

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

**ENDÜSTRİYEL AMAÇLI ROBOT KOL TASARIMI
VE ÜRETİMİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yusuf HAMİDA EL NASER

Enstitü Anabilim Dalı : MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Durmuş KARAYEL

Haziran 2018

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ENDÜSTRİYEL AMAÇLI ROBOT KOL TASARIMI
VE ÜRETİMİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yusuf HAMİDA EL NASER

Enstitü Anabilim Dalı : MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 07.06.2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

**Prof. Dr.
Durmuş KARAYEL
Jüri Başkanı**

**Dr. Öğr. Üyesi
Barış BORU
Üye**

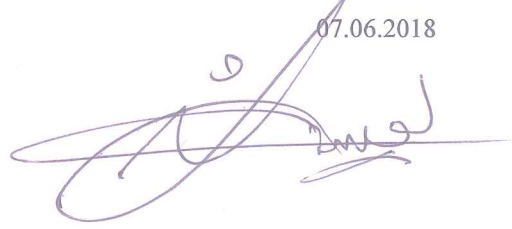
**Dr. Öğr. Üyesi
Davut AKDAŞ
Üye**

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.

Yusuf HAMİDA EL NASER

07.06.2018



TEŞEKKÜR

Yüksek lisans çalışmalarım boyunca kıymetli bilgi ve tecrübelerinden istifade ettiğim, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, çalışmamın hiçbir aşamasında yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Prof. Dr. Durmuş KARAYEL'e teşekkür ederim.

Bunun yanısıra çeşitli konularda kendilerine danıştığım Yrd. Doç. Dr. Barış BORU, Öğr. Gör. Gökhan ATALI ve Arş. Gör. Mücahit SOYASLAN'a yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

Ayrıca bu çalışmanın maddi açıdan desteklenmesine olanak sağlayan Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Komisyon Başkanlığına (Proje No: 2017-50-01-009) teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vi
TABLolar LİSTESİ.....	viii
ÖZET	ix
SUMMARY	x

BÖLÜM 1.

GİRİŞ	1
1.1. Endüstriyel Robot Kavramının Doğuşu ve Gelişimi.....	1
1.2. Endüstriyel Robotların Avantaj ve Dezavantajları.....	2
1.3. Endüstriyel Robotların eklem Tiplerine Göre Sınıflandırılması.....	2
1.3.1. Döner mafsallı robotlar	3
1.3.2. Küresel robotlar.....	4
1.3.3. SCARA robotlar.....	4
1.3.4. Silindirik robotlar.....	5
1.3.5. Kartezyen robotlar.....	6
1.4. Endüstriyel Robotların Kullanım Alanları.....	6
1.4.1. Çapak temizleme işlemleri ve endüstriyel robotlar.....	7
1.5. Endüstriyel Robotlarda Yörüngesel Kontrol Yöntemleri.....	8
1.6. Endüstriyel Robotlarda Programlama ve Yörünge Tayin Yöntemleri..	8

BÖLÜM 2.

LİTERATÜR TARAMALARI	10
----------------------------	----

2.1. Robotik Çapak Temizleme Alanında Taranan Makale ve Bildiriler....	10
2.2. Robotik Çapak Temizleme Alanında Taranan Tez Çalışmaları.....	16

BÖLÜM 3.

ROBOT KOL TASARIM KRİTERLERİ	19
3.1. Çalışmanın Amacı, Kapsamı ve Kullanılan Araç-Gereçler.....	19
3.1.1. Dynamixel AX-12A servo motorlar ve özellikleri.....	20
3.1.2. Dynamixel MX-28T servo motorlar ve özellikleri.....	22
3.1.3. Bioloid FP04-F3 ve FP04-F4 şase parçaları.....	24
3.1.4. Bilyalı vidalı lineer raylı sistem.....	25
3.1.5. Tasarlanan flanş ve yataklama konstrüksiyon elemanları.....	25

BÖLÜM 4.

ROBOT KOLUN ÜÇ BOYUTLU MODELLENMESİ VE ÇALIŞMA ALANININ BELİRLENMESİ	27
--	----

BÖLÜM 5.

ROBOT KOL KİNEMATİĞİNİN İNCELENMESİ	32
5.1. İleri Kinematik.....	32
5.2. Ters Kinematik.....	37

BÖLÜM 6.

İŞLENECEK PARÇA ÖZELLİKLERİNİN GÖRÜNTÜ İŞLEME METODLARIYLA BELİRLENMESİ VE PROGRAM BASAMAKLARI.....	42
6.1. LabVIEW Vision Assistant Eklentisinin İncelenmesi.....	42
6.2. Çapağı Temizlenecek Parçanın Görüntü İşleme Basamakları.....	44
6.2.1. Çapağı temizlenecek parça görüntüsünün elde edilmesi.....	44
6.2.2. Alınan görüntünün renk eşiklemesinin yapılması.....	45
6.2.3. Eşiklenen görüntüye partikül filtresi uygulanması.....	46
6.2.4. Görüntüye ileri morfoloji tekniklerinin uygulanması.....	47
6.2.5. İşlenen görüntüye histogram eşitleme işlemi uygulanması.....	48
6.2.6. Eşitlenen görüntüden nesne özelliklerinin belirlenmesi.....	49

6.3. Piksel Koordinatlarından Milimetrik Koordinatlara Geçiş İşlemleri... 51

BÖLÜM 7.

TARTIşMA VE SONUÇ..... 55

KAYNAKLAR..... 59

ÖZGEÇMİş 62

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

BAPK	: Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu
CAD	: Bilgisayar destekli tasarım
DH	: Denavit-Hartenberg metodu
DOF	: Serbestlik derecesi
HSI	: Öz-doygunluk-şiddet renk uzayı
HSL	: Öz-doygunluk-parlaklık renk uzayı
HSV	: Öz-doygunluk-ton renk uzayı
ID	: Kimlik numarası
NI	: National Instruments
P	: Kayar eklem
PID	: Oransal-integral-türevsel kontrol
R	: Dönel eklem
RGB	: Kırmızı-yeşil-mavi renk uzayı
ROI	: Çalışma bölgesi
TTL	: Transistör seviyesi çalışma
USB	: Evrensel seri veriyolu

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Düzlemde dönel (R) ve kayar (P) eklemler.....	3
Şekil 1.2. Uzayda dönel (R) ve kayar (P) eklemler.....	3
Şekil 1.3. Dönel Mafsallı Robotların Yapısı ve Hareket Eksenleri.....	3
Şekil 1.4. Küresel Robotların Yapısı ve Hareket Eksenleri.....	4
Şekil 1.5. SCARA Robotların Yapısı ve Hareket Eksenleri.....	5
Şekil 1.6. Silindirik Robotların Yapısı ve Hareket Eksenleri.....	5
Şekil 1.7. Kartezyen Robotların Yapısı ve Hareket Eksenleri.....	6
Şekil 2.1. Ziliani ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği robotik çapak işlemi.....	10
Şekil 2.2. Leo Princely ve Selvaraj'ın kullandıkları deney düzeneği.....	12
Şekil 2.3. Çapaklı parçanın işlem öncesi ve sonrası mikroskopik görüntüsü.....	12
Şekil 2.4. Anh ve Song'un çalışmalarında kurdukları deney düzeneği.....	13
Şekil 2.5. Ogawa ve arkadaşlarının çalışmalarında kurdukları deney düzeneği....	14
Şekil 2.6. Kazerooni ve Her'in çalışmalarındaki sistemin yapısı.....	14
Şekil 2.7. Lin ve arkadaşlarının kenar algılama işlem basamakları.....	15
Şekil 2.8. Lin ve arkadaşlarının çalışmalarında kullandıkları deney düzeneği.....	15
Şekil 2.9. Yosıf'ın çalışmasında kullandığı Kalman tahmincisi blok diyagramı...	17
Şekil 2.10. Yosıf'ın gerçekleştirdiği bilgisayar görüşüyle nesne yakalama.....	18
Şekil 3.1. Çalışmada kullanılan kamera ve kontrol kartı.....	20
Şekil 3.2. AX-12A motorlarına ait adresler ve kontrol tablosu.....	21
Şekil 3.3. Çalışmada kullanılan AX-12A akıllı servo motorlar.....	21
Şekil 3.4. Çalışmada kullanılan AX-12A motorunun teknik resmi.....	22
Şekil 3.5. Çalışmada kullanılan MX-28T motorunun teknik resmi.....	23
Şekil 3.6. MX-28T motorunun tork-açısız hız grafiği.....	23
Şekil 3.7. Çalışmada kullanılan FP04-F3 parçasının teknik resmi.....	24
Şekil 3.8. Çalışmada kullanılan FP04-F4 parçasının teknik resmi.....	24
Şekil 3.9. Kullanılan bilyalı vidalı lineer raylı sisteminin çizilen teknik resmi.....	25

Şekil 3.10. Tasarlanan flanş parçasının teknik resmi.....	26
Şekil 3.11. Tasarlanan yataklama elemanının teknik resmi.....	26
Şekil 4.1. SolidWorks programı kullanılarak tasarlanan robot kol sistemi.....	28
Şekil 4.2. Tasarlanan robot kolun çalışma alanının üstten görünümü.....	29
Şekil 4.3. Robot kolun çalışma uzayının SolidWorks programıyla gösterimi.....	30
Şekil 4.4. Çapağı temizlenecek parçanın robot kola göre koordinatlandırılması..	31
Şekil 5.1. Robot kol eklemleri üzerine eksen takımlarının yerleştirilmesi.....	34
Şekil 5.2. Robotun ters kinematik çözümleri için grafiksel çizimi.....	38
Şekil 6.1. LabVIEW Vision Assistant programının arayüzü ve bölümleri.....	43
Şekil 6.2. Vision Assistant ile alınan çapağı işlenecek parçanın görüntüsü.....	44
Şekil 6.3. Renk eşikleme işlemine tabi tutulan parçanın görüntüsü.....	45
Şekil 6.4. Eşiklenen görüntüye partikül filtresinin uygulanması.....	46
Şekil 6.5. Delik doldurma işlemi sonucu ortaya çıkan görüntü.....	47
Şekil 6.6. Küçük objelerin kaldırılması neticesinde elde edilen görüntü.....	48
Şekil 6.7. Histogram eşitleme işlemi sonucu elde edilen görüntü.....	49
Şekil 6.8. Özellik belirleme işleminde çapaklı köşe noktalarının tespiti.....	50
Şekil 6.9. Çapaklı köşe noktalarının koordinatları ve doluluk değerleri.....	50
Şekil 6.10. Görüntü işleme basamaklarına ait performans ölçümleri.....	50
Şekil 6.11. Oluşturulan Görüntü İşleme Blokları.....	52
Şekil 6.12. Oluşturulan interpolasyon, hesaplamalar ve yazma işlemi blokları..	53
Şekil 6.13. Arayüzdeki işlenen görsel ve diğer göstergeler.....	53
Şekil 6.14. Arayüzdeki kontrol araçları.....	54
Şekil 6.15. Oluşturulan deney düzeneği.....	54
Şekil 7.1. İnterpolasyonlu yörünge takibindeki bozulmaların gösterimi.....	56
Şekil 7.2. Belirlenen interpolasyon noktalarındaki konum hatalarının gösterimi	57

TABLULAR LİSTESİ

Tablo 1.1. Endüstriyel robotların kullanım alanları.....	7
Tablo 3.1. Dynamixel AX-12A DC Servo Motor Özellikleri Tablosu.....	22
Tablo 5.1. Robot kola ait D-H parametreleri tablosunun oluşturulması.....	34
Tablo 7.1. Çalışma kapsamında yapılan malzeme alımları ve harcamalar.....	57

ÖZET

Anahtar kelimeler: 4 serbestlik dereceli endüstriyel robot kol, manipülatör, çapak temizleme, görüntü işleme

Günümüzde endüstriyel uygulamalarda robot manipülatörlerin kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Robotların başlıca kullanım alanları olarak kaynak, pozisyonlama, taşıma-dizme, imalat yöntemlerinde kullanılan bileme, parlatma ve çapak temizleme işlemleri örnek gösterilebilir. Bu çalışmada, ülkemizde çoğunlukla manuel olarak yapılan bu çapak temizleme işlemleri için robotik bir çözüm önerilmektedir. Bu kapsamda, 4 eksenli ve SCARA tipinde ortaya konulan ve son uzvuna temizleyici bir aparat yerleştirilen bir robot kol düzeneğinin görüntü işleme tabanlı yörünge kontrolüyle çapaklı parçaların temizlenmesi işlemi ortaya konmuştur. Çalışmada öncelikle robot kola ait kinematik denklemlerin analitik çözümleri elde edilmiştir. Daha sonra bir kamera yardımıyla alınan görüntülerin işlenmesiyle işlenecek parçanın sınırları belirlenmiştir. Piksel-koordinat dönüşümleri yapılarak bulunan değerler bilgisayar ortamında kontrol edilen motorlara açı setleri şeklinde gönderilerek parça geometrisi olarak belirlenen yörünge izlenmesi sağlanmıştır. Bir prototip halinde ortaya konulan bu robot kol, gerekli parametrik değişiklikleri yapıldığında endüstriyel amaçlar içinde kullanılabilir niteliktedir.

DESIGN AND PRODUCTION OF AN INDUSTRIAL ROBOTIC ARM

SUMMARY

Keywords: 4-DOF industrial robotic arm, manipulator, deburring, image processing

Today, the use of robot manipulators in industrial applications is becoming widespread. The main applications of robots are welding, positioning, picking and placing, grinding, polishing and deburring processes used in manufacturing methods. In this study, we propose a robotic solution for these deburring processes which are mostly done manually in our country. In this context, the image processing based trajectory control of a robotic arm which has 4-axis and SCARA type, equipped with a cleaning tool for the last limb, has been demonstrated. First, the analytical solutions of kinematic equations of the robot arm are obtained. Afterwards, the boundaries of the parts to be processed are determined by processing the images taken with a camera. The pixel-coordinate transformations were performed and the values found were sent to the motors controlled in computer environment as angle sets and the trajectory determined as part geometry was provided. This robot arm, presented as a prototype, can be used for industrial purposes when the necessary parametric changes are made.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

1.1. Endüstriyel Robot Kavramının Doğuşu ve Geçmişten Günümüze Gelişimi

Endüstriyel robotlar, belirli sayıda eksene ve uzva sahip, dönel ve/veya kayar eklemler ve bu eklemleri hareketlendiren aktüatörleri sayesinde önceden programlanarak öğretilen yörüngeleri tekrarlanabilir bir biçimde takip eden, son uzvuna bağlı bir uç işlevci vasıtasıyla parça, malzeme ve iş takımı gibi nesnelere taşıyarak endüstride iş yapan makineler şeklinde tanımlanabilir. İlk kez 20. yüzyılın başlarında Karel Čapek isimli bir oyun yazarı tarafından kullanılan robot sözcüğünün [1], edebiyat ve sonrasında bilim dünyasında uyandırdığı yankı günden güne büyüyerek Yapay Zeka kavramı ile birleşmiş ve teknolojiye ilerlemelere öncülük etmiştir. Hatta bu yankı öylesine bir hal almıştır ki robot teknolojisindeki olası kontrolsüz gelişmelerin insanlığı tehdit edebileceği kaygısına yol açarak Isaac Asimov tarafından özgürlüklerinin kısıtlandırıldığı 3 Robot Yasası fikrinin öne sürülmesine sebep olmuştur. Bu yasa şöyledir;

1. Bir robot insanlara zarar veremez veya insanların zarar görmesine kayıtsız kalamaz.
2. Bir robot birinci yasayla çelişmedikçe insanlar tarafından verilen emirlere itaat etmek zorundadır.
3. Bir robot birinci ve ikinci yasayla çelişmedikçe kendisini zarar görmekten korumak zorundadır.

Bu sayede kontrollü bir biçimde ilerleyen robotik bilimi yarı-iletkenler, yapay zeka, güç elektroniği, bilgisayarla görme, programcılık, haberleşme, kontrol, mekatronik sistemler, malzeme bilimi gibi pek çok disiplinle bütünleşerek gelişimini sürdürmektedir. Geçmişten günümüze robot kolları, mobil robotlar, insansı robotlar, örümceksi robotlar, medikal robotlar ve hatta uzay araştırmaları için kullanılan

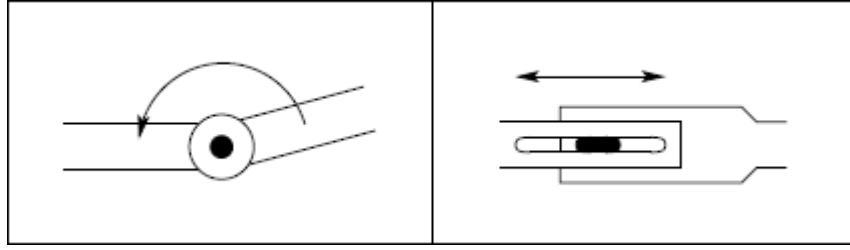
robotlar, her geçen gün yeni teknolojilerle entegre edilmekte ve insanlığın yaşamını kolaylaştırmak üzere kullanıma sunulmaktadır.

1.2. Endüstriyel Robotların Avantaj ve Dezavantajları

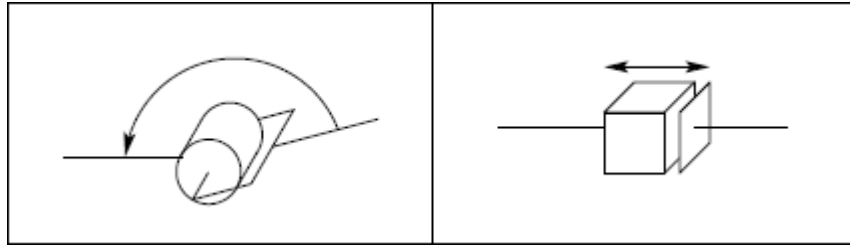
Endüstriyel manipulatörler üretimde kaliteyi ve verimi belirgin bir biçimde artırmaktadırlar. İşlemlerini yorulmaksızın gerçekleştirebilmekte ve insana kıyasla çok daha hızlı ve güvenli çalışabilmektedirler. Yüksek sesler, zararlı ışınlar, yüksek sıcaklıklar gibi olumsuz etmenlerden etkilenmemektedirler. Önceden programlanarak öğretilen işlemleri, çok yüksek hassasiyetle defalarca tekrarlayabilmektedirler. İlk kurulum maliyetleri yüksek olmasına karşın, uzun vadede daha karlı bir yatırım niteliğindedir ve günümüzde orta ölçekli firmalar tarafından dahi tercih edilmeye başlanmıştır. Tüm bu avantajlarına karşın, bir tehlike anında robot manipulatörün müdahale yetenekleri programıyla kısıtlıdır ve beklenmedik bir durumla karşılaştığında insan gibi reaksiyon göstermesi mümkün olmamaktadır. Bunun yanı sıra hareketleri insana nispeten çok daha hassas ve tekrarlanabilir olsa dahi, çalışma uzayı uzuv ve eklemleriyle sınırlanmaktadır. Endüstriyel robotlar, kullanıcının programlamasına bağımlı çalışmakta ve farklı bir amaçla kullanılması için yeniden programlanmaya ihtiyaç duymaktadırlar.

1.3. Endüstriyel Robotların Eklem Tiplerine Göre Sınıflandırılması

Endüstriyel robotların çalışma karakteristikleri, daha fazla serbestlik derecesine sahip olmaları dahi, ilk üç eklem tipinin tipi ve dizilimine göre belirlenir. Genellikle kayar (prismatic-*P*) ve dönel (revolute-*R*) ile ifade edilen eklem tiplerinin farklı konfigürasyonlarla dizilimleri, robotların çalışma uzayını ve dolayısıyla kullanım amaçlarını birbirinden ayırır. Kayar ve dönel eklem yapılarının 2 boyutlu düzlemde sembolik gösterimi Şekil 1.1.'de, 3 boyutlu uzayda sembolik gösterimi ise Şekil 1.2.'de ifade edilmiştir.



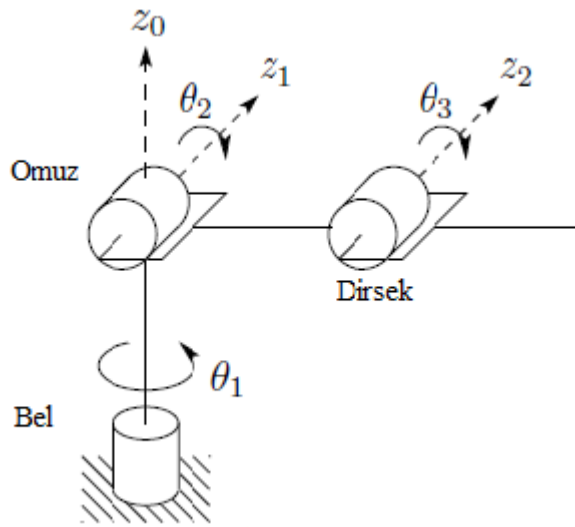
Şekil 1.1. Düzlemde dönel (R) ve kayar (P) eklemler [1].



Şekil 1.2. Uzayda dönel (R) ve kayar (P) eklemler [1].

1.3.1. Dönel mafsallı robotlar

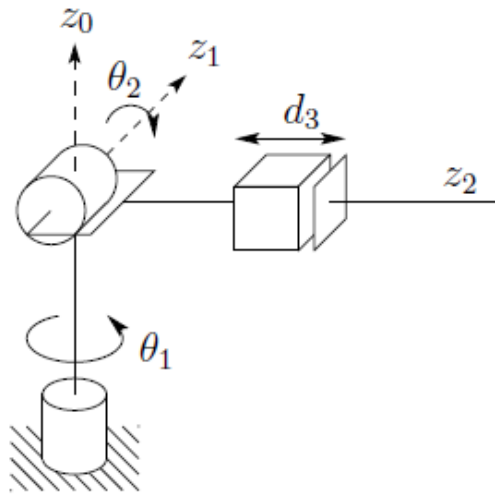
RRR (dönel-dönel-dönel) dizilimli robotlardır. İnsan fizyolojisinden esinlenerek tasarlanmışlardır. Genellikle montaj, talaş kaldırma, sprey boyama gibi alanlarda kullanılırlar. Çalışma uzayı oldukça geniştir ve aynı noktaya farklı şekillerde ulaşabilmesi sisteme esneklik sağlar. Bu robotların yapısı Şekil 1.3.'te gösterilmiştir.



Şekil 1.3. Dönel Mafsallı Robotların Yapısı ve Hareket Eksenleri [1].

1.3.2. Küresel robotlar

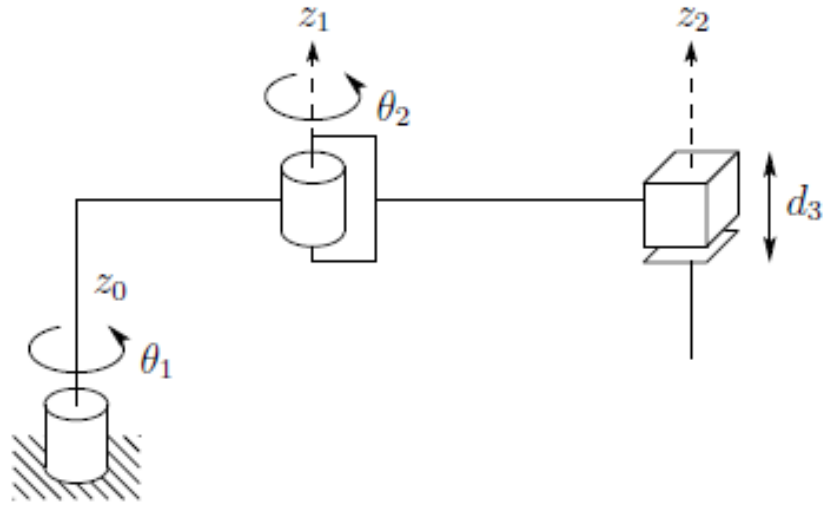
RRP (dönel-dönel-kayar) dizilimindeki robotlar olup, dönel mafsallı robotlardan yapısal farkları son uzva bağlı eklemün dönel yerine kayar tipte olmasıdır. Çalışma uzayı dönel mafsallı robotlara benzer biçimde geniştir ve incelendiğinde küresel yapıda bir geometri oluşturur. Endüstride mekanik aparatların taşınmasında ve kaynak işlemlerinde sıklıkla tercih edilirler. Küresel yapıdaki robotların yapısına bir örnek Şekil 1.4.'te verilmiştir.



Şekil 1.4. Küresel Robotların Yapısı ve Hareket Eksenleri [1].

1.3.3. SCARA robotlar

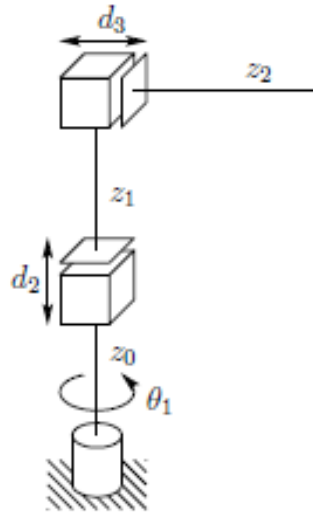
SCARA robotlar tıpkı küresel robotlar gibi RRP diziliminde olmalarına karşın, geometrisi, kinematiği ve kullanım alanları bakımından küresel robotlardan oldukça farklıdır. Robot endüstrisine nispeten geç dahil olan Japonların önerdiği bambaşka bir konsept ve karakteristiğe sahip robotlardır. SCARA robotlarda eksenler küresel robotlardaki gibi çakışmazlar ve birbirlerine paraleldirler. Bu özellikleri sayesinde oldukça portatiftirler. Çok yüksek hızlara çıkabildiklerinden endüstride ürün alma- yerleştirme işlemlerinde sıklıkla tercih edilirler. SCARA tipi robotlara ait yapı, Şekil 1.5.'te gösterilmiştir.



Şekil 1.5. SCARA Robotların Yapısı ve Hareket Eksenleri [1].

1.3.4. Silindirik robotlar

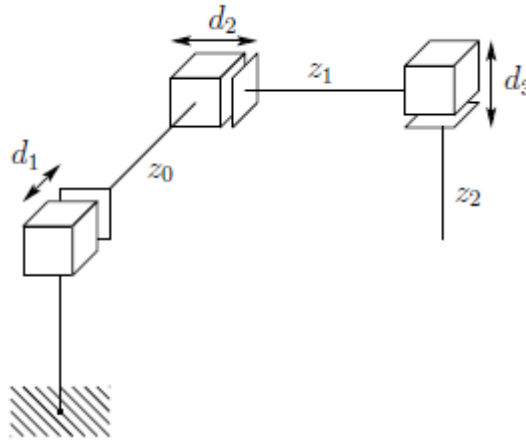
Eklem dizilimleri RPP (dönel-kayar-kayar) şeklindedir. İlk iki eksenine birbirine paralel ve üçüncü eksene diktir. X ve y eksenleri boyunca doğrusal ve z eksenine etrafında dönel bir hareket yaptığından çalışma uzayı silindirik şeklindedir. Silindirik yörüngede dizme, montajlama ve kaynaklama gibi işlemlerde kullanılırlar. Şekil 1.6.'da silindirik robotların yapısı gösterilmiştir.



Şekil 1.6. Silindirik Robotların Yapısı ve Hareket Eksenleri [1].

1.3.5. Kartezyen robotlar

Eklem değişkenleri, x , y ve z eksenleri boyunca hareket mesafelerine eşit olduğundan tüm robot konfigürasyonları arasında kinematiğinin incelenmesi ve kontrolü en kolay robot türüdür. Eksenleri PPP (kayar-kayar-kayar) dizilimindedir, birbirlerine diktir ve çalışma uzayı dikdörtgenler prizması geometrisindedir. Yük taşıma işlemlerinde oldukça iyidirler ve bilhassa CNC freze mekanizmalarında sıklıkla kullanılırlar. Yapıları Şekil 1.7.'deki gibidir.



Şekil 1.7. Kartezyen Robotların Yapısı ve Hareket Eksenleri [1].

1.4. Endüstriyel Robotların Kullanım Alanları

Günümüzde robotlar, büyük üretim tesislerinde taşıma-dizme, döndürme-çevirme, karıştırma, kaynak, boyama, kesme, delme, bileme, cilalama ve çapak temizleme gibi işlemlerde, montaj ve demontaj proseslerinde kullanılmaktadır. Farklı endüstriyel uygulamalarda kullanıldığı alan, işlem ve ürün çıktısına dair örnekler Tablo 1.1.'de mevcuttur.

Tablo 1.1. Endüstriyel robotların kullanım alanları [2].

Üretim Alanı	Üretim Prosesleri	Ürünler
Tüm alanlarda	Frezeleme	Hızlı Prototipleme
Havacılık	Bileme, Parlatma, Kesme, Delme	Türbin Kanatları, Kanat Bölmeleri
Otomotiv	Frezeleme, Delme, Kesme	Motorlar, Kaportalar, Tamponlar
Moda	Frezeleme, Kumlama	Manken Kalıpları ve Mankenler
Dökümhanelerde	Çapak Temizleme, Frezeleme	Kalıplar, Döküm Parçaları
Denizcilik	Frezeleme	Tekne Aparatları
Medikal	Bileme, Parlatma	Protezler
Eğlence Sektöründe	Frezeleme	Sahne setleri, Lunaparklar
Plastik	Frezeleme, Çapak Alma	Kalıplar, Kask
Ahşap	Frezeleme, Traşlama	Mobilya, Tırabzanlar

1.4.1. Çapak temizleme işlemleri ve endüstriyel robotlar

Talaşlı imalat proseslerinde çapak hemen her zaman rastlanan bir problemdir [3]. Bu problem, üretimde kaliteyi düşürmesi, parçanın geometrik hassasiyetinin bozulması, parçanın yorulma ömrünün azalmasına sebep olması, çevreyi kirletmesi, temizlenme mecburiyetinden dolayı zaman, enerji, maliyet gibi kayıplara yol açması gibi pek çok zarara yol açmaktadır. Leitz ve arkadaşlarının yaptıkları araştırma, çapak temizleme giderlerinin toplam üretim maliyetine oranının %10 mertebelerine yaklaştığını ortaya koymaktadır [4]. Tüm bu zararların önüne geçmek için imalat proseslerinde çapağın mümkün olduğunca azaltılması ve oluşan çapakların temizlenmesi problemi, pek çok akademik ve endüstriyel çalışmaya konu olmuştur. Çapak temizleme işlemleri uzun yıllar boyunca çapak temizleme aparatlarının insan gücüyle kullanılmasıyla sürdürülmüştür. Ancak, teknolojinin gelişmesi ve seri üretimin yaygınlaşması sonucunda çapak temizleme işlemine harcanan zaman ve enerjinin azaltılması bir zorunluluk haline gelmiştir. Ayrıca insan gücüne dayalı çapak temizleme işlemlerinde, işgücü giderleri, iş güvenliği problemleri, çapak temizlenecek geometri karmaşıklıkça proseste verimin düşmesi gibi daha nice problemler imalatı olumsuz etkilemektedir. Tüm bu sebepler dolayısıyla çapak temizleme işlemleri, robotik sistemlerle birleşmeye doğru günden güne evrilmektedir. Bilhassa son yıllarda çapak

temizleme amaçlı manipülatör tasarımı ve/veya kontrolü üzerine yapılan çalışmalar göze çarpmaktadır. Bundan on sene öncesine kadar endüstriyel robot satın alımlarının yalnızca %5 kadarının çapak temizleme ve benzeri işlemlerde kullanılmak üzere yapıldığı bilirse de [2], bu oran gün geçtikçe artmaktadır.

1.5. Endüstriyel Robotlarda Yörüngesel Kontrol Yöntemleri

Endüstriyel robotlarda uç işlevcinin yörüngesi iki şekilde kontrol edilmektedir. İlk yöntem, noktadan noktaya kontrol yöntemi olup, bu yöntemde uç işlevci yörüngesi robota öğretilen iki noktayı birleştiren herhangi bir çizgidir. İki noktanın arasında kalan diğer interpolasyon noktalarının kontrol edilmesine gerek yoktur. İki den fazla sayıda öğretilen noktalar, birinin başlangıcı diğerinin bitişi olmak üzere ikililer şeklinde gruplandırılarak sürekli bir geometri oluşturulabilir. Kullanım alanları genellikle taşıma ve dizme uygulamalarıdır. İkinci yöntem ise sürekli yörünge kontrolü olarak ifade edilir. Bu yöntemde uç işlevcinin yörüngesi, yörüngeyi oluşturan tüm noktalarda kontrol edilir. Aynı zamanda eklemlerin hız ve ivmelerinin kontrolüne de olanak sağlar. Noktadan noktaya kontrol yöntemine göre daha karmaşıktır ve kaynak ve çapak temizleme gibi yörüngeyi sürekli kontrolüne ihtiyaç duyulan uygulamalarda kullanılırlar.

1.6. Endüstriyel Robotlarda Programlama ve Yörünge Tayin Yöntemleri

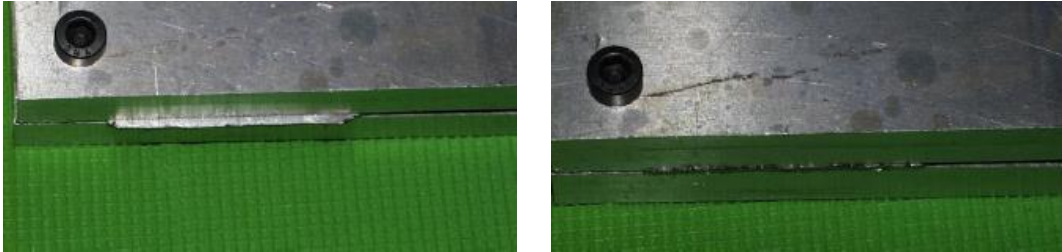
Robotların hareket prensipleri, uç işlevcinin izleyeceği yörüngeyi dönüşüm matrisleri vasıtasıyla mutlak koordinat sistemine oturtulması ve bu koordinatların kinematik hesaplamalar yardımıyla eklem kayma ve/veya dönme miktarlarına çevrilmesi ve aktüatörlere iletilmesi esasına dayanır. Endüstriyel robotlarda işlenecek yörünge çevrimiçi ve çevrimdışı programlama yöntemleri ile tayin edilir. Çevrimiçi programlama, robota bağlı kumanda paneli (teach pendant) yardımıyla yapılır ve robota izletilecek yörünge, butonlar ve kumanda yapıları ile robota izletilir, belirlenen noktalar kaydedilir ve böylece robota tanıtılır. Robota tanıtılan bu noktalar robot programlama dilindeki komutlara çevrilir. Çevrimdışı programlama ise robotun desteklediği bir programlama dili üzerinden kodlamalar yoluyla yazılımsal olarak

programlama işlemidir. Günümüz robot kumanda panellerinin çoğunda dokunmatik panel üzerinde kodlamalar yapmak da mümkün olmaktadır. Öte yandan endüstriyel robot üreticileri tarafından hazırlanan ve robotların yanında kullanıcıların hizmetine sunulan grafik tabanlı programlar sayesinde robot ve çalışma sahası üç boyutlu olarak simüle edilebilmekte ve yörünge belirlenmesi bu şekilde çevrimdışı olarak gerçekleştirilebilmektedir. Yörünge tayin işlemi, tüm bu yöntemlerin yanısıra son yıllardaki bilgisayar görüşü (computer vision) alanındaki teknolojik gelişmeler neticesinde kameradan alınan görüntü verilerinin filtreleme ve kenar belirleme algoritmaları gibi görüntü işleme tekniklerine tabi tutularak koordinatlara dönüştürülmesiyle de yapılabilmektedir.

BÖLÜM 2. LİTERATÜR TARAMALARI

2.1. Robotik Çapak Temizleme ve Bilgisayar Görüsü Alanında Taranan Makale ve Bildiriler

Ziliani ve arkadaşları sistemlerinde düzgün geometrideki parçalarda çapak temizleme işlemini gerçekleştirmek üzere 2 eksenli düzlemsel bir SCARA robot kullanmışlardır. Tasarladıkları sistemi kuvvet ve hız parametrelerine bağlı olarak incelemişler ve bu parametrelerin matematiksel ifadelerini ortaya koyarak hibrit bir kontrol uygulamışlardır. Robotik çapak alma işlemi önce ve sonrası görüntüleri Şekil 2.1.'de gösterilmiştir [5].



Şekil 2.1. Ziliani ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği robotik çapak temizleme işlemi [5].

Tian ve arkadaşları kavisli yüzeylerde parlatma işlemlerinde kullanılmak üzere ortaya koydukları çalışmalarında otomatik robotik sistemlerin manuel sistemlere nispeten daha hassas sonuçlar verdiğini deneysel olarak gözlemlemişlerdir. Çalışma kapsamında, eğimli yüzeylerin işleneceği derinliğe bağlı olarak yörünge planlamalarını yapmışlar ve uç işlevcinin gezineceği adım aralıklarını optimize ederek işlemin kontrolünü sağlamışlardır [6].

Valente ve Oliveira çalışmalarında robotla gerçekleştirdikleri çapak temizleme proseslerinde çapak temizleyen uç işlevcilerinin yörünge kontrolünde modern bir

yaklaşımında bulunarak temizleme süresince uç işlevci üzerinde oluşan kuvvet aralığını kontrol ederek işlevci yörüngesinin optimizasyonunu sağlamışlardır. Bu kuvvet aralığı, çapak temizleyici aparatın yüzeyden ayrılmayacak veya yüzeyde tahribata yol açmayacak şekilde belirlenmiş ve talaş kaldıracabilecek seviyelerde tutularak işlem gerçekleştirilmiştir [7].

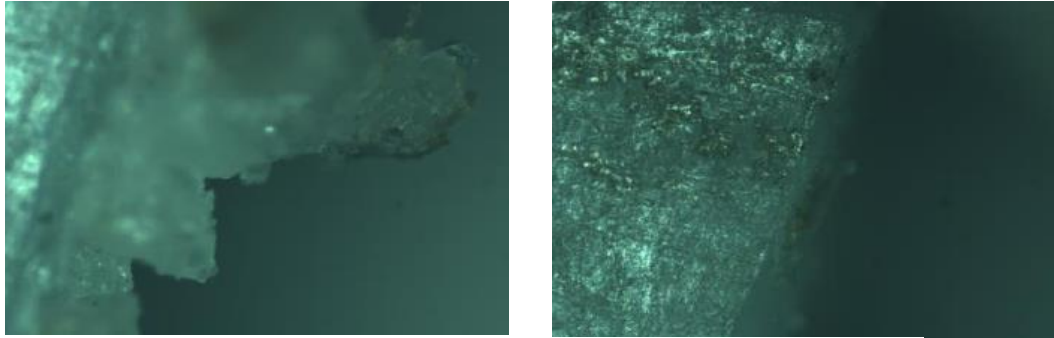
Kosler ve arkadaşlarının çalışmasında döküm parçalarında oluşan pozisyon hatalarını düzelterek çapak temizleme işlemlerine uygun hale getirmek üzere adaptif bir robotik sistem geliştirmişlerdir. Bu kapsamda, iş parçası yüzeyi 3 boyutlu lazer sensörler yardımıyla ölçülerek parçanın orijinal geometrisiyle kıyaslanmış ve temizlenecek çapaklar belirlenmiştir [8].

Benzer şekilde Kuss ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen çalışmada, parçanın CAD modelini 3 boyutlu sensör verileriyle karşılaştırarak robotik çapak temizleme işlemlerinde şekilsel sapmaları tespit etmek ve buna bağlı olarak çapak temizleyici yörüngesini iyileştirmek üzerine bir yaklaşım ortaya konmuştur [9]. Çalışmalarındaki teorik bulguları, KUKA KR270 endüstriyel robot üzerinde gerçekleyerek pratik olarak desteklemişlerdir.

Leo Princely ve Selvaraj, iki boyutlu parçaların çapak temizlemesinde kullanılmak üzere robotik bir sistem üzerine çalışmışlardır. Hazır bir robot sistemi üzerinde gerçekleştirdikleri çalışmada, robotik çapak temizleme işlemlerinde manuel öğretim ve çevrimdışı programlama yöntemlerinde harcanan zaman kaybını ortadan kaldırmayı amaçlayarak ve parçaların CAD verilerini kullanmaksızın bilgisayarla görmeye dayalı çevrimiçi programlama yöntemini kullanmışlar ve görüntü işleme tabanlı kenar algılama işlemleri ile kullandıkları beş eksenli robota gönderdikleri çapak temizleyicinin gezineceği yörünge koordinatlarını işleyerek robotun hareketini sağlamışlardır. Çapak temizleme deney düzenekleri Şekil 2.2.'de ve parçanın işlem önce ve sonrası görüntüsü Şekil 2.3.'de gösterilmiştir [10].



Şekil 2.2. Leo Princely ve Selvaraj'ın çalışmalarında kullandıkları deney düzeneği [10].

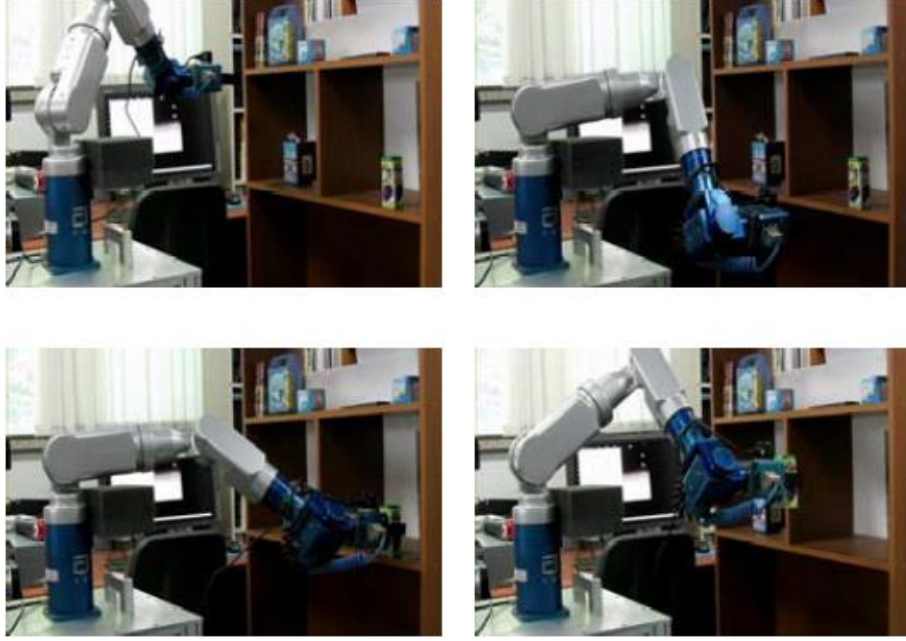


Şekil 2.3. Çapaklı parçanın işlem öncesi ve sonrası mikroskopik görüntüsü [10].

Akec ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada konveyör bant üzerinde hareket eden belirsiz geometrideki bir profilin, 6 serbestlik dereceli bir manipülatörün son uzvuna sabitlenmiş bir kameradan alınan görüntülerinin işlenmesi vasıtasıyla takibini gerçekleştirmişlerdir [11]. Kameradan alınan görüntüleri Sobel kenar belirleme algoritmasına tabi tutarak piksel cinsinden belirledikleri koordinatları, kamera kalibrasyonu yardımıyla mutlak koordinatlara dönüştürerek bu verileri seri haberleşme protokolleriyle robot kontrolcüsüne göndermişlerdir.

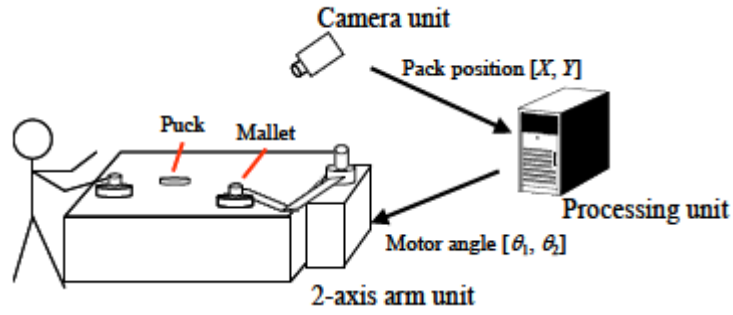
Anh ve Song çalışmalarında robot manipülatör üzerine entegre ettikleri kamera vasıtasıyla cisimlerin yakalama işleminin optimizasyonu üzerine çalışmışlardır. Alınan cisim görüntülerinin özellik eşleştirme ve belirleme işlemlerine tabi tutulduğu bu yöntemde, parçanın geometrik özellikleri algılanarak görsel takibini sağlamışlar ve bu şekilde kamera-cisim arasındaki açı değişimleri, gürültüler ve diğer bozucu etkilere

karşı daha düzgün sonuçlar elde etmişlerdir. Bu sayede cisimlerin daha yüksek doğrulukta ve daha hızlı bir şekilde yakalanmasını sağlamışlardır. Gerçekleştirdikleri deney düzenekleri Şekil 2.4.'te gösterilmiştir [12].



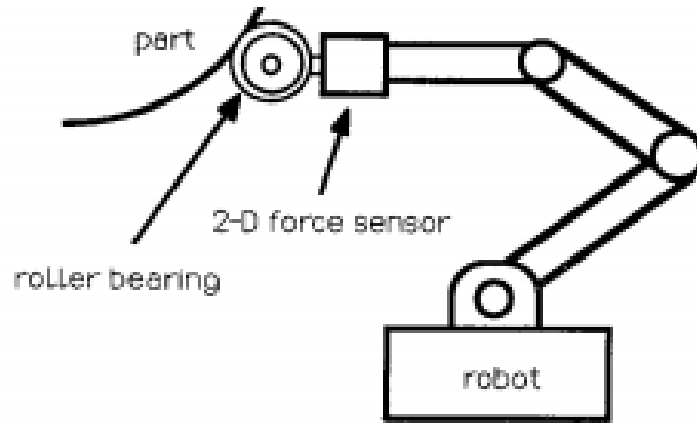
Şekil 2.4. Anh ve Song'un çalışmalarında kurdukları deney düzeneği [12].

Ogawa M. ve arkadaşları yaptıkları çalışmada insanlara karşı hava hokeyi oynamak üzere sabit bir kameradan görüntü alan iki eksenli düzlemsel bir robot kol geliştirmişlerdir. Sistem öncelikle kameradan alınan görüntülerden cismi tanıma ve ağırlık merkezini bulma yoluyla diskin o anki konumunu tespit etmekte ve robot kolla temas edeceği noktanın koordinatlarını belirlemektedir. Sonrasında bu konuma bağlı olarak 2 eksenli kol yörüngesini oluşturmakta ve kolu kontrol ederek diski rakibe göndermektedir. İşlemci ünitesinde görüntü işleme, yörünge planlama ve kol kontrol prosesleri eş zamanlı olarak işlenmektedir. Robot kolunun hareketi için alınan disk konumu verileri, mafsalsal açı bilgilerine çevrilerek gerekli hareket sağlanmaktadır. Ogawa ve arkadaşlarının kurdukları deney düzeneği Şekil 2.5.'te gösterilmiştir [13].



Şekil 2.5. Ogawa ve arkadaşlarının çalışmalarında kurdukları deney düzeneği [13].

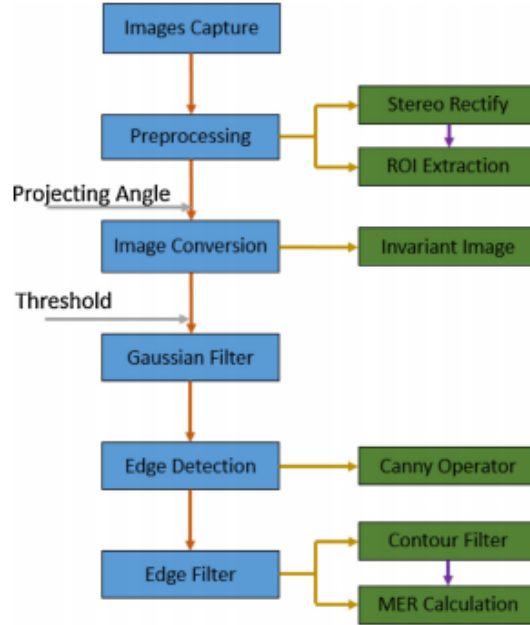
Kazerooni ve Her çalışmalarında, iki boyutlu karmaşık geometrik yapılı parçaların çapak temizleme işlemlerindeki parça yüzeyini takip etme ve çapak alma esnasında karşılaşılan problemlere ilişkin çözümler üzerinde durmuşlardır. İşlenecek parça ve robot arasına bağladıkları iki boyutlu kuvvet sensöründen alınan veriler yardımıyla hem yüzey normalince etkiyen temas kuvvetini ölçerek parça yüzeyinin takibinin sürekliliğini kontrol etmişler, hem de çapak alma esnasında oluşan ve yüzey doğrultusuna etkiyen kuvveti belirleyerek çapak temizleme prosesinin devamlılığını sağlamışlardır [14]. Çalışmalarındaki sistemlerinin yapısı Şekil 2.6.'da gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Kazerooni ve Her'in çalışmalarındaki sistemin yapısı [14].

Lin ve arkadaşları robot kısılcacının etrafına yerleştirdikleri endüstriyel kameraları kullanarak robotik sistemlerde bilgisayar görüşü yöntemi yardımıyla parça takibi ve yakalama-yerleştirme işlemleri üzerine çalışmışlar ve görüntü işlemede karşılaşılan aydınlatma yetersizliği, gölgeler ve düşük çözünürlük gibi problemlerin üstesinden gelmişlerdir [15]. Çalışmalarında, görüntü işleme tekniklerinde kullanılan görüntü

dönüştürme, filtreleme ve kenar algılama gibi operatörleri kullanarak 6 eksenli robotlarını kontrol etmişlerdir. Kullandıkları kenar algılama işlem basamakları Şekil 2.7.'de ve deney düzenekleri Şekil 2.8.'de gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Lin ve arkadaşlarının çalışmalarında kenar algılama işlem basamakları [15].



Şekil 2.8. Lin ve arkadaşlarının çalışmalarında kullandıkları deney düzeniği [15].

Asokan ve Singaperumal yaptıkları çalışmada çapak temizleme işlemlerinde empedans kontrolünü kullanarak performans iyileştirmesini sağlamışlardır. Çalışmalarını bilgisayar ortamında simüle etmişler ve deneysel olarak da gerçekleştirmişlerdir [16].

Aynı amaçla sistemin bulanık mantık yöntemiyle[17, 18] adaptif yöntemle [19] veya iki yöntemin birleştirilmesiyle [20] kontrol edildiği çalışmalar da mevcuttur.

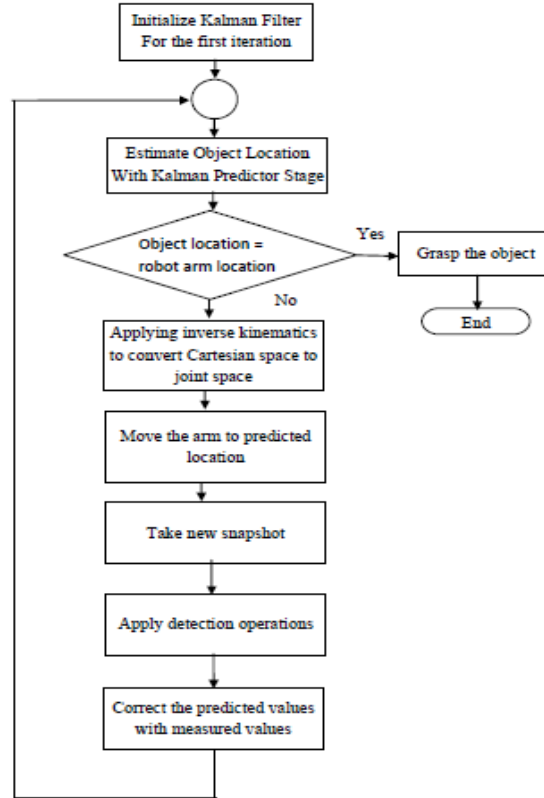
Elfasakhany ve arkadaşları, çalışmalarında 4 serbestlik dereceli robot manipülatörler üzerine çalışmışlar ve düşük maliyetlere kendi prototiplerini tasarlamışlar, üretmişler ve kontrolünü gerçekleştirmişlerdir. Çalışmanın mekanik tasarımında çizdikleri parçaların statik hesaplamalarını yapmış ve buradan hareketle motorlarını seçmişlerdir. Ardından 4 serbestlik dereceli manipülatörler için ters kinematik denklemler yardımıyla mafsalları hesaplamışlardır. Uç işlemci olarak hazır servolu gripper(kavrayıcı) seçerek tasarımlarını tamamlamışlardır. Kontrol ünitelerinde ise Arduino mikrokontrolör ve servo sürücüleri kullanmışlar ve bilgisayar arayüzünü LabVIEW ortamında gerçekleştirmişlerdir. Bu arayüz sayesinde uç işlemci koordinatları verilir ve bu veriler ters kinematik denklemlerden geçirilerek eklem açıları ve dolayısıyla servo dönüş açıları elde edilmektedir. Son olarak gerekli durumlarda manuel kontrol amaçlı potansiyometrelerden oluşan bir kontrol kartı oluşturularak çalışmalarını tamamlamışlardır [21].

Hamida El Naser ve arkadaşları, endüstriyel çapak temizleme işlemlerinde kullanılmak üzere RRR dizilimli bir robotun tasarımını yapmışlardır. Robotlarının çalışma uzayına bağlı olarak uzuv uzunluklarını belirlemişler ve bu parametrelere bağlı olarak sistemlerinin ileri ve ters kinematik davranışını incelemişlerdir. Buldukları denklemleri LabVIEW ortamında simule ederek sistemlerinin hareketini modellemişlerdir. Son olarak talaşlı imalat uygulamalarında kuvvet ve konum kontrolü üzerine yaklaşımlarını ortaya koyarak çalışmalarını tamamlamışlardır [22].

2.2. Robotik Çapak Temizleme ve Bilgisayar Görüsü Alanında Taranan Tez Çalışmaları

Yosif gerçekleştirdiği tez çalışmasında bilgisayarla görüş tekniğinin robot kolu teknolojisiyle birleşimini incelemiş ve hareketli nesnelerin takip edilmesi ve bir tutucu yardımıyla yakalanması üzerine çalışmıştır. Çalışmasında Lynx6 5 eksenli mafsallı

robot kolunu kullanmış ve uç işlevciye yerleştirilen bir kamera yardımıyla topladığı görüntü verilerini Kalman filtresinden geçirerek objenin takibini sağlamıştır. Alınan görüntü verilerini gri seviyeye çevirme, medyan filtreleme, ikili sisteme çevirme, morfolojik işlemlere tabi tutma gibi proseslerden geçirerek takibi yapılacak nesnenin şekilsel özelliklerini belirlemiş ve yakalama işlemini bu şekilde gerçekleştirmiştir. Kullandığı robotun kinematik özelliklerini inceleyerek görüntü verilerini pikselden milimetrik koordinat sistemine çevirerek kinematik denklemlerini bu verilerle beslemiş ve çalışmasını başarıyla tamamlamıştır [23]. Bu tez çalışmasında kullanılan Kalman tahmircisi blok diyagramı Şekil 2.9.'da, deney düzeneği ise Şekil 2.10.'da gösterilmiştir.



Şekil 2.9. Yosiñ'ın çalışmasında kullandığı Kalman tahmircisi blok diyagramı [23].



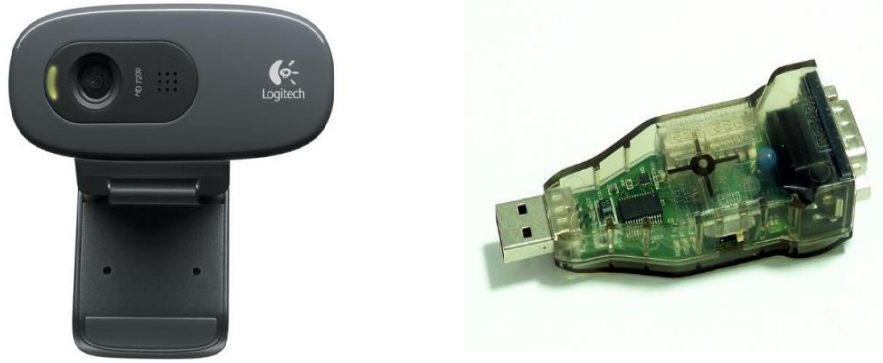
Şekil 2.10. Yosıf'ın gerçekleştirdiği robotik bilgisayar görüşüyle nesne yakalama [23].

Karaçalı, tez çalışmasında 5 eksenli bir robot kolunu incelemiş ve çapak alma işlemlerinde kullanılmak üzere tasarım kriterlerini belirlemiştir. Robota dair ileri ve ters kinematik hesaplamalarını yaptıktan sonra Jakobiyen matrisinin elde edilme yöntemlerini incelemiş ve robot dinamiğine giriş yapmıştır. Sonrasında tasarladığı robotu SolidWorks ortamında modelleyerek burada oluşturduğu parçaların kütleleri, kütle merkezleri, atalet momentleri gibi parametrelerini belirlemiştir. Tüm bu verilerin ışığında MATLAB ortamında eklemsel açı ve ivme değerlerini hesaplayarak gerekli eklem torklarını bulmuş ve çalışmasını tamamlamıştır [24].

BÖLÜM 3. ROBOT KOL TASARIM KRİTERLERİ

3.1. Çalışmanın Amacı, Kapsamı ve Kullanılan Araç-Gereçler

Çalışma kapsamında, endüstriyel çapak temizleme işlemlerinde kullanılan robot kolların bir prototipini ortaya koymak amacıyla giriş bölümünde bahsedilen robot tiplerinden SCARA tipi robotlar üzerine bir tasarım yapılmıştır. Çapakları temizlenecek parça malzemesi ise düzgün geometrilerdeki 3 boyutlu yazıcı çıktıları olarak belirlenmiştir. Sistemde SCARA tipi robot kolun tercih edilmesinin nedeni, çapak temizleme işleminde yüzeyle çapak temizleyici aparatın teması sonucu meydana gelecek z ekseni doğrultusundaki kuvvetin robot kol geometrisince tolere edilebilmesi, motorlara ekstra yük bindirmemesi ve bu sayede daha pahalı motor alımlarına duyulacak gereksinimin ortadan kaldırılmasıdır. Normalde RRP diziliminde karşımıza çıkan SCARA robotlar, prototip üretiminde son eklemine kayar tipte masal eklemenin zorlukları sebebiyle bir lineer raylı sistem düzeneği kullanarak PRR dizilimine çevrilmiştir. SolidWorks 2013 programı aracılığıyla tasarlanıp montajlanan robot kolu 4 eksenli olup ileri ve ters kinematik denklemleri bu eksen dizilimlerine göre hesaplanmıştır. Sistemde aktüatör elemanları olarak Robotis firması tarafından üretilen Dynamixel AX-12A ve MX-28T servo motorları, kol gövdesini oluşturmak için yine Robotis firmasının Bioloid FP04-03 ve FP04-04 şase parçaları kullanılmıştır. Çapağı temizlenecek parça Şekil 3.1.'de gösterilen Logitech C270 HD kamera ile tespit edilmiş ve National Instruments firmasının geliştirdiği LabVIEW 2016 programı vasıtasıyla işlenerek geometrik özellikleri belirlenmiş ve koordinatlandırılmıştır. Proje kapsamında satın alınan USB2Dynamixel kontrol kartı, kol eklemlerinde kullanılan servo motorların bilgisayar üzerinden doğrudan kontrol edilmesine imkan sağlamıştır. Motorların beslemesi maksimum 30V-3A çıkış verebilen harici bir DC güç kaynağı yardımıyla yapılmış ve sistem deneysel olarak başarıyla gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.1. Çalışmada kullanılan Logitech C270 kamera ve USB2Dynamixel kontrol kartı.

3.1.1. Dynamixel AX-12A servo motorlar ve özellikleri

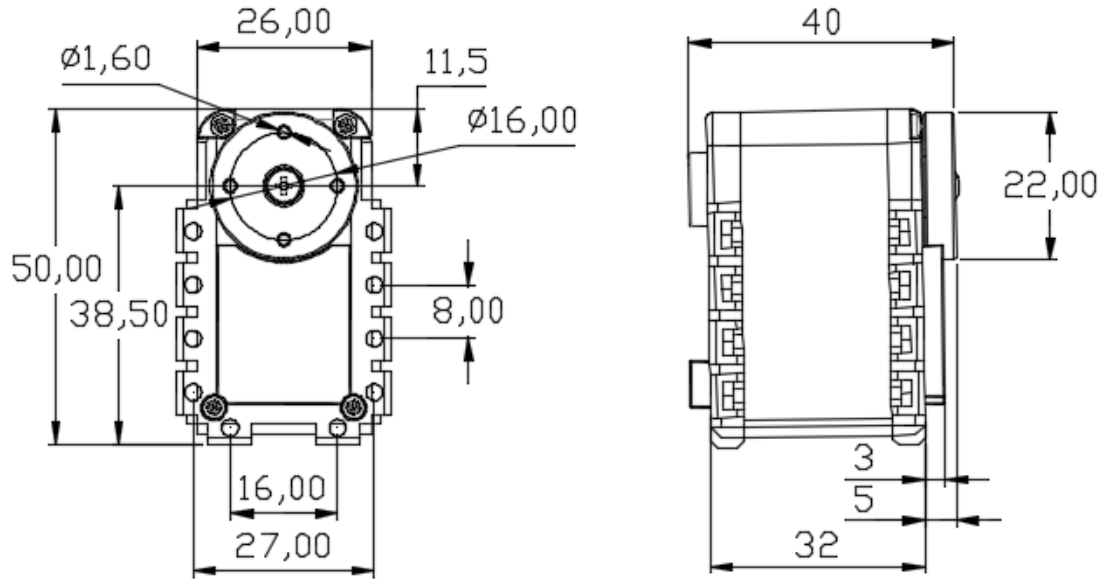
Dynamixel AX-12A servo motorlar, sistemde hareketi sağlayan elemanlar olduklarından gerilim ve akım beslemeleri, dakikadaki dönüş sayıları ve tork değerleri gibi parametreleri sistemin sürdürülebilirliği açısından oldukça önem arz etmektedir. Bu motorlar akıllı servo motorlar sınıfına girdiklerinden, üretici firma tarafından belirlenen adreslere yazılımsal olarak erişerek motorun anlık pozisyonu, hızı, dönüş yönü, sıcaklığı, gerilimi gibi pekçok okuma işlemi ve açı, sıcaklık, gerilim ve tork sınırlamaları, led alarmı ve ID atamaları gibi pekçok yazma işlemi kolaylıkla yapılabilmektedir. Bunun yanı sıra üretici firması Robotis tarafından motorların yanında satışa sunulan şase ve mafsal parçaları eklentileri sayesinde tasarlanan robotik sistemler kolaylıkla hayata geçirilebilmektedir. Bu motorların bir diğer güçlü yönü de seri olarak birbirlerine bağlanabilmeleri ve bir motorun beslenmesi ile tüm zincirin tek seferde beslenebilmesi ve zincirden bir motorun kontrolcüye bağlanması ile tüm zincirin tek seferde kontrol edilebilmesine imkan sağlamasıdır. Bu bağlantı, TTL tipi bağlantı olup besleme, toprak ve veri girişlerinden oluşmaktadır. Dolayısıyla bağlantılar gereksiz kablo karışıklıklarıyla uğraşmadan rahatlıkla yapılabilmektedir. Yazılımsal olarak da C, C++, Java, Visual Basic, Matlab, Python ve LabVIEW gibi pekçok yazılım ile kontrol edilebilen bu motorlar, robotik uygulamalarda sıklıkla tercih edilmektedir. Çalışmada kullanılan bu motorlardan 3 adet kullanılmış olup motorlara ait adresler ve kontrol tablosu Şekil 3.2.'de, motorlar Şekil 3.3.'te, teknik resimleri Şekil 3.4.'te ve motor özellikleri Tablo 3.1.'de gösterilmiştir.

Area	Address (Hexadecimal)	Name	Description	Access	Initial Value (Hexadecimal)
E E P R O M	0 (0X00)	Model Number(L)	Lowest byte of model number	R	12 (0X0C)
	1 (0X01)	Model Number(H)	Highest byte of model number	R	0 (0X00)
	2 (0X02)	Version of Firmware	Information on the version of firmware	R	-
	3 (0X03)	ID	ID of Dynamixel	RW	1 (0X01)
	4 (0X04)	Baud Rate	Baud Rate of Dynamixel	RW	1 (0X01)
	5 (0X05)	Return Delay Time	Return Delay Time	RW	250 (0XFA)
	6 (0X06)	CW Angle Limit(L)	Lowest byte of clockwise Angle Limit	RW	0 (0X00)
	7 (0X07)	CW Angle Limit(H)	Highest byte of clockwise Angle Limit	RW	0 (0X00)
	8 (0X08)	CCW Angle Limit(L)	Lowest byte of counterclockwise Angle Limit	RW	255 (0XFF)
	9 (0X09)	CCW Angle Limit(H)	Highest byte of counterclockwise Angle Limit	RW	3 (0X03)
	11 (0X0B)	the Highest Limit Temperature	Internal Limit Temperature	RW	70 (0X46)
	12 (0X0C)	the Lowest Limit Voltage	Lowest Limit Voltage	RW	60 (0X3C)
	13 (0X0D)	the Highest Limit Voltage	Highest Limit Voltage	RW	140 (0X8E)
	14 (0X0E)	Max Torque(L)	Lowest byte of Max. Torque	RW	255 (0XFF)
	15 (0X0F)	Max Torque(H)	Highest byte of Max. Torque	RW	3 (0X03)
	16 (0X10)	Status Return Level	Status Return Level	RW	2 (0X02)
	17 (0X11)	Alarm LED	LED for Alarm	RW	36(0x24)
	18 (0X12)	Alarm Shutdown	Shutdown for Alarm	RW	36(0x24)
R A M	24 (0X18)	Torque Enable	Torque On/Off	RW	0 (0X00)
	25 (0X19)	LED	LED On/Off	RW	0 (0X00)
	26 (0X1A)	CW Compliance Margin	CW Compliance margin	RW	1 (0X01)
	27 (0X1B)	CCW Compliance Margin	CCW Compliance margin	RW	1 (0X01)
	28 (0X1C)	CW Compliance Slope	CW Compliance slope	RW	32 (0X20)
	29 (0X1D)	CCW Compliance Slope	CCW Compliance slope	RW	32 (0X20)
	30 (0X1E)	Goal Position(L)	Lowest byte of Goal Position	RW	-
	31 (0X1F)	Goal Position(H)	Highest byte of Goal Position	RW	-
	32 (0X20)	Moving Speed(L)	Lowest byte of Moving Speed (Moving Velocity)	RW	-
	33 (0X21)	Moving Speed(H)	Highest byte of Moving Speed (Moving Velocity)	RW	-
	34 (0X22)	Torque Limit(L)	Lowest byte of Torque Limit (Goal Torque)	RW	ADD14
	35 (0X23)	Torque Limit(H)	Highest byte of Torque Limit (Goal Torque)	RW	ADD15
	36 (0X24)	Present Position(L)	Lowest byte of Current Position (Present Velocity)	R	-
	37 (0X25)	Present Position(H)	Highest byte of Current Position (Present Velocity)	R	-
	38 (0X26)	Present Speed(L)	Lowest byte of Current Speed	R	-
	39 (0X27)	Present Speed(H)	Highest byte of Current Speed	R	-
	40 (0X28)	Present Load(L)	Lowest byte of Current Load	R	-
	41 (0X29)	Present Load(H)	Highest byte of Current Load	R	-
	42 (0X2A)	Present Voltage	Current Voltage	R	-
	43 (0X2B)	Present Temperature	Current Temperature	R	-
44 (0X2C)	Registered	Means if Instruction is registered	R	0 (0X00)	
46 (0X2E)	Moving	Means if there is any movement	R	0 (0X00)	
47 (0X2F)	Lock	Locking EEPROM	RW	0 (0X00)	
48 (0X30)	Punch(L)	Lowest byte of Punch	RW	32 (0X20)	
49 (0X31)	Punch(H)	Highest byte of Punch	RW	0 (0X00)	

Şekil 3.2. AX-12A motorlarına ait adresler tablosu görseli [25].



Şekil 3.3. Çalışmada kullanılan AX-12A akıllı servo motorlar.



Şekil 3.4. Çalışmada kullanılan AX-12A motorunun teknik resmi.

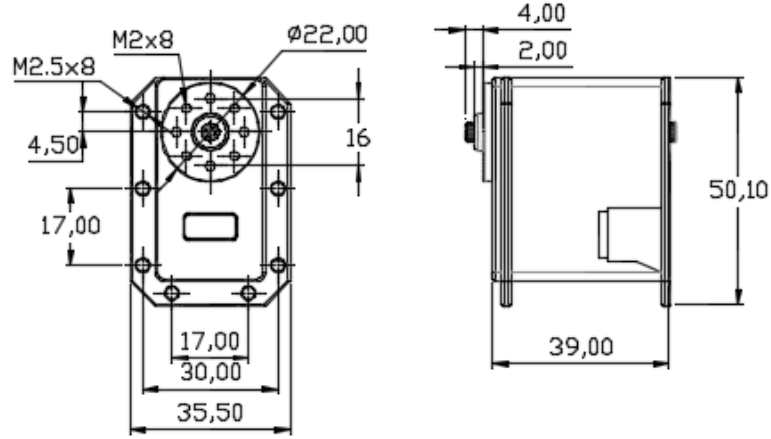
Tablo 3.1. Dynamixel AX-12A DC Servo Motor Özellikleri Tablosu.

Ağırlık	54,6 g
Boyutlar	32 mm * 50 mm * 40 mm
Çözünürlük	0,29°
Redüksiyon Oranı	254:1
Durma Torku	1,5 N.m (12 V, 1,5 A)
Yüksüz Hızı	59 rpm (12V)
Çalışma Derecesi	0° ~ 300°
	Sonsuz Dönüş
Çalışma Sıcaklığı	-5°C ~ 70°C
Çalışma Gerilimi	9 V ~ 12 V
ID Sayısı	254 (0 ~ 253)
Haberleşme Hızı	7343 bps ~ 1 Mbps
Geribeslemeler	Pozisyon, Sıcaklık, Yük, vb.
Malzeme	Mühendislik Plastiği

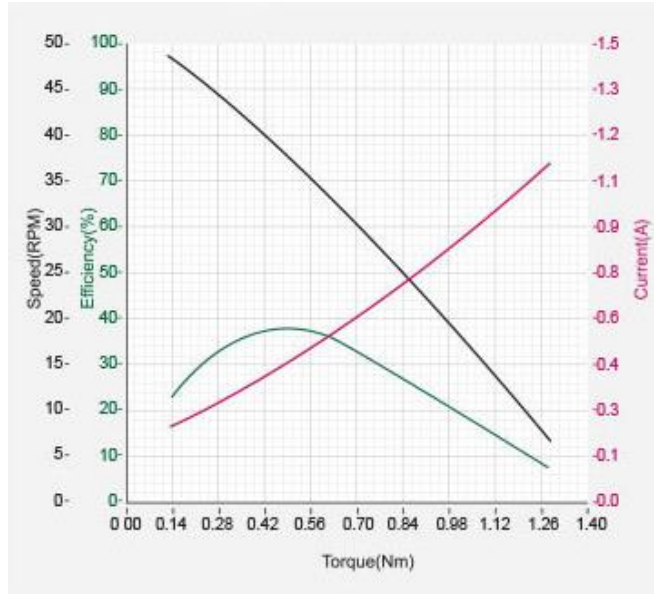
3.1.2. Dynamixel MX-28T servo motorlar ve özellikleri

Lineer raylı sistemin tahriki ve sistemin tork ihtiyacının karşılanabilmesi için Dynamixel AX-12A motorlar yetersiz kalmış ve daha yüksek torklu bir motora ihtiyaç

duyulmuştur. Bunun için de yine TTL bağlantı sistemine sahip Dynamixel MX-28T akıllı servo motor kullanılmıştır. AX-12A motorlarıyla benzer adres erişim sistemine sahip olan MX-28T servoları, PID katsayılarına müdahale edilebilme ve $0^\circ \sim 360^\circ$ arası ölü bölge olmaksızın çalışabilme imkanlarıyla AX-12A motorlarından ayrılmaktadırlar. Motorun genel görünüşü Şekil 3.5.'te ve hız, tork, akım ve verimlilik grafiği ise Şekil 3.6.'da verilmiştir.



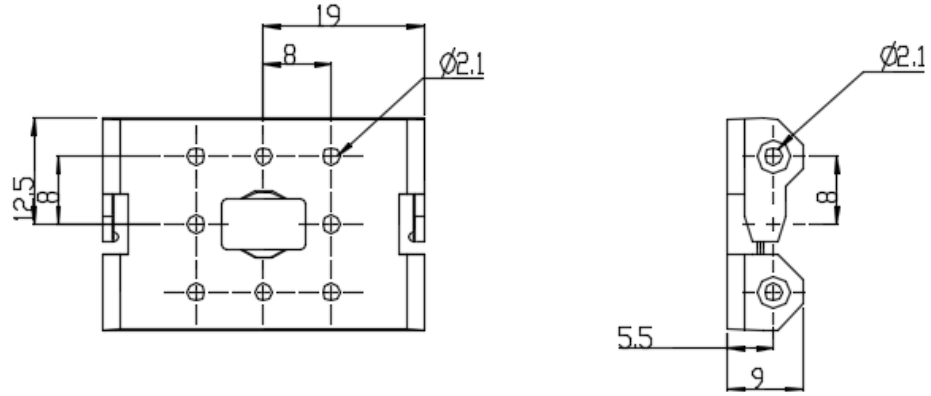
Şekil 3.5. Çalışmada kullanılan MX-28T motorunun genel görünüşü.



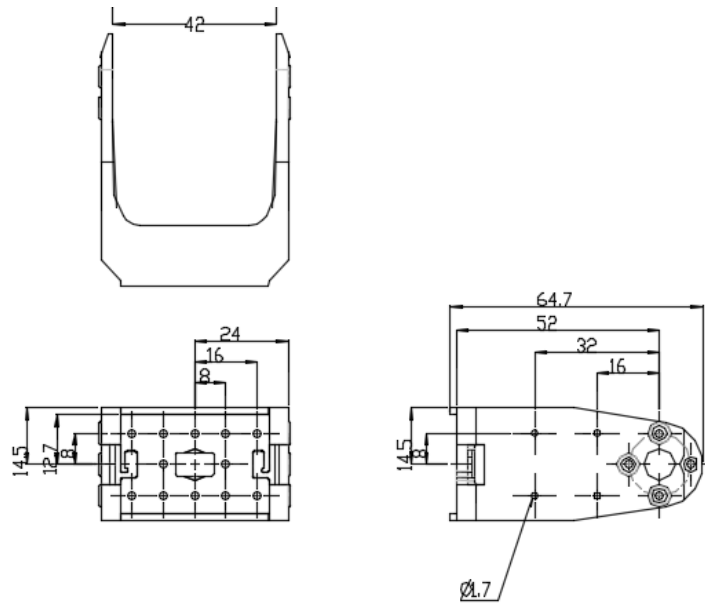
Şekil 3.6. MX-28T motorunun tork-açısıl hız-akım ve verimlilik grafiği [26].

3.1.3. Bioloid FP04-F3 ve FP04-F4 şase parçaları

Tasarlanan robot kol gövdesinin montajlanmasında Dynamixel AX-12A motorlarıyla uyumlu olarak aynı firma tarafından üretilen Bioloid FP04-F3 ve FP04-F4 şase parçaları kullanılmıştır. Döner eklemleri birbirine bağlamak üzere toplamda üçer adet kullanılan FP04-F3 ve FP04-F4 parçalarının boyutları sırasıyla Şekil 3.7. ve 3.8.'de gösterilmiştir.



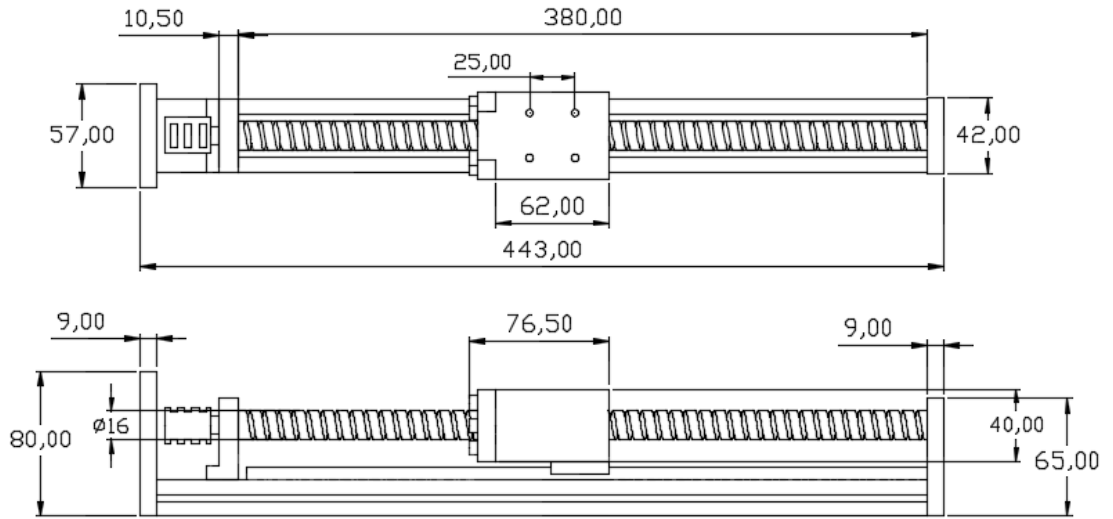
Şekil 3.7. Çalışmada kullanılan FP04-F3 parçasının boyutları [25].



Şekil 3.8. Çalışmada kullanılan FP04-F4 parçasının boyutları [25].

3.1.4. Bilyalı vidalı lineer raylı sistem

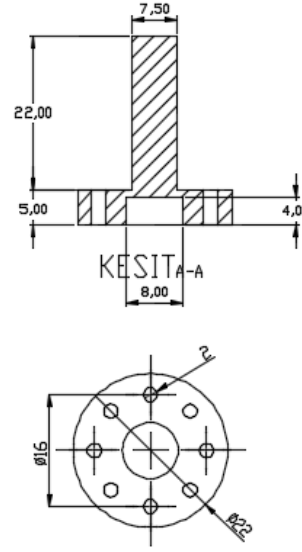
Çalışma kapsamında da bahsedildiği üzere eldeki motorların tork değerlerinin son uzva bağlı kayar bir eklem sistemini taşımasında karşılaşılabilecek zorluklar dolayısıyla kayar eklem sistemin ilk eksenine oturtularak problemin üstesinden gelinmiştir. Bu kayar eklem sisteminin hareketinin AX-12A motorlarla sağlanabilmesi içinse bilyalı vidalı lineer raylı sistem düzeneği kullanılmıştır. Seçilen raylı sistem, FUYU firmasının ürettiği FLS40 bilyalı vidalı lineer raylı sistem serisi ürünü olup, 30 kg yatay ve 10 kg düşey yüklere dayanabilecek özelliktedir. Düzenek, dahili bir kaplin vasıtasıyla motora bağlanmakta ve dönel hareketleri lineer harekete çevirmektedir. Modellenen raylı sistemin teknik resmi Şekil 3.9.'da gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Kullanılan FLS40 bilyalı vidalı lineer raylı sisteminin çizilen teknik resmi.

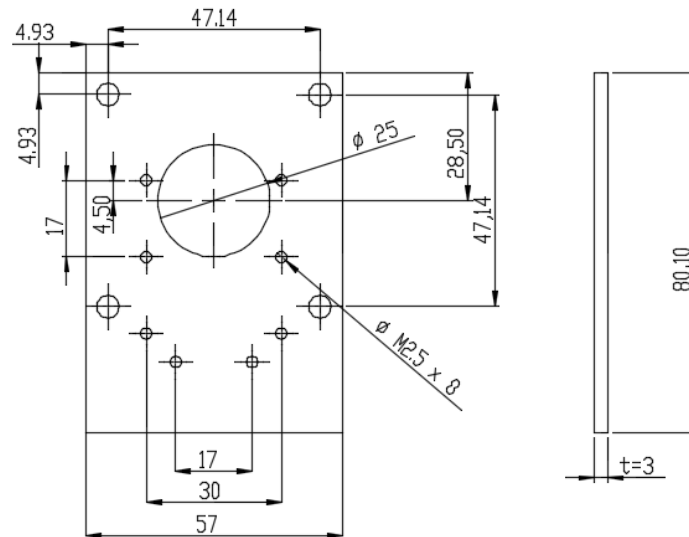
3.1.5. Tasarlanan flanş ve yataklama konstrüksiyon elemanları

Tasarlanan robot kolun z ekseninde hareket edebilmesi için kullanılan servo motordan lineer raylı sisteme tork aktarımının gerçekleştirilebilmesi amacıyla motor flanşına civatalanacak ek bir flanş tasarlanmıştır. Bu flanş, bir kaplin vasıtasıyla lineer raylı sisteme monte edilerek hareket aktarımı sağlanmaktadır. Tasarım, kullanılan motordan ve raylı sistemin tabanından alınan ölçüler ışığında yapılmış ve SolidWorks ortamında montajı gerçekleştirilmiştir. Tasarımın çizimi Şekil 3.10.'da gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Tasarlanan flanş parçasının bilgisayar ortamında çizimi.

Flanşla raylı sisteme bağlanan motorun sistem gövdesine sabitlenebilmesi için ise bir yataklama elemanı tasarlanmıştır. Raylı sisteme civatalanarak sabitlenen yataklama elemanı, aynı şekilde civatalanarak motora sabitlenmekte ve rijit bir yapı oluşturmaktadır. Tasarımın teknik resmi Şekil 3.11.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Tasarlanan yataklama elemanının teknik resmi.

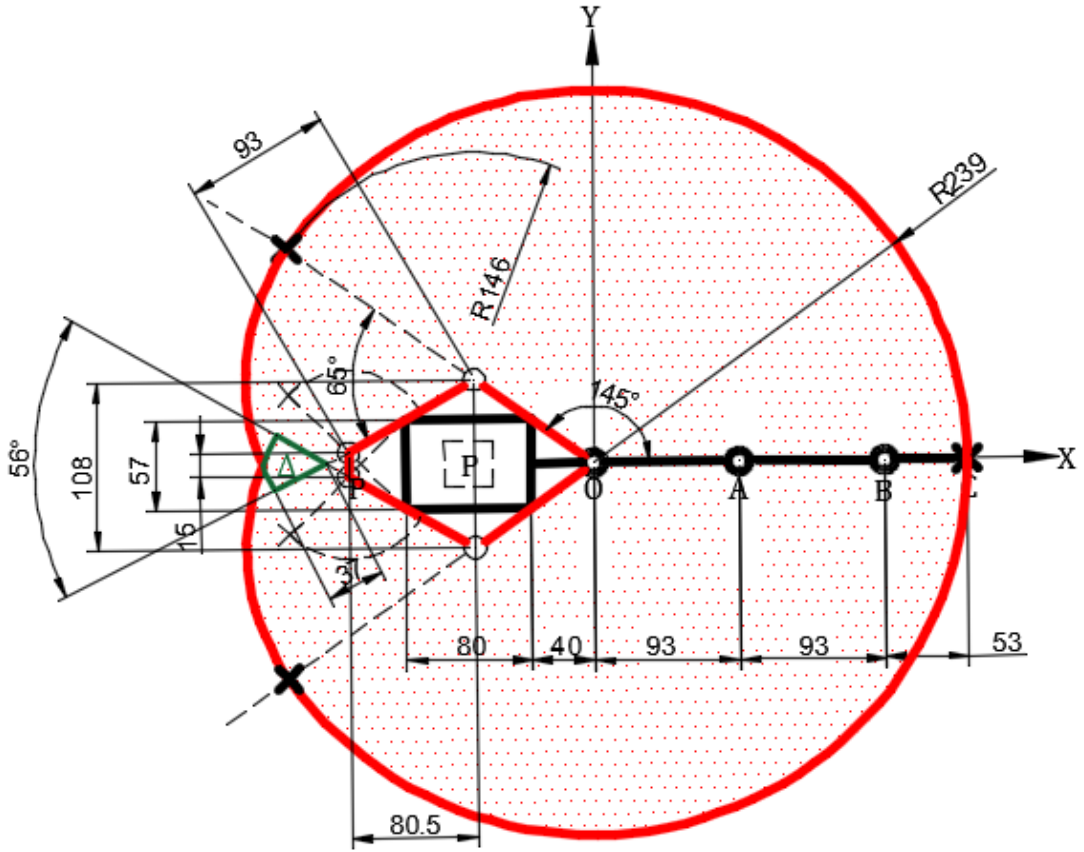
BÖLÜM 4. ROBOT KOLUN ÜÇ BOYUTLU MODELLENMESİ VE ÇALIŞMA ALANININ BELİRLENMESİ

Bölüm 3 içerisinde gösterilen teknik resimler baz alınarak robot kolu meydana getiren parçalar SolidWorks programı yardımıyla modellenmiş ve kolun montajı gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan parçalar gerekli montaj ilişkilerinin tanımlanmasıyla bir araya getirilerek robot kolun nihai formu 3 boyutlu olarak ortaya konulmuştur. Çalışmanın devamında parçalara ait malzeme atamaları gerçekleştirilmiş ve sistemin gerçekçi bir yapıya kavuşturulması amaçlanmıştır. Bu sayede parçalara ait ağırlık, kütle merkezi, atalet momentleri gibi veriler elde edilebilir hale gelmiş ve sistemin statik ve dinamik davranışlarının incelenebilmesi için ihtiyaç duyulan parametreler belirlenmiştir. Son olarak program üzerinde render alma işlemi gerçekleştirilerek tasarlanan katı modelin gerçekçi bir görünüm alması sağlanmıştır. Tüm bu çalışmalar doğrultusunda SolidWorks programı kullanılarak tasarlanmış, malzeme atamaları yapılmış, montajlanmış ve render alma işlemi gerçekleştirilmiş 4 eksenli PRRR dizilimli robot kol düzeneğinin son görünümü Şekil 4.1.'de sunulmuştur.



Şekil 4.1. Tasarlanan robot kolun üç boyutlu yapısal resmi.

Tasarlanan robot kolda kullanılan AX-12A akıllı servo motorlar daha önce de ifade edildiği gibi her iki yönde 150° çalışma açısı aralığına sahiptirler. Bu özellikleri çalışma alanlarını sınırlamaktadır. Üzerinde işlem yapılacak parça konumlandırılırken motorların bu özelliklerinin dikkate alınması gerekmektedir. Robot kolun kinematiği incelenirken detaylı olarak anlatılacak olan robot kol parametreleri Şekil 4.2.'de verilen çizimde belirtildiği gibi $l_1=40$ mm, $l_2=93$ mm, $l_3=93$ mm ve $l_4=53$ mm olarak ölçülmüş ve çalışma alanının bulunmasında kullanılmıştır. Buna göre robot kolun çalışma alanının üstten görünümü Şekil 4.2.'deki gibidir.



Şekil 4.2. Tasarlanan robot kolun çalışma alanının üstten görünümü.

Şekilde robot kol gövdesi kalın siyah renkle, farklı konfigürasyonlarla birçok defa taranabilen alanlar yeşil renkle ve çalışma alanı sınırları ise kırmızı renkle gösterilmiştir. Çalışma alanı hesaplanırken robot kolun lineer raylı sistemin gövdesiyle çakışmamasına dikkat edilmiştir. Delta (Δ) sembolü ile gösterilen kısım daire parçasının alan hesabında 2 defa kullanıldığından, şekil üzerinde gerekli ölçüler kullanılarak toplam alandan çıkartılmış ve sonuç tam olarak bulunmuştur.

Buna göre çalışma alanının hesaplanması denklem 4.1.'deki gibi yapılabilir:

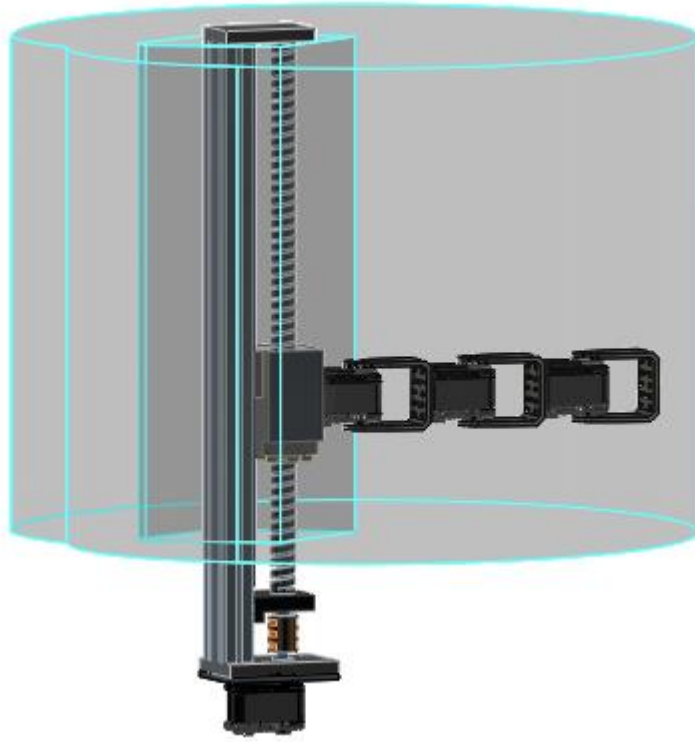
$$A = \pi 239^2 \frac{145}{360} 2 + \pi 93^2 \frac{65}{360} 2 - \pi 37^2 \frac{28}{360} 2 - \frac{1}{2} 93^2 \sin 70 - \frac{1}{2} (15 + 108) 80.5 \quad (4.1)$$

$A = 144686.19 \text{ mm}^2$ olarak bulunur.

Lineer raylı sistem, z ekseninde 300 mm'lik bir uzunluğu taramaktadır. Dolayısıyla yukarıda bulunan alan bu 300 mm'lik uzunlukla çarpılarak çalışma uzayının hacmi elde edilebilir. Bu ifade, denklem 4.2.'de de gösterildiği gibi,

$$V = A \cdot h = 144686,19 \cdot 300 = 43405857 \text{ mm}^3 \quad (4.2)$$

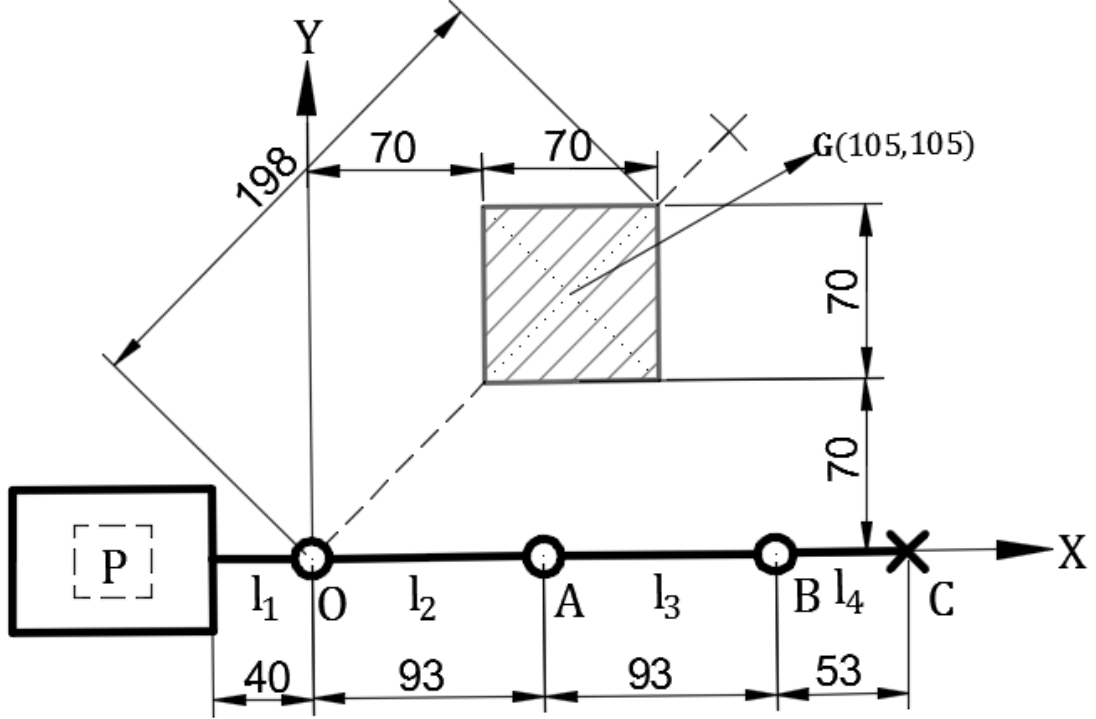
Dolayısıyla robot kolun çalışma uzayının hacmi yaklaşık $0,0434 \text{ m}^3$ olarak bulunur. Çalışma uzayının 3 boyutlu gösterimi SolidWorks programında çizilerek Şekil 4.3.'te robot kol üzerinde ifade edilmiştir.



Şekil 4.3. Robot kolun çalışma uzayının üç boyutlu olarak gösterimi.

İşlenecek parçanın çalışma düzleminde koordinatlandırılması ise Şekil 4.4.'te gösterilmiştir. Robot kolun çalışma düzlemi üzerinde en geniş alanın tarandığı $0^\circ \sim 90^\circ$ aralığında yerleştirilen parçanın boyutları, robotun rahat manevra yapabilmesi için 70 mm kenar uzunluğuna sahip bir kare olarak seçilmiş ve en yakın köşesi ana eksenin orijinininden 70'er mm yukarıda ve sağda olacak şekilde eksenlere paralel biçimde

konumlandırılmıştır. Buna göre parçanın koordinatlandırılmasını gösteren çizim aşağıdaki gibidir.



Şekil 4.4. Çapağı temizlenecek parçanın robot kola göre koordinatlandırılması.

Parçanın geometri merkezi şekilde de gösterildiği gibi x ve y eksenlerinden 105'er mm uzaklıktaki noktadır. Bu noktanın tayini görüntü işlemede kullanılacak kameranın koordinatlandırılmasında önem arz etmektedir. Geometri merkezine z ekseninde dik olarak konumlandırılacak bir kameradan daha düzgün görüntü verileri alınabilecek olup piksel verilerini milimetrik koordinat sistemine daha doğru bir biçimde transfer edebilmeye imkan sağlayacaktır.

BÖLÜM 5. ROBOT KOL KİNEMATİĞİNİN İNCELENMESİ

Kinematik kavramı için kısaca bir tanımlama yapmak gerekirse, sistemlerin hareketlerini doğrudan geometrisinden yola çıkarak, kuvvet ve tork gibi dinamik etkilerden bağımsız olarak ele alan bilim dalı olarak ifade edilebilir. Robotlarda bu kinematik incelemeler sonucunda mafsal ve son uzvun pozisyon, hız ve ivmelerine dair veriler elde edilmektedir. Robotların kinematik karakteristiklerinin incelenmesinde farklı birçok yöntem kullanılabilir. Bunlardan birkaçı Pieper-Roth metodu, Denavit-Hartenberg metodu, eksponansiyel metod, analitik metod ve nümerik metodlar örnek olarak gösterilebilir. Kinematik bilimi kendi içinde ileri kinematik ve ters kinematik olarak iki alt dala ayrılmaktadır. Tasarlanan robotun ileri kinematik problemleri yukarıda belirtilen yöntemlerden Denavit-Hartenberg metoduyla, ters kinematik problemleri ise analitik metod yardımıyla ifade edilecektir.

5.1. İleri Kinematik

İleri kinematik temel hatlarıyla, robotlarda son uzuv pozisyon ve konfigürasyonunun eklem değişkenleri yardımıyla mutlak koordinat sistemine göre belirlenmesi olarak tanımlanabilir. Robotun birbirlerine komşu iki uzvunun birbirleriyle olan ilişkisi ve bu iki uzuv arasındaki eklem karakteristiği denklem 5.1.'de verilen homojen transformasyon matrisleri yardımıyla ifade edilmektedir. Bu matrisin elemanlarının belirlenebilmesi için eksen takımlarının ilgili eklemlere doğru bir biçimde yerleştirilmesi gerekmektedir. Eklemlerdeki dönme ve kayma yönleri z eksenine ve buna dik olan uzuv uzunluğu doğrultusunda bir x eksenine belirtildikten sonra sağ el kuralına göre y eksenleri belirlenir. Denavit-Hartenberg metodunda transformasyon matrisini oluşturan α_{i-1} , a_{i-1} , d_i ve θ_i olmak üzere 4 adet eklem parametresi bulunmaktadır. Bu parametrelerin tespitinde izlenecek adımlar aşağıdaki gibidir:

1. a_{i-1} ; z_{i-1} ve z_i arasındaki x_{i-1} doğrultusundaki dik mesafe,
2. d_i ; x_{i-1} ve x_i arasındaki z_i doğrultusundaki dik mesafe,
3. α_{i-1} ; z_{i-1} ve z_i arasında x_i etrafında ölçülen açı,
4. θ_i ; x_{i-1} ve x_i arasında z_i etrafında ölçülen açı olarak ifade edilir.

Bu terimler her mafsal için ayrı ayrı hesaplanır ve aşağıda denklem 5.1’de verilen transformasyon matrisine taşınır.

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin\theta_i * \cos\alpha_{i-1} & \cos\theta_i * \cos\alpha_{i-1} & -\sin\alpha_{i-1} & -\sin\alpha_{i-1} * d_i \\ \sin\theta_i * \sin\alpha_{i-1} & \cos\theta_i * \sin\alpha_{i-1} & \cos\alpha_{i-1} & \cos\alpha_{i-1} * d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

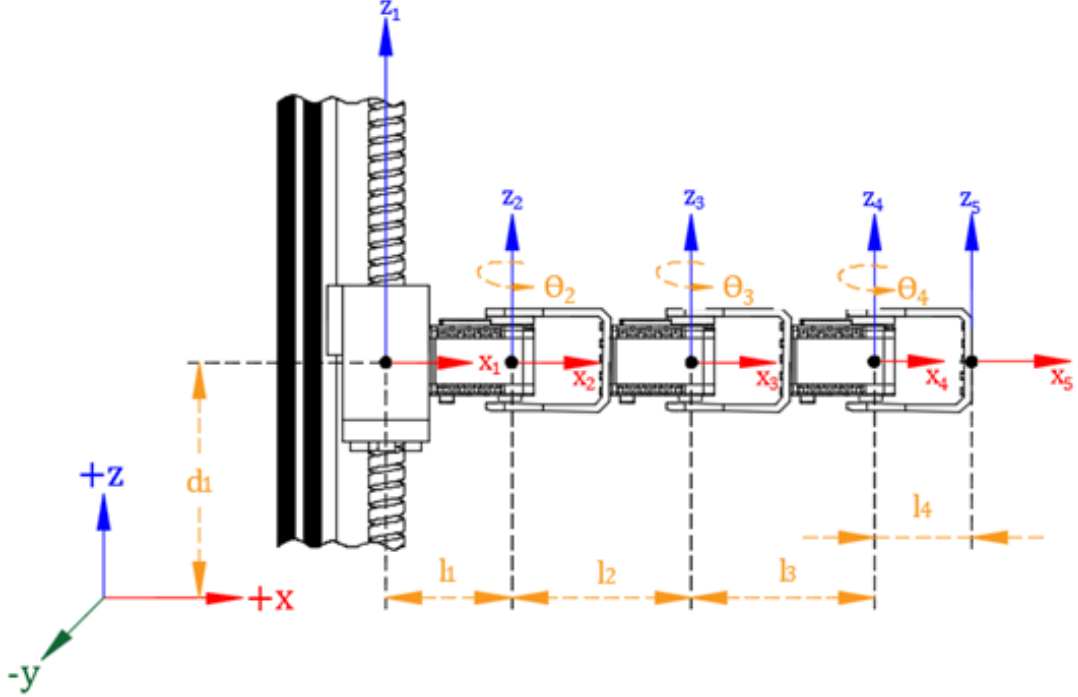
Robotun birbiriyle komşu her bir eksen takımı için transformasyon matrisleri oluşturulduktan sonra bu matrisler birbirleriyle sırasıyla çarpılır ve n eksenli bir robot için 0. uzvun n. uzuvla ilişkisi denklem 5.2’deki gibi ifade edilmiş olur.

$${}^0T_n = {}^0T_1 * {}^1T_2 * \dots * {}^{n-1}T_n \quad (5.2)$$

Bu çarpımın sonucunda n adet 4x4’lük matrisin çarpımından meydana gelen ve yine bir 4x4’lük matris olan genel dönüşüm matrisi elde edilir. Bu matrisin son sütununun ilk üç elemanı sırasıyla robotun son uzvuna ait x, y ve z koordinatlarını eklem değişkenleri cinsinden ifade eder ve robotun ileri kinematik denklemleri olarak ifade edilir.

Aşağıdaki ana koordinat sisteminde yeşil renkle ifade edilen y eksenini, robot eklemleri koordinatlandırılırken eklem değişkenleri üzerinde bir etkisi olmaması sebebiyle ve teknik çizimde karmaşıklığa sebebiyet verebileceği kaygısıyla belirtilmemiştir. Tasarlanan robota yerleştirilen eksen takımları ve buradan hareketle mafsal parametrelerinin tayinine ilişkin AutoCAD çizimi Şekil 5.1.’de gösterilmiştir. Şekilde, x eksenini kırmızı, y eksenini mavi ve belirlenen mafsal parametreleri turuncu renkle ifade edilmiş, α parametresinin, tasarlanan sistemin SCARA yapısında olması ve z eksenlerinin birbirlerine paralel olması dolayısıyla her bir mafsal için 0 değerine eşit

olduğu bilindiğinden şekil üzerinde gösterilmemiş ancak D-H parametreleri tablosunda Tablo 5.1.'de ifade edilmiştir.



Şekil 5.1. Tasarlanan robot kol eklemleri üzerine eksen takımlarının yerleştirilmesi.

Tablo 5.1. Robot kola ait D-H parametreleri tablosunun oluşturulması.

	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i
1. eksen	0	0	d_1	0
2. eksen	0	a_1	0	θ_2
3. eksen	0	a_2	0	θ_3
4. eksen	0	a_3	0	θ_4
5. eksen	0	a_4	0	0

Bu parametreler denklem 5.1'de verilen transformasyon matrisine taşınırsa aşağıdaki matrisler elde edilir:

$${}^0_1T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

$${}^1_2T = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & a_1 \\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} \cos\theta_3 & -\sin\theta_3 & 0 & a_2 \\ \sin\theta_3 & \cos\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

$${}^3_4T = \begin{bmatrix} \cos\theta_4 & -\sin\theta_4 & 0 & a_3 \\ \sin\theta_4 & \cos\theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

$${}^4_5T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_4 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

Bu matrisleri sırasıyla çarpılmasıyla ilk ve son uzuvların ilişkisini ifade eden genel transformasyon matrisi aşağıdaki gibi elde edilir:

$${}^0_5T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

Matrisi oluşturan elemanlar, $c\theta = \cos\theta$ ve $s\theta = \sin\theta$ olmak üzere sırasıyla yazılırsa,

$$r_{11} = c\theta_4(c\theta_2c\theta_3 - s\theta_2s\theta_3) - s\theta_4(c\theta_2s\theta_3 + c\theta_3s\theta_2)$$

$$r_{21} = c\theta_4(c\theta_2s\theta_3 + c\theta_3s\theta_2) + s\theta_4(c\theta_2c\theta_3 - s\theta_2s\theta_3)$$

$$r_{31} = 0$$

$$r_{12} = -c\theta_4(c\theta_2s\theta_3 + c\theta_3s\theta_2) - s\theta_4(c\theta_2c\theta_3 - s\theta_2s\theta_3)$$

$$r_{22} = c\theta_4(c\theta_2c\theta_3 - s\theta_2s\theta_3) - s\theta_4(c\theta_2s\theta_3 + c\theta_3s\theta_2)$$

$$r_{32} = 0$$

$$r_{13} = 0$$

$$r_{23} = 0$$

$$r_{33} = 1$$

$$p_x = l_1 + l_2 c\theta_2 + l_3 (c\theta_2 c\theta_3 - s\theta_2 s\theta_3) + l_4 [c\theta_4 (c\theta_2 c\theta_3 - s\theta_2 s\theta_3) - s\theta_4 (c\theta_2 s\theta_3 + c\theta_3 s\theta_2)]$$

$$p_y = l_2 s\theta_2 + l_3 (c\theta_2 s\theta_3 + c\theta_3 s\theta_2) + l_4 [c\theta_4 (c\theta_2 s\theta_3 + c\theta_3 s\theta_2) + s\theta_4 (c\theta_2 c\theta_3 - s\theta_2 s\theta_3)]$$

$$p_z = d_1$$

Dikkat edilirse, bulunan ifadeler denklem 5.9 ve 5.10'da verilen trigonometrik toplam-fark formüllerinin yardımıyla sadeleştirilebilir niteliktedir.

$$\sin(\alpha \pm \beta) = \sin(\alpha)\cos(\beta) \pm \cos(\alpha)\sin(\beta) \quad (5.9)$$

$$\cos(\alpha \pm \beta) = \cos(\alpha)\cos(\beta) \mp \sin(\alpha)\sin(\beta) \quad (5.10)$$

Buna göre genel dönüşüm matrisi 0_5T , aşağıdaki formda bulunur:

$$\begin{bmatrix} c(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) & s(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) & 0 & l_1 + l_2 c\theta_2 + l_3 c(\theta_2 + \theta_3) + l_4 c(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \\ s(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) & c(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) & 0 & l_2 s\theta_2 + l_3 s(\theta_2 + \theta_3) + l_4 s(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Matrisin konum vektörü ise denklem 5.11'de ifade edildiği gibidir:

$$\begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 + l_2 c\theta_2 + l_3 c(\theta_2 + \theta_3) + l_4 c(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \\ l_2 s\theta_2 + l_3 s(\theta_2 + \theta_3) + l_4 s(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \\ d_1 \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

Sistemin başlangıç pozisyonu motorların 0° açı değerindeki durumu olup, 5.11’de verilen denklemde $\theta_2 = \theta_3 = \theta_4 = 0^\circ$ alındığında denklem 5.12’deki gibi bulunur.

$$\begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 + l_2 + l_3 + l_4 \\ 0 \\ d_1 \end{bmatrix} \quad (5.12)$$

Buradaki d_1 ifadesi sistemin 1. eksenindeki kayar eklem z doğrultusundaki yer değiştirmesini temsil eden θ_1 açısına bağlı bir ifadedir. Açı değişimi ve kayma ilişkisinin ortaya konabilmesi için lineer raylı sistemin kılavuzuna bakılabilir veya tur başına kayma miktarı sistem üzerinden ölçüm alınarak ortaya konabilir. Ölçüm alınarak ortaya konan ve r ile gösterilen bu değer 5mm olarak bulunmuş ve kılavuzundan kontrol edilerek teyit edilmiştir. Açısal ve lineer yer değiştirme ilişkisi

d_1 , z ekseninde lineer yer değiştirme miktarı (mm)

r , efektif dönüş yarıçapı, tur başına lineer yer değiştirme miktarı (mm)

θ_1 , 1. eksenindeki motorun dönme açısı (deg)

olmak üzere denklem 5.13’teki gibi bir bağıntıyla ifade edilirse,

$$d_1 = \frac{r}{360} \theta_1 \quad (5.13)$$

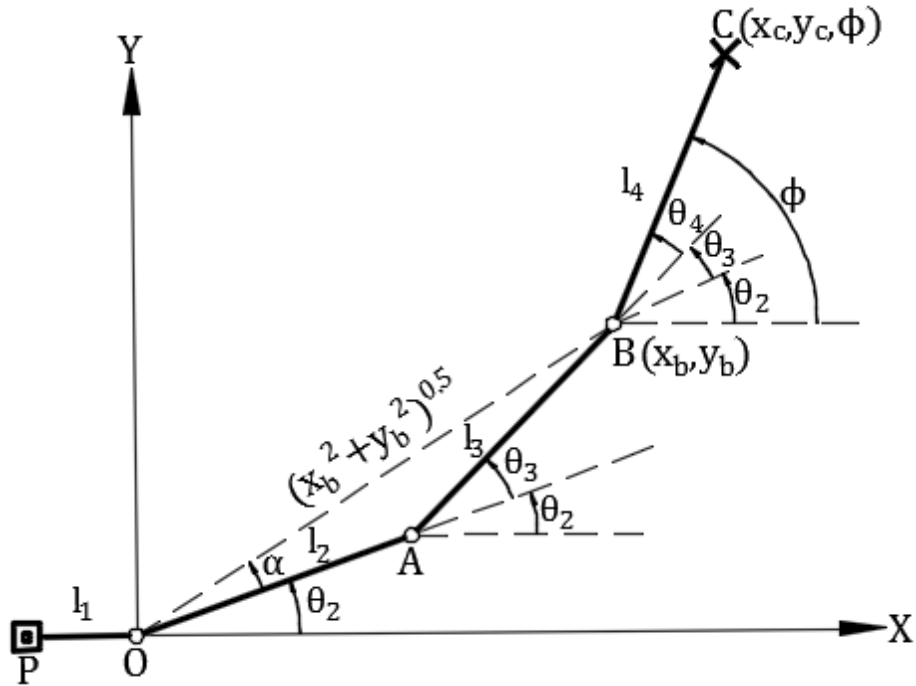
$$d_1 = \frac{1}{72} \theta_1 = 0,1388 \theta_1 \text{ olarak bulunur.}$$

5.2. Ters Kinematik

Bölüm 5.1.’de ileri kinematik kavramı tanımlanırken kayar eklemlerdeki değişken d ve dönel eklemlerdeki değişken θ olmak üzere eklem değişkenleri ve robot geometrisi yardımıyla robotun x, y ve z ekseninde koordinatlarının belirlenmesinde kullanıldığından bahsedilmiştir. Ters kinematik ise bunun tam tersi olarak robotun hedef pozisyonu koordinatları ve konfigürasyonundan eklem değişkenleri d ve θ değerlerinin belirlenmesi esasına dayanmaktadır. Bu sayede robotun kartezyen

koordinat sisteminden her bir eklemin polar koordinat sistemine dönüşümler üzerinden çözümler aranarak eklemlere ait dönel veya kayar yer değiştirme verileri elde edilmeye çalışılmaktadır. Bu veriler aktüatörlere gönderilerek robotun hareketi gerçekleştirilmektedir. Eklem değişkenlerinin belirlenmesinde ortaya çıkan denklemler genellikle non-linear yapıda olduklarından çözümleri hedef pozisyonlarının belirlenmesinde kullanılan denklemlerden daha zor olmaktadır. Öte yandan trigonometrik fonksiyonların özelliklerinden dolayı tek bir hedef pozisyonu koordinatları için eklem tipi ve sayısına da bağlı olarak birden çok sayıda ve zaman zaman gerçek olmayan çözümler üretilebilmektedir.

Sistemin ters kinematik denklemlerinin çözümü için AutoCAD programı kullanılarak çizilmiş üst görünüşü grafiksel olarak Şekil 5.2.'de gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Tasarlanan robotun ters kinematik çözümleri için üst görünüşünün grafiksel çizimi.

İleri kinematik çözümlerinde eksen takımları ve mafsalları parametreleri belirlenirken robot kolun ön görünüşü direk olarak kullanılmış olmasına karşın, ters kinematik çözümlerinde sistem geometrisinin gösterilmesinde karmaşıklığı önlemek amacıyla robot kolun üst görünüşü grafiksel olarak ifade edilmiştir. Buradaki P noktası 1. eksen

üzerindeki kayar eklemi, O noktası 2. eksen takımıyla çakışık olan motor milini, A noktası 3. eksen takımıyla çakışık motor milini, B noktası 4. eksen takımıyla çakışık son motor milini ve C noktası da 5. eksen takımıyla çakışık çapak temizleyici takımı ifade etmektedir. Sistemin x-y koordinat düzleminin merkezi hesaplamalarda kolaylık sağlaması açısından 2. eksen takımı üzerine oturtulmuştur. Z eksenini doğrultusundaki hareket tamamen 1. eksen üzerindeki kayar eklemeye bağlı olduğundan robot kolun üst görünüşü ve mafsal parametreleri 2 boyutlu düzlemde gösterimi, sistemin ters kinematik karakteristiğinin ifadesinde yeterli olmaktadır. Bu durumda ters kinematik hesaplamalar neticesinde bulunacak olan mafsal parametreleri θ_2 , θ_3 ve θ_4 olup, bu parametrelerin belirlenmesinde şekilde C noktasıyla temsil edilen çapak temizleyicinin konumu (x_c, y_c) ve yönelimi (ϕ) bilinmekte ve kullanılmaktadır.

Şekil 5.2.'ye göre B noktasının koordinatları C noktasının konum ve yönelimine bağlı olarak denklem 5.14'teki gibi ifade edilecek olursa,

$$\begin{aligned}x_b &= x_c - l_4 \cos \phi \\y_b &= y_c - l_4 \sin \phi\end{aligned}\tag{5.14}$$

O ve B noktalarını birleştiren hayali çizginin uzunluğu denklem 5.15'teki gibi Pisagor teoremi yardımıyla, B noktasının çapak temizleyicinin konumu ve yönelimi cinsinden ifade edilen x-y koordinatlarının karelerinin toplamının karekökü alınarak bulunabilir.

$$\begin{aligned}x_b^2 &= x_c^2 + l_4^2 \cos^2 \phi - 2x_c l_4 \cos \phi \\y_b^2 &= y_c^2 + l_4^2 \sin^2 \phi - 2y_c l_4 \sin \phi \\x_b^2 + y_b^2 &= x_c^2 + y_c^2 + l_4^2 - 2l_4(x_c \cos \phi + y_c \sin \phi) \\ \sqrt{x_b^2 + y_b^2} &= \sqrt{x_c^2 + y_c^2 + l_4^2 - 2l_4(x_c \cos \phi + y_c \sin \phi)}\end{aligned}\tag{5.15}$$

Şekildeki OAB açısı θ_3 açısının bütünleyen açısıdır, dolayısıyla $180 - \theta_3$ olarak gösterilebilir.

Buna göre θ_3 açısı denklem 5.16'daki gibi OAB üçgeninde kosinüs teoremi kullanılarak gösterilecek olursa,

$$l_2^2 + l_3^2 - 2l_2l_3\cos(180 - \theta_3) = x_b^2 + y_b^2$$

$$\cos(180 - \theta_3) = \frac{l_2^2 + l_3^2 - x_b^2 - y_b^2}{2l_2l_3}$$

$$\theta_3 = 180 - \cos^{-1} \frac{l_2^2 + l_3^2 - x_b^2 - y_b^2}{2l_2l_3} \quad (5.16)$$

Benzer şekilde Şekil 5.2.'de α olarak gösterilen açının bulunması için AOB hayali üçgeninde kosinüs teoremi uygulanırsa denklem 5.17'deki gibi ifade bulunur.

$$x_b^2 + y_b^2 + l_2^2 - 2\sqrt{x_b^2 + y_b^2}l_2\cos\alpha = l_3^2 \quad (5.17)$$

Yukarıdaki ifadeden α açısı çekildiğinde denklem 5.18 elde edilir.

$$\cos\alpha = \frac{l_2^2 + x_b^2 + y_b^2 - l_3^2}{2l_2\sqrt{x_b^2 + y_b^2}}$$

$$\alpha = \cos^{-1} \frac{l_2^2 + x_b^2 + y_b^2 - l_3^2}{2l_2\sqrt{x_b^2 + y_b^2}} \quad (5.18)$$

OB doğru parçasının x eksenine yaptığı açı $\alpha + \theta_2$ kadar olup, bu açı B noktasının koordinatları cinsinden denklem 5.19'daki gibi ifade edilebilir.

$$\alpha + \theta_2 = \cos^{-1} \frac{x_b}{\sqrt{x_b^2 + y_b^2}} \quad (5.19)$$

Denklem 5.19'daki ifadeden denklem 5.18'deki ifade çıkarıldığında denklem 5.20'deki θ_2 değeri bulunur;

$$\theta_2 = \cos^{-1} \frac{x_b}{\sqrt{x_b^2 + y_b^2}} - \cos^{-1} \frac{l_2^2 + x_b^2 + y_b^2 - l_3^2}{2l_2\sqrt{x_b^2 + y_b^2}} \quad (5.20)$$

Şekil 5.2.'de ϕ ile ifade edilen çapak temizleyici konfigürasyon açısının 2. , 3. , ve 4. mafsıl açıları toplamına eşit olduğu görülmektedir. Bu durum denklem 5.21'de ifade edilmektedir.

$$\phi = \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 \quad (5.21)$$

Sistemde ϕ açısı bilinmekte, θ_2 ve θ_3 açıları ise yukarıda denklem 5.16 ve 5.20 yardımıyla bulunmaktadır. Buna göre θ_4 açısı denklem 5.22'deki ya da açık formuyla denklem 5.23'teki gibi bulunabilir.

$$\theta_4 = \phi - \theta_2 - \theta_3 \quad (5.22)$$

$$\theta_4 = \phi - \cos^{-1} \frac{x_b}{\sqrt{x_b^2 + y_b^2}} + \cos^{-1} \frac{l_2^2 + x_b^2 + y_b^2 - l_3^2}{2l_2 \sqrt{x_b^2 + y_b^2}} - 180 + \cos^{-1} \frac{l_2^2 + l_3^2 - x_b^2 - y_b^2}{2l_2 l_3} \quad (5.23)$$

İleri kinematik bölümünde θ_1 açısı ile z eksenindeki hareket ilişkisi denklem 5.13'teki gibi lineer bir bağıntıyla ifade edilmiştir. Buna göre θ_1 ifadesi denklem 5.24'te ifade edildiği üzere elde edilebilir.

$$\theta_1 = \frac{360}{r} d_1$$

Burada tur başına yer değiştirmeyi temsil eden $r = 5$ mm olduğundan,

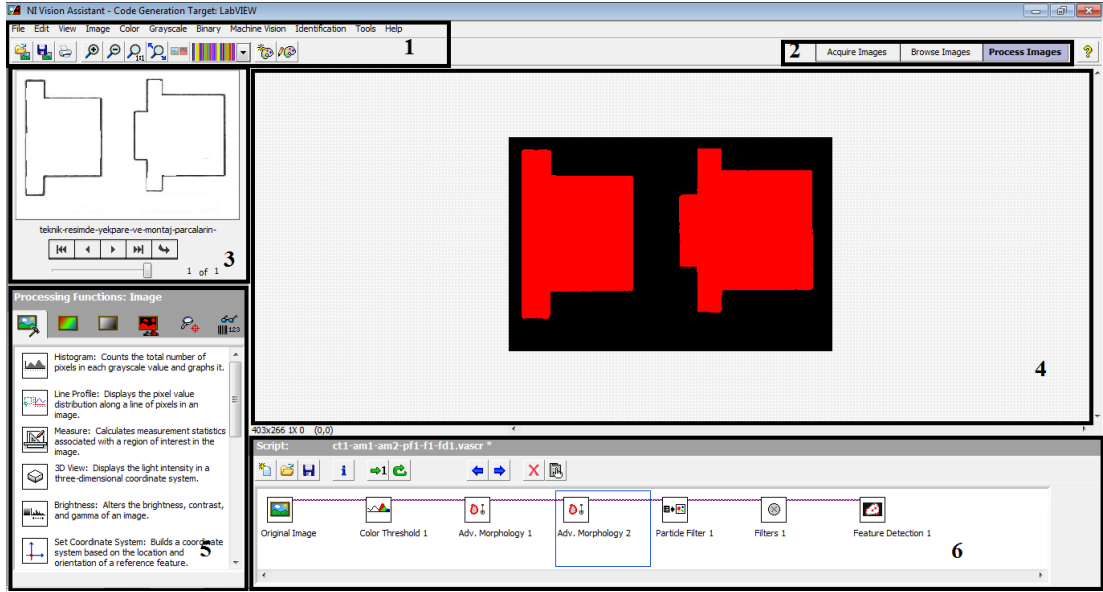
$$\theta_1 = 72d_1 \quad (5.24)$$

BÖLÜM 6. PARÇA GEOMETRİSİNİN GÖRÜNTÜ İŞLEME YÖNTEMİYLE BELİRLENMESİ VE PROGRAM BASAMAKLARI

Tasarlanan robot kolun çapak temizleme işlemini gerçekleştirebilmesi için çapağın bulunduğu yörünge belirlenmesi kritik bir konudur. Bu yörünge, çalışmamızda çapağı temizlenecek parçanın çevresidir. Çevrenin belirlenerek sisteme tanıtılması üzerine yaklaşımlar Bölüm 1.6.'da ifade edilmiştir. Çalışma kapsamında, ifade edilen bu yaklaşımlardan bilgisayar görüşü (computer vision) üzerinde durulmuş ve çapağı temizlenecek parçanın kamera yardımıyla alınan görüntüsü üzerinde görüntü işleme teknikleri uygulanmıştır. Görüntü alma, işleme ve koordinatlandırma işlemleri LabVIEW programı ve Vision Development Module – Vision Assistant eklentisi kullanılarak gerçekleştirilmiş ve belirlenen koordinatlar kalibre edilerek robot kola ait motorların tahriki sağlanmıştır.

6.1. LabVIEW Vision Assistant Eklentisinin İncelenmesi

Vision Assistant eklentisi LabVIEW programıyla birlikte kullanılmak üzere tasarlanmış birçok eklentiden biri olup, LabVIEW programı vasıtasıyla mühendislikte sıklıkla kullanılan görüntü alma ve işleme uygulamalarında kullanıcılara kolaylık sağlamak üzere National Instrument firması tarafından kullanıma sunulmuştur. Programın genel olarak görünümü Şekil 6.1.'deki gibidir ve aşağıda numaralandırılmış bölümlerden oluşmaktadır.



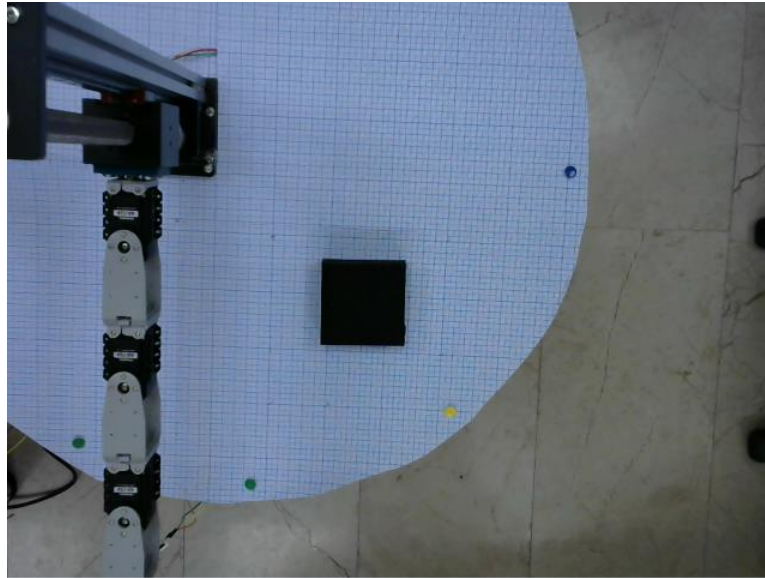
Şekil 6.1. LabVIEW Vision Assistant programının arayüzü ve bölümleri.

1 ile numaralandırılan bölümde dosya açma, kaydetme, yakınlaştırma, renk palet seçimleri yapılmakta olup standart sekmelerin yanısıra 5 ile numaralandırılan bölümdeki görüntü işleme basamaklarına, ilgili sekmelerin altında alternatif erişim imkanları sunulmaktadır. 2 ile numaralandırılan bölümde, tekli, sürekli ve çoklu görüntü alma yöntemleri, görüntülerde seçme, sıralama ve ayıklama işlemleri ve görüntü işleme metodları üzerine sıralama ve yetkilendirme yapılan 3 adet sekme bulunmaktadır. 3 ile numaralandırılan bölümde işlenen görsel referans haliyle gösterilmekte, görüntü işleme tekniklerine tabi tutulan görsel ise 4 ile numaralandırılan ve işlem penceresi olarak adlandırılan bölümde yer almaktadır. 5 ile numaralandırılan bölümde, görsel (image), renk (color), gri seviye (greyscale), ikili seviye (binary), makine görüşü (machine vision) ve tanımlama (identification) işlemleri ve bu işlemlerin altındaki yöntemlerin sıralandığı bölümdür. Son olarak 6 ile numaralandırılan kısımda ise kullanıcı tarafından oluşturulmuş görüntü işlem senaryosu yer almaktadır.

6.2. Çapağı Temizlenecek Parça Üzerinde Kullanılan Görüntü İşleme Basamakları

6.2.1. Çapağı temizlenecek parça görüntüsünün elde edilmesi

Çapağı temizlenecek parçaya dair alınan kamera görüntüsü Şekil 6.2.'de verilmiştir. Bu görüntünün elde edilmesinde Vision Assistant eklentisinin Şekil 6.1.'de 2 ile numaralandırılan kısmında bulunan Acquire Images bölümünün altında Acquisition ve sonra Acquire Single Image (Image Snap) kısmından veri toplayıcı görüntü aygıtı seçilir ve tek bir görüntü elde edilir. Buna alternatif olarak Acquire Continuous Images kısmından birden çok görüntü de alınabilmektedir. Bu işlemden sonra Browse Images bölümüne geçilerek varsa istenmeyen görüntülerin elimine edilmesi, sırasının değiştirilmesi gibi işlemler yapılır. Buradaki işlem de tamamlandıktan sonra Process Images kısmına geçilir ve Şekil 6.1.'de 5 ile numaralandırılan Processing Function komutları aktifleştirilir. Alınan görüntü Şekil 6.2.'deki gibidir. Görüntüde, kameranın görüş alanının içerisinde bulunduğundan, çapağı işlenecek parçanın yanısıra robot kolun bir bölümü de bulunmaktadır. Bu durum, parçanın koordinatlandırılıp robot kolun bu koordinatları izlemesinde soruna yol açmaktadır. Bu sorunun ortadan kaldırılmasında kullanılacak görüntü işleme teknikleri daha sonra anlatılacaktır.



Şekil 6.2. NI Vision Assistant programı ile alınan çapağı işlenecek parçanın görüntüsü.

6.2.2. Alınan görüntünün renk eşiklemesinin yapılması

Alınan görüntüde kullanılan renk eşiklemesi (color threshold) fonksiyonu yardımıyla konumlarıyla ilgilenilen nesnelere arka planda bulunan zeminden ayrıştırılmaya çalışılmıştır. Buna göre, arayüz vasıtasıyla belirlenen eşik değerlerinin arasında olmayan değerler 0 değerine çekilmektedir. Bu değerler ortam ışıklandırması, nesnelere rengi, saydamlık ve opaklık gibi pek çok etmene göre değişiklik göstermektedir. İçerisinde renk eşiklemesinin yapılabildiği RGB (red-green-blue), HSL (hue-saturation-luminance), HSV (hue-saturation-value) ve HSI (hue-saturation-intensity) olmak üzere 4 çeşit renk uzayı bulunmaktadır. Program üzerinde yapılan denemeler sonucunda HSL uzayının daha düzgün sonuçlar verdiği görülmüş ve eşikleme işlemi buna göre gerçekleştirilmiştir. Belirlenen eşik değerleri $hue_{min} = 0$, $hue_{max} = 184$, $sat_{min} = 0$, $sat_{max} = 255$, $lum_{min} = 0$ ve $lum_{max} = 29$ şeklindedir. Programdaki preview color seçeneğinden zeminden ayrılan bölgelerin belirtileceği renk kırmızı olarak belirlenmiştir. Buna göre renk eşiklemesi işlemine tabi tutulan görüntünün son hali aşağıda Şekil 6.3.'teki gibidir.



Şekil 6.3. Renk eşiklemesi işlemine tabi tutulan parçanın görüntüsü.

Görüntü dikkatlice incelendiğinde parçaların yanısıra zemine ait bazı noktaların da eşikleme işleminden etkilendiği görülmektedir. Bu noktalar ileride kullanılacak fonksiyonlarla ortadan kaldırılacaktır.

6.2.3. Eşiklenen görüntüye partikül filtresi uygulanması

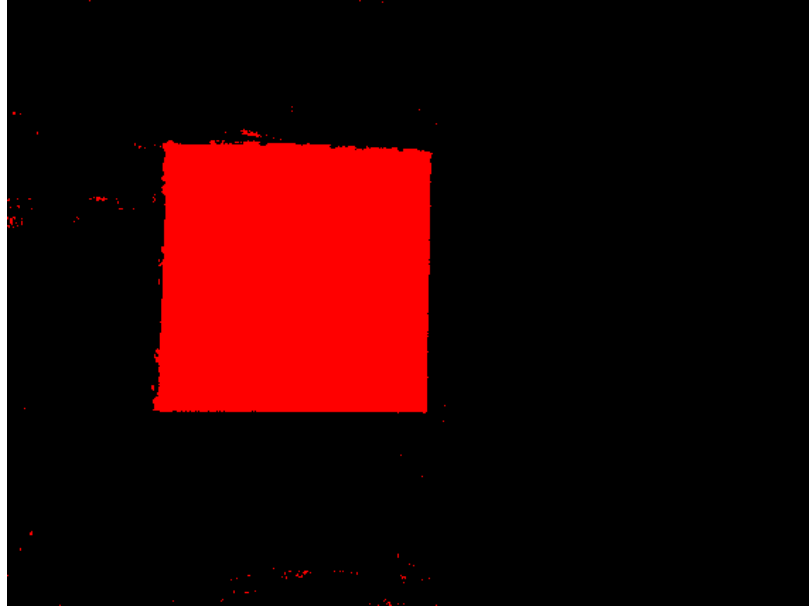
Kamera yardımıyla alınan görüntü 1280x960 boyutlarında tek bir fotoğraftan oluşmaktadır. Bu fotoğrafın eşiklenmesi neticesinde görsel zeminden ayrılmış ve çapağı temizlenecek nesne ve robot kol gövdesi belirgin hale getirilmiştir. Ancak, gerçekleştirilecek çapak temizleme işlemi için elde kalan görüntü yeterli olmamaktadır. Robot kolun takip edeceği yörüngeyi belirlemek için kameradan alınan görüntüde yalnızca çapaklı parçanın bulunması gerekmektedir. Bu problemin giderilmesi için eşiklenen görüntüye piksellerin belirlenen kriterlere göre kaldırılması veya tutulmasını sağlayan partikül filtresi uygulanmıştır. Pek çok pasif filtreleme fonksiyonundan oluşan bu filtrede Bounding Rect Left fonksiyonu aktif hale getirilerek (0,0) noktasından (görselin sol üst köşesinden) itibaren girilen piksel değerinin sağında kalan tüm pikseller 0 değerine çekilmekte, yani eşiklenen görüntüden ayrıştırılmaktadır. Bunun için aralığın minimum değeri $range_{min}=0$ ve maksimum değeri $range_{max}=200$ olarak belirlenmiş ve gerçekleştirilecek eylem (action), tut (keep) olarak seçilmiştir. Partikül filtresi uygulanan görüntü Şekil 6.4.'teki gibidir.



Şekil 6.4. Eşiklenen görüntüye partikül filtresinin uygulanması.

6.2.4. Görüntüye ileri morfoloji tekniklerinin uygulanması

Partikül filtresi yardımıyla çapaklı parça görüntüsünün izolasyonunun sağlandığı görselde nesnenin kenar belirlemesi halen mümkün olmamaktadır. Bunun sebebi, görüntüde belirginleştirilen nesne üzerinde yeterince belirgin olmayan noktalar, yani kırmızı pikseller içerisinde seyrek siyah pikseller ve solgunlaştırılan zemin üzerinde belirgin noktalar, yani siyah pikseller arasında seyrek kırmızı pikseller bulunmasıdır. Bu durum ışıklandırma hataları sebebiyle ortaya çıkmakta ve eşikleme işlemini de olumsuz etkilemektedir. Üstesinden gelmek için ileri morfoloji fonksiyonları kullanılmaktadır. İleri morfoloji fonksiyonları, ikili seviyedeki (binary) görüntü pikselleri üzerinde ileri seviye işlemler yapılmasına olanak sağlamaktadır. Çapaklı nesne üzerindeki solgun noktaların düzeltilmesi için delik doldurma işlemi (fill holes), ve siyah zemin üzerindeki belirgin noktaların giderilmesi için de küçük objelerin kaldırılması işlemi (remove small objects) uygulanmıştır. Delik doldurma işlemi neticesinde ortaya çıkan görüntü Şekil 6.5.'te ve küçük objelerin kaldırılması işlemi sonucunda elde edilen görüntü Şekil 6.6.'da ifade edilmiştir.



Şekil 6.5. Delik doldurma işlemi sonucu ortaya çıkan görüntü.



Şekil 6.6. Küçük objelerin kaldırılması neticesinde elde edilen görüntü.

6.2.5. İşlenen görüntüye histogram eşitleme işlemi uygulanması

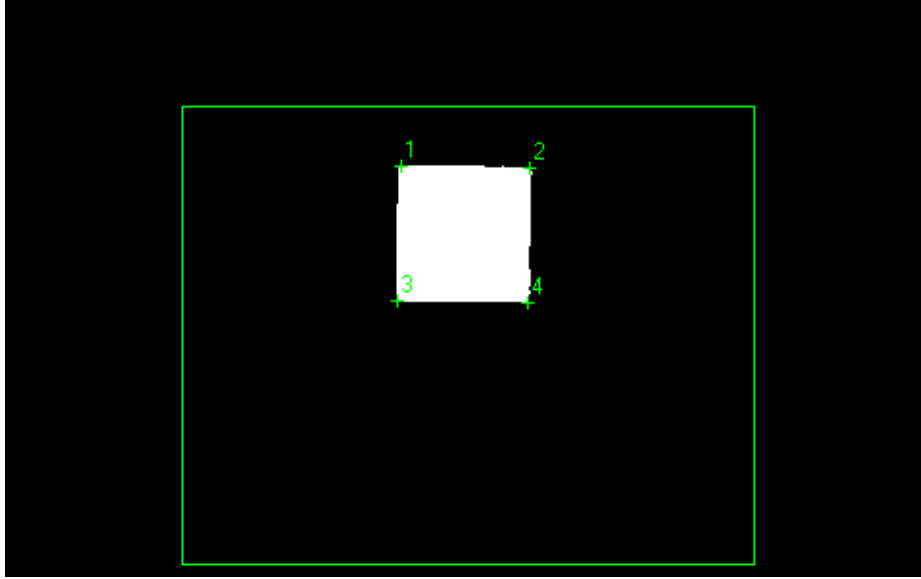
Çapaklı parça bir önceki aşamada ileri morfoloji teknikleri kullanılarak çevreden ve bozucu etkilerden tamamen izole edilmiştir. Ancak bu durum özellik belirleme (feature detection) ile parça koordinatlarının tespiti için yeterli değildir. Çünkü piksellerin eşikleme sonrası doluluk değerleri (point strengths), özellik belirleme algoritmalarındaki minimum değer şartlarını sağlamada yetersiz kalmaktadır. Bunun için, görüntü üzerinde renk uzayını oluşturan bileşenlerin yoğunluklarını gösteren histogram eğrileri üzerinde yapılan histogram eşitleme işlemleriyle nesnenin görüntüdeki karşıtlığının artırılması gerekmektedir. Bu durumda arka plan değeri olan 0 (siyah) değerinden 1 gibi bir değerle eşiklenen nesnenin karşıtlığı histogram eşitleme yöntemiyle 255 (beyaz) değerine çekilmekte ve karşıtlık daha da belirginleştirilmektedir. Histogram eşitleme sonucunda elde edilen görüntü Şekil 6.7.'deki gibidir.



Şekil 6.7. Histogram eşitleme işlemi sonucu elde edilen görüntü.

6.2.6. Eşitlenen görüntüden nesne özelliklerinin belirlenmesi

Özellik belirleme ya da öznitelik çıkarımı (feature detection), kullanılan özellik belirleme algoritmasına ait parametrelerin görüntünün her pikselinde aranarak bu parametreleri sağlayan köşe, kenar ve sınır gibi çevresinden ayıran özelliklerinin ortaya konması işlemi olarak tanımlanmaktadır [27]. Özellik belirleme algoritması olarak Harris Corner Detector algoritması kullanılmıştır. Yapılan denemeler sonucunda Kernel Size değeri 3 ve Pyramid Level değeri 3 olarak belirlenmiş, Minimum Strength (doluluk) değeri ise çapaklı kenarların kesiştiği köşe noktalarının tespitine imkan sağlaması için 80 olarak belirlenmiştir. Çalışma bölgesi (ROI) Şekil 6.8.'de gösterildiği gibi yeşil renkli çerçeve ile sınırlandırılmıştır. Bulunan çapaklı kenarlara ait köşe noktaları Şekil 6.8.'de yeşil renkte numaralarla ve köşe noktalarının piksel cinsinden koordinatları ve doluluk değerleri Şekil 6.9.'da gösterilmiştir. Şekil 6.8.'de belirlenen yörüngeyi devamlı ve düzgün olarak takip edilebilmesi için çıkarılan öznitelik noktaları sıralanıp bir dizinin elemanları olarak sıralanmış ve robotun yörünge planlaması bu şekilde gerçekleştirilmiştir.

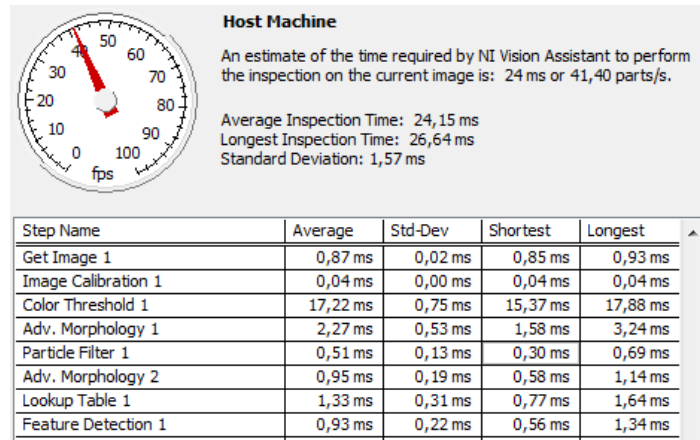


Şekil 6.8. Özellik belirleme işleminde çalışma bölgesinin sınırlandırılması ve çapaklı köşe noktalarının tespiti.

Results ...	1	2	3	4
X Position (Pix.)	625,32922	740,88330	622,49030	741,50970
Y Position (Pix.)	554,14539	557,14600	679,37054	682,37054
Point Strength	127,07573	118,13327	122,82348	120,61063

Şekil 6.9. Çapaklı köşe noktalarının piksel cinsinden koordinatları ve doluluk değerleri.

Görüntü işleme basamaklarına ait performans ölçümleri aşağıdaki görselde Şekil 6.10.'da ifade edilmiştir. Buna göre kullanılan bilgisayarda kameradan alınan görüntünün tüm proseslerden geçerek işlenmesi yaklaşık 25 ms'lik bir sürede gerçekleşmektedir.



Şekil 6.10. Görüntü işleme basamaklarına ait performans ölçümleri.

Alınan ölçümler sonucunda prosesin tamamı dikkate alındığında en uzun süren basamakların renk eşikleme ve küçük objelerin kaldırılması işlemleri olduğu görülmüştür. Bu iki işlemin toplamı, toplam işlem yükünün yaklaşık %78'ine tekabül etmektedir. Yapılan çalışma tek bir görselin işlenmesi üzerine olduğundan çalışma için önem arz etmemekle beraber, çoklu görsel ve video işleme gibi işlemlerde fps değerinin artırılması, dolayısıyla saniyede işlenen kare sayısının yükseltilmesi amacıyla görsellere ait çalışma bölgesi sınırlandırılarak işlem yükü azaltılabilmektedir.

6.3. Piksel Koordinat Sisteminden Milimetrik Koordinat Sistemine Geçiş İşlemleri

Görüntü işleme sonucu çapaklı köşe noktalarına ait elde edilen x-y koordinatları piksel cinsinden koordinatlardır ve bu koordinat düzleminin orijini görselin sol üst köşesidir. Oysa robot koluna ait koordinat sisteminin orijini görüntünün sağ alt bölümünde kalmaktadır. Bulunan noktaların robotun koordinat sistemi birimi olan milimetreye dönüştürülmesinde bu duruma dikkat edilmelidir. Yapılan dönüşüm işleminde öznitelik çıkarımı prosesi sonucu bulunan piksel cinsinden koordinatlara karşılık gelen milimetrik koordinatlar ölçülerek belirlenmiştir. Buna göre öznitelik çıkarımı sonucu elde belirlenen noktaların piksel cinsinden koordinatları (x_p, y_p) ikilileri şeklinde ifade edilerek birinci nokta için (651.3, 556.7), ikinci nokta için (777.0, 559.0), üçüncü nokta için (648.2, 680.9) ve dördüncü nokta için ise (768.8, 683.8) olarak bulunmuştur. Bunlara karşılık gelen milimetrik koordinatlar ise (x_m, y_m) ikilileri şeklinde sırasıyla gösterilerek birinci nokta için (36, 146), ikinci nokta için (36.5, 217), üçüncü nokta için (106, 146) ve dördüncü nokta için (107, 216.5) olarak ölçülmüştür. Kameranın piksel koordinat eksenleri ile robotun milimetrik koordinat eksenleri arasında 90° fark olduğundan bulunan x_p ifadeleri y_m değerlerine ve y_p ifadeleri x_m değerlerine dönüştürülecektir. Milimetrik x koordinatlarını bulmak için aşağıdaki eşitlikler (Denklem 6.1 ve 6.2) yazılabilir.

$$x_m = m \cdot y_p + n \quad (6.1)$$

$$36 = m \cdot 556,7 + n$$

$$106 = m \cdot 680,9 + n$$

Denklemler çözüldüğünde $m = 0,563607$ ve $n = -277,7600$ olarak bulunur. Benzer şekilde y koordinatlarının eldesi için,

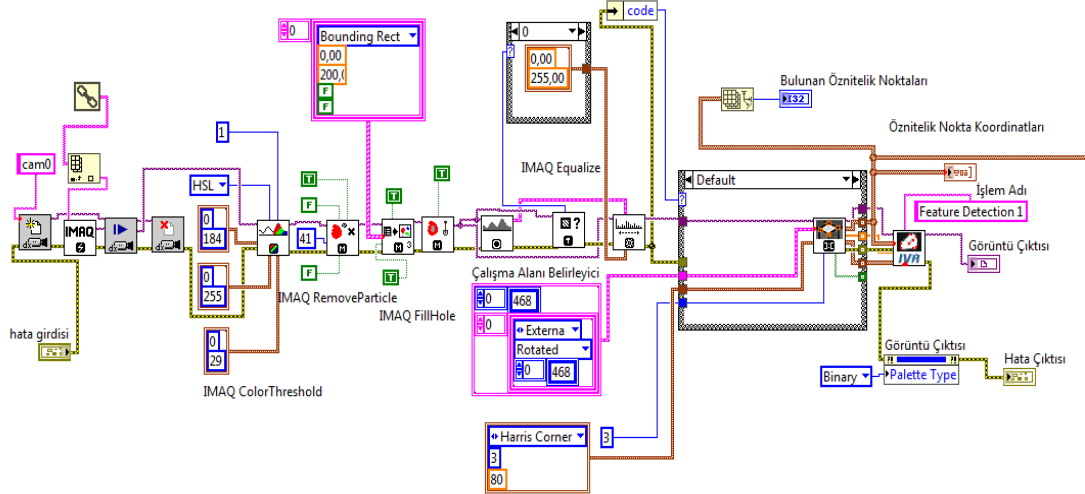
$$y_m = k \cdot x_p + l \quad (6.2)$$

$$146 = k \cdot 648,2 + l$$

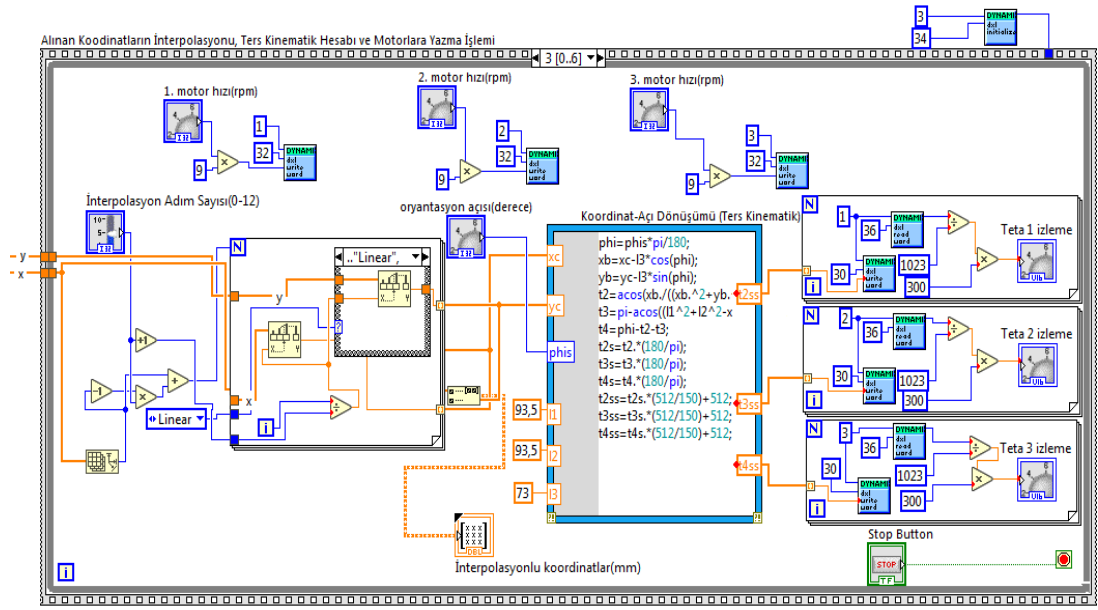
$$216,5 = k \cdot 768,8 + l$$

Buradan $k = 0,584577$ ve $l = -232,923$ olarak elde edilir. Bulunan bu değerlerle birinci dereceden bir fonksiyon oluşturulup, x ve y eksenleri doğrultusunda pikselden milimetreye koordinat dönüşüm işlemleri sağlanmıştır.

Yazılan LabVIEW programının blok diyagramına ilişkin görsellerden ikisi aşağıda ifade edilmiştir. Şekil 6.11.'de görüntü işleme adımları verilmiş, Şekil 6.12.'de ise interpolasyon, ters kinematik hesaplamaları ve motor adreslerine yazma işlemi gösterilmiştir.



Şekil 6.11. Oluşturulan görüntü işleme blokları.



Şekil 6.12. Oluşturulan interpolasyon, kinematik hesaplamalar ve motorlara yazma işlemi blokları.

Programın arayüzüne ve deney düzeneğine ait görseller aşağıda gösterilmiştir. Üzerlerinden program çıktılarının okunmasına olanak sağlayan indikatörler Şekil 6.13.'te , programa veri girişlerine imkan veren kontrol araçları ise Şekil 6.14.'te, kurulan deney düzeneği ise Şekil 6.15.'te ifade edilmiştir.

İŞLENEN GÖRSEL

Görüntü Çıktısı

GÖSTERGELER

Bulunan Öznitelik Noktaları:

Öznitelik Nokta Koordinatları(piksel):

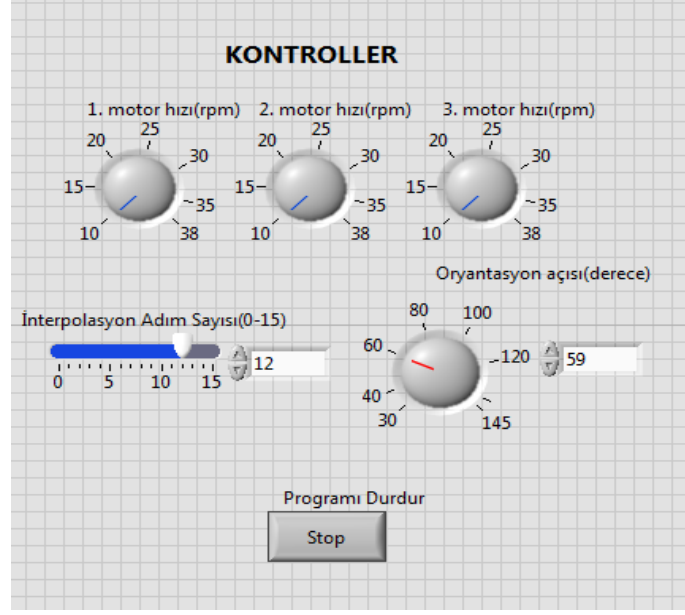
X	618,23
Y	513,67

İnterpolasyonlu koordinatlar(mm):

11,7475	128,479	▲
11,7994	133,312	▬
11,8514	138,144	▾
11,9033	142,977	▼

Teta 1 (derece) Teta 2 (derece) Teta 3 (derece)

Şekil 6.13. Arayüzdeki işlenen görsel ve diğer göstergeler.



Şekil 6.14. Arayüzdeki kontrol araçları.



Şekil 6.15. Oluşturulan deney düzeneği.

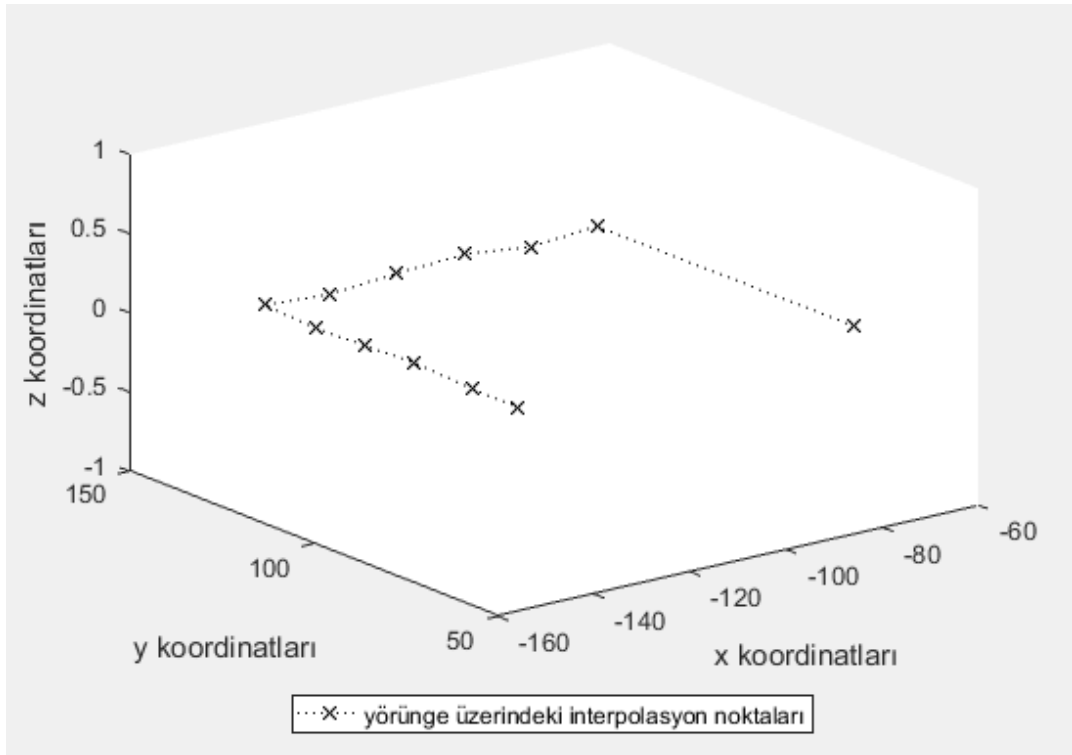
BÖLÜM 7. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada sanayide çapak temizleme işlemlerinde kullanılan endüstriyel robotlar incelenmiş ve bir prototipi ortaya konmuştur. Çapağı temizlenecek parçanın tespiti bir USB kameradan alınan parça görüntüsünün görüntü işleme tekniklerine tabi tutulmasıyla sağlanmış ve bu sayede parça sınırları belirlenerek dönüm noktalarının koordinatları tespit edilerek robot kola ait servolar tahrik edilmiş ve gerekli hareket sağlanmıştır.

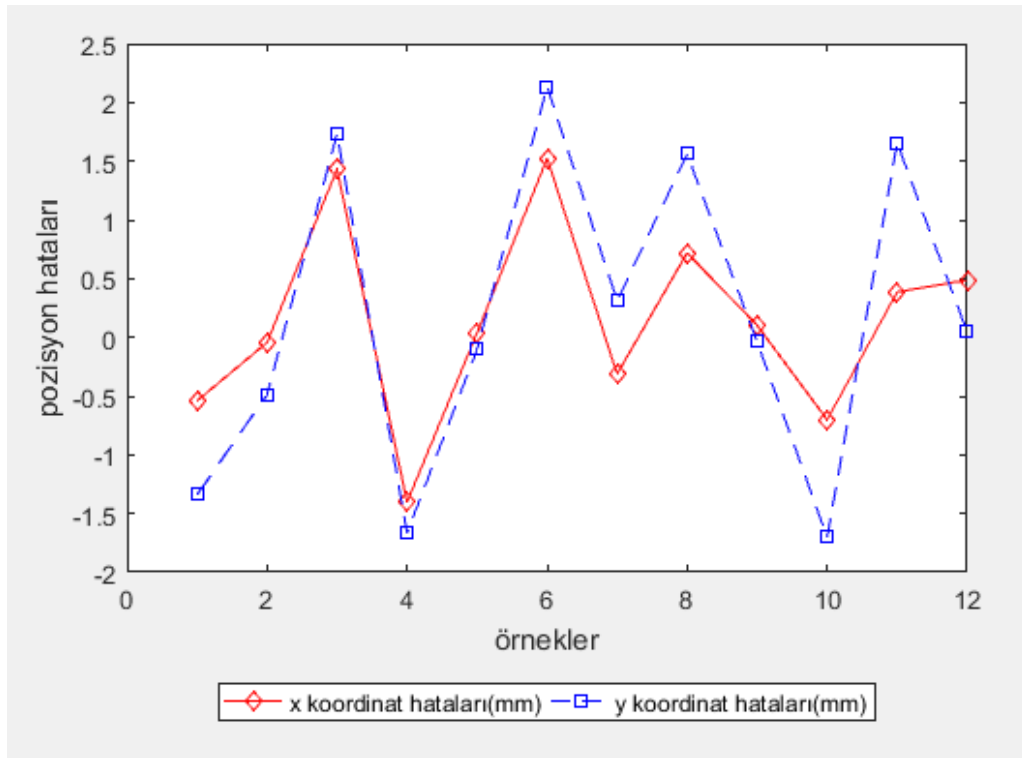
Çalışma kapsamında öncelikle robot kinematiği üzerinde durularak dört eksenli ve SCARA tipi olarak seçilen robot kolun uzuv uzunlukları tayin edilerek ileri ve ters kinematiği incelenmiş ve MATLAB R2016a programı yardımıyla kinematik denklemleri matematiksel olarak elde edilmiştir. Bunun devamında parçanın SolidWorks 2013 ortamında katı modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan bu katı modelden hareketle robot kola ait çalışma alanı ve hacmi ortaya konulmuştur. Bu proseslerin görselleştirilerek çalışmaya aktarımında AutoCAD 2015 programı kullanılmıştır. Çalışma alanı içerisindeki parçanın tespiti LabVIEW 2016 programının Vision Development Module eklentisi içerisinde gerçekleştirilen görüntü işleme basamakları ile sağlanmıştır. Bu sayede parça geometrisini oluşturan köşe ve kavis gibi kritik noktaların koordinatları özellik belirleme algoritmaları sayesinde ortaya konulmuş ve gerekli hareketi sağlamak üzere ters kinematik denklemlerden geçirilmiştir. Robot kolda kullanılan servo motorların haberleşmesi, değer okuma ve değer yazma gibi robot programlama işlemleri ve bilgisayar arayüzünün oluşturulması yine LabVIEW 2016 programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Çalışma süresince karşılaşılan problemlerden bahsedilecek olursa, belirlenen robot tipi ve serbestlik derecesi her yeni görev ve gereksinimle beraber güncelleştirilmek ihtiyacı doğurmuştur. Çapak temizleme işlemleri gibi sürekli yörünge kontrolüne ihtiyaç

duyan işlemlerde basit servo motorlarla çözüm üretmek pratikte pek mümkün olmamaktadır. Yine de kritik koordinatlar arasında yapılan interpolasyon işlemi ile işlenecek nokta sayısı çoğaltılarak bu probleme bir çözüm geliştirilmeye çalışılmıştır. Bu noktalar Şekil 7.1.'de ifade edilmiştir. Öte yandan parça tespiti için sonradan karar verilen görüntü işlemeyle tespit etme işlemi bir miktar süre kaybına sebep olmuştur. Kullanılan servo motorların kompleks yapıda olmaması sebebiyle yalnızca tamsayı tipinde parametre girdisine izin vermesi yörünge kontrolünde stabiliteyi etkilemiştir. Bu sebeple yörünge takibinde meydana gelen bozulmalar yine Şekil 7.1.'de görselleştirilmiştir. Benzer şekilde görüntü işleme proseslerinde ışıklandırma, odaklama ve düşük çözünürlük gibi problemler sistemin stabil çalışmasını olumsuz etkileyen faktörler arasındadır. X ve Y koordinatlarından 105 mm uzaklıkta yerleştirilen bir kenarı 70 mm uzunluğundaki kare prizma parçanın çapak temizleme işlemi için belirlenen yörünge, üzerindeki interpolasyon noktaları ve milimetre cinsinden yörüngesel hata analizleri sırasıyla Şekil 7.1. ve Şekil 7.2.'de ifade edilmiştir.



Şekil 7.1. İnterpolasyona tabi tutulan yörüngeyi takibinde meydana gelen bozulmaların üç boyutta gösterimi.



Şekil 7.2. Belirlenen 12 interpolasyon noktasında görülen konum hatalarının grafiksel gösterimi.

Çalışmanın maliyeti aşağıdaki tabloda ifade edilmiştir.

Tablo 7.1. Çalışma kapsamında yapılan malzeme alımları ve harcamalar.

Motorlar	1 Adet	1510.00 TL
Kontrol Kartı	1 Adet	300.00 TL
Lineer Raylı Sistem	1 Adet	150.00 USD
Lazer Kesim Parçalar	5 Adet	100.00 TL
Elektronik Sarf Malzemeleri	-	30.00 TL
Mekanik Bağlantı Elemanları	-	100.00 TL
USB Kamera	1 Adet	137.00 TL
TOPLAM		2777.00 TL

Malzemelerin yaklaşık üçte ikilik kısmı Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Komisyon Başkanlığından alınan destekle (Proje No: 2017-50-01-009) karşılanmıştır. Bunun yanısıra güç kaynağı, basit servo motorlar, gövde montaj

parçaları ve bazı elektronik komponentler bölüme ait laboratuvar imkanlarından faydalanılarak kullanılmıştır.

Ortaya konan bu çalışma, hassasiyetine göre değerlendirilecek olursa geliştirme ve iyileştirmelere ihtiyaç duymaktadır. Yukarıda sözü edilen problemler, daha yüksek çözünürlüklü motorlar ve sürücüler kullanılarak, endüstriyel kameralarla stereo görüntü işleme yöntemleri geliştirilerek iyileştirilebilir niteliktedir. Endüstriyel uygulamalarda sisteme hazır olarak entegre edilen çapak temizleyici takımların tasarımı apayrı bir çalışma konusudur ve bu çalışma kapsamında üzerinde durulmamıştır. Ortaya konulan prototipte bu çapak temizleyici takım, titreşim motoruyla tahrik edilen ve piyasada benzer amaçlarla kullanılan bir düzeneğe temsil edilmiştir.

Gelecek çalışmalarda, robot kontrol yöntemlerinden bulanık kontrol, empedans kontrolü, adaptif kontrol, hibrit kontrol gibi robot kontrol algoritmalarından biri kullanılarak uç işlevci ile parça arasında temas kuvvetinin denetimi sağlanacaktır. Öte yandan sistem elektronik kartlar kullanılarak gömülü hale getirilerek robot kolun bilgisayar kontrolünden ve gereksiz kablo karmaşasından kurtarılması sağlanacaktır. Bu şekilde sistem hem portatif ve pratik hale getirilecek, hem de sensör geribeslemelerinden ve kart işlemcisinin hızından yararlanarak sistem verileri kapalı çevrimde ve çok hızlı bir biçimde işlenip gerekli aktüatörlere aktarılabilecektir.

Geliştirilen sistem örnek alınarak, gerekli iyileştirmeler yapıldığında ve sistem parametreleri endüstriyel uygulamaları karşılayabilecek nitelikte seçildiğinde, profesyonel bir çapak temizleme robotu kolaylıkla tasarlanarak üretilebilecektir. Böylece endüstride önemli bir problemin çözümüne katkı sağlanmış olacaktır. Böyle bir sistem gerçekleştirildiğinde ve ticari nitelik kazandığında kısa sürede yaygın kullanım alanı kazanacağı ümit edilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Spong, M. W., Hutchinson, S., Vidyasagar, M., Robot Dynamics and Control, Second Edition. Wiley, 9-22, 2004.
- [2] Iglesias, I., Sebastián, M. A., Ares J. E., Overview of the State of Robotic Machining: Current Situation and Future Potential. *Procedia Eng.*, 132, 911-917, 2015.
- [3] Chen, S. C., Tung, P. C., Trajectory Planning for Automated Robotic Deburring on an Unknown Contour. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 40(7), 957-978, 2000.
- [4] Leitz, L., Franke, V., Aurich, J. C., Burr Formation in Drilling Intersecting Holes, *Proceedings of the CIRP International Conference on Burrs*, 109-115, 2009.
- [5] Ziliani, G., Visioli, A., Legnani, G., A mechatronic approach for robotic deburring. *Mechatronics*, 17(8), 431–441, 2007.
- [6] Tian, F., Lv, C., Li, Z., Liu, G., Modeling and control of robotic automatic polishing for curved surfaces. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 14, 55-64, 2016.
- [7] Calente, C., Oliviera, J., A New Approach For Tool Path Control In Robotic Deburring Operations. *ABCM Symposium Series in Mechatronics*, 1, 124-133, 2004.
- [8] Kosler, H., Pavlovčič, U., Jezeršek, M., Možina, J., Adaptive robotic deburring of die-cast parts with position and orientation measurements using a 3D laser-triangulation sensor. *Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering*, 62(4), 207-212, 2016.
- [9] Kuss, A., Drust, M., Verl, A., Detection of workpiece shape deviations for tool path adaptation in robotic deburring systems. *Procedia CIRP*, 57, 545-550, 2016.

- [10] Princely, F. L., Selvaraj, T., Vision Assisted Robotic Deburring of Edge Burrs in Cast Parts. *Procedia Engineering*, 97, 1906-1914, 2014.
- [11] Akec, J. A., Steiner, S. J., Stenger, F., An Experimental Visual Feedback Control System for Tracking Applications Using a Robotic Manipulator. *Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE*, 2, 1125-1130, 1998.
- [12] La Anh, T., Song, J. B., Robotic Grasping Based on Efficient Tracking and Visual Servoing Using Local Feature Descriptors. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 13(3), 387-393, 2012.
- [13] Ogawa, M., Shimizu, S., Kadogawa, T., et. al., Development of Air Hockey Robot Improving with the Human Players. *IECON 2011 – 37th Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc.*, 3364-3369, 2011.
- [14] Kazerooni, H., Her, M. G., Robotic Deburring of Two Dimensional Parts with Unknown Geometry. *Proceedings., IEEE International Symposium*, 459-464, 1988.
- [15] Lin, L., Song, Y., Yang, Y., Feng, H., Cheng, Y., Pan, H., Computer Vision System R&D for EAST Articulated Maintenance Arm Robot. *Fusion Engineering and Design*, 100, 254-259, 2015.
- [16] Asokan, T., Singaperumal, T., Control of Interaction Impedance Using an Electrohydraulic Servosystem: An Application to Robotic Deburring. *Journal of Materials Processing Technology*, 65(1-3), 172-178, 1997.
- [17] Liu, M. H., Force-Controlled Fuzzy-Logic-Based Robotic Deburring. *Control Engineering Practice*, 3(2), 189-201, 1995.
- [18] Chen, S. C., Tung, P. C., Application of a Self-Regulating Fuzzy Controller for Robotic Deburring on Unknown Contours. *Fuzzy Sets and Systems*, 110(3), 341-350, 2000.
- [19] Rodić, A. D., Vukobratović, M. K., Contribution to the Controller Design in Tasks of Robot Deburring. *Mechanism and Machine Theory*, 30(3), 363-382, 1995.
- [20] Mendes, N., Neto, P., Indirect adaptive fuzzy control for industrial robots: a solution for contact applications. *Expert Systems with Applications*, 42(22), 8929-8935, 2015.
- [21] Elfasakhany, A., Yanez, E., Baylon, K., Salgado, R., Design and Development of a Competitive Low-Cost Robot Arm with Four Degrees of Freedom. *Modern Mechanical Engineering*, 1(02), 47-55, 2011.

- [22] Hamida El Naser, Y., Karayel, D., Ozkan S. S., Atali, G., Talaşlı İmalatta Otomatik Çapak Alma İşlemi için Endüstriyel Robot Kol Tasarımı, 5th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science, Baku, 2017.
- [23] Yosıf, Z. M., Integrating Computer Vision with a Robot Arm System. Çankaya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2014.
- [24] Karaçalı, H., Beş Eklemlı Çapak Alma Robotu Tasarımı. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2012.
- [25] www.support.robotis.com, Erişim Tarihi: 04.02.2018.
- [26] www.emanual.robotis.com, Erişim Tarihi: 04.02.2018.
- [27] www.wikipedia.org, Erişim Tarihi: 11.12.2017.

ÖZGEÇMİŞ

Yusuf H. EL NASER, 24.11.1992'da İstanbul'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Yalova'da tamamladı. 2010 yılında Yalova Şehit Osman Altinkuyu Anadolu Lisesi'nden mezun oldu. 2010 yılında başladığı Yıldız Teknik Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü'nü 2014 yılında bitirdi. 2015 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü'nde lisansüstü eğitimine başladı. 2016 yılında Sakarya Üniversitesi'nde araştırma görevlisi olarak çalışmaya başladı ve yüksek lisans eğitimine Sakarya Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü'nde devam etti. Halen Sakarya Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak görev yapmaktadır.