BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÜÇ SERBESTLİK DERECELİ ROBOTİK KOLUN KARTEZYEN UZAYDA EMPEDANS KONTROLÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ayberk BEYHAN

Fen Bilimleri Enstitüsü

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

HAZİRAN 2021

BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÜÇ SERBESTLİK DERECELİ ROBOTİK KOLUN KARTEZYEN UZAYDA EMPEDANS KONTROLÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ayberk BEYHAN
(181241782009)

Fen Bilimleri Enstitüsü

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Nurettin Gökhan ADAR

HAZİRAN 2021

BTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 181241782009 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Ayberk BEYHAN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "ÜÇ SERBESTLİK DERECELİ ROBOTİK KOLUN KARTEZYEN UZAYDA EMPEDANS KONTROLÜ" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Dr. Öğr. Üyesi Nurettin Gökhan ADAR** .....
Bursa Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Dr. Öğr. Üyesi Hakan ÜLKER** .....
Bursa Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Elif Erzan TOPÇU .....
Uludağ Üniversitesi

Teslim Tarihi **:22 Haziran 2021**
Savunma Tarihi **:11 Haziran 2021**

20.04.2016 tarihli Resmi Gazete'de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, Bursa Teknik Üniversitesi'nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere göre uygun rapor alınmıştır.

Bu tez, Bursa Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi 191N008 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

İNTİHAL BEYANI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Öğrencinin Adı Soyadı: Ayberk BEYHAN

İmzası :

Aileme,

ÖNSÖZ

Yüksel lisans eğitimim boyunca desteğini esirgemeyen tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Nurettin Gökhan ADAR'a, 191N008 proje numarasıyla yapmış olduğumuz çalışmaları destekleyen Bursa Teknik Üniversitesi BAP Koordinatörlüğü'ne teşekkür ederim.

Haziran 2021 Ayberk BEYHAN

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **v**
KISALTMALAR ..... **viii**
SEMBOLLER ..... **ix**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xi**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xii**
ÖZET ..... **xiv**
SUMMARY ..... **xv**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Tezin Amacı 1
1.2 Literatür Araştırması 2
2. ROBOT KİNEMATİĞİ **5**
2.1 Değiştirilmiş Denavit Hartenberg (D-H) Yöntemi 5
2.2 Robot İleri Kinematiği 7
2.3 Ters Kinematik 9
2.4 Jakobiyen Matrisi 11
2.5 Yörünge Planlaması 13
2.5.1 Eklem uzayında yörünge planlanması 13
2.5.2 Kartezyen uzayında yörünge planlanması 13
3. ROBOT DİNAMİĞİ **14**
4. ROBOT TASARIM VE İMALATI **18**
4.1 Robot Tasarımı 18
4.2 Robot İmalatı 18
4.2.1 DC motorlar 19
4.2.2 DC motor sürücüleri 19
4.2.3 Enkoder 20
4.2.4 Geliştirme kartı 20
4.2.5 Kuvvet sensörü 21
4.2.6 Robotun imalatı 21
5. ROBOT KONTROLÜ **22**
5.1 Hesaplanan tork kontrolü 22
5.2 Kuvvet Kontrolü 23
5.3 Dolaylı Kuvvet Kontrol Yöntemleri 23
5.4 Empedans Kontrol 23
5.5 Hesaplanan tork tabanlı empedans kontrolü 25
5.6 Hesaplanan tork tabanlı empedans kontrol simülasyonu 27
6. ROBOTUN GERÇEK ZAMANLI KONTROLÜ **36**
6.1 Yerçekimi dengelemeli PID kontrolü 36
6.2 Pozisyon Tabanlı Empedans Kontrolü 45
6.3 Yerçekimi dengelemeli PID ve Empedans uygulamalarının karşılaştırılması 52
7. SONUÇ **55**

KAYNAKLAR 57
ÖZGEÇMİŞ..... 60

KISALTMALAR

A : Amper
ADC : Analog to Digital Converter (Analog dijital dönüştürücü)
CAD : Computer-aided Design (Bilgisayar destekli grafik-tasarım)
cm : Santimetre
CPR : Cycles per Revolution (Tur başına sayım sayısı)
cθ : cos(θ)
DC : Direct Current (Doğru akım)
DH : Denavit-Hartenberg
g : Gram
kg : Kilogram
kg.cm : Kilogram santimetre
m : Metre
mm : Milimetre
N : Newton
N.m : Newton metre
rad : Radyan
rad/s : Radyan bölü saniye
RNE : Recursive Newton Euler (Yinelemeli Newton Euler)
RPM : Revolutions per Minute (Dakika başına tur sayısı)
SD : Serbestlik dereceli
sθ : sin(θ)
V : Volt

SEMBOLLER

a_{i-1} : z eksenleri arasındaki mesafe

B_{imp}, b_x, b_y, b_z: Empedans kontrol sönüm vektörü ve Kartezyen uzaydaki katsayıları

$C(q,\dot{q})$: Coriolis ve merkezkaç vektörü

d_i : x eksenleri arasındaki mesafe

$D_x(a_{i-1})$: a_{i-1} eksenindeki yer değiştirmesine dönüşüm matrisi

$D_z(d_i)$: d_i yer değiştirmesine dönüşüm matrisi

F, f_x, f_y, f_z : Temas kuvveti vektörü ve Kartezyen uzaydaki katsayıları

G(q) : Yerçekimi vektörü

J, J_p, J_ω : Jakobiyen matrisi, Doğrusal Jakobiyen matrisi, Açısal Jakobiyen matrisi

K_d : PID kontrolün türev katsayı matrisi

K_g : PWM değeri ile DC motorun tork değeri oranı

K_p : PID kontrolün oran katsayı matrisi

K_i : PID kontrolün integral katsayı matrisi

K_{imp}, k_x, k_y, k_z: Empedans kontrol yay vektörü ve Kartezyen uzaydaki katsayıları

k_p : Konum hata katsayısı

k_v : Hız hata katsayısı

l : Uzuv uzunluğu

M(q) : Kütle matrisi

M_{imp}, m_x, m_y, m_z: Empedans kontrol kütle vektörü ve Kartezyen uzaydaki katsayıları

n : Örnekleme sayısı

P, p_x, p_y, p_z : Pozisyon vektörü ve Kartezyen uzayındaki katsayıları

$\dot{P}$: Kartezyen uzayındaki doğrusal hız vektörü

P_D : İstenen Kartezyen yörünge

P_F : Temas kuvvetinin empedans kontrolüne göre oluşturduğu Kartezyen pozisyon

P_I : Empedans kontrol sonrası düzenlenen Kartezyen yörünge

$R_x(\alpha_{i-1})$: α_{i-1} rotasyonuna dönüşüm matrisi

$R_z(\theta_i)$: θ_i rotasyonuna dönüşüm matrisi

q : Eklem değişkeni

$\dot{\mathbf{q}}$	: Eklem hız değişkeni
$\mathbf{r}$	: Giriş sinyali
$\mathbf{r_1, r_2, r_3}$	: 2. ve 3. uzuvdan oluşturulan ABC üçgeninin kenar uzunlukları
$\mathbf{t}$	: Zaman
$\mathcal{T}$	: Kinetik enerji
$^{\mathbf{i-1}}\mathbf{iT}$	: Dönüşüm matrisi
$\mathcal{U}$	: Potansiyel enerji
$\mathbf{U_i(s)}$	: Modellenen uzunların transfer fonksiyonları
$\mathbf{u}$	: Kontrol giriş sinyali
$\mathbf{v}$	: Kartezyen uzayında doğrusal ve açısal hız bilgilerinin olduğu vektör
$\mathbf{y}$	: Çıkış sinyali
$\mathbf{Z}$	: Eklemin Kartezyen uzaydaki açısal hız vektörü
$\boldsymbol{\alpha_{i-1}}$	: x eksenleri arasındaki açı
$\boldsymbol{\varphi_i}$	: Yardımcı açı
$\boldsymbol{\theta_i}$	: Değişken eklem açısı
$\boldsymbol{\tau_i}$	: Tork
$\boldsymbol{\Omega}$	: Kartezyen açısal hız vektörü
$\boldsymbol{\omega}$	: Kartezyen açısal hız
$\boldsymbol{\omega_n}$	: Doğal frekans
ζ	: Sönüm oranı
$\boldsymbol{\gamma_i}$	: Polinom katsayısı
$\boldsymbol{\xi}$	: Genelleştirilmiş tork
$^\circ$	: Derece

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : D-H tablosu örneği. **6**
Çizelge 2.2 : 3-SD robotun D-H tablosu. **8**
Çizelge 4.1 : DC motor tork değeri. **19**
Çizelge 4.2 : Pololu 150:1 DC motor özellikleri [32]. **19**
Çizelge 4.3 : DC motor sürücüsünün özellikleri [33]. **20**
Çizelge 6.1 : 3-SD robotun PID katsayıları. **40**
Çizelge 6.2 : PID kontrolün farklı zamanlardaki % hataları. **45**
Çizelge 6.3 : Empedans ve PID kontrol Kartezyen eksenindeki % hataları. **54**

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : D-H parametrelerinin gösterimi [29]. **6**
Şekil 2.2 : 3-SD robotun koordinat eksenlerinin yerleştirilmesi. **8**
Şekil 2.3 : 3-SD robotun uç işlevci Kartezyen pozisyonları. **10**
Şekil 2.4 : ABC üçgeni ve 2. ve 3. eklem değişken açıları. **10**
Şekil 3.1 : 3-SD robotun uzuvlarının kütle merkezlerinin gösterimi. **15**
Şekil 4.1 : Robotun 3B tasarımı. **18**
Şekil 4.2 : Enkoder [32]. **20**
Şekil 4.3 : Arduino Mega 2560 [34]. **20**
Şekil 4.4 : Kuvvet sensörü [35]. **21**
Şekil 4.5 : HX711 (Yükseltici) [36]. **21**
Şekil 4.6 : 3-SD robot. **21**
Şekil 5.1 : Hesaplanan tork kontrolü blok diyagramı [37]. **23**
Şekil 5.2 : Kartezyen uzayında empedans kontrol blok diyagramı [1]. **24**
Şekil 5.3 : 1-SD sistemin Empedans kontrolü [38]. **24**
Şekil 5.4 : Çevre kuvveti gösterimi [38]. **25**
Şekil 5.5 : Hesaplanan tork tabanlı empedans kontrol sistemi algoritması. **26**
Şekil 5.6 : Matlab/Simulink simülasyonu blok diyagramı. **27**
Şekil 5.7 : (a) px, (b) py, ve (c) pz'de referans yörüngelerin zamana bağlı grafikleri. **29**
Şekil 5.8 : 20 cm'deki temas kuvveti. **30**
Şekil 5.9 : 20 cm'deki (a) x pozisyonu (b) y pozisyonu (c) z pozisyonu. **30**
Şekil 5.10 : 30 cm'deki temas kuvveti. **32**
Şekil 5.11 : 30 cm'deki (a) x pozisyonu (b) y pozisyonu (c) z pozisyonu. **32**
Şekil 5.12 : 40 cm'deki temas kuvveti. **34**
Şekil 5.13 : 40 cm'deki (a) x pozisyonu (b) y pozisyonu (c) z pozisyonu. **34**
Şekil 6.1 : PID ve yerçekimi dengeleme kontrolü blok diyagramı. **36**
Şekil 6.2 : Robotun ilk uzvunun (a) giriş gerilimi ve (b) çıkış açısı cevapları. **37**
Şekil 6.3 : 1. uzvun ölçülen değere göre modellenen transfer fonksiyon cevapları. **37**
Şekil 6.4 : 2. uzvun ölçülen değere göre modellenen transfer fonksiyon cevapları. **38**
Şekil 6.5 : 3. uzvun ölçülen değere göre modellenen transfer fonksiyon cevapları. **39**
Şekil 6.6 : 6 s'de (a) $\theta 1$ (b) $\theta 2$ (c) $\theta 3$ için referans ve gerçek açılar. **41**
Şekil 6.7 : 11 s'de (a) $\theta 1$ (b) $\theta 2$ (c) $\theta 3$ için referans ve gerçek açılar. **42**
Şekil 6.8 : 16 s'de (a) $\theta 1$ (b) $\theta 2$ (c) $\theta 3$ için referans ve gerçek açılar. **44**
Şekil 6.9 : 3-SD robotun başlangıç konumu ve temas bölgesi. **46**
Şekil 6.10 : 3-SD robotun gerçek zamanlı kontrol algoritmasının blok diyagramı. **46**
Şekil 6.11 : ζ değişimine göre çıkış cevabı değişimi [41]. **47**
Şekil 6.12 : Empedans kontrolün $\zeta = 2{,}2$, $\omega n = 4{,}5$ değerlerindeki temas kuvveti. **48**
Şekil 6.13 : Empedans kontrolün $\zeta = 2{,}2$, $\omega n = 4{,}5$ değerlerindeki (a) px, (b) py, (c) pz için referans ve gerçek yörüngeleri. **48**

Şekil 6.14 : Empedans kontrolün $\zeta = 11{,}2$, $\omega n = 4{,}5$ değerlerindeki temas kuvveti. **50**
Şekil 6.15 : Empedans kontrolün $\zeta = 11{,}2$, $\omega n = 4{,}5$ değerlerindeki (a) px, (b) py, (c) pz için referans ve gerçek yörüngeleri. **50**
Şekil 6.16 : PID ve empedans kontrolün temas kuvvetleri. **52**
Şekil 6.17 : PID ve empedans kontrolün (a) px, (b) py, (c) pz için referans ve gerçek yörüngeleri. **53**

ÜÇ SERBESTLİK DERECELİ ROBOTİK KOLUN KARTEZYEN UZAYDA KUVVET KONTROLÜ

ÖZET

Günümüzde robotlar montaj, boyama, kaynak, kaldırma ve yerleştirme, vs. pek çok uygulamada kullanılmaktadır. Hareket kontrolü, robotların çevre ile temassız bir yörüngede ilerlemesinde başarılı bir şekilde, aktif olarak kullanılmaktadır. Ancak robotların çevre ile etkileşim halinde olması durumunda bu kontrol algoritmaları yetersiz kalmaktadır. Bu problemin üstesinden gelebilmek için kuvvet kontrol algoritmaları geliştirilmiştir. Bu tezin amacı, çevre ile temas eden 3-SD robota gerçek zamanlı pozisyon tabanlı empedans kontrol uygulanmasıdır.

Bu amaçla robotun tasarım ve imalatı gerçekleştirilmiştir. Robotun tasarımı Solidworks'te, simülasyonu Matlab / Simulink ortamında Robotic Toolbox kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Robotun imalatında simülasyondaki tork değerleri kullanılarak uygun fırçalı DC motorlar seçilmiştir. CAD çizimiyle oluşturulan robot uzuvları 3 boyutlu yazıcıyla basılmıştır. Kuvvet kontrol çalışmalarının gerçekleştirilmesi için uç işlevciye kuvvet sensörü takılmıştır. Gerçek zamanlı kontrol için Matlab / Simulink ortamında giriş ve çıkış verileri işlenmiştir. Bu verilerin 3-SD robota aktarımı için geliştirme kartları kullanılmıştır.

3-SD robotun kontrolü için gerekli olan kinematik ve dinamik denklemler elde edilmiştir. Elde edilen dinamik model kullanılarak robotun hesaplanan tork tabanlı empedans kontrol simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Ancak hesaplanan tork tabanlı empedans kontrolünde dinamik modele ihtiyaç duyulmasından işlem süresi uzundur. Bu sebeple kontrol algoritması gerçek zamanlı sisteme adapte edilememiştir, bunun yerine gerçek zamanlı sistemde pozisyon tabanlı empedans kontrolü kullanılmıştır. Pozisyon tabanlı empedans kontrolü iç ve dış olmak üzere iki döngüden oluşmaktadır. İç döngüde yer çekimi dengelemeli PID kontrolü, dış döngüde ise empedans kontrol kullanılmıştır. Yer çekimi dengelemeli PID kontrolün katsayılarının hesaplanması için her bir uzuv için Matlab programının System Identification eklentisi kullanılarak yapılmıştır. Bunun için çıkış ve giriş veri seti hazırlanıp farklı sıfır ve kutuplara sahip transfer fonksiyonları elde edilmiştir. Bu transfer fonksiyonlarından uygunluk oranı en yüksek olan seçildikten sonra kontrolör dahil edilip kapalı çevrim transfer fonksiyon elde edilmiştir. Bu transfer fonksiyon kullanılarak kutup atama yöntemiyle PID katsayıları hesaplanıştır. Empedans kontrolü için kütle sönüm yay modeli seçilmiştir. Bu modele ait katsayılar sönüm oranı dikkate alınarak gerçek zamanlı testlerle tayin edilmiştir. Yüzeyle temas eden robot için pozisyon tabanlı empedans kontrolü ile yer çekimi dengelemeli PID kontrolü gerçek zamanlı olarak karşılaştırılmıştır. Elde edilen pozisyon ve kuvvet sonuçları grafik olarak verilip karşılaştırılmıştır.

Anahtar kelimeler: Empedans kontrol, 3-SD robot, gerçek zamanlı kontrol.

IMPEDANCE CONTROL OF 3 DOF ROBOTIC ARM IN CARTESIAN SPACE

SUMMARY

Today, robots are used in many applications such as assembling, printing, welding, pick and place, etc. Motion control has been studied actively for robots to move in a non-contact with the environment successfully. However, if robot interacts with the environment, motion control algorithms are not adequate sufficiently. Force control algorithms have been developed to overcome this problem. The aim of the thesis is applied real-time position-based impedance control to the 3-DOF robotic arm in contact with the environment.

3 DOF robotic arm was designed and manufactured for this purpose. The design of the robot is obtained in Solidworks and its simulation is made in Matlab / Simulink using Robotic Toolbox. In the production of the robot, appropriate brushed DC motors were selected by using the torque values in the simulation. Robot arms and base are created with a 3-D printer. A force sensor was attached to the end effector to perform force control tests. Input and output data were established in Matlab / Simulink for real-time control. Development board was used to transfer this data to the 3-DOF robot.

The kinematics and dynamics equations for the control of the 3-DOF robotic arm were obtained. Using the dynamic model, the computed torque-based impedance control of the robotic arm was simulated in Matlab/Simulink. However, due to the necessity for a dynamic model in computed torque-based impedance control, the processing time is long. So computed torque control algorithm could not be adapted to the real-time, because of the long processing time. Thus position-based impedance control is adapted and implemented in real time. Position-based impedance control consists of two loops which are inner and outer. Gravity compensated PID control is used in the inner loop and impedance control is used in the outer loop. Calculation of coefficients of gravity compensated PID control for each link, System Identification was used in Matlab/Simulink. The output and input data are obtained and transfer functions with different zeros and poles were calculated. After selecting the best fits among these transfer functions, the closed loop transfer function with the controller is calculated. Using this transfer function, PID coefficients are calculated by pole placement method. Mass damping spring model has been chosen for impedance control. The coefficients of this model were determined by real-time tests, considering the damping ratio. Position-based impedance control and gravity compensated PID control were compared in real time for the robotic arm contacting the surface. The obtained position and force results are given graphically and compared.

Keywords: Impedance control, 3-DOF robot, Real-time control.

1. GİRİŞ

Elektronik gelişmeler ardından başlayan robotların tasarımı, üretimi ve kontrolü, Endüstri 4.0 teknolojisinin yardımıyla günümüzde öncelikli araştırma konuları içerisinde yer almaktadır. Robotlar otomasyon sistemleri anlamında büyük gelişmelere öncelik etmiştir ve bu sistemlerde endüstriyel robotların kullanımı artarak devam etmektedir

Robotik sistemlerin her ne kadar iyi bir şekilde çevreye uygun yörünge planları olmasına rağmen onların insan ya da çevresi ile ilgili herhangi bir plana bağlı kalmaksızın etkileşimi mümkün değildir. Yaklaşık son 30 yılda çeşitli sensörler veya kontrol algoritmalarıyla bu durumun aşılması amaçlanmıştır. Bu arayışların biri de kuvvet kontrol sistemleridir.

1.1 Tezin Amacı

Tezin amacı, robotun kontrol algoritmaları yardımıyla çevre ile temasını gerçekleştirmesidir. Bu amaç doğrultusunda robotun simülasyon ve gerçek zamanlı çalışmaları yapılmıştır. Gerçek zamanlı uygulamalar için iç döngüde yer çekimi dengelemeli PID kontrolü dış döngüde empedans kontrol algoritmasından yararlanılmıştır. Empedans kontrol Kartezyen ve yer çekimi dengelemeli PID kontrolü eklem uzayında çalışmaktadır. Kartezyen ve eklem uzayındaki bağlantı kinematik denklemler ile kurulmuştur.

Bu amaç için gerekli olan literatür araştırması 1. bölümde alt başlık olarak ele alınmıştır. Teorik bilgiler, 2., 3. ve 5. bölümlerde açıklanmıştır. Robotta kullanılan parçaların tanıtılması ve robotun imalatı 4. bölümde verilmiştir. Gerçek zamanda elde edilen bulgular 6. bölümde yer almaktadır. Sonuçların tartışılması ve gelecekte yapılacak çalışmalar 7. bölüm olan sonuç kısmındadır.

1.2 Literatür Araştırması

Kuvvet kontrol algoritmaları; temel ve gelişmiş olmak üzere iki grupta toplanmıştır [1]. Temel kuvvet kontrol, algoritmaları pozisyon (veya hız) ile kuvvet arasındaki ilişkiyi inceler. Temel kontrol algoritması olarak sertlik (stiffness) kontrol, empedans kontrol, admitans kontrol, hibrit kontrol örneklendirilebilir. Gelişmiş kuvvet kontrol algoritmaları, adaptif (adaptive), sağlam (robust), öğrenme tabanlı (learning based) veya yapay sinir ağları (neural network) gibi gelişmiş kontrolörler ile temel kuvvet kontrol algoritmaların beraber çalışmasıdır.

Zeng ve Hemami'nin gruplandırmasına yanı sıra Siciliano ve Villani kuvvet kontrol algoritmaları algoritmalarını dolaylı ve doğrudan olmak üzere iki grupta toplamıştır [2]. Dolaylı kuvvet kontrol, temas kuvvetini olduğu gibi kullanarak algoritmaya dahil eder. Doğrudan kuvvet kontrolde temas kuvveti referans bir değerde tutularak algoritmaya dahil edilir.

Kuvvet kontrol algoritmasının başlıca bilinen algoritmaları hibrit kontrol ve empedans kontroldür [3].

Empedans kontrol Hogan tarafından ortaya atılmıştır [4]. Hogan empedans kuvvet kontrolün kaynağı olarak antagonist (karşıt) kasların birlikte çalışmasının gözlemlenmesi sonucu ortaya çıkmıştır. Bu kasların birbirlerine karşı olan dirençleri matematiksel olarak modellenmiştir [5-8].

Calanca ve Fiorini iç döngü (inner loop) olarak empedans kontrolü kullanmıştır. Dış döngü (outer loop) olarak pozisyon kontrolünü adaptif bir kontrolör sağlamıştır. Gerçek zamanlı çalışması tek uzuv elastik eyleyicide gerçekleştirmiştir ve değişen empedans katsayılarına yönelik insan temasında verilen sonuçlara ulaşılmıştır [9]. Farklı empedans kontrol tasarımlarının tanımlarını ve bunların tek uzuv elastik eyleyicideki etkisini karşılaştırmıştır [10].

Li ve arkadaşları yapmış olduğu çalışmada yinelemeli öğrenme empedans kontrolü (İterative learning impedance control) kullanmışlardır. Tek uzuv elastik eyleyicinin insan etkisi altında, empedans katsayılarının yenilenmesiyle oluşturduğu etkiyi farklı iterasyonlarda göstermişlerdir [11].

Lau ve arkadaşları gürbüz kontrol (Robust control) tabanlı empedans kontrol kullanmıştır. Gerçek zamanlı testler için lineer elastik eyleyici kullanılmıştır. Belirlenen empedans katsayıların değişimine verilen yanıtlar gözlemlenmiştir [12].

de Gea ve Kirchner tasarladıkları iki uzuv robotta empedans kontrolü simülasyon ortamında gerçekleştirmişlerdir [13]. İç döngüde hareket kontrolünü hesaplamalı tork kontrolüyle sağlamışlardır.

Baptista ve da Costa 2-SD robotların yapay sinir ağları yöntemiyle kuvvet denkleştirmesini (force compensation) sağlayacak bir empedans kontrolör tasarlamışlardır. Bu yöntemi kullanarak katsayılarını düzenlemiş ve simülasyon ortamında kontrolü gerçekleştirmiştir [14].

Love ve Book 2-SD robotta gerçek zamanlı empedans kontrolü gerçekleştirmiştir. Empedans katsayılarının değişimiyle alakalı test sonuçları paylaşılmıştır [15].

Değişken empedans kontrol (Variable Impedance Control) olarak tanımladığı kontrol algoritmasıyla 2-SD robotta gerçek zamanlı çalışmalar yapmış olan Mills ve Lokhorst, algoritmanın istenen kuvvette çalışmasını ve katsayıların değişimine olan cevapları makalesinde sunmuştur [16].

Kong ve arkadaşları [17] tarafından empedans değerinin sıfırlanmasını sağlayacak kontrolcü tasarlanmıştır. Bu kontrolcü tarafından eksoskeleton bir yapı ile gerçek zamanlı kontrol gerçekleştirilmiştir.

Kayma kipli empedans kontrol (Sliding mode impedance control) otonom sualtı aracına yerleştirilen 3-SD robotta gerçek zamanlı olarak test edilmiştir [18].

Tezinde 3-SD robot tasarlayan van Spaandonk 2-SD robottan farklı olarak uç işlevcinin R matrisi de kullanılmıştır. Bunun sebebi simülasyonda yapmış olduğu görevden kaynaklanmaktadır. Uç işlevcinin cismi deliğe sokabilmesi için sadece konum bilgisi yetersizdir. Konum bilgisinin yanında uç işlevcinin rotasyon bilgisine de ihtiyaç vardır [19]. Tezinde geçen bu simülasyonu tasarlayabilmek için Corke'a ait olan Robotic Toolbox for Matlab [20, 21] eklentisini Matlab/Simulink ortamında kullanmıştır.

Endüstriyel robotlarda empedans kontrol gerçekleştirilmiştir. Dede'nin tez çalışmasında Puma 560 simülasyon olarak çeşitli kuvvet algoritmalarında (sertlik, empedans, hibrit kuvvet kontrol vs.) denenmiştir [22]. Değişen yüzey rijitliğine karşı

değişken empedans kontrol Abb Irb 120 endüstriyel robotta simülasyonu test edilmiştir [23]. Sadeghian ve arkadaşları iki Kuka Lwr robotunun uç işlevcilerinin etkileşimiyle sağlanmıştır. Bu etkileşimin gerçekleşmesi için empedans kontrol kullanılmıştır [24]. Juan ve arkadaşları adaptif değişken empedans kontrolünü Estun Er16 endüstriyel robotunda gerçek zamanlı olarak gerçekleştirmişlerdir [25].

2. ROBOT KİNEMATİĞİ

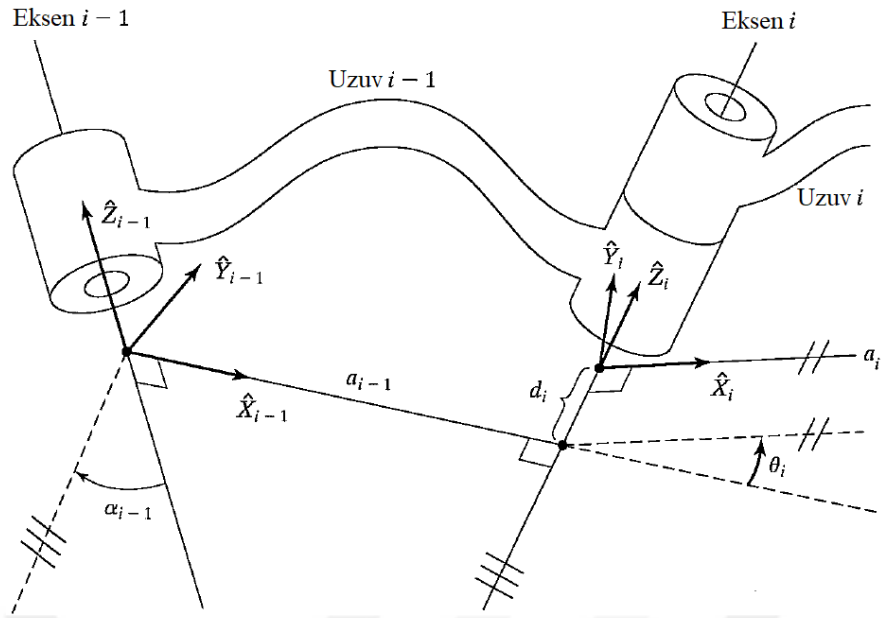
Robotların geometrik olarak yapı ve hareketlerinin incelenmesi robot kinematiğinin konusudur. Art arda sıralanan eklemlere ait uzuvların oluşturduğu robotlar, bu yöntem ile uç işlevcisinin pozisyonunu, açısal ve doğrusal hızlarını eklem değişkenlerini kullanarak elde edilir. Robotun uç işlevine ait bilgiler sayesinde, her eklemin pozisyonunu, açısal ve doğrusal hızlarını elde etmesi de mümkündür.

2.1 Değiştirilmiş Denavit Hartenberg (D-H) Yöntemi

Değiştirilmiş D-H (Denavit-Hartenberg) yöntemi, robotun art arda gelen eklemlerine ait uzuvların oluşturmuş olduğu robotu, geometrik ve kinematik olarak tanımlamada kullanılır [26]. Robot ileri kinematiğinin bulunmasında kullanılan en yaygın yöntem D-H yöntemidir [27].

Yöntem, robot eklemlerinin her birine koordinat eksenlerinin yerleştirilmesiyle başlar. Koordinat eksenleri referans noktasından başlayarak eklem değişkenlerinin türüne göre (döner eklem ise dönme noktasına, kayar eklem ise kayan uzvun uç kısmına) sırasıyla yerleştirilir. En son uç işlevci için koordinat ekseni eklenir. Bu eklenen koordinat eksenleri D-H yönteminin belirttiği kurallara göre belirlenir [28]. D-H parametreleri yardımıyla da gerekli kinematik denklemler elde edilir.

D-H tablosunu oluşturmak için dört eklem değişkenini elde etmek gerekir. Bunlar, z eksenleri arasındaki bağ uzunluğu a_{i-1}, x eksenleri arası bağ açısı α_{i-1}, x eksenleri arasındaki eklem kaçıklığı d_i ve z eksenleri arasında oluşan eklem açısı θ_i'dir (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 : D-H parametrelerinin gösterimi [29].

Koordinat eksen sayısı kadar değişkenlerin elde edildiği bir tablo Çizelge 2.1'deki gibi çıkarılır.

Çizelge 2.1 : D-H tablosu örneği.

Eksen	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i
1	α_0	a_0	d_1	θ_1
2	α_1	a_1	d_2	θ_2
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
n	α_{n-1}	a_{n-1}	d_n	θ_n

Tabloda bulunan değişkenlerin oluşturduğu dönüşüm matrisleri ($R_x(\alpha_{i-1})$, $D_x(a_{i-1})$, $R_z(\theta_i)$ ve $D_z(d_i)$) aşağıdaki gibidir [30]. Denklemlerde $c\theta = \cos\theta$, $s\theta = \sin\theta$ kısaltmaları kullanılmıştır.

$$R_x(\alpha_{i-1}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c\,\alpha_{i-1} & -s\,\alpha_{i-1} & 0 \\ 0 & s\,\alpha_{i-1} & c\,\alpha_{i-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2.1}$$

$$D_x(a_{i-1}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_{i-1} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2.2}$$

$$R_z(\theta_i) = \begin{bmatrix} c\,\theta_i & -s\,\theta_i & 0 & 0 \\ s\,\theta_i & c\,\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2.3}$$

$$D_z(d_i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2.4}$$

Denklem 2.1-2.4 matrislerinin çarpımıyla iki komşu koordinat eksenine ait olan genelleştirilmiş dönüşüm matrisi (${}^{n-1}_{n}T$) elde edilir.

$${}^{n-1}_{n}T = R_x(\alpha_{i-1})\, D_x(a_{i-1})\, R_z(\theta_i)\, D_z(d_i) \tag{2.5}$$

Dönüşüm matrisleri, Denklem 2.6 ve 2.7'de gösterildiği gibi eksenlere ait dönme matrisi (${}^{n-1}_{n}R$) ve yer değiştirme vektörü (${}^{n-1}_{n}P$) bilgilerine sahiptir.

$${}^{n-1}_{n}R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}, \qquad {}^{n-1}_{n}P = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} \tag{2.6}$$

$${}^{n-1}_{n}T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2.7}$$

Denklem 2.5'e ait genelleştirilmiş dönüşüm matrisi aşağıdaki gibi elde edilir.

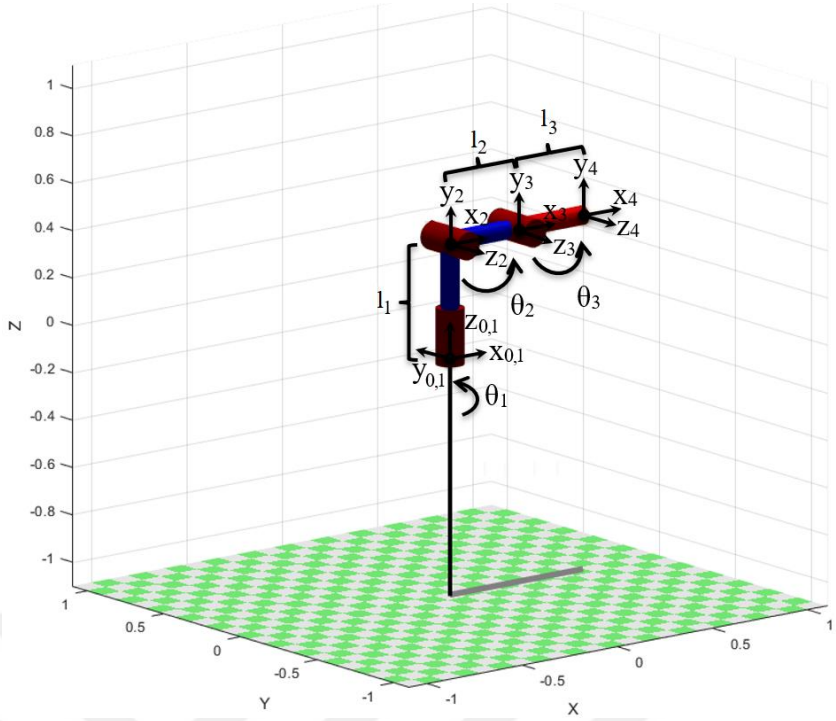
$${}^{n-1}_{n}T = \begin{bmatrix} c\,\theta_i & -s\,\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\,\theta_i\, c\,\alpha_{i-1} & c\,\theta_i\, c\,\alpha_{i-1} & -s\,\alpha_{i-1} & -s\,\alpha_{i-1}\, d_i \\ s\,\theta_i\, s\,\alpha_{i-1} & c\,\theta_i\, s\,\alpha_{i-1} & c\,\alpha_{i-1} & c\,\alpha_{i-1}\, d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2.8}$$

2.2 Robot İleri Kinematiği

İleri kinematik, eklem değişkenlerini kullanarak robotun uç işlevcisinin Kartezyen uzayındaki pozisyon ve rotasyon bilgisini elde etmemizi sağlar. D-H tablosundaki parametreleri kullanarak her eksen için elde edilen dönüşüm matrislerinin çarpımıyla elde edilir.

$${}^{0}_{n}T = {}^{0}_{1}T\,{}^{1}_{2}T\,{}^{2}_{3}T \cdots {}^{n-1}_{n}T \tag{2.9}$$

Tezde kullanılan 3-SD robotun D-H yöntemine göre koordinat eksenleri Şekil 2.2'deki gibi yerleştirilmiştir.



Şekil 2.2 : 3-SD robotun koordinat eksenlerinin yerleştirilmesi.

Robotun koordinat eksenleri kullanılarak D-H tablosu Çizelge 2.2'deki gibi çıkarılır.

Çizelge 2.2 : 3-SD robotun D-H tablosu.

Eksen	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i
1	0	0	l_1	θ_1
2	$\pi/2$	0	0	θ_2
3	0	l_2	0	θ_3
4	0	l_3	0	0

Her bir komşu eksene ait dönüşüm matrisleri, Çizelge 2.2'de verilen değerlerin Denklem 2.8'de kullanılmasıyla aşağıda elde edilmişlerdir.

$$ {}^{0}_{1}T = \begin{bmatrix} c\theta_1 & -s\theta_1 & 0 & 0 \\ s\theta_1 & c\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2.10} $$

$$ {}^{1}_{2}T = \begin{bmatrix} c\theta_2 & -s\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ s\theta_2 & c\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2.11} $$

$$ {}^{2}_{3}T = \begin{bmatrix} c\theta_3 & -s\theta_3 & 0 & l_2 \\ s\theta_3 & c\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2.12} $$

$$ {}^{3}_{4}T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2.13} $$

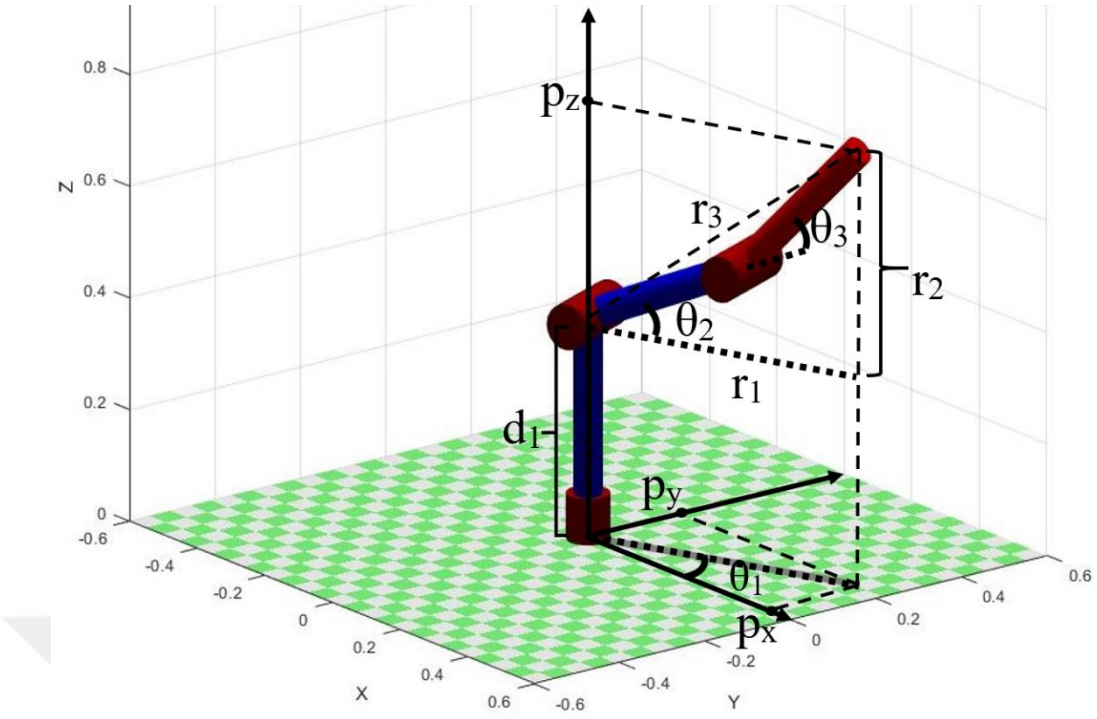
Elde edilen dönüşüm matrisleri sırasıyla çarpılarak robotun ileri kinematik denklemleri elde edilir. ($c\theta_{23} = cos(\theta_2 + \theta_3)$, $c\theta_{23} = sin(\theta_2 + \theta_3)$ kısaltmaları kullanılmıştır).

$$ {}^{0}_{4}T = \begin{bmatrix} c\theta_1 c\theta_{23} & -c\theta_1 s\theta_{23} & s\theta_1 & c\theta_1(l_2 c\theta_2 + l_3 c\theta_{23}) \\ s\theta_1 c\theta_{23} & -s\theta_1 s\theta_{23} & -c\theta_1 & s\theta_1(l_2 c\theta_2 + l_3 c\theta_{23}) \\ s\theta_{23} & c\theta_{23} & 0 & l_1 + l_2 s\theta_2 + l_3 s\theta_{23} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2.14} $$

2.3 Ters Kinematik

Ters kinematik, uç işlevcinin Kartezyen uzayındaki pozisyon (gerekiyorsa rotasyon) bilgilerini kullanarak eklem uzayındaki değişkenleri elde etmemizi sağlar. Ters kinematik denklemler analitik, sayısal, geometrik çözüm vs. kullanılarak bulunabilir [30].

Bu çalışmada robotun ters kinematik denklemleri geometrik çözüm yöntemiyle hesaplanmıştır. 3-SD robotun uç işlevcisinin Kartezyen uzayındaki pozisyonları ve eklem değişkenleri Şekil 2.3'te gösterilmiştir.

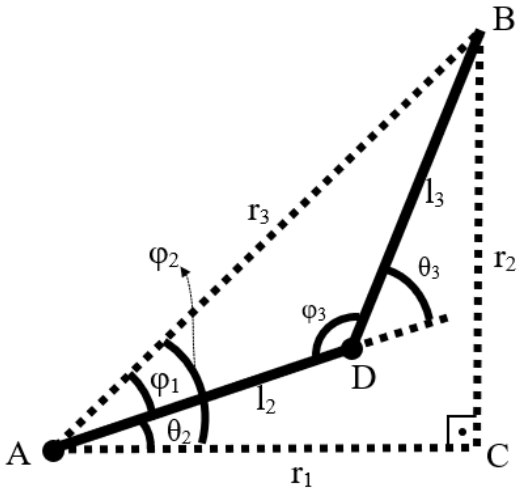


Şekil 2.3 : 3-SD robotun uç işlevci Kartezyen pozisyonları.

Robotun z eksenindeki etrafındaki dönüşü θ_1'deki değişimle meydana gelir. p_x ve p_y uzunlukları kullanılarak θ_1 aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\theta_1 = tan^{-1}\left(\frac{p_y}{p_x}\right) \tag{2.15}$$

θ_2 ve θ_3 eklem değişkenlerinin hesaplanması için Şekil 2.4'ten destek alınmıştır. φ_1, φ_2 ve φ_3 eklem değişkenlerini bulmak için oluşturulan yardımcı açılardır. Burada $\varphi_2 - \varphi_1 = \theta_2$ ve $180 - \varphi_3 = \theta_3$ eşitlikleri kullanılır.



Şekil 2.4 : ABC üçgeni ve 2. ve 3. eklem değişken açıları.

r_1, r_2 ve r_3 ABC dik üçgenini oluşturmaktadır. Şekil 2.4'te gösterilen ABC dik üçgeninin kenarları (r_1, r_2 ve r_3) aşağıdaki gibi bulunur.

$$r_1 = \sqrt{{p_x}^2 + {p_y}^2} \tag{2.16}$$

$$r_2 = p_z - d_1 \tag{2.17}$$

$$r_3 = \sqrt{{r_1}^2 + {r_2}^2} \tag{2.18}$$

φ_2 açısı tanjant formülü kullanılarak bulunur.

$$\varphi_2 = tan^{-1}\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \tag{2.19}$$

ADC üçgeninde Kosinüs teoremi kullanılarak φ_3 ve φ_1 elde edilir.

$$\varphi_3 = cos^{-1}\left(\frac{-{r_3}^2 + {l_2}^2 + {l_3}^2}{2l_2l_3}\right) \tag{2.20}$$

$$\varphi_1 = cos^{-1}\left(\frac{-{l_3}^2 + {l_2}^2 + {r_3}^2}{2l_2r_3}\right) \tag{2.21}$$

φ_1, φ_2 ve φ_3 kullanılarak θ_2 ve θ_3 değişken açıları bulunur.

$$\theta_2 = \varphi_2 - \varphi_1 \tag{2.22}$$

$$\theta_3 = \varphi_3 - 180 \tag{2.23}$$

2.4 Jakobiyen Matrisi

Jakobiyen matrisi eklem değişken hızları ile Kartezyen uzaydaki doğrusal ve açısal hızlar arasındaki ilişkiyi gösteren matristir.

$$v = J(q)\dot{q} \tag{2.24}$$

$v = [\dot{P}^T \quad \Omega^T]^T$ doğrusal ve açısal hız bilgisinin bulunduğu 6×1'lik vektördür. $\dot{P} = \left[\dot{p}_x\ \dot{p}_y\ \dot{p}_z\right]^T$ Kartezyen uzaydaki doğrusal, $\Omega = \left[\omega_x\ \omega_y\ \omega_z\right]^T$ Kartezyen uzaydaki

açısal hızları temsil eden 3×1'lik vektörlerdir. Robotun eklem sayısına n dersek, $J(q)$ olarak temsil edilen Jakobiyen matrisi $6 \times n$ boyutunda olur. $\dot{q}$ eklem değişken hızını temsil eder ve $n \times 1$ boyutunda bir vektördür.

Jakobiyen matrisi doğrusal ve açısal hız matrislerinden oluşur.

$$J(q) = \begin{bmatrix} J_p \\ J_\omega \end{bmatrix} \tag{2.25}$$

J_ω, $3 \times n$ açısal hız matrisidir, J_p, $3 \times n$ doğrusal hız matrisini temsil eder. n eklemli robotun n. eklemine ait Jakobiyen matrisi aşağıdaki denklemde verilmiştir. ${}^0Z_n$, n. ekleme ait açısal hızı ifade eder. n. eklemin kayar olması halinde, ${}^nZ_n = [0 \quad 0 \quad 1]^T$ ve ${}^0Z_n = {}^0_nR\,{}^nZ_n$ denklemlerinden yararlanılır [30, 31]. P uç işlevcinin, ${}^0P_n$, n. ekleme ait Kartezyen pozisyonudur.

$$\begin{bmatrix} J_p \\ J_\omega \end{bmatrix}_n = \begin{cases} kayar\ eklem\ ise, & \begin{bmatrix} {}^0Z_n \\ 0 \end{bmatrix} \\ döner\ eklem\ ise, & \begin{bmatrix} {}^0Z_n \times (P - {}^0P_n) \\ {}^0Z_n \end{bmatrix} \end{cases} \tag{2.26}$$

Robotun Jakobiyen matrisini elde etmek için gerekli olan uç işlevcisi ve eklemlerine ait Kartezyen uzayındaki pozisyon bilgisi dönüşüm matrislerinden elde edilmiştir.

$${}^0P_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ l_1 \end{bmatrix}, {}^0P_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ l_1 \end{bmatrix}, {}^0P_3 = \begin{bmatrix} l_2c\theta_2 \\ l_2s\theta_2 \\ l_1 + l_2c\theta_2 \end{bmatrix}, P = \begin{bmatrix} c\theta_1(l_3c\theta_{23} + l_2c\theta_2) \\ s\theta_1(l_3c\theta_{23} + l_2c\theta_2) \\ l_1 + l_3s\theta_{23} + l_2s\theta_2 \end{bmatrix} \tag{2.27}$$

Eklemlere ait Z vektörü aşağıdaki gibi bulunur.

$${}^1Z_1 = {}^2Z_2 = {}^3Z_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \tag{2.28}$$

$${}^0Z_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, {}^0Z_1 = \begin{bmatrix} s\,\theta_1 \\ -c\,\theta_1 \\ 1 \end{bmatrix}, {}^0Z_3 = \begin{bmatrix} s\,\theta_1 \\ -\mathrm{c}\,\theta_1 \\ 1 \end{bmatrix} \tag{2.29}$$

Üç eklem değişkeni de kayar olduğu için Jakobiyen matris Denklem 2.26'daki bilgilere göre aşağıdaki gibi oluşturulur.

$$J(q) = \begin{bmatrix} {}^0Z_1 \times (P - {}^0P_1) & {}^0Z_2 \times (P - {}^0P_2) & {}^0Z_3 \times (P - {}^0P_3) \\ {}^0Z_1 & {}^0Z_2 & {}^0Z_3 \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

Denklem 2.30'da verilen değişkenler, Denklem 2.27, 2.28, 2.29'da bulunmuştur. İşlemler tamamlandığında robot için gereken Jakobiyen matrisi aşağıdaki gibi çıkarılır.

$$J(q) = \begin{bmatrix} -s\,\theta_1\,(l_3\,c\,\theta_{23} + l_2\,c\,\theta_2) & -c\,\theta_1\,(l_3\,s\,\theta_{23} + l_2\,s\,\theta_2) & -l_3\,s\,\theta_{23}\,s\,\theta_1 \\ -s\,\theta_1\,(l_3\,c\,\theta_{23} + l_2\,c\,\theta_2) & c\,\theta_1\,(l_3\,c\,\theta_{23} + l_2\,c\,\theta_2) & -l_3\,s\,\theta_{23}\,s\,\theta_1 \\ 0 & l_3\,s\,\theta_{23} + l_2\,s\,\theta_2 & l_3\,s\,\theta_{23} \\ 0 & s\,\theta_1 & s\,\theta_1 \\ 0 & -c\,\theta_1 & -c\,\theta_1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

2.5 Yörünge Planlaması

Robotun uç işlevcisinin ilk konumundan son konumuna hareketinin tasarlanmasıdır. Çeşitli yöntemler kullanılarak yalnız konum değil hız ve ivme değerleri de istendiği gibi ayarlanabilir.

2.5.1 Eklem uzayında yörünge planlanması

Başlangıç ve bitiş değerleri belirlenen eklem değişkenlerinin hepsi için tasarlanarak eklem uzayında yörünge planlaması gerçekleştirilir. Uç işlevcinin izlediği noktaları bulmak için eklem değişkenlerinin o anki değerleri, ileri kinematik denklemleriyle kullanılarak elde edilir.

2.5.2 Kartezyen uzayında yörünge planlanması

Uç işlevcinin izleyeceği başlangıç ve bitiş noktalarını, seçilen yönteme göre oluşturan yörüngedir planlamasıdır. Kartezyen uzayından eklem uzayına geçiş ters kinematik denklemleriyle olur ve izlenen noktalarda gereken açılar veya uzunluklar ters kinematik denklemler kullanılarak bulunur.

3. ROBOT DİNAMİĞİ

Robotun kuvvetler altından hareketine neden olan etkenlerin incelendiği bölümdür. Dinamik modelleme olarak tezde ele alınacak yöntem Euler-Lagrange yöntemidir. Euler-Lagrange yöntemi, enerji değişimleri üzerinden hesaplamalar yapar.

Lagrange fonksiyonu aşağıdaki gibidir.

$$\mathcal{L} = \mathcal{T} - \mathcal{U} \tag{3.1}$$

Burada $\mathcal{T}$ kinetik enerjiyi, $\mathcal{U}$ potansiyel enerjiyi ifade eder. Lagrange fonksiyonu ($\mathcal{L}$) kullanarak Lagrange denklemleri aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q} = \xi \tag{3.2}$$

ξ genelleştirilmiş kuvveti, q hareket değişkenlerini ifade eder.

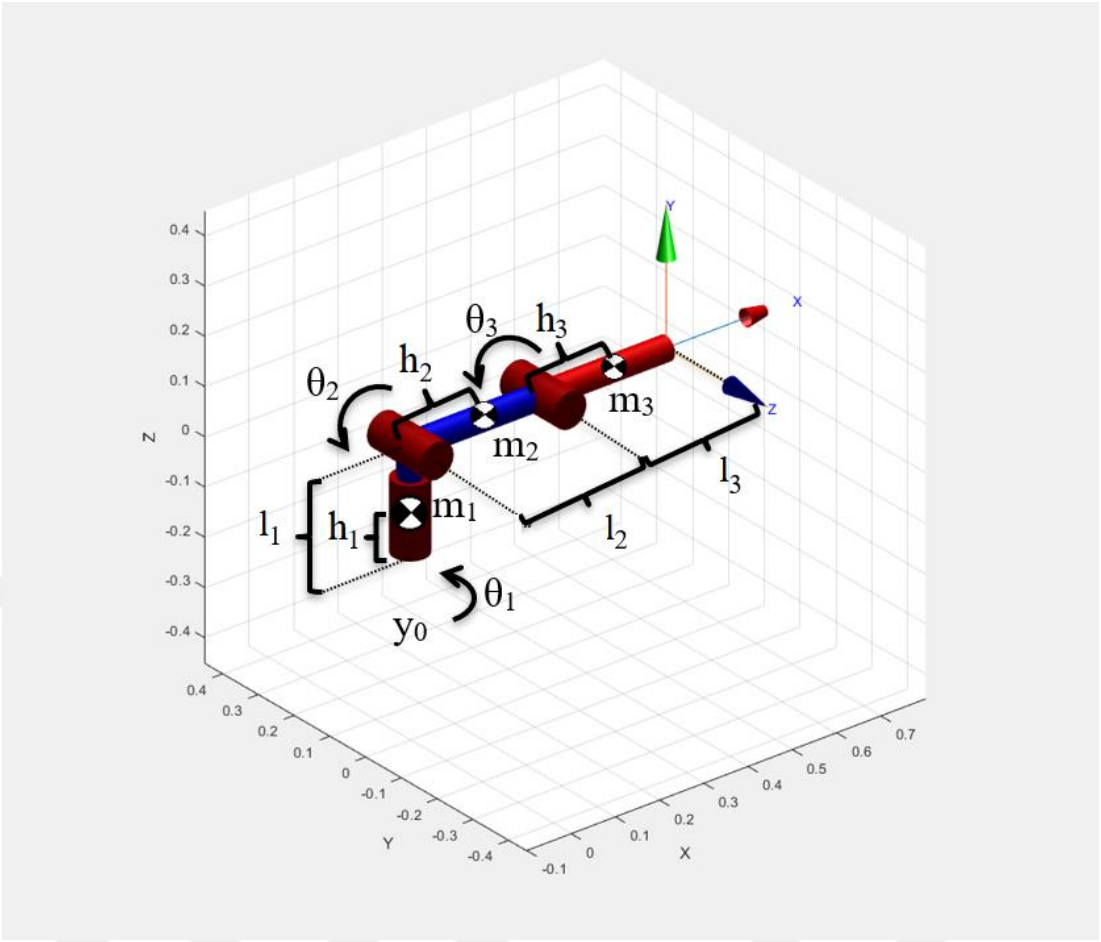
Robotun kinetik ve potansiyel enerjileri göz önünde bulundurulup, Lagrange denklemlerinde yerine koyulduğunda, robot dinamik denklemleri elde edilir.

$$\tau = M(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q}) + G(q) \tag{3.3}$$

τ robota etki eden momentleri ifade eder. Robotun n eklem sayısı olduğu varsayılırsa, $M(q)$ n × n simetrik pozitif tanımlı kütle matrisi olarak tanımlanır. $C(q,\dot{q})$ n × 1 robota etki eden Coriolis ve merkezkaç momentleri temsil eden vektördür. $G(q)$ n × 1 yer çekimi ivmesinin robota etkisini ifade etmek için kullanılır. Denklem 3.3 robot ters dinamik modeli olarak adlandırılmaktadır. Robotun ileri dinamik modeli ise aşağıda verilmiştir.

$$\ddot{q} = M(q)^{-1}(\tau - C(q,\dot{q}) - G(q)) \tag{3.4}$$

3-SD robotun dinamik denklemleri dinamik denklemler Matlab yardımıyla aşağıdaki gibi çıkarılmıştır.



Şekil 3.1 : 3-SD robotun uzuvlarının kütle merkezlerinin gösterimi.

3-SD robotun kütle merkezleri ve kütle merkezine olan uzaklıkları Şekil 3.1'deki gibidir. Uzuvların kütleleri sırasıyla m_1, m_2, m_3 ; kütle merkezine olan uzaklıkları h_1, h_2, h_3 olarak temsil edilmektedir.

Atalet momentleri aşağıdaki şekilde kabul edilirse;

$$I_1 = \begin{bmatrix} I_{xx_1} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy_1} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz_1} \end{bmatrix} \tag{3.5}$$

$$I_2 = \begin{bmatrix} I_{xx_2} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy_2} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz_2} \end{bmatrix} \tag{3.6}$$

$$I_3 = \begin{bmatrix} I_{xx_3} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy_3} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz_3} \end{bmatrix} \tag{3.7}$$

Atalet matrisi aşağıdaki gibi bulunur.

$$M(\theta) = \begin{bmatrix} M_{11} & 0 & 0 \\ 0 & M_{22} & M_{23} \\ 0 & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix} \tag{3.8}$$

$$\begin{aligned} M_{11} = {} & I_{zz_1} + I_{zz_2} + I_{zz_3} + 0.5{l_2}^2 m_3 + 0.5{h_2}^2 m_2 + 0.5{h_3}^2 m_3 \\ & + 0.5{h_3}^2 m_3 c2\theta_{23} + 0.5{l_2}^2 m_3 c2\theta_2 + 0.5{h_2}^2 m_2 c2\theta_2 \\ & + l_2 h_3 m_3 c(2\theta_2 + \theta_3) + l_2 h_3 m_3 c\theta_3 \end{aligned} \tag{3.9}$$

$$\begin{aligned} M_{22} = {} & 0.5I_{xx_2} + 0.5I_{xx_3} + 0.5I_{yy_2} + 0.5I_{yy_3} + {l_2}^2 m_3 + {h_2}^2 m_2 \\ & + {h_3}^2 m_3 - 0.5I_{xx_2} c2\theta_1 - 0.5I_{xx_3} c2\theta_1 + 0.5I_{yy_2} c2\theta_1 \\ & + 0.5I_{yy_3} c2\theta_1 + 2l_2 h_3 m_3 c\theta_3 \end{aligned} \tag{3.10}$$

$$\begin{aligned} M_{23} = {} & 0.5I_{xx_3} + 0.5I_{yy_3} + {h_3}^2 m_3 - 0.5I_{xx_3} c2\theta_1 + 0.5I_{yy_3} c2\theta_1 \\ & + l_2 h_3 m_3 c\theta_3 \end{aligned} \tag{3.11}$$

$$\begin{aligned} M_{32} = {} & 0.5I_{xx_3} + 0.5I_{yy_3} + {h_3}^2 m_3 - 0.5I_{xx_3} c2\theta_2 + 0.5I_{yy_3} c2\theta_2 \\ & + l_2 h_3 m_3 c\theta_3 \end{aligned} \tag{3.12}$$

$$M_{33} = 0.5I_{xx_3} + 0.5I_{yy_3} + {h_3}^2 m_3 - 0.5I_{xx_3} c2\theta_2 + 0.5I_{yy_3} c2\theta_2 \tag{3.13}$$

Merkezkaç ve Coriolis matrislerinin denklemleri aşağıdaki gibidir.

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} \\ C_{21} \\ C_{31} \end{bmatrix} \tag{3.14}$$

$$\begin{aligned} C_{11} = {} & -0.5I_{xx_2}{\dot{\theta}_2}^2 s2\theta_1 - 0.5I_{xx_3}{\dot{\theta}_2}^2 s2\theta_1 - 0.5I_{xx_3}{\dot{\theta}_3}^2 s2\theta_1 \\ & + 0.5I_{yy_2}{\dot{\theta}_2}^2 s2\theta_1 + 0.5I_{yy_3}{\dot{\theta}_2}^2 s2\theta_1 \\ & + 0.5I_{yy_3}{\dot{\theta}_3}^2 s2\theta_1 - I_{xx_3}\dot{\theta}_2\dot{\theta}_3 s2\theta_1 + I_{yy_3}\dot{\theta}_2\dot{\theta}_3 s2\theta_1 \\ & - {l_2}^2 m_3\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 s2\theta_2 - {h_2}^2 m_2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 s2\theta_2 \\ & - 0.5{h_3}^2 m_3\dot{\theta}_1(2\dot{\theta}_2 + 2\dot{\theta}_3)\dot{\theta}_2 s2\theta_{23} \\ & - l_2 h_3 m_3\dot{\theta}_1(2\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3)s(2\theta_2 + \theta_3) - l_2 h_3 m_3\dot{\theta}_1\dot{\theta}_3\, s\theta_3 \end{aligned} \tag{3.15}$$

$$C_{21} = I_{xx_2}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 s2\theta_1 + I_{xx_3}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 s2\theta_1 + I_{xx_3}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_3 s2\theta_1 - I_{yy_2}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 s2\theta_1$$
$$- I_{yy_3}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 s2\theta_1 - I_{yy_3}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_3 s2\theta_1$$
$$+ 0.5{h_3}^2 m_3 {\dot{\theta}_1}^2 s2\theta_{23} + 0.5{l_2}^2 m_3 {\dot{\theta}_1}^2 s2\theta_2 \quad (3.16)$$
$$+ {h_2}^2 m_2 {\dot{\theta}_1}^2 s2\theta_2 - l_2 h_3 m_3 {\dot{\theta}_3}^2 s\theta_3 + l_2 h_3 m_3 {\dot{\theta}_1}^2 s(2\theta_2$$
$$+ \theta_3) - 2l_2 h_3 m_3 \dot{\theta}_2\dot{\theta}_3 s\theta_3$$

$$C_{31} = I_{xx_3}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 s2\theta_1 + I_{xx_3}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_3 s2\theta_1 - I_{yy_3}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 s2\theta_1 - I_{yy_3}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_3 s2\theta_1$$
$$+ 0.5{h_3}^2 m_3 {\dot{\theta}_1}^2 s2\theta_{23} + 0.5 l_2 h_3 m_3 {\dot{\theta}_1}^2 s\theta_3 \quad (3.17)$$
$$+ 0.5 l_2 h_3 m_3 {\dot{\theta}_2}^2 s\theta_3 + 0.5 l_2 h_3 m_3 {\dot{\theta}_1}^2 s(2\theta_2 + \theta_3)$$

Yer çekimi -z eksenine göre kabul edilirse, yer çekiminden oluşacak tork matrisi aşağıdaki gibi bulunur.

$$G = \begin{bmatrix} G_{11} \\ G_{21} \\ G_{31} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ h_3 m_3 g c\theta_{23} + l_2 m_3 g c\theta_2 + h_2 m_2 g c\theta_2 \\ h_3 m_3 g c\theta_{23} \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

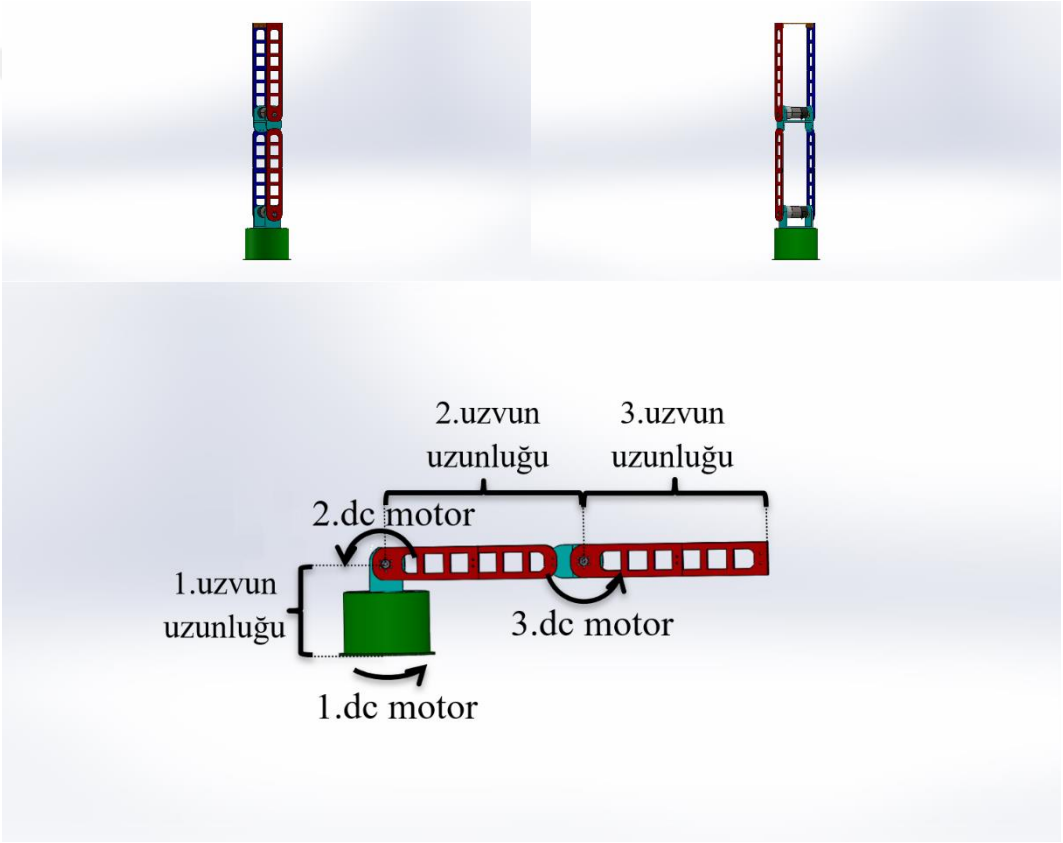
Eklemlere bağlı tork değerleri matrislerin toplamından oluşur.

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & 0 & 0 \\ 0 & M_{22} & M_{23} \\ 0 & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{11} \\ C_{21} \\ C_{31} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_{11} \\ G_{21} \\ G_{31} \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

4. ROBOT TASARIM VE İMALATI

4.1 Robot Tasarımı

Yapılan simülasyonlar yardımıyla istenen boyutlarda robotun gövdesi ve kolları SolidWorks programında tasarlanmıştır. Şekil 4.1'de robotun 3 boyutlu tasarımı gösterilmektedir.



Şekil 4.1 : Robotun 3B tasarımı.

Robot taban ve 2 uzuvdan oluşmaktadır. Taban bölümü zemine sabitleneceği için ağırlığı önemsizdir, uzunluğu 14 cm'dir. 1. uzvun ağırlığı yaklaşık 335 g ve uzunluğu 30 cm'dir. 2. uzvun ağırlığı yaklaşık 100 g ve uzunluğu 28 cm'dir.

4.2 Robot İmalatı

Gerekli malzemelerin seçilmesi aşağıdaki başlıklarda açıklanmıştır.

4.2.1 DC motorlar

Elde edilen dinamik denklemler sayesinde robotun simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Robotun hareketinin gerçekleştirebilmesi için gereken tork değerleri Çizelge 4.1'deki gibi bulunmuştur.

Çizelge 4.1 : DC motor tork değeri.

	Motor ve uzuv ağırlığı (g)	**Maksimum hız (rad/s)**	**Maksimum hız (RPM)**	**Maksimum tork (N.m)**	**Maksimum tork (kg.cm)**
	Motorların her biri 90°'yi 2 s'de alırsa;				
Motor 1	500	0,589	5,624	0,06	0,585
Motor 2	525	0,589	5,624	3,41	34,772
Motor 3	525	0,589	5,624	0,88	8,973

Bu tork değerlerini sağlayan Pololu 150:1 DC motorlar alınmıştır. DC motorların özellikleri Çizelge 4.2'deki gibidir.

Çizelge 4.2 : Pololu 150:1 DC motor özellikleri [32].

Özellik	**Değer**
Motor Tipi	12 Volt DC motor
Ağırlık	210 g
Boyutlar	37Dx30,7 mm
Yüksüz hız	67 RPM
Yüksüz akım	0,2 A
Tutma akımı	5,5 A
Tutma torku	4,9 kg.cm

4.2.2 DC motor sürücüleri

Seçilen DC motorların çalışma gerilimi 12 V'tur. Ayrıca seçilecek olan motor sürücülerinin seçilmiş olan DC motorun tutma torkunu karşılanması için gereken akım 5,5 A'dir. Bu özellikler temelinde VNH5019 DC motor sürücü devresi seçilmiştir. Özellikleri Çizelge 4.3'teki gibidir.

Çizelge 4.3 : DC motor sürücüsünün özellikleri [33].

Özellik	Değer
Çalışma gerilim aralığı	5,5 V-24 V
Çıkış akımı	Sürekli 12 A, Anlık 30 A
Boyutları	6,5x5,13x0,96 cm
Sürülen motor sayısı	2

4.2.3 Enkoder

Seçilen DC motorlara ait enkoderler kullanılmıştır. 64 CPR değerindedir. Motorun dişlilerle birlikte çözünürlüğü 0,0375°'dir. Hall effect sensörlü manyetik enkoderler Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



Şekil 4.2 : Enkoder [32].

4.2.4 Geliştirme kartı

Arduino Mega 2560 seçilmiştir. PWM pinleri motorun istenen 0-12 V'ta çalışmasını sağlamıştır. Dijital pinler motorun yönünü belirlemede kullanılmıştır. Dış kesmeler kullanılarak motorların pozisyon bilgileri elde edilmiştir (Şekil 4.3).



Şekil 4.3 : Arduino Mega 2560 [34].

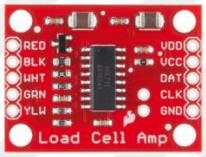
4.2.5 Kuvvet sensörü

Çalışma için 0-200 kg arasındaki ağırlıkları algılayacak bir sensör temin edilmiştir (Şekil 4.4).



Şekil 4.4 : Kuvvet sensörü [35].

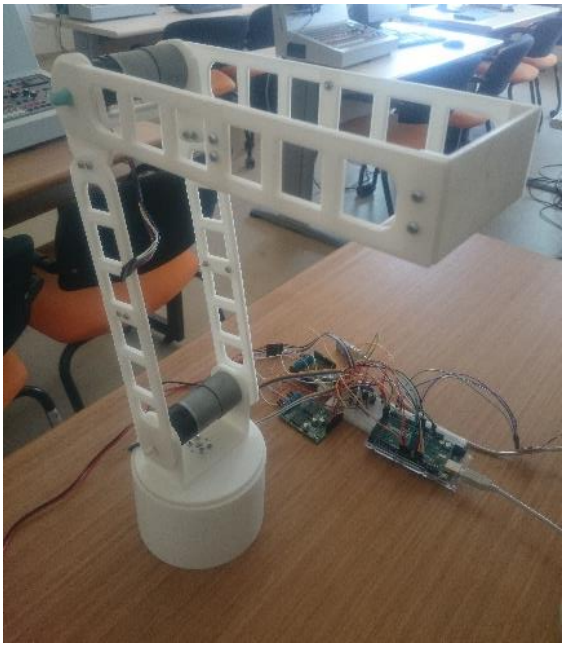
Ayrıca sensörden alınan verilerin kullanılabilmesi için HX711 (Yükseltici) modülü de gerekmektedir (Şekil 4.5). Bu modül 24 bit ADC'dir.



Şekil 4.5 : HX711 (Yükseltici) [36].

4.2.6 Robotun imalatı

SolidWorks'te tasarlanan CAD çiziminin 3 boyutlu yazıcı ile basımı gerçekleştirilmiştir. Malzeme seçimi tamamlandıktan sonra oluşan robot Şekil 4.6'da gösterilmektedir.



Şekil 4.6 : 3-SD robot.

5. ROBOT KONTROLÜ

Bu bölümde, hesaplanan tork kontrolü ve empedans kontrolü açıklanmıştır. İç döngüde hesaplanan tork kontrolü, dış döngüde empedans kontrol olacak şekilde tasarlanan sistem açıklanarak Matlab/Simulink ortamında bu sistemin yüzey temasının sağlandığı simülasyon gerçekleştirilmiştir.

5.1 Hesaplanan tork kontrolü

Hesaplanan tork kontrolü, robotun ters dinamik denklemleri elde edilerek, robottan gelen hareket değişkenlerinin bilgisine göre gereken tork miktarının girişe dahil edilmesiyle gerçekleşir.

$$\tau = M(q)u + C(q,\dot{q}) + G(q) \tag{5.1}$$

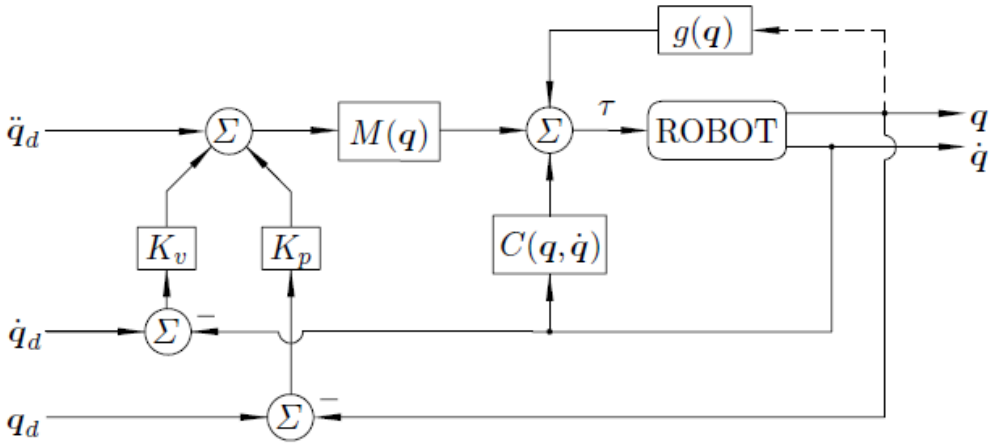
Denklem 5.2'de verilen u sistemin kontrol girişidir. $C(q,\dot{q})$ ve $G(q)$ vektörleri robottan alınan hareket değişkenleri ile oluşturularak geri beslemeye girer.

$$u = \ddot{q}_d + K_V(\dot{q}_d - \dot{q}_r) + K_P(q_d - q_r) \tag{5.2}$$

Kontrol algoritmasının içinde bulunan K_P konum hata katsayısı, K_V hız hata katsayısıdır. Kontrol girişi yerine yazıldığında aşağıdaki ifade elde edilmektedir.

$$\tau = M(q)\big(\ddot{q}_d + K_V(\dot{q}_d - \dot{q}) + K_P(q_d - q)\big) + C(q,\dot{q})\dot{q} + G(q) \tag{5.3}$$

Böylece robotun uzuvlarının eyleyiciler üzerindeki tork miktarları hesaplanarak sisteme dahil edilmiş olur. Hesaplanan tork kontrolü yöntemine ait blok diyagramı Şekil 5.1'de verilmiştir.



Şekil 5.1 : Hesaplanan tork kontrolü blok diyagramı [37].

5.2 Kuvvet Kontrolü

Kuvvet kontrol, hareket kontrolünün yanı sıra çevre ile etkilemişimin sağlanabilmesi için kuvvetin de kontrol algoritmalarına dahil edilmesiyle oluşturulmuştur. Tezde kuvvet kontrol gruplandırılmasında Siciliano ve Villiani'nin kitabında bahsedilen gruplandırma biçimi alınmıştır. Bu gruplandırma biçiminde kuvvet kontrol doğrudan ve dolaylı kuvvet kontrol olarak ikiye ayrılmaktadır. Dolaylı kuvvet kontrol, temas kuvvetini kullanılan algoritmaya göre hareket değişkenine çevirerek işlemlere dahil eder. Dolaylı kuvvet kontrolüne; sertlik (stiffness) kontrol, empedans kontrol, admitans kontrol şeklinde örneklendirilebilir. Doğrudan kuvvet kontrolde kullanılan algoritmaya göre temas kuvveti istenen kuvvette tutulur. Bunu sağlamak için çevre kuvveti geri beslemesi ile kontrol sağlanır. Doğrudan kuvvet kontrol algoritmalarına hibrit kontrol örnek olarak verilebilir.

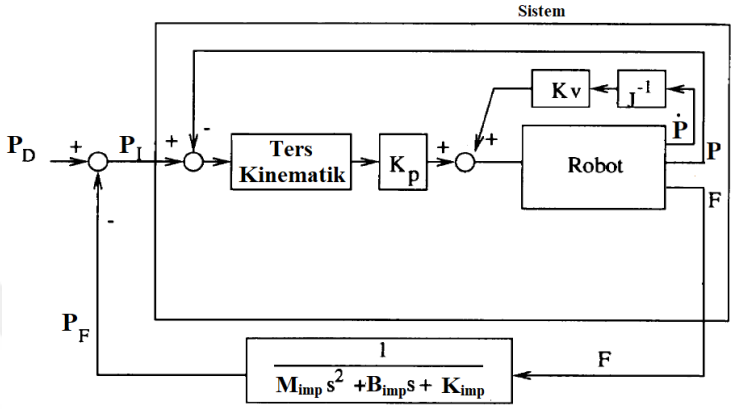
5.3 Dolaylı Kuvvet Kontrol Yöntemleri

Robotun çevre ile temas kuvvetinin etkisi algoritmadaki katsayılarla belirlenen kuvvet kontrol algoritmalarıdır. Dolaylı kuvvet kontrol yöntemleri empedans kontrolü başlığında incelenmiştir.

5.4 Empedans Kontrol

Empedans kontrol, robotun çevre ile etkileşimi halinde hareket değişkenleri ile temas kuvveti arasındaki ilişkiyi sağlayan dolaylı kuvvet kontrol algoritmasıdır [8]. Empedans kontrole ait blok diyagramı Şekil 5.2'de verilmiştir.

Robotun kontrolünde iç ve dış olmak üzere iki kontrol algoritması bulunmaktadır. Dış kontrol döngüsü Kartezyen uzayda empedans kontrolünü içermektedir. Empedans kontrolü sayesinde Empedans kontrol ile elde edilen Kartezyen uzayındaki pozisyon değişimleri kinematik denklemler kullanılarak eklem uzayında geçilir. İç döngü kontrol eklem uzayında gerçekleşmiş olup PD, PID vb. farklı kontrol algoritmaları kullanılabilir.



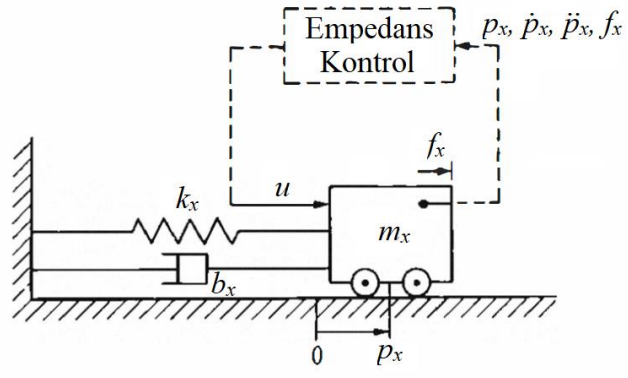
Şekil 5.2 : Kartezyen uzayında empedans kontrol blok diyagramı [1].

Empedans aslında elektrik kökenli bir terim olsa da ilgili katsayılar temas kuvveti ve hareket değişkenlerine göre düzenlenip mekanik olarak kullanılması sağlanmıştır [4]. $z(t)$ empedansı, $f(t)$ temas kuvveti, $\dot{p}(t)$ hareket değişkenini (Kartezyen hız) temsil etmektedir.

$$z(t) = f(t)/\dot{p}(t) \tag{5.4}$$

Hız, yer değiştirme olarak tekrar düzenlenir ve s domenine geçilirse aşağıdaki denklem elde edilir.

$$sZ(s) = F(s)/P(s) \tag{5.5}$$



Şekil 5.3 : 1-SD sistemin Empedans kontrolü [38].

$Z(s)$ mekanik Şekil 5.3'teki gibi modellenir.

$$Z(s) = M_{imp}s + B_{imp} + K_{imp}/s \tag{5.6}$$

Denklem 5.5, 5.6 kullanılarak kuvvet ile pozisyon arasındaki transfer fonksiyonu aşağıdaki denklemde elde edilir.

$$\frac{P_F(s)}{F(s)} = \frac{1}{M_{imp}s^2 + B_{imp}s + K_{imp}} \tag{5.7}$$

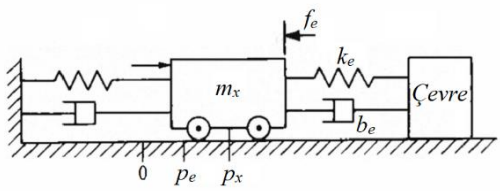
$M_{imp} = \left[m_x\ m_y\ m_z\right]^T$, empedans kontrolündeki 3 × 1 kütle vektörünü ve onu oluşturan Kartezyen uzayındaki kütle katsayılarını temsil etmektedir. $B_{imp} = \left[b_x\ b_y\ b_z\right]^T$, empedans kontrolündeki 3 × 1 sönüm vektörü ve onu oluşturan Kartezyen uzayındaki sönüm katsayılarıdır. $K_{imp} = \left[k_x\ k_y\ k_z\right]^T$, empedans kontrolündeki 3 × 1 yay vektörü ve onu oluşturan Kartezyen uzayındaki yay katsayılarını temsil etmektedir. $F = \left[f_x\ f_y\ f_z\right]^T$, 3 × 1 kuvvet vektörüdür ve Kartezyen uzayındaki kuvvetleri temsil etmektedir. P_F temas kuvvetinin ilgili transfer fonksiyonlarına bağlı olarak oluşturduğu Kartezyen pozisyonlardır. Empedans kontrol sonucu elde edilen yeni pozisyon bilgisi aşağıdaki denklemde verilmektedir.

$$P_I = P_D - P_F \tag{5.8}$$

P_I çevre ile olan etkileşim sonucunda empedans kontrolün düzenlemesiyle oluşturulan yeni Kartezyen yörüngeleridir.

5.5 Hesaplanan tork tabanlı empedans kontrolü

İç ve dış döngü kontrol algoritması olarak ikiye ayrılır. İç döngüde hareket kontrolünü gerçekleştiren hesaplanan tork kontrol, dış döngüde ise kuvvet kontrolünü gerçekleştiren empedans kontrol bulunur.



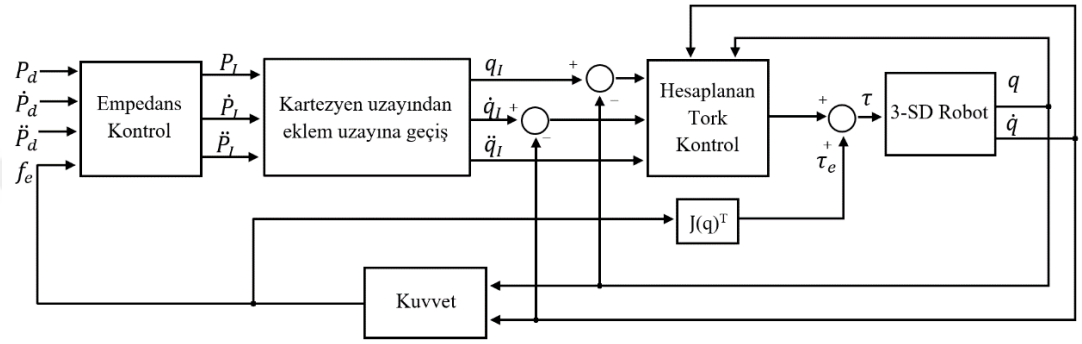
Şekil 5.4 : Çevre kuvveti gösterimi [38].

Şekil 5.4'te gösterildiği gibi çevre kuvveti simülasyon için mekanik tasarlanmıştır:

$$f_e = k_e(p_x - p_e) + b_e\dot{p}_x \tag{5.9}$$

f_e çevre kuvvetini ifade etmektedir. Kuvvet sadece x ekseninde etki etmektedir. k_e çevre yay, b_e ise çevre sönüm katsayısıdır. p_e çevrenin, . p_x uç işlevcinin Kartezyen uzayında x eksenindeki konumudur.

Sistemin kontrol algoritmalarıyla birlikte genel blok diyagramı Şekil 5.5'te verilmiştir.



Şekil 5.5 : Hesaplanan tork tabanlı empedans kontrol sistemi algoritması.

Empedans kontrol çıkışı olarak Kartezyen uzay değişkenleri P_I, $\dot{P}_I$ ve $\ddot{P}_I$ olur. Empedans kontrolden hesaplanan tork kontrolüne geçiş için Kartezyen uzaydan eklem uzayına aşağıdaki denklemler eklenerek hareket kontrol algoritmasının çalışması sağlanmıştır.

$$q_I = Ters\ Kinematik(P_I) \tag{5.10}$$

$$\dot{q}_I = J^{-1}(q)\dot{P}_I \tag{5.11}$$

$$\ddot{q}_I = \dot{J}^{-1}(q)\ddot{P}_I + J^{-1}(q)\dot{P}_I \tag{5.12}$$

Kartezyen uzaydaki uç işlevciye ait kuvvetler eklem uzayındaki torklara aşağıdaki denklem kullanılarak dönüştürülür [31]. τ_e çevre kuvvetinin tork karşılığıdır.

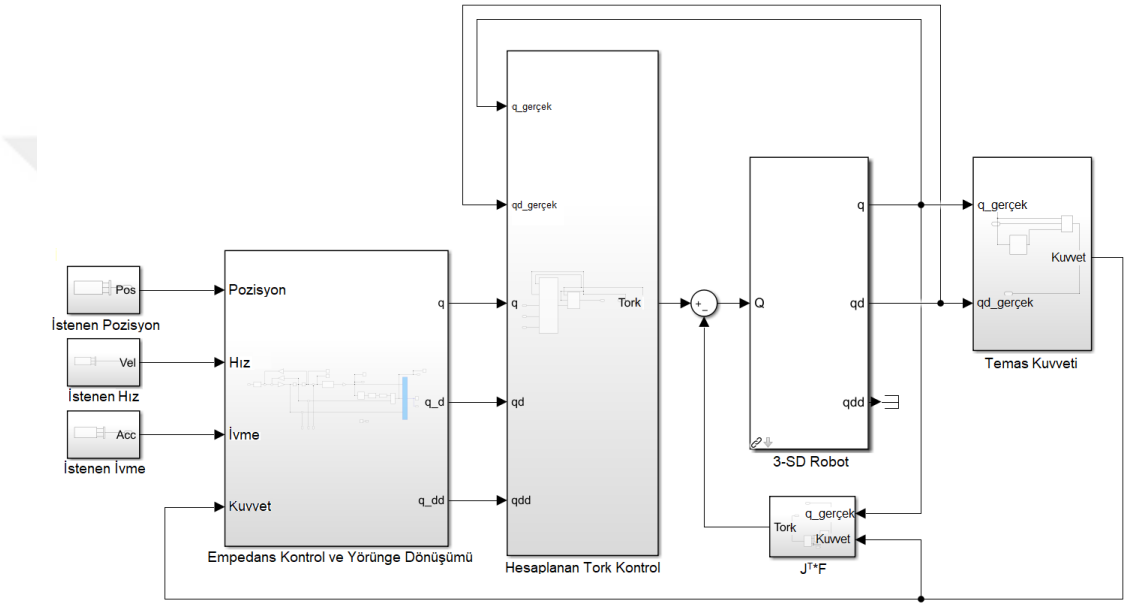
$$\tau_e = J(q)^T f_e \tag{5.13}$$

Eklemlere etki eden çevre torkları genel denkleme dahil edilerek genel kontrol girişi aşağıdaki denklemdeki çıkarılır.

$$\tau = \tau_e + M(q)\left(\ddot{q}_d + K_V(\dot{q}_I - \dot{q}) + K_P(q_I - q)\right) + C(q,\dot{q}) + G(q) \tag{5.14}$$

5.6 Hesaplanan tork tabanlı empedans kontrol simülasyonu

Robotun simülasyonu Matlab/Simulink programında Matlab Robotic Toolbox eklentisiyle gerçekleştirilmiştir [20, 21]. Matlab Robotic Toolbox dinamik denklemlerin simülasyonunda RNE (Recursive Newton Euler) yöntemini kullanmaktadır. Simulink bloklarından oluşan blok diyagramı Şekil 5.6'da verilmiştir.



Şekil 5.6 : Matlab/Simulink simülasyonu blok diyagramı.

Simülasyonun hesaplanan tork kuvveti katsayıları $K_P = [100 \quad 100 \quad 100]^T$ ve $K_V = [20 \quad 20 \quad 20]^T$ olarak seçilmiştir. Robotun temas mesafesi 0,2 m, 0,3 m ve 0,4 m olarak belirlenmiştir. Empedans kontrol katsayıları $k_x = 20$, $b_x = 100$ ve $m_x = 1$ olarak belirlenmiştir. Simülasyondaki temas kuvveti için kuvvet parametreleri $k_e = 5000$, $b_e = 200$ olarak seçilmiştir.

Robotun takip edeceği yörünge 5.dereceden polinom kullanılarak oluşturulmuştur. Bu yörüngenin kullanılma sebebi ani hız ve ivme oluşumlarını engellemektir. Oluşturulan başlangıç pozisyonundan bitiş pozisyonu kullanılan yöntemle birlikte aşağıdaki şekilde oluşmuştur.

Simülasyon için seçilen Kartezyen yörüngeleri, başlangıç pozisyonu için $P(t_0) = [10 \quad 30 \quad 20]^T$, bitiş pozisyonu için $P(t_f) = [50 \quad -10 \quad 40]^T$ ve gerçekleşme zamanı olarak 5 s belirlenmiştir.

Aşağıdaki hesaplamalarda x pozisyonuna ait referans yörüngenin polinom katsayıları (γ_n) bulunmuştur.

$$p_x(t) = \gamma_0 + \gamma_1 t + \gamma_2 t^2 + \gamma_3 t^3 + \gamma_4 t^4 + \gamma_5 t^5 \tag{5.15}$$

x eksenine ait yörüngenin başlangıç ve bitiş değerleri aşağıdaki şekilde olması belirlenmiştir.

$$p_x(t_0) = 10 \quad \dot{p}_x(t_0) = 0 \quad \ddot{p}_x(t_0) = 0 \tag{5.16}$$

$$p_x(t_f) = 50 \quad \dot{p}_x(t_f) = 0 \quad \ddot{p}_x(t_f) = 0 \tag{5.17}$$

Polinomun katsayıları matris biçiminde aşağıdaki denklemdeki gibi oluşturulur.

$$\begin{bmatrix} 1 & t_0 & {t_0}^2 & {t_0}^3 & {t_0}^4 & {t_0}^5 \\ 0 & 1 & 2t_0 & 3{t_0}^2 & 4{t_0}^3 & 5{t_0}^4 \\ 0 & 0 & 2 & 6t_0 & 12{t_0}^2 & 20{t_0}^3 \\ 1 & t_f & {t_f}^2 & {t_f}^3 & {t_f}^4 & {t_f}^5 \\ 0 & 1 & 2t_f & 3{t_f}^2 & 4{t_f}^3 & 5{t_f}^4 \\ 0 & 0 & 2 & 6t_f & 12{t_f}^2 & 20{t_f}^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \gamma_0 \\ \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \gamma_3 \\ \gamma_4 \\ \gamma_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_x(t_0) \\ \dot{p}_x(t_0) \\ \ddot{p}_x(t_0) \\ p_x(t_f) \\ \dot{p}_x(t_f) \\ \ddot{p}_x(t_f) \end{bmatrix} \tag{5.18}$$

Verilen bilgiler doğrultusunda eşitlik aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 5 & 25 & 125 & 625 & 3125 \\ 0 & 1 & 10 & 75 & 500 & 3125 \\ 0 & 0 & 2 & 30 & 300 & 2500 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \gamma_0 \\ \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \gamma_3 \\ \gamma_4 \\ \gamma_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10 \\ 0 \\ 0 \\ 50 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{5.19}$$

Polinom katsayılarını bulmak için gerekli düzenlemeler yapılır.

$$\begin{bmatrix} \gamma_0 \\ \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \gamma_3 \\ \gamma_4 \\ \gamma_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 5 & 25 & 125 & 625 & 3125 \\ 0 & 1 & 10 & 75 & 500 & 3125 \\ 0 & 0 & 2 & 30 & 300 & 2500 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 10 \\ 0 \\ 0 \\ 50 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{5.20}$$

Matlab yardımıyla 6×6 matrisin tersi hesaplanır.

$$\begin{bmatrix}\gamma_0\\ \gamma_1\\ \gamma_2\\ \gamma_3\\ \gamma_4\\ \gamma_5\end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0{,}5 & 0 & 0 & 0\\ -0{,}08 & -0{,}24 & -1{,}02 & 0{,}08 & -0{,}16 & 0{,}1\\ 0{,}024 & 1 & 10 & 75 & 500 & 3125\\ -0{,}00192 & -0{,}0048 & -0{,}0256 & 0{,}0192 & -0{,}0048 & 0{,}004\end{bmatrix}\begin{bmatrix}10\\ 0\\ 0\\ 50\\ 0\\ 0\end{bmatrix} \tag{5.21}$$

Polinom katsayıları sırasıyla $\gamma_0 = 10,\ \gamma_1 = 0,\ \gamma_2 = 0,\ \gamma_3 = 3{,}2,\ \gamma_4 = 0{,}96,\ \gamma_5 = 0{,}0768$ olarak hesaplanır.

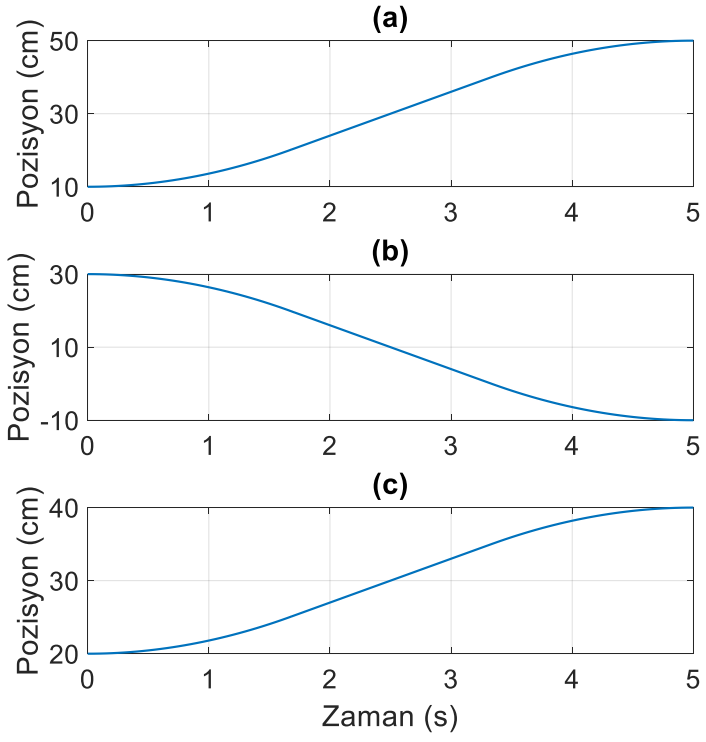
p_y, ve p_z için gerekli olan polinom katsayılarının da hesaplanması ardından aşağıdaki denklemler elde edilir.

$$p_x(t) = 10 + 3{,}2t^3 - 0{,}96t^4 + 0{,}0768\ t^5 \tag{5.22}$$

$$p_y(t) = 30 - 3{,}2t^3 + 0{,}96t^4 + 0{,}0768\ t^5 \tag{5.23}$$

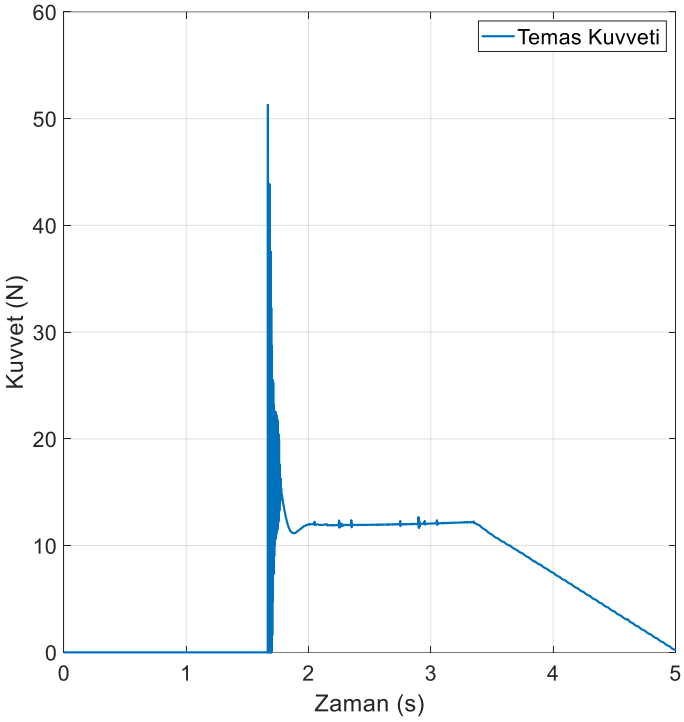
$$p_z(t) = 20 + 1{,}6t^3 - 0{,}48t^4 + 0{,}0384\ t^5 \tag{5.24}$$

p_x, p_y, ve p_z'de referans yörüngelerin Şekil 5.7'de zamana bağlı olarak değişimi gösterilmiştir.

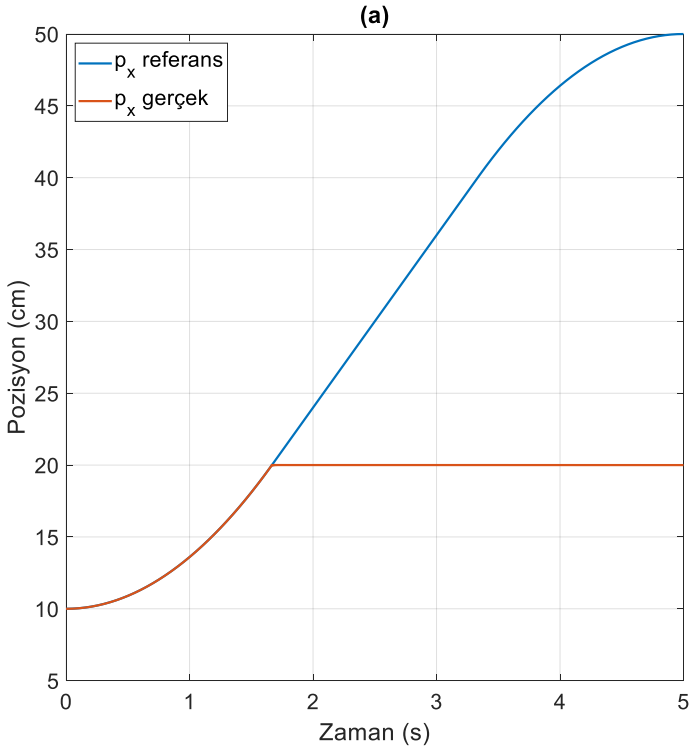


Şekil 5.7 : (a) p_x, (b) p_y, ve (c) p_z'de referans yörüngelerin zamana bağlı grafikleri.

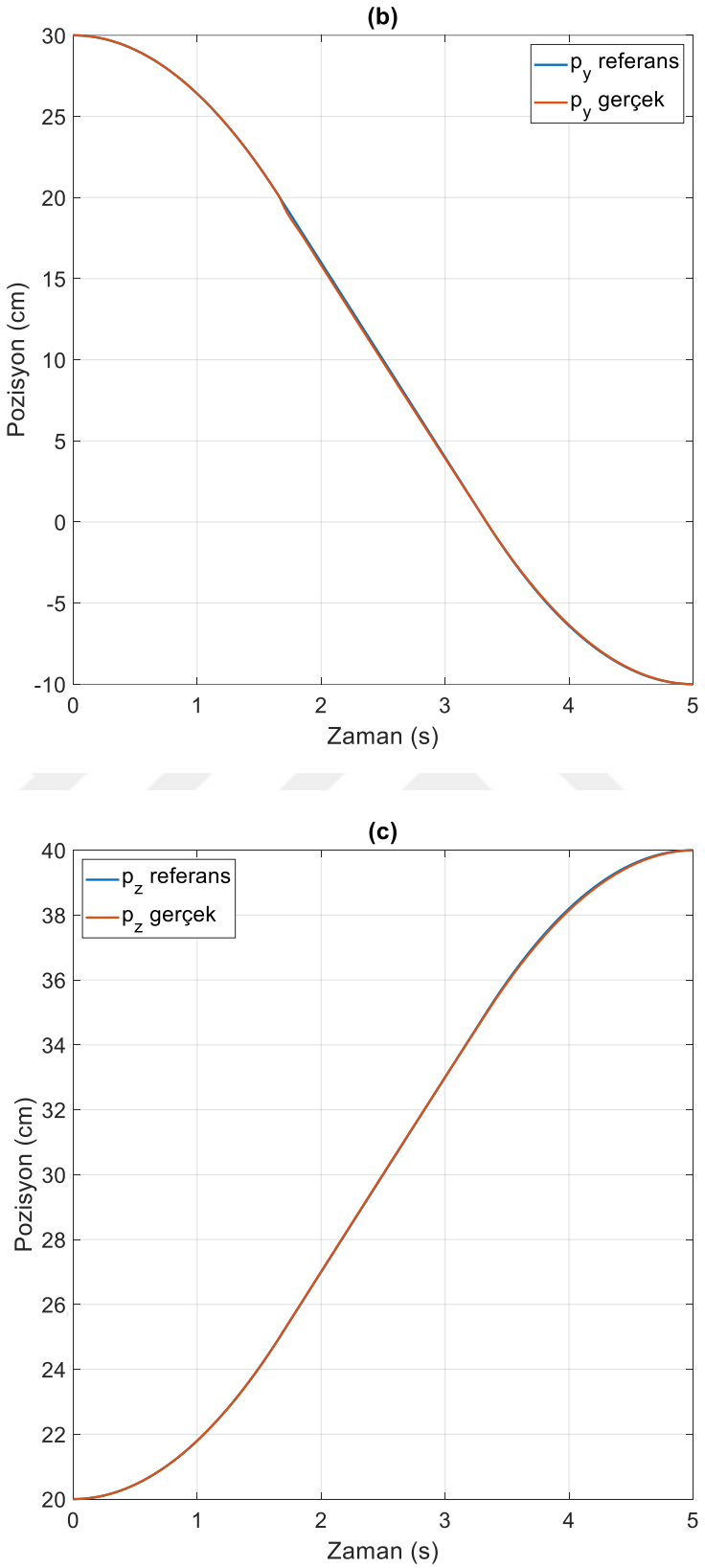
Robotun 20 cm'de temasından oluşan simülasyon sonuçları aşağıdaki gibidir. Şekil 5.8'de temas kuvveti, Şekil 5.9'da Kartezyen uzayındaki yörünge takibi verilmiştir.



Şekil 5.8 : 20 cm'deki temas kuvveti.

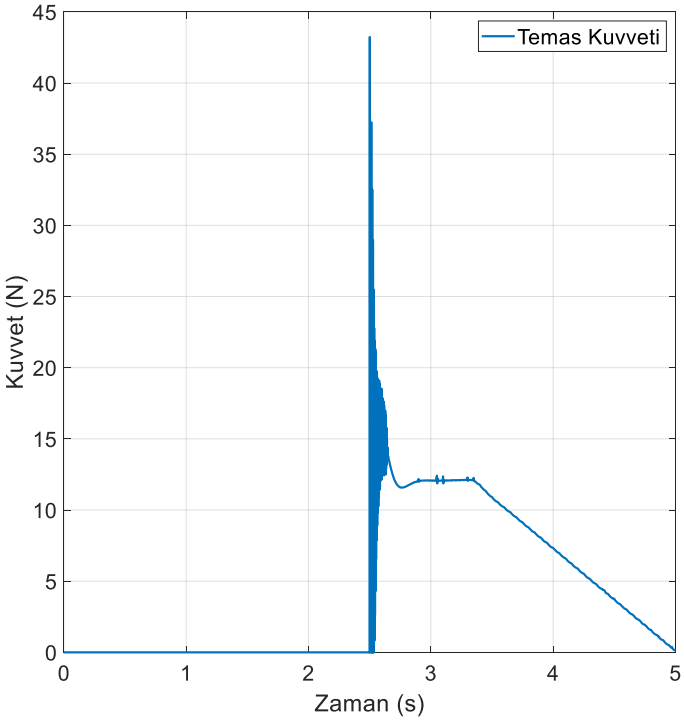


Şekil 5.9 : 20 cm'deki (a) x pozisyonu (b) y pozisyonu (c) z pozisyonu.

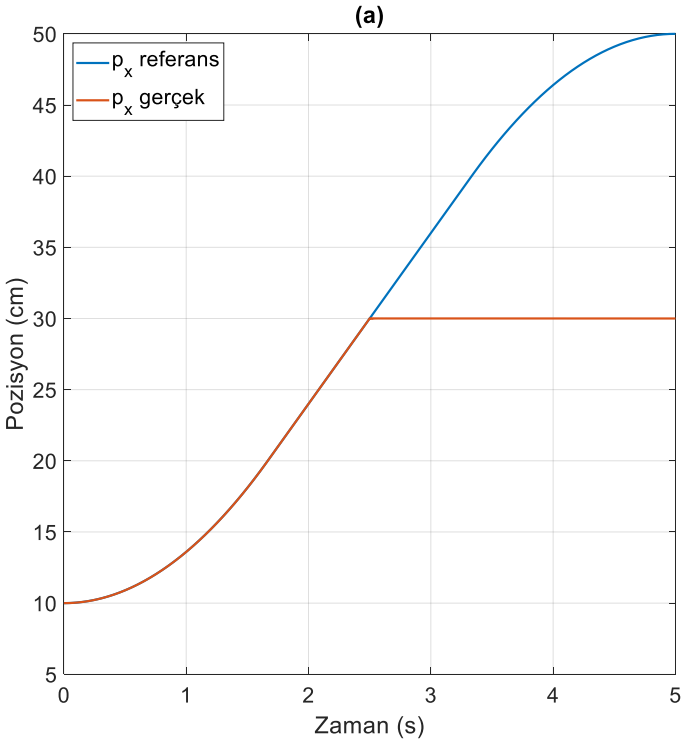


Şekil 5.9 (devam): 20 cm'deki (a) x pozisyonu (b) y pozisyonu (c) z pozisyonu.

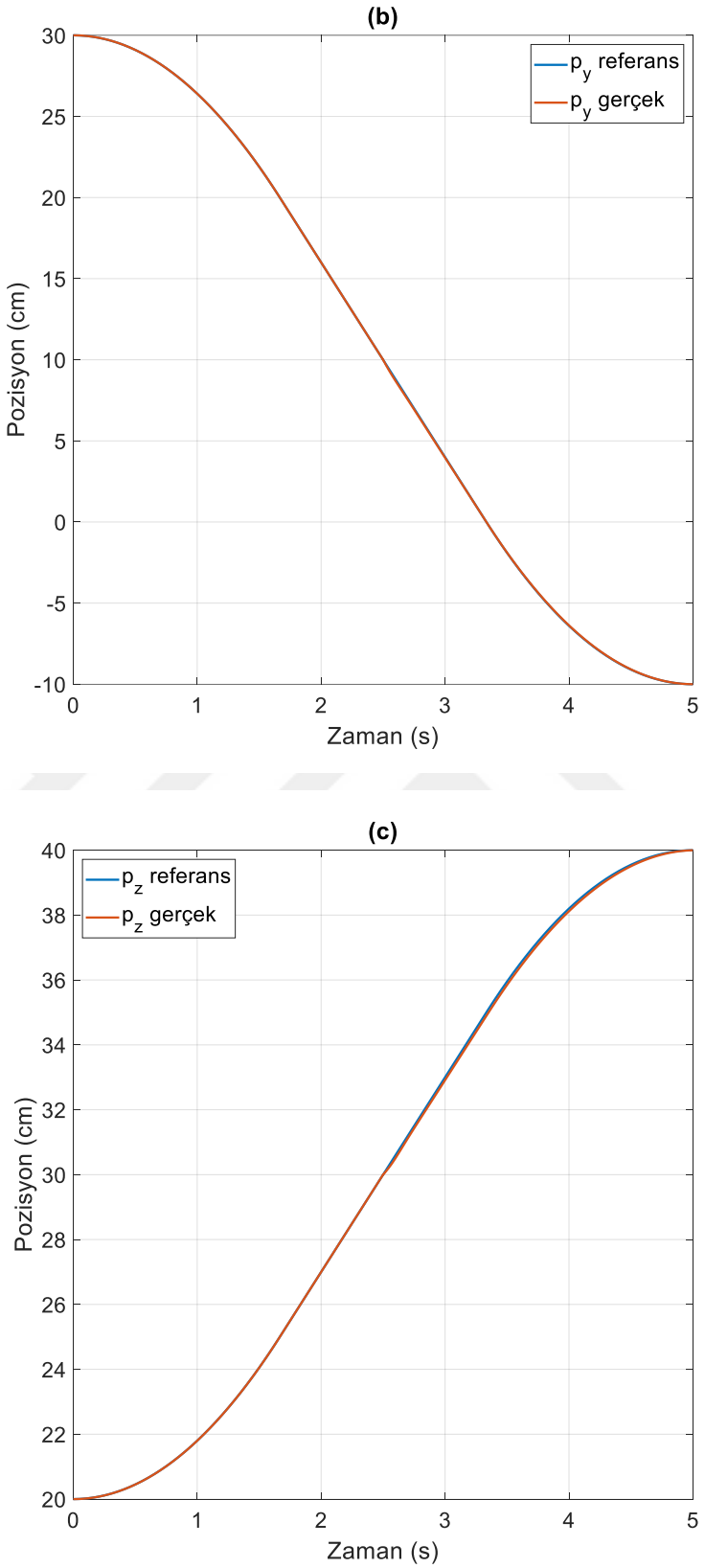
Robotun 30 cm'de temasından oluşan simülasyon sonuçları aşağıdaki gibidir. Şekil 5.10'da temas kuvveti, Şekil 5.11'de Kartezyen uzayındaki yörünge takibi verilmiştir.



Şekil 5.10 : 30 cm'deki temas kuvveti.

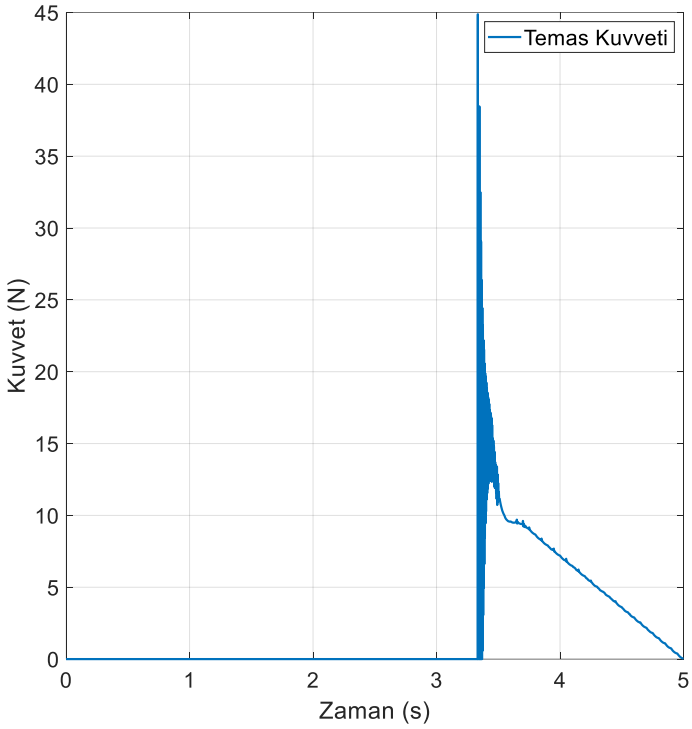


Şekil 5.11 : 30 cm'deki (a) x pozisyonu (b) y pozisyonu (c) z pozisyonu.

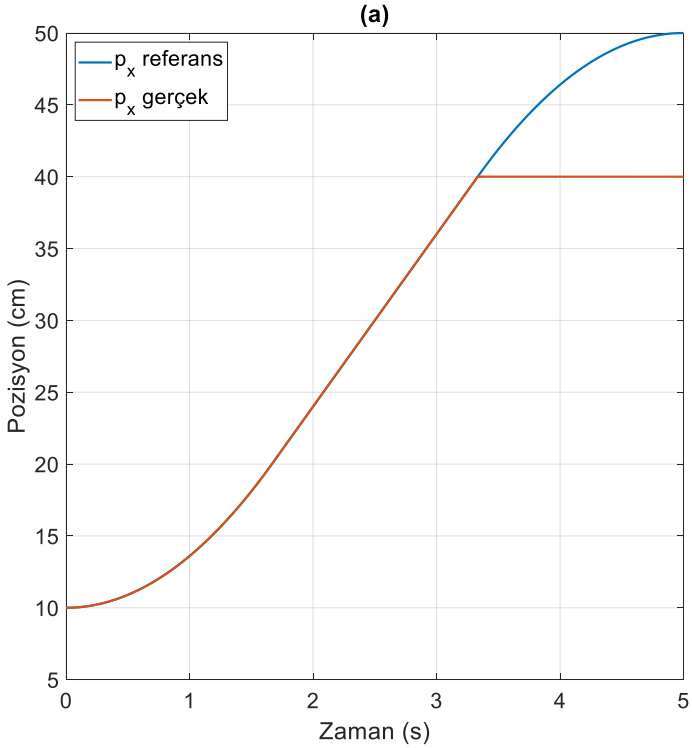


Şekil 5.11 (devam): 30 cm'deki (a) x pozisyonu (b) y pozisyonu (c) z pozisyonu.

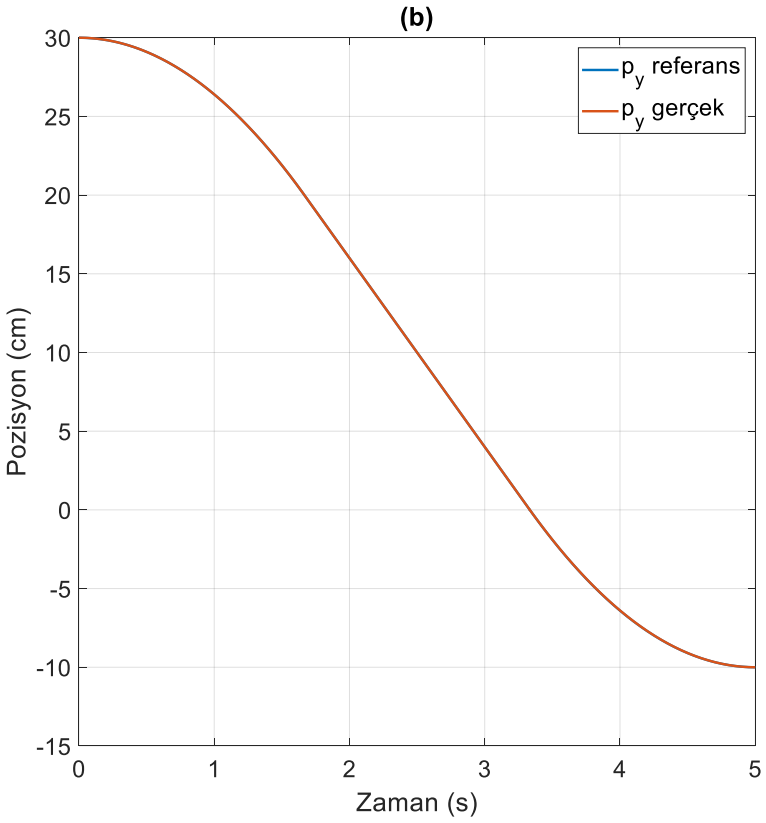
Robotun 40 cm'de temasından oluşan simülasyon sonuçları aşağıdaki gibidir. Şekil 5.12'de temas kuvveti, Şekil 5.13'te Kartezyen uzayındaki yörünge takibi verilmiştir.

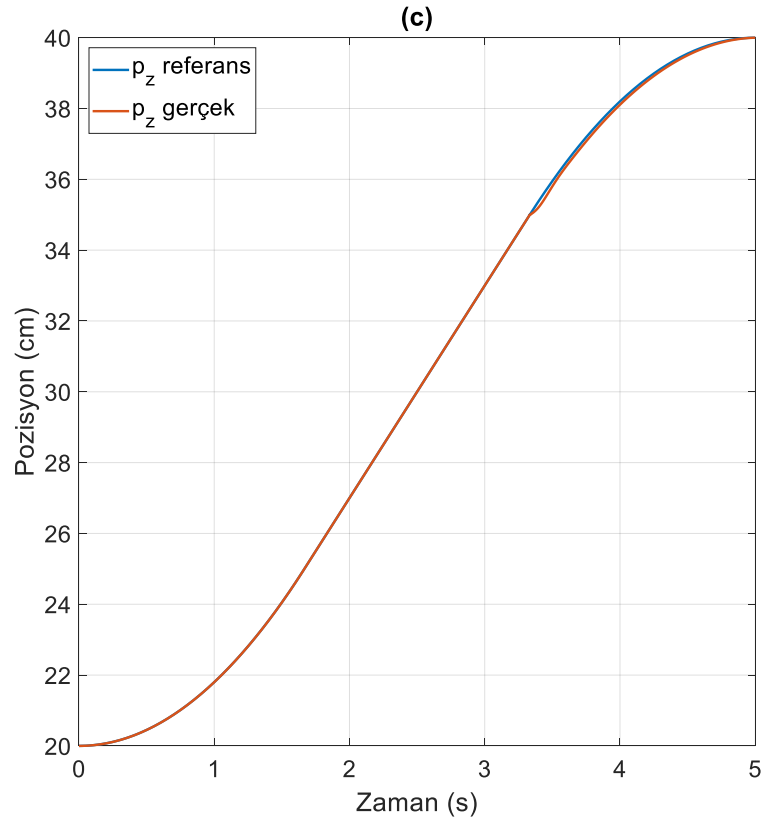


Şekil 5.12 : 40 cm'deki temas kuvveti.



Şekil 5.13 : 40 cm'deki (a) x pozisyonu (b) y pozisyonu (c) z pozisyonu.





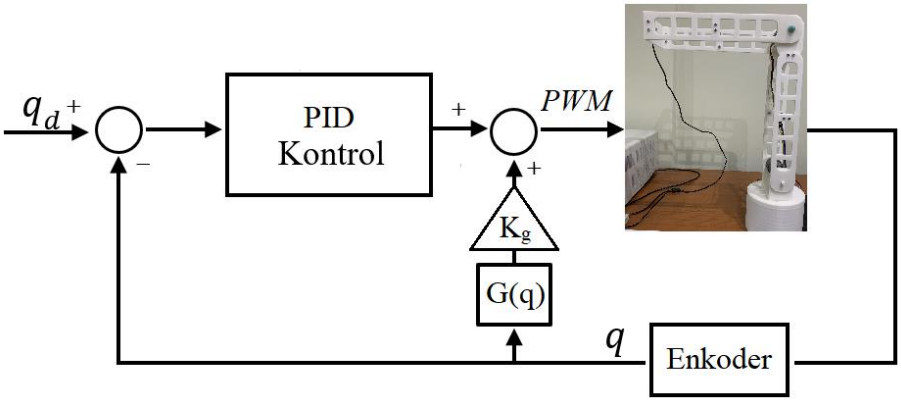
Şekil 5.13 (devam): 40 cm'deki (a) x pozisyonu (b) y pozisyonu (c) z pozisyonu.

6. ROBOTUN GERÇEK ZAMANLI KONTROLÜ

Bu bölümde, robotun gerçek zamanlı uygulamaları için kullanılan yer çekimi tabanlı PID kontrol açıklanmıştır. Robotun uzuvları matematiksel olarak modellenerek PID katsayıları bulunmuştur. Pozisyon tabanlı empedans kontrolün yüzey teması halinde uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Aynı uygulama sadece PID kontrolü ile sağlanıp sonuçlar karşılaştırılmıştır.

6.1 Yerçekimi dengelemeli PID kontrolü

Robotun hareket kontrolü için yerçekimi dengelemeli PID kontrolü kullanılmıştır. Şekil 6.1'de gösterilen blok diyagramı eklem uzayında gerçekleşmektedir. Enkoder yardımıyla motorlardan alınan açı bilgisi referans ile karşılaştırılarak PID kontrol gerçekleştirilmiştir.

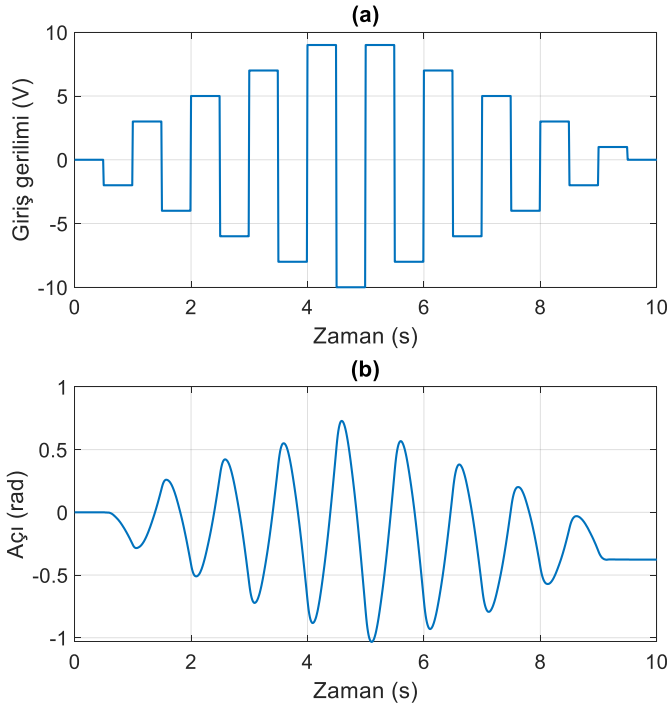


Şekil 6.1 : PID ve yerçekimi dengeleme kontrolü blok diyagramı.

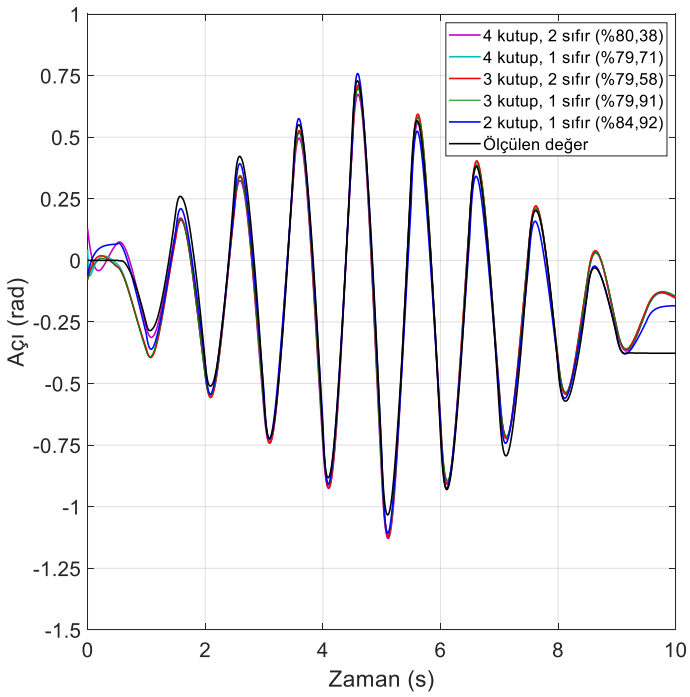
Yerçekimi dengelemesi için tork değerinin girdisini sağlamak için akım sensöründen alınan veriyle oranlayıp denenmiştir. Alınan verinin gürültü ve çözünürlük problemleri nedeniyle kontrolde kararlılık sağlanamamıştır. Dolayısıyla PWM değeri ile DC motorun tork değeri oranlanarak K_g bulunmuştur. Giriş sinyali PID kontrol ve K_g katsayısıyla çarpılan yerçekimi vektöründen oluşturulmuştur.

$$u = K_P(q_d - q) + K_I \int \big((q_d - q)\big)\, dt + K_D(\dot{q}_d - \dot{q}) + G(q)K_G \tag{6.1}$$

Bağımsız uzuv kontrolü için Matlab programının “System Identification” eklentisi kullanılarak robot uzuvlarının modellenmesi gerçekleştirilir [39]. İlk uzvun modellenmesi için gereken giriş gerilimi ve çıkış açı cevapları Şekil 6.2’de verilmiştir.



Şekil 6.2 : Robotun ilk uzvunun (a) giriş gerilimi ve (b) çıkış açısı cevapları.

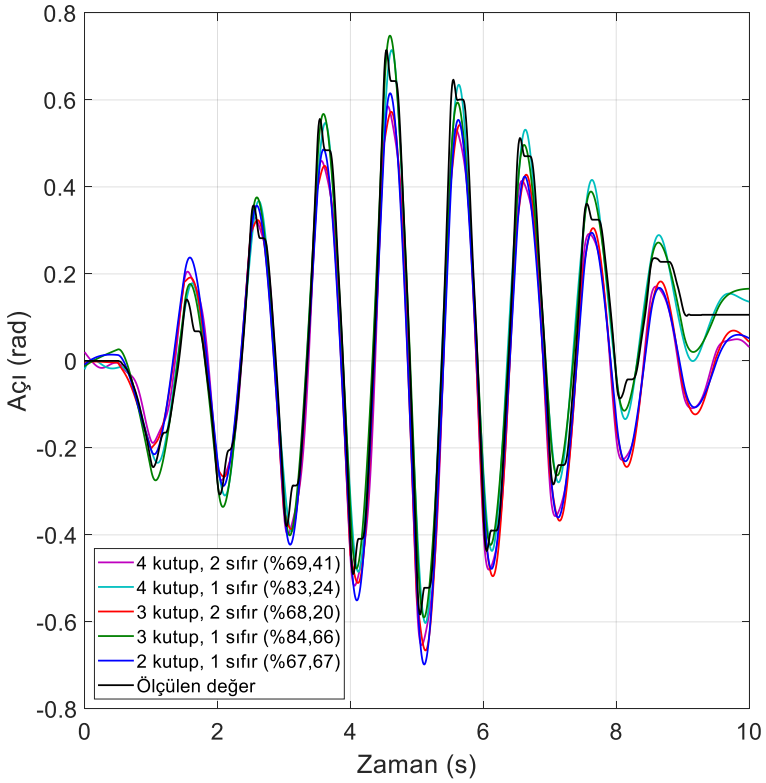


Şekil 6.3 : 1. uzvun ölçülen değere göre modellenen transfer fonksiyon cevapları.

Şekil 6.3'te 1. uzvun kutuplar ve sıfırlara göre modellenen transfer fonksiyonlarının uygunluk oranları verilmiştir. Uygunluk oranı %84,92 olan 2 kutuplu ve 1 sıfırlı transfer fonksiyon 1. uzuv modeli olarak seçilmiştir.

$$U_1(s) = \frac{-0{,}148s + 4{,}846}{s^2 + 9{,}675s + 5{,}033.10^{-13}} \tag{6.2}$$

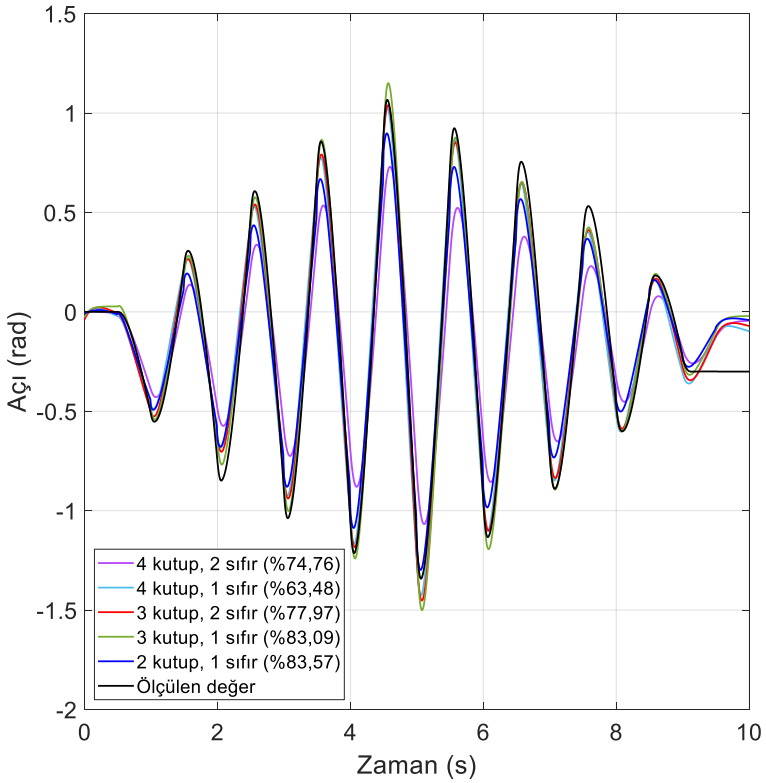
2. ve 3. uzvun kutupları ve sıfırlarına göre transfer fonksiyonlarının uygunluk oranları Şekil 6.4 ve 6.5'te gösterilmiştir. 2. ve 3. uzvun modellenmesinde kullanılan giriş gerilimi Şekil 6.2'nin (a) bölümünde verilen giriş gerilimi ile aynıdır.



Şekil 6.4 : 2. uzvun ölçülen değere göre modellenen transfer fonksiyon cevapları.

2. uzuv için modellenen transfer fonksiyonu aşağıdaki gibidir.

$$U_2(s) = \frac{2{,}833s + 0{,}164}{s^3 + 6{,}505\,s^2 + 0{,}802s + 0{,}67} \tag{6.3}$$



Şekil 6.5 : 3. uzvun ölçülen değere göre modellenen transfer fonksiyon cevapları.

3. uzuv için modellenen transfer fonksiyonu aşağıdaki denklemde verilmiştir.

$$U_3(s) = \frac{-0{,}169\,s\ +\ 8{,}039}{s^2 +\ 12{,}107\,s\ +\ 2{,}231} \tag{6.4}$$

PID kontrolün s domaindeki ifadesi aşağıdaki denklemde verilmiştir.

$$C(s) = \frac{k_d s^2 + k_p s + k_i}{s} \tag{6.5}$$

Uzuvların PID kontrolcü ile kapalı çevrim transfer fonksiyonları sırasıyla aşağıdaki gibidir.

$$TF_1(s) = \frac{-0{,}15k_d s^3 + (4{,}8k_d - 0{,}15k_p)s^2(4{,}8k_P - 0{,}15k_i)s + 4{,}8k_i}{(1 - 0{,}15k_d)s^3 + \left(4{,}8k_d - 0{,}15k_p + 9{,}7\right)s^2 + (4{,}8k_P - 0{,}15k_i)s + 4{,}8k_i} \tag{6.6}$$

$$TF_2(s) = \frac{-2{,}83k_d s^3 + (0{,}16k_d + 2{,}83k_p)s^2 + (2{,}83k_i + 0{,}16k_p)s + 0{,}16k_i}{s^4 + (2{,}83k_d + 6{,}5)s^3 + \left(0{,}16k_d + 2{,}83k_p + 0{,}8\right)s^2 + \left(2{,}83k_i + 0{,}16k_p\right)s + 0{,}16k_i} \tag{6.7}$$

$$TF_3(s) = \frac{-0{,}17k_d s^3 + (8{,}04k_d - 0{,}17k_p)s^2 + (8{,}04k_p - 0{,}17k_d)s + 8{,}04k_i}{(1 - 0{,}17k_d)s^3 + \left(8{,}04k_d - 0{,}17k_p + 12{,}11\right)s^2 + (8{,}04k_P - 0{,}17k_i + 2{,}23)s + 8{,}04k_i} \tag{6.8}$$

Sistemin oturması istenen kökleri 1. ve 3. uzuv için $s_1 = -1$, $s_2 = -5$, $s_3 = -50$ olarak seçildiğinde 1. uzvun PID katsayıları aşağıdaki denklemden bulunur.

$$s^3 + \left(4{,}8k_d - 0{,}15k_p + 9{,}7\right)/(1 - 0{,}15k_d)s^2 + (4{,}8k_P - 0{,}15k_i)/(1 - 0{,}15k_d)s + 4{,}8k_i/(1 - 0{,}15k_d) = s^3 + 56s^2 + 305s + 250 \quad (6.9)$$

1. uzuv için Denklem 6.9 çözüldüğünde, PID katsayıları $k_p = 27{,}87$, $k_i = 22{,}29$ ve $k_d = 3{,}84$ olacak şekilde elde edilir.

3. uzuv için PID katsayıları aşağıdaki denklemden elde edilir.

$$s^3 + \left(8{,}04k_d - 0{,}17k_p + 12{,}11\right)/(1 - 0{,}17k_d)s^2 + (2{,}23 + 8{,}04k_P - 0{,}17k_i)/(1 - 0{,}17k_d)s + 4{,}8k_i/(1 - 0{,}17k_d) = s^3 + 56s^2 + 305s + 250 \quad (6.10)$$

3. uzuv için Denklem 6.10 çözüldüğünde, PID katsayıları $k_p = 20{,}63$, $k_i = 16{,}85$ ve $k_d = 2{,}7$ olacak şekilde elde edilir.

2. uzuvda 4 kutup istendiği için sistemin oturması istenen sistemin kökleri s_1=-0.05, $s_2 = -0{,}2$, $s_3 = -5$ $s_4 = -15$ olacak şekilde seçilir.

$$s^4 + (6{,}5 + 2{,}8k_d)s^3 + (2{,}8k_P - 0{,}16k_d + 0{,}8)s^2 + \left(2{,}8k_i + 0{,}16k_p + 0{,}57\right)s + 0{,}16k_i = s^4 + 20{,}25s^3 + 80{,}01s^2 + 18{,}95s + 0{,}75 \quad (6.11)$$

2. uzuv için Denklem 6.11 çözüldüğünde, PID katsayıları $k_p = 27{,}68$, $k_i = 4{,}58$ ve $k_d = 4{,}85$ olacak şekilde elde edilir.

Çizelge 6.1'deki değerlere göre gerçek zamanlı uygulamalar yapılmıştır.

Çizelge 6.1 : 3-SD robotun PID katsayıları.

	θ_1	θ_2	θ_3
K_p	27,87	27,68	20,63
K_i	22,29	4,58	16,85
K_d	3,84	4,85	2,7

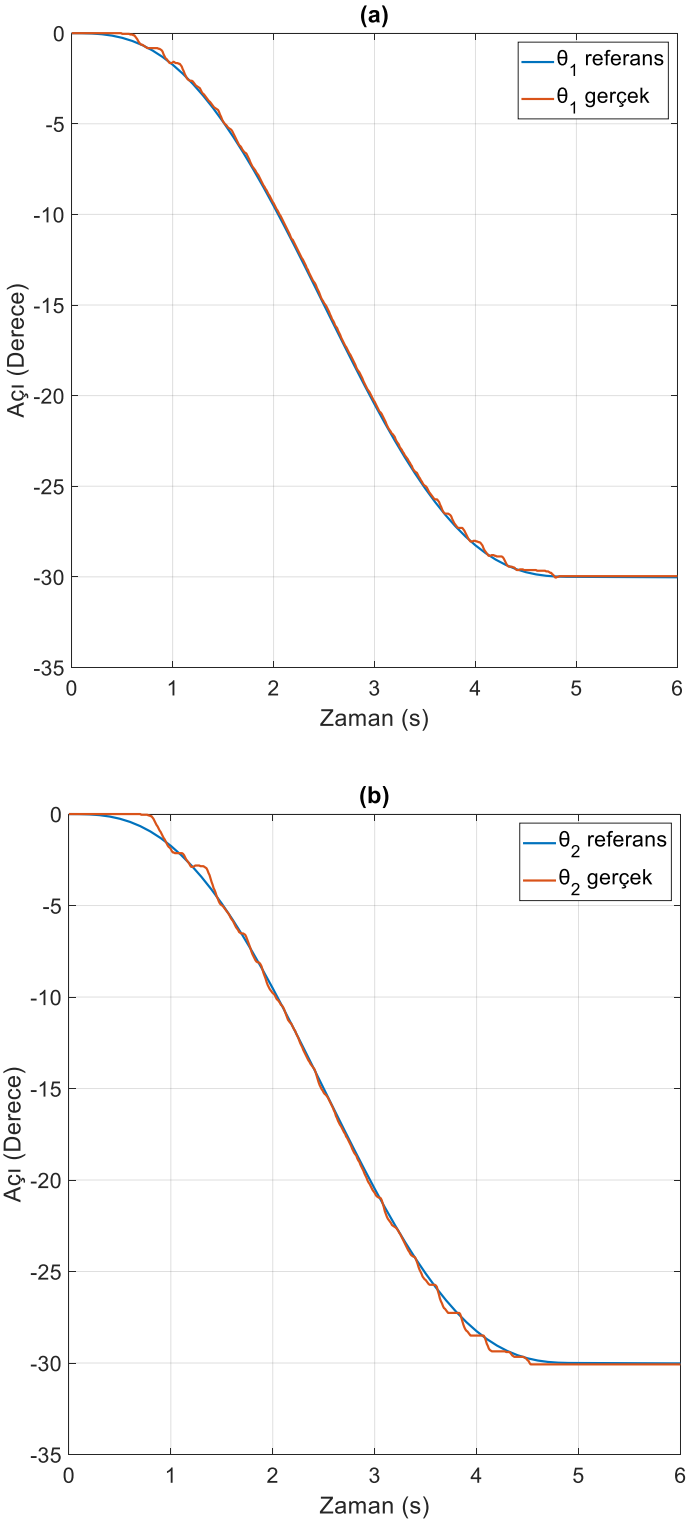
Açı yörüngeleri, başlangıç açılar için $q(t_0) = [0 \quad 0 \quad 0]^T$, bitiş açıları için $q\left(t_f\right) = [-30 \quad -30 \quad 30]^T$ ve gerçekleşme zamanı olarak 5 s belirlenmiştir.

$$\theta_1(t) = -2{,}4t^3 + 0{,}72t^4 - 0{,}0576\, t^5 \quad (6.12)$$

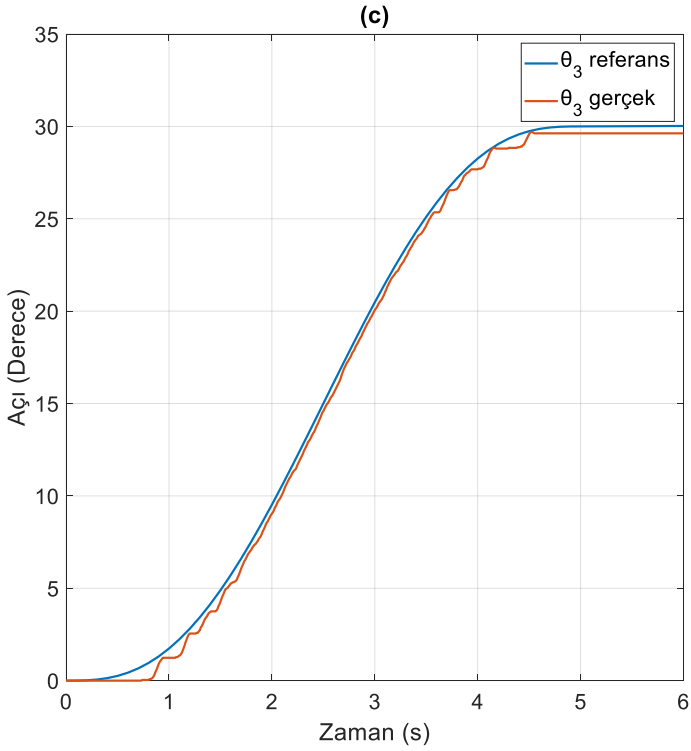
$$\theta_2(t) = -2{,}4t^3 + 0{,}72t^4 - 0{,}0576\, t^5 \quad (6.13)$$

$$\theta_3(t) = 2{,}4t^3 - 0{,}72t^4 + 0{,}0576\,t^5 \tag{6.14}$$

Yapılan uygulamalarda 6, 11 ve 16 s'de referans yörüngelere karşılık cevapları Şekil 6.6, 6.7 ve 6.8'de verilmiştir.

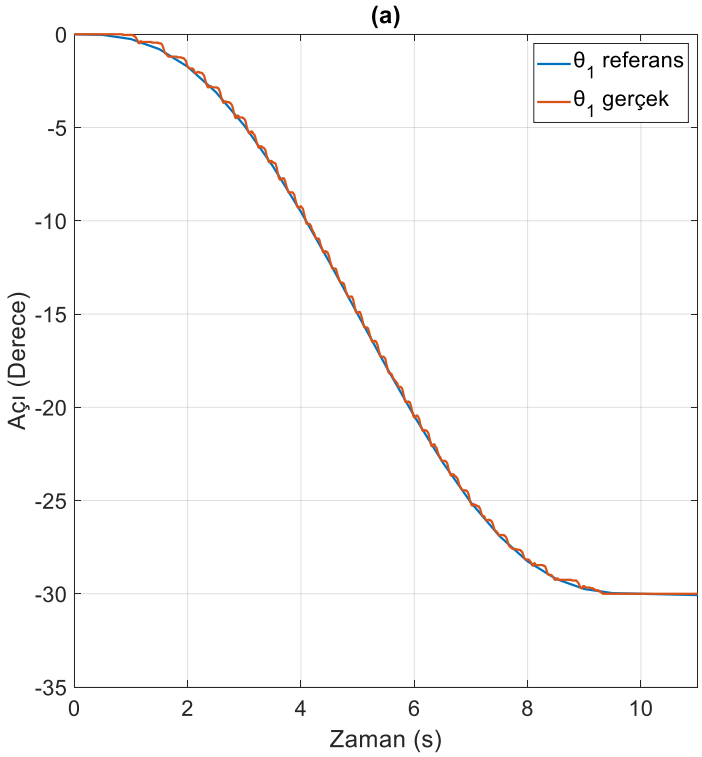


Şekil 6.6 : 6 s'de (a) θ_1 (b) θ_2 (c) θ_3 için referans ve gerçek açılar.

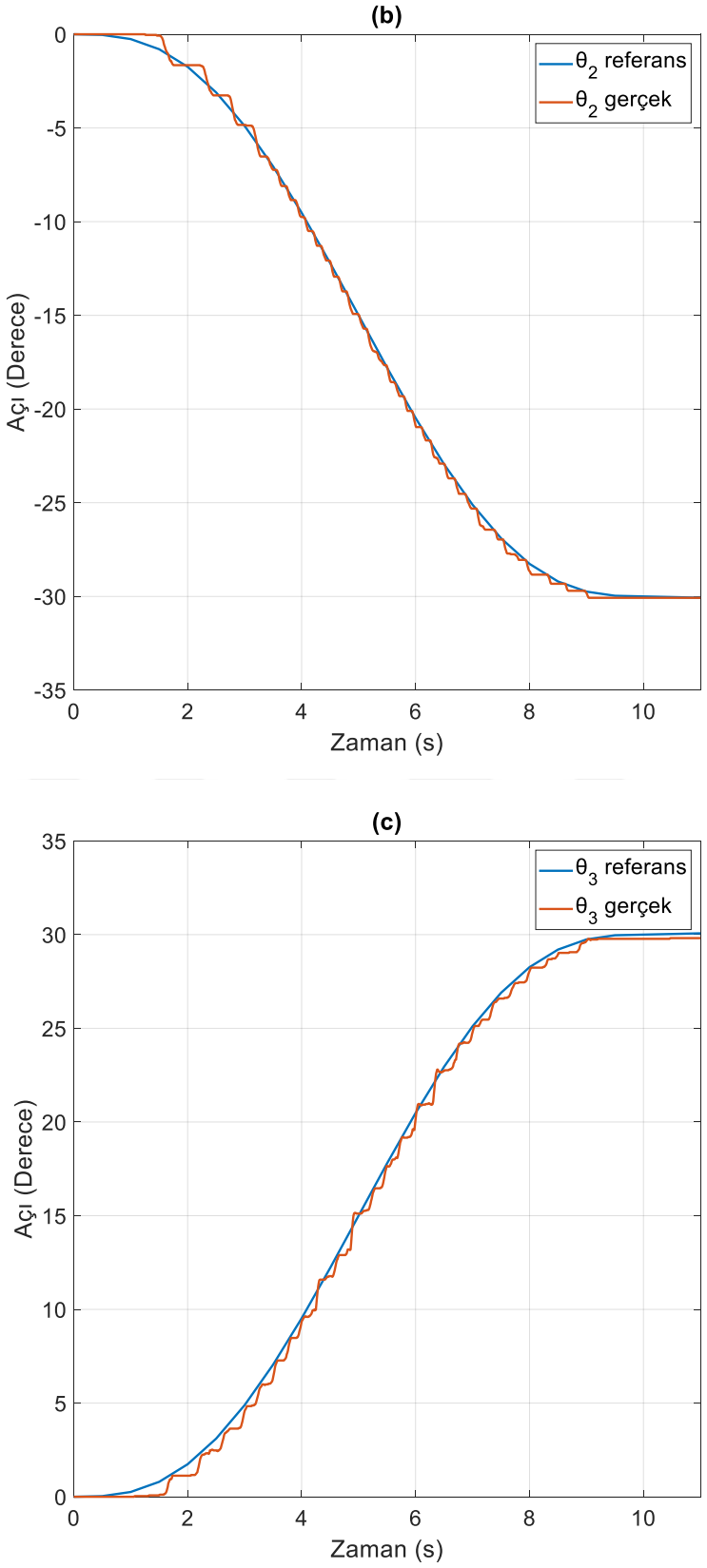


Şekil 6.6 (devam): 6 s'de (a) θ_1 (b) θ_2 (c) θ_3 için referans ve gerçek açılar.

Açıların başlangıç ve bitiş açıları değiştirmemek kaydıyla gerçekleşme zamanı olarak 10 s belirlenmiştir.

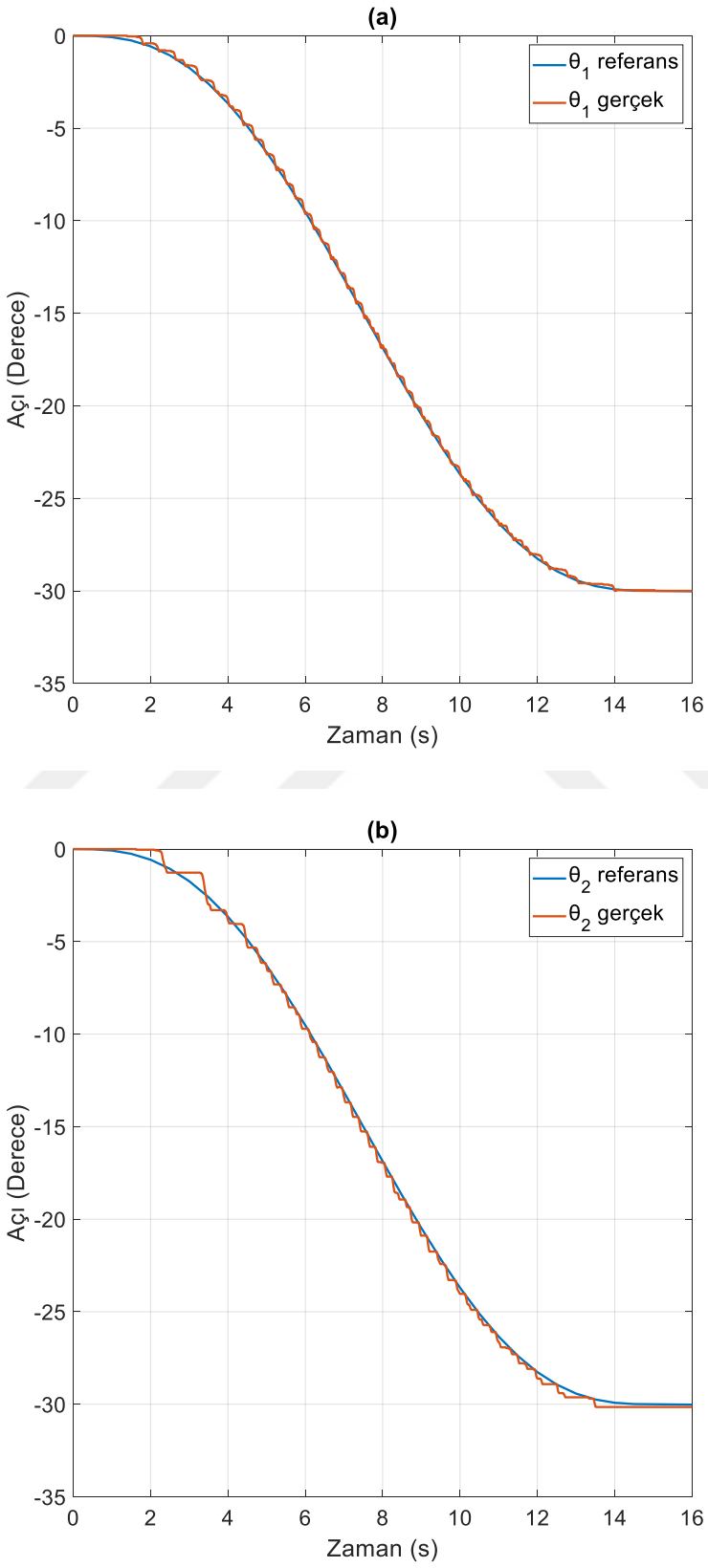


Şekil 6.7 : 11 s'de (a) θ_1 (b) θ_2 (c) θ_3 için referans ve gerçek açılar.

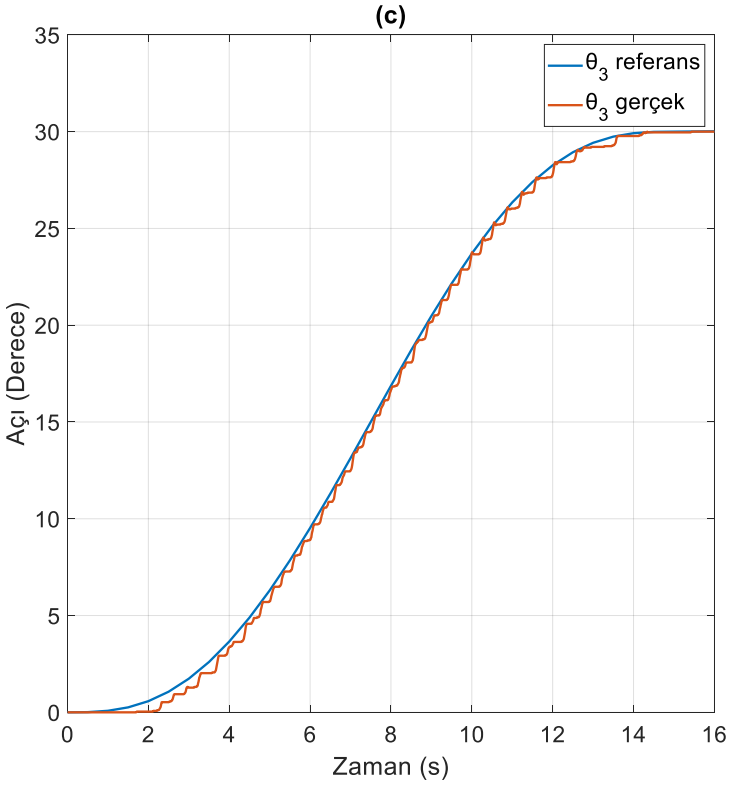


Şekil 6.7 (devam): 11 s'de (a) θ_1 (b) θ_2 (c) θ_3 için referans ve gerçek açılar.

Açıların başlangıç ve bitiş açıları değiştirmemek kaydıyla gerçekleşme zamanı olarak 15 s belirlenmiştir.



Şekil 6.8 : 16 s'de (a) θ_1 (b) θ_2 (c) θ_3 için referans ve gerçek açılar.



Şekil 6.8 (devamı): 16 s'de (a) θ_1 (b) θ_2 (c) θ_3 için referans ve gerçek açılar.

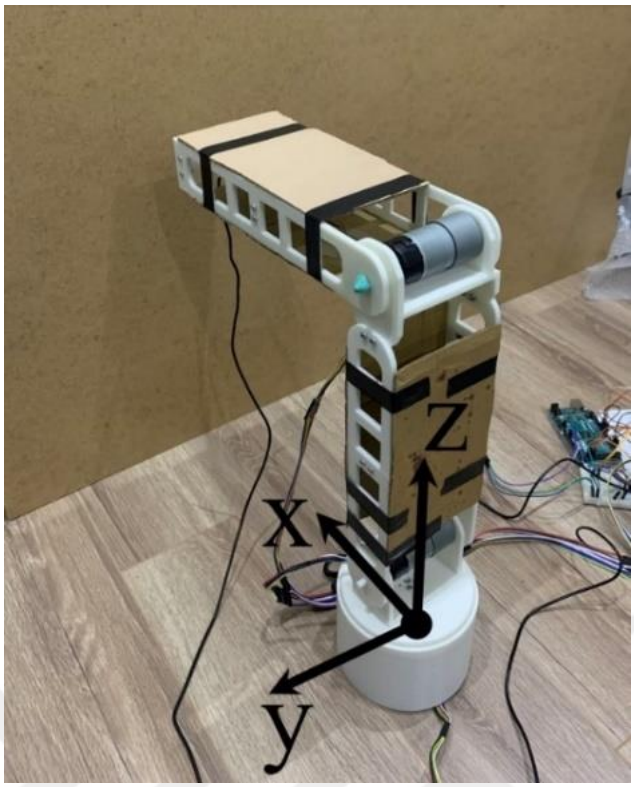
Çizelge 6.2'de PID kontrol yapılan uygulamalardaki % hata cinsinden değerler aşağıdaki gibi verilmiştir.

Çizelge 6.2 : PID kontrolün farklı zamanlardaki % hataları.

	θ_1	θ_2	θ_3
6 s	2,1	0,56	3,79
11 s	1,66	0,69	3,35
16 s	1,28	0,86	2,4

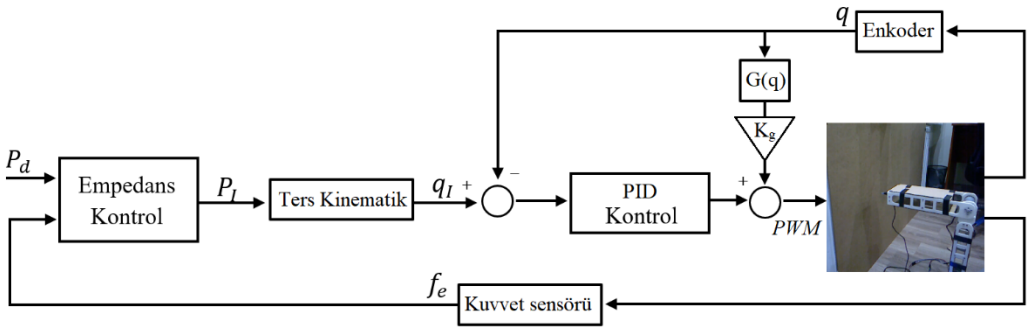
6.2 Pozisyon Tabanlı Empedans Kontrolü

3-SD robotun başlangıç pozisyonu ve temasın gerçekleştirildiği çevre Şekil 6.9'da gösterilmektedir. Empedans kontrol katsayılarının değiştirilmesiyle uygulama koşullarına verdiği Kartezyen uzayda gerçek zamandaki cevaplar aşağıdaki şekillerde mevcuttur.



Şekil 6.9 : 3-SD robotun başlangıç konumu ve temas bölgesi.

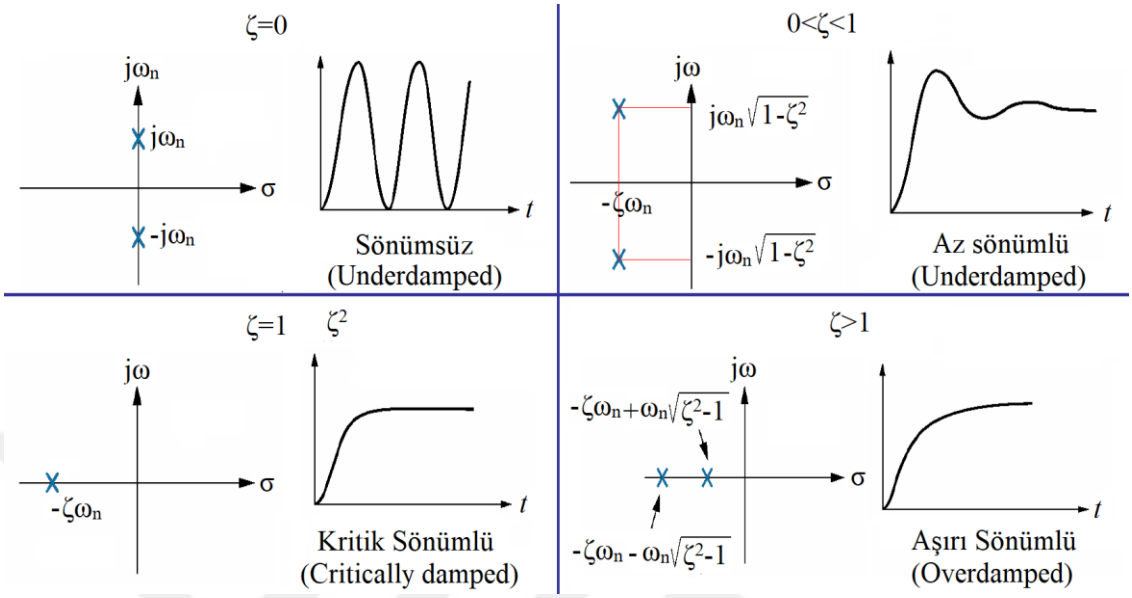
Kartezyen uzayda referans giriş takibi yapan 3-SD robotun x eksenine etki edecek şekilde teması tasarlanmıştır. Şekil 6.10'da gösterilen blok diyagramında çevre ile temas halinde kuvvet sensöründen alınan veriler kullanılarak dış döngüde empedans kontrol Kartezyen uzayda gerçekleştirilmiştir. İç döngüdeki hareket kontrolü eklem uzayında gerçekleştirildiği için empedans kontrol sonrası ters kinematik kullanılarak Kartezyen uzayından eklem uzayına geçiş yapılmıştır. Elde edilen eklem uzayındaki veriler enkoderden alınan eklemlerin açı bilgisiyle karşılaştırılarak yerçekimi dengelemeli PID kontrolü gerçekleştirilir.



Şekil 6.10 : 3-SD robotun gerçek zamanlı kontrol algoritmasının blok diyagramı.

Empedans katsayılarının oluşturmuş olduğu 2.dereceden bir sistemin doğal frekansı $\omega_n = \sqrt{k/m}$ ve sönüm oranı $\zeta = b/2m\omega_n$ denklemleri kullanılarak bulunur.

Şekil 6.11'de gösterildiği gibi $\zeta = 0$ değerinde sönümsüz, $0 < \zeta < 1$ değerinde az sönümlü, $\zeta = 1$ değerinde kritik sönüm ve $\zeta > 1$ değerinde aşırı sönüm gerçekleşmektedir.



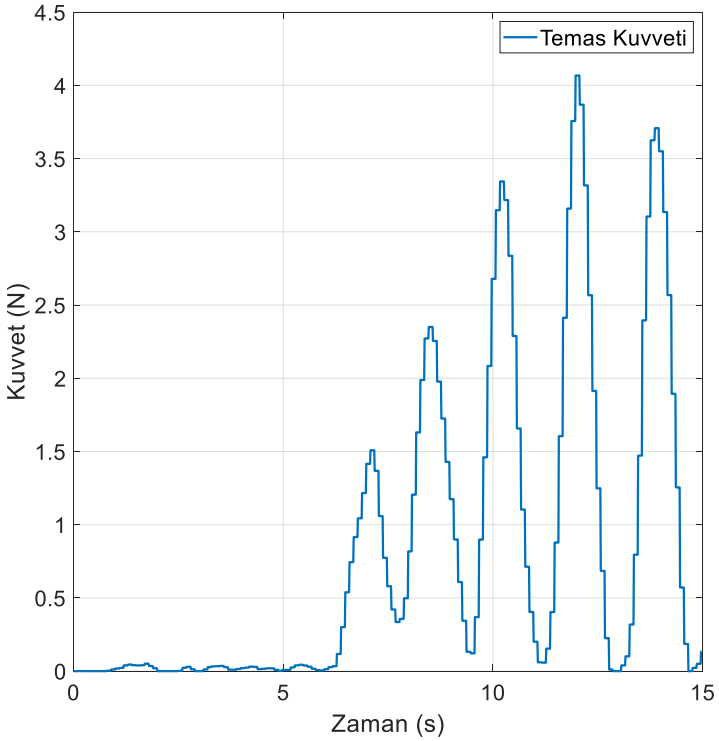
Şekil 6.11 : ζ değişimine göre çıkış cevabı değişimi [40].

Uygulamada kullanılan empedans kontrolü katsayıları $k_x = 20$, $b_x = 20$, $m_x = 1$ olarak seçilmiştir ($\zeta = 2{,}2$, $\omega_n = 4{,}5$). x eksenindeki yörüngede $p_x \cong 42$ cm'de çevre ile temas başlamıştır. Boşluklar ve kuvvet sensörünün rijit bir eklentiden oluşmaması nedeniyle yaklaşık 2 cm fazladan x ekseninde hareket edilmiştir. Temas kuvveti Şekil 6.12'de gösterilmiştir. Kartezyen uzaydaki yörüngelerin takibi Şekil 6.13'te gösterilmektedir. Pozisyon yörüngeleri, başlangıç pozisyonlar için $P(t_0) = [34 \quad 0 \quad 44]^T$, bitiş pozisyonlar için $P(t_f) = [47{,}81 \quad 27{,}61 \quad 35{,}21]^T$ ve gerçekleşme zamanı olarak 15 s belirlenmiştir.

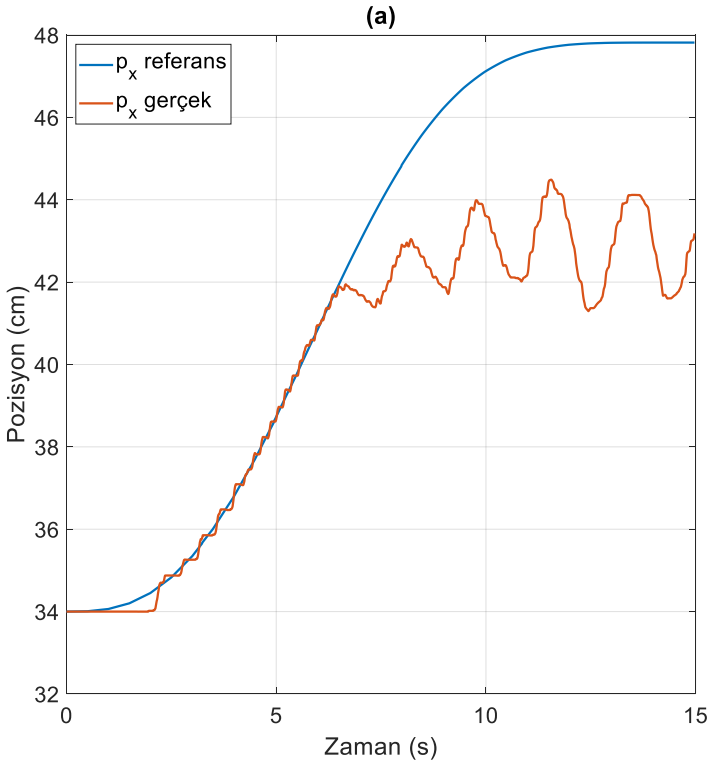
$$p_x(t) = 34 - 0{,}041t^3 - 0{,}004t^4 - 0{,}0001\,t^5 \tag{6.15}$$

$$p_y(t) = 0{,}082t^3 - 0{,}008t^4 - 0{,}0002\,t^5 \tag{6.16}$$

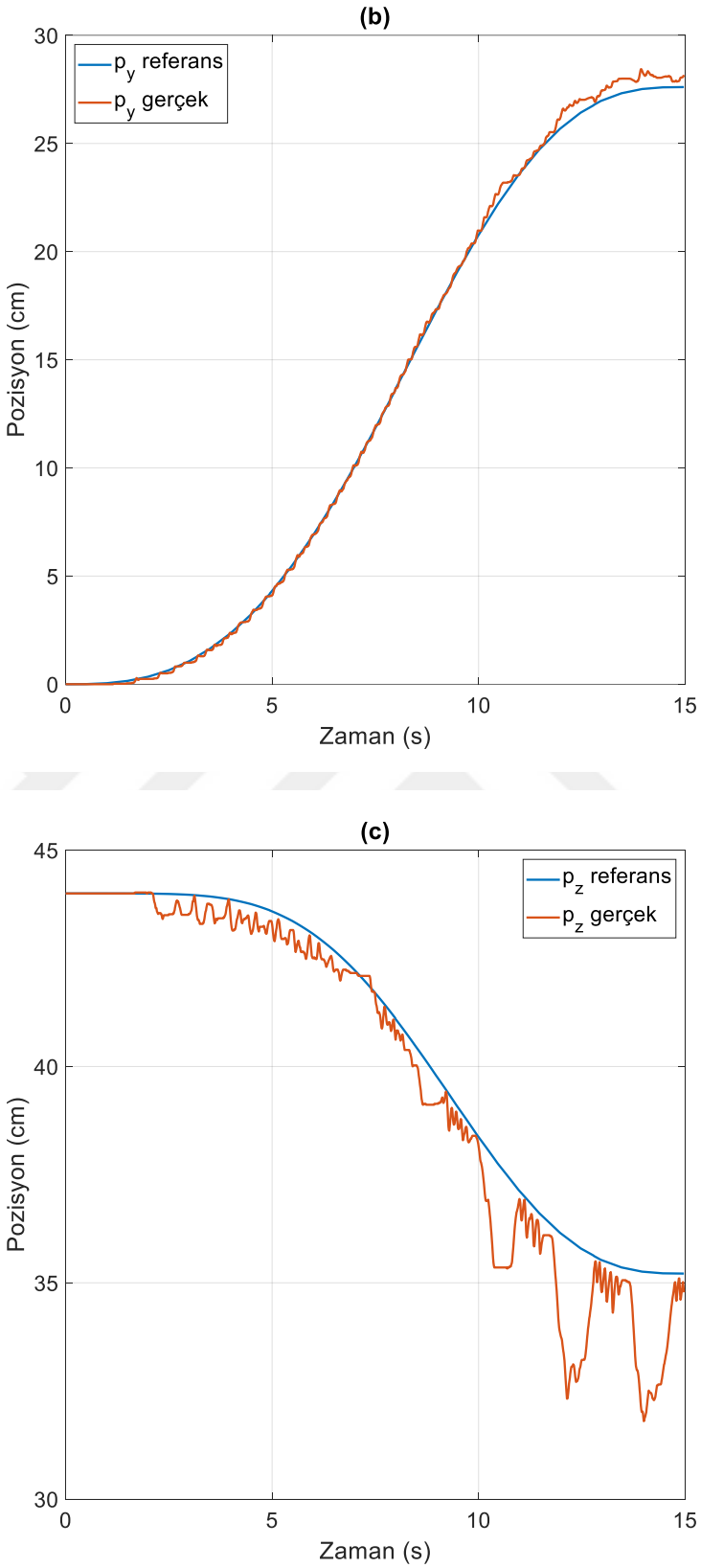
$$p_z(t) = 44 - 0{,}026t^3 + 0{,}0026t^4 - 0{,}000007t^5 \tag{6.17}$$



Şekil 6.12 : Empedans kontrolün $\zeta = 2{,}2$, $\omega_n = 4{,}5$ değerlerindeki temas kuvveti.

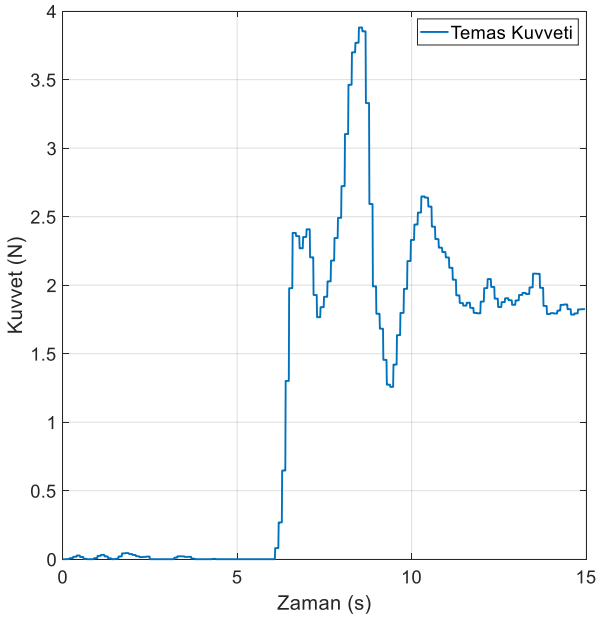


Şekil 6.13 : Empedans kontrolün $\zeta = 2{,}2$, $\omega_n = 4{,}5$ değerlerindeki (a) p_x, (b) p_y, (c) p_z için referans ve gerçek yörüngeleri.

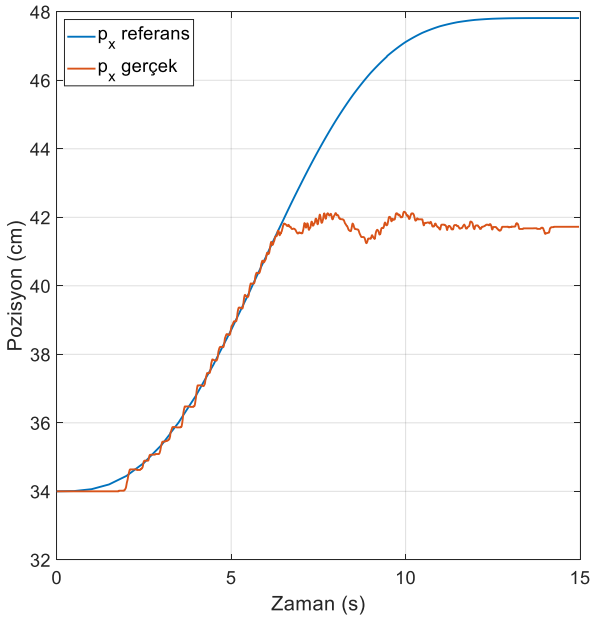


Şekil 6.13 (devam): Empedans kontrolün $\zeta = 2{,}2$, $\omega_n = 4{,}5$ değerlerindeki (a) p_x, (b) p_y, (c) p_z için referans ve gerçek yörüngeleri.

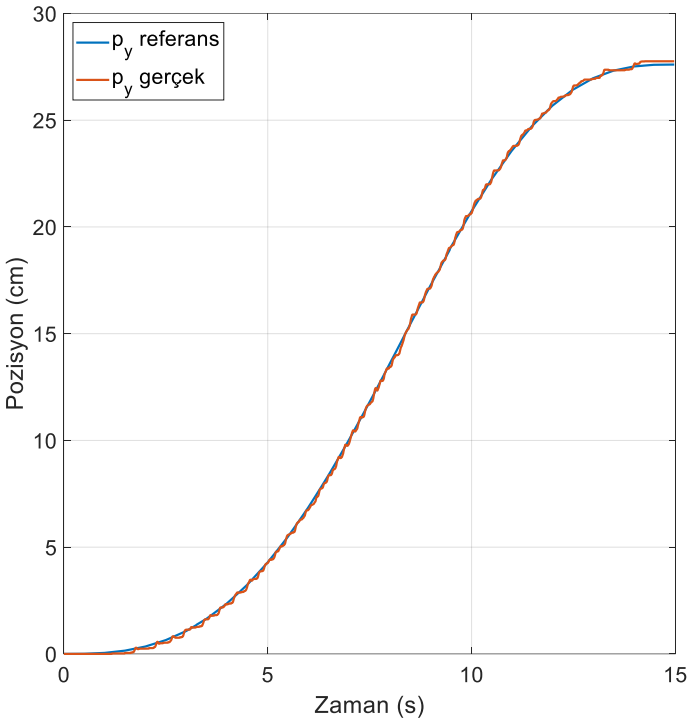
Bu uygulama temas sonrası salınımın bitirilmesi için sönüm katsayısı artırılmıştır. Empedans katsayıları $k_x = 20$, $b_x = 100$, $m_x = 1$ olacak şekilde seçilmiştir (ζ=11,2, $\omega_n = 4{,}5$). x eksenindeki yörüngede bir önceki uygulamada olduğu gibi $p_x \cong 42$ cm'de çevre ile temas başlamıştır. Temas kuvveti Şekil 6.14'te Kartezyen uzayındaki pozisyonlar Şekil 6.15'te gösterilmektedir.

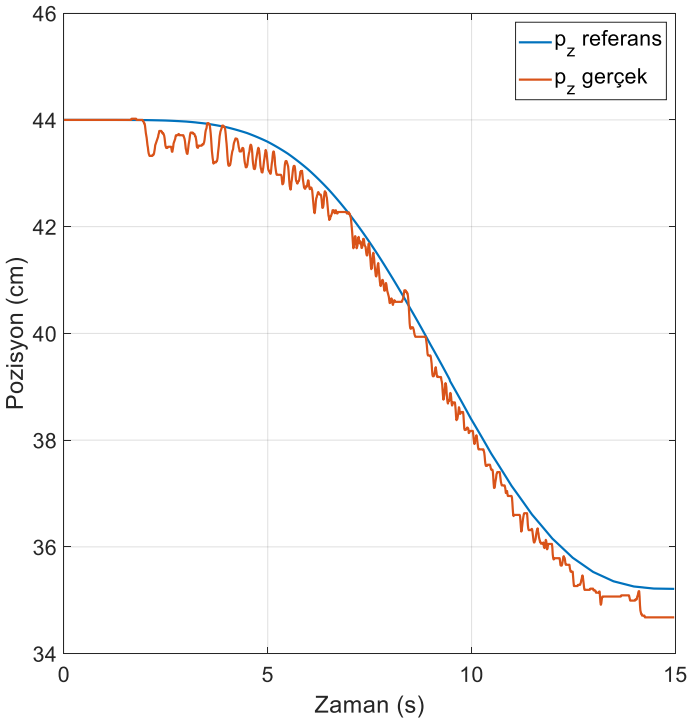


Şekil 6.14 : Empedans kontrolün $\zeta = 11{,}2$, $\omega_n = 4{,}5$ değerlerindeki temas kuvveti.



Şekil 6.15 : Empedans kontrolün $\zeta = 11{,}2$, $\omega_n = 4{,}5$ değerlerindeki (a) p_x, (b) p_y, (c) p_z için referans ve gerçek yörüngeleri.





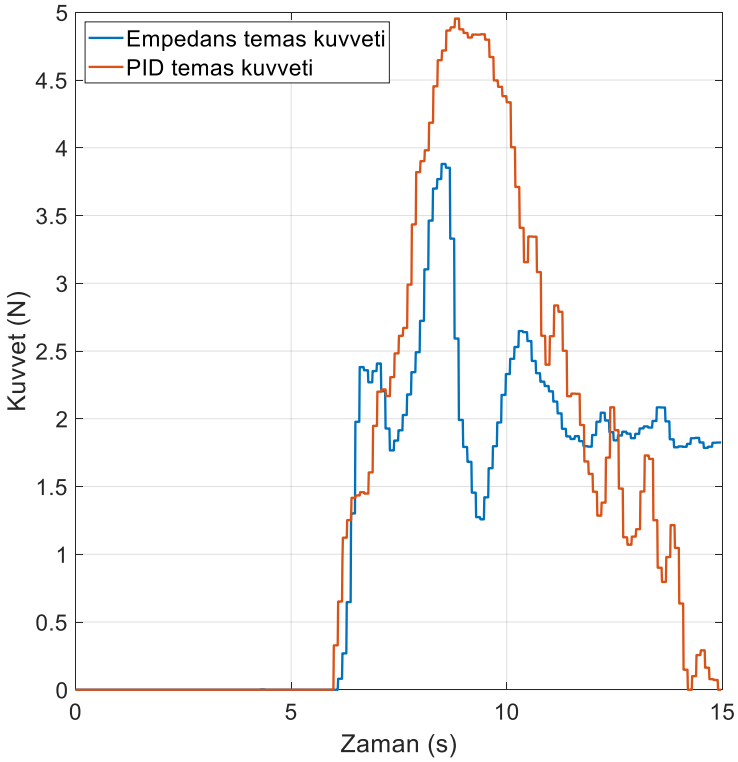
Şekil 6.15 (devam): Empedans kontrolün $\zeta = 11{,}2$, $\omega_n = 4{,}5$ değerlerindeki (a) p_x, (b) p_y, (c) p_z için referans ve gerçek yörüngeleri.

Uygulamalarda pozisyon tabanlı empedans kontrolü temas öncesinde yörünge takibini gerçekleştirmiştir. Uygulamaların temas sonrası kararlı bir biçimde takibi

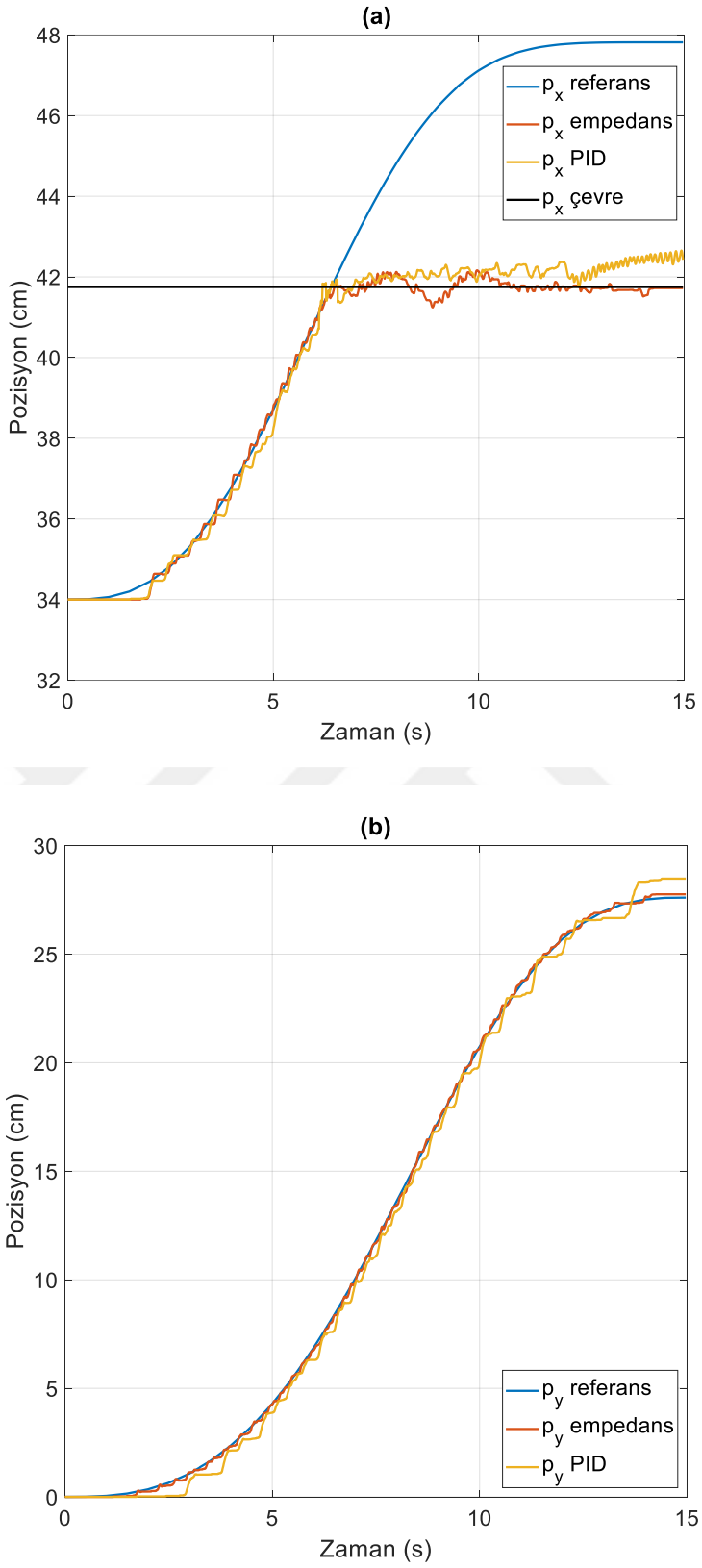
sürdürülebilmesi için empedans katsayıları aşırı sönümlü cevaplar verecek biçimde seçilmiştir. Şekil 6.13'te temas sonrası x ekseninde salınım gerçekleşmiştir, bu durum yapılacak olan diğer uygulamada sönüm oranını arttırmak gerektiğini göstermiştir. Şekil 6.15'te empedans katsayılarının değiştirilmesiyle arttırılan sönüm oranı sayesinde robot, Kartezyen uzaydaki yörünge takibini temas sonrası da kararlı bir biçimde gerçekleştirmiştir.

6.3 Yerçekimi dengelemeli PID ve Empedans uygulamalarının karşılaştırılması

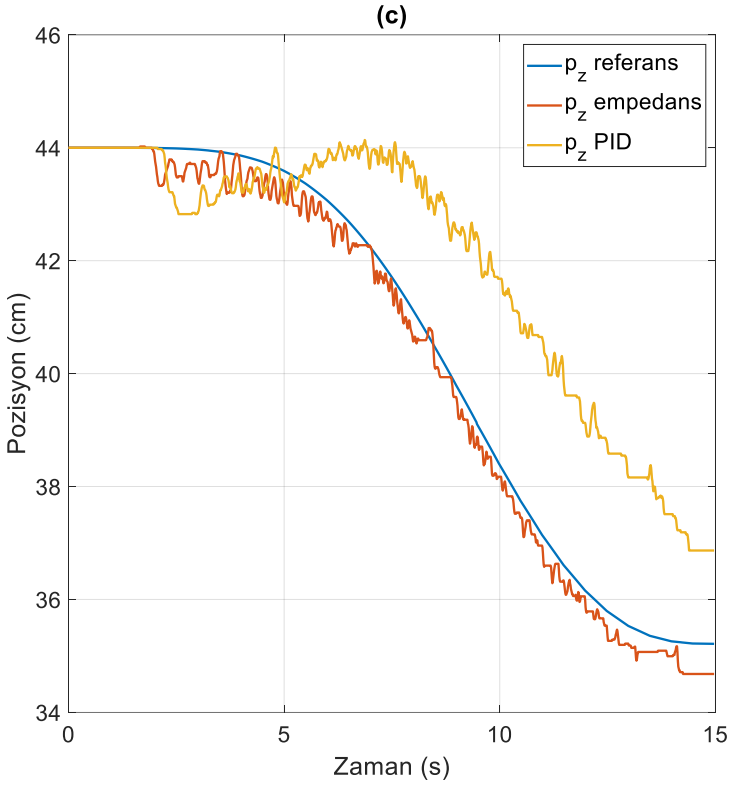
Uygulama empedans kontrol olmaksızın yerçekimi dengelemeli PID ve empedans kontrolün dahil edildiği yerçekimi dengelemeli PID arasındaki farkları gözlemlemek için yapılmıştır. Temas kuvvetleri Şekil 6.16'da ve Kartezyen uzaydaki pozisyonlar Şekil 6.17'de karşılaştırılmaktadır.



Şekil 6.16 : PID ve empedans kontrolün temas kuvvetleri.



Şekil 6.17 : PID ve empedans kontrolün (a) p_x, (b) p_y, (c) p_z için referans ve gerçek yörüngeleri.



Şekil 6.17 (devam): PID ve empedans kontrolün (a) p_x, (b) p_y, (c) p_z için referans ve gerçek yörüngeleri.

Pozisyon tabanlı empedans kontrolde x ekseninde gerçekleşen temasa karşılık y ve z eksenleri yörünge dahilinde hareket edilmiştir. Sadece PID kontrol ile yapılan çalışmada temas öncesi yörünge takibi gerçekleştiren algoritma temas sonrası x ekseninde gitmeye zorlanırken z ekseninde yörüngeyi takip edememiştir. Çizelge 6.3'te Kartezyen eksenindeki yüzde hatalar verilmiştir.

Çizelge 6.3 : Empedans ve PID kontrol Kartezyen eksenindeki % hataları.

	p_x	p_y	p_z
Empedans kontrol	0,28	0,13	0,73
PID kontrol	0,78	0,59	4,35

Temas sonrası kuvvet değerleri, empedans kontrolde PID kontrole göre azaldığı gözlemlenmektedir.

7. SONUÇ

Bu çalışmada 3-SD robot tasarım ve imalatı gerçekleştirip pozisyon tabanlı empedans kontrolü uygulanmıştır. Bu amaç doğrultusunda 3-SD robotun gerekli tork hesaplamaları Matlab/Simulink ara yüzünde Robotic Toolbox kullanılarak çıkarılmıştır. Gerçek zamanlı testler için kullanılacak olan robotun bulunun torklar yardımıyla uygun motorlar alınmıştır. CAD programından çizilen robotun taban kısmı ve uzuvları üç boyutlu yazıcıdan elde edilmiştir.

Empedans kontrol uygulamaları, Matlab/Simulink'te teorik bilgilerin yardımıyla temas gerçekleşecek şekilde yapılmıştır. İç döngüde hesaplanan tork kontrol, dış döngüde pozisyon tabanlı empedans kontrol kullanılmıştır. Uygulamalar, x eksenindeki temas mesafesinin değişmesiyle denenmiştir. Temas sonrası Kartezyen uzaydaki yörüngelerin takibi bütün simülasyon uygulamalarda gerçekleştirilmiştir.

Robotun istenen yörüngeyi takip etmesi için gerçek zamanlı yerçekimi dengelemeli PID kontrolü kullanılmıştır. Gerçek zamanlı uygulamalarda kullanılacak olan PID katsayıları, 3-SD robotun her uzvunun matematiksel modellerinin çıkarılmasından sonra kökler gerçek eksen üzerine kalacak şekilde bulunmuştur. Köklerin gerçek eksende seçilmesinin nedeni sistemin yüzde aşım yapmasını engellemektir. Bu PID katsayılarıyla yapılan yörünge takibi 16 s testi çalışma zamanlarında eksenlerin sırasıyla 1.eksen için %1,28, 2.eksen için %0,86 ve 3.eksen için %2,4 hata oranıyla gerçekleştirilmiştir.

Robotun gerçek zamanlı uygulamaları, iç döngüde yer çekimi dengelemeli PID kontrol ile gerçekleştirilmiştir. Simülasyonda uygulanan hesaplanan tork kontrolü yerine yer çekimi dengelemeli PID kontrolün sebebi, dinamik denklemlerin hesaplanıp sisteme entegre edilmesinin yeterince hızlı olmamasıdır.

Gerçek zamanlı kuvvet kontrol uygulamaları iç döngüde eklem uzayında yerçekimi dengelemeli PID kontrolü, dış döngüde kuvvet kontrolü için Kartezyen uzayında empedans kontrol kullanılmıştır. Yapılan uygulamalarda 3-SD robotun takibini gerçekleştirdiği Kartezyen referans yörünge dahilinde x ekseninde teması

sağlanmıştır. Seçilen empedans katsayılarının köklerinin gerçek eksende olması istenerek $\zeta > 1$ (aşırı sönümlü) olarak seçilmiştir.

Empedans katsayılarının sönüm oranı $\zeta = 2{,}2$ olarak seçilen uygulamada robot çevre ile teması ettiği x ekseninde salınım yaparak hareket etmiştir. Temas kuvveti kararsız bir şekilde herhangi bir değere oturmadan uygulama tamamlanmıştır. Bu uygulama sönüm oranının yetersiz olduğunu göstermiştir. Empedans katsayılarının sönüm oranı $\zeta = 11{,}2$ olacak şekilde arttırılarak uygulama tekrarlanmıştır. Kartezyen uzaydaki yörüngenin temas sonrası da kararlı bir şekilde takibi gerçekleştirilmiştir. Temas kuvveti de denge noktasına oturarak uygulama tamamlanmıştır.

Kuvvet kontrol ve hareket kontrolün çevre temasının karşılaştırılması gerçekleştirilmiştir. Empedans kontrol temas sonrası diğer eksenlerde belirlenen Kartezyen yörüngeyi takip etmektedir. Hareket kontrol ise temas sonrası kuvvet artışı ve z ekseninde %4,35 oranında yukarı yönlü sapma gerçekleşmiştir. Maksimum temas kuvveti PID kontrole kıyasla empedans kontrolde %21,66 oranda azalmış ve denge noktasına oturmuştur.

Gelecekte yapılacak çalışmada, eyleyici seçimi için esnek eyleyiciler, kuvvet sensörü için Kartezyen uzayda torkları ve kuvvetleri algılayacak sensör, hareket kontrolü için değişken katsayılı gelişmiş bir kontrolcü ve kuvvet geri beslemesiyle birlikte katsayıları değişken olan kuvvet kontrolcü seçimleri yapılarak daha stabil çalışmalar elde edilebilir.

KAYNAKLAR

[1] **Zeng, G. & Hemami, A.** (1997). An overview of robot force control, *Robotica*, 473-482.

[2] **Siciliano, B. &Villani, L.** (2012). *Robot force control*. Springer Science & Business.

[3] **De Schutter, J., Bruyninckx, H., Zhu, W. H., & Spong, M. W.** (1998). Force control: A bird's eye view. In Control problems in robotics and automation (pp. 1-17). Springer, Berlin, Heidelberg.

[4] **Hogan, N.** (1985). Impedance Control: An Approach to Manipulation: Part I~ III. Trans. of ASME Journal of Dynamic System, Measurement, and Control, 107, 1.

[5] **Hogan, N.** (1984). Adaptive control of mechanical impedance by coactivation of antagonist muscles. *IEEE Transactions on automatic control*, *29*(8), 681-690.

[6] **Hogan, N.** (1989). Controlling impedance at the man/machine interface. In *1989 IEEE International Conference on Robotics and automation* (pp. 1626-1627).

[7] **Hogan, N.** (1985). The mechanics of multi-joint posture and movement control. *Biological cybernetics*, *52*(5), 315-331.

[8] **Song, P., Yu, Y., & Zhang, X.** (2017). Impedance control of robots: an overview. In *2017 2nd international conference on cybernetics, robotics and control (CRC)* (pp. 51-55). IEEE.

[9] **Calanca, A., & Fiorini, P.** (2017). Impedance control of series elastic actuators based on well-defined force dynamics. *Robotics and Autonomous Systems*, *96*, 81-92.

[10] **Calanca, A., Muradore, R., & Fiorini, P.** (2017). Impedance control of series elastic actuators: Passivity and acceleration-based control. *Mechatronics*, *47*, 37-48.

[11] **Li, X., Liu, Y. H., & Yu, H.** (2018). Iterative learning impedance control for rehabilitation robots driven by series elastic actuators. *Automatica*, *90*, 1-7.

[12] **Lau, J. Y., Liang, W., & Tan, K. K.** (2019). Enhanced robust impedance control of a constrained piezoelectric actuator-based surgical device. *Sensors and Actuators A: Physical*, *290*, 97-106.

[13] **de Gea, J., & Kirchner, F.** (2008). Modelling and simulation of robot arm interaction forces using impedance control. IFAC Proceedings Volumes, 41(2), 15589-15594.

[14] **Baptista, L. F., & da Costa, J. M. S.** (1999). A force control approach of robotic manipulators in non-rigid environments. In *1999 European Control Conference (ECC)* (pp. 2777-2782). IEEE.

[15] **Love, L. J., & Book, W. J.** (1995). Environment estimation for enhanced impedance control. In *Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (Vol. 2, pp. 1854-1859). IEEE.

[16] **Mills, J. K., & Lokhorst, D. M.** (1993). Control of robotic manipulators during general task execution: A discontinuous control approach. *The International Journal of Robotics Research*, *12*(2), 146-163.

[17] **Kong, K., Bae, J., & Tomizuka, M.** (2009). Control of rotary series elastic actuator for ideal force-mode actuation in human–robot interaction applications. *IEEE/ASME transactions on mechatronics*, *14*(1), 105-118.

[18] **Dai, P., Lu, W., Le, K., & Liu, D**. (2020). Sliding Mode Impedance Control for contact intervention of an I-AUV: Simulation and experimental validation. *Ocean Engineering*, *196*, 106855.

[19] **van Spaandonk, V.** (2016). *Learning Variable Impedance Control: A Model-Based Approach Using Gaussian Processes*. (Yüksek lisans tezi). TU DELFT.

[20] **Corke, P.** (1996). A robotics toolbox for MATLAB, *IEEE Robotics & Automation Magazine*, (pp. 24-32)

[21] **Corke, P.** (2017). *Robotics, vision and control: fundamental algorithms in MATLAB® second, completely revised*. Springer.

[22] **Hamedani, M. H., Zekri, M., Sheikholeslam, F., Salvaggio, M., Ficuciello, F., & Siciliano, B.** (2020). Recurrent Fuzzy Wavelet Neural Network Variable Impedance Control of Robotic Manipulators with Fuzzy Gain Dynamic Surface in an Unknown Varied Environment. *Fuzzy Sets and Systems*.

[23] **Dede, M. İ. C.** (2005). *Position/force control of robot manipulators.* (Yüksek lisans tezi). ODTÜ.

[24] **Sadeghian, H., Ficuciello, F., Villani, L., & Keshmiri, M.** (2012). Global impedance control of dual-arm manipulation for safe interaction. *IFAC Proceedings Volumes*, *45*(22), 767-772.

[25] **Duan, J., Gan, Y., Chen, M., & Dai, X.** (2018). Adaptive variable impedance control for dynamic contact force tracking in uncertain environment. *Robotics and Autonomous Systems*, *102*, 54-65.

[26] **Özgören, M. K.** (2016), *Robot Manipülatörlerin Dinamiği ve Kontrolu*, Robot Dinamiği ve Kontrolu Çalıştay Kitabı, Makina Teorisi Derneği ve Gazi Üniversitesi.

[27] **Spong, M. W., & Vidyasagar, M.** (2008). *Robot dynamics and control*. John Wiley & Sons.

[28] **Denavit, J. & Hartenberg, R.** (1955). A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices, *ASME E, Journal of Applied Mechanics*, (ss. 215–221).

[29] **Craig, J.** (2005) *Introduction to robotics: Mechanics and control*, 3rd ed. Pearson/Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey

[30] **Bingül, Z., & Küçük, S.** (2009). *Robot kinematiği*. Birsen Yayınevi.

[31] **Sciavicco, L., & Siciliano, B.** (2012). *Modelling and control of robot manipulators*. Springer Science & Business Media.

[32] **Pololu - 150:1 Metal Gearmotor 37Dx73L mm 12V with 64 CPR Encoder (Helical Pinion)** (t.y). Erişim: 27 Kasım 2020 https://www.pololu.com/product/2828/specs.

[33] **Pololu Dual VNH5019 Motor Driver Shield for Arduino** (t.y). Erişim: 27 Kasım 2020 https://www.pololu.com/product/2507/specs.

[34] **Arduino Mega 2560 Rev3 | Arduino Official Store** (t.y). Erişim: 27 Kasım 2020 https://store.arduino.cc/arduino-mega-2560-rev3.

[35] **Load Cell - 200kg, Disc (TAS606) - SEN-13332 - SparkFun** (t.y). Erişim: 27 Kasım 2020 https://www.sparkfun.com/products/13332.

[36] **SparkFun Load Cell Amplifier - HX711 - SEN-13879 - SparkFun Electronics** (t.y). Erişim: 1 Aralık 2020 https://www.sparkfun.com/products/13879.

[37] **Kelly, R., Davila, V. S., & Perez, J. A. L.** (2006). *Control of robot manipulators in joint space*. Springer Science & Business Media.

[38] **Yoshikawa, T.** (1990). *Foundations of robotics: analysis and control*. MIT press.

[39] **Tran, M. S., Le, N. B., Dang, D. C., Choi, E. H., & Kim, Y. B.** (2017). Independent joint control system design method for robot motion reconstruction. In *International Conference on Advanced Engineering Theory and Applications* (pp. 627-638). Springer, Cham.

[40] **Cansever, G.** (2007). *Otomatik Kontrol Ders # 6-8*. (t.y). Erişim: 27 Kasım 2020 https://docplayer.biz.tr/40869067-Otomatik-kontrol-sistem-modellerinin-zaman-cevabi-ve-performans-kriterleri-prof-dr-galip-cansever-ders-6-8-otomatik-kontrol.html

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad: Ayberk BEYHAN

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans:** 2017, Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği
- **Yüksek Lisans:** 2021, Bursa Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mekatronik Mühendisliği Lisansüstü Programı