, bandwidth, ceil(n/4), formula,
expansion, decomposition);
            case 'cfeINV'
```

```

        if isinteger(n/2) & ~isinteger(n/4)
            C = kp +...
                nid(kd, vd, bandwidth, ceil(n/2)+1, formula,
expansion, decomposition) +...
                nid(ki, -vi, bandwidth, ceil(n/2)+1,
formula, expansion, decomposition);
        else
            C = kp +...
                nid(kd, vd, bandwidth, ceil(n/2), formula,
expansion, decomposition) +...
                nid(ki, -vi, bandwidth, ceil(n/2), formula,
expansion, decomposition);
        end
    otherwise
        error ('The expansion has an invalid format.');
```

end

end



## KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] **Alshawi A.**, Kizir S., Impedance control of 2dof serial robot manipulator, *International Conference on Advanced Technologies, Computer Engineering and Science (ICATCES'18)*, Safranbolu, Turkey, May 11-13, 2018.



## ÖZGEÇMİŞ

Ali Alshawi 1990 yılında El-Bab/Halep'te doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini El-Bab/Halep'te tamamladı. 2007 yılında girdiği Halep Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü'nden 2012 yılında mezun oldu. 2007-2012 seneleri arasında birçok yazılım ve Mekatronik projesinde görev aldı. Mezun olduktan sonra 2012-2014 seneleri arasında Elektronik ve Mekatronik projeleri tasarlayan şirketlerde çalışmıştır. 2014 yılı Eylül ayında Türkiye bursunu kazanarak Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans eğitime başlamıştır. Yüksek lisans eğitiminde empedans ve kesir dereceli empedans kontrol algoritmaları konusunda çalışmaları bulunmaktadır.