

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MOBİL İNSANSI ROBOT TASARIMI
İMALATI VE KONTROLÜ**

DOKTORA TEZİ

Nurettin Gökhan ADAR

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : MAKİNE TASARIM VE İMALAT
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Recep KOZAN

Mayıs 2016

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ


MOBİL İNSANSI ROBOT TASARIMI
İMALATI VE KONTROLÜ


DOKTORA TEZİ


Nurettin Gökhan ADAR

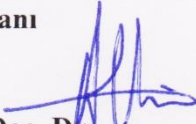
Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

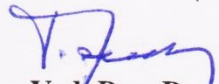
Bu tez 27 / 05 /2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.


Prof. Dr.
Recep KOZAN
Jüri Başkanı


Prof. Dr.
Cemil ÖZ
Üye


Doç. Dr.
Akın Oğuz KAPTI
Üye


Doç. Dr.
Ayhan KURAL
Üye


Yrd. Doç. Dr.
Turan ŞİŞMAN
Üye

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.



Nurettin Gökhan ADAR

27.05.2016

TEŞEKKÜR

Doktor eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Prof. Dr. Recep KOZAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Bu günlere gelmemde pay sahibi olan, her zaman manevi desteklerini esirgemeyen annem N. Rezzan ALTINÇENE'ye ve ablam Yasemin ADAR'a teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca bu çalışmanın maddi ačıdan desteklenmesine olanak sağlayan Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Komisyon Başkanlığına (Proje No: 2013-01-06-032) teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER LİSTESİ	v
TABLolar LİSTESİ.....	v
ÖZET	x
SUMMARY	xi
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı.....	9
1.2. Tezin Organizasyonu	10
BÖLÜM 2.	
ROBOT MEKANİĞİ.....	11
2.1. Robot Kinematığı.....	11
2.1.1. Robot ileri kinematığı	12
2.1.1.1. Robot koluna ait ileri kinematik denklemlerin elde edilmesi	15
2.1.1.2. Robot başına ait ileri kinematik denklemlerin elde edilmesi	19
2.1.2. Robot ters kinematığı	20
2.1.2.1. Robot koluna ait ters kinematik denklemlerin elde edilmesi	21
2.1.2.2. Robot başına ait ters kinematik denklemlerin elde edilmesi	23
2.2. Robot Dinamiğı.....	24

BÖLÜM 3.

KAMERA SİSTEMİ ve GÖRÜNTÜ İŞLEME TEKNİKLERİ	29
3.1. İğne Deliği Kamera Modeli	29
3.2. Görüntü İşleme.....	34
3.2.1. Sayısal görüntülerin bilgisayar ortamında temsil edilmesi	37
3.2.2. Görüntü işleme aşamaları.....	39
3.2.2.1. Kullanılacak görüntünün elde edilmesi	39
3.2.2.2. Önileme.....	39
3.2.2.3. Özellik çıkartımı ve veri azaltma	39
3.2.2.4. Nitelik analizi	43

BÖLÜM 4.

ROBOT KONTROLÜ	44
4.1. PID - 2DOF PID Kontrolör.....	45
4.2. Görsel Servo Kontrol	47
4.2.1. Kamera konumu ve sayısı	47
4.2.2. Görsel servo kontrol sınıflandırması	49
4.3. Yapay Sinir Ağları	53

BÖLÜM 5.

UYGULAMALAR	56
5.1. Robotun Tasarımı ve İmalatı.....	56
5.2. Robotun Bilgisayar ile Haberleşmesi.....	62
5.3. Robota Uygulanan Kontrol Algoritmaları	64
5.3.1. Robotun kollarına PID ve 2dof PID uygulaması	65
5.3.2. Pozisyon tabanlı görsel servo uygulamaları.....	76
5.3.2.1. Yapay sinir ağları	80
5.3.2.2. Pozisyon tabanlı görsel servo uygulama 1	82
5.3.2.3. Pozisyon tabanlı görsel servo uygulama 2	92
5.3.2.4. Pozisyon tabanlı görsel servo uygulama 3	103

BÖLÜM 6.	
SONUÇLAR	109
KAYNAKLAR	112
ÖZGEÇMİŞ	116



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. MIT tarafından geliştirilen robot	2
Şekil 1.2. 1999 yılında geliştirilen robot.....	2
Şekil 1.3. a) Armar-I b) Armar-II c) Armar-III.....	3
Şekil 1.4. Michigan üniversitesi ait robot	3
Şekil 1.5. Robota ait uzuvlar	4
Şekil 1.6. Robovie isimli robot	4
Şekil 1.7. Yiren isimli robot.....	5
Şekil 1.8. Justin isimli robot.....	6
Şekil 1.9. Robutun alt platformu	6
Şekil 1.10. Mahru-m isimli robot.....	6
Şekil 2.1. İleri ve ters kinematik gösterimi	12
Şekil 2.2. D-H yönteminde kullanılan değişkenlerin gösterilmesi: eklem açısı(θ) ve eklem uzunluğu (d), link uzunluğu (a) ve link bükme açısı (α).....	13
Şekil 2.3. Beş serbestlik dereceli koluna ait farklı tasarımlar	15
Şekil 2.4. Seçilen kol yapısı ve referans eksen takımı	16
Şekil 2.5. Seçilen kafa yapısı ve referans eksen takımı	19
Şekil 2.6. Matlab/Simulink blok diyagramı	26
Şekil 2.7. Herbir ekleme ait hız/tork grafikleri	27
Şekil 3.1. Görüntü Sistemi bileşenleri kamera-bilgisayar-yazılım	29
Şekil 3.2. İğne deliği modeli	30
Şekil 3.3. İğne deliği kamera modeli	30
Şekil 3.4. Perspektif iz düşüm modeli.....	31
Şekil 3.5. Kamera piksel düzlemi	33
Şekil 3.6. RGB görüntü formatı	35
Şekil 3.7 Gri seviye renk skalası	35
Şekil 3.8. Üç farklı formata ait görüntü	36

Şekil 3.9. Görüntünün orijinali ve sayısallaştırma işlemi sonucu elde edilen matris .37	
Şekil 3.10. Siyah-beyaz görüntüden elde edilen matris ve piksel gösterimi.....	38
Şekil 3.11. Renkli görüntüden elde edilen matrisler	38
Şekil 3.12. Temsil işlemi.....	42
Şekil 4.1. Kapalı çevrim kontrolör genel yapısı.....	44
Şekil 4.2. 2dof PID blok diyagramı	46
Şekil 4.3. 2 dof-PID eş değer blok diyagramı.....	46
Şekil 4.4. a- Uç işlevciye sabitlenmiş model b- Çalışma uzayına sabitlenmiş model c- Hibrit model	48
Şekil 4.5. Uç işlevciye sabitlenmiş model için kamera-nesne-robot ilişkisi.....	48
Şekil 4.6. Çalışma uzayına sabitlenmiş model için kamera-nesne-robot.....	49
Şekil 4.7. Dinamik pozisyon tabanlı kontrol yöntemi.....	50
Şekil 4.8. Dinamik görüntü tabanlı yöntem	51
Şekil 4.9. Pozisyon tabanlı görsel servo yöntemi	51
Şekil 4.10. Görüntü tabanlı görsel servo yöntemi.....	52
Şekil 4.11. Hibrit servo kontrol yöntemi.....	52
Şekil 4.12. Tek giriş nöron.....	53
Şekil 4.13. YSA'nın temel yapısı.....	54
Şekil 5.1. Robotun tasarım resmi	57
Şekil 5.2. Robot platformun ana boyutları	57
Şekil 5.3. Motorların kollarda uzuvlara bağlanma şekli	58
Şekil 5.4. Omuz motor bağlantı parçası	58
Şekil 5.5. Omuz dirsek bağlantı parçası.....	59
Şekil 5.6. İmalatı gerçekleştirilen robotun sol kolu	60
Şekil 5.7. Alt şase kayış kasnak mekanizması	60
Şekil 5.8. a) Robotun birinci versiyonu b) Robotun ikinci versiyonu	61
Şekil 5.9. Robotun son hali	61
Şekil 5.10. Dynamixel marka örnek motor	62
Şekil 5.11. Dynamixel motor seri bağlantı şeması.....	62
Şekil 5.12. Gigabyte marka bilgisayar	63
Şekil 5.13. USB2dynamixel bağlantı şeması	64
Şekil 5.14. RS-485 haberleşme paket yapısı	64

Şekil 5.15. Robot PID kontrol blok diyagramı	66
Şekil 5.16. Robot 2 dof PID kontrol blok diyagramı	66
Şekil 5.17. $z=-1$, $x=26$ $y = 27$ için elde edilen PID ve 2 dof PID grafikleri	70
Şekil 5.18. $z=-3$, $x=15$, $y = 31$ için elde edilen PID ve 2 dof PID grafikleri	71
Şekil 5.19. $z=-3$, $x=21$, $y = 24$ için elde edilen PID ve 2 dof PID grafikleri	72
Şekil 5.20. $z=-6$ $x=21$ $y = 27$ için elde edilen PID ve 2 dof PID grafikleri	73
Şekil 5.21. $z=-9$ $x=26$, $y = 24$ için elde edilen PID ve 2 dof PID grafikleri	74
Şekil 5.22. $z=-12$ $x=15$ $y = 24$ için elde edilen PID ve 2 dof PID grafikleri	75
Şekil 5.23. Matlab/Simulink video device bloğu	77
Şekil 5.24. Renkli görüntüden siyah-beyaz görüntü elde etme.....	77
Şekil 5.25. Cismin kamerada oluşan imajı.....	78
Şekil 5.26. Cisim-kamera-kol eksen takımları.....	80
Şekil 5.27. Orijinal görüntü ile bozulma meydana gelmiş görüntü	80
Şekil 5.28. Yapay sinir ağları çıkışı	81
Şekil 5.29. Pozisyon tabanlı servo motor kontrolü uygulama 1 blok diyagramı	82
Şekil 5.30. Pozisyon tabanlı servo motor kontrolü ait akış diyagramı.....	83
Şekil 5.31. $z=-10,23$, $x=1,73$ $y = 29,73$ için elde edilen grafikler	85
Şekil 5.32. $z=-2,35$, $x=10,06$ $y = 27,67$ için elde edilen grafikler	86
Şekil 5.33. $z=-2,85$, $x=8,67$, $y = 33,51$ için elde edilen grafikler	87
Şekil 5.34. koordinatları $z=-6,19$, $x=18,30$, $y = 36,25$ için elde edilen grafikler.....	89
Şekil 5.35. $z=-6,15$, $x=3,95$, $y = 33,89$ için elde edilen grafikler	90
Şekil 5.36. $z=-7,81$, $x=-1,01$, $y = 38,1$ için elde edilen grafikler	91
Şekil 5.37. Pozisyon tabanlı servo motor kontrolü uygulama 2 blok diyagramı	93
Şekil 5.38. Pozisyon tabanlı servo motor kontrolüne ait akış diyagramı.....	94
Şekil 5.39. $z=-0,97$, $x=22,1$, $y=32,9$ için elde edilen grafikler	96
Şekil 5.40. $z=-7,26$, $x=25,38$, $y=30,8$ için elde edilen grafikler	97
Şekil 5.41. $z=-8,41$, $x=25,36$, $y=34,15$ için elde edilen grafikler	98
Şekil 5.42. $z=-1,77$, $x=25,21$, $y=32,77$ için elde edilen grafikler	100
Şekil 5.43. $z=-6,63$, $x=25,45$, $y=34,98$ için elde edilen grafikler	101
Şekil 5.44. $z=-8,37$, $x=20,42$, $y=33,97$ için elde edilen grafikler	102
Şekil 5.45. Değişken kesitli cisim.....	104
Şekil 5.46. Genişliği değişen cisim robot sağ kol için elde edilen x-y-z grafikleri .	106

Şekil 5.47. Genişliği değişen cisim robot sağ kol için elde edilen x-y-z grafikleri . 107



TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1. D-H parametre tablosu.....	15
Tablo 2.2. Sol kol için D-H parametre tablosu	17
Tablo 2.3. Kafaya ait D-H parametre tablosu	19
Tablo 2.4. Robot kolunun özellikleri	26
Tablo 5.1. Robota ait ağılıklar.....	59
Tablo 5.2. Servo motorların teknik özellikleri	63
Tablo 5.3. PID ve 2-dof PID kontrol sonucu elde edilen değerler.....	67
Tablo 5.4. Elde tutulan cisim için robot sol kol tutucu x-y-z referans-gerçek değerleri ve % hata değerleri.....	84
Tablo 5.5. Elde tutulan cisim için robot sağ kol tutucu x-y-z referans-gerçek değerleri ve % hata değerleri.....	88
Tablo 5.6. Masaüstü duran cisim için robot sol kol tutucu x-y-z referans-gerçek değerleri ve % hata değerleri	95
Tablo 5.7. Masaüstü duran cisim için robot sağ kol tutucu x-y-z referans-gerçek değerleri ve % hata değerleri	99
Tablo 5.8. Genişliği değişen cisim için robot sol kol tutucu x-y-z referans-gerçek değerleri ve % hata değerleri	105
Tablo 5.9. Genişliği değişen cisim için robot sağ kol tutucu x-y-z referans-gerçek değerleri ve % hata değerleri	107

ÖZET

Anahtar kelimeler: Robotik, servo kontrol, görüntü işleme, mobil insansı robot

Bu çalışmada, görüntü uzayı içerisine yerleştirilen cisimlerin robotun kamerası ile algılanıp cismin robot tarafından otonom olarak tutulması amaçlanmıştır. Bu amaca uygun mobil insansı robot tasarlanıp imal edilmiştir. Robotun her bir kolunda tutucu ile birlikte 6, baş kısmında 2 ve paletli mekanizmasında 2 olmak üzere toplam 16 serbestlik derecesi bulunmaktadır.

Pozisyon tabanlı görsel servo kontrolün temelini görüntü işleme ve kontrol oluşturmaktadır. Robotun kontrolü için kinematik denklemlere ihtiyaç duyulmuştur. Robotun koluna ve başına ait ileri denklemleri Denavit Hartenberg yöntemi ile ters kinematik denklemleri cebirsel yöntemle elde edilmiştir. Görüntü işleme teknikleri ile cismin ihtiyaç duyulan konum koordinatları hesaplanmıştır. Ancak burada görüntü işleme sırasında robotun başının hareketinden dolayı elde edilen görüntünün bozulduğu tespit edilmiştir. Bu sorunu aşmak için yapay sinir ağlarından destek alınarak bir düzeltme katsayısı (kd) sürekli olarak güncellenerek görüntünün iyileşmesi sağlanmıştır. İlk olarak pozisyon tabanlı görsel servo kontrolün temel kontrol algoritması belirlenmiştir. Bunun için kollara PID ve 2-dof PID kontrol uygulanıp verileri tablo ve grafik olarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar kıyaslandığında 2-dof PID'nin x-y-z değerlerinin % hatasının daha az olduğu, oturma zamanının daha kısa olduğu, salınım ve aşımalarının daha az olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlarda 2-dof PID daha başarılı olduğundan kollarin temel kontrol algoritması olarak seçilmiştir.

Yapılan çalışma renk bazlı olup görüntü işleme açısından yeşil renkli cisim seçilmiştir. Pozisyon tabanlı görsel servo kontrol ile ilgili 3 farklı uygulama gerçekleştirilmiştir. Birinci uygulamada 7-9-11 cm yüksekliğinde, dikdörtgen şekilli cisim insan eli tarafından tutulup robotun yakalaması amaçlanmıştır. İkinci uygulamada aynı cisimlerin masa üstüne konulup robotun yakalaması amaçlanmıştır. Son uygulamada değişken kesitli cisim masa üstüne konulup robotun cismin uygun yerinden yakalaması amaçlanmıştır. Her üç uygulamada temel kontrol algoritması aynı olup birinci uygulamada robot kolu hedef noktaya direk giderken ikinci uygulamada robotun masaya çarpma ihtimali olduğundan dolayı yörünge planlaması ile gitmektedir. Üçüncü uygulamada ise cismin daralan kesitinin hesaplanması yapılip robot tutucunun cismi en uygun yerinden tutması amaçlanmıştır.

Yapılan denemelerde birinci uygulamada genellikle %90-80, ikinci uygulamada %80-70 ve son uygulamada %40-50 başarı sağlanmıştır.

DESIGN, MANUFACTURING AND CONTROL OF MOBILE ROBOT

SUMMARY

Keywords: Robotic, visual servoing, image processing, mobile humanoid robot

In this study, it is aimed to detect the objects in the image space by the humanoid robot's camera, and to grasp them by the robot's grippers autonomously. Mobile humanoid robot has been designed and manufactured for this purpose. The robot's arm has six degree of freedom, five degrees of freedom are located at the arm while one degree of freedom is assigned to the gripper. The head of the robot has two degrees of freedom which is pan-tilt platform. The robot has totally 16 dof.

Image processing and control are the basis of position based visual servoing. The kinematic equations were needed to control the robot. Forward equations of robot arm and head were obtained using D-H method while inverse kinematics equations were obtained by algebraic methods. Image processing was used to calculate coordinates of the object. However, Image deteriorated through the movement of the robot head. Neural networks was used to overcome this problem. Correction coefficient (kd) was updated to improve the image. Firstly basic control algorithm of position based visual servoing was determined. PID and dof PID controller were applied to the robot. When the results were compared, 2-DOF PID was found better than PID.

Three different applications were applied to the robot about position based visual serving. In these applications green object was used. In the first application, 7-9-11 cm high, rectangular objects kept by the human hand were used in order to grasp by the robot. In the second application same objects placed on the table were used. Variable cross-section object was used in the final application. It is placed in the table. In the first application gripper moved directly to the object while in second application path planning was used to prevent gripper impact. In the third application body tapering section was calculated to grasp by gripper.

At the end of these studies, 85%, 75% and %45 success ratios have been achieved in the first, second and third applications, respectively.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

İnsanların günlük yaşamlarında kullandıkları ürünlerin artması robotlara olan ihtiyacı arttırmıştır. İstenilen ürünlerin fabrikalarda seri ve hızlı bir şekilde üretilebilmesi için çeşitli özelliklere sahip robotlar üretime adapte edilmiştir.

Sanayide robotların başarılı bir şekilde kullanılması, özellikle 1980'lerden sonra akademik camiada insanın hareketlerini taklit edebilen robotlarla ilgili çalışmalara başlanmasını sağlamıştır. Görüntü ve hareket kabiliyeti açısından insanlara benzeyen bu robotlar literatürde İnsansı Robot (Humanoid Robot) olarak isimlendirilmektedir. Günümüzde robotlar oyuncak sanayisinden sinema sektörüne, otomasyon sistemlerinden savunma sanayisine kadar çok geniş alanlarda kullanılmaktadır.

İnsansı robotlar yapısal olarak iki ana bölüme ayrılmaktadır [1].

- İki Ayaklı İnsansı Robot (Biped Humanoid Robot)
- Gezgin İnsansı Robot (Mobile Humanoid Robot)

İki Ayaklı İnsansı Robotlar yürüme, koşma gibi temel insan hareket mekanizmaları üzerine araştırmalar yapılmak üzere geliştirilmektedir. Gezgin İnsansı Robotlar ise insan-robot etkileşimi ve işbirliği amacıyla geliştirilmektedir [2].

Gezgin İnsansı Robotlar mobilite ve esneklik sağlayan tekerlekli alt şase ile insanın üst gövdesine benzeyen yapının birleştirilmesiyle elde edilir [3]. Bu robotların tasarımında mekanik, elektronik ve sayısal yöntemlerin birleşmesine gerek duyulmaktadır.

Gezgin İnsansı Robotlar insanlar gibi yürüme, zıplama, merdiven tırmanma gibi özelliklere sahip olmasalar da son yıllarda sıklıkla kapalı ortamlarda daha az enerji harcayarak servis hizmetinde kullanılmak amacıyla geliştirilmişlerdir. Gezgin İnsansı Robotlar sadece tekerleklerin elverişli yapısından dolayı değil aynı zamanda batarya, bilgisayar v.b. ek donanımlar için yeterli alana sahip ve kolay bir şekilde monte edilebilmesinden dolayı iyi birer seçimidirler [4].

Bu alandan yapılmış birçok başarılı Gezgin İnsansı Robot tasarımı mevcuttur. Bu bölümde özellikle üniversiteler tarafında geliştirilen robotlardan bazıları hakkında bilgi verilecektir.

MIT (ABD) tarafından 1993 yılında ‘‘Cog’’ isimli robot için çalışmalara başlanmıştır (Şekil 1.1.). 21 serbestlik derecesine sahip olan robot görsel, işitsel, dokunsal algılayıcılara sahiptir [5].



Şekil 1.1. MIT tarafından geliştirilen robot

Fukuoka Üniversitesi, Kyushu Matsusita Şirketi ve Kyushu Sangyo Üniversitesinin ortaklaşa çalışması olan gezgin insansı robot 1999 yılında geliştirilmiştir. Robotun toplam kütlesi 130 kg’dır (Şekil 1.2.). Robotun boyu 180 cm, eni 74 cm ve derinliği 100 cm şeklindedir. Robotun çevresi ile etkileşime geçebilmesi için 2 adet CCD kamerası, 1 adet mikrofonu ve 1 adet hoparlörü vardır [6].



Şekil 1.2. 1999 yılında geliştirilen robot

Forschungszentrum Informatik Karlsruhe (Almanya) tarafından ‘‘ARMAR’’ isimli toplam üç adet gezgin insansı robot geliştirilmiştir. Armar-I 2000 yılında geliştirilmiş olup yerden yüksekliği 180 cm alt şasi çapı 70 cm şeklindedir ve toplam 45 kg’dır (Şekil 1.3.a). Robot toplam 25 serbestlik derecesine sahiptir. Bunlardan 3 adedi gövdenin hareketini sağlayan tekerleklere (2+1), 4 adedi gövdeye, 7 adedi kollara, 2 adedi ellere ve 3 adedi kafa bölgesine aittir [7]. İkinci model olan Armar-II 2004 yılında üretilmiştir (Şekil 1.3.b). Robot toplam 23 serbestlik derecesine sahiptir. Bunlardan 3 adedi gövdenin hareketini sağlayan tekerleklere (2+1), 7 adedi kollara ve 2 adedi boyun bölgesine aittir [8]. 2006 yılında üçüncü model olan Armar-III üretilmiştir (Şekil 1.3.c). Robot toplam 21 serbestlik derecesine sahiptir. Bunlardan 3 adedi gövdeye, 5 adedi kollara, 2 adedi bilek ve 4 adedi boyun bölgesine aittir [9].



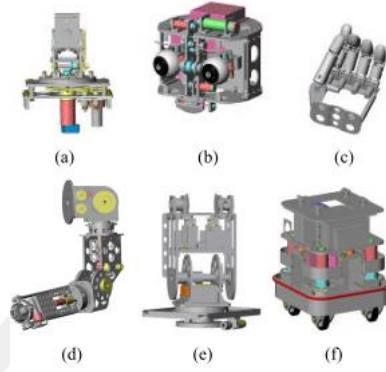
Şekil 1.3. a) Armar-I b) Armar-II c) Armar-III

Michigan Üniversitesi (ABD) tarafından 2002 yılında ‘‘DAV’’ isimli gezgin insansı robot geliştirilmiştir (Şekil 1.4.) [10].



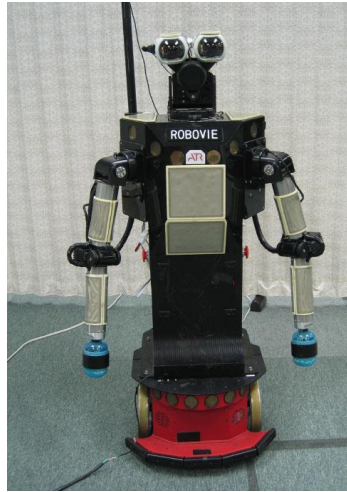
Şekil 1.4. Michigan üniversitesi ait robot

İmalatı gerçekleştirilen bu robotun ana boyutları 750x750x1700 mm şeklindedir. Robot toplam 43 serbestlik derecesine sahiptir. Bunlardan 4 adedi gövdenin hareketini sağlayan tekerleklere, 2 adedi gövdeye, 7 adedi kollara, 8 adedi ellere ve 8 adedi başa aittir (Şekil 1.5.). Ayrıca robot birbirinden bağımsız çalışabilen 2 adet kameraya sahiptir [10].



Şekil 1.5. Robota ait uzuvlar

Wakayama Üniversitesi (Japonya) tarafından 2002 yılında “Robovie” isimli gezgin insansı robot geliştirilmiştir (Şekil 1.6.). Üst kısmı insana benzeyen görüntüye sahip olan bu robot insanlarla iletişim amacıyla tasarlanmıştır. İşitme, görme ve dokunma gibi insana ait olan duyuların fonksiyonlarını yerine getirmek için değişik algılayıcılara sahiptir [13].



Şekil 1.6. Robovie isimli robot

İmalatı gerçekleştirilen bu robotun yüksekliği 120 cm ve çapı 40 cm olup toplam 40 kg ağırlığa sahiptir. Robot toplam 11 serbestlik derecesine sahiptir. Bunlardan 3 adedi gövdenin hareketini sağlayan tekerleklere (2 adedi sürücü teker, 1 adedi gezgin teker), 4 adedi kollara ve 4 adedi kafaya aittir [13].

Robotun çevresiyle ve insanlarla iletişim kurabilmesi için 16 adet yüzey algılayıcısı, gezgin platformun çevresinde 10 adet yüzey algılayıcısı, tüm yönlü görüntü algılayıcısı, insan sesini algılamak için 2 adet mikrofon ve karşısına çıkan engelleri algılamak için 24 adet ultrasonik sensörü vardır [13].

Shenyang Üniversitesi (Çin) tarafından 2005 yılında “YIREN” isimli gezgin insansı robot geliştirilmiştir (Şekil 1.7.). Bu robotun tekerlekleri karışık alanda hareketini sağlamak için tasarlanmıştır. Robot toplam 23 serbestlik derecesine sahiptir. Bunlardan 3 adedi gövdenin hareketini sağlayan tekerleklere (2 adedi sürücü teker, 1 adedi gezgin teker), 7 adedi kollara, 1 adedi el, 2 adedi bel ve 2 adedi boyun bölgesine aittir [1].



Şekil 1.7. Yiren isimli robot

Alman Uzay Merkezi (Almanya) tarafından 2009 yılında “Justin” isimli gezgin insansı robot geliştirilmiştir (Şekil 1.8.). İmalatı gerçekleştirilen bu robotun üst gövdesi 693 mm uzunluğundadır. Robotun üst gövdesi 50 kg olup toplam ağırlığı 195 kg’dır. Robot toplam 51 serbestlik derecesine sahiptir. Bunlardan 8 adedi gövdenin hareketini sağlayan tekerleklere, 3 adedi gövdeye, 7 adedi kollara, 12 adedi ellere ve 2 adedi kafaya aittir [14].



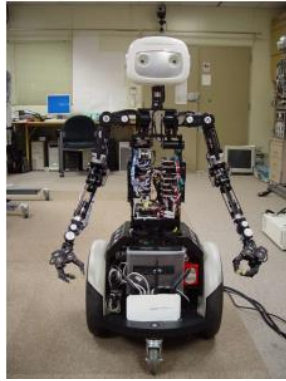
Şekil 1.8. Justin isimli robot

Robotun alt platformu genişleyip daralabilen bir mekanizmaya sahip olup boyu 1052-1220 mm, eni 658-728 mm arasında değişmektedir. Bu yapı robotun esnek bir hareket kabiliyetine sahip olmasını sağlamaktadır (Şekil 1.9.).



Şekil 1.9. Robotun alt platformu

Kore Bilim ve Teknoloji Enstitüsü tarafından 2009 yılında “MAHRU-M” isimli gezgin insansı robot geliştirilmiştir (Şekil 1.10.). Bu robotun ikili ağ yapısını kullanarak gerçek zamanlı kontrolü gerçekleştirilmiş olup ev hizmet servisinde kullanılması amaçlanmıştır [15].



Şekil 1.10. Mahru-m isimli robot

İmalatı gerçekleştirilen bu robotun ana boyutları 750x750x1700 mm şeklindedir. Robot toplam 23 serbestlik derecesine sahiptir. Bunlardan 1 adedi gövdeye, 6 adedi kollara, 4 adedi ellere ve 2 adedi boyun bölgesine aittir. Ayrıca robot birbirinden bağımsız çalışan 2 adet kameraya sahiptir. Robotun hareketini 3 tekerlek (ikisi tahrik tekerleği, diğeri gezgin tekerlek) sağlamaktadır [15].

Literatürde yapılmış daha birçok Gezgin İnsansı Robot bulunmaktadır. Bu robotların çevreleriyle iletişimde olabilmeleri ve istenilen hareketleri doğru bir şekilde yapabilmeleri için çeşitli algılayıcılar kullanılmaktadır.

İnsanlar çevreleriyle beş duyu organı sayesinde etkileşimde bulunabilmektedir. İnsan dış dünyayı bu duyu organları ile algılar ve yorumlar. Göz bu duyu organlarından bir tanesidir. İnsan, gözü sayesinde cisimlerin rengini, biçimini, şeklini, uzaklığını belirleyebilir. İnsandaki bu özellik, robotlara buna benzer bir özelliğin adapte edilip edilemeyeceği sorusunu gündeme getirmiştir. Yapılan çalışmalar kameraların robotlarda insan gözü yerine kullanılabileceğini göstermiştir.

Literatürde; robotun hareket kontrolü için gerekli olan geri besleme sinyalini belirlemek amacıyla kameradan alınan görüntünün bilgisayar tarafından işlenip elde edilen verilerin kullanılmasına Görsel Servo Kontrol (Visual Servoing-Visual Servo Control) denilmektedir.

Görsel Servo Kontrol ile ilgili ilk çalışmalar 1970'lerde başlamıştır. 1980'lerde Sanderson ve Weiss ise bu kontrol yönteminin sınıflandırılması ve bir sistematığe oturtulması ile ilgili çalışmalar gerçekleştirmişlerdir [16,17]. Bu tarihten sonra Görsel Servo Kontrol robot kontrol uygulamalarında kullanılmaya başlanmıştır. Espiau ve arkadaşları (1992) Görsel Servo Kontrol için daha tutarlı ve genel bir yaklaşım elde etmişlerdir [18]. Bu çalışmada görme sistemi ilk olarak sadece bir kontrol döngüsü içinde herhangi bir algılayıcı gibi modellenmiştir. Daha sonra görüntü özellikleri ve kamera hızı ile ilgili Jakobiyenin nasıl modelleneceğini ve kontrol sisteminin istikrarını sağlamak için gerekli koşulların nasıl elde edileceğini araştırmışlardır.

Hutchinson ve arkadaşları (1996) Görsel Servo Kontrolün temellerini tanıtır Pozisyon Tabanlı Kontrol (Position-Based Control) ve Görüntü Tabanlı Kontrol (Image-Based Control) olmak üzere ikiye ayırmışlardır [19]. Görsel Servo Kontrolün temel kavramlarının anlatıldığı ve temel kontrol yöntemleri olan Pozisyon Tabanlı Kontrol ve Görüntü Tabanlı Kontrol ile ilgili kapsamlı yayınlar yapmışlardır [19,20].

Ancak, klasik Görsel Servo Kontrol yaklaşımında kontrol kanununun formülasyonu ve görsel özelliklerinin seçimi ile ilgili bazı zayıflıklar gözlemlenmiştir [21]. Bu zayıflıkları en aza indirip kontrol algoritmasının sağlamlığını arttırmak için Görsel Servo Kontrol ile ilgili çalışmalar hızlanmıştır. 2-1/2D Görsel Servo Kontrol olarak adlandırılan kontrol yöntemi, pozisyon ve görüntü tabanlı kontrollerinin hibrit bir karışımı olan kontrol yöntemi olarak geliştirilmiştir [22,23].

Görsel Servo Kontrol ile ilgili yapılan uygulamalar son yıllarda artmıştır. Sanchez-Lopez ve arkadaşları stereo kamera kullanarak renkli nesnelere ayırmak için yöntem geliştirmişlerdir [35]. Geliştirdikleri yöntemi gerçek zamanlı sistemde uygulamışlardır. Monjaraz ve arkadaşları Pozisyon tabanlı görsel servo kontrolü sabit kamer kullanarak düzlemsel bir robotta uygulamışlardır [36]. Moughlbay ve arkadaşları NAO insansı robotun kapalı çevrim kontrolünde görsel servo kontrol kullanmışlardır [37].

PID kontrolör basit yapısı ve kolay uygulanabilir olduğundan dolayı birçok sistemde kullanılmaktadır. Ancak PID'deki eksikleri giderip sağlamlığını arttırmak için 2-dof PID kontrolör geliştirilmiştir. Literatürde PID ve 2-dof PID ile ilgili çok fazla teorik çalışma bulunmaktadır. Rakesh ve arkadaşları 2-dof PID kontrolörü bir depoya uygulamışlardır [38]. Sharma 2 eklemlilik düzlemsel bir robot kolunun istenilen yörüngeyi takip etmesi için 2-dof PID kullanmışlardır [39]. Boujari ve arkadaşları aktif kütle-yay-sönüm elemanı sisteminin kontrolünde PID ve 2-dof PID kullanıp karşılaştırmışlardır [40].

1.1. Tezin Amacı

Bu tezin amacı; görüntü uzayı içerisinde yerleştirilen cisimlerin robotun mono kamerası ile algılanıp pozisyon tabanlı görsel servo kontrolü kullanılarak cismin robot tarafından otonom olarak tutulmasıdır. Bu amaçla cismin ihtiyaç duyulan konum koordinatları görüntü işleme teknikleri ile hesaplanmakta, robotun sol veya sağ tutucularının bu cismi yakalaması istenmektedir. Bu amaca uygun bir robot imal edilmiştir. Robotun her bir kolunda 6, baş kısmında 2 ve paletli mekanizmasında 2 olmak üzere toplam 16 serbestlik derecesi bulunmaktadır. Yapılan çalışma renk bazlı olup görüntü işleme açısından cisim yeşil renkli seçilmiştir. İlk olarak dikdörtgen şekilli 7-9-11 cm yüksekliğinde ve değişken kesitli cisimler kullanılmıştır. Pozisyon tabanlı görsel servo kontrol ile ilgili 3 farklı uygulama gerçekleştirilmiştir. Birinci uygulamada dikdörtgen şekilli cisim insan eli tarafından tutulup robotun yakalaması amaçlanmıştır. İkinci uygulamada dikdörtgen şekilli cisim masa üstüne konulup robotun yakalaması amaçlanmıştır. Son uygulamada değişken kesitli cisim masa üstüne konulup robotun cismin uygun yerinden yakalaması amaçlanmıştır. Her üç uygulamada temel kontrol algoritması aynı olup birinci uygulamada robot kolu hedef noktaya direk giderken ikinci uygulamada yörünge planlaması ile gitmektedir. Üçüncü uygulamada ise cismin daralan kesitinin hesaplanması yapıp robot tutucunun cismi en uygun yerinden tutması amaçlanmıştır. Bu uygulamalardan öncelikle robotun başı cismi bulup sabitlenmektedir. Daha sonra görüntü işleme teknikleri ile renkli görüntüden siyah-beyaz görüntü elde edilmektedir. Robotun başının hareketli olmasından dolayı elde edilen görüntüdeki bozulmaları iyileştirmek için yapay sinir ağlarından destek alınmıştır. İyileştirme işleminden sonra iğne deliği kamera modeli kullanarak cismin kameraya göre konum koordinatları hesaplanmaktadır. Kameraya göre hesaplanan bu koordinatlar kolun temel eksenine taşınmaktadır. Bu aşamada cismin kol temel eksenine göre koordinatları hesaplanmış olur. Bu değerler ters kinematik denklemlerde yerine koyularak robot kolunun hareketi için ihtiyaç duyulan ekleme açıları hesaplanır. Cismin robota göre konumuna bağlı olarak sağ veya sol kol devreye girmektedir.

1.2. Tezin Organizasyonu

Bölüm 2: Robot mekaniği robot çalışmalarının temelini oluşturur. Bu bölümde ilk önce robot kinematiği daha sonra robot dinamiği hakkında bilgi verilmiştir.

Bölüm 3: Robotun kontrol algoritması olan görsel servo kontrolün temelini görüntü işleme oluşturmaktadır. Bu bölümde kamera ve kamera modeli hakkında bilgi verilmiştir. Daha sonra görüntü işlem teknikleri ve adımları ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır.

Bölüm 4: Bu bölümde PID ve 2dof PID kontrol hakkında bilgi verilmiştir. Robotun ana kontrol algoritması olan görsel servo kontrol genel olarak tanıtılıp sınıflandırılması yapılmıştır.

Bölüm 5: Bu bölümde ilk olarak imalatı gerçekleştirilen robotun donanımı ve yazılımı hakkında bilgi verilmiştir. Daha sonra robot ile yapılan uygulamalar detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Yapılan uygulamalar sırasıyla aşağıda verilmiştir:

- PID ve 2 dof PID kontrol karşılaştırması
- Elde tutulan dikdörtgen şekilli yeşil renkli cismi robotun tutması
- Masa üstünde duran dikdörtgen şekilli yeşil renkli cismi robotun tutması
- Masa üstünde duran dikdörtgen şekilli olmayan yeşil renkli cismi robotun tutması

Yukarıdaki uygulamalardan elde edilen sonuçlar tablo ve grafik şeklinde verilmiştir.

Bölüm 6: Sonuç bölümünde, bu tez çalışmasından elde edilen sonuçlar ve ileriye dönük öneriler irdelenmiştir.

BÖLÜM 2. ROBOT MEKANİĞİ

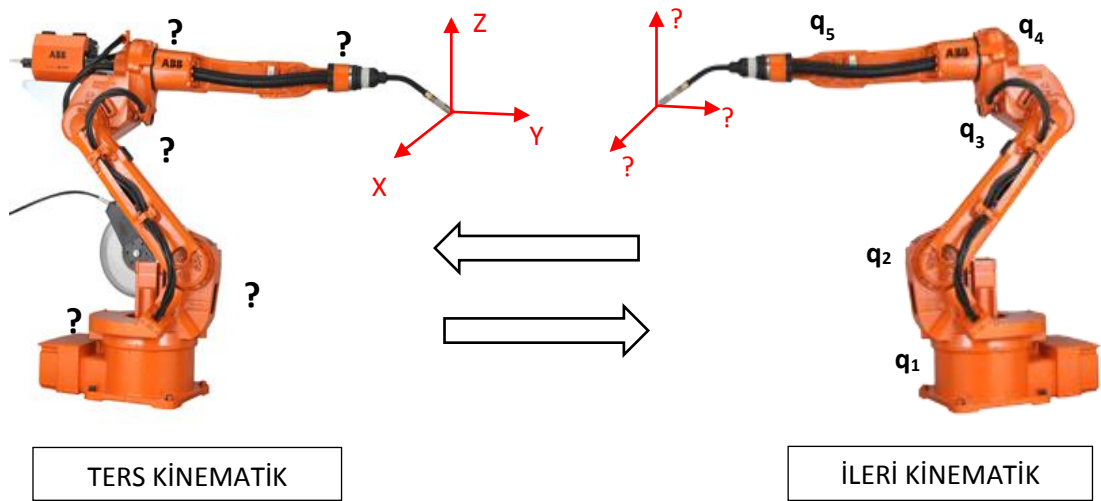
Robot mekaniği robot kinematiği ve robot dinamiği olmak üzere iki ana bölüme ayrılır. Robot kinematiği; cisimlerin hareketi sırasında oluşan konum, hız ve ivmenin zamana bağlı olarak değişimini, bu hareketi meydana getiren kuvvetleri göz önüne almadan inceleyen bir bilim dalıdır. Robot dinamiği ise robotun uzuvlarının hareketini incelerken bu hareketleri meydana getiren kuvvet-momentleri göz önünde bulunduran bir bilim dalıdır. Robot dinamiği sayesinde robotun dinamik davranışı incelenip kontrolör tasarlanabilir.

Bu bölümde robot kinematiği ve dinamiği hakkında genel bilgiler verildikten sonra robotumuza ait kinematik ve dinamik denklemler elde edilmiştir.

2.1. Robot Kinematiği

Robotun çalışma uzayı içerisindeki hareketini inceleyebilmek için robot kinematiğinden yardım alınır. Robot kinematiği sayesinde robotun çalışma uzayı içerisinde uç elemanının pozisyon-oryantasyonu ve bu pozisyon-oryantasyona karşılık gelen eklem değişkenleri hesaplanabilir. Robot kinematiği ileri kinematik ve ters kinematik olmak üzere ikiye ayrılır.

Robot ileri kinematiğinde her bir eklem değişkeninin değerine karşılık gelen uç elemanının konumu hesaplanırken, ters kinematikte uç işlevcinin konumuna karşılık her bir eklem değişkeni hesaplanmaktadır (Şekil 2.1.).



Şekil 2.1. İleri ve ters kinematik gösterimi

2.1.1. Robot ileri kinematiği

Robotların eklem değişkenlerini belirlemek için birçok kinematik yöntem geliştirilmiştir. Kinematik problemlerin çözümü, Kartezyen üç boyutlu ve Kartonyum dört boyutlu olmak üzere iki farklı uzayda gerçekleştirilir. Kartezyen uzayda robotun eklem değişkenlerinin belirlenmesinde en çok tercih edilen yöntem Denavit-Hartenberg (D-H) yöntemidir [25]. Bu yöntem ardışık iki eklem arasındaki ilişkiyi sistematik notasyonla belirlemeye yarar.

D-H yöntemine göre eklem toplam 4 değişken ile temsil edilir. Bu değişkenlerden ikisi eklem kendisi ile ilgili olup diğer ikisi komşu eklemle ilgilidir [26]. Bu değişkenler

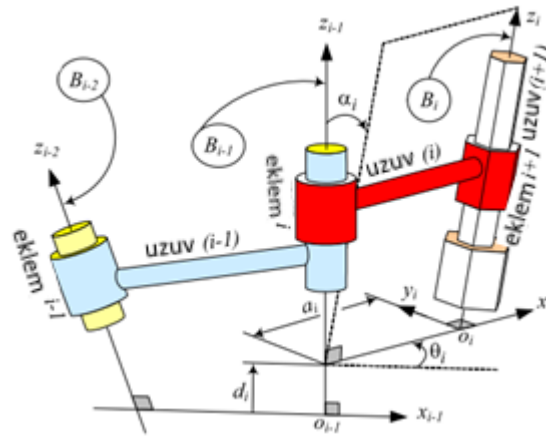
iki eksen arasındaki uzuv uzunluğu $\rightarrow a_i$

$i-1$ ile i eksenleri arasındaki açı $\rightarrow \alpha_i$

üst üste çakışan bağlar arasındaki bağ kaçıklığı $\rightarrow d_i$

iki bağ arasında oluşan eklem açısı $\rightarrow \theta_i$

şeklinde tanımlanmaktadır (Şekil 2.2.) [25].



Şekil 2.2. D-H yönteminde kullanılan değişkenlerin gösterilmesi: eklem açısı(θ) ve eklem uzunluğu (d), link uzunluğu (a) ve link bükme açısı (α).

Denavit-Hartenberg yönteminde eklemlere koordinatlar aşağıdaki adımlar izlenerek yerleştirilir [27].

- Z_i eksenini hareket eksenini olacak şekilde yerleştirilir. Burada eklem eksenleri, döner eksenler için dönme, prizmatik eklemler için kayma eksenidir.
- X_i eksenini Z_i ve Z_{i-1} eksenleri arasındaki ortak normal boyunca tanımlanır. Burada X , Z_{i-1} den Z_i doğrultusunda olacak şekilde yerleştirilir.
- Y_i eksenini sağ el kuralına göre belirlenir.

Eklem koordinat sistemleri belirlendikten sonra, eklem değişkenleri şöyle tanımlanır [27].

$a_i \rightarrow Z_{i-1}$ ile Z_i arasında X_i boyunca belirlenen uzunluk

$\alpha_i \rightarrow Z_{i-1}$ ile Z_i arasında X_i etrafında ölçülen açı

$d_i \rightarrow X_{i-1}$ ile X_i arasında Z_{i-1} boyunca belirlenen uzunluk

$\theta_i \rightarrow X_{i-1}$ ile X_i arasında Z_{i-1} etrafında ölçülen açı

D-H yöntemine göre dönme ve öteleme hareketleri özel 4x4 lük homojen dönme ve öteleme matrisleri yardımı ile tanımlanmıştır.

Dönme hareketini tanımlayan homojen dönme matrisleri:

$$R_{x_{i-1}, \alpha_i} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_i & -\sin \alpha_i & 0 \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$R_{y_{i-1}, \beta_i} = \begin{bmatrix} \cos \beta_i & 0 & \sin \beta_i & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \beta_i & 0 & \cos \beta_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$$R_{z_{i-1}, \theta_i} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & 0 \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Öteleme hareketini tanımlayan homojen öteleme matrisi:

$$D = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

D-H yöntemine göre, A_{i-1} ile A_i koordinat çerçevelerine arasındaki ${}^{i-1}T_i$ homojen dönüşüm matrisi i . uzuv ve i . eklem değişkenleri kullanılarak 4 temel dönüşüm matrisinin belirli bir sıraya göre çarpılmasıyla elde edilir.

$${}^{i-1}T_i = D_{z_{i-1}, d_i} R_{z_{i-1}, \theta_i} D_{x_{i-1}, \alpha_i} R_{x_{i-1}, \alpha_i} \quad (2.5)$$

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\cos\alpha_i \sin\theta_i & \sin\alpha_i \sin\theta_i & \alpha_i \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\alpha_i \cos\theta_i & -\sin\alpha_i \cos\theta_i & \alpha_i \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

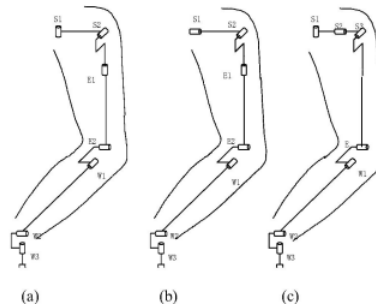
D-H parametre tablosu uzuv çerçevelerinin sistematik bir biçimde oluşturulmasına yardımcı olur. Aşağıdaki tabloda D-H parametreleri en genel haliyle gösterilmiştir. Tablo, bir tane eklem sayısı ve dört tane D-H parametresi olmak üzere toplam 5 adet sütundan oluşmaktadır. Birinci sütunda eklem sayısı belirlendikten sonra, her bir eklem için D-H parametreleri ilgili alanlara gelecek şekilde tablo doldurulur [27]. Eklem tipine göre dönel (θ) veya kayar (d) eklem değişkeni olarak tayin edilir (Tablo 2.1.).

Tablo 2.1. D-H parametre tablosu

Eklem No	D-H Parametreleri			
	a_i	α_i	d_i	θ_i
1	a_1	α_1	d_1	θ_1
2	a_2	α_2	d_2	θ_2
....
i	a_j	α_j	d_j	θ_j
....
n	a_n	α_n	d_n	θ_n

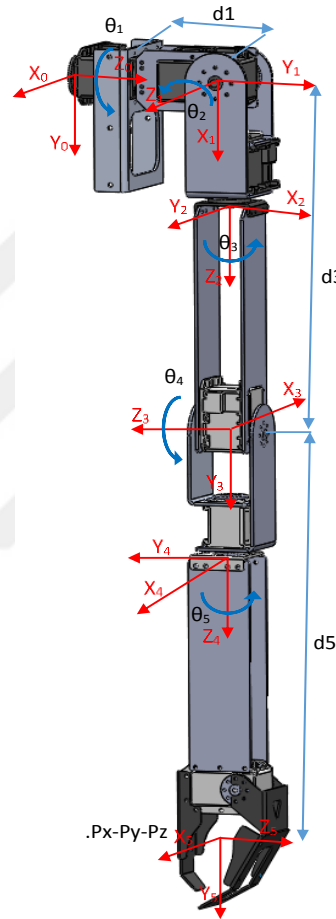
2.1.1.1. Robot koluna ait ileri kinematik denklemlerin elde edilmesi

Bu tezde, mobil insansı robotun kolları olarak insan koluna benzer yapıya sahip robot kolu tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla beş serbestlik dereceli robot kolu seçilmiştir. Literatürde beş serbestlik dereceli insansı robot kolu birçok değişik yapıya sahiptir. Bunlardan en çok kullanılanları Şekil 2.3’de verilmiştir [24].



Şekil 2.3. Beş serbestlik dereceli koluna ait farklı tasarımlar

Burada ilk üç serbestlik derecesi insan kol hareketine daha çok benzediğinden Şekil-2.3b'deki kol yapısı seçilmiştir. Seçilen robot koluna ait her bir eklemin eksen takımı D-H yöntemine göre yerleştirilmiştir. Robot kolunun referans koordinat sistemi ve her bir uzva ait hareketli eksen takımları Şekil 2.4.'de gösterilmiştir. Hareket kabiliyetini artırmak için uzuvlara döner eklem yerleştirilmiştir.



Şekil 2.4. Seçilen kol yapısı ve referans eksen takımı

Seçilen insansı robot kolu beş serbestlik dereceli ve dönel eklemlidir olduğundan eklem değişkeni olarak beş farklı θ eklem açısı vardır. Şekil 2.4.'te gösterildiği gibi, θ 'lar her bir eklemin açısal yer değiştirmesini d_1 , d_3 ve d_5 'de uzuv uzunluklarını göstermektedir.

Kullanılan robot kolunun ileri kinematik hesaplamaları için D-H yöntemi kullanılmıştır. Robot koluna ait D-H parametreleri Tablo 2.2.'de verilmiştir.

Tablo 2.2. Sol kol için D-H parametre tablosu

	d_i	α_i	a_i	θ_i
1	$d_1=250$	90°	0	θ_1+90°
2	0	90°	0	θ_2+90°
3	$d_3=250$	90°	0	θ_3+90°
4	0	-90°	0	θ_4
5	$d_5=100$	90°	0	θ_5

D-H parametrelerine göre her bir ekleme ait homojen dönüşüm matrisleri aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$T_1^0 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & \sin \theta_1 & 0 \\ \sin \theta_1 & 0 & -\cos \theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

$$T_2^1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & 0 & \sin \theta_2 & 0 \\ \sin \theta_2 & 0 & -\cos \theta_2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

$$T_3^2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & 0 & \sin \theta_3 & 0 \\ \sin \theta_3 & 0 & -\cos \theta_3 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

$$T_4^3 = \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & 0 & -\sin \theta_4 & 0 \\ \sin \theta_4 & 0 & \cos \theta_4 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

$$T_5^4 = \begin{bmatrix} \cos \theta_5 & 0 & \sin \theta_5 & 0 \\ \sin \theta_5 & 0 & -\cos \theta_5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

İleri kinematik, robot eklem değişkenleri uzayından Kartezyen koordinat uzayına dönüşümdür. İleri kinematiğin ana problemi verilen eklem değişkenleri ile uç elemanın pozisyon ve oryantasyonunu bulmaktır [27]. Uç elemanın temel koordinat eksenine göre konumu (Px-Py-Pz) ve oryantasyonu D-H parametreleri ile oluşturulan homojen matrislerinin seri çarpımı sonucu elde edilmiştir.

$$T_5^0 = T_1^0 \cdot T_2^1 \cdot T_3^2 \cdot T_4^3 \cdot T_5^4 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Burada n-o-a indisleri uç noktanın rotasyonunu ve p indisi konumunu temsil etmektedir.

Denklem 2.12 matrislerinin çarpımı sonucu elde edilen T_5^0 matrisinin konum koordinatlarına ait olan ifadeleri aşağıda sırasıyla verilmiştir.

$$P_x = \cos \theta_1 (d_3 + d_5 \cos \theta_4) \sin \theta_2 - d_5 (\cos \theta_1 \cos \theta_2 \cos \theta_3 + \sin \theta_1 \sin \theta_3) \sin \theta_4 \quad (2.13)$$

$$P_y = (d_3 + d_5 \cos \theta_4) \sin \theta_1 \sin \theta_2 + d_5 (-\cos \theta_2 \cos \theta_3 \sin \theta_1 + \cos \theta_1 \sin \theta_3) \sin \theta_4 \quad (2.14)$$

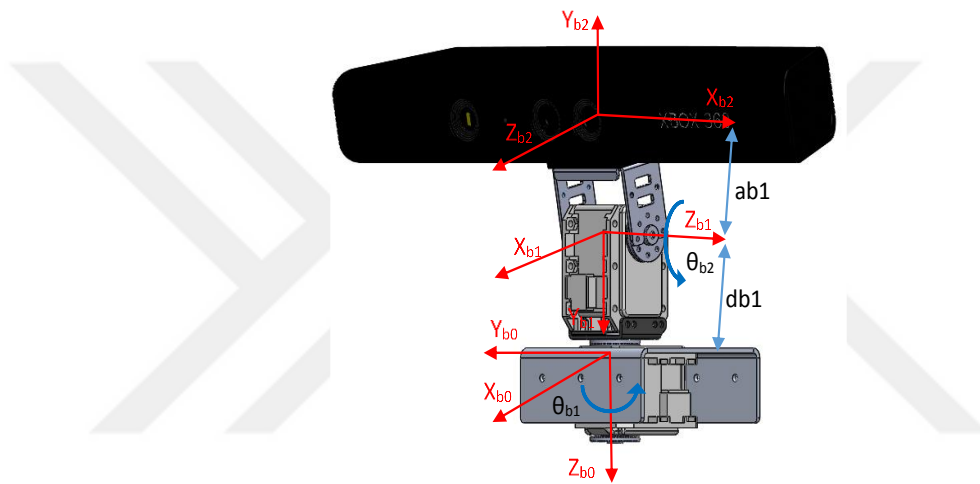
$$P_z = d_1 - \cos \theta_2 (d_3 + d_5 \cos \theta_4) - d_5 \cos \theta_3 \sin \theta_2 \sin \theta_4 \quad (2.15)$$

Robot sol ve sağ olmak üzere iki koldan meydana gelmektedir. Yukarıdaki denklemler sol kola aittir. Robot denklemlerinin kolaylığı için sağ kol eksen takımları sol kol ile

aynı olacak şekilde yerleştirilmiştir. Böylece sol kol için elde edilen denklemler sağ kol için de geçerlidir.

2.1.1.2. Robot başına ait ileri kinematik denklemlerin elde edilmesi

Robotun üst kısmında bulunan kamera, sağa-sola, yukarı-aşağı (pan-tilt) hareketi sağlayacak şekilde iki adet servo motor üzerine yerleştirilmiştir. Aşağıda Şekil 2.5.'de bu mekanizma ve eksen takımları gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Seçilen kafa yapısı ve referans eksen takımı

Yukarıdaki mekanizmada eksen takımları D-H parametrelerine göre yerleştirilmiştir. θ_{b1} ve θ_{b2} her bir eklemin açısal yer değiştirmesini, d_{b1} ve a_{b1} da uzuv boyutlarını göstermektedir.

Robot kamera mekanizmasına ait D-H parametreleri Tablo 2.3.'de verilmiştir.

Tablo 2.3. Kafaya ait D-H parametre tablosu

	d_i	α_i	a_i	θ_i
1	$d_{b1}=100$ mm	90°	0	θ_{b1}
2	0	0	$a_{b1}=250$ mm	θ_{b2}

D-H parametrelerine göre her bir ekleme ait homojen dönüşüm matrisleri aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$T_{b1}^{b0} = \begin{bmatrix} \cos[\theta_{b1}] & 0 & \sin[\theta_{b1}] & 0 \\ \sin[\theta_{b1}] & 0 & -\cos[\theta_{b1}] & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

$$T_{b2}^{b1} = \begin{bmatrix} \cos[\theta_{b2}] & -\sin[\theta_{b2}] & 0 & a1 \cos[\theta_{b2}] \\ \sin[\theta_{b2}] & \cos[\theta_{b2}] & 0 & a1 \sin[\theta_{b2}] \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Mekanizmanın uç noktasındaki boynun temel koordinat eksenine göre konumu (P_{bx} , P_{by} , P_{bz}) D-H parametreleri ile oluşturulan homojen matrislerinin seri çarpımı sonucu elde edilmiştir.

$$T_{b2}^{b0} = T_{b1}^{b0} \cdot T_{b2}^{b1} = \begin{bmatrix} n_{bx} & o_{bx} & a_{bx} & p_{bx} \\ n_{by} & o_{by} & a_{by} & p_{by} \\ n_{bz} & o_{bz} & a_{bz} & p_{bz} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

$$T_{b2}^{b0} = \begin{bmatrix} \cos[\theta_{b1}]\cos[\theta_{b2}] & -\cos[\theta_{b1}]\sin[\theta_{b2}] & \sin[\theta_{b1}] & a1 \cos[\theta_{b1}]\cos[\theta_{b2}] \\ \cos[\theta_{b2}]\sin[\theta_{b1}] & -\sin[\theta_{b1}]\sin[\theta_{b2}] & -\cos[\theta_{b1}] & a1 \cos[\theta_{b2}]\sin[\theta_{b1}] \\ \sin[\theta_{b2}] & \cos[\theta_{b2}] & 0 & d1 + a1 \sin[\theta_{b2}] \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

2.1.2. Robot ters kinematiği

Ters kinematik, robot kinematiğinde önemli bir yere sahiptir. Ters kinematik, robotun uç noktasının uzayda istenilen koordinatlara (x,y,z) gidebilmesi için her bir eklemin alması gereken değeri hesaplayan kinematik problemdir. İleri kinematik denklemlerin

hesaplanması sistematik ve kolaydır. Buna karşın ters kinematik hesabı, denklemlerin nonlineer olması nedeniyle zor ve karmaşıktır. Bazı durumlarda aynı denklem için birden fazla çözüm elde edilirken bazı durumlarda ise çözüm elde edilemez.

Ters kinematikte elde edilen nonlineer denklem takımlarını çözmek için lineer denklemler de olduğu gibi genel bir algoritma yoktur. Nonlineer denklem takımlarını çözmek için kapalı form yöntemler (closed-form solutions) ve sayısal yöntemler (numerical solutions) olmak üzere iki yöntem kullanılır. Burada kapalı form, analitik ifadelerin ve 4 veya daha az dereceli polinomların çözüm metotları anlamına gelmektedir. Kapalı form yöntemler, cebirsel ve geometrik olmak üzere iki metoda ayrılır. Herhangi bir geometrik yöntem cebirsel ifadeler vasıtasıyla uygulanır. Aslında bu iki yöntem yaklaşım olarak farklı olmasına karşın benzer yapıya sahiptir [26].

2.1.2.1. Robot koluna ait ters kinematik denklemlerin elde edilmesi

Burada robot kolu ve boyun mekanizması için kapalı form yöntemlerinden cebirsel metot kullanılmıştır. Kolun gövdeye göre uç noktasının ileri kinematik denklemleri homojen dönüşüm matrislerinin seri bir şekilde çarpılması ile eşitlik 2.12'de elde edilmiştir. Elde edilen eşitlik aşağıda tekrar yazılmıştır.

$$T_{uç} = T_1^0 \cdot T_2^1 \cdot T_3^2 \cdot T_4^3 \cdot T_5^4 \quad (2.20)$$

Yukarıdaki denklem 2.20'nin her iki tarafı $(T_1^0)^{-1}$ ile çarpılırsa aşağıdaki ifade elde edilir.

$$\underbrace{T_{uç} (T_1^0)^{-1}}_{L_1} = \underbrace{T_2^1 \cdot T_3^2 \cdot T_4^3 \cdot T_5^4}_{R_1} \quad (2.21)$$

Eşitlik 2.21'den L_1 ve R_1 ile temsil edilen iki matris elde edilir. Elde edilen bu matris eşitliğinden uygun olan matris elemanları eşitlenerek θ değerleri hesaplanır. Burada $L(n,m)$ ifadesi L matrisinin n . satır m . sütun elemanını göstermektedir.

$L_1(3,2)=R_1(3,2)$ ve $L_1(3,4)=R_1(3,4)$ matris elemanları çekilip gerekli düzenlemeler yapılarak θ_1 aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$\theta_1 = \arctan 2 \left(p_x - o_x \cdot d5, -o_y \cdot d5 + p_y \right) \quad (2.22)$$

Eşitlik 1.20'den $L_1(2,2)=R_1(2,2)$ ve $L_1(2,4)=R_1(2,4)$ matris elemanları çekilip gerekli düzenlemeler yapılarak θ_2 aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$\theta_2 = \arccos \left((o_z \cdot d5 + d1 - p_z) / d3 \right) \quad (2.23)$$

Eşitlik 1.20'den $L_2(1,2)=R_2(1,2)$ ve $L_2(2,2)=R_2(2,2)$ matris elemanları çekilip gerekli düzenlemeler yapılarak θ_3 aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$\theta_3 = \arctan 2 \left(\begin{array}{l} o_x \cdot \cos(\theta_1) \cdot \cos(\theta_2) + o_y \cdot \cos(\theta_2) \cdot \sin(\theta_1) \\ + o_z \cdot \sin(\theta_2), o_y \cdot \cos(\theta_1) - o_x \cdot \sin(\theta_1) \end{array} \right) \quad (2.24)$$

Eşitlik 2.21'in her iki tarafı $(T_1^2)^{-1}$ ile çarpılıp aşağıdaki ifade elde edilir.

$$\underbrace{T_{uc}(T_1^0)^{-1}(T_2^1)^{-1}}_{L_2} = \underbrace{T_3^2 \cdot T_4^3 \cdot T_5^4}_{R_2} \quad (2.25)$$

Eşitlik 2.25'nin sol tarafı L_2 sağ tarafı R_2 ile gösterilerek $L_2(3,4)=R_2(3,4)$ matris elemanları çekilip gerekli düzenlemeler yapılarak θ_4 aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$\theta_4 = \arccos \left(\left(\begin{array}{l} (d1 - p_z) \cdot \cos(\theta_2) \\ + (p_x \cdot \cos(\theta_1) + p_y \cdot \sin(\theta_1)) \cdot \sin(\theta_2) - d3 \end{array} \right) / d5 \right) \quad (2.26)$$

Eşitlik 2.25'den $L_2(3,1)=R_2(3,1)$ ve $L_2(3,3)=R_2(3,3)$ matris elemanları çekilip gerekli düzenlemeler yapılarak θ_5 aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$\theta_5 = \arctan 2 \left(-a_z \cdot \cos(\theta_2) + a_x \cdot \cos(\theta_1) \cdot \sin(\theta_2) + a_y \cdot \sin(\theta_1) \cdot \sin(\theta_2), \right. \\ \left. -n_z \cdot \cos(\theta_2) + n_x \cdot \cos(\theta_1) \cdot \sin(\theta_2) + n_y \cdot \sin(\theta_1) \cdot \sin(\theta_2) \right) \quad (2.27)$$

2.1.2.2. Robot başına ait ters kinematik denklemlerin elde edilmesi

Eşitlik 2.18'de elde edilen matrisin son sütundaki 3 elemanı x, y, z koordinatlarına eşittir. Bu eşitlikler kullanılarak robotun boyun mekanizmasına ait ters kinematik çözümü gerçekleştirilir.

$$T_{b2}^{b0} = T_{b1}^{b0} \cdot T_{b2}^{b1} = \begin{bmatrix} n_{bx} & o_{bx} & a_{bx} & p_{bx} \\ n_{by} & o_{by} & a_{by} & p_{by} \\ n_{bz} & o_{bz} & a_{bz} & p_{bz} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

Matrisin $T_{b2}^{b0}(3,4)$ numaralı elemanı kullanılarak boyun mekanizmasının θ_{b2} değeri aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$p_{bz} = d1 + a1 \cdot \sin[\theta_{b2}] \quad (2.29)$$

$$\theta_{b2} = \arcsin\left(\frac{p_{bz} - d1}{a1}\right) \quad (2.30)$$

Matrisin $T_{b2}^{b0}(2,4)$ numaralı elemanı boyun mekanizmasının uç noktasının uzaydaki P_{by} koordinat değerine eşittir. Bu eşitlik kullanılarak θ_{b1} değeri aşağıdaki şekilde elde edilmiştir.

$$p_{by} = a1 \cdot \cos[\theta_{b2}] \cdot \sin[\theta_{b1}] \quad (2.31)$$

$$\theta_{b1} = \arcsin\left(\frac{p_{by}}{a1 \cdot \cos[\theta_{b2}]}\right) \quad (2.32)$$

Böylece robotun kollarının ve kafasının kontrollü için gerekli olan ileri ve ters kinematik denklemler elde edilmiştir.

2.2. Robot Dinamiği

Robot kolunun dinamik denklemlerini elde etmek için bilinen birçok metot vardır. Bunlar Lagrange-Euler (L-E), Recursive Lagrange (R-L), Newton-Euler (N-E), Genelleştirilmiş D'Alambert (G-D) prensibi gibi yaklaşımlardır. Bu yöntemlerden en çok kullanılanlar L-E ve N-E yaklaşımlarıdır [8]. Bu çalışmada robot kolun dinamik modelinin çıkarılmasında, iyi planlanmış bir yapıya sahip ve çıkarılması N-E yaklaşımından daha basit ve sistematik olan L-E yaklaşımı ile elde edilmiş denklemler kullanılmıştır [26].

Burada L-E yöntemine ait ifadeler elde edilecektir. Öncelikle robotun kinetik enerjisi hesaplanır. Robotun i . uzvuna ait kinetik enerji aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$k_i = \frac{1}{2} (v_i^T m_i v_i + \omega_i^T I_i \omega_i) \quad (2.33)$$

Denklemden m_i i . uzvun kütle, I_i i . uzvun kütle merkezinin atalet tensörünü göstermektedir. Yukarıdaki ifadede birinci terim uzvun kütle merkezinin lineer hareketi sonucu oluşan kinetik enerjiyi, ikinci terim ise uzvun açısal yer değiştirmesi sonucu oluşan kinetik enerjisi göstermektedir.

Robotun toplam kinetik enerji ise her bir uzva ait kinetik enerjilerin toplamına eşittir.

$$k = \sum_{i=1}^n k_i \quad (2.34)$$

Robotun i . uzvunda depolanan potansiyel enerji aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$u_i = m_i g^T h_i \quad (2.35)$$

Burada g 3×1 boyutunda olup yerçekimi ivmesini, h_i ise i . uzvun kütle merkezinin ana koordinat merkezine göre konumunu göstermektedir.

Robota ait toplam potansiyel enerji ise her bir uzuvda depo edilen potansiyel enerjilerin toplamına eşittir.

$$u = \sum_{i=1}^n u_i \quad (2.36)$$

L-E yönteminde kinetik ve potansiyel enerjinin farkına Lagrange fonksiyonu denmektedir. Burada Lagrange fonksiyonu aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$L(q, \dot{q}) = k(\dot{q}) - u(q) \quad (2.37)$$

burada q dönel eklemler için eklem açısını, prizmatik eklemler için bağ uzunluğunu, $\dot{q} = \frac{dq}{dt}$ eklem hızlarını göstermektedir.

L-E yöntemine göre robot hareket denklemleri aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\tau = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} \quad (2.38)$$

burada τ $n \times 1$ boyutunda olup eyleyicilerde oluşan tork vektörüdür.

Robot kolunun dinamik davranışını analiz etmek için kullanılan L-E denklemleri düzenlenerek matris-vektör formunda aşağıdaki şekilde yazılır.

$$\tau = M(q)\ddot{q} + V(q, \dot{q}) + G(q) \quad (2.39)$$

Burada τ : Tork/kuvvet vektörü [$n \times 1$]

M: Kütle matrisi (atalet tensörü) [$n \times n$]

$V(q, \dot{q})$: Coriolis ve merkezkaç kuvvet vektörü [$n \times 1$]

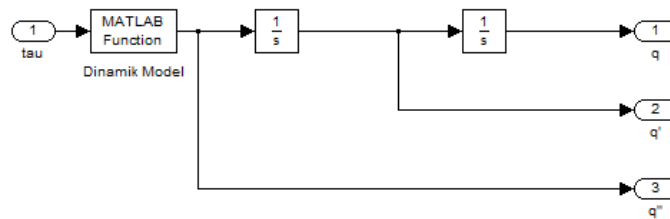
G: Yerçekimi ivme vektörü [$n \times 1$]

Modellenmesi yapılan robotik kolun teknik özellikleri aşağıdaki Tablo 2.4.'de verilmiştir.

Tablo 2.4. Robot kolunun özellikleri

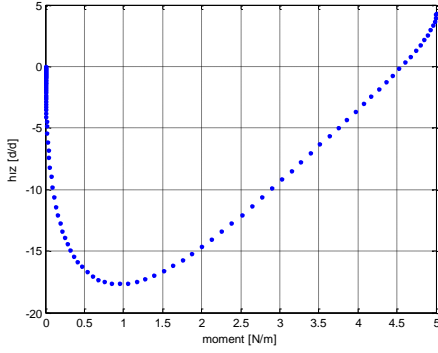
	1.uzuv	2.uzuv	3.uzuv
Ağırlık[kg]	0,5	1	1,5
Uzunluk[m]	0,70	0,25	0,30
Genişlik[m]	0,05	0,05	0,05
Yükseklik[m]	0,05	0,05	0,05

L-E denklemleri ile elde edilen dinamik denklemlerin sağlamasını yapmak için her bir uzva serbest düşme hareketi verilmiştir. Robot kolunun dinamik denklemlerinin yazılması ve her bir eklemin dinamik davranışını gözlemleyebilmek için Matlab/Simulink programından yararlanılmıştır. Robot kolunun Matlab/Simulink blok diyagramı Şekil 2.6.'da gösterilmiştir.

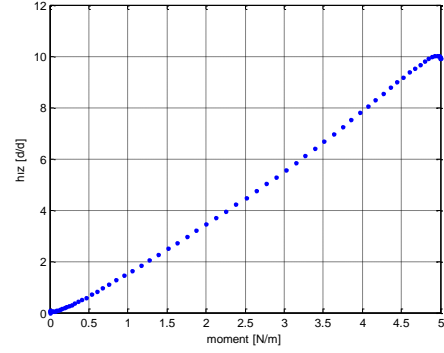


Şekil 2.6. Matlab/Simulink blok diyagramı

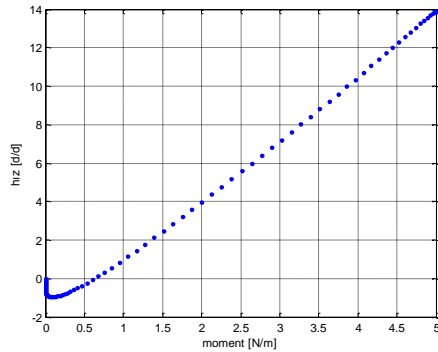
Elde edilen dinamik denklemler robotun kolunun motor seçimi için ihtiyaç duyulan hız/tork grafiklerini elde etmede kullanılmıştır. Şekil 2.7.'de elde edilen grafiklerden örnek verilmiştir.



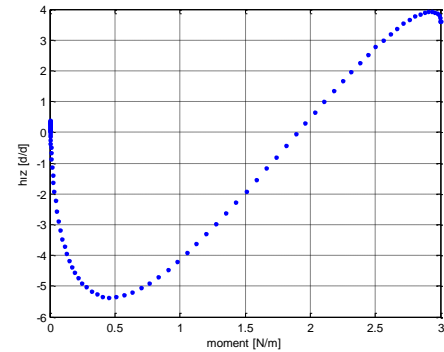
a) 01 hız/tork grafiği



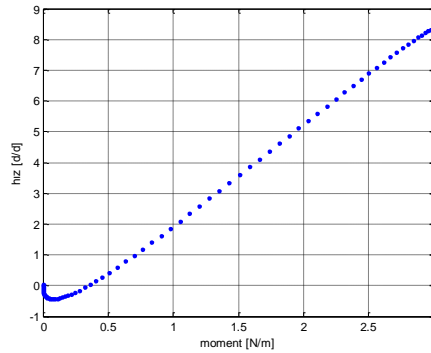
b) 02 hız/tork grafiği



c) 03 hız/tork grafiği



d) 04 hız/tork grafiği



e) 05 hız/tork grafiği

Şekil 2.7. Herbir ekleme ait hız/tork grafikleri

Yukarıda elde edilen grafikler motor seçiminde kullanılmıştır. Elde edilen grafiklerde 01 için maksimum tork 5 N.m ve maksimum hız 30 dv/dak, 02 için tork 5 N.m, hız 10 dv/dak, 03 için tork 5 N.m, hız 15 dv/dak, 04 için tork 3 N.m, hız 6 dv/dak, 05 için tork

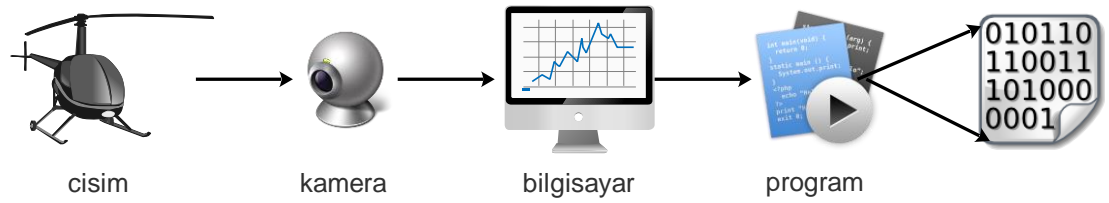
3 N.m, hız 9 dv/dak olarak hesaplanmıştır. Bu değerler göz önümde tutularak motor seçimi yapılmıştır. Kataloglar incelediğinde ilk 3 eklem için dynamixel 64, son iki eklem için dynamixel 28 marka motorlar seçilmiştir.



BÖLÜM 3. KAMERA SİSTEMİ ve GÖRÜNTÜ İŞLEME TEKNİKLERİ

Görsel Servo Kontrol’de kamera modeli ve görüntü işleme teknikleri sistemde önemli bir yere sahiptir. Görüntü işleme teknikleri ile robotun kontrolü için gerekli olan kontrol sinyali elde edildiği için görsel servo kontrolün temelini oluşturur. Görüntü işleme teknikleri kullanılarak ne kadar sağlam ve temiz bir görüntü elde edilirse robot o kadar iyi kontrol edilebilir.

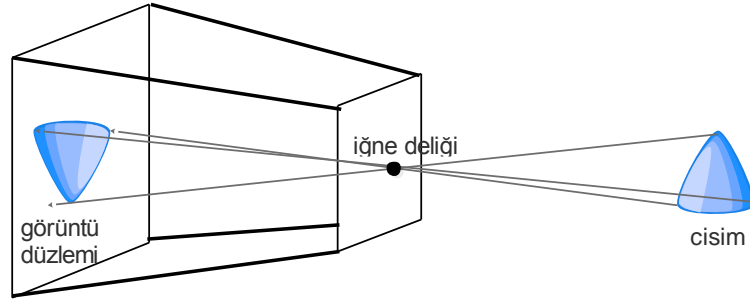
Görüntü işlemede kamera ile dış ortamdan hedef cismin görüntüsü kamera sönürü ile dijitalleştirilerek bilgisayara usb v.b. bağlantı noktası üzerinden gönderilir. Bilgisayarda görüntü işleme için geliştirilmiş programlar ile görüntü işleme teknikleri kullanılarak görüntüden anlamlı veri elde edilir (Şekil 3.1.).



Şekil 3.1. Görüntü Sistemi bileşenleri kamera-bilgisayar-yazılım

3.1. İğne Deliği Kamera Modeli

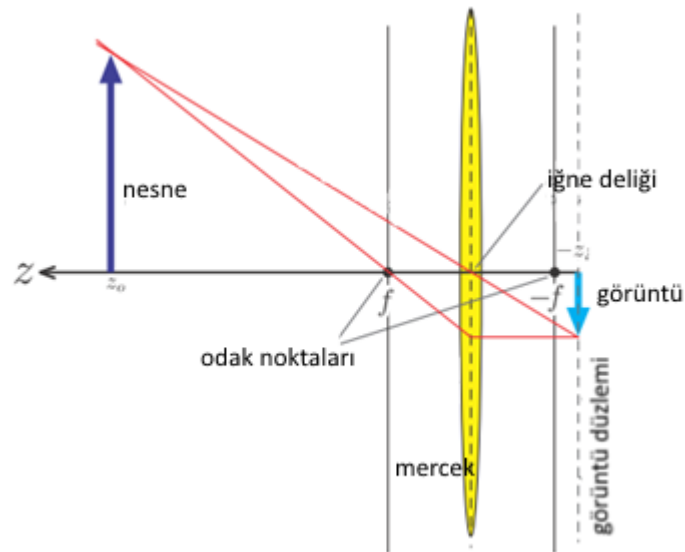
İğne deliği kamera modelinde kameranın diğer modellere göre en önemli farkı objektifinin bulunmamasıdır. Diyafram, objektif yerine kullanılan iğne deliğinin büyüklüğüdür. Işık bu iğne deliğinden tek düz bir yol üzerinden geçerek görüntü düzlemine ulaşır. Cisim, görüntü düzleminde baş aşağı olacak şekilde oluşur (Şekil 3.2.).



Şekil 3.2. İğne deliği modeli

İğne deliği kamerada en önemli sorun netliktir. Eğer delik yeteri kadar küçük olamazsa görüntü düzleminde oluşan cisim bulanıklaşır. Diğer taraftan ışığın görüntüdeki her noktaya ulaşması isteniyorsa delik geniş olmalıdır. Elde edilen görüntünün kalitesini arttırmak için objektif (lens) kullanılmalıdır. Mercek daha geniş delik sağlar ve film düzlemine olan mesafeyi düzlemi hareke ettirmeden değiştirmemize izin verir. Ancak lens renklerde sapmalar ve radyal bozulmalara neden olmaktadır [28].

İğne deliği kamera modelinde dış dünyadan alınan görüntünün görüntü düzleminde oluşumu Şekil 3.3.'de gösterilmiştir. Burada pozitif z ekseni kameranın optik eksenini (optical axis) yönündedir [29].



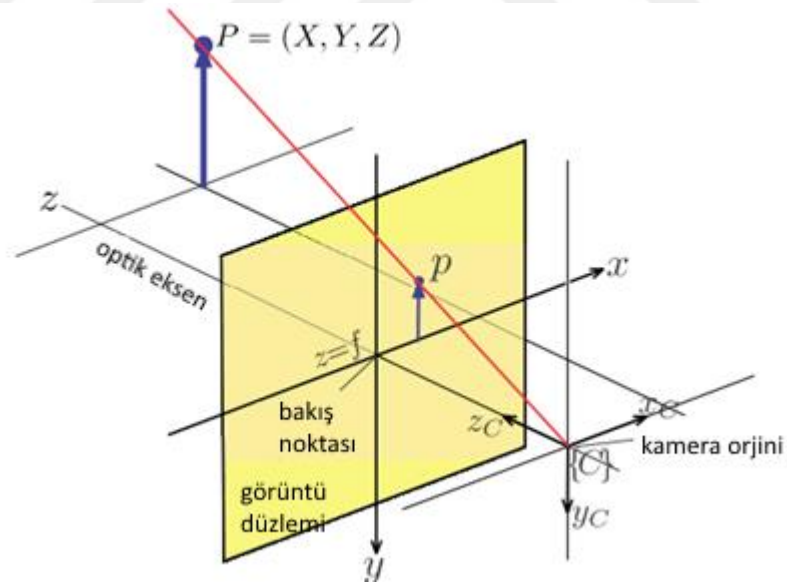
Şekil 3.3. İğne deliği kamera modeli

Nesnenin z koordinatı ile görüntünün z koordinatı lens kanununa göre birbirleriyle ilişkilidir. Bu ilişki aşağıdaki şekilde ifade edilir [29].

$$\frac{1}{z_0} + \frac{1}{z_i} = \frac{1}{f} \quad (3.1)$$

Burada z_0 nesnenin lense uzaklığı
 z_i görüntünün lense uzaklığını
 f odak uzaklığını göstermektedir.

Bilgisayar görmesinde Şekil 3.4.'de gösterilen perspektif iz düşüm modeli kullanılmaktadır. Nesneden yansıyan ışınlar kamera düzleminin $\{C\}$ orijininde birleşir. Ters çevrilmemiş görüntü, görüntü düzleminin ($z=f$) üzerine yansıtılır. Nesnenin dünya koordinatı olan $P=(X,Y,Z)$ noktasının görüntü düzlemindeki yansıması $p=(x,y)$ noktasıdır [29].



Şekil 3.4. Perspektif iz düşüm modeli

Yukarıdaki resimde üçgenlerde benzerlik teoremi kullanılarak aşağıdaki ifadeler elde edilir.

$$x = f \frac{X}{Z}, y = f \frac{Y}{Z} \quad (3.2)$$

Yukarıda elde edilen ifade perspektif izdüşüm modeli olarak adlandırılır. Bu model aşağıdaki özellikler sahiptir:

- Bu model 3 boyutlu uzayı 2 boyutlu imaj düzleminde temsil etmemizi sağlar.
 $\mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^2$
- Dünyada düz çizgiler imaj düzleminde düz çizgi olarak yansıtılır.
- Dünyada paralel çizgiler ufuk noktasında kesişecek şekilde yansıtılırlar.
- Konik şekiller (daire, elipse v.b.) konik olarak yansıtılır.
- Birebir eşleme ve benzersiz ters görüntü elde etme yoktur. İmaj düzlemindeki $p(x,y)$ noktasından doğru bir şekilde $P(X,Y,Z)$ noktası elde edilemeyebilir.
- Ötelenme, dönme ve ölçekleme gibi dönüşümler sonucunda iç açılar korunmaz.

Görüntü düzleminde oluşan $p(x,y)$ noktası homojen formda $\hat{p}(x',y',z')$ olarak yazılabilir. Bu durumda eşitlik 3.2 düzenlenirse aşağıdaki ifade elde edilir [29].

$$x' = \frac{fX}{z'}, y' = \frac{fY}{z'}, z' = Z \quad (3.3)$$

Yukarıdaki ifade matris formunda yazılıp düzenlenirse aşağıdaki ifade elde edilir.

$$\tilde{p} = \begin{pmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

Nesnenin dünya koordinatı olan $P=(X,Y,Z)$ homojen formda ${}^c\tilde{P} = (X,Y,Z,1)^T$ şeklinde ifade edilebilir. Bu durumda perspektif izdüşümü modeli lineer formda aşağıdaki şekilde yazılabilir [29].

$$\tilde{p} = \begin{pmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} {}^c \tilde{P} \quad (3.5)$$

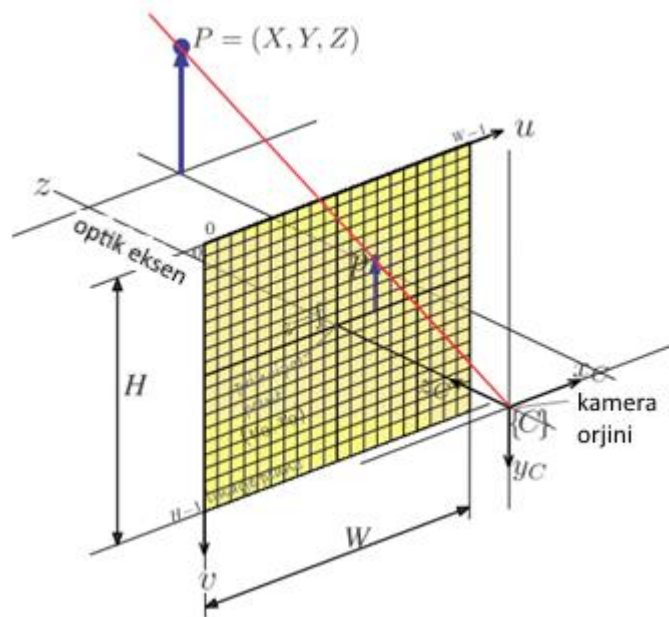
$$\tilde{p} = C {}^c \tilde{P}$$

Burada $C_{3 \times 4}$ kamera matrisini temsil etmektedir. C matrisinin 3. sütunu kamera optik eksenine paralel olan bir vektördür. Kamera matrisi buna göre düzenlenip yazılırsa aşağıdaki ifade elde edilir [29].

$$\tilde{p} = \begin{pmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} {}^c \tilde{P} \quad (3.6)$$

Burada 2. matris projeksiyon matrisidir.

Dijital kamerada imaj düzlemi $W \times H$ boyutlarında ışığa duyarlı photosite denilen bir elemandan oluşmaktadır. Düzlemin her bir elemanı piksel olarak adlandırılır. Piksel koordinatları pozitif tamsayı (u, v) vektöründen oluşmaktadır ve orijini sol üst köşedir (Şekil 3.5.) [29].



Şekil 3.5. Kamera piksel düzlemi

Her bir pikselin boyutu aynı olup imaj düzleminde bir ızgara oluşturur. Piksel koordinatları ile imaj düzlemi koordinatları arasında aşağıdaki ilişki vardır:

$$u = \frac{x}{\rho_w} + u_0, \quad v = \frac{y}{\rho_h} + v_0 \quad (3.7)$$

Burada ρ_w ve ρ_h her bir pikselini genişliğini ve yüksekliğini, (u_0, v_0) bakış noktasını göstermektedir. Bakış noktası, optik eksen ile imaj düzleminin kesiştiği noktadır. Denklem 3.5 piksel koordinatları göz önüne alınıp düzenlenirse aşağıdaki denklem elde edilir [29].

$$\tilde{p} = \underbrace{\begin{pmatrix} 1/\rho_w & 0 & u_0 \\ 0 & 1/\rho_h & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_K \begin{pmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \overset{c}{\tilde{P}} \quad (3.8)$$

Burada K kamera parametre matrisini temsil etmektedir.

Kamera iç parametreleri, kamera ve sensörünün kendine özgü karakteristiğinden ve $f, \rho_w, \rho_h, u_0, v_0$ 'den oluşmaktadır. Kamera dış parametreleri ise kameranın pozisyonunu tanımlar ve öteleme ve dönmesi tanımlayan minimum 6 parametreden oluşur. Kamera iç ve dış parametrelerinin toplamı 11'dir. Kamera matrisi toplam 12 elmandan oluştuğu için tek serbestliklidir. Pratikte bu kamera parametreleri bilinemezler. Bu parametreler kamera kalibrasyon yöntemi ile kestirilebilirler [29].

3.2. Görüntü İşleme

Görüntü işleme, bir veya daha fazla görüntüden başka bir görüntü elde etmeye yarayan sayısal bir yöntemdir. Görüntü işleme genellikle görüntünün boyutunu, netliğini, parlaklığını vb iyileştirilmeleri gerçekleştirmek için kullanılır [29]. Bir başka deyişle görüntü işleme, dijital olarak elde edilmiş görüntünün belirli bir amaca yönelik görüntü üzerinde yapılan tüm işlemlerini kapsamaktadır.

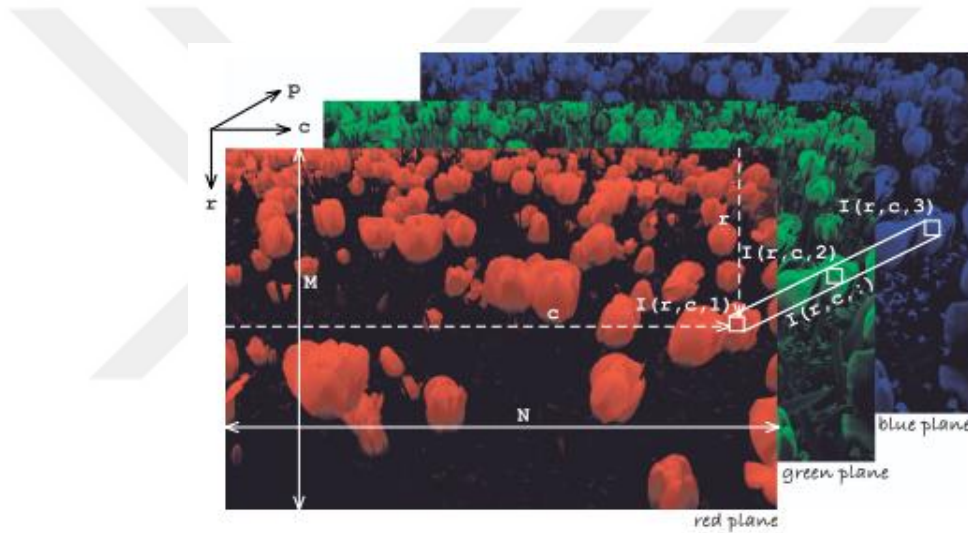
Temel olarak 3 farklı görüntü formatı vardır. Bunlar:

Renkli Görüntü

Gri Seviye Görüntü

Siyah – Beyaz Görüntü

Renkli görüntüde her bir piksel değeri, temel olarak belirlenen kırmızı, yeşil ve mavi 3 temel rengin birleşiminden oluşan bir değere sahiptir ve RGB olarak gösterilmiştir (Şekil 3.6.). Her bir renk bandı 8 bit ile gösterilebildiği için, toplamda her bir piksel $3 \times 8 = 24$ bit ile gösterilebilmektedir [29].



Şekil 3.6. RGB görüntü formatı

Gri seviye görüntüde, her bir piksel değeri 8 bit ile ifade edilmektedir. Bu nedenle her bir piksel değeri $2^8 = 256$ farklı değer alabileceği için, bir piksel değeri 0–255 arası bir değere sahiptir (Şekil 3.7.).



Şekil 3.7 Gri seviye renk skalası

Siyah-beyaz resimde her bir piksel, sadece 1 bit ile ifade edilir. Her bir piksel 0 veya 1 değerini alabilmektedir. siyah renk 0, beyaz renk ise 1 ile gösterilmektedir. Siyah

beyaz resimde, renkli resme göre renk bilgisi kaybolmaktadır. Buna karşın çeşitli görüntü analizi algoritmaları yardımıyla resim içerisinde yer alan objeler tespit edilip objelere ait tanımlayıcı bazı nitelikler elde edilebilmektedir [29].

$$\text{Piksel siyah-beyaz değeri} = \begin{cases} 1 & \text{Eğer pikselin gri değeri} > \text{eşik değeri} \\ 0 & \text{Eğer pikselin gri değeri} < \text{eşik değeri} \end{cases} \quad (3.9)$$

Aşağıda Şekil 3.8.'de üç farklı formatta temsil edilen resim gösterilmiştir.



Gerçek dünyada gözümüz ile gördüğümüz bir görüntü sayısallaştırılıp dijital bir ortama atıldığında elde edilen görüntünün en küçük noktasına piksel denilmektedir. Piksel miktarı görüntü yakalama aracının çözünürlük miktarı ile sınırlıdır. Sayısallaştırma işlemi gerçekleştirildikten sonra görüntü formatına bağlı olarak gri ve siyah-beyaz görüntü için 1 renkli görüntü için 3 matristen oluşan bir yapı elde edilir. Matrisin her bir elemanı bir piksele karşılık gelip renk düzlemindeki sayısal değeri yazmaktadır. Dış dünyadaki görüntü sayısal bir veri matrisi olarak dijital ortamda saklanmaktadır. Dijital ortamımız bir bilgisayar ise matrislere, bir sayı veya matris ile toplama-çıkarma-bölme-çarpma gibi temel matris işlemleri yapılarak görüntü işleme gerçekleştirilebilir. Gri veya siyah-beyaz görüntü 1 matris, renkli görüntü 3 matristen oluştuğu için renkli görüntüye işlemler yapmak daha zordur. Bunda dolayı görüntü işlemede çoğunlukla gri veya siyah-beyaz görüntü tercih edilir.

3.2.1. Sayısal görüntülerin bilgisayar ortamında temsil edilmesi

Resimlerin bilgisayar ortamında değerlendirilebilmeleri için veri formatlarının bilgisayar ortamına uygun hale getirilmeleri gerekmektedir. Bu dönüşüme sayısallaştırma (digitizing) adı verilir (Şekil 3.9.). Bir resmin bilgisayar ortamında işlenebilmesi için sayısal forma dönüştürülmesi gerekmektedir [28].



0	3	2	5	4	7	6	9	8
3	0	1	2	3	4	5	6	7
2	1	0	3	2	5	4	7	6
5	2	3	0	1	2	3	4	5
4	3	2	1	0	3	2	5	4
7	4	5	2	3	0	1	2	3
6	5	4	3	2	1	0	3	2
9	6	7	4	5	2	3	0	1
8	7	6	5	4	3	2	1	0

Şekil 3.9. Görüntünün orijinali ve sayısallaştırma işlemi sonucu elde edilen matris

Siyah-beyaz bir görüntü, iki boyutlu skaler bir fonksiyon olarak $f(x,y)$ şeklinde ifade edilir. Fonksiyonun değeri gerçel bir sayı olduğundan, siyah-beyaz bir görüntü şöyle ifade edilebilir:

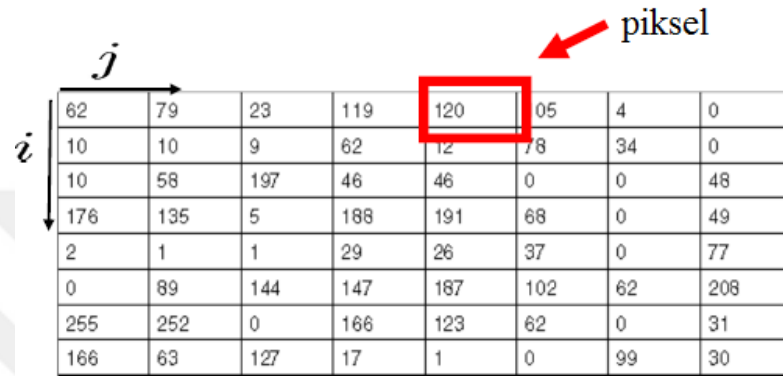
$$f : [a,b] \times [c,d] \rightarrow R \quad (3.10)$$

Renkli bir görüntü, iki boyutlu kırmızı, yeşil ve mavi fonksiyonlardan oluşup aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$f(x,y) = \begin{bmatrix} k(x,y) \\ y(x,y) \\ m(x,y) \end{bmatrix}, \quad f : [a,b] \times [c,d] \rightarrow R \times R \times R \quad (3.11)$$

Sayısal siyah-beyaz bir görüntü, fonksiyonun tanımlı olduğu bölge üzerinde sonlu sayıda nokta alınarak (örnekleme) ve fonksiyonun alabileceği değerler sonlu sayıda tamsayı ile sınırlandırılarak (kuantalama) oluşturulur.

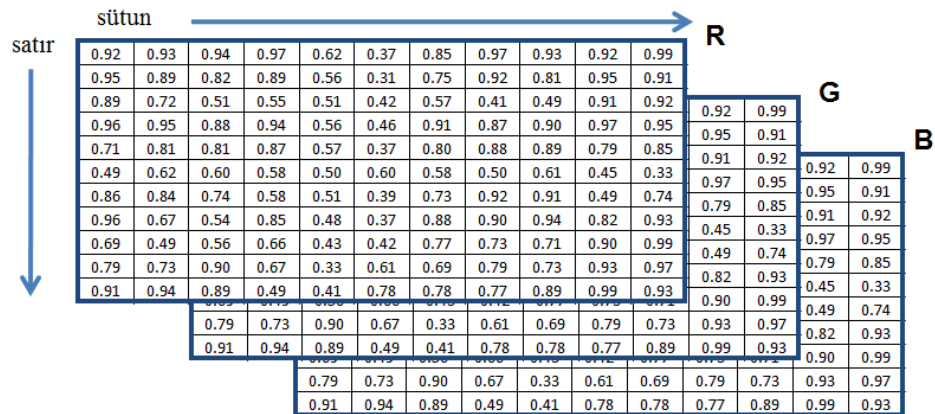
Dolayısıyla, sayısal siyah-beyaz görüntüler tamsayı değerlerden oluşan bir matris olarak ifade edilir. Matrisin herhangi bir elemanına bir PİKSEL denir (Şekil 3.10.).



62	79	23	119	120	05	4	0
10	10	9	62	12	78	34	0
10	58	197	46	46	0	0	48
176	135	5	188	191	68	0	49
2	1	1	29	26	37	0	77
0	89	144	147	187	102	62	208
255	252	0	166	123	62	0	31
166	63	127	17	1	0	99	30

Şekil 3.10. Siyah-beyaz görüntüden elde edilen matris ve piksel gösterimi

Sayısal renkli bir görüntü, tamsayı değerlerden oluşan üç matris olarak ifade edilir (Şekil 3.11.).



0.92	0.93	0.94	0.97	0.62	0.37	0.85	0.97	0.93	0.92	0.99
0.95	0.89	0.82	0.89	0.56	0.31	0.75	0.92	0.81	0.95	0.91
0.89	0.72	0.51	0.55	0.51	0.42	0.57	0.41	0.49	0.91	0.92
0.96	0.95	0.88	0.94	0.56	0.46	0.91	0.87	0.90	0.97	0.95
0.71	0.81	0.81	0.87	0.57	0.37	0.80	0.88	0.89	0.79	0.85
0.49	0.62	0.60	0.58	0.50	0.60	0.58	0.50	0.61	0.45	0.33
0.86	0.84	0.74	0.58	0.51	0.39	0.73	0.92	0.91	0.49	0.74
0.96	0.67	0.54	0.85	0.48	0.37	0.88	0.90	0.94	0.82	0.93
0.69	0.49	0.56	0.66	0.43	0.42	0.77	0.73	0.71	0.90	0.99
0.79	0.73	0.90	0.67	0.33	0.61	0.69	0.79	0.73	0.93	0.97
0.91	0.94	0.89	0.49	0.41	0.78	0.78	0.77	0.89	0.99	0.93

0.92	0.99
0.95	0.91
0.91	0.92
0.97	0.95
0.79	0.85
0.45	0.33
0.49	0.74
0.82	0.93
0.90	0.99

0.92	0.99
0.95	0.91
0.91	0.92
0.97	0.95
0.79	0.85
0.45	0.33
0.49	0.74
0.82	0.93
0.90	0.99

Şekil 3.11. Renkli görüntüden elde edilen matrisler

3.2.2. Görüntü işleme aşamaları

Gerçek dünyadan elde edilen görüntüden amaca uygun yararlı bilginin elde edilebilmesi için görüntünün bazı aşamalardan geçmesi gerekmektedir. Görüntü işleme adımları olarak adlandırılan bu aşamalar temel olarak 4 tanedir:

- Kullanılacak görüntünün elde edilmesi
- Önişleme
- Özellik çıkartımı ve veri azaltma
- Nitelik analizi

3.2.2.1. Kullanılacak görüntünün elde edilmesi

Görüntü işlemenin gerçekleştirilebilmesi için öncelikle gerçek dünyadaki görüntünün dijital ortama aktarılması gerekmektedir. Bunun için standart video kamera, sayısal kamera, tarayıcı vb. cihazlar kullanılarak görüntü elde edilir.

3.2.2.2. Önişleme

Gerçek dünyadaki görüntüden görüntü yakalama cihazları ile sayısallaştırılıp resim elde edilmesi sırasında resim üzerinde bazı bozulmalar meydana gelebilir. Resmin renginde, parlaklığından vb. meydana gelen bu bozulmalara gürültü denilmektedir. Önişlem aşaması resim üzerindeki gürültüyü, tekrar eden verileri veya görüntü işlemi sırasında kullanılmayacak olan verilerin ortadan kaldırılma işlemlerini kapsamaktadır [28]. Önişlem aşamasında farklı özelliklerde filtreler kullanılabilir.

3.2.2.3. Özellik çıkartımı ve veri azaltma

Dijital görüntülerden özellik çıkartımı; dijital resme, resmin içindeki objelere veya resmin bir bölgesine ait tanımlayıcı özelliklerin elde edilmesi işlemidir. İstatistiksel yöntemler, histogram ve projeksiyon, segmentasyon, doku analizi, sezgisel

yöntemler vb. dijital görüntülerden özellik çıkartımı için kullanılan teknikler arasında yer almaktadır [28].

Dijital görüntülerde yer alan objelere ait niteliklerin tespit edilmesi için öncelikle objelerin tespit edilmesi gerekmektedir. Dijital görüntülerde objelerin veya objelere ait anlamlı parçaların tespit edilmesi işlemi segmentasyon olarak adlandırılır. Segmentasyon algoritmaları, resimdeki renk, desen, parlaklık vb. değişimleri göz önüne almaktadır. Parlaklık değişimleri ikili eşikleme yöntemleriyle, renk değişimleri renk uzayları arasındaki dönüşümle, desen değişimleri frekans eksenli işlemleri ile tespit edilebilir. Segmentasyon bölge bazlı segmentasyon, kümeleme algoritmalarına dayanan segmentasyon ve kenar/çizgilerin birleştirilmesine dayanan segmentasyon başlıklarında incelenebilir [34].

Gerçek dünyadan elde edilmiş dijital görüntü piksellerden oluşan bir matris şeklinde saklanmaktadır. Bu matris resim içerisinde ilgilendiğimiz nesne hakkında çok az bilgi barındırmaktadır. Nesnenin pozunu, hareket hızını, tipi vb. soruları bu bilgi ile cevaplayamayız. Buna benzer soruların cevaplarına görüntüden elde edilen ölçümler ve görüntü özellikleri denilmektedir. Nesne özellikleri, robot kontrolü için gerekli olan resmin ve ham malzemenin temelini oluşturmaktadır [28].

Özellik çıkarma görüntü üzerindeki işlemler olup bir veya daha fazla görüntü özelliği elde edilebilir. Bu özellikler sayısal veya vektörel büyüklükler olabilir.

Görüntü özellikleri bölgesel, çizgisel ve noktasal olmak üzere 3 temel başlıkta toplanabilir.

Bölgesel özellikler: Görüntü bölütleme (segmentation) uygulamada görüntüyü anlamlı bölgelere ayırma işlemidir. Resim içerisinde ilgililenen nesneye veya bölgeye ait piksellerin ayrılması bu işlemin amacını oluşturmaktadır. Bölütleme görüntü işleminin ilk yaklaşımlarından birini oluşturmaktadır.

Görüntü bölütleme, sınıflama (Classification), temsil (Representation) ve betimleme (Description) olmak üzere 3 alt başlığa ayrılabilir.

Sınıflama (Classification) her bir piksele uygulanan ve bu pikselin uygun sınıflardan birine atanmasını içeren karar verme sürecinden oluşmaktadır.

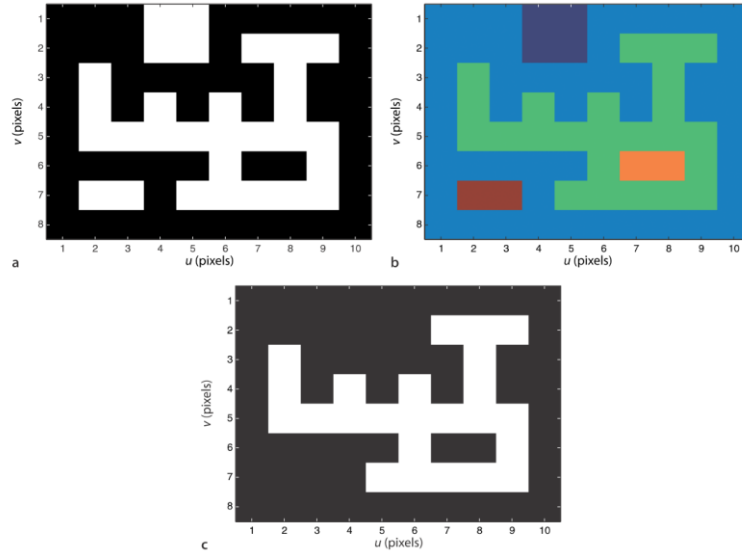
Gri seviye sınıflamada her bir piksel seçilen eşik değerinin altında veya üstünse olma durumuna göre işleme tabi tutulur.

$$c[u, v] = \begin{cases} 0 & I[u, c] < t \\ 1 & I[u, c] \geq t \end{cases} \quad (3.12)$$

Burada I görüntü matrisini, u - v matrisin eleman indisini ve t eşik değerini göstermektedir.

Renkli seviye sınıflama zengin veriye sahiptir. Ancak renk sabitliğindeki sorunlardan dolayı robotik uygulamalarında genellikle uzak durulur.

Görüntü bölümlenmesinin ikinci konusu olan temsil işlemi (Representation) uzaysal setleri oluşturmak için aynı sınıfa ait komşu piksellerin gösterilmesidir. Bu setler, ilişki setin sınırlarını tanımlayan piksel koordinatlarının veya her bir pikselin etiketi ile temsil edilebilir. Bu setler $S_1 \dots S_m$ ile temsil edilmektedir. Bir başka deyişle sınıflama yöntemi ile resim içerisinde sınıflara ayrılan bölgelerin birbirleriyle olan temsil yöntemiyle incelenip uzaysal setler oluşturulur (Şekil 3.12). Görüntü işleme teknikleriyle siyah-beyaz görüntü elde edilmiştir. Elde edilen görüntüde birbiriyle bağlantılı olmayan 3 ayrı beyaz bölge görülmektedir. Bu farklı bölgeler farklı renklerle etiketlenebilir (Şekil 3.12.b). Etiketleme işleminden sonra en büyük alana sahip bölge resim içerisinde kolay bir şekilde ayrılabilir (Şekil 3.12.c) [29].



Şekil 3.12. Temsil işlemi

Üçüncü ve son aşama olan betimlemede (Description) kümeler (sets), boyut, konum ve şekil gibi skaler veya vektörel özellikleri açısından tarif edilir. Ancak bu temsil, ilgili kümenin boyut, konum ve şekil gibi öz bilgileri yerine sadece mantıksal piksel değerlerine sahip bir görüntüdür.

Burada resim içerisinde odaklanılan nesne resmin geri kalanından ayrılıp bir küme elde edildikten sonra bu kümeye ait boyut, konum vb. elde edilmesi için moments yönteminden yararlanır.

Görünütü özelliklerinin elde edilmesi açısından basit ve zevgin bir yöntem olan moments cismin boyutu, konumu ve şeklini hesaplamada kullanılır. Moments I ile temsil edilen skaler bir büyüklük olup aşağıdaki şekilde ifade edilir [29].

$$m_{pq} = \sum_{(u,v) \in I} u^p v^q I[u,v] \quad (3.13)$$

Burada $(p+q)$ momentin kuvvetidir. Sıfırıncı kuvvetten moment $(p=q=0)$ aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$m_{pq} = \sum_{(u,v) \in I} I[u,v] \quad (3.14)$$

Bu ifade arka plan piksellerinin sıfır olduğu siyah-beyaz görüntüye ait olup, beyaz bölgenin alanını vermektedir.

Görüntü içerisinde ilgilenilen bölgenin merkezinin koordinatları aşağıdaki şekilde elde edilir [29].

$$u_c = \frac{m_{10}}{m_{00}}, v_c = \frac{m_{01}}{m_{00}} \quad (3.15)$$

Burada m_{00} bölgenin kütlesi m_{10} ve m_{01} birinci mertebede momentleri göstermektedir.

Çizgisel özellikleri: Çizgiler, yolar, binalar ve kapılar gibi özellikle insan yapımı ortamlara ait olan görsel özellikleridir.

Nokta özellikleri: Görüntüden özellik elde etme yöntemlerinin sonucusu nokta özellikleridir. Bu noktalar görüntü içerisinde ayırt edilebilen genellikle köşe noktalarıdır.

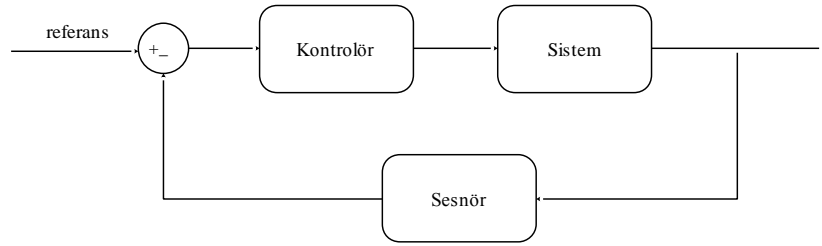
3.2.2.4. Nitelik analizi

Kameradan elde edilen dijital görüntüden tanımlayıcı nitelikler bir araya getirilerek resim veya objeler için özellik vektörleri oluşturulur. Elde edilen bu özellik vektörleri istatistiksel yöntemler ve/veya yapay zekâ teknikleri ile değerlendirilerek sınıflandırma, tanıma, tahmin gibi uygulamalar gerçekleştirilmektedir. Sınıflandırma veya tanıma işlemlerinde küme merkezlerini belirlemekte kullanılan ortalama vektörü ile objeye ait özellik vektörü arasında ilişki Öklit uzaklığı, mutlak uzaklık, Minkowski uzaklığı gibi istatistiksel yöntemlerle incelenebilir [34].

BÖLÜM 4. ROBOT KONTROLÜ

Robot kontrolü robotiğin önemli bir konusudur. Robotun uç işlevcisinin istenen yörüngeyi takip edebilmesi için kontrolör kullanılmalıdır. Robotların kontrolünde konum, hız ve kuvvet gibi kontrol yöntemleri kullanılır. Konum kontrolünde robotun uç işlevcisinin istenen yörüngeyi takip etmesi istenir. Hız kontrolünde ise her bir serbestliği ait motorların hız kontrolü gerçekleştirilir. Tork kontrolü ise robotta meydana gelen bozucuları gidermek için kullanılır.

Robotun istenilen hareketi gerçekleştirebilmesi için kapalı çevrim kontrol edilmesi gerekmektedir. Kontrol edilmek istenen parametre uygun sensör ile gerçek değeri okunup geri besleme sinyali olarak alınır. Elde edilen bu değer referans değeri ile kıyaslanıp ilgili kontrolöre hata sinyali olarak uygulanır. Kontrolör, kontrol edilmek istenen parametre için uygun kontrol sinyali üreterek sistemi kontrol eder (Şekil 4.1.).



Şekil 4.1. Kapalı çevrim kontrolör genel yapısı

Bu çalışmada görüntü uzayı içerisine yerleştirilen cismin robot tarafından tutucu tarafından otonom bir şekilde yakalanması amaçlanmıştır. Bundan dolayı bu çalışmada robot tutucunun konum kontrolü gerçekleştirilmiştir.

4.1. PID - 2DOF PID Kontrolör

1940'lı yıllarda ortaya çıkan PID kontrolörün teorisi ve uygulaması ile ilgili çok fazla çalışma yapılmıştır. PID kontrolör basit yapısı ve parametrelerinin kolay ayarlanabilmesinden dolayı sanayi uygulamalarında geniş bir yere sahiptir [1,2].

2-dof PID kontrolör, PID kontrolörün kısıtlarının üstesinden gelmek için geliştirmiştir. 2-dof PID, PID'nin değiştirilmiş halidir [3,4,5].

PID kontrolör lineer bir kontrolördür. Hata sinyali $e(t)$ 'yi kontrol sinyali $u(t)$ 'ye çevirir. Lineer bir kontrolcü olduğundan zaman ve frekans domenlerinde incelenebilir. Zaman domeninde kontrol sinyali şu şekildedir:

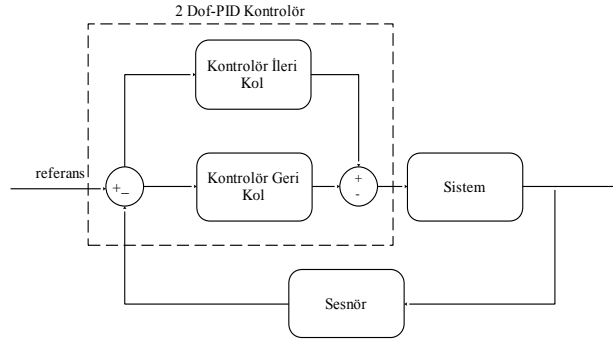
$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{d}{dt} e(t) \right) \quad (4.1)$$

PID kontrolde en önemli nokta kontrolör katsayıları olan orantı kazancını (K_p), integral zamanını (T_i) ve türev zamanını (T_d) ayarlamaktır. Bunun için deneysel ve teorik birçok yöntem geliştirilmiştir.

PID kontrolörün ayrık zamandaki matematiksel ifadesi aşağıdaki şekildedir.

$$u(z) = \left(K_p + \frac{K_i}{1-z^{-1}} + K_d(1-z^{-1}) \right) E(z) \quad (4.2)$$

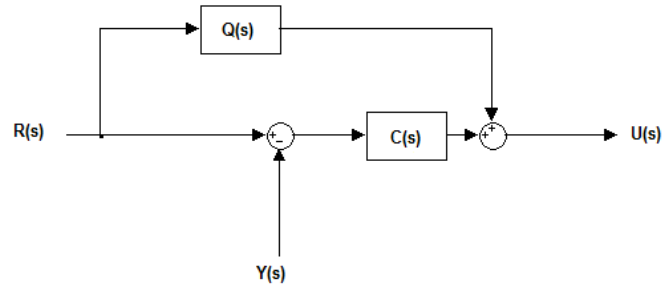
2dof-PID kontrolör ileri besleme kompanzatör ile geri besleme kompanzatörün birleşiminden oluşmaktadır (Şekil 4.2.).



Şekil 4.2. 2dof PID blok diyagramı

Kontrolörün ileri besleme kolu PD kontrolör olup geri besleme kolu ise PID kontrolörden oluşmaktadır. Ayar ağırlıkları olan b ve c ileri besleme kolundaki türev ve oransal katsayıda kullanılmaktadır.

2dof-PID kontrolör eşdeğeri aşağıdaki Şekil 4.3.'deki blok diyagramı ile modellenenabilir.



Şekil 4.3. 2 dof-PID eş değer blok diyagramı

Burada R(s) referans sinyali, Y(s) geri besleme sinyalini ve C(s) 1dof kontrolörü Q(s) ise ileri besleme kolundaki kontrolörü temsil etmektedir. Bu durumda 2dof-PID zaman domeninde aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$u(t) = K_p \left(b(r - y) + \frac{1}{T_i} \int (r - y) dt + T_d \frac{d}{dt} (cr - y) \right) \quad (4.3)$$

burada b ve c ayar ağırlıklarını temsil etmektedir.

2-dof PID kontrolörün ayrık zamandaki matematiksel ifadesi aşağıdaki şekildedir.

$$u(z) = (K_p b(r - y)) + \frac{K_i}{1 - z^{-1}}(r - y) + K_d((1 - z^{-1})(cr - y)) \quad (4.4)$$

4.2. Görsel Servo Kontrol

Robotların istenilen hareketleri yapabilmesi için sensörler önemli bir yere sahiptir. İnsanlar dış dünyayı beş duyu organıyla algılayıp çevresinden gelen tepkilere bu organlarla cevap veriler. Robotlar dış dünya ile algılayıcılar ile iletişime geçebilmektedir. Bununla ilgili farklı çeşitte ve farklı özellikte algılayıcılar mevcuttur. Robotlarda algılayıcı olarak kameranın kullanılması son yıllarda artmıştır. Özellikle 1980'lerden sonra robotun kontrolünde kameranın kullanılması ile ilgili yapılan akademik çalışmalar hız kazanmıştır.

Robotlarda kameranın bir algılayıcı gibi kullanılması yöntemine literatürde Görsel Servo Kontrol (Visual Servoing, Visual Servo Control) adı verilmektedir. En genel anlamda Görsel Servo Kontrol, robotun hareket kontrolü için gerekli olan geri besleme sinyalini belirlemek amacıyla kameradan elde edilen görüntünün bilgisayar yardımıyla işlenip elde edilen verilerin kullanılması anlamına gelmektedir [20,30].

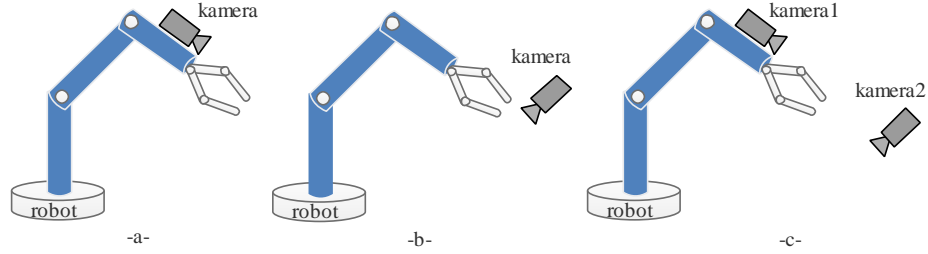
1980 yılında Sanderson ve Weiss [17] tarafından sistemin sınıflandırılması yapıp, Görsel Servo Kontrol ile ilgili değişik yaklaşımlar sistemin doğruluğunu ve kararlılığını arttırmak için ortaya konmuştur.

Burada ilk olarak Görsel Servo Kontrol'de önemli bir konu olan kamera konumu ve sayısından bahsedildikten sonra sistemin sınıflandırılması yapılacaktır.

4.2.1. Kamera konumu ve sayısı

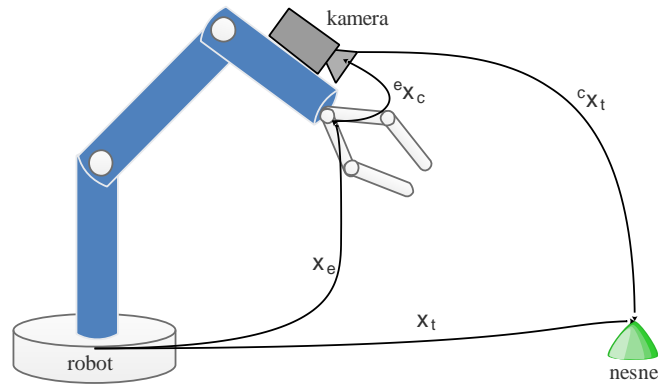
Görsel Servo Kontrol sistemlerinde genellikle iki temel kamera konumundan biri veya birleştirilmiş hali kullanılmaktadır (Şekil 4.4.).

- Uç işlevciye sabitlenmiş kamera konumu
- Çalışma uzayında sabitlenmiş kamera konumu
- Bu iki kamera konumunun birleşimi olan hibrit kamera konumu



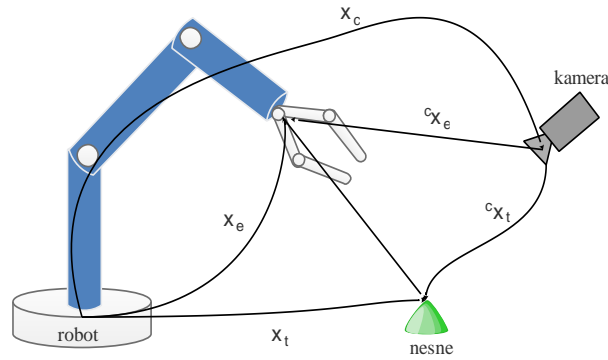
Şekil 4.4. a- Uç işlevciye sabitlenmiş model b- Çalışma uzayına sabitlenmiş model c- Hibrit model

Birinci kamera konum modelinde kamera uç işlevcinin üzerine monte edilmiştir. Burada kamera pozunu ile uç işlevcinin pozunu arasında bilinen sabit bir ilişki vardır. Bu ilişki ${}^e x_c$ şeklinde tanımlanır. Hedef nesnenin kamera çerçevesine göre pozunu ${}^c x_t$ ile gösterilir. Bu ilişkiler Şekil 4.5.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Uç işlevciye sabitlenmiş model için kamera-nesne-robot ilişkisi

İkinci kamera konum modelinde kamera, çalışma uzayı içerisinde sabit bir yere konumlandırılır. Bu durumda, kameranın robotun temel koordinat sistemine göre konumu ${}^0 x_c$ ile cisme göre konumu ise ${}^c x_t$ ile temsil edilir. Bu modelde hedefin kamera görüntüsü, hedef uç işlevci olmadığı sürece robotun hareketinden bağımsız olmaktadır (Şekil 4.6.).



Şekil 4.6. Çalışma uzayına sabitlenmiş model için kamera-nesne-robot

Her iki kamera konum modelinde kamera kalibrasyonu, odak uzaklığı, piksel aralığı ve odak noktası gibi kamera parametrelerini belirlemek için yapılmalıdır. Sabit bir kamera pozunu (${}^0 x_c$), genel koordinat sistemine göre yerleştirilmelidir ve kamera kalibrasyonundan elde edilen parametreleri içermelidir. Birinci kamera konum modeli için göreceli poz ${}^e x_c$ hesaplanmalıdır. Bu işlem el-göz kalibrasyonu (hand/eye calibration) olarak adlandırılır. Kamera kalibrasyonu bilgisayar görmesinde önemli bir konudur.

Hibrit kamera konumu modeli yukarıda bahsedilen kamera konumlarının birleşimi olup burada bir kamera uç işlevcisine, diğer kamera ise çalışma uzayına sabitlenmiştir [31,32]. Flandi ve arkadaşları yaptıkları çalışmada hibrit kamera konum modelini kullanmışlardır. Burada uç işlevciye sabitlenmiş kamera, robotun dönme hareketini, diğer kamera ise öteleme hareketini birbirlerinden bağımsız bir şekilde kontrol edecek şekilde düzenlenmiştir [31]. Marchand ve Hager ise robot kolunun engellerden kaçabilmesi için çalışma uzayına sabitlenmiş kameranın diğer kamerayı yönlendirebilmesi için yörünge planlama algoritması geliştirmişlerdir [32].

4.2.2. Görsel servo kontrol sınıflandırması

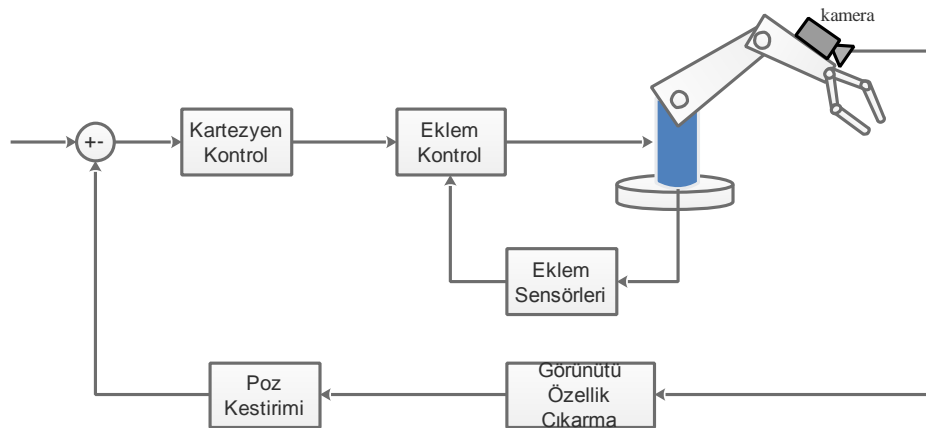
Sanderson ve Weiss tarafından Görsel Servo Kontrol sisteminin ilk sınıflandırması 1980 yılında yapılmıştır. Tüm Görsel Servo Sistemler aşağıdaki iki soruya verdikleri cevaba göre sınıflandırılabilirler.

- Kontrol yapısı, görüntü sistemi tarafından sağlanan ayar (hedef) noktalar, robotun eklem seviyesindeki kontrolörü için giriş midir yoksa görsel kontrolör doğrudan eklem seviyesindeki girişleri mi hesaplar?
- Hata sinyali 3B koordinatlardan mı yoksa doğrudan görüntü özelliklerinden mi tanımlanır?

Görsel Servo Kontrol ile ilgili yukarıdaki iki soru karşımıza beş ana sonuç çıkarır. Bu kategoriler Görsel Servo Kontrol ile ilgili temel yapıları oluşturur. Görsel Servo Kontrolle ilgili iki ana kategori aşağıda verilmiştir:

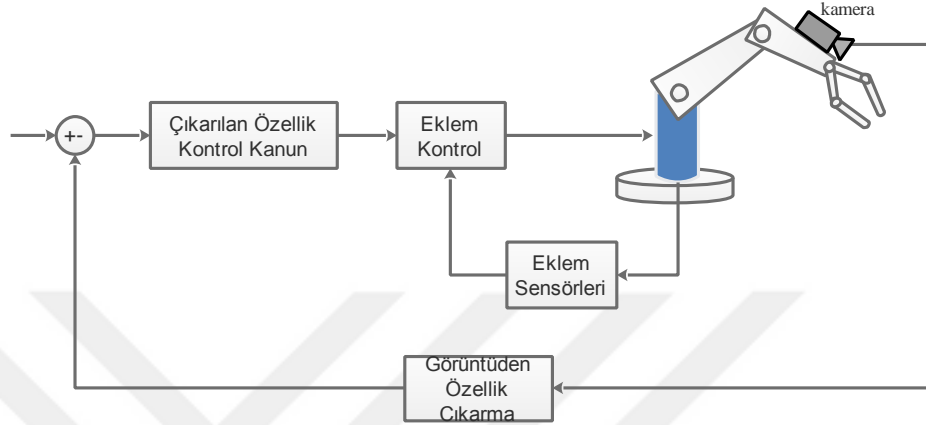
- Dolaylı Yöntemler
 - Dinamik Pozisyon Tabanlı Yöntem
 - Dinamik Görüntü Tabanlı Yöntem
- Doğrudan Yöntemler
 - Pozisyon Tabanlı Görsel Servo Yöntemi
 - Görüntü Tabanlı Görsel Servo Yöntemi
 - 2-1/2-D Görsel Servo Kontrol

Dinamik Pozisyon Tabanlı Yöntemi hiyerarşik bir yapıya sahiptir (Şekil 4.7.). Bu kontrol yönteminde kameradan sağlanan görüntü, eklem değişkenlerini kontrol etmek için hedef noktaları sağlar ve her bir ekleme ait sensörden gelen geri besleme, robotu dengelemek için kullanılır [20].



Şekil 4.7. Dinamik pozisyon tabanlı kontrol yöntemi

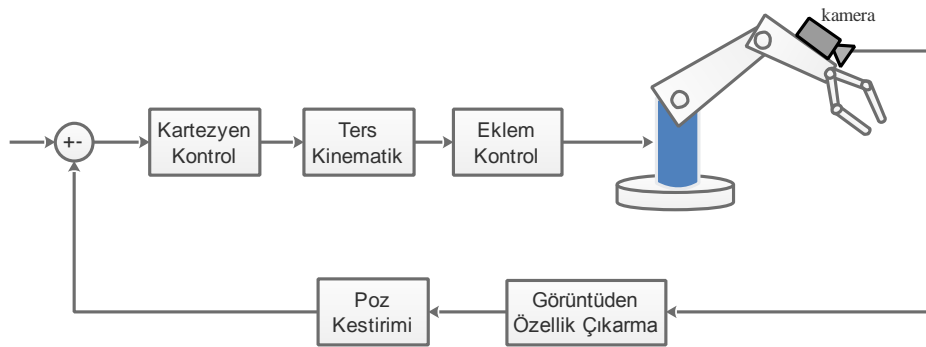
Buna karşın Dinamik Görüntü Tabanlı Yöntemde robot kontrolörünü bütünüyle ortadan kaldırıp yerine eklem girişlerini doğrudan hesaplayan görsel servo kontrolör kullanılır (Şekil 4.8.). Bu şekilde görüntü tek başına mekanizmayı dengelemek için kullanılır [20].



Şekil 4.8. Dinamik görüntü tabanlı yöntem

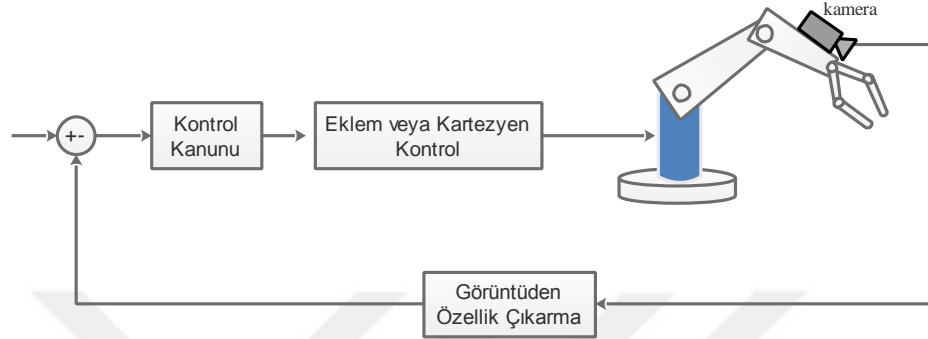
İkinci temel sınıflandırma doğrudan kontrol yöntemi olup Pozisyon ve Görüntü Tabanlı Görsel Servo Yöntemi olarak ikiye ayrılır.

Pozisyon temelli kontrolde robotu kontrol etmek için hedeflenen özellikler kameradan gelen resimden elde edilir (Şekil 4.9.). Bu özellikler, kameraya göre hedefin pozunu tahmin etmek için bilinen kamera modeli ve hedefin geometrik modeli ile birlikte kullanılır. Geri besleme, kestirilen poz uzayı içinde hataları azaltmak için kullanılır [20].



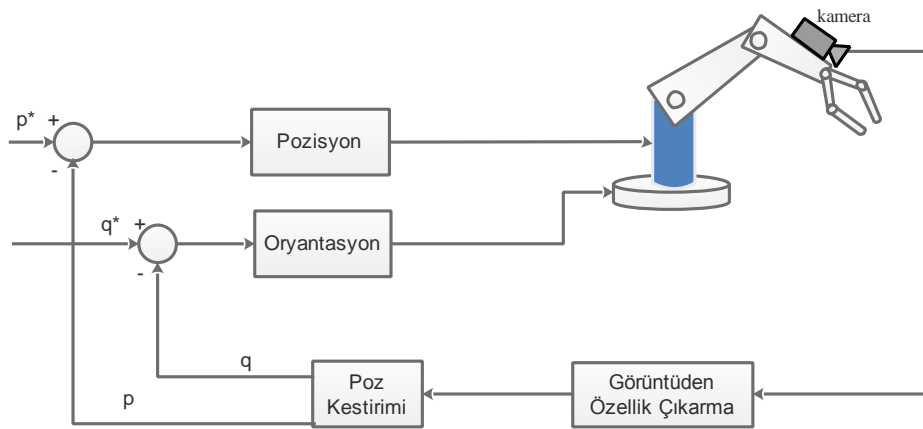
Şekil 4.9. Pozisyon tabanlı görsel servo yöntemi

Görüntü temelli kontrolde, kontrol değerleri kameradan elde edilen resim özelliklerinden hesaplanır (Şekil 4.10.). Bu kontrol yaklaşımı hesaplama gecikmesini azaltır, resim yorumlama gerekliliğini ortadan kaldırır, sensör modelinden ve kamera kalibrasyonundan kaynaklı hataları giderir [20].



Şekil 4.10. Görüntü tabanlı görsel servo yöntemi

Malis ve arkadaşları konum temelli ve görüntü temelli kontrol yöntemlerinin birleşimi olan 2-1/2-D Görsel Servo Kontrol yöntemini tanıtmışlardır [23]. Bu yöntemde her iki kontrol yönteminin üstün özellikleri alınıp sisteme uygulanmıştır. Görüntü temelli kontrol robotun ötelenmesi ile ilgili kısmını kontrol etmektedir. Konum temelli kontrolde ise mevcut görüntü ile referans görüntüyü kıyaslayıp, görüntüde meydana gelen rotasyon miktarını hesaplamak için kullanılır (Şekil 4.11.).



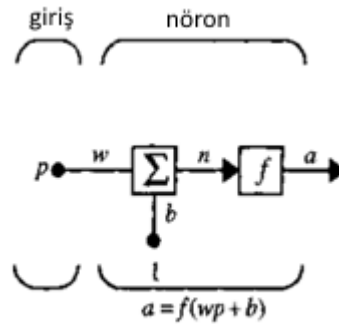
Şekil 4.11. Hibrit servo kontrol yöntemi

Bu çalışmada doğrudan kontrol yöntemi olan Pozisyon Tabanlı Görsel Servo Yöntem seçilmiştir.

4.3. Yapay Sinir Ağları

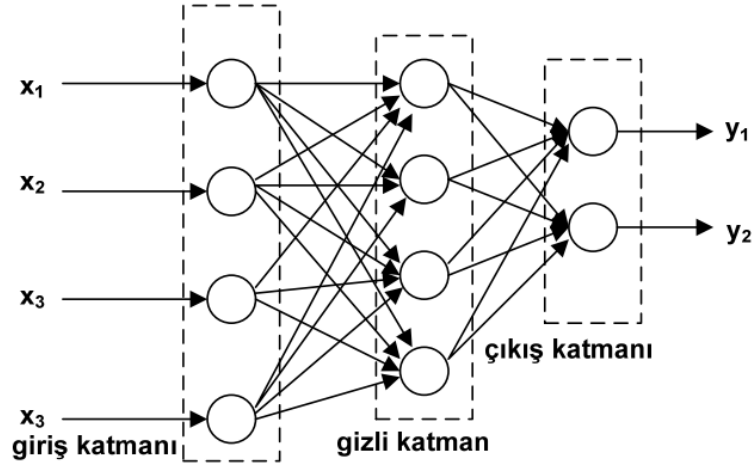
İnsan beyni, duyu organlarıyla çevresinden aldığı bilgilerin işlendiği, algılandığı, yorumlandığı ve saklandığı birimdir. Beynin özelinde ise sinir hücreleri bu işlemleri gerçekleştirmektedir. Sinir hücrelerinin gelen veriyi işlemesi ve uygun sonuç üretmesi bilim insanlarını bu hücreleri matematiksel olarak modelleme araştırmalarına yoğunlaştırmıştır. 1950-60 yıllarında başlayan çalışmalar 1970-80 yıllarında yoğunlaşmış olup günümüzde kullandığımız modellerin temelleri atılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda yapay sinir ağları modeli ortaya çıkmıştır. Günümüzde yapay sinir ağları uzay, otomotiv, bankacılık, savunma sanayi, reklam, finans, imalat sanayi, tıp v.b. birçok alanda kullanılmaktadır [33].

Yapay sinir ağlarının en küçük birimine nöron denir (Şekil 4.12.). Nöron skaler giriş, ağırlık ve skaler çıkış elemanından oluşmaktadır [33].



Şekil 4.12. Tek giriş nöron

Nöronlar bir araya gelerek ağ yapısını oluşturur. Yapay sinir ağlarının temel yapısı Şekil 4.13.'de verilmiştir. Ağ giriş, gizli ve çıkış katmanı olmak üzere 3 ana katmandan oluşmaktadır.



Şekil 4.13. YSA'nın temel yapısı

Giriş verisi nörona geldikten sonra bir katsayı ile çarpılır. Elde edilen sonuç aktivasyon fonksiyonu olarak adlandırılan bir fonksiyona uygulanır. Fonksiyondan nöronun çıkış değeri elde edilmiş olur. Yapay sinir ağlarının yapısında bulunan nöronlar için eşik, lineer, sigmoid, hipertanjant gibi aktivasyon fonksiyonları bulunmaktadır.

Yapay sinir ağlarının kullanmadan önce hazır hale getirilmesi gerekmektedir. Yapılan bu ön işleme ağı öğrenmesi denmektedir. Öğrenme en temelde ağıdaki nöronların ağırlık ve eşiklerini güncellenme işlemidir. Bir başka deyişle öğrenme ağı eğitimi anlamına gelmektedir [33]. Öğrenme işlemi Danışmalı, Danışmansız ve Takviyeli olmak üzere 3 ana gurubu ayrılmaktadır.

Danışmalı öğrenmede, sistemden toplanan giriş-hedeften oluşan eğitim veri seti kullanılır. Giriş eğitim verisi ağı uygulanır ve ağı çıkışı ile hedef eğitim verisi kıyaslanır. Bu kıyaslama işlem ağırlık ve eşikleri ağı çıkışı ile hedef değerin birbirine yaklaşıncaya kadar güncellemeye devam eder [33].

Takviyeli öğrenmede ağı çıkışının ne olması gerektiği ağı önceden bildirilememekte, ağı çıkışının doğru veya yanlış olduğu belirtilebilmektedir. Bu öğrenme yöntemi takviyeli öğrenme olarak isimlendirilir. Takviyeli öğrenme yöntemi kullanan yapay sinir ağlarında, giriş verileri ağı uygulanır ve sonucun danışman tarafından

değerlendirilmesi istenir. Danışmanın değerlendirmesi sonucuna göre ağırlıkları güncellenir [33].

Danışmansız öğrenmede, danışmalı öğrenmede olduğu gibi hedef eğitim verisi bulunmamaktadır. Ağırlıklar ve eşikler sadece giriş verisine göre güncellenir. Bu öğrenme tipi genellikle kümeleme operasyonlarında kullanılır [33].



BÖLÜM 5. UYGULAMALAR

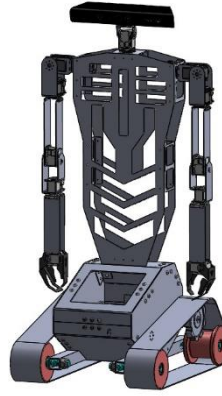
Tasarım ve imalat Makine Mühendisliğinin önemli konularından bir tanesidir. Tasarım, imalatın ön adımını oluşturmaktadır. Tasarım aşamasında özellikle imalatla ilgili bazı faktörler göz önünde bulundurulmalıdır.

Bu bölümde üst kısmı insanın üst gövdesine benzeyen alt kısmı zeminde hareketini sağlamak için paletli bir mekanizmaya sahip mobil insansı robotun imalatı ve donanımı hakkında bilgi verilecektir. Daha sonra robota uygulanan kontrol algoritmaları tanıtılıp elde edilen veriler tablo ve grafik olarak verilecektir.

5.1. Robotun Tasarımı ve İmalatı

Mobil insansı robotlar yapısal olarak üst kısmı insana benzeyen alt kısımları ise zeminde hareketini sağlayacak tekerlekli-paletli mekanizmalara sahiptir. Yapılan robotların büyük bir çoğunluğu ofis gibi yerlerde kullanılması amaçlandığından tekerlekli yapıya sahiptir. Burada robotun ileri dış ortamda çalışması amaçlandığından paletli mekanizma seçilmiştir.

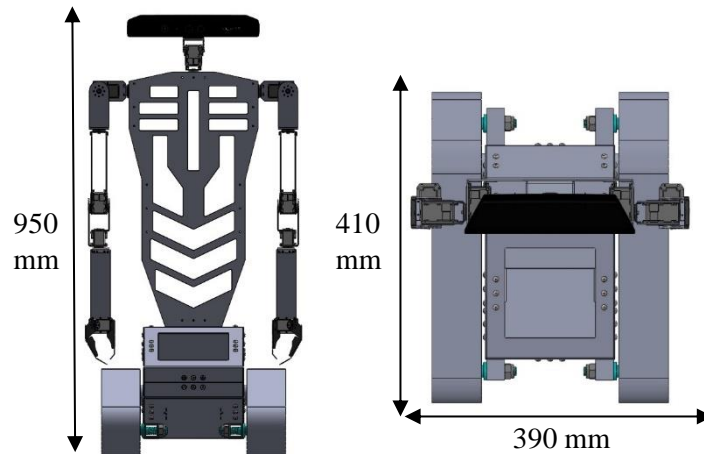
Robotun tasarımı Solidworks 2012 programında katı model ve sac metal modülleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.1.).



Şekil 5.1. Robotun tasarım resmi

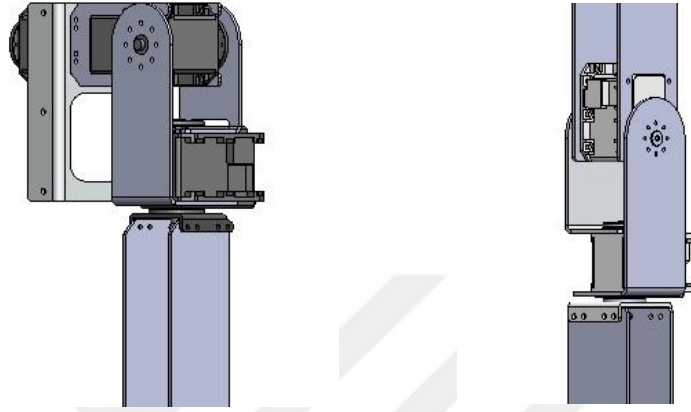
Robotun tasarımında hareket zenginliği arttırmak için her bir serbestliğe döner mafsallı yerleştirilmiştir. Her bir kolda üçü omuz bölgesinde, ikisi dirsek bölgesinde ve bir tanesi tutucuda olmak üzere toplam 6 serbestlik derecesi bulunmaktadır (Şekil 5.2.). Robot kafasında yukarı-aşağı ve sağa-sola dönmesini sağlamak için 2 serbestlik derecesi bulunmaktadır. Robotun zeminde hareketini sağlayan paletli mekanizmasında ise 2 serbestlik derecesi vardır. Robot toplam 16 serbestlik derecesine sahiptir.

İmalatı gerçekleştirilen robotun özellikle üst bölümünün insana benzemesi amaçlanmıştır. Robotun uzuvlarının boyutlandırılmasında insan boy-uzuv ilişkisi göz önünde tutulmuştur. Robot platformun yerden yüksekliği 950 mm, zeminde iz düşüm genişliği 390 mm, derinliği 410 mm'dir. Aşağıdaki Şekil 5.2.'de robot platforma ait ana boyutlar verilmiştir.



Şekil 5.2. Robot platformun ana boyutları

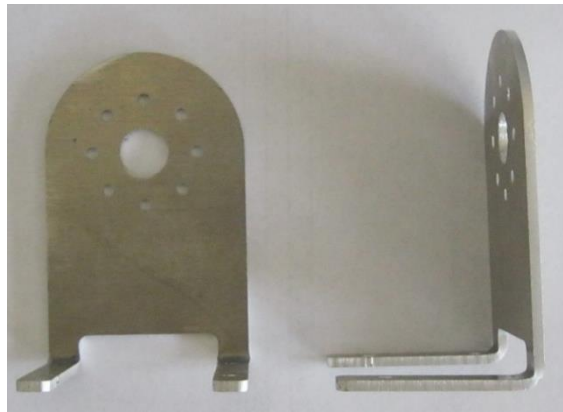
Robotun tasarımı ağırlık ve kolay imal edilebilirlik olmak üzere iki önemli kıstas göz önünde tutularak gerçekleştirilmiştir. Özellikle robotun kollarında tasarım ve imalatın kolay olabilmesi için motorlar kollardaki eklemlere direkt olarak bağlanmıştır (Şekil 5.3.).



Şekil 5.3. Motorların kollarda uzuvlara bağlanma şekli

Robotun imalatında sanayiden ve Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği Laboratuvarından destek alınmıştır.

Robotun üst gövde, kollar, kafa ve alt şase kısımlarında 2mm kalınlığında 6000 serisi alüminyum sac metal kullanılmıştır. 1x2 metre tabaka olarak alınan alüminyum malzeme önce lazer kesim daha sonra ihtiyaç duyulan parçalarda bükme imalat yöntemleri kullanılarak elde edilmiştir. İmalat sonrası elde edilen parçalardan örnekler aşağıda Şekil 5.4. ve 5.5.'de verilmiştir.



Şekil 5.4. Omuz motor bağlantı parçası



Şekil 5.5. Omuz dirsek bağlantı parçası

Robota ait ağırlıklar aşağıdaki Tablo 5.1.'de verilmiştir.

Tablo 5.1. Robota ait ağırlıklar

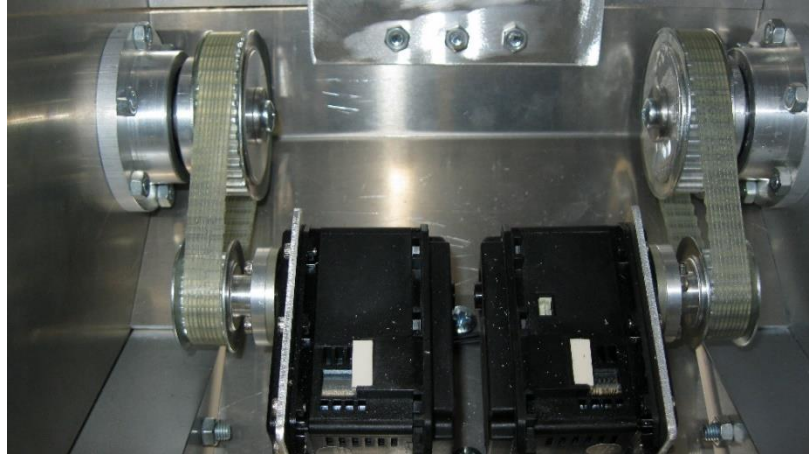
		Kullanılan malzeme ağırlığı [gr]	Motor ağırlığı [gr]	Toplam Birim Ağırlık [gr]	Adet	Toplam
KOL	Omuz	15	126	141	2	282
	Üst kol	96	198	294	2	588
	Alt kol	116	144	260	2	520
	Tutucu	14	72	86	2	172
					Toplam	1562
KAFA		200	72	272	1	272
					Toplam	272
ÜST GÖVDE		980	324	1304	1	1304
					Toplam	1304
ALT GÖVDE	Üst kapak	460	-	460	1	460
	Alt kapak	490	-	490	1	490
	Yan duvar	325	-	325	2	650
	Ana mil	465	200	665	2	865
	Avare mil	502	-	502	4	2000
	Şase	258	-	258	2	516
	Palet	1000	-	1000	2	2000
					Toplam	6331

Robotun üst bölümü olan kollarda ve kafada motorlar ihtiyaç duyulan hız-moment değerlerini karşıladığından uygun şekilde herhangi bir aktarma organı (dişli kutusu, kayış kasnak v.b.) kullanmadan direk olarak bağlanmışlardır (Şekil 5.6.).



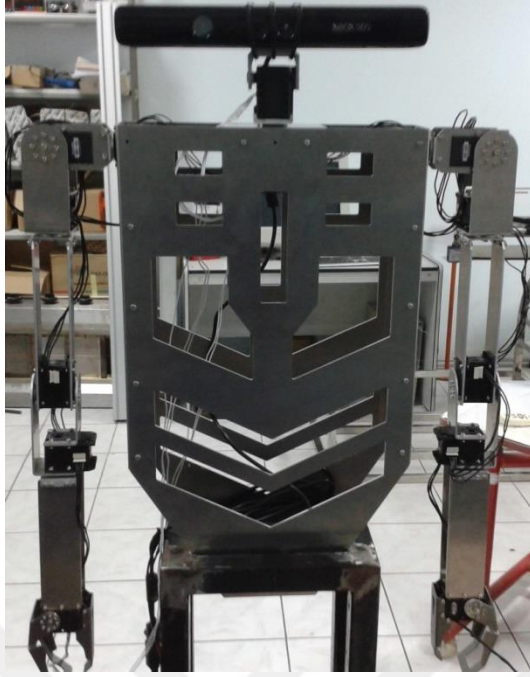
Şekil 5.6. İmalatı gerçekleştirilen robotun sol kolu

Robotun alt bölümü olan paletli şasede ise robotun bütün ağırlığını taşıması ve paletin zemin ile yüzeysel temasının bulunması sebebiyle $\frac{1}{2}$ oranında kayış kasnak mekanizması kullanılmıştır. Böylece çıkış hızı yarıya inerken moment 2 kat arttırılmıştır (Şekil 5.7.).



Şekil 5.7. Alt şase kayış kasnak mekanizması

İmal edilen robotun kollarının çalışması sırasında karşılaşılan mekanik sıkıntılar giderilip bazı parçalar tekrar imal edilmiştir. Robotun eski ve yeni hali aşağıdaki Şekil 5.8.'de gösterilmiştir.



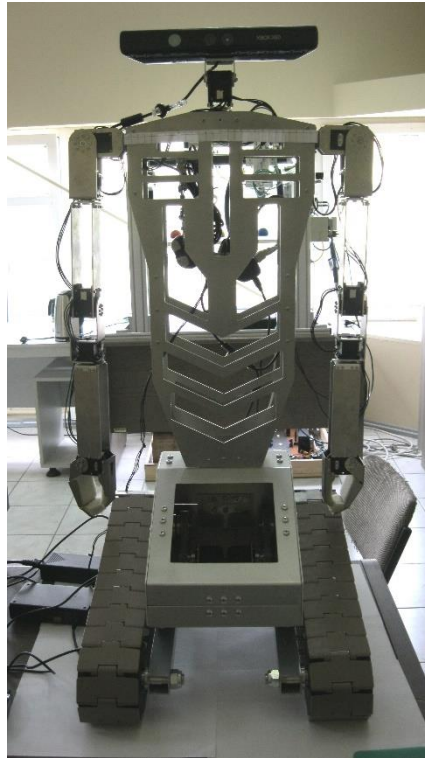
a



b

Şekil 5.8. a) Robotun birinci versiyonu b) Robotun ikinci versiyonu

Robotun son hali Şekil 5.9.'da verilmiştir.



Şekil 5.9. Robotun son hali

5.2. Robotun Bilgisayar ile Haberleşmesi

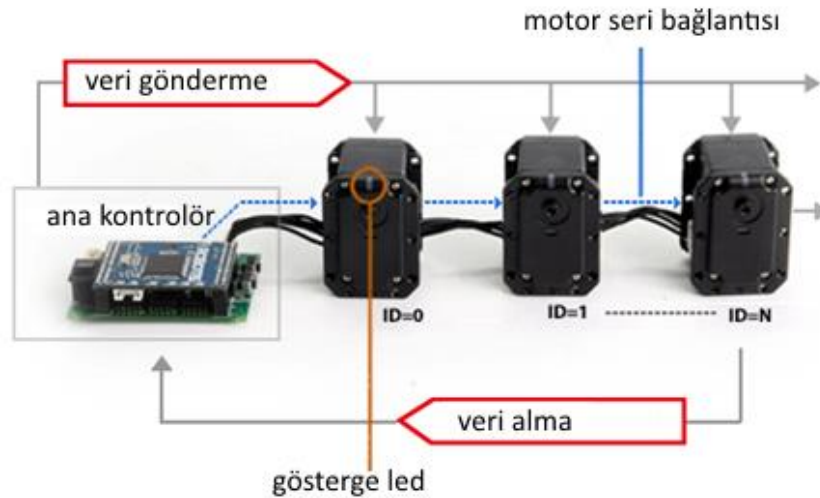
Robotu kinematik ve dinamik açıdan incelendiğinde her bir eklemden farklı tipte motorlar kullanılması gerekmektedir. İçerisinde kendine ait mikro kontrolörü, dişli kutusu olması sebebiyle servo motor kullanılmaya karar verilmiştir.

Hız, konum, ivme vb. verileri kontrol edebilmesi, şasesini farklı şekillerde ana gövdeye bağlayabilme imkânı sunması, yüksek moment-hız oranına sahip olmasından dolayı Dynamixel marka motorlar kullanılmıştır (Şekil 5.10.).



Şekil 5.10. Dynamixel marka örnek motor

Dynamixel marka motorların en büyük özelliklerinden bir tanesi de motorların birbirine seri olarak bağlanabilmesidir (Şekil 5.11.).



Şekil 5.11. Dynamixel motor seri bağlantı şeması

Kolların ilk üç eklemde mx-64 son üç eklemde mx-28, kafanın iki eklemde mx-28 ve paletli alt şasede mx-106 model olmak üzere toplam 6 adet mx-64, sekiz adet mx-28 ve 2 adet Mx-106 Dynamixel motor kullanılmıştır. Kullanılan motorlarla ilgili teknik bilgiler Tablo 5.2.'de verilmiştir.

Tablo 5.2. Servo motorların teknik özellikleri

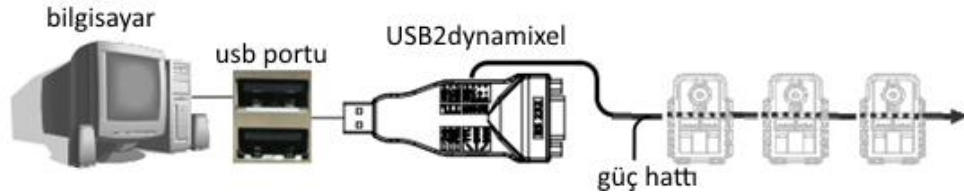
Model	Ağırlık [gram]	Boyutlar [mmxmmxmm]	Tork [N.m]	Yüksüz Hızı [dev/dak]	Maksimum Çalışma Voltajı [V]
mx-28	72	35.6x50.6x35.5	3.1	67	14.8
mx-64	126	40.2x61.1x41	7.3	78	14.8
mx-106	153	40.2x65.1x46	10.0	55	14.8

Robotun tüm yazılımını gerçekleştirmek için Gigabyte GB-BXi7H-5500 model mini masaüstü bilgisayar seçilmiştir. Bu bilgisayar diğer masaüstü bilgisayarlar göre daha az güç tüketmektedir. İ7 işlemci, 8 GB Ram ve SSD diske sahiptir (Şekil 5.12.).



Şekil 5.12. Gigabyte marka bilgisayar

Her bir motor bilgisayar ile rs-485 seri haberleşme gerçekleştirilmektedir. Bilgisayarın rs-485 bağlantı noktası bulunmadığından motorlar ile usb üzerinden çevirici kullanılarak (USB2Dynamixel) haberleşmesi sağlanmıştır (Şekil 5.13.).



Şekil 5.13. USB2dynamixel bağlantı şeması

Kullanılan servo motor rs-485 ara yüze sahip mikro kontrolöre sahiptir. Bu yüzden her bir motorun bilgisayar ile haberleşmesi için rs-485 protokol kullanılmıştır.

Bilgisayar ile motorlar arasında işlenmek istenen verilerin paket halinde gönderilmesi gerekmektedir. Bu protokolda her bir motorun id numarası (kimlik numarası) bulunmaktadır. Bilgisayardan gönderilen veri paketi hangi motora ait ise o motorda işlem görmektedir. Veri paketine ait yapı aşağıda gösterilmiştir (Şekil 5.14.).

0xff	0xff	id	Length	Instruction	Parameter1	...	Parameter N	Check Sum
------	------	----	--------	-------------	------------	-----	-------------	-----------

Şekil 5.14. RS-485 haberleşme paket yapısı

Burada paketin ilk iki adresi (header) standart olup her zaman aynıdır. Paketin üçüncü adres motor id numarasından, daha sonraki adresler parametreden ve en son veri paketin bozukluk olup olmadığının kontrolünün yapıldığı adresten (check sum) oluşmaktadır.

Robotun gerçek zamanlı hareket ve kontrol algoritmaları Matlab-Simulink programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Motorlar ile Matlab-Simulink programı RapidSTM32 kütüphanesi kullanılarak haberleşmesi sağlanmıştır.

5.3. Robota Uygulanan Kontrol Algoritmaları

İmalatı gerçekleştirilen mobil insansı robotun çalışma kabiliyetini göstermek için uygulamalar gerçekleştirilmiştir. Burada öncelikle robotun temel kontrol algoritması belirlenmiş daha sonra görsel servo kontrol uygulaması gerçekleştirilmiştir. Öncelikle robotun her bir koluna klasik kontrolör olan PID kontrolör ve 2-dof PID kontrolör

uygulanmıştır. Her iki kontrolör uygulaması sonucu elde edilen sonuçlar tablo ve grafik halinde verilip karşılaştırılmıştır. Bu çalışma ile ilgili detaylı bilgi Bölüm 5.3.1.'de verilmiştir.

Bölüm 5.3.2.'de Pozisyon Tabanlı Görsel Servo Kontrol algoritmasının temel matematiksel ifadeleri verilmiştir.

Robotun kafasının hareketinden kaynaklı görüntü işlemede meydana genel bozulmaları gidermek için yapay sinir ağlarından destek alınmıştır. Detaylı bilgi bölüm 5.3.2.1.'de verilmiştir.

Bölüm 5.3.2.2.'de dikdörtgen şekilli yeşil renkli farklı yükseklikteki hedef cisimlerin elde tutulup robotun sağ veya sol elinin cismi yakalaması gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar tablo ve grafik halinde verilmiştir.

Bölüm 5.3.2.3.'de dikdörtgen şekilli yeşil renkli farklı yükseklikteki hedef cisimlerin masa üstüne konup robotun sağ veya sol elinin cismi yakalaması gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar tablo ve grafik halinde verilmiştir.

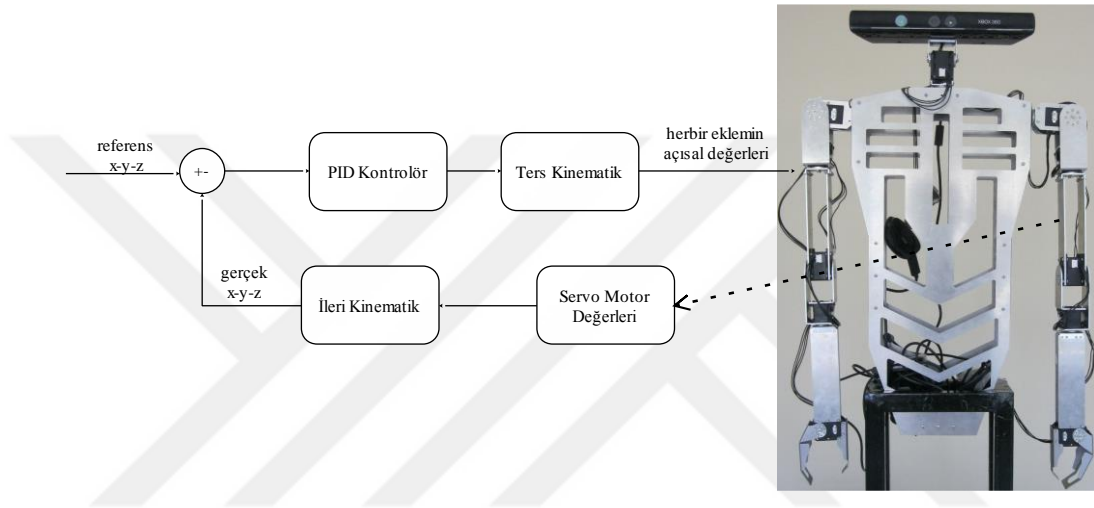
Bölüm 5.3.2.4.'de yeşil renkli kesiti değişen şekilli hedef cismin masa üstüne konup robotun sağ veya sol elinin cismi yakalaması gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar tablo ve grafik halinde verilmiştir.

5.3.1. Robotun kollarına PID ve 2dof PID uygulaması

Bu çalışmada robotun temel kontrol algoritmasını belirlemek için robotun her bir koluna PID ve 2-Dof PID kontrolör uygulanıp elde edilen sonuçların sayısal ve grafiksel karşılaştırması gerçekleştirilmiştir.

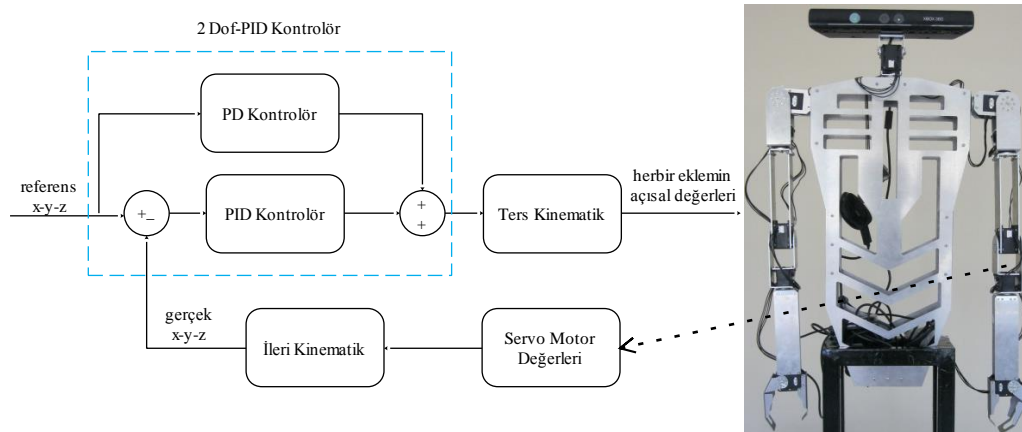
Robotun kontrolü için gerekli olan servo motorların o anki açısal konumu motorun içerisinde bulunan sensör ile gerçek zamanlı olarak elde edilebilmektedir. Her bir motordan elde edilen açısal konular robot kolunun ileri kinematiğine sokularak

kolun uç noktasının o anki gerçek konumu ($x_g-y_g-z_g$) hesaplanır. Hesaplanan gerçek konum ile dışarıdan kullanıcı tarafından verilen referans konum ($x_r-y_r-z_r$) değerleri karşılaştırılıp hata değeri (e) elde edilir. Elde edilen bu hata değeri kontrolöre sokulup uygun kontrol sinyali (u) elde edilir. Kontrol değerleri robot kolu ters kinematik denklemlerine sokulup bu kontrol değerine karşılık gelen her bir eklemin açısal değeri hesaplanır. Hesaplanan bu değerler de motorları sürmek için kullanılır. PID kontrolöre ait blok diyagramı Şekil 5.15.'de verilmiştir.



Şekil 5.15. Robot PID kontrol blok diyagramı

2dof-PID kontrolör yukarıda anlatılan PID kontrol çevrime sahip olup, kontrolörün ileri besleme kolu PD kontrolör olup geri besleme kolu ise PID kontrolörden oluşmaktadır (Şekil 5.16.). Detaylı bilgi Bölüm 4.'de bulunmaktadır.



Şekil 5.16. Robot 2 dof PID kontrol blok diyagramı

Her iki uygulamada robot kolunun uç noktası olan referans noktaları (x_r - y_r - z_r) rasgele seçilmişlerdir. Örnekleme zamanı 0.01 ve gerçekleştirilen yazılım 60 s çalıştırılmıştır. Robot kolu ilk 3 s sadece dirsek ekleminde $\pi/8$ radyan kadar öne doğru gelmektedir. 3 s sonunda referans ve gerçek konum değerleri kullanılarak uygun kontrol sinyali elde edilmiştir. Elde edilen bu kontrol sinyali ters kinematiğe sokulup motorları sürmek için gerekli değerler hesaplanmıştır.

Referans konum değerleri aşağıdaki şekilde seçilmiştir.

$$x_r = [15 \ 21 \ 26]$$

$$y_r = [24 \ 27 \ 31]$$

$$z_r = [-1 \ -3 \ -6 \ -9 \ -12]$$

Her iki kontrol algoritması için deneysel çalışma gerçekleştirmiş olup uç noktanın referans değerine göre bağıl hatası ve rms değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerler aşağıdaki Tablo 5.3.'de verilmiştir.

Tablo 5.3. PID ve 2-dof PID kontrol sonucu elde edilen değerler

	Referans değeri	PID	PID% hata	2dof PID	2dof PID % hata	PID rms	2dof PID rms
x	15	14,8441	1,0391	15,0143	-0,0956	7,2264	4,6097
y	24	24,0939	-0,3914	24,0016	-0,0065	3,7011	1,9587
z	-12	-12,0826	-0,6885	-12,0612	-0,5103	2,6967	1,5323
x	15	14,8244	1,1704	14,8508	0,9949	7,1970	4,6921
y	27	27,0447	-0,1656	27,0290	-0,1075	2,9119	2,0443
z	-12	-12,0615	-0,5128	-12,0594	-0,4946	1,8985	1,5072
x	15	14,8465	1,0231	14,9827	0,1155	7,2606	5,0594
y	31	30,9912	0,0284	31,0209	-0,0673	2,8679	2,2500
z	-12	-12,0302	-0,2515	-12,0184	-0,1532	1,8285	1,3736
x	21	20,9107	0,4251	20,9695	0,1452	7,1052	3,5584
y	24	24,0486	-0,2025	24,0084	-0,0350	2,5608	1,6627
z	-12	-12,0301	-0,2506	-12,0112	-0,0932	1,8989	1,8283
x	21	20,9169	0,3958	21,0731	-0,3481	7,2148	3,4943
y	27	27,0197	-0,0731	26,9175	0,3055	2,5910	1,8320
z	-12	-11,9813	0,1556	-12,0001	-0,0010	1,8650	1,6906
x	21	21,0274	-0,1306	21,0378	-0,1800	7,2433	3,4315
y	31	30,8790	0,3903	30,9727	0,0881	2,6824	2,1990
z	-12	-11,9248	0,6269	-11,9448	0,4603	1,6737	1,6182
x	26	25,9308	0,2662	25,9373	0,2411	7,3251	2,5611
y	24	23,9459	0,2256	23,9978	0,0090	2,1797	1,6525

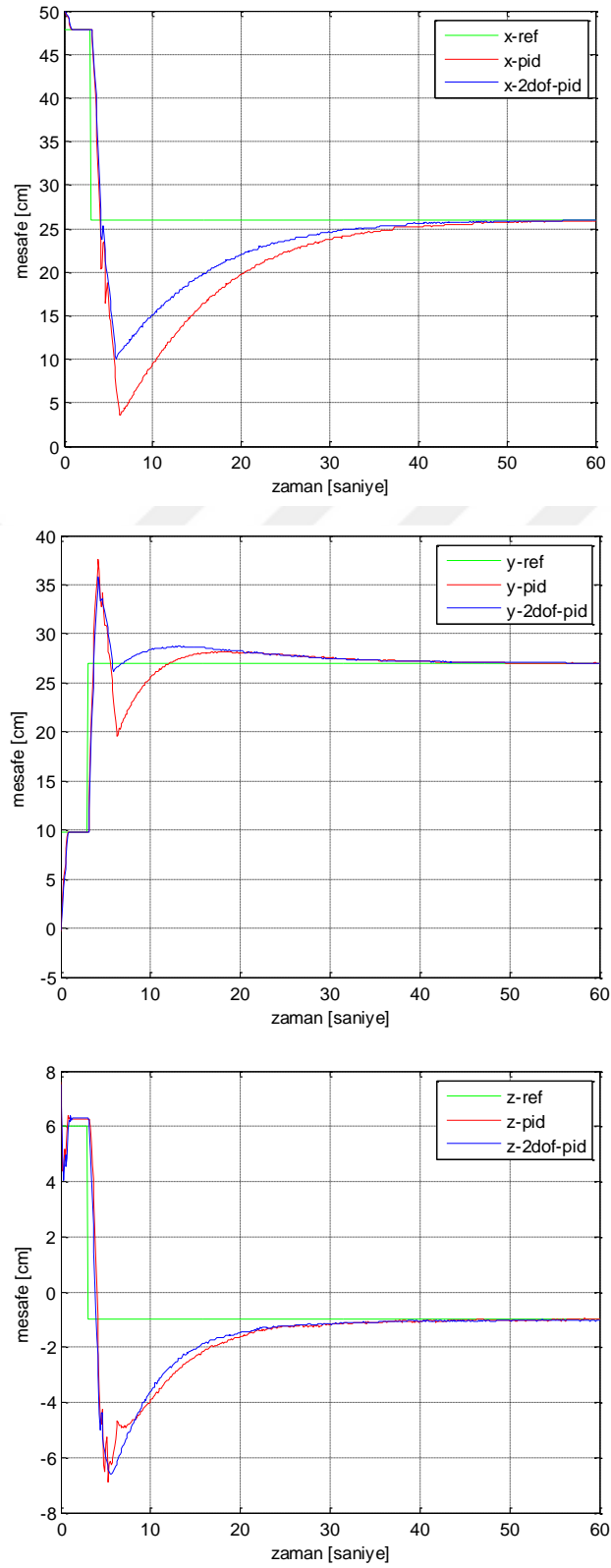
Tablo 5.3. (Devami)

z	-12	-11,9390	0,5081	-12,0106	-0,0886	1,8771	1,9618
x	26	26,1079	-0,4150	26,1007	-0,3873	7,3779	2,5616
y	27	26,7559	0,9041	26,9124	0,3246	2,2780	1,9083
z	-12	-11,7735	1,8872	-11,8435	1,3045	1,7479	1,8639
x	26	26,2296	-0,8832	26,0467	-0,1798	7,3541	3,5867
y	31	30,7642	0,7608	30,9156	0,2724	2,5540	2,2366
z	-12	-11,8213	1,4890	-11,9118	0,7354	1,5953	1,6329
x	15	15,0163	-0,1085	14,9925	0,0500	7,1131	4,8975
y	24	24,1574	-0,6560	24,1154	-0,4808	3,0837	2,0121
z	-9	-9,0196	-0,2178	-8,9808	0,2136	1,7184	1,4454
x	15	14,9010	0,6599	14,9675	0,2165	7,3038	4,8368
y	27	27,1217	-0,4508	27,0528	-0,1956	2,9827	2,0106
z	-9	-9,0244	-0,2710	-9,0141	-0,1562	1,6715	1,3493
x	15	14,7929	1,3809	15,0269	-0,1793	7,4193	5,5347
y	31	31,0655	-0,2113	30,9369	0,2036	2,8781	2,3114
z	-9	-9,0180	-0,2003	-9,0460	-0,5114	1,6880	1,3590
x	21	20,9590	0,1951	21,0285	-0,1356	7,2571	3,8199
y	24	24,0973	-0,4054	24,0178	-0,0741	2,6333	1,5527
z	-9	-8,9934	0,0729	-9,0189	-0,2104	1,8570	1,8193
x	21	20,9727	0,1302	20,9573	0,2033	7,3533	5,0778
y	27	27,0063	-0,0235	27,0161	-0,0596	2,6044	1,8916
z	-9	-8,9999	0,0012	-8,9986	0,0151	1,7025	1,5522
x	21	20,8391	0,7664	20,9383	0,2937	7,4105	4,9462
y	31	30,9890	0,0355	30,9641	0,1159	2,6447	2,0593
z	-9	-8,9906	0,1046	-8,9594	0,4512	1,5406	1,3477
x	26	25,8925	0,4135	25,9576	0,1632	7,3959	3,2499
y	24	23,9768	0,0965	23,9792	0,0865	2,1817	1,4772
z	-9	-8,9948	0,0580	-8,9991	0,0097	1,8024	1,9809
x	26	25,9487	0,1974	25,9803	0,0759	7,4785	2,7926
y	27	26,8862	0,4214	26,9435	0,2092	2,2656	1,6693
z	-9	-8,9365	0,7057	-8,9569	0,4791	1,6649	1,7925
x	26	26,1561	-0,6003	26,0955	-0,3674	7,4504	4,3443
y	31	30,7600	0,7742	30,8693	0,4217	2,4076	2,0393
z	-9	-8,8389	1,7904	-8,8828	1,3017	1,4032	1,5283
x	15	15,0491	-0,3272	15,0484	-0,3230	7,1343	5,5853
y	24	24,1466	-0,6109	24,0993	-0,4139	3,1753	2,3353
z	-6	-6,0913	-1,5211	-6,0271	-0,4511	1,6052	1,4117
x	15	14,9808	0,1279	14,9319	0,4542	7,3254	5,6107
y	27	27,1232	-0,4565	27,1130	-0,4185	3,0699	2,2793
z	-6	-6,0352	-0,5871	-6,0344	-0,5730	1,5913	1,3149
x	15	14,7962	1,3586	14,9271	0,4863	7,5590	5,5740
y	31	31,0955	-0,3082	31,0801	-0,2583	2,8984	2,2624
z	-6	-6,0516	-0,8600	-6,0032	-0,0541	1,5569	1,2404
x	21	20,9712	0,1370	21,1325	-0,6307	7,3309	4,8334
y	24	24,0683	-0,2847	24,0984	-0,4100	2,7090	1,7209
z	-6	-6,0466	-0,7769	-6,0170	-0,2831	1,7053	1,7306
x	21	20,8930	0,5093	21,0155	-0,0738	7,3573	4,7155
y	27	27,0620	-0,2295	27,0221	-0,0819	2,5466	1,7441
z	-6	-6,0409	-0,6808	-5,9905	0,1576	1,5113	1,5504
x	21	20,9250	0,3572	20,9475	0,2502	7,4703	4,8114
y	31	31,0054	-0,0175	30,9620	0,1225	2,5639	2,0188

Tablo 5.3 (Devamı)

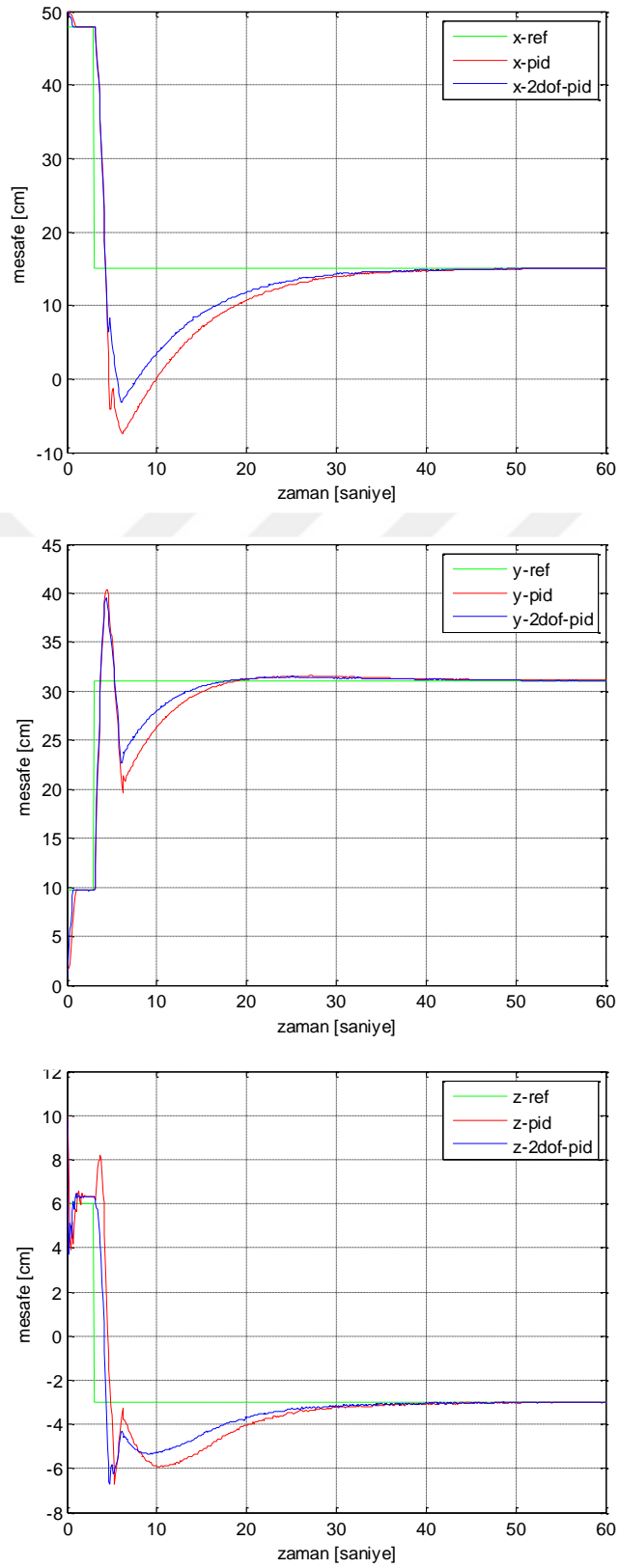
z	-6	-6,0094	-0,1574	-5,9978	0,0368	1,3981	1,3785
x	26	25,8885	0,4288	25,9116	0,3399	7,4385	4,0046
y	24	24,0267	-0,1112	24,0429	-0,1787	2,2139	1,4848
z	-6	-6,0328	-0,5464	-6,0235	-0,3920	1,6600	1,9712
x	26	25,8708	0,4968	25,9585	0,1598	7,5262	4,0279
y	27	26,9688	0,1155	26,9639	0,1335	2,2269	1,5794
z	-6	-5,9611	0,6480	-6,0094	-0,1575	1,5853	1,7891
x	26	26,1656	-0,6369	26,1362	-0,5238	7,6227	4,0018
y	31	30,7023	0,9602	30,8350	0,5322	2,3746	1,9152
z	-6	-5,8683	2,1950	-5,8760	2,0660	1,4264	1,5042
x	15	15,2820	-1,8798	15,2164	-1,4424	7,1057	5,4626
y	24	24,2110	-0,8793	24,1467	-0,6110	3,0794	2,2824
z	-3	-3,0675	-2,2488	-3,0383	-1,2781	1,6037	1,3660
x	15	14,6806	2,1295	14,9477	0,3485	7,5578	6,3168
y	27	26,8709	0,4781	26,9743	0,0952	3,2467	2,6972
z	-3	-3,0543	-1,8114	-3,0330	-1,0997	2,0592	1,6002
x	15	15,0727	-0,4849	15,0702	-0,4681	7,7127	6,2748
y	31	31,1279	-0,4124	31,0951	-0,3067	3,0521	2,4867
z	-3	-3,0149	-0,4968	-3,0176	-0,5880	1,9062	1,4612
x	21	21,1599	-0,7616	21,1465	-0,6974	7,2904	4,7358
y	24	24,0811	-0,3380	24,0910	-0,3790	2,6683	1,7066
z	-3	-3,0063	-0,2087	-3,0042	-0,1404	1,6170	1,7103
x	21	21,2494	-1,1877	21,2181	-1,0385	7,3541	5,4768
y	27	27,1094	-0,4051	27,0936	-0,3466	2,7923	1,9658
z	-3	-2,9121	2,9288	-3,0259	-0,8619	1,7791	1,5959
x	21	21,0537	-0,2555	21,0506	-0,2408	7,2406	5,5766
y	31	31,0284	-0,0915	31,0420	-0,1355	2,6979	2,1805
z	-3	-3,0070	-0,2317	-2,9582	1,3932	1,6604	1,4673
x	26	25,9834	0,0638	26,0066	-0,0253	7,4515	4,0148
y	24	24,0520	-0,2169	24,0243	-0,1012	2,2630	1,5568
z	-3	-3,0163	-0,5437	-3,0152	-0,5052	1,6905	1,9766
x	26	26,0300	-0,1152	26,0017	-0,0064	7,3350	4,7829
y	27	26,9991	0,0033	27,0076	-0,0280	2,3361	1,6307
z	-3	-2,9794	0,6852	-3,0270	-0,8994	1,7395	1,8022
x	26	26,1361	-0,5234	26,1341	-0,5156	7,4658	4,8807
y	31	30,7129	0,9261	30,7372	0,8478	2,4849	1,9519
z	-3	-2,9376	2,0815	-2,9506	1,6455	1,6017	1,5676
x	15	15,2927	-1,9516	15,3511	-2,3405	7,1538	6,0552
y	24	24,2369	-0,9870	24,1680	-0,7001	3,1058	2,6132
z	-1	-1,0294	-2,9401	-1,0013	-0,1300	1,7477	1,5017
x	15	15,2010	-1,3401	15,1286	-0,8572	7,4045	6,1221
y	27	27,1457	-0,5396	27,1219	-0,4513	3,0424	2,4736
z	-1	-1,0499	-4,9862	-1,0210	-2,0962	1,6247	1,3962
x	15	14,9273	0,4849	14,9786	0,1426	7,6298	5,1463
y	31	31,1512	-0,4879	31,0800	-0,2580	2,8992	2,1131
z	-1	-1,0442	-4,4209	-0,9669	3,3109	1,5391	1,2663
x	21	21,0850	-0,4050	21,0719	-0,3422	7,4000	5,5703
y	24	24,0938	-0,3910	24,0622	-0,2592	2,7706	2,0409
z	-1	-1,0275	-2,7494	-1,0309	-3,0922	1,7461	1,6444
x	21	20,9958	0,0200	21,0336	-0,1601	7,4720	5,6731
y	27	27,0420	-0,1555	27,0209	-0,0774	2,6132	2,0371

$z_{ref}=-1$, $x_{ref}=26$, $y_{ref}=27$ için elde edilen grafikler aşağıda Şekil 5.17.'de verilmiştir.



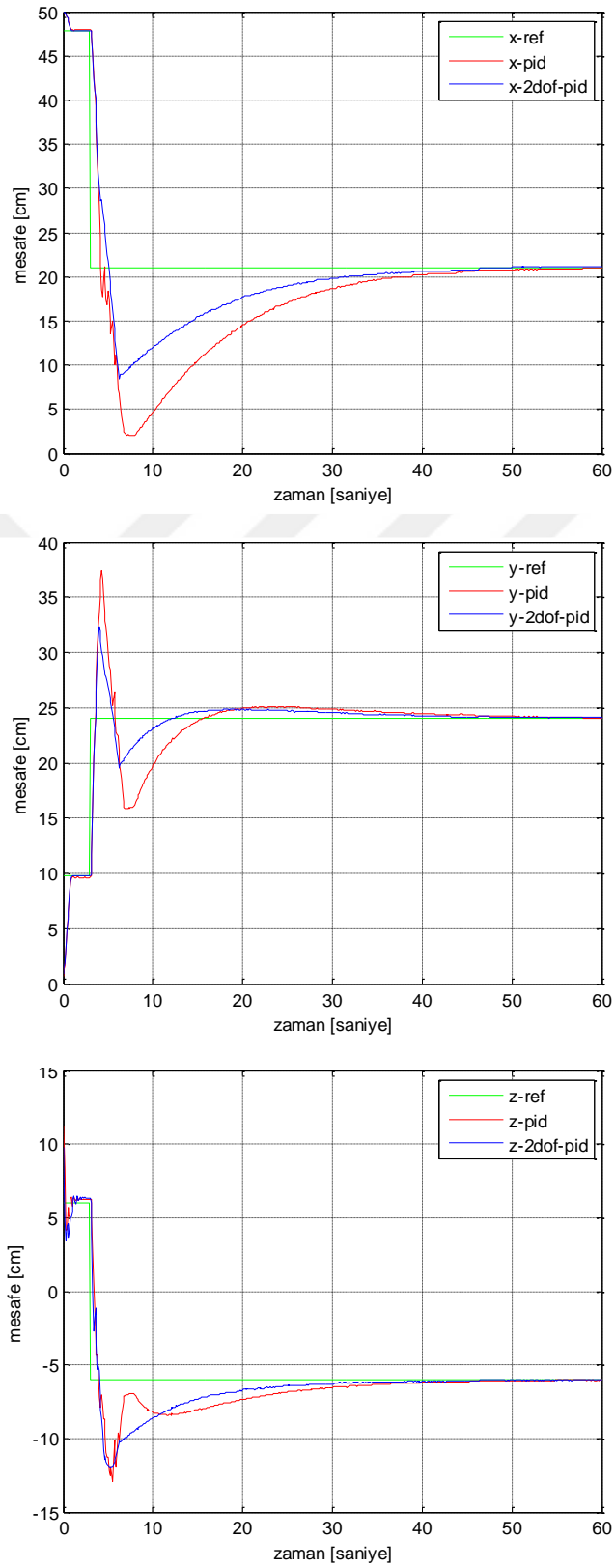
Şekil 5.17. $z=-1$, $x=26$ $y=27$ için elde edilen PID ve 2 dof PID grafikleri

$z_{ref}=-3$, $x_{ref}=15$, $y_{ref}=31$ için elde edilen grafikler aşağıda Şekil 5.18.'de verilmiştir.



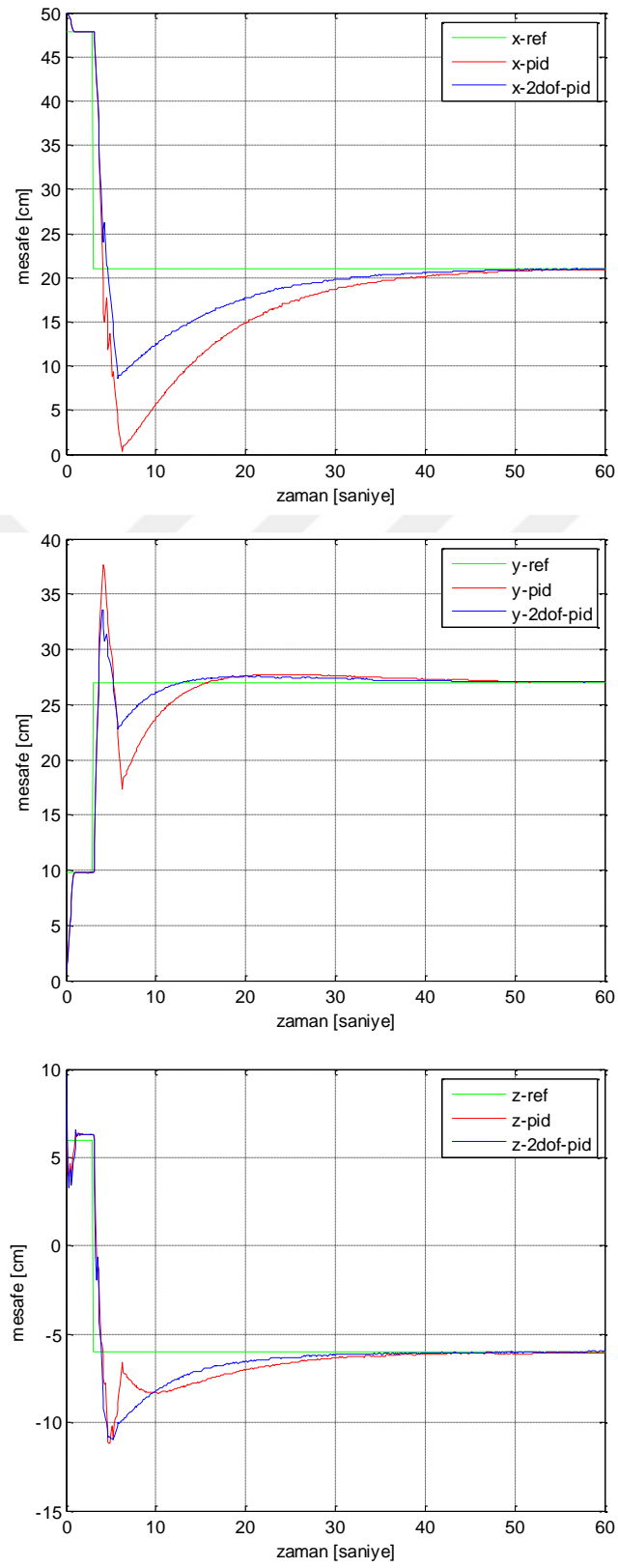
Şekil 5.18. $z=-3$, $x=15$, $y=31$ için elde edilen PID ve 2 dof PID grafikleri

$z_{ref}=-3$, $x_{ref}=21$, $y_{ref}=24$ için elde edilen grafikler aşağıda Şekil 5.19.'da verilmiştir.



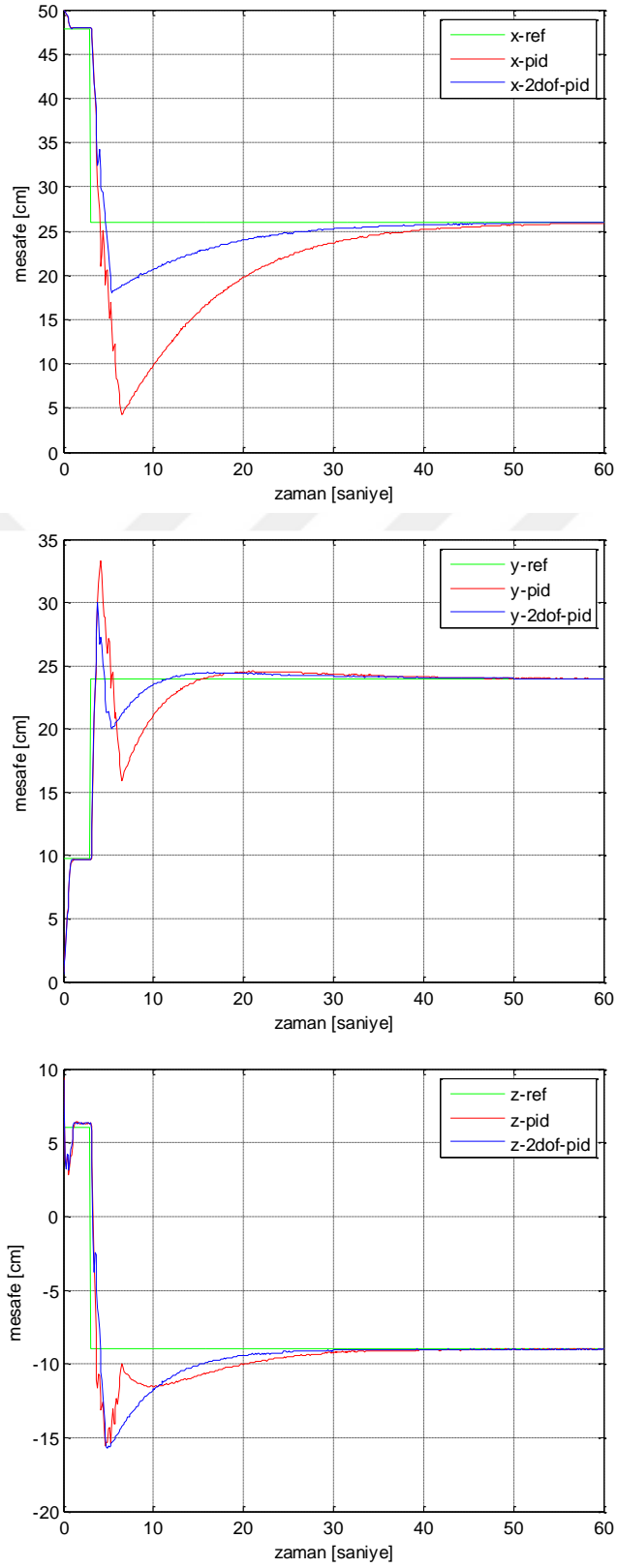
Şekil 5.19. $z=-3$, $x=21$, $y=24$ için elde edilen PID ve 2 dof PID grafikleri

$z_{ref}=-6$ $x_{ref}=21$ $y_{ref}=27$ için elde edilen grafikler aşağıda Şekil 5.20.'de verilmiştir.



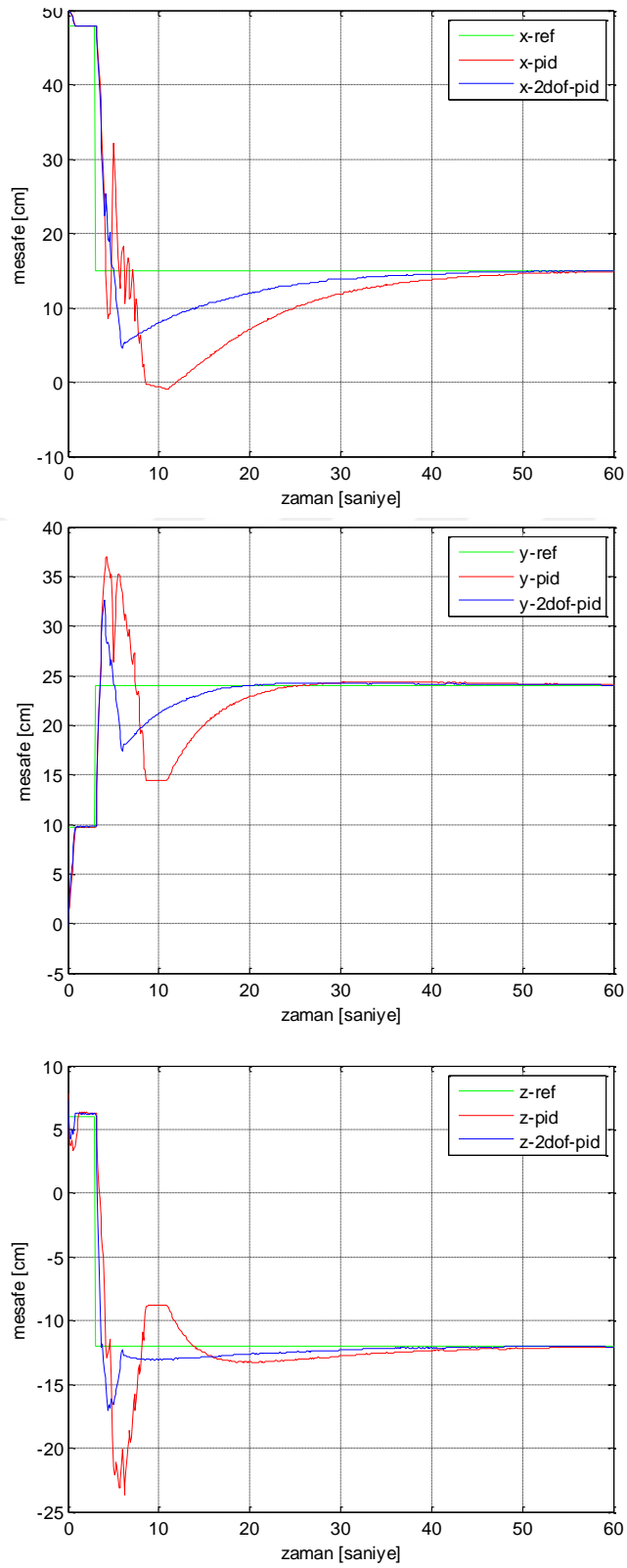
Şekil 5.20. $z=-6$ $x=21$ $y=27$ için elde edilen PID ve 2 dof PID grafikleri

$z_{ref}=-9$ $x_{ref}=26$, $y_{ref}=24$ için elde edilen grafikler aşağıda Şekil 5.21.'de verilmiştir.



Şekil 5.21. $z=-9$ $x=26$, $y = 24$ için elde edilen PID ve 2 dof PID grafikleri

$z_{ref}=-12$, $x_{ref}=15$, $y_{ref}=24$ için elde edilen grafikler aşağıda Şekil 5.22.'de verilmiştir.



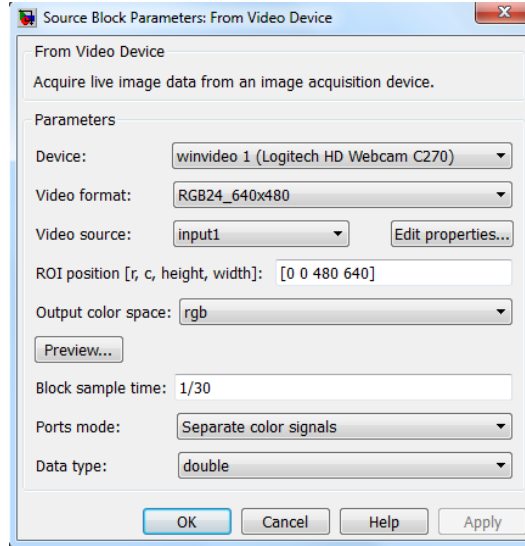
Şekil 5.22. $z=-12$ $x=15$ $y=24$ için elde edilen PID ve 2 dof PID grafikleri

Bu çalışmada robot koluna uygulanan PID ve 2-dof PID kontrolör karşılaştırılmıştır. Robot kolunun uç noktasının referansı yakaladığındaki x-y-z için hata yüzdeleri ve toplam rms değerleri hesaplanmıştır. Uç noktanın referans ile arasındaki en büyük hata değeri 2-dof PID ile PID için sırasıyla $x_{2pid}=\%0,99$, $x_{pid}=\% 2,12$, $y_{2pid}=\%0,85$, $y_{pid}=\%0,96$ ve $z_{2pid}=\%3,31$, $z_{pid}=\%4,4$ olarak hesaplanmıştır. Ayrıca toplam rms en büyük değerleri sırasıyla $x_{rmspid}=7,6$, $x_{rms2dof}=6,3$, $y_{rmspid}=3,7$, $y_{rms2pid}=2,6$ ve $z_{rmspid}=2,1$, $z_{rms2pid}=1,9$ olarak elde edilmiştir. Yukarıdaki grafikler incelediğinde 2dof-PID'nin PID'ye göre oturma zamanı x için 1-8 s, y için 1-4 s, z için 2-7s daha kısa ve maksimum aşım $x_{2pid}=\%13$, $x_{pid}=\%106$, $y_{2pid}=\%21$, $y_{pid}=\%38$ ve $z_{2pid}=\%42$, $z_{pid}=\%92$ olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde 2-dof PID'nin PID'ye göre daha başarılı olduğu tespit edilmiştir. Bundan dolayı 2-dof PID kontrolör seçilmiştir.

5.3.2. Pozisyon tabanlı görsel servo uygulamaları

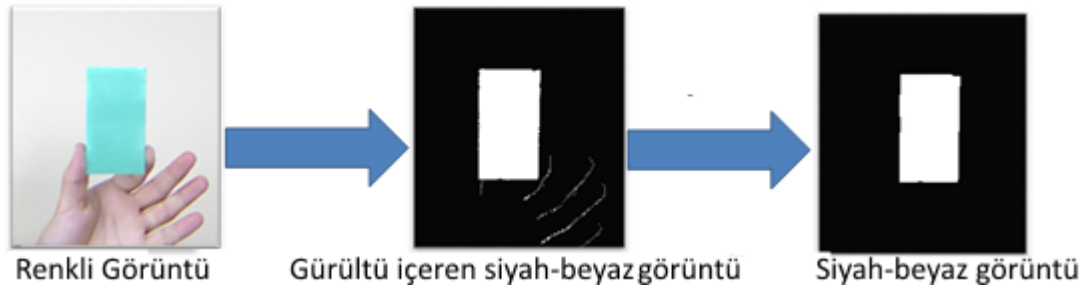
Literatürde kameranın bir sensör gibi kullanılıp robotun istenilen hareketi yapması için geliştirilen yöntem Görsel servo kontrol denir. Görsel servo kontrol ile ilgili detaylı bilgi Bölüm 4.'de verilmiştir. Bu ve ileriki uygulamalarda, kamera robottun gövdesine sabit olduğundan dolayı pozisyon tabanlı görsel servo kontrol algoritması seçilmiştir.

Cismin kameraya olan uzaklığını matematiksel olarak hesaplayabilmemiz için cismin bazı özelliklerinin görüntü işleme teknikleri ile elde edilmesi gerekmektedir. Bunun için Matlab-Simulink 'Görüntü İşleme Araç Kutusu' ile bilgisayara bağlı olan kameradan veri almak için "video device" bloğu kullanılmıştır. Bu blokta video formatı olarak RGB ve görüntü boyut olarak 640x480 seçilmiştir (Şekil 5.23.).



Şekil 5.23. Matlab/Simulink video device bloğu

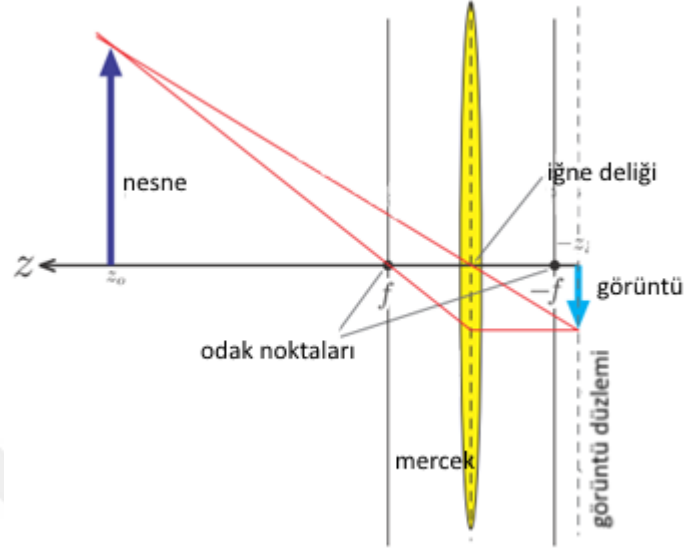
Video kameradan RGB formatında ayrı ayrı alınan görüntünün RGB değeri belli katsayılarla çarpılarak tek değer elde edilmiştir. Burada kat sayılar yeşil rengi arka plandan ayıracak şekilde seçilmiştir. Elde edilen değer uygun eşik değerinden geçirilerek siyah-beyaz görüntü elde edilmiştir. Elde edilen siyah-beyaz görüntünün üzerindeki bozucu etkileri giderip daha kaliteli bir görüntü elde etmek için açma (opening) morfolojik işlemi gerçekleştirilmiştir. Böylece kamera ile elde edilen renkli görüntüden görüntü işleme teknikleri kullanılarak siyah-beyaz görüntü elde edilmiştir (Şekil 5.24.).



Şekil 5.24. Renkli görüntüden siyah-beyaz görüntü elde etme

Cismin robota göre konum koordinatlarını hesaplayabilmek için görüntü işleme ile istenilen görüntü elde edilmiştir.

Lens kanununa göre cisim ile imaj arasındaki ilişki aşağıda Şekil 5.25.'de gösterilmiştir. Burada z-ekseni kameranın optik eksenidir.



Şekil 5.25. Cismin kamerada oluşan imajı

Lens kanununa göre değişkenler aşağıdaki şekilde ifade edilir [14].

$$\frac{1}{z_o} + \frac{1}{z_i} = \frac{1}{f} \quad (5.1)$$

z_o : cismin uzaklığı

z_i : imajın uzaklığı

f : odak uzaklığı

İmajın yüksekliği y_i , cismin yüksekliği y_o ile aşağıdaki şekilde ilişkilidir:

$$M = \frac{y_i}{y_o} = \frac{f}{f - z_o} \quad (5.2)$$

Şekil 5.24.'deki üçgenler kullanılarak cismin koordinat sistemi (x,y,z) ile imaj düzlemindeki x_i - y_i arasındaki bağıntılar aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$x_i = \frac{f x}{f - z} \quad (5.3)$$

$$y_i = \frac{f y}{f - z} \quad (5.4)$$

Eşitlik 5.2-5.3 kullanılarak z_o aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$z_o = f \left(1 - \frac{1}{M} \right) \quad (5.5)$$

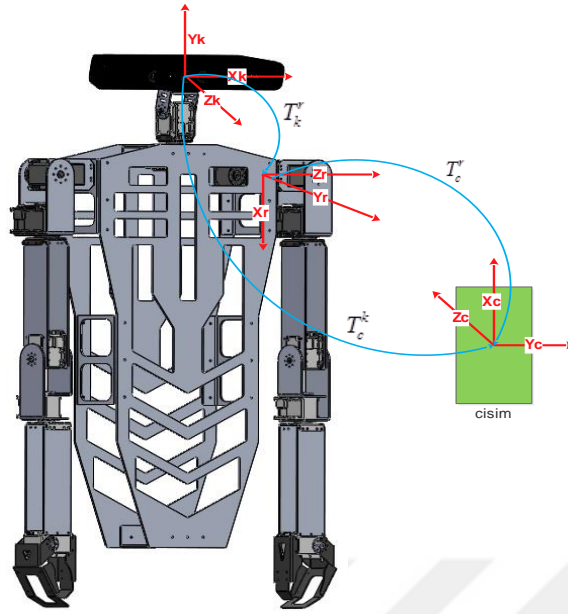
Elde edilen bu denklem ile cismin kameraya olan uzaklığı matematiksel olarak hesaplanabilir.

Görüntü işleme teknikleri ile elde edilen siyah-beyaz görüntüden cismin merkezinin konum koordinatları (x_c - y_c - z_c) yukarıdaki denklemler ile hesaplanır. Daha sonra kameraya göre hesaplanan koordinatlar kolun temel eksenine taşınır (x_r - y_r - z_r) (Şekil 5.26.).

$$T_c^r = T_c^k T_k^r \quad (5.6)$$

Yukarıdaki matrisin son 4. sütunun 3 elamanı cismi kolun temel eksenine göre konum koordinatlarını göstermektedir. Böylece kolun temel noktasına göre cismin konum koordinatları hesaplanmış olur. Elde edilen bu koordinatlar kolun kontrolünde kullanılmaktadır.

Cisim, kamera ve robot kol eksen takımları Şekil 5.26.'da gösterildiği gibi alınmıştır.



Şekil 5.26. Cisim-kamera-kol eksen takımları

5.3.2.1. Yapay sinir ağları

Yukarıda elde edilen matematiksel ifadeler robota uygulandığı zaman cismin kameraya olan uzaklığı hesaplanabilmektedir. Ancak cismin kameraya olan uzaklığı robotun karşısında-sağında-solunda konumlanmasına göre farklı hesaplanmaktadır. Bunun sebebi robot kafasının hareketi sonucu cismin görüntüsünde meydana gelen bozulmadır (Şekil 5.27.).



Şekil 5.27. Orijinal görüntü ile bozulma meydana gelmiş görüntü

Bu sorunu aşmak için yapay sinir ağlarından destek alınmıştır. Aynı uzaklıktaki cisim için olması gereken yüksekliği ile elde edilen yüksekliği arasındaki ilişki aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır.

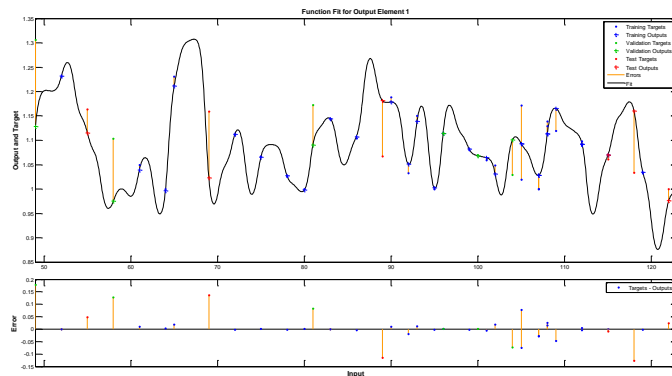
$$K_d = \frac{\text{cismin olması gereken yükseklik değeri (piksel)}}{\text{cismin o anki yükseklik değeri (piksel)}} \quad (5.7)$$

Burada K_d düzeltme parametresidir.

Yapay sinir ağının girişi cismin yüksekliği (piksel), çıkışı ise K_d düzeltme parametresi olarak seçilmiştir.

Burada robot kafası tam karşıya bakacak şekilde konumlandırılıp cisim sırasıyla 30-35-40 cm uzaklıklara yerleştirilmiştir. Bu esnada elde edilen değerler cismin olması gereken yükseklik değeri olarak kabul edilmiştir. Daha sonra cisim önce sola sonra aşağı doğru belli aralıklara konumlandırılıp o anki cismin kamera tarafından hesaplanan yükseklik değerleri elde edilmiştir. Elde edilen bu yükseklik değerleri ile K_d parametresi hesaplanmıştır. Böylece yapay sinir ağlarının eğitimi için ihtiyaç duyulan cismin yükseklik değerleri giriş ile düzeltme parametresi K_d çıkış olacak şekilde veri seti hazırlanmıştır.

Hazırlanan bu veri seti, yapay sinir ağlarının eğitimi için kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki Şekil 5.28.'de verilmiştir.



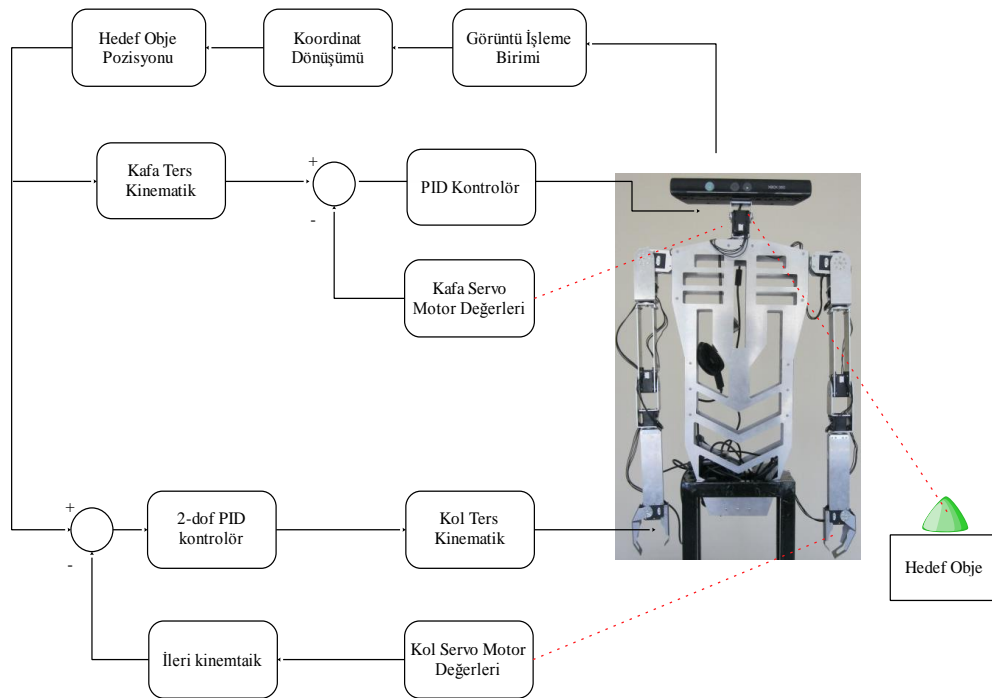
Şekil 5.28. Yapay sinir ağları çıkışı

Burada Yapay Sinir Ağlarının eğitimi için 50 adet veri toplanmıştır. Matlab programının yapay sinir ağı modülü kullanılarak ağı eğitimi gerçekleştirilip, Simulink bloğu elde edilmiştir.

5.3.2.2. Pozisyon tabanlı görsel servo uygulama 1

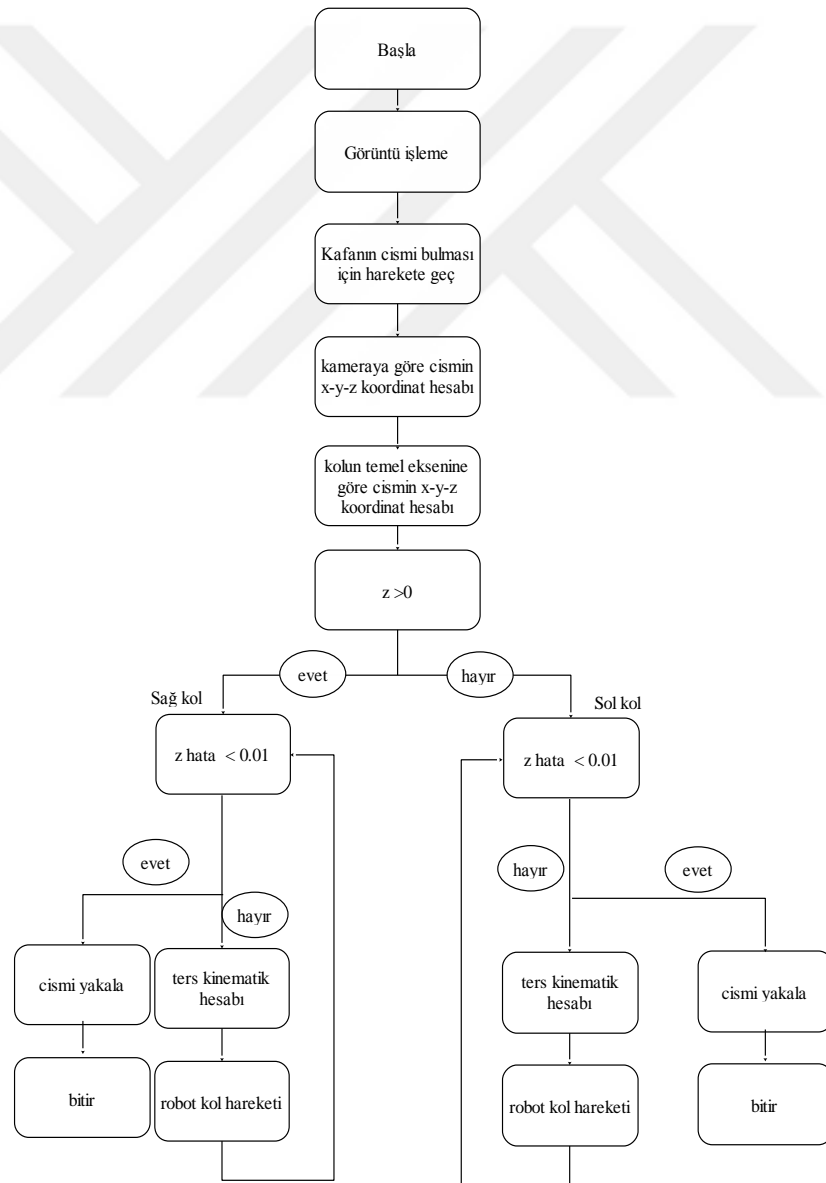
Bu uygulamada, insan tarafından tutulan cismin robotun sol veya sağ tutucusunun yakalaması amaçlanmıştır. Cisim yeşil renkli olup 7-9-11 cm yüksekliğinde dikdörtgen şekillidir.

Servo motorlardan alınan açısal konum bilgileri ileri kinematik denklemlere sokularak gerçek konum bilgisi elde edilmiştir. Bu değer ile kolun temel eksenine indirgenen cismin konum koordinatları kıyaslanıp hata değeri hesaplanır. Bu hata kolun hareketini kontrol eden 2-DOF PID kontrolöre verilerek ters kinematik için gerekli olan kontrol sinyali hesaplanmıştır. Bu kontrol değerleri ters kinematik denklemlere kullanılarak bu koordinatlara karşılık gelen eklem açıları hesaplanmıştır. Bu eklem açıları kullanılarak robot tutucusunun cisimi yakalaması için hareket ettirilir. Pozisyon Tabanlı Servo Kontrol blok diyagramı Şekil 5.29.'de gösterilmiştir.



Şekil 5.29. Pozisyon tabanlı servo motor kontrolü uygulama 1 blok diyagramı

Matlab-Simulink programında hazırlanan algoritma şu adımlardan oluşmaktadır. Program başladıktan sonra kafa cismin yerini tespit etmek üzere harekete geçer. Cismin yerini tespit ettikten sonra önce cismin kameraya göre daha sonra kolun temel eksenine göre cismin konum koordinatları hesaplanır. Bu işlemler sırasında her iki kol dirsekten 45° bükülme gerçekleştirir. Buraya kadar olan adımlar 6 s içerisinde gerçekleştirilir. Cisim, sağ veya sol koldan hangisine daha yakınsa ilgili kol devreye girer. z eksenindeki hata 0.01'den küçük olana kadar kol hareket etmeye devam eder. Hata 0.01'den küçük olduktan sonra tutucu devreye girer ve cismi tutma işlemini gerçekleştirir. Bu algoritmayla ilgili akış diyagramını Şekil 5.30.'da verilmiştir.



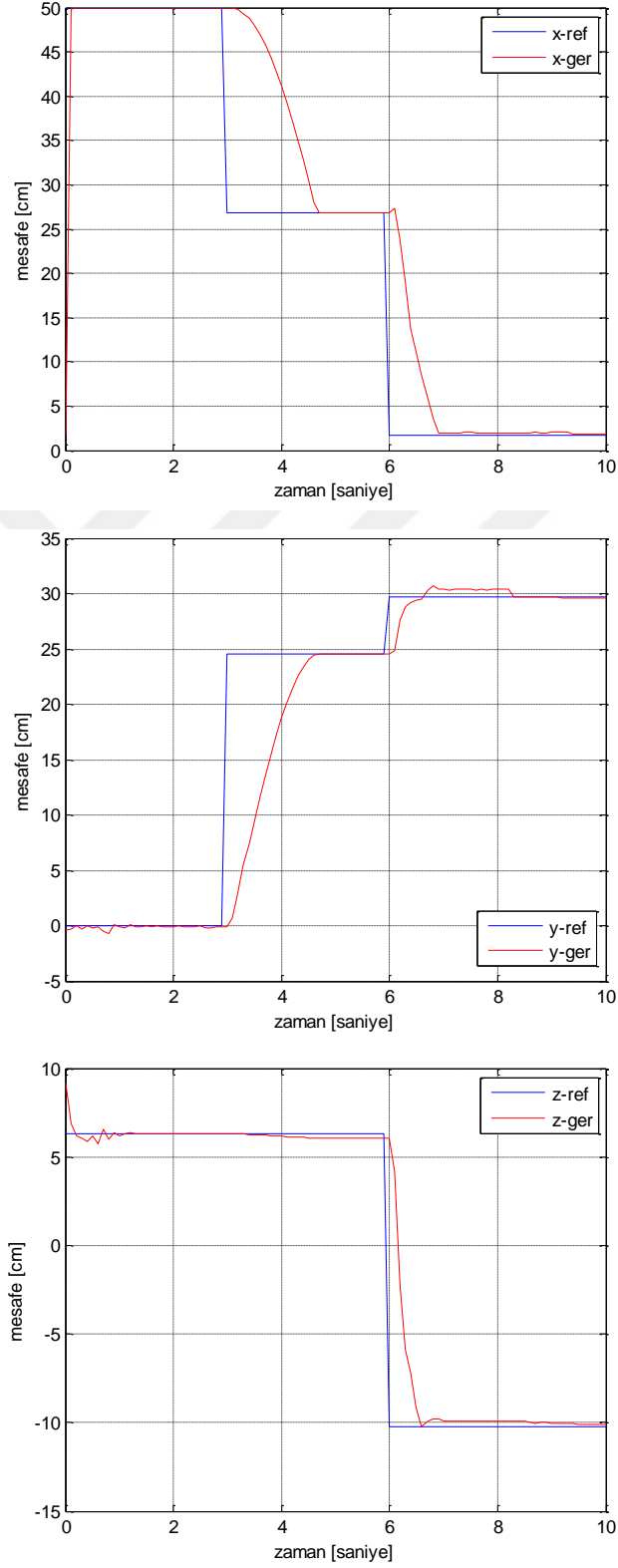
Şekil 5.30. Pozisyon tabanlı servo motor kontrolü ait akış diyagramı

Bu uygulamada yüksekliği 7-9-11 cm genişliği 5cm olan farklı yeşil renkli cisimler kullanılmıştır. Cisimler rasgele konumlarda tutulup robotun cismi yakalaması gerçekleştirilmiştir. Örnekleme zamanı 0.01 ve uygulama toplam 10 s çalıştırılmıştır. Robotun cismi tuttuğu andaki x-y-z değerleri, tutma zamanı, referans x-y-z değerleri elde edilip x-y-z % hata değerleri hesaplanmıştır. Bu değerler sol kol için Tablo 5.4.'de, sağ kol için Tablo 5.5.'de verilmiştir.

Tablo 5.4. Elde tutlan cisim için robot sol kol tutucu x-y-z referans-gerçek değerleri ve % hata değerleri

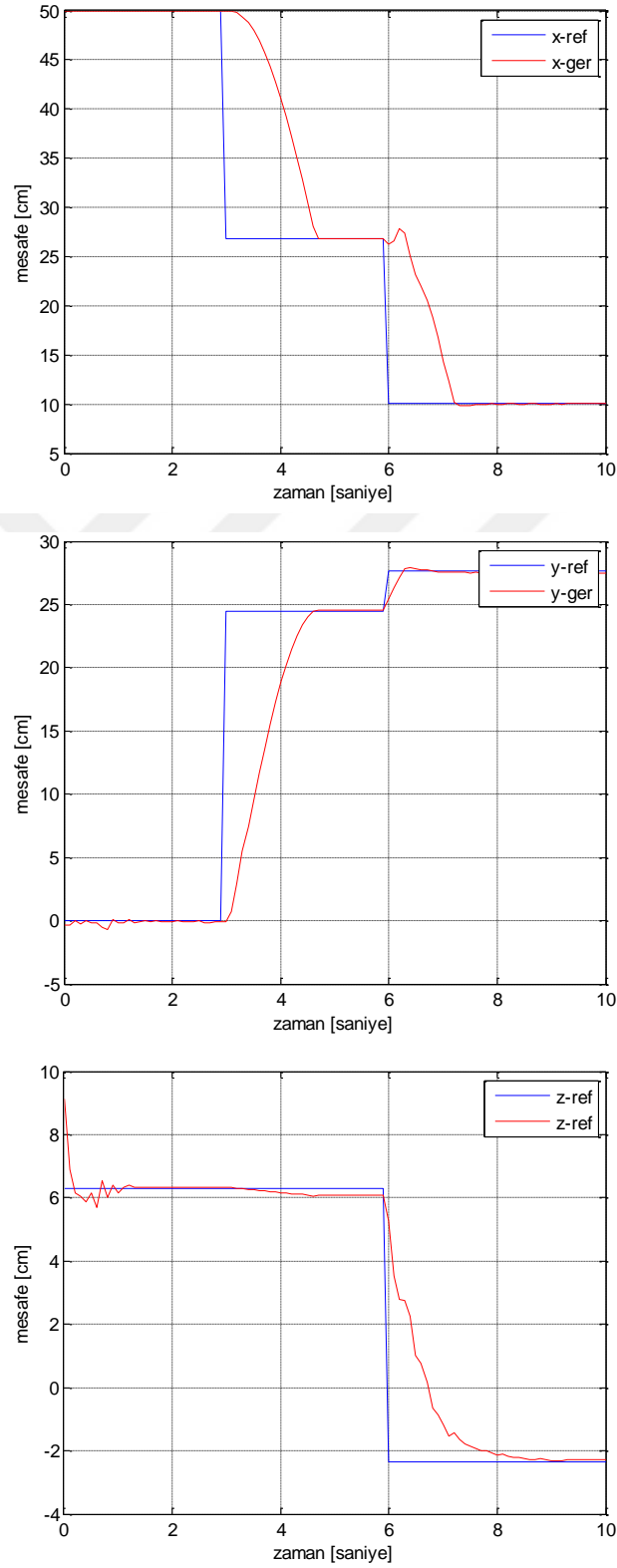
zaman	x_ref	x_ger	y_ref	y_ger	z_ref	z_ger	x%hata	y%hata	z%hata
7 cm yüksekliğindeki cisim için									
8.5	10.299	9.971	30.535	31.126	-6.224	-6.246	3.183	-1.935	-0.355
9.4	10.057	10.069	27.667	27.446	-2.345	-2.328	-0.127	0.801	0.743
9.6	13.191	13.472	28.996	28.818	-3.637	-3.595	-2.136	0.615	1.162
9.9	14.224	14.376	30.823	30.846	-4.811	-4.837	-1.073	-0.074	-0.544
9.1	3.789	3.768	30.880	30.9	4.736	4.758	0.574	-0.065	-0.455
9.7	12.404	12.686	31.955	32.140	-11.78	-11.81	-2.270	-0.580	-0.196
8.7	10.273	10.642	32.362	32.947	-8.349	-8.244	-3.585	-1.809	1.261
8	6.125	6.344	29.034	30.032	-8.778	-8.845	-3.584	-3.439	-0.769
8.1	3.609	3.469	27.725	28.034	-8.412	-8.429	3.855	-1.113	-0.195
8.5	0.930	0.907	28.156	28.667	-0.380	-0.386	2.422	-1.814	-1.433
9 cm yüksekliğindeki cisim için									
9.3	5.234	5.222	29.732	30.040	-10.23	-10.18	0.226	-1.038	0.619
9.7	11.503	11.039	32.112	32.337	-6.6	-6.011	4.037	-0.701	-0.071
9.5	10.056	10.246	30.029	30.180	-3.656	-3.650	-1.889	-0.502	0.170
8.6	5.455	5.498	28.095	28.610	-5.421	-5.454	-0.779	-1.832	-0.611
8.7	7.198	7.255	31.204	31.015	-9.846	-9.789	-0.792	0.606	0.581
9.6	10.855	11.198	27.854	27.938	-4.136	-4.108	-3.168	-0.301	0.659
9.6	9.140	9.171	27.031	27.569	-12.05	-12.09	-0.334	-1.992	-0.373
9.4	17.584	18.662	30.256	31.511	-8.354	-8.280	-6.132	-4.147	0.884
11 cm yüksekliğindeki cisim için									
9.4	8.674	8.712	33.507	33.754	-2.846	-2.798	-0.439	-0.737	1.708
9.1	7.523	7.659	28.645	29.156	-9.173	-9.118	-1.812	-1.781	0.602
9.1	0.809	0.773	27.715	27.330	-9.036	-9.382	4.380	1.388	-3.836
8.7	8.116	7.878	33.445	34.152	-4.823	-4.855	2.940	-2.116	-0.662
8.8	3.366	3.369	29.820	30.488	-4.971	-4.962	-0.086	-2.240	0.181
9	6.703	6.749	31.906	32.808	-7.039	-6.992	-0.679	-2.825	0.672
8.2	0.617	0.631	30.857	31.692	0.656	0.655	-2.325	-2.706	0.148
8.9	12.719	13.107	27.165	27.194	-7.669	-7.562	-3.055	-0.108	1.389
9.1	16.010	16.239	32.421	32.630	-5.321	-5.159	-1.431	-0.646	3.045
9.5	19.495	19.867	29.761	30.167	-10.44	-10.20	-1.905	-1.364	2.223

Yüksekliği 7 cm ve hedef koordinatları $z=-10,23$, $x=1,73$, $y = 29,73$ için elde edilen grafikler aşağıdaki Şekil 5.31.'de verilmiştir.



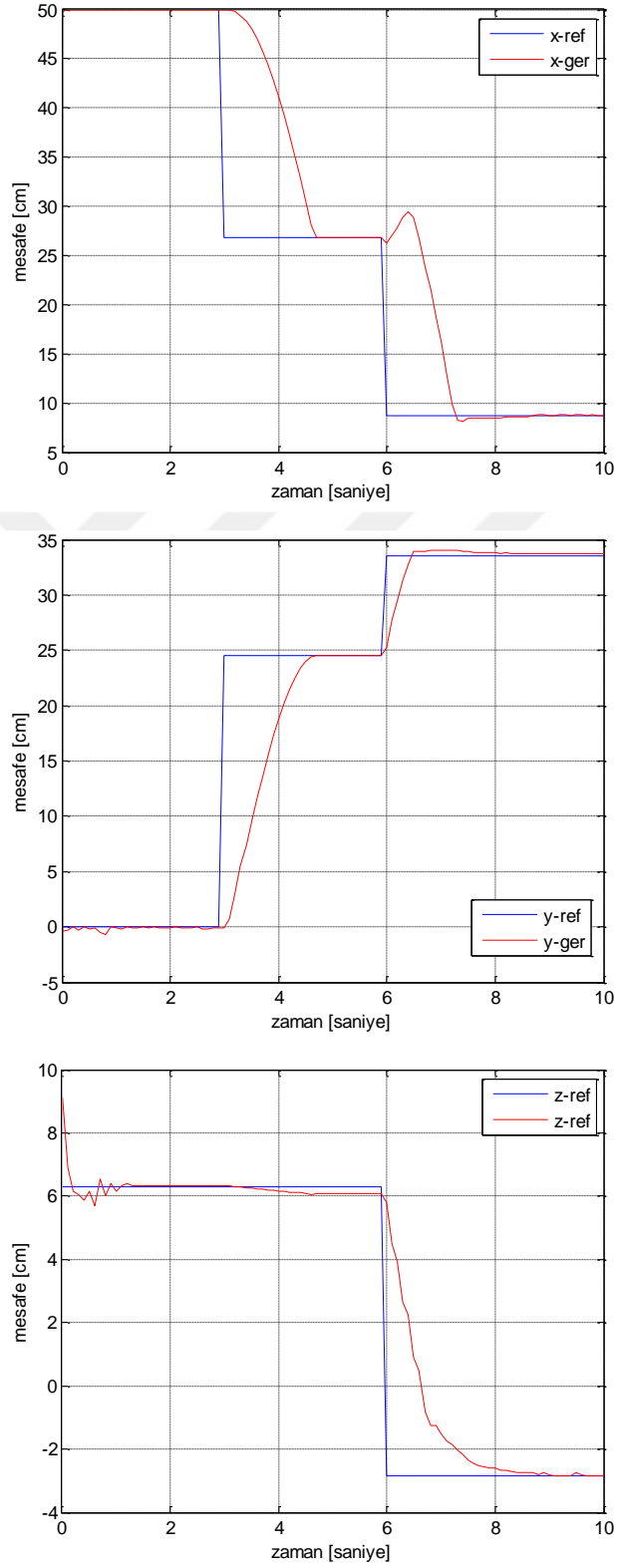
Şekil 5.31. $z=-10,23$, $x=1,73$ $y = 29,73$ için elde edilen grafikler

Yüksekliği 9 cm ve hedef koordinatları $z=-2,35$, $x=10,06$ $y = 27,67$ için elde edilen grafikler aşağıdaki Şekil 5.32.'de verilmiştir.



Şekil 5.32. $z=-2,35$, $x=10,06$ $y = 27,67$ için elde edilen grafikler

Yüksekliği 11 cm ve hedef koordinatları $z=-2,85$, $x=8,67$, $y = 33,51$ için elde edilen grafikler aşağıdaki Şekil 5.33.'de verilmiştir.

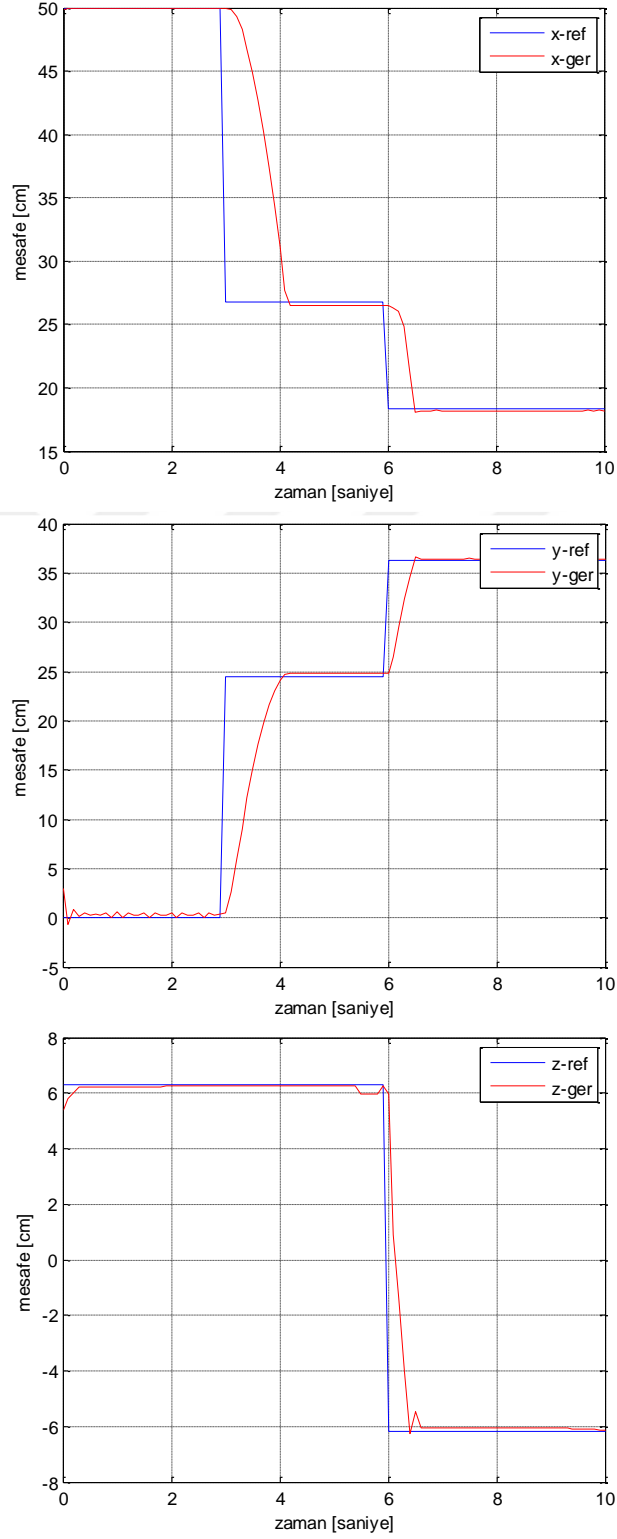


Şekil 5.33. $z=-2,85$, $x=8,67$, $y = 33,51$ için elde edilen grafikler

Tablo 5.5. Elde tutlan cisim için robot sağ kol tutucu x-y-z referans-gerçek değerleri ve % hata değerleri

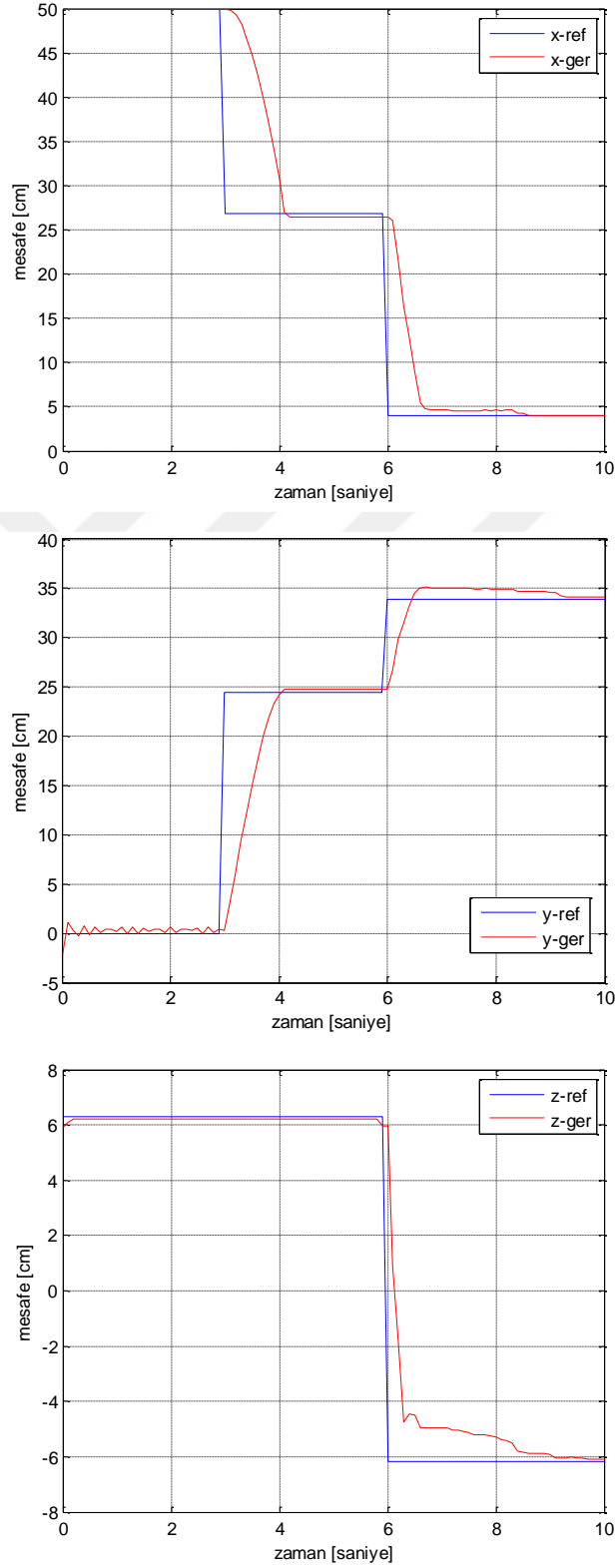
zaman	x_ref	x_ger	y_ref	y_ger	z_ref	z_ger	x	y	z
							% hata	% hata	% hata
7 cm yüksekliğindeki cisim için									
9.4	10.176	10.276	35.019	35.849	-6.983	-6.954	-0.989	-2.370	0.415
8.1	9.591	9.538	31.992	32.874	-9.136	-9.488	0.554	-2.758	-3.859
10.0	4.796	4.669	34.504	34.478	-3.224	-3.171	2.640	0.076	1.645
9.5	11.176	11.182	37.561	37.012	-10.62	-10.40	-0.052	1.461	2.071
9.8	14.916	15.033	39.248	38.043	-7.870	-7.741	-0.785	3.072	1.649
7.6	18.310	18.198	36.256	36.452	-6.193	-6.034	0.611	-0.541	2.575
9.7	18.019	18.741	36.468	36.348	-6.443	-6.296	-4.9	0.329	2.291
8.1	10.668	10.893	29.477	30.406	-6.324	-6.394	-2.108	-3.151	-1.112
7.7	11.696	11.356	30.702	30.716	-1.645	-1.629	2.906	-0.046	0.949
7.7	13.060	12.820	31.047	31.405	-4.791	-4.812	1.838	-1.154	-0.434
9 cm yüksekliğindeki cisim için									
9.1	3.951	4.032	33.895	34.598	-6.156	-6.038	-2.038	-2.074	1.929
8.8	7.832	7.439	32.411	33.861	-4.923	-4.861	5.015	-4.474	1.259
9.1	5.934	5.724	31.193	33.132	-1.665	-1.648	3.549	-6.215	1.053
8.5	6.902	7.504	38.290	37.576	-8.843	-8.626	-8.720	1.867	2.453
7.8	14.143	13.822	31.038	33.208	-6.150	-6.178	2.271	-6.991	-0.463
9.0	9.322	9.242	35.069	35.943	-6.606	-6.529	0.856	-2.495	1.175
9.5	13.274	13.284	33.155	33.266	-8.5	-8.682	-0.074	-0.334	-2.144
8.5	8.652	8.570	30.730	32.173	-7.333	-7.791	0.946	-4.698	-6.248
9.7	12.632	12.080	36.816	38.123	0.256	0.241	4.372	-3.549	5.691
10.0	9.304	9.460	35.365	36.096	1.603	1.647	-1.675	-2.066	-2.689
11 cm yüksekliğindeki cisim için									
10.0	14.974	14.706	38.1	37.693	-1.824	-1.866	1.787	0.810	-2.305
10.0	9.564	9.366	40.398	40.843	1.619	1.670	2.070	-1.103	-3.156
9.5	9.619	9.160	35.828	36.060	-1.701	-1.650	4.769	-0.645	3.003
8.4	9.195	9.384	34.494	35.534	0.203	0.193	-2.048	-3.018	4.759
7.7	7.883	8.224	38.530	38.764	-3.391	-3.548	-4.322	-0.609	-4.639
7.5	7.509	7.237	42.268	41.296	-1.923	-1.834	3.625	2.301	4.602
7.3	3.978	4.193	36.226	34.803	-7.915	-7.797	-5.410	3.927	1.497
8.0	3.531	3.587	42.374	41.713	-6.857	-6.838	-1.591	1.560	0.271
7.7	1.015	0.985	38.104	37.892	-7.812	-7.863	3.022	0.558	-0.656
7.5	7.326	7.577	39.856	38.342	-3.040	-3.036	-3.436	3.798	0.141

Yüksekliği 7 cm ve hedef koordinatları $z=-6,19$, $x=18,30$, $y = 36,25$ için elde edilen grafikler aşağıdaki Şekil 5.34.'de verilmiştir.



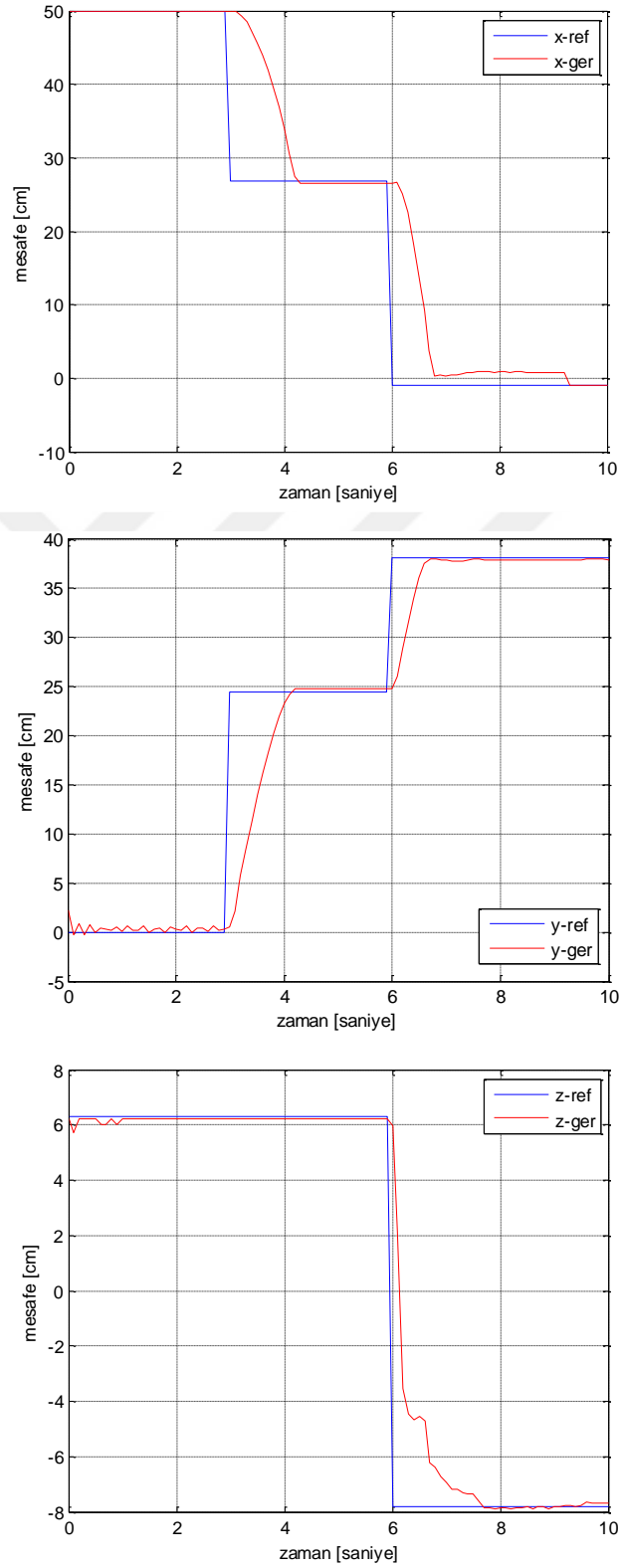
Şekil 5.34. koordinatları $z=-6,19$, $x=18,30$, $y = 36,25$ için elde edilen grafikler

Yüksekliği 9 cm ve hedef koordinatları $z=-6,15$, $x=3,95$, $y = 33,89$ için elde edilen grafikler aşağıdaki Şekil 5.35.'de verilmiştir.



Şekil 5.35. $z=-6,15$, $x=3,95$, $y = 33,89$ için elde edilen grafikler

Yüksekliği 11 cm ve hedef koordinatları $z=-7.81$, $x=-1.01$, $y = 38.1$ için elde edilen grafikler aşağıdaki Şekil 5.36.'da verilmiştir.



Şekil 5.36. $z=-7.81$, $x=-1.01$, $y = 38.1$ için elde edilen grafikler

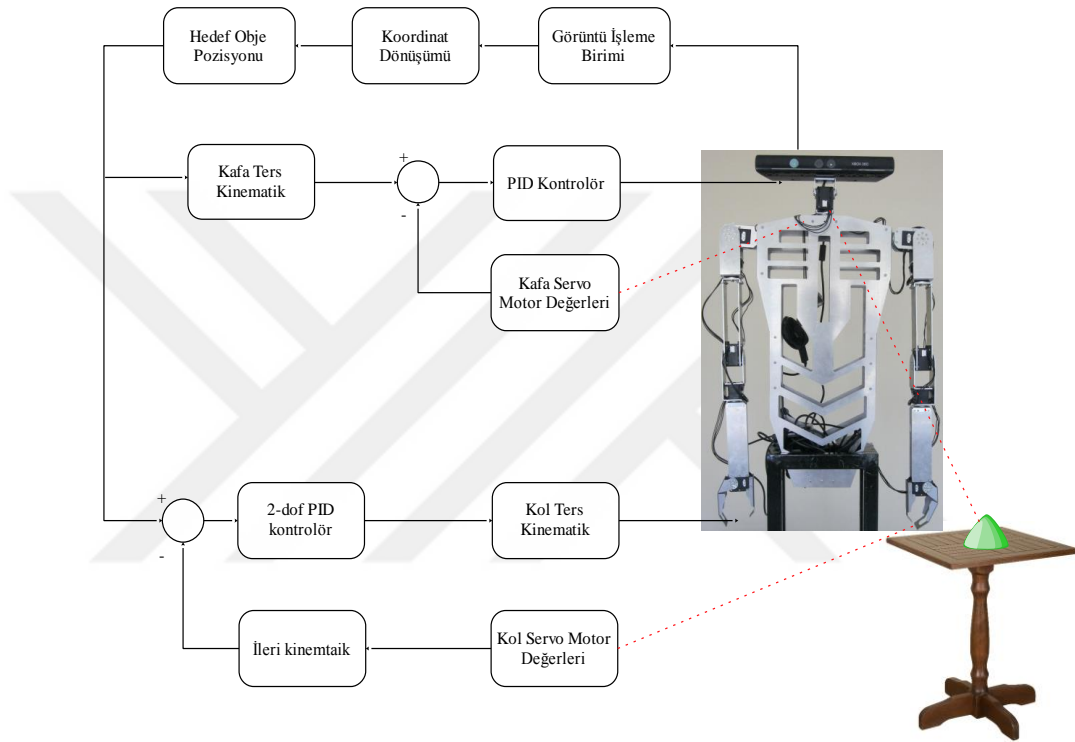
Bu çalışmada insan elinde tutulan cismin tutucu tarafından yakalanması amaçlanmıştır. Elde edilen değerler tablo ve grafik halinde verilmiştir. 7-9-11 cm yüksekliğindeki cisimler için hata değerleri hesaplanmıştır. Yukarıdaki Tablo 5.4.-5.5. ve Grafikler 5.32.-37. incelendiğinde 7cm yüksekliğindeki cisim için maksimum hata $x=2,9$, $y=3,1$, $z=2,5$, 9 cm yüksekliğindeki cisim için $x=8,7$, $y=6,7$, $z=6,2$ ve 11 cm yüksekliğindeki cisim için $x=4,7$, $y=3,9$, $z=4,6$ olarak elde edilmiştir. Bu yüzde hatalara karşılık gelen değerler 0,2-1,2 cm aralığındadır. Robot tutucu açık pozisyondayken belli bir hacmi tarayabilmektedir. Bundan dolayı tutucu bu hata değerleri içerisinde çalışabilmektedir. Ayrıca tutucunun cisme çarpma ihtimali olduğundan dolayı sistem cevabının aşım yapmaması istenmiştir. Elde edilen grafiklerde 9cm yüksekliğindeki cisim için y ekseninde %3'lük bir aşım yaptığı tespit edilmiş ve bu 1,11 cm mesafeye karşılık gelmektedir. Yapılan denemelerde bu uygulamanın genellikle %80-90 başarılı olduğu görülmüştür.

5.3.2.3. Pozisyon tabanlı görsel servo uygulama 2

Bu bölümde bir önceki bölümde gerçekleştirilen Pozisyon Tabanlı görsel servo kontrolü uygulanmış olup, burada farklı olarak cisim elde tutulmayıp, masa üzerine yerleştirilmiştir. Cisim masa üzerinde bulunduğundan dolayı kol hedef noktaya yaklaşırken masaya çarpma olasılığı olduğundan dolayı serbest bir şekilde hedef noktaya yaklaşmamalıdır. Kolun masaya çarpmasını engellemek için yörünge planlaması gerçekleştirmiştir.

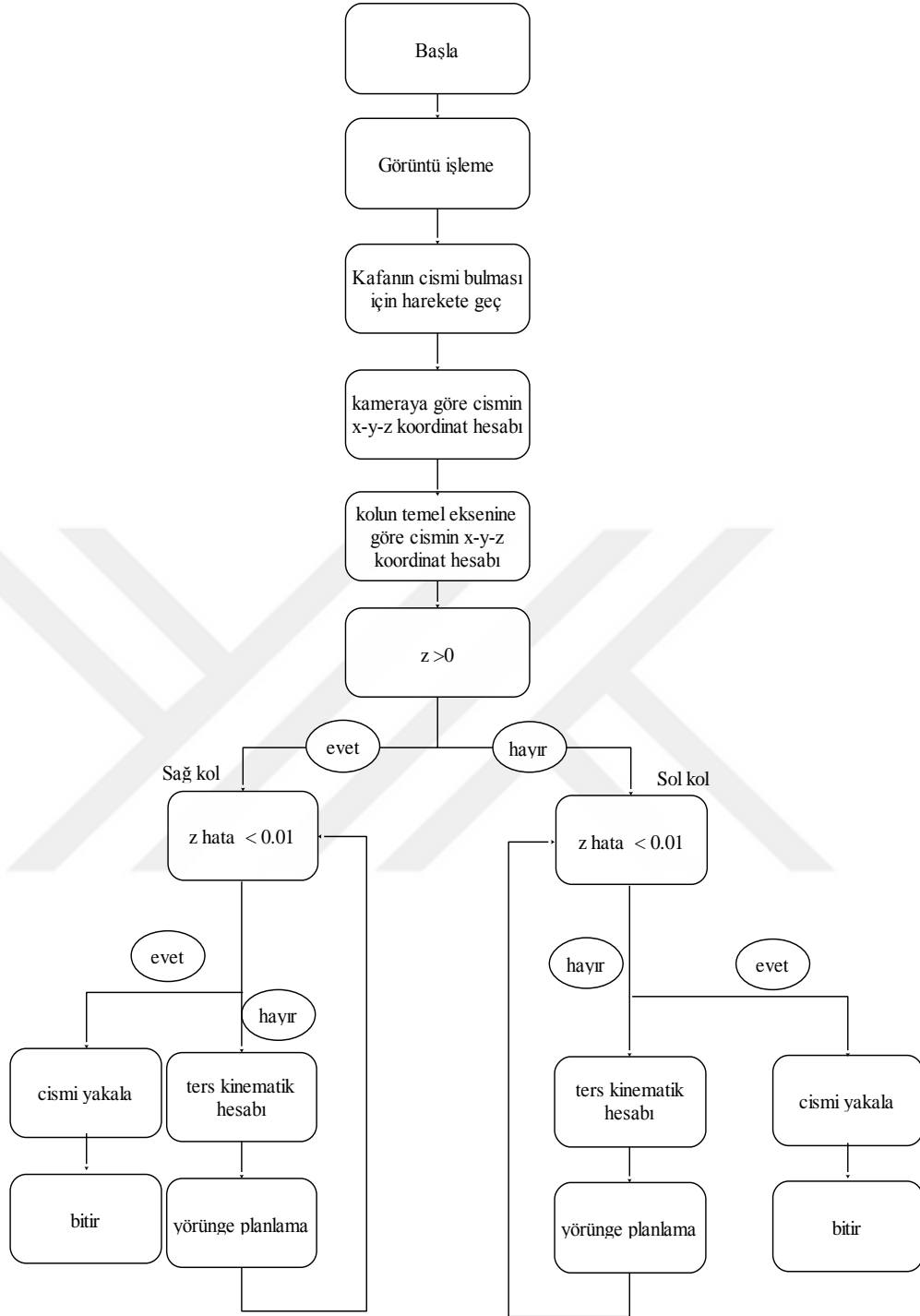
Bir önceki bölümde verilmiş olan pozisyon tabanlı servo kontrol algoritmasındaki matematiksel ifadeler bu algorithmada da kullanılmıştır. Masa üzerine yerleştirilen yeşil renkli cisim kamera tarafından algılanıp robot kafası cismin merkezine göre konumlanır. Konumlama işlemi gerçekleştirildikten sonra cismin konum koordinatları ($x_c-y_c-z_c$) önce kameraya göre hesaplanır daha sonra kolun temel eksenine ($x_r-y_r-z_r$) taşınır. Robot kolunun kontrolü için gerekli olan motorlardan elde edilen açısal değerler ileri kinematik denklemlerine sokulup robot kolunun uç nokrasının gerçek konum koordinatları hesaplanır. Bu koordinatlar ile hedef cismin koordinatları kıyaslanıp hata değeri elde edilir. Bu hata değeri kontrolöre sokulup uygun kontrol

sinyal hesaplanır. Elde edilen kontrol sinyali ters kinematikte kullanılarak robot kolunun hareketi için gerekli olan açısal değerler hesaplanır. Masa üzerinde bulunan cismin konumuna göre sağ veya sol kol devreye girer. İlgili kolun masaya çarpmasını engellemek için kol cismin önünde ve yukarısında konumlandırılır. Daha sonra yörünge planlamasıyla kolun cisme kontrollü bir şekilde yaklaşması sağlanır. Pozisyon Tabanlı Servo Kontrol blok diyagramı Şekil 5.37.'de gösterilmiştir.



Şekil 5.37. Pozisyon tabanlı servo motor kontrolü uygulama 2 blok diyagramı

Matlab-Simulink programında hazırlanan algoritma şu adımlardan oluşmaktadır. Program başladıktan sonra kafa cismin yerini tespit etmeye harekete geçer. Cismin yerini tespit ettikten sonra önce cismin kameraya göre daha sonra kolun temel eksenine göre cismin konum koordinatları hesaplanır. Cismin kamera tarafından yerinin tespiti, konumunun hesabı ve ilk hareketin gerçekleşmesi 6 s sürmektedir. Kolun cismin önünde ve yukarıda pozisyonlanması 9 s'de gerçekleşir. 11-22 s aralığında yörünge planlama ile cisme kontrollü yaklaşmaktadır. Z koordinatındaki hata 0.01'den daha az olduğunda tutucu kapanarak cismi yakalaması gerçekleştirilir. Bu algoritmayla ilgili akış diyagramını Şekil 5.38.'de verilmiştir.



Şekil 5.38. Pozisyon tabanlı servo motor kontrolüne ait akış diyagramı

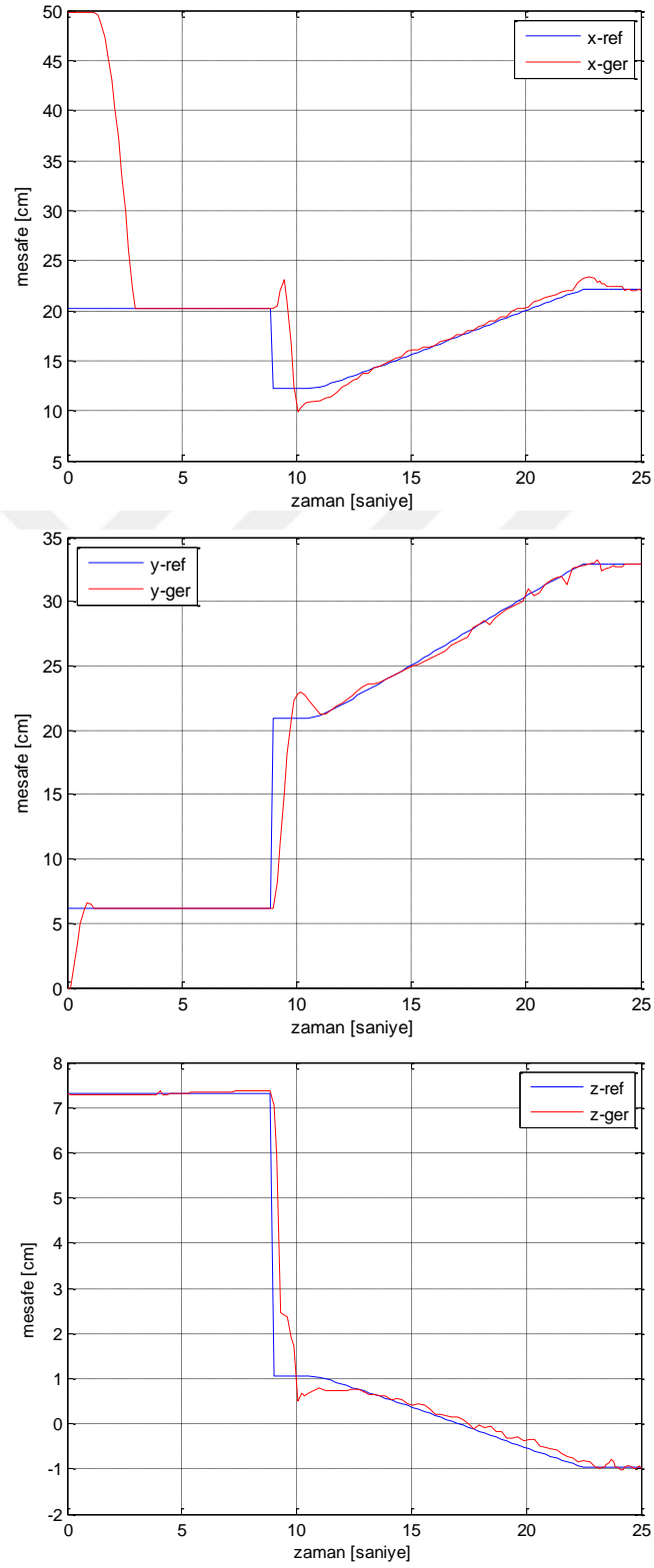
Bu uygulamada 7-9-11 cm yüksekliğinde olan farklı cisimler kullanılmıştır. Cisimler masa üzerine rasgele olacak şekilde konumlandırılmıştır. Örnekleme zamanı 0.1 ve uygulama toplam 25 s olarak gerçekleştirilmiştir. Robotun cismi tuttuğu andaki x-y-z değerleri, tutma zamanı, referans x-y-z değerleri elde edilip x-y-z % hata değerleri

hesaplanmıştır. Bu değerler sol kol için Tablo 5.6.'da, sağ kol için Tablo 5.7.'de verilmiştir.

Tablo 5.6. Masaüstü duran cisim için robot sol kol tutucu x-y-z referans-gerçek değerleri ve % hata değerleri

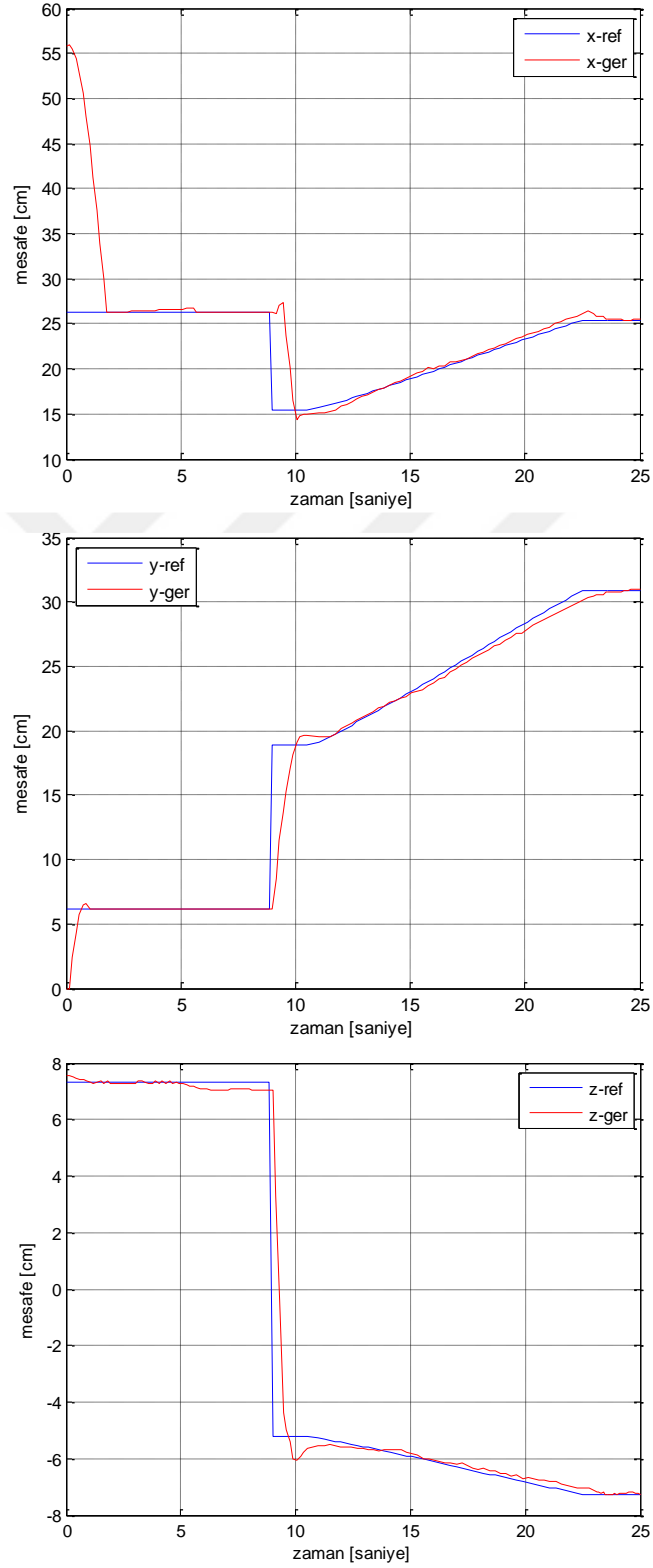
zaman	x_ref	x_ger	y_ref	y_ger	z_ref	z_ger	x%	y%	z%
							hata	hata	hata
7 cm yüksekliğindeki cisim için									
22,2	25,687	25,767	30,868	31,019	-0,847	-0,853	-0,311	-0,489	-0,708
23,1	25,357	25,437	31,215	31,237	1,443	1,439	-0,315	-0,070	0,277
22,2	25,096	25,198	33,247	33,077	-4,613	-4,600	-0,406	0,511	0,282
22,1	25,806	25,936	31,131	30,991	-10,098	-10,201	-0,504	0,450	-1,020
23,2	22,421	22,553	37,178	37,050	3,955	3,940	-0,589	0,344	0,379
23,3	22,936	22,944	34,660	34,849	-5,533	-5,632	-0,035	-0,545	-1,789
23	22,079	22,020	32,200	32,335	-7,117	-7,182	0,267	-0,419	-0,908
23,1	22,052	22,040	36,304	36,564	-2,807	-2,830	0,054	-0,716	-0,819
23,2	25,232	25,303	33,402	33,561	0,648	0,639	-0,281	-0,476	1,389
23,2	25,773	25,739	38,718	38,571	-5,180	-5,138	0,132	0,380	0,811
9 cm yüksekliğindeki cisim için									
22,9	20,835	20,748	31,991	32,2	-2,592	-2,582	0,418	-0,653	0,386
22,8	20,715	20,835	32,807	32,991	-0,963	-0,955	-0,579	-0,561	0,831
23,1	20,054	20,915	34,037	34,319	-5,249	-5,238	-4,293	-0,829	0,210
23,2	20,043	20,109	34,605	34,807	-9,119	-9,143	-0,329	-0,584	-0,263
23,3	20,597	20,6	36,771	36,789	-7,821	-7,672	-0,015	-0,049	1,905
22,8	24,315	24,23	38,171	38,245	0,405	0,404	0,350	-0,194	0,247
22,9	24,164	24,128	33,672	33,504	-7,565	-7,495	0,149	0,499	0,925
22,9	24,697	24,696	33,273	33,027	-4,898	-4,863	0,004	0,739	0,715
23	24,902	24,991	34,692	34,739	-3,839	-3,861	-0,357	-0,135	-0,573
23,1	224,612	24,579	31,869	32,143	-9,678	-9,699	89,057	-0,860	-0,217
11 cm yüksekliğindeki cisim için									
23,1	23,163	23,953	33,264	33,078	-4,717	-4,723	-3,411	0,559	-0,127
23,2	23,869	23,038	32,448	31,936	-0,651	-0,653	3,482	1,578	-0,307
23,2	23,626	23,566	35,305	35,17	-9,567	-9,603	0,254	0,382	-0,376
23,3	23,833	23,72	34,186	34,347	-7,81	-7,813	0,474	-0,471	-0,038
22,8	23,743	23,691	36,184	36,259	-0,506	-0,503	0,219	-0,207	0,593
22,9	20,135	20,396	31,444	31,114	1,353	1,341	-1,296	1,049	0,887
22,9	19,83	19,69	33,333	33,528	-6,144	-6,162	0,706	-0,585	-0,293
23	20,229	20,654	36,463	36,223	-4,552	-4,512	-2,101	0,658	0,879
23,2	20,692	20,49	37,792	37,742	-7,181	-7,188	0,976	0,132	-0,097
23,1	20,235	20,352	34,177	34,904	-9,218	-9,203	-0,578	-2,127	0,163

Yüksekliği 7 cm ve hedef koordinatları $z=-0,97$, $x=22,1$, $y=32,9$ için elde edilen grafikler aşağıdaki Şekil 5.39.'da verilmiştir.



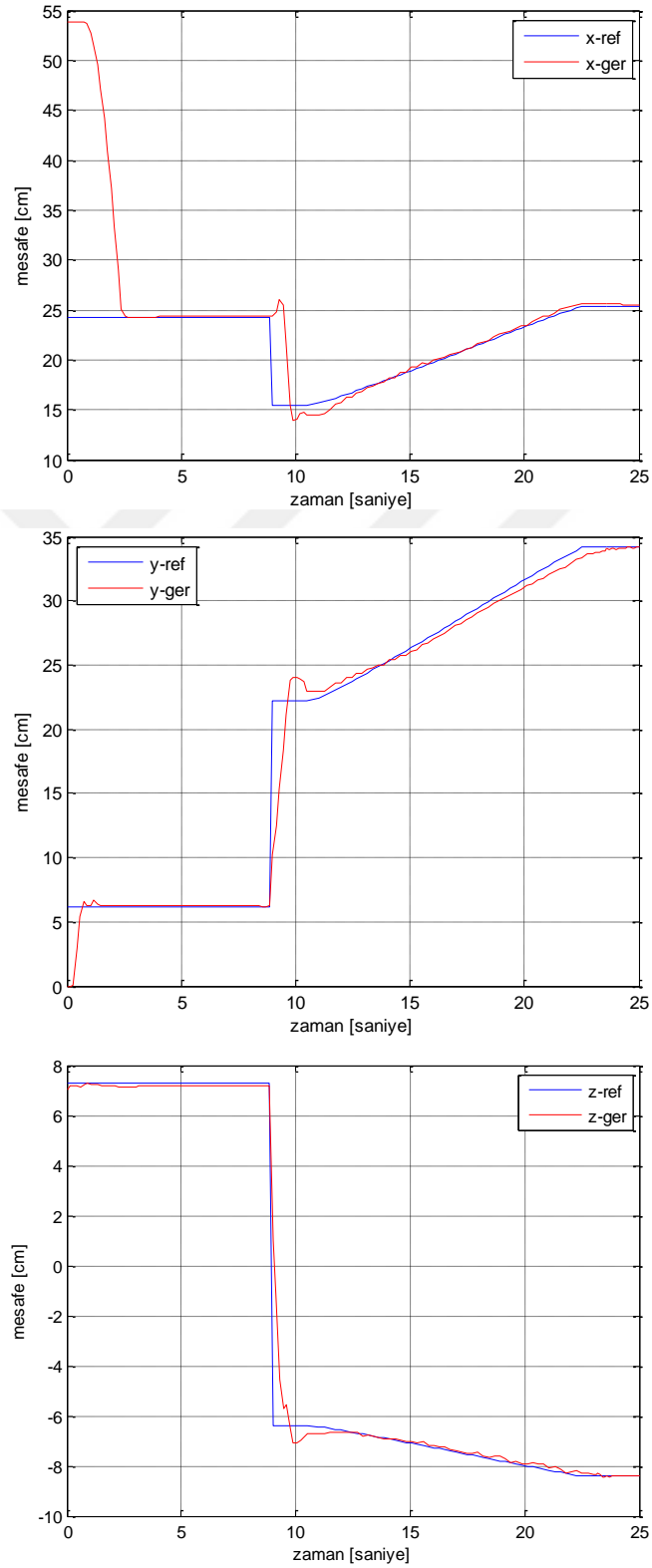
Şekil 5.39. $z=-0,97$, $x=22,1$, $y=32,9$ için elde edilen grafikler

Yükseklği 9 cm ve hedef koordinatları $z=-7,26$, $x=25,38$, $y=30,8$ için elde edilen grafikler aşağıdaki Şekil 5.40.'da verilmiştir.



Şekil 5.40. $z=-7,26$, $x=25,38$, $y=30,8$ için elde edilen grafikler

Yüksekliği 11 cm ve hedef koordinatları $z=-8,41$, $x=25,36$, $y=34,15$ için elde edilen grafikler aşağıdaki Şekil 5.41.'de verilmiştir.

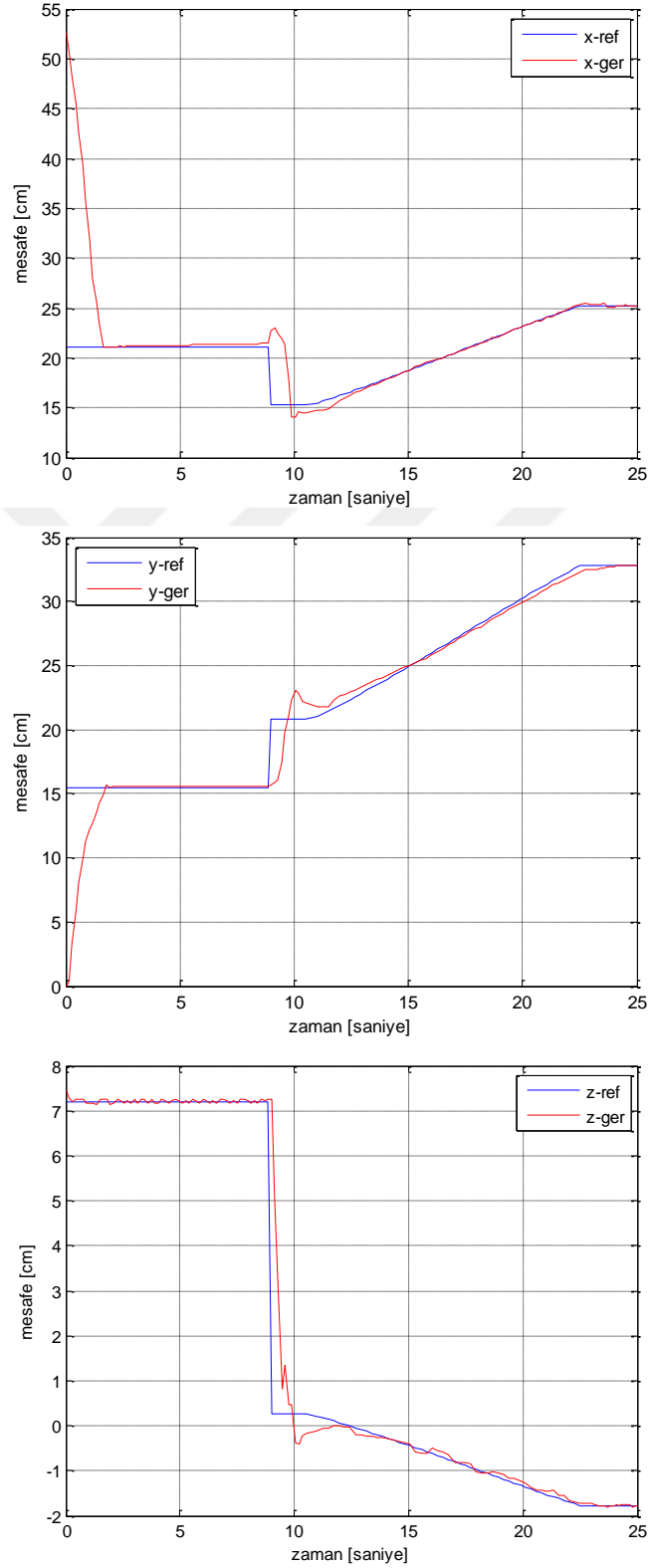


Şekil 5.41. $z=-8,41$, $x=25,36$, $y=34,15$ için elde edilen grafikler

Tablo 5.7. Masaüstü duran cisim için robot sağ kol tutucu x-y-z referans-gerçek değerleri ve % hata değerleri

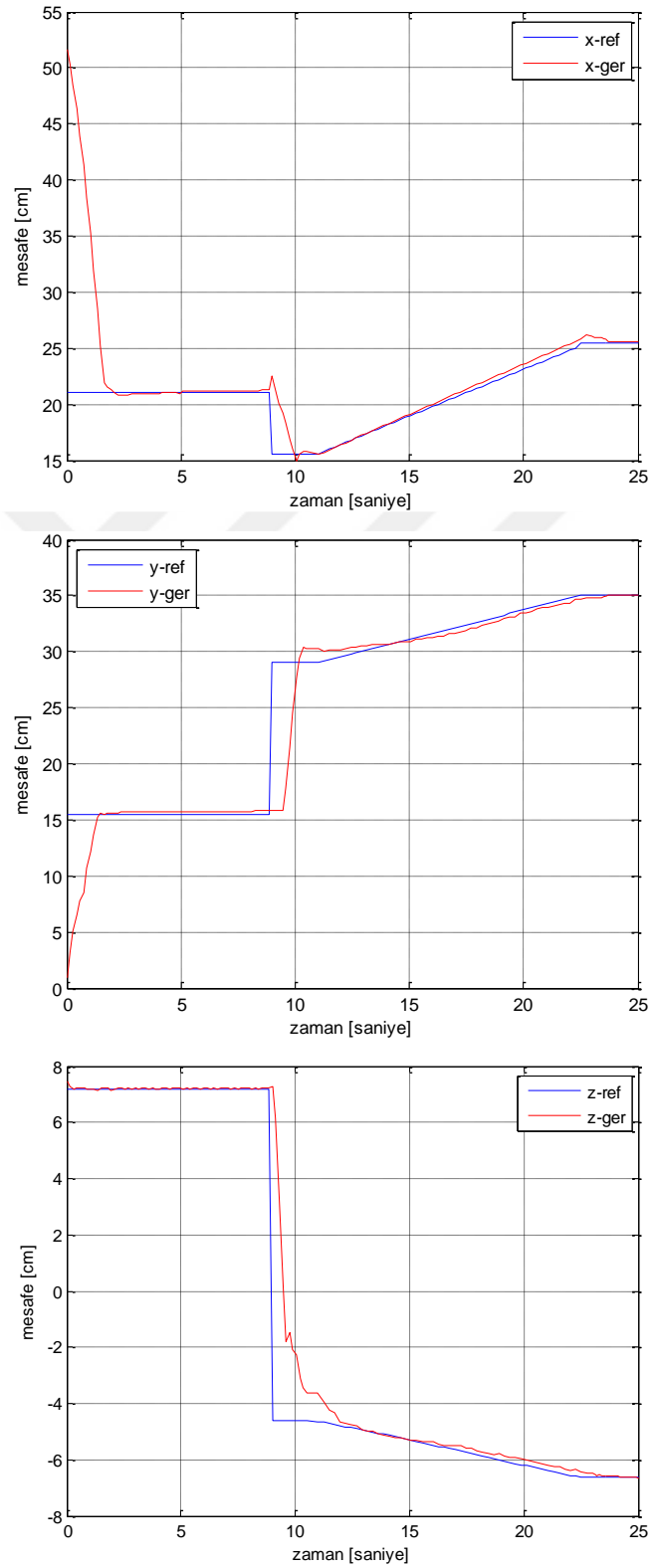
zaman	x_ref	x_ger	y_ref	y_ger	z_ref	z_ger	x	y	z
							% hata	% hata	% hata
7 cm yüksekliğindeki cisim için									
8.5	21.299	21.507	30.535	31.126	-6.224	-6.246	-0,977	-1,935	-0,353
12.5	25.342	25.341	34.463	34.471	-4.713	-4.698	0,004	-0,023	0,318
12.6	25.446	25.415	34.405	34.404	-6.491	-6.447	0,122	0,003	0,678
12.9	25.217	25.077	36.775	36.737	-0.772	-0.773	0,555	0,103	-0,130
13.7	25.533	25.211	32.862	32.624	-4.008	-4.000	1,261	0,724	0,200
18.3	25.641	25.620	34.373	34.613	-6.869	-6.868	0,082	-0,698	0,015
12.2	22.660	22.473	30.657	30.569	-8.473	-8.420	0,825	0,287	0,626
12.3	22.761	22.694	32.654	32.514	-8.375	-8.336	0,294	0,429	0,466
12.4	22.252	22.540	33.688	33.502	-3.136	-3.112	-1,294	0,552	0,765
8.5	22.299	22.507	30.535	31.126	-6.224	-6.246	-0,933	-1,935	-0,353
9 cm yüksekliğindeki cisim için									
12.7	21.990	21.182	33.900	33.770	-3.419	-3.394	3,674	0,383	0,731
12.3	21.449	21.521	34.986	34.837	-6.628	-6.565	-0,336	0,426	0,951
13.4	21.962	21.863	36.937	36.058	-6.841	-6.794	0,451	2,380	0,687
12.5	21.279	21.424	32.602	32.550	-8.112	-8.054	-0,681	0,159	0,715
12.7	21.895	21.022	33.984	33.942	-2.149	-2.140	3,987	0,124	0,419
12.5	24.630	24.903	31.453	31.301	-5.482	-5.456	-1,108	0,483	0,474
12.6	24.392	24.334	33.876	34.010	-8.572	-8.514	0,238	-0,396	0,677
12.6	24.085	24.237	32.087	32.108	-10.044	-9.959	-0,631	-0,065	0,846
12.6	24.247	24.281	35.715	35.728	-3.559	-3.551	-0,140	-0,036	0,225
13.1	24.551	24.690	34.577	34.560	-4.153	-4.151	-0,566	0,049	0,048
11 cm yüksekliğindeki cisim için									
12.7	20.937	20.833	34.645	34.760	-6.629	-6.609	0,497	-0,332	0,302
12.3	20.436	20.757	36.448	36.432	-7.505	-7.452	-1,571	0,044	0,706
12.6	20.422	20.169	33.974	34.164	-8.367	-8.338	1,239	-0,559	0,347
12.7	20.647	20.427	35.534	35.749	-6.688	-6.660	1,066	-0,605	0,419
12.4	20.074	20.017	32.903	32.988	-8.012	-7.970	0,284	-0,258	0,524
12.4	23.809	23.090	35.018	34.921	-3.487	-3.460	3,020	0,277	0,774
12.3	23.021	23.147	35.345	35.437	-6.899	-6.840	-0,547	-0,260	0,855
12.5	23.304	23.627	35.075	35.025	-6.249	-6.213	-1,386	0,143	0,576
12.5	23.709	23.843	35.143	35.165	-8.359	-8.365	-0,565	-0,063	-0,072
12.8	23.166	23.310	33.960	33.973	-10.301	-10.35	-0,622	-0,038	-0,524

Yüksekliği 7 cm ve hedef koordinatları $z=-1,77$, $x=25,21$, $y=32,77$ için elde edilen grafikler aşağıdaki Şekil 5.42.'de verilmiştir.



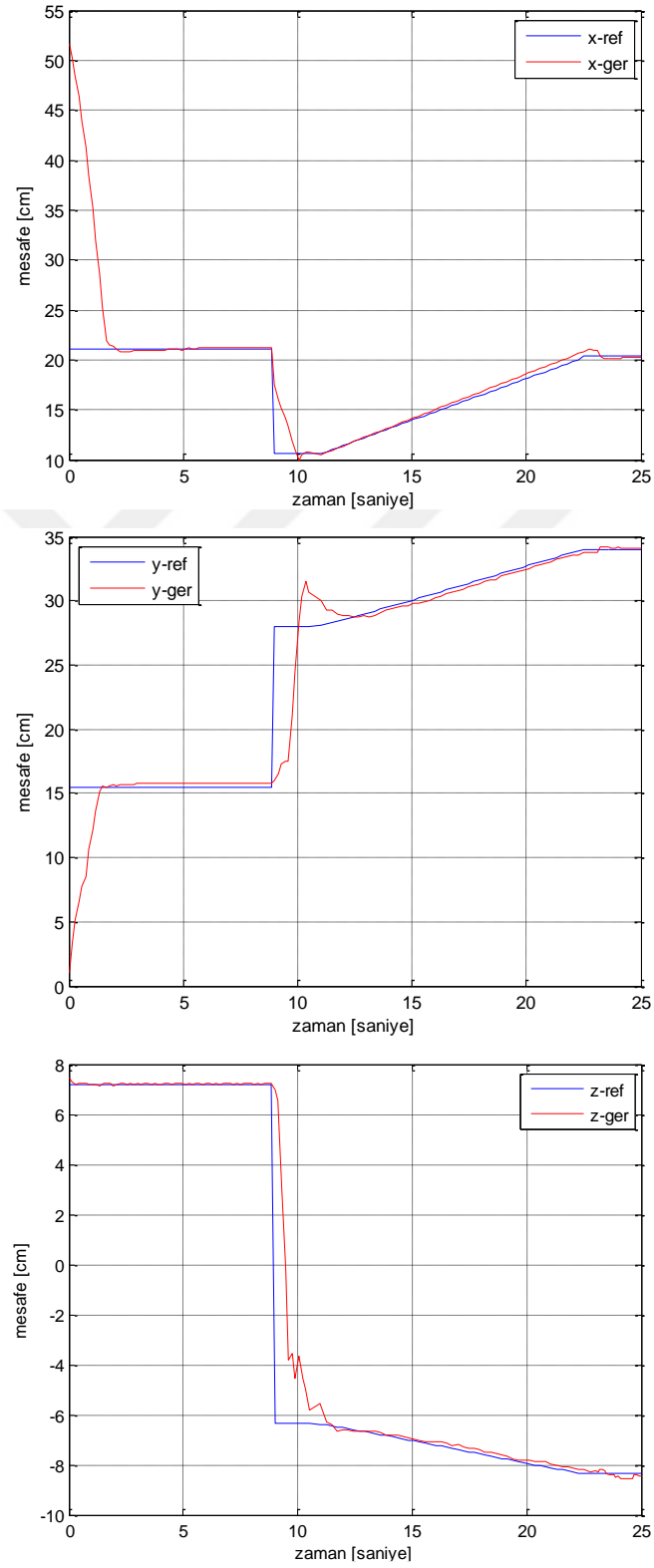
Şekil 5.42. $z=-1,77$, $x=25,21$, $y=32,77$ için elde edilen grafikler

Yüksekliği 9 cm ve hedef koordinatları $z=-6,63$, $x=25,45$, $y=34,98$ için elde edilen grafikler aşağıdaki Şekil 5.43.'de verilmiştir.



Şekil 5.43. $z=-6,63$, $x=25,45$, $y=34,98$ için elde edilen grafikler

Yüksekliği 11 cm ve hedef koordinatları $z=-8,37$, $x=20,42$, $y=33,97$ için elde edilen grafikler aşağıdaki Şekil 5.44.'de verilmiştir.



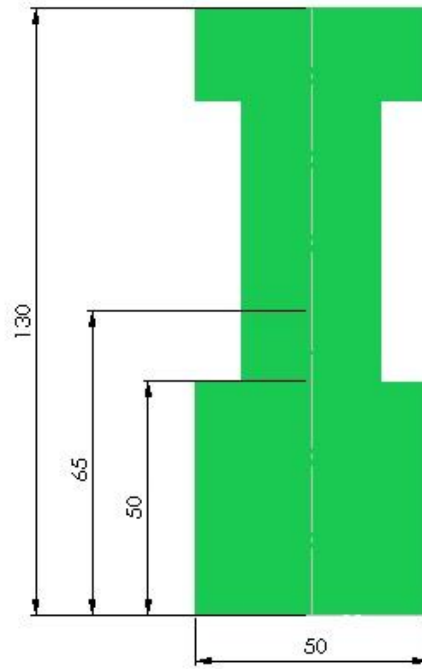
Şekil 5.44. $z=-8,37$, $x=20,42$, $y=33,97$ için elde edilen grafikler

Bu çalışmada masa üstünde duran cismin tutucu tarafından yakalanması amaçlanmıştır. Elde edilen değerler tablo ve grafik halinde verilmiştir. Yukarıdaki tablo ve grafikler incelendiğinde 7cm yüksekliğindeki cisim için maksimum hata $x=1,261$, $y=-1,935$, $z=0,765$. 9 cm yüksekliğindeki cisim için $x=3,674$, $y=2,380$, $z=0,951$ ve 11 yüksekliğindeki cisim için $x=-1,571$, $y=-0,605$, $z=0,774$ olarak elde edilmiştir. Bu yüzde değerlere karşılık gelen hatalar 0,1-0,9 cm aralığındadır. Robot tutucu açık pozisyondayken belli bir hacmi tarayabilmektedir. Bundan dolayı bu hata değerleri içerisinde çalışabilmektedir. Ayrıca tutucunun masaya çarpma ihtimalinden dolayı 11-22 s aralığında yörünge planlama ile cisme kontrollü yaklaşması sağlanmıştır. Grafikler incelendiğinde tutucunun x-y-z’de istenilen yörüngeyi başarılı bir şekilde takip ettiği gözlemlenmiştir. Yapılan denemelerde bu uygulamanın genellikle %70-80 başarılı olduğu görülmüştür.

5.3.2.4. Pozisyon tabanlı görsel servo uygulama 3

Önceki bölümlerde görüntü işleme teknikleri kullanılarak dikdörtgen şekle sahip cismin robot tarafından algılanıp insanın elinden ve masaüstünde yakalanması ile ilgili uygulamalar gerçekleştirmiştir. Bu uygulamalarda kullanılan cisimlerin genişliği 5cm olup robot tutucunun kavrayabileceği genişliktedir. Ancak cismin genişliği bölgesel farklı olup sadece belli bir bölgesinin genişliği robot tutucunun kavrayabileceği genişlikte olursa nasıl bir algoritma ile cismin yakalanması gerçekleştirilebilir? Bu sorunun cevabı yeni algoritmanın temelini oluşturmaktadır.

Genişliği değişen cisim robot tutucunun yakalaması için uygun yerinin tespit edilmesi gerekmektedir. Bu uygulamada yeşil renkli cisim kullanılmıştır. Cisim boyutları ile ilgili bilgi Şekil 5.45.’de verilmiştir.



Şekil 5.45. Değişken kesitli cisim

Yukarıda verilen cismin robot tutucu tarafından yakalanabileceği bölge şekilde de gösterilmiştir. Bu bölgeden yakalayabilmek için öncelikle kameraya göre daha sonra kolun temel eksenine göre konum koordinatlarının tespit edilmesi gerekmektedir. Bunun için Bölüm 5.3.2.'de anlatılan görüntü işleme teknikleri kullanarak yeşil cisimden siyah-beyaz görüntü elde edilmelidir.

Elde edilen siyah-beyaz görüntüde kesitin daralan noktasının bulunması amaçlanmıştır.

- Elde edilen siyah-beyaz görüntünün satırları taranır.
- Her bir satırdaki beyaz noktalar toplanır.
- Bu toplamlar bir dizine kaydedilir.
- Bu dizini yukarıda aşağıya kıyaslayarak cismin daralmanın başladığı ve bittiği nokta hesaplanır.
- Bu iki noktanın ortası bulunur.

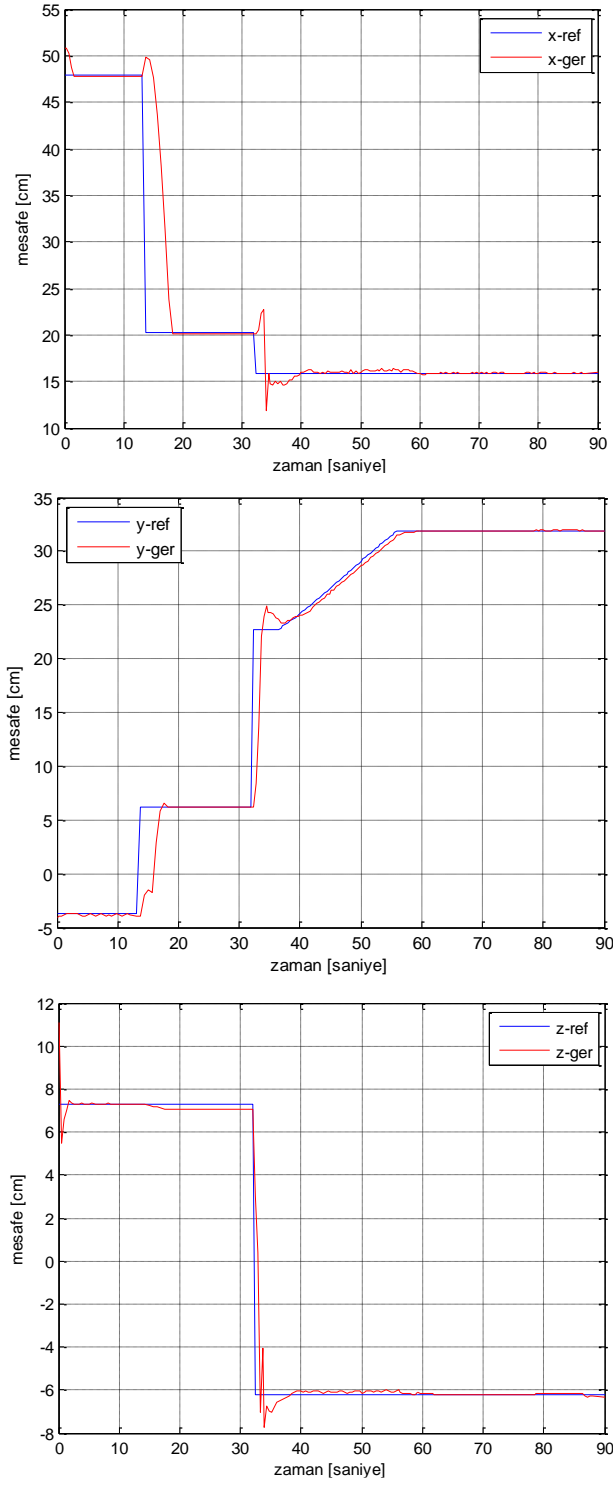
Yukarıdaki algoritma ile cismin daralan kesitinin orta noktasının satır-sütun numarası elde edilmiştir. Bu satır-sütun numarası aynı zamanda cismin bu noktasının konum koordinatlarını vermektedir. Bu koordinatlar kullanılarak kameranın bu noktaya odaklanması sağlanmıştır. Bölüm 6.2.'de anlatılan görüntü işleme teknikleri kullanarak cismin kolun temel eksenine göre konum koordinatları hesaplanmış olunur. Elde edilen bu konum kornaları tutucunun cismi yakalaması için kullanılır.

Bu uygulamada cisim masa üzerine rasgele olacak şekilde konumlandırılmıştır. Örnekleme zamanı 0.1 s ve uygulama toplam 80 s olarak gerçekleştirilmiştir. Robotun cismi tuttuğu andaki x-y-z değerleri, tutma zamanı, referans x-y-z değerleri elde edilip x-y-z % hata değerleri hesaplanmıştır. Bu değerler sol kol için Tablo 5.8.'de, sağ kol için Tablo 5.9.'da verilmiştir.

Tablo 5.8 Genişliği değişen cisim için robot sol kol tutucu x-y-z referans-gerçek değerleri ve % hata değerleri

zaman	x_ref	x_ger	y_ref	y_ger	z_ref	z_ger	x % hata	y % hata	z % hata
13.0	13.874	13.739	31.901	31.872	-2.197	-2.185	0.970	0.090	0.531
12.9	13.466	13.449	30.317	30.353	-5.298	-5.245	0.130	-0.120	0.985
12.8	14.429	14.526	26.312	26.293	-1.294	-1.291	-0.668	0.073	0.213
12.3	14.424	14.574	27.419	27.207	-3.992	-3.974	-1.042	0.775	0.464
12.5	14.692	14.929	30.255	30.023	2.362	2.346	-1.618	0.767	0.680

Genişliği değişen cisim robot sol kol için elde edilen x-y-z grafikleri aşağıdaki Şekil 5.46.'de verilmiştir.

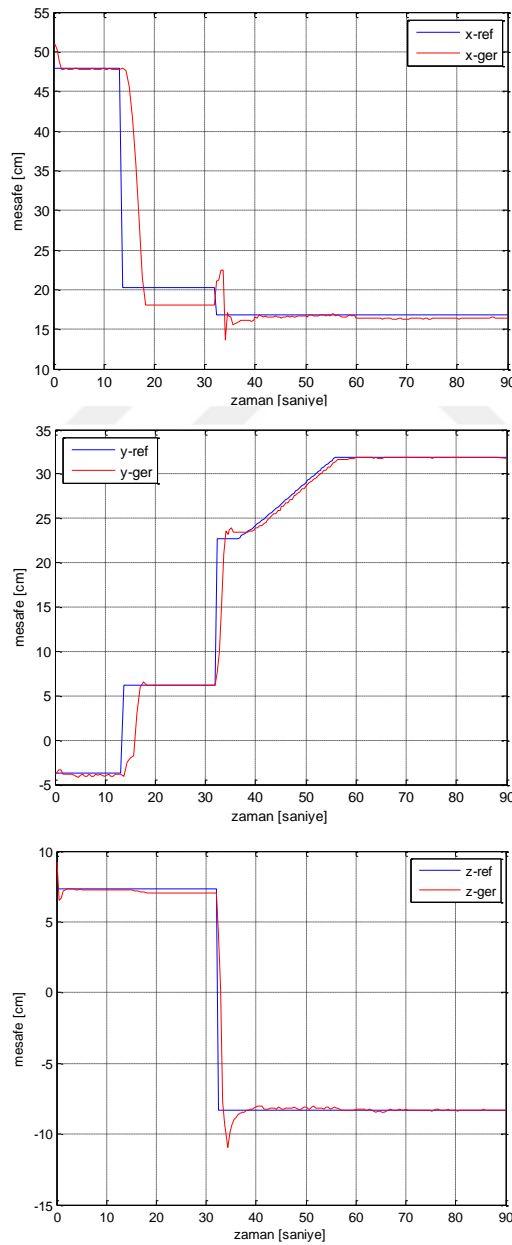


Şekil 5.46. Genişliği değişen cisim robot sağ kol için elde edilen x-y-z grafikleri

Tablo 5.9. Genişliği değişen cisim için robot sağ kol tutucu x-y-z referans-gerçek değerleri ve % hata değerleri

zaman	x_ref	x_ger	y_ref	y_ger	z_ref	z_ger	x	y	z
							% hata	% hata	% hata
12.5	13.781	13.870	26.497	26.360	0.576	0.563	-0.645	0.519	2.185
12.4	13.182	13.126	25.506	25.410	-1.868	-1.854	0.428	0.377	0.773
12.3	12.386	12.5	26.999	26.972	-4.677	-4.680	-0.922	0.1	-0.052
12.4	16.295	16.284	22.253	22.146	-6.127	-6.145	0.069	0.480	-0.294
12.2	16.696	16.648	25.518	25.323	-3.157	-3.152	0.286	0.765	0.167

Genişliği değişen cisim robot sağ kol için elde edilen x-y-z grafikleri aşağıdaki Şekil 5.47.'da verilmiştir.



Şekil 5.47. Genişliği değişen cisim robot sağ kol için elde edilen x-y-z grafikleri

Bu çalışmada masa üstünde duran genişliği değişen cismin tutucu tarafından uygun yerinden yakalanması amaçlanmıştır. Elde edilen sonuçlar tablo ve grafik halinde verilmiştir. Yukarıdaki tablo ve grafikler incelendiğinde genişliği değişen cisim için maksimum hata $x=1,6$ $y=0,8$, $z=2,2$ olarak elde edilmiştir. Bu yüzde değerlere karşılık gelen hatalar 0,01-0,5 cm aralığındadır. Robot tutucu açık pozisyondayken belli bir hacmi tarayabilmektedir. Bundan dolayı bu hata değerlerini içerisinde çalışabilmektedir. Ayrıca tutucunun masaya çarpma ihtimalinden dolayı 32-77 s aralığında y’de yörünge planlama ile cisme kontrollü yaklaşması sağlanmıştır. Yapılan denemelerde bu uygulamanın genellikle %40-50 başarılı olduğu görülmüştür.



BÖLÜM 6. SONUÇLAR

Bu çalışmada pozisyon tabanlı görsel servo kontrol algoritmasının 6 serbestlik dereceli robot koluna gerçek zamanlı uygulanıp otonom bir şekilde cisim tutması gerçekleştirilmiştir. Bu amaca uygun mobil insansı robot imalatı gerçekleştirmiştir.

Robotun her bir kolunda üçü omuz bölgesinde, ikisi dirsek bölgesinde ve bir tanesi tutucuda olmak üzere toplam 6 serbestlik derecesi bulunmaktadır. Robot başında yukarı-aşağı ve sağa-sola dönmesini sağlayan 2 serbestlik derecesi bulunmaktadır. Robotun zeminde hareketini sağlayan paletli mekanizmasında ise 2 serbestlik derecesi vardır. Robot toplam 16 serbestlik derecesine sahiptir. Robotun her bir serbestliği için Dynamixel marka servo motor kullanılmıştır. Bu motorların içerisinde mikro kontrolör bulunup birbirleri ile seri bir şekilde bağlanabilmektedir. Robotun yazılımı Matlab-Simulink programında gerçekleştirmiştir. Bilgisayar ile motorlar Rs-485 üzerinden bağlandığından haberleşmede Rs-485 protokolü kullanılmıştır.

Robotun kollarının çalışma uzayı içerisinde istenilen noktaya gidebilmesi için ters kinematik denklemlere ihtiyaç duyulmuştur. Bunun için önce D-H yöntemi ile robot kollarının ileri kinematik denklemleri elde edilmiştir. Daha sonra cebirsel metod kullanılarak kolların ters kinematik denklemleri çıkarılmıştır.

İlk olarak pozisyon tabanlı görsel servo kontrolün temel kontrol algoritması belirlenmiştir. Bunun için kollara PID ve 2-dof PID kontrol uygulanıp verileri tablo ve grafik olarak elde edilmiştir. Bu çalışmada hedef noktalar rasgele seçilmiştir. Uygulamada örnekleme zamanı 0.01 ve toplam süre 60 s seçilmiştir. Elde edilen sonuçlar kıyaslandığında 2-dof PID'nin x-y-z değerlerinin % hatasının daha az olduğu, oturma zamanının daha kısa olduğu, salınım ve aşımalarının daha az olduğu tespit

edilmiştir. Bundan dolayı 2-dof PID kolların temel kontrol algoritması olarak seçilmiştir.

Pozisyon tabanlı görsel servo kontrol uygulamasında robotun başının hareketinden dolayı elde edilen görüntünün bozulduğu tespit edilmiştir. Bu sorunu aşmak için yapay sinir ağlarından destek alınarak bir kd düzeltme katsayısı sürekli olarak güncellenerek görüntünün iyileşmesi sağlanmıştır.

Pozisyon tabanlı görsel servo kontrol ile ilgili üç uygulama gerçekleştirilmiştir. Birinci uygulamada insan elinde tutulan cismin robot sol veya sağ tutucu tarafından yakalanması amaçlanmıştır. Uygulamada 7-9-11 cm yüksekliğinde dikdörtgen şekilli yeşil renkli cisimler kullanılmıştır. Cismin konum koordinatları görüntü işleme teknikleri ile hesaplanıp kolun temel eksenine aktarılmıştır. Ters kinematik denklemler ile bu koordinatlara karşılık gelen eklem açıları hesaplanmıştır. Burada 2-dof PID kontrolör konum hatasını minimize etmek için çalışmaktadır. Temel olarak bu uygulamada robot kolunun basamak cevabı elde edilmiştir. Örnekleme zamanı 0.1 s seçilmiş ve uygulama toplam 10 s sürmüştür. Robot tutucunun kapanması z eksenindeki hataya bağlı olup hata değeri 0.001'den küçük olunca gerçekleşmektedir. Yapılan denemelerde bu uygulamada genellikle %90 başarı sağlanmıştır.

Pozisyon tabanlı görsel servo kontrol ile ilgili ikinci uygulamada robot tutucunun masa üstünde duran cisimi yakalaması amaçlanmıştır. Burada bir önceki uygulamada kullanılan cisimler kullanılmış olup işlem adımları aynıdır. Ancak bu uygulamada robot tutucunun serbest bir şekilde cisme yaklaşması masaya çarpmasına sebebiyet verdiği için dolayı yörünge planlaması yapılmıştır. Robot tutucunun önce cismin yakınındaki bir noktaya konumlanması sağlanıp daha sonra yörünge planlaması ile kontrollü bir şekilde cisme yaklaşması sağlanmıştır. Bu uygulamada örnekleme zamanı 0.1 s seçilmiş ve uygulama toplam 25 s sürmüştür. Yapılan denemelerde bu uygulamada genellikle %80 başarı sağlanmıştır.

Pozisyon tabanlı görsel servo kontrol ile ilgili üçüncü ve son uygulamada robot tutucunun masa üstünde duran bir cisimi yakalaması amaçlanmıştır. Burada ikinci

uygulamadan farklı olarak değişken kesitli bir cisim kullanılmıştır. Robotun cismi daralan kesitinden tutması amaçlanmıştır. Görüntü işlem teknikleri ile elde edilen siyah-beyaz görüntü taranıp daralan bölge tespit edilmiştir. Elde edilen bu bölgenin koordinatları hesaplanıp robot tutucunun cismi yakalaması için kullanılmıştır. Yapılan uygulamada örnekleme zamanı 0.1 s seçilmiş olup uygulama toplam 60 s sürmüştür. Yapılan denemelerde bu uygulamada genellikle %40-50 başarı sağlanmıştır.

Robotun yazılımı Matlab-Simulink programında gerekleştirilirmiştir. Görsel servo kontrole ait uygulamaların tamamlanma süreleri sırasıyla 10-25-60 s'dir. Burada alışma sürelerinin artmasının sebebi programdaki for,if v.b. döngülerin artmasıdır.

Yapılan uygulama renk bazlı olup yeşil renk üzerinden çalışmaktadır. Program mavi, sarı v.b. farklı renk veya şekil bazlı hale de getirilebilir. Robot tutucuda sensör olmadığından dolayı z'deki hata değerine göre açılıp kapanmaktadır. Hata değeri 0,01'den küçük olduğunda kapama işlemini gerçekleştirmektedir. Kapama işleminin daha sağlıklı olabilmesi için tutucuya basınç sensörü yerleştirilebilir. Robot tutucunun cismi yakalamasındaki başarısı tutucunun içine yerleştirecek mesafe sensörü ile iyileştirebilir. Robot kolunun hareketinden belli bir süre sonra mesafe sensörü devreye girerek cismin tutucuya olan mesafesini ölçerek cismi tutması sağlanabilir. Cismin robota olan uzaklığının matematiksel olarak daha iyi hesaplanabilmesi için 2 kamera kullanılabilir. Ayrıca robotun paletli kısmı devreye sokularak zeminde hareketi sağlanabilir. Böylece kol mesafesinden uzaktaki cisimleri de yakalayabilir. Çalışma uzayının büyüdüğü uygulamalarda mevcut kamera yetersiz kalabilir, bundan dolayı daha profesyonel kameraya ihtiyaç duyulabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Tiejun Z., Dalong T. Mingyang Z. The Development of a Mobile Humanoid Robot with Varying Joint Stiffness Waist. Mechatronics and Automation, IEEE International Conference (Volume: 3), 1402-1407, 2005.
- [2] Tang J., Watanabe K., Shiraishi Y. Design and traveling experiment of an omnidirectional holonomic mobile robot. In Proc. of IEEE/RSJ Int. conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS' 96), Osaka, 66-73, 1996.
- [3] Wang J., Li Y. A Survey on the Structures of Current Mobile Humanoid Robots-2 IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems, Macao, 1826-1829, 2008.
- [4] Morita T., Shibuya K., Sugano S. Design and Control of Mobile Manipulation System for Human Symbiotic Humanoid Hadaly-2. IEEE IEEE International Conference on Intelligent Robotics and Automation, Leuven, 1315-1320, 1998.
- [5] Brooks R. A., Breazeal C., Marjanovic M., Scassellati B., Williamson M. M. The Cog Project: Building a Humanoid Robot. Computation for Metaphors, Analogy, and Agents, Springer, 52-87, 1999.
- [6] Aramaki S., Shirouzu H., Kurono S., Mino M., Uno Y., Hara K., Tanak H., Tsuoruoka T., Development of Autonomous Mobile Humanoid Robot. Industrial Electronics Society, 529-534, 1999.
- [7] Asfour T., Berns K., Dillmann R., The Humanoid Robot ARMAR Design and Control. Romansy 13, Theory and Practice of Robots and Manipulators, 307-312, 2000.
- [8] Ly D.N., Regenstien K., Asfour T., Dillmann R., A Modular and Distributed Embedded Control Architecture for Humanoid Robots. International Conference on Intelligent Robots and Systems, Japan, 2775-2780, 2004.
- [9] Albers A., Brudniok S., Ottnad J., Sauter C., Sedchaicharn K. Upper Body of a new Humanoid Robot the Design of ARMAR III, 6th IEEE International Conference on Humanoid Robots, Genova, 308-313, 2006.

- [10] Han J.D., Zeng S.Q., Tham K.Y., Badgero M., Weng J.Y., Dav: A Humanoid Robot Platform for Autonomous Mental Development, Proceedings of the 2nd International Conference on Development and Learning, 73-81, 2002.
- [11] Bischoff R., Graefe V., HERMES-a versatile personal robotic assistant, Proc. of the IEEE-Special Issue on Human Interactive Robots for Psychological Enrichment, 92(11), 1759-1779, 2004.
- [12] Bischoff R., Graefe V., Integrating Vision, Touch and Natural Language in the Control of a Situation-Oriented Behavior Humanoid Robot, IEEE Int. Conf. on Systems, Man and Cybernetics, Japan, 999-1004,1999.
- [13] Kanda T., Ishiguro H., Ono T., Imai M., Nakatsu R., Development and Evaluation of an Interactive Humanoid Robot "Robovie", IEEE International Conference on Robotics Automation, Washington, 1848-1855, 2002.
- [14] Fuchs M., Borst C, Robuffo P., Baumann A., Kraemer E., Langwald J., Gruber R., Seitz N., Plank G., Kunze K., Burger R., Schmidt F., Wimboeck T., Hirzinger G., Rollin Justin Design considerations and realization of a mobile platform for a humanoid, IEEE International Conference on Robotics Automation, Kobe, 4131-4137, 2009.
- [15] Cha Y. S., You B. J., Design and Implementation of Mobile Humanoid Robot Control System Based on Dual Network. IEEE International Conference on Robotics Automation, Guilin, 251-256, 2009.
- [16] Weiss L., Sanderson A., Neuman C. Dynamic sensor based control of robots with visual feedback. IEEE Journal of Robotics and Automation 3(5), 404-417, 1987.
- [17] Weiss L., Sanderson A., Neuman C. Dynamic visual servo control of robots: An adaptive image based approach. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 662-668, 1985.
- [18] Espiau B., Chaumette F., Rives P. A new approach to visual servoing in robotics. IEEE Transactions on Robotics and Automation 8(3), 313-326, 1992.
- [19] Hutchinson S., Hager G.D., Corke P.I. A tutorial on visual servo control. IEEE Transactions on Robotics and Automation 12(5), 651-670, 1996.
- [20] Chaumette F., Hutchinson S. Visual servo control, Part I: Basic approaches. IEEE Robotics and Automation, 13(4), 82-90, 2006.
- [21] Chaumette F., Potential problems of stability and convergence in image-based and position-based visual servoing. The Confluence of Vision and Control, 66-78, 1998.

- [22] Malis E., Chaumette F., Boudet S. 2-1/2 D Visual Servoing. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 15(2), 238-250, 1999.
- [23] Chaumette F., Malis E. 2-1/2 D visual servoing: a possible solution to improve image-based and position-based visual servoings. IEEE International Conference on Robotics and Automation, San Francisco, 630-635, 2000.
- [24] Zhao T., Yuan J., Zhao M., Tan D. Research on the Kinematics and Dynamics of a 7-DOF Arm of Humanoid Robot. International Conference on Robotics and Biomimetics, Kunming, 1553-1558, 2006.
- [25] Bingül Z., Küçük S. Robot Tekniği 1Birsen Yayınevi, 2010.
- [26] Craig J. J. Introduction to Robotics: Mechanics and Control. Pearson, 2004.
- [27] Jazar R. N. Theory of Applied Robotics: Kinematics, Dynamics, and Control, SpringerR, 2010.
- [28] Gonzales R.C., Woods R.E. Digital Image Processing, Prentice Hall, 2002.
- [29] Corke P. Robotics Vision and Control Fundamental Algorithms in MATLAB, Springer, 2013.
- [30] Hashimoto k. Visual servoing: Real time control of robot manipulators based on visual sensory feedback, World Scientific Pub. Co. Inc., 1993.
- [31] Flandin G., Chaumette F., Marchand E. Eye-in-hand/eye-to-hand cooperation for visual servoingnt, International Conference on Robotics and Automation, San Francisco,2741-2746, 2000.
- [32] Wijesoma S.W., Wolfe D.F.H., Richards R J., Eye-to-hand coordination for vision-guided robot control applications, Int. Journal of Robotics Research, Vol.12, no. 1, pp. 65-78, February 1993.
- [33] Hagan M. T., Demuth H. B., Beale M. Neural Network Design, PWS Pub. Co., 1995.
- [34] Baykan N., Robotik bir mikroskop sisteminden elde edilen görüntülerin görüntü işleme ve yapay zeka yöntemleri ile analizi. Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Doktora Tezi 2010.
- [35] Sanchez-Lopez J. R., A. Marin-Hernandez, E. R. Palacios-Hernandez, H. V. Rios-Figueroa, L. F. Marin-Urias, A Real-time 3D Pose Based Visual Servoing Implementation for an Autonomous Mobile Robot Manipulator, The 2013 Iberoamerican Conference on Electronics Engineering and Computer Science (CIECC 2013), 2013

- [36] Cid-Monjaraz J., Reyes-Cortés F., Sánchez P., A visual servoing controller for robot manipulators, Industrial Informatics (INDIN 2009), Cardiff, Wales, 2009.
- [37] Moughlby A. A., Cervera E., Martinet P., Real-Time Model Based Visual Servoing Tasks on a Humanoid Robot, Intelligent Autonomous Systems 12, 321-333, 2013.
- [38] Rakesh M. K., Satheesh R., Design and Implementation of Two-Degree-of-Freedom Nonlinear PID Controller for a Nonlinear Process, Journal of Electrical and Electronics Engineering 9, 59-64, 2014.
- [39] Sharma R., Gaur P., Mittal A.P., Performance analysis of two-degree of freedom fractional order PID controllers for robotic manipulator with payload, ISA Transactions 58, 279-91, 2015.
- [40] Boujari M., Ghorbani-Tanha A.K., Rahimian M., Rahami H., Two Degrees of Freedom PID Control for Active Vibration Control of Structures, Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering 24-28, 2012.

ÖZGEÇMİŞ

Nurettin Gökhan ADAR, 19.09.1980'de İstanbul'da doğdu. İlkokul eğitimini İstanbul'da, orta ve lise eğitimini Kuşadası'nda tamamladı. 1999 yılında Şehit Kaya Aldoğan Lisesi'nden mezun oldu. 1999 yılında başladığı Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nü 2004 yılında bitirdi. 2004 yılında başladığı İstanbul Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans eğitimini 2008 yılında bitirdi. 2008 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde doktora eğitimine başladı. 2011 yılında Sakarya Üniversitesi'nde araştırma görevlisi olarak çalışmaya başladı. 2011 yılında doktora eğitimini tamamlamak için Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliğine yatay geçiş yaparak tez aşamasından eğitime devam etti. Halen Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak görev yapmaktadır.