



**T.C.
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**5 EKSENLİ HİBRİT DELTA ROBOTUN RGB-D KAMERAYLA GÖRSEL
SERVO YAKLAŞIMI İLE YÖNLENDİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Özgür KURT

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Mekatronik Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

MAYIS 2025

**T.C.
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**5 EKSENLİ HİBRİT DELTA ROBOTUN RGB-D KAMERAYLA GÖRSEL
SERVO YAKLAŞIMI İLE YÖNLENDİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Özgür KURT
(21241782029)
ORCID: 0009-0005-6804-8806**

**Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Mekatronik Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı**

**Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Nurettin Gökhan ADAR
ORCID: 0000-0001-6888-5755**

MAYIS 2025

BTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 21241782029 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Özgür KURT, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “5 EKSENLİ HİBRİT DELTA ROBOTUN RGB-D KAMERAYLA GÖRSEL SERVO YAKLAŞIMI İLE YÖNLENDİRİLMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

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

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Ömer KASIM**
Kütahya Dumlupınar Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Mustafa ÖZDEN
Bursa Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi :
Savunma Tarihi : 05 Mayıs 2025



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

Bu tez, TÜBİTAK Bilim İnsanı Destek Programları Başkanlığı (BİDEB) 2210-C Yurt İçi Öncelikli Alanlar Yüksek Lisans Burs Programı kapsamında desteklenmiştir.

İNTİHAL BEYANI

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

Öğrencinin Adı Soyadı: Özgür KURT

İmzası:





Aileme,

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim boyunca kıymetli bilgi ve tecrübeleri ile yoluma ışık tutan, destek olan değerli danışman hocam, Dr. Öğr. Üyesi Nurettin Gökhan Adar'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Her koşulda çalışmalarımı destekleyen ve her zaman yanımda olan annem Zekiye Kurt'a, babam Kamil Kurt'a ve arkadaşlarıma en içten sevgilerimi sunar, sonsuz teşekkür ederim.

2210-C Yurt İçi Öncelikli Alanlar Yüksek Lisans Burs Programı kapsamında tez çalışmalarımı desteklediği için TÜBİTAK Bilim İnsanı Destek Programları Başkanlığı'na (BİDEB) ayrıca teşekkür ederim.

Mayıs 2025

Özgür KURT

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	viii
KISALTMALAR	ix
SEMBOLLER	x
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xviii
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	2
1.2 Literatür Araştırması	3
2. BEŞ EKSENLİ HİBRİT DELTA ROBOT MODELİ	7
2.1 Paralel Robotlar	7
2.2 Delta Robot Çeşitleri	8
2.2.1 Prizmatik (linear) eklemlili delta robot	8
2.2.2 Döner (revolute) eklemlili delta robot.....	9
2.3 Beş Eksenli Hibrit Delta Robot Kinematik Modeli	10
2.3.1 İleri kinematik denklemler	13
2.3.2 Ters kinematik denklemler.....	21
2.3.3 Dinamik robot yörünge planlanması.....	24
3. BEŞ EKSENLİ HİBRİT DELTA ROBOT GELİŞTİRİLMESİ.....	29
3.1 Mekanik Tasarım.....	29
3.2 Donanım	37
3.3 Yazılım	40
4. GÖRSEL SERVO İLE KONTROL	43
4.1 Görüntü Tabanlı Görsel Servo Yöntemi (IBVS).....	43
4.2 Pozisyon Tabanlı Görsel Servo Yöntemi (PBVS)	44
4.3 Kamera Robot Kalibrasyonu	44
4.4 Geliştirilen Pozisyon Tabanlı Görsel Servo Yöntemi	49
4.5 YOLO11 ile Segmentasyon	55
4.6 ICP ile Yörünge Noktalarını Güncelleme	62
5. SONUÇ.....	67
KAYNAKLAR	69
ÖZGEÇMİŞ.....	73

KISALTMALAR

CAD	: Computer Aided Design
CAN	: Controller Area Network
CNC	: Computer Numerical Control
DH	: Denavit Hartenberg
DOF	: Degree of Freedom
FOC	: Field Oriented Control
FPGA	: Field Programmable Gate Array
FPS	: Frames Per Second
IBVS	: Image Based Visual Servoing
ICP	: Iterative Closest Point
IMU	: Inertial Measurement Unit
ISO	: International Organization for Standardization
MAP	: Mean Average Precision
PBVS	: Position Based Visual Servoing
RCNN	: Region based Convolutional Neural Network
RGB	: Red Green Blue
RGBD	: Red Green Blue Depth
TMN	: Takım Merkezi Noktası
TOF	: Time of Flight
YOLO	: You Only Look Once

SEMBOLLER

a_{i-1}	: z eksenleri arasındaki mesafe
Θ_4	: 4.döner eksen açısı
Θ_5	: 5.döner eksen açısı
Θ_i	: x eksenleri arasındaki açı
d_1	: 1.prizmatik eksenin Dünya eksenine göre z değeri
d_2	: 1.prizmatik eksenin Dünya eksenine göre z değeri
d_3	: 1.prizmatik eksenin Dünya eksenine göre z değeri
$d_{\text{Pivot-4}}$	: Pivot ve 4.eklemin x eksenleri arasındaki mesafe
$d_{5\text{-TMN}}$	: 5.eklem ve TMN eklemin x eksenleri arasındaki mesafe
P_x	: Pivot merkezinin Dünya eksenine göre x değeri
P_y	: Pivot merkezinin Dünya eksenine göre y değeri
P_z	: Pivot merkezinin Dünya eksenine göre z değeri
T_1	: 1.prizmatik eksenin merkezi
T_2	: 2.prizmatik eksenin merkezi
T_3	: 3.prizmatik eksenin merkezi
α_{i-1}	: z eksenleri arasındaki açı
R	: Delta robotun üst yüzeyinin yarıçapı
r	: Delta robotun pivot kısmının yarıçapı
x_i	: Dünya eksenine göre değişken prizmatik eksenin x değeri
y_i	: Dünya eksenine göre değişken prizmatik eksenin y değeri
z_i	: Dünya eksenine göre değişken prizmatik eksenin z değeri
β_i	: Prizmatik eksenlerin arasındaki değişken açı
E_i	: Değişken x, y, z değerlerinden oluşan denklem
V_i	: Değişken x ve y, x ve z değerlerinden oluşan denklem
N_i	: Değişken x ve y, x ve z değerlerinden oluşan denklem
k_2	: x, E, V değerlerinden oluşan denklem
m_2	: y, E, N değerlerinden oluşan denklem

$\overrightarrow{OO_p}$	: Pivot merkezinin Dünya eksenine göre konum vektörü
$\overrightarrow{OT_i}$	: Prizmatik eksenlerin Dünya eksenine göre konum vektörü
$\overrightarrow{T_i \text{ Pivot}_i}$	: Pivotlara prizmatik eksenlerine göre konum vektörü
$\overrightarrow{\text{Pivot}_i O_p}$	: Pivot merkezinin pivotlara göre konum vektörü
Kol	: Paralel kolların uzunluğu
$\begin{smallmatrix} \text{Dünya} \\ \text{Pivot} \end{smallmatrix} T$	: Pivot ekseninin Dünya eksenine göre dönüşüm matrisi
$\begin{smallmatrix} \text{Pivot} \\ 4.\text{Eksen} \end{smallmatrix} T$	: 4.eksenin Pivot eksenine göre dönüşüm matrisi
$\begin{smallmatrix} 4.\text{Eksen} \\ 5.\text{Eksen} \end{smallmatrix} T$	: 5.eksenin 4.eksene göre dönüşüm matrisi
$\begin{smallmatrix} 5.\text{Eksen} \\ \text{TMN} \end{smallmatrix} T$	: TMN ekseninin 5.eksene göre dönüşüm matrisi
$\begin{smallmatrix} \text{Dünya} \\ \text{TMN} \end{smallmatrix} T$	: TMN ekseninin Dünya eksenine göre dönüşüm matrisi
$\begin{smallmatrix} \text{Dünya} \\ \text{TMN} \end{smallmatrix} R$	: TMN ekseninin Dünya eksenine göre dönme matrisi
TMN_x	: TMN merkezinin Dünya eksenine göre x değeri
TMN_y	: TMN merkezinin Dünya eksenine göre y değeri
TMN_z	: TMN merkezinin Dünya eksenine göre z değeri
$\begin{smallmatrix} \text{TMN} \\ \text{Pivot} \end{smallmatrix} P$	: TMN eksenine göre Pivot 'un pozisyon vektörü
$\begin{smallmatrix} \text{TMN} \\ \text{Pivot} \end{smallmatrix} T$	: Pivot ekseninin TMN eksenine göre dönüşüm matrisi
$\begin{smallmatrix} \text{Dünya} \\ \text{Pivot} \end{smallmatrix} R$	: Pivot ekseninin Dünya eksenine göre dönme matrisi
$\begin{smallmatrix} \text{Pivot} \\ 4.\text{Eksen} \end{smallmatrix} R$	: 4.eksenin Pivot eksenine göre dönme matrisi
$\begin{smallmatrix} 4.\text{Eksen} \\ 5.\text{Eksen} \end{smallmatrix} R$	: 5.eksenin 4.eksene göre dönme matrisi
$\begin{smallmatrix} 5.\text{Eksen} \\ \text{TMN} \end{smallmatrix} R$	: TMN eksenin 5.eksene eksenine göre dönme matrisi
$\begin{smallmatrix} \text{Dünya} \\ \text{Nesne} \end{smallmatrix} T$	: Nesne ekseninin Dünya eksenine göre dönüşüm matrisi
$\begin{smallmatrix} \text{Nesne} \\ n.\text{Nokta} \end{smallmatrix} T$	: n. Nokta ekseninin Nesne eksenine göre dönüşüm matrisi
$\begin{smallmatrix} \text{Dünya} \\ n.\text{Nokta} \end{smallmatrix} T$	: n. Nokta ekseninin Dünya eksenine göre dönüşüm matrisi
$\begin{smallmatrix} \text{Dünya} \\ \text{Nesne2} \end{smallmatrix} T$	: Nesne2 ekseninin Dünya eksenine göre dönüşüm matrisi
$\begin{smallmatrix} \text{Dünya} \\ \text{Yeni n. Nokta} \end{smallmatrix} T$	: Yeni n. Nokta ekseninin Dünya eksenine göre dönüşüm matrisi
$\begin{smallmatrix} \text{Dünya} \\ \text{KAM} \end{smallmatrix} T$	: Kamera ekseninin Dünya eksenine göre dönüşüm matrisi
$\begin{smallmatrix} \text{TMN} \\ \text{İşaret} \end{smallmatrix} T$	: Aruco işaretçi ekseninin TMN eksenine göre dönüşüm matrisi
$\begin{smallmatrix} \text{İşaret} \\ \text{KAM} \end{smallmatrix} T$	: Kamera ekseninin Aruco işaretçi eksenine göre dönüşüm matrisi

Dünya Derinlik T	: Kamera derinlik ekseninin Dünya eksenine göre dönüşüm matrisi
RGB Derinlik T	: Kamera derinlik ekseninin RGB eksenine göre dönüşüm matrisi
Derinlik n. Nokta T	: n. Nokta ekseninin derinlik eksenine göre dönüşüm matrisi
Kaynak Hedef T	: Hedef nokta bulutları ekseninin kaynak nokta bulutları eksenine göre dönüşüm matrisi
Hedef Kaynak T	: Kaynak nokta bulutları ekseninin hedef nokta bulutları eksenine göre dönüşüm matrisi



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Dönme eksenleri için Modifiye Denavit Hartenberg parametreleri.	18
Çizelge 3.1 : Makerbase Servo42D ürünün özellikleri [31].	39
Çizelge 3.2 : Robotun eksenlerinde kullanılan step motorlar ve özellikleri [32].	39
Çizelge 4.1 : Intel Realsense D435i kamera özellikleri [40].	54
Çizelge 4.2 : YOLO11 derin öğrenme modelinin parametreleri.	60



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Paralel ve seri robot karşılaştırması.....	7
Şekil 2.2 : Prizmatik eklemli 3 eksen delta robot [22].	9
Şekil 2.3 : Döner eklemli 3 eksen delta robot [23].	9
Şekil 2.4 : Delta robot türleri, a)2 DOF igus marka [24], b)DOF Deltax marka [23], c)3 DOF Trilab3D marka [22], d)4 DOF Omron marka [25], e)5 DOF ABB marka [26].	10
Şekil 2.5 : Geliştirilen 5 eksenli hibrit delta robotun önden görünümü.....	11
Şekil 2.6 : Robot görünümü, a)izometrik görüntüsü, b)döner eksenlerin yakından görüntüsü.	11
Şekil 2.7 : Noktaların gösterilmesi, a)kinematik denklemler için ilk üç eksen gösterimi, b)hareketli pivot olan kısmın gösterimi.	12
Şekil 2.8 : Trilateration ile 3 kürenin kesişimi kullanılarak kinematik zincir oluşturulması.	13
Şekil 2.9 : Noktaların gösterilmesi, a)delta robotun üstten görünümü, b)pivotun üstten görünümü.	14
Şekil 2.10 : 5 eksenli hibrit delta robotun ileri kinematik çözüm aşamaları.	17
Şekil 2.11 : Üçüncü prizmatik eksenin geometrisi.	17
Şekil 2.12 : Dünya, Pivot, TMN eksenleri arasındaki dönüşüm matrisleri.	18
Şekil 2.13 : Modifiye Denavit Hartenberg için eksenlerin gösterimi, a)plastik parça ile görünümü, b)plastik parça olmadan görünümü.	19
Şekil 2.14 : Pivot eksen ve 4.eksen arasında dönüşüm.	20
Şekil 2.15 : 4.eksen ve 5.eksen arasındaki dönüşüm.	20
Şekil 2.16 : 5.eksen ve TMN eksen arasındaki dönüşüm.	21
Şekil 2.17 : Dünya, Pivot, TMN eksenleri arasındaki dönüşüm matrisleri.	23
Şekil 2.18 : Montaj yapılacak nesne, a)eksen tanımlanması, b)nesnenin CAD modeli.....	25
Şekil 2.19 : Nesne eksenine göre tanımlanan robotun gideceği 4 nokta.	25
Şekil 2.20 : Nesnenin farklı pozları, a)nesnenin başlangıç pozu, b)nesnenin z eksen etrafında 45 derece döndürülmüş poz.	26
Şekil 2.21 : Nesnenin 45 derece döndürülmüş pozuna göre otomatik oluşan robotun gideceği noktalar.	27
Şekil 3.1 : Robotun genel görünümü ve elemanları.....	29
Şekil 3.2 : Hareketli platform üzerindeki robot elemanları.	30
Şekil 3.3 : İlk üç eksen de kullanılan parçalar, a)dişli kasnak, b)avare kasnak, c)zamanlayıcı kayış.	30
Şekil 3.4 : Robotun ilk üç eksen görünümü, a)lineer rayların görünümü, b)üst tarafının yakından görünümü.	31
Şekil 3.5 : Prizmatik eksenlerin hareketi.	32
Şekil 3.6 : Robotun alt kısmı, a)taban görünümü, b)tabanda bulunan sabit platform.	32

Şekil 3.7 : Robotun üst kısmı, a)üstten görünüm, b)pleksi parça, c)kablolar için plastik parça.....	33
Şekil 3.8 : Prizmatik eksen parçaları, a)arabanın montajlanmış görünümü, b)lineer araba, c)metal taşıyıcı, d)metal mesafe aparatı, e)küresel eklem.....	34
Şekil 3.9 : Paralel kolların görünümü, a)kolun bütün görünümü, b)karbon fiberden üretilen tekli kol, c)yayların sabitlenmesi için plastik aparat, d)metal yay.....	34
Şekil 3.10 : 4. eksen görünümü, a)bağlantı elemanlarının montajlanmış görünümü, b)montajlanmamış görünümü.	35
Şekil 3.11 : 5. eksen görünümü, a)bağlantı elemanlarının montajlanmış görünümü, b)montajlanmamış görünümü.	36
Şekil 3.12 : 4. eksen referans noktaları, a)montajlı görünümü, b)montajlanmamış görünümü.	37
Şekil 3.13 : 5. eksen referans noktaları, a)montajlı görünümü, b)montajlanmamış görünümü.	37
Şekil 3.14 : Makerbase Servo42D ürünü, a)montajlı görünümü, b)parçaların ayrı ayrı görünümü [31].....	38
Şekil 3.15 : Robotun motorlarının bağlantıları ve haberleşmesi [31].....	40
Şekil 3.16 : Prizmatik eksenler için RS485 paketi [33].....	41
Şekil 3.17 : Döner eksenler için RS485 paketi [33].	41
Şekil 3.18 : Matplotlib, Tkinter ve Python kullanılarak geliştirilen kinematik arayüz.	42
Şekil 4.1 : Görüntü tabanlı görsel servo yöntemi [34].....	44
Şekil 4.2 : Pozisyon tabanlı görsel servo yöntemi [34].	44
Şekil 4.3 : Robot kamera kalibrasyonu, a)dönüşüm matrislerinin gösterilmesi, b) kalibrasyon için robotun farklı konumu.	45
Şekil 4.4 : Dünya eksenine göre RGB kameranın gösterimi.	47
Şekil 4.5 : Intel Realsense kamerasının RGB ve derinlik eksenlerinin birbirine göre konumsal ilişkisi [40].....	48
Şekil 4.6 : Derinlik kamera ekseninin RGB eksenine göre dönüşüm matrisi [41]... ..	48
Şekil 4.7 : Robot kamera kalibrasyonu ile bulunan kameranın RGB eksen ve derinlik ekseninin birlikte gösterilmesi.	49
Şekil 4.8 : 5 eksenli delta robot için geliştirilen görsel servo yöntemi [41].	50
Şekil 4.9 : Montaj yapılacak nesne ve robot noktaları a)farklı bir poz, b)başlangıç poz, c)farklı bir poz.....	51
Şekil 4.10 : Delta robotun iş parçasının ilk deliğine dik açıda montaj yapması [42].....	51
Şekil 4.11 : Delta robotun nesnenin ikinci deliğine eğimli açıda montaj yapması [42].....	52
Şekil 4.12 : Intel derinlik kamerasının delta robota montajının genel görünümü [42].....	53
Şekil 4.13 : Intel derinlik kamerasının robota montajının yandan görünümü [42]. ..	53
Şekil 4.14 : Intel Realsense D435i derinlik kamerası [41].	54
Şekil 4.15 : Intel Realsense D435i kamerasından elde edilen görüntüler, a)RGB görüntü, b)aynı kameradan elde edilen derinlik görüntüsü.	55
Şekil 4.16 : YOLO11 modeli mimari özeti [43].....	57
Şekil 4.17 : YOLO modellerinin birbiri ile performans karşılaştırılması [44].	58
Şekil 4.18 : Montaj yapılacak nesnenin tespiti için veri seti oluşturulması.....	58
Şekil 4.19 : Montaj yapılacak nesnenin segmentasyon için etiketlenmesi.	59

Şekil 4.20 :	YOLO11 nano modelinin eğitim sırasındaki performans metrik grafikleri, a)mAP50 metriği, b)kesinlik metriği, c)duyarlılık metriği. ...	60
Şekil 4.21 :	RGBD kameradan alınan veriler, a)RGB görüntü, b)derinlik görüntüsü, c)derinlik görüntüsüne göre oluşturulan nokta bulutları.	61
Şekil 4.22 :	YOLO11 modelinin tahmin çıktıları, a)Intel Realsense D435i kamerasından alınan RGB tahmini, b)segmentasyon maskesinin derinlik görüntüsüne uygulanması.	61
Şekil 4.23 :	YOLO11 modelinin segmentasyon maskesi çıktıları, a)RGB görüntü segmentasyon maske çıktısı, b)derinlik görüntüsü çıktısı, c)RGB görüntüye göre elde edilen nokta bulutları.....	62
Şekil 4.24 :	ICP'nin çalışma mantığı gösteren görsel [45].	62
Şekil 4.25 :	Montaj yapılacak iş parçası nesnenin CAD modelinin başlangıç pozu.	63
Şekil 4.26 :	Nokta bulutları, a)kameradan alınan nokta bulutları, b)kameradan alınan nokta bulutları ile CAD modelin hizalanması, c)hizalanan CAD modelin nokta bulutlarının içinden ayrıştırılması.	64
Şekil 4.27 :	Montaj yapılacak nesnenin nokta bulutları, a)CAD modelden oluşturulan kaynak modelin nokta bulutları, b)kameradan alınan hedef modelin nokta bulutları.	65

5 EKSENLİ HİBRİT DELTA ROBOTUN RGB-D KAMERAYLA GÖRSEL SERVO YAKLAŞIMI İLE YÖNLENDİRİLMESİ

ÖZET

Gelişen görüntü işleme ve yapay zekâ teknolojilerinin robotik sistemlere entegrasyonu ile beraber üretim yöntemleri önemli ölçüde dönüşmeye başlamıştır. Geleneksel robotik yöntemlerinin aksine, günümüzde robotlar, derin öğrenme modelleri ve bilgisayarla görme yöntemleri sayesinde çevrelerini algılayabilmekte ve farklı durumlara göre karar alabilmektedir. Ancak geleneksel yöntemlerle programlanan robotik sistemlerde, iş parçalarının sabit konumda kalması gerekmekte ve robotların ya da parçaların konum değiştirmesi durumunda sistemin tekrar programlanması gerekmektedir. Bu tür durumlar, özellikle zaman ve iş gücü verimliliği anlamında önemli dezavantajlar oluşturmakla beraber üretim süreçlerinde esnekliğin azalmasına sebep olmaktadır. Bu durum, yenilikçi ve akıllı robotik yöntemlerin uygulanmasını gerekli hâle getirmektedir.

Bu tez çalışmasında, pozisyon tabanlı görsel servo yöntemi geliştirilerek, iş parçalarının konum ve oryantasyonundaki farklılıklara rağmen robotun otonom şekilde görevini gerçekleştirebildiği ve geleneksel robot programlama ihtiyacını ortadan kaldırılmasını sağlayacak beş eksenli hibrit delta robot sisteminin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Delta robotlar yüksek hız ve hassasiyet avantajları sayesinde endüstride yaygın bir şekilde tercih edilmektedir. Bu kapsamda, düşük maliyetli ve yüksek doğrulukta çalışabilecek şekilde yeni bir hibrit delta robot kinematik modeli geliştirilmiş ve ayrıca fiziksel olarak test edilmiştir. Derinlik kamerası kullanılarak ortamdaki görsel verilerin işlenmesi sağlanarak, hibrit delta robotun görevini geleneksel yöntemlerin kullanılmasına gerek kalmadan otonom bir şekilde gerçekleştirmesi hedeflenmiştir. Geliştirilen sistem ile beş eksenli hibrit delta robotun montaj uygulamalarını etkin bir şekilde yerine getirmesi amaçlanmıştır. Robotun montaj yapacağı iş parçasının tespit edilmesi için RGB görüntü üzerinde YOLO11 segmentasyon modeli uygulanmakta; elde edilen segmentasyon maskesi aracılığıyla tespit edilen nesneye ait nokta bulutu verisi ayrıştırılmaktadır. Bu nokta bulutu üzerinde Yinelemeli En Yakın Nokta (Iterative Closest Point) algoritması uygulanarak, nesnenin başlangıç pozuna göre üç boyutlu uzaydaki konumu ve oryantasyonu belirlenmesi hedeflenmiştir. Böylece robotun çevresindeki nesneleri algılayarak insan müdahalesine ihtiyaç duymaksızın görevini otonom bir şekilde sürdürebilecek yetkinliğe ulaşması amaçlanmıştır. Bu yaklaşım, hem teorik bilgilerin pratik uygulamalara dönüştürülmesini hem de robotikte bilgisayarla görme yöntemlerinin gerçek dünya problemleri üzerindeki etkinliğini ortaya koymayı amaçlamaktadır. Geliştirilen robotik sistem, yapay zekâ ve nokta bulutları işleme algoritmalarının fiziksel olarak test edilebildiği, esnek ve yenilikçi bir altyapı sunarak literatüre katkı sağlaması hedeflenmiştir.

Anahtar kelimeler: Hibrit delta robot, Görsel servo kontrolü, Nesne tespiti, Nokta bulutları.

GUIDANCE OF 5-AXIS HYBRID DELTA ROBOT WITH RGB-D CAMERA USING VISUAL SERVO APPROACH

SUMMARY

Integrating image processing and artificial intelligence algorithms into robotic systems has significantly transformed modern manufacturing processes. Modern robotic systems are capable of perceiving their environments and making decisions thanks to deep learning models and computer vision techniques, unlike traditional robotic systems. In traditional robotic systems, the position or orientation of workpieces must remain fixed, and any change in the position or orientation of either the robot or the workpieces requires reprogramming the robot. Such constraints create significant disadvantages, especially in terms of time efficiency and labor productivity, and lead to reduced flexibility in production processes. Therefore, the adoption of innovative and intelligent robotic techniques has become increasingly essential.

In this thesis, a five-axis hybrid delta robot kinematic model is developed to facilitate autonomous operation through a position-based visual servoing method. The robotic system is designed to perform effectively despite changes in the position and orientation of the robot workpieces, thereby eliminating the need for manual reprogramming. Delta robots are commonly used in industrial applications due to their high speed and high accuracy advantages. In this context, a new kinematic model of a hybrid delta robot has been developed with a focus on low cost and high accuracy, and its functionality has also been tested under physical and experimental conditions. 3D point clouds and RGB images are acquired and processed using an RGBD camera, allowing the robot to autonomously perform robotic assembly tasks without manual reprogramming. In this system, a five-axis hybrid delta robot is intended to perform the assembly operation. In order to detect the workpiece to be assembled by the delta robot, YOLO11 segmentation is applied to the RGB image only. Using the segmentation mask obtained from the model, the point cloud data corresponding to the detected object is extracted from the depth frame. The Iterative Closest Point (ICP) algorithm is then applied to the extracted point cloud to accurately determine the object's position and orientation in three-dimensional space based on the object's initial pose. Thus, it is aimed that the delta robot will be able to perceive the objects around it and gain the competence to continue its task autonomously without the need for human intervention. This approach aims to translate theoretical knowledge into practical applications and to demonstrate the effectiveness of computer vision methods in robotics for solving real-world problems. The developed robotic system aims to contribute to the literature by providing a flexible and innovative infrastructure where artificial intelligence, image processing, and point cloud processing algorithms can be physically tested.

Keywords: Hybrid delta robot, Visual servoing, Object detection, Point clouds.

1. GİRİŞ

Endüstri 4.0 ve akıllı fabrikalar sistemleri günümüzde son derece önem kazanmıştır. Robotik ve otomasyon sistemleri bir dönüşüm içerisine girmektedir. Üretimin verimliliğini arttırmak ve insan kaynaklı hataların önüne geçmek için üretimde insanlar yerine robot otomasyonunun kullanımı son derece yaygınlaşmaktadır. Dijitalleşme, nesnelerin interneti, yapay zekâ ve büyük veri kullanılarak üretim yöntemlerinde büyük kapasite artışları sağlanmaktadır.

Robotik sistemler geleneksel yöntemler yerine kamera, sensör gibi donanımlar ile entegre çalışarak görüntü işleme ve yapay zekâ yazılımları ile kullanılmaktadır. Bu sayede robotlar bulundukları ortamları algılayabilmekte ve akıllı algoritmalar ile kendi kendilerine karar alabilmektedirler. Robotik sistemlerin, insan ve çevreyle güvenli ve verimli bir etkileşim gerçekleştirebilmesi için kamera ve sensörlerden elde edilen verilerle yörünge planlarının otomatik olarak güncellenmesi gerekmektedir. Böylece robotlar, gerçek zamanlı etkileşim ve adaptasyon yeteneği kazanarak Endüstri 4.0'ın temel hedeflerinden biri olan akıllı üretim süreçlerinin iyileştirilmesinde büyük katkı sağlamaktadır.

Endüstride delta robotların kullanımı önemli bir kullanım alanına sahiptir. Özellikle üretim alanında yüksek hız ve ivme gerektiren al bırak uygulamalarında tercih edilmektedir. Delta robotlar, üretim hatlarında küçük ve hafif nesnelerin hızlı taşınması gereken uygulamalar için idealdir. Konumları belirsiz olan nesnelerin yerlerinin tespit edilmesi için sıklıkla görüntü işleme yöntemleri ile kullanılmaktadır. Yapısal olarak genellikle 3 eksenli olan delta robotların, uygulama ihtiyacına bağlı olarak 4 ya da 5 eksenli versiyonları da mevcuttur. Bu çeşitlilik, daha karmaşık hareketlerin gerçekleştirilmesine ve ek serbestlik derecelerine olanak tanır. Delta robotlar eklem türlerine döner, prizmatik ve hibrit yapıda olmak üzere farklı çeşitleri vardır. Hibrit yapıdaki delta robotlar, her iki eklem türünü bir arada barındırarak hem dönme hem de doğrusal hareket kabiliyeti sunmaktadırlar.

1.1 Tezin Amacı

Bu tezin temel amacı, beş eksenli hibrit bir delta robot geliştirerek, bu robotun yapay zekâ algoritmalarıyla entegre şekilde çalışmasını sağlamak ve böylelikle çevresini algılayabilen, otonom biçimde görevlerini yerine getirebilen bir robotik sistem oluşturmaktır. Geliştirilecek bu sistem sayesinde robotlar, çevrelerinden elde ettikleri verileri yorumlayarak karar alma mekanizmalarını kendi başlarına yürütebilecek ve böylece geleneksel yöntemlere kıyasla daha verimli ve esnek bir şekilde çalışabileceklerdir.

Bu hedef doğrultusunda, literatürde başarısı kanıtlanmış olan YOLO11 (You Only Look Once) segmentasyon ve ICP (Iterative Closest Point) algoritmaları kullanılmıştır. YOLO11 algoritması yardımıyla robotun çevresinde yer alan nesneler tespit edilerek ve sonrasında ICP algoritması ile bu nesnelerin uzaydaki pozisyon ve oryantasyon bilgileri hesaplanması hedeflenmiştir. Robotun, hesaplanan bu bilgileri kullanarak belirlenen görevlerini yerine getirmesi sağlanacaktır.

Algoritmaların gerçek dünya problemleri üzerinde test edilebilmesi ve uygulanabilirliğinin pratik olarak değerlendirilebilmesi amacıyla, düşük maliyetli, beş eksenli hibrit yapıya sahip bir delta robot prototipi geliştirilmiş ve gerçek donanımlar kullanılarak fiziksel olarak test edilmiştir. Tasarlanan bu fiziksel platform, yapay zekâ algoritmalarına yönelik çalışmaların yürütülebileceği hem akademik araştırmalar hem de endüstrideki problemlerin çözülmesi için uygun bir deney ortamı sunmaktadır.

Delta robotun tercih edilmesinin temel gerekçeleri arasında, sahip olduğu paralel kinematik yapının sunduğu yapısal avantajlar yer almaktadır. Bu yapılar, düşük atalet sayesinde yüksek hızda hareket edebilme, yüksek konumlama doğruluğu ve üstün tekrarlanabilirlik gibi kritik performans kriterleri öne çıkmaktadır. Ayrıca, sistemin genel mekanik yapısının daha sade olması, redüksiyon gibi pahalı bileşenlerin kullanılmasına gerek olmadan doğruluk anlamında başarı sağlamaktadır.

Buna ek olarak, delta robotların üretim maliyetleri, seri kinematik yapıya sahip manipülatörlere kıyasla çok daha uygun olup, bu durum sistemin daha geniş bir kullanıcı kitlesi tarafından erişilebilir ve yeniden üretilebilir olmasına olanak tanımaktadır. Böylece, geliştirilen robotik platform hem araştırma ve geliştirme faaliyetleri için ekonomik bir alternatif sunmakta hem de fiziksel sistemlerin gerçek

dünya problemleri için test edilmesi anlamında yaygınlaştırılabilir bir çözüm olarak öne çıkmaktadır.

Bu tez kapsamında geliştirilen sistemin, yapay zekâ ve bilgisayarla görme algoritmalarının robotik uygulamalara entegre edilebildiği, düşük maliyetli bir çözüm olarak hem akademik hem de endüstriyel çalışmalarda kullanılabilir olması hedeflenmektedir.

1.2 Literatür Araştırması

Reymond Clavel 1998 yılında, üç serbestlik derecesine (DOF) sahip ve üç özdeş bacaklı bir manipülatör olan delta robotu tanıtmıştır. Bu tasarım, uç işlevcisinin (end effector) yalnızca uzayda öteleme hareketi gerçekleştirmesine olanak tanımaktadır. Delta robot, yüksek hız ve hassasiyet gerektiren endüstriyel uygulamalar için devrim niteliğinde bir çözüm olup ve robotik alanında önemli bir yer edinmiştir [1].

Robotların performanslarının değerlendirilmesi için doğruluk ve tekrarlanabilirlik parametreleri son derece önemlidir. Tasarımı ve prototipi yapılan lineer bir delta robotun ISO 9283 standardına göre yapılan değerlendirmenin sonucunda ortalama doğruluk 1,25 mm ve ortalama tekrarlanabilirlik 1,45 mm ölçülmüştür [2].

Hendriko ve arkadaşları 5 eksenli delta robotun ters kinematik çözümleri için analitik bir metot geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri analitik metodu, simülasyon programında her bir motor için doğrulamışlardır. Analitik yöntemi, nümerik yöntemle kıyaslamışlardır [3].

Hassasiyet, kuvvet ve sertlik (stiffness) gerektiren uygulamalarda lineer delta robotlar avantajlar sağlamaktadır. Farklı konfigürasyonlara sahip lineer delta robotlar montaj uygulamaları olduğu kadar al-bırak (pick and place) uygulamalarında da kullanılabilir [4].

Wu ve arkadaşları yeni bir tür 5 eksen hibrit delta robot geliştirmişlerdir. Geleneksel 3 eksen delta robota ek olarak iki döner eksen eklemişlerdir. Bu hibrit robotun montaj ve al-bırak uygulamalarını yüksek hız ve yüksek doğrulukta gerçekleştirebildiğini kanıtlamışlardır [5].

Delta robotların özellikleri göz önüne alındığında başarılı paralel robotlardan biri olarak sayılmaktadırlar. Mehrafruz ve arkadaşları kinematik hassasiyetleri (sensivity) bakımından döner eklemlili ve prizmatik eklemlili delta robotları kıyaslamışlardır [6].

Paralel robotların insan-sistem etkileşimleri, tıbbi robotlar, rehabilitasyon ve dış iskelet sistemleri gibi birçok alanda da uygulamaları bulunmaktadır. Bu çalışmada, üç serbestlik derecesine sahip paralel robotların optimum tasarımı için çok amaçlı bir yöntem sunulmuştur. Tasarım, çalışma alanı sınırları, iletim kalitesi endeksi ve sertlik gibi dört optimalite kriteri göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmiştir [7].

Gao ve Wang, düşük maliyetli 4 eksenli üç boyutlu baskı ile üretilmiş delta robot geliştirmiştir. Bu robot ile görsel servo yöntemi kullanarak al bırak uygulaması test edilmiştir [8].

Yamtuan ve arkadaşları görsel servo yöntemi kullanarak düşük maliyetli bir delta robotun gerçek dünya koşullarında otonom bir şekilde al bırak uygulaması gerçekleştirmiştir. Robotun yüksek hareket doğruluğu ve hassas hareket tekrarı sağlamak amacıyla düşük maliyetli delta robot ve kinematik noktasal kontrol sistemi geliştirilmiş, ardından simüle edilmiştir. Düşük maliyetli bu delta robot kullanılarak ürünlerin ayrılmasında, sınıflandırılması ve paketlenmesi gibi birçok endüstriyel uygulamada sıra dışı avantajlar sağlamaktadır [9].

Delta robotun, hareketli bir konveyör üzerindeki parçaları toplamak ve yerleştirmek amacıyla görsel servo yöntemi geliştirilmiştir. Robotun hareket planlaması için ileri ve ters kinematik denklemleri ile nesneleri tanımak için görüntü işleme yöntemi entegre edilmiştir. Delta robotun konveyör üzerindeki parçaları otomatik olarak toplaması ve yerleştirmesi sağlanmıştır. Deneysel sonuçlar, önerilen yöntemin etkinliğini doğrulamaktadır [10].

Başka bir hareketli konveyör uygulamasında, delta robot nesnelerin algılanması ve ayrıştırılmasında test edilmiştir. Ancak bu tür uygulamalarda nesne algılama, gerçek zamanlı görüntü işleme ve hassas yörünge planlaması gibi önemli zorluklar bulunmaktadır. Bu tür zorluklara rağmen çalışmada geliştirilen yöntem karmaşık şekilleri yüksek doğrulukla tanıma konusunda başarılı sonuçlar vermiştir [11].

Cong ve arkadaşları düşük maliyetli bir kamera kullanarak birlikte görüntü işleme ile al bırak uygulaması için bir delta robot prototipi geliştirmişlerdir. Görsel sistem, robotun nesneleri algılaması, üç boyutlu koordinatlarını ve boyutlarını hesaplaması

amacıyla entegre edilmiştir. Nesnelerin boyutu 1 milimetreden daha az hata ile hesaplanabilmektedir. Görsel veriler, robotun motorlarının dönme açılarına dönüştürülerek robotun nesneleri uygun şekilde kavraması sağlanmıştır [12].

Chen ve arkadaşları delta robot için FPGA (Field Programmable Gate Array) tabanlı görsel servo takip yöntemi geliştirmişlerdir. Deneysel sonuçlar, önerilen FPGA tabanlı görsel servo sistemi ile delta robotların nesne takip performansının önemli ölçüde iyileştirildiğini göstermektedir. Ayrıca, önerilen yöntem açık çevrim kontrol sistemine kıyasla daha yüksek izleme hassasiyeti ve dinamik takip başarımı sunmaktadır [13].

Başka bir çalışmada delta robotun kinematik analizi için 2 boyutlu kamera kullanılmıştır. Sabit bir konuma yerleştirilen kamera manipüle edilen konumu yüksek doğrulukta tahmin ederek, gerçek zamanlı olarak kinematik analizini gerçekleştirmişlerdir. Paralel mekanizmaların kinematik parametrelerinin hassas bir şekilde belirlenmesi nesne manipülasyonu başarısını arttırmaktadır [14].

Yang ve arkadaşları nesne yakalamak için bir delta robot geliştirmiş ve derinlik kamerası kullanarak görsel servo kontrol yöntemini delta robota uygulamışlardır. Önerdikleri robot yapısı ve kontrol algoritmasının uygulanabilirliğini, karada ve su altında gerçekleştirilen deneyler ile başarılı bir şekilde doğrulamışlardır [15].

Otomasyon üretim hatlarında yüksek hızlı al bırak uygulamaları gerçekleştirmek için delta robotlarda görsel tabanlı bir kontrol stratejisi uygulanmıştır. Farklı pozlarda gelen nesneleri hareketli bir konveyörden vakumlu tutucu aracılığıyla alarak başka bir konveyöre sıralı bir şekilde yerleştirmek için delta robot doğru bir seçenek olmaktadır. Görüntü işleme ile nesnelerin konumu ve şekli tespit edilerek robotun nesneleri tutması sağlanmaktadır. Delta robot üzerinde yapılan deneyler, önerilen stratejinin etkinliğini ve geçerliliğini göstermektedir [16].

Endüstriyel otomasyonda artan ihtiyaçlar sebebiyle otomatik montaj sistemlerine olan talep artmaktadır. Bu doğrultuda, tam otomatik ve akıllı bir cıvata montaj sistemi için, görme sensörlerine dayalı yeni bir robotlu cıvata sıkma stratejisi önerilmektedir. Bu yöntemde iki boyutlu görüntüler ile üç boyutlu nokta bulutları ile birleştirilerek iş parçalarının pozisyonu yüksek hassasiyetle belirlenmiştir. Uygulamalı deneylerle delik konumlandırma hatasının minimuma indirildiği gösterilmiştir [17].

Meyve hasat robotlarında, meyvelerin tanınması ve meyvelerin robotu yakalama pozları, dış ortamlarda hızlı ve başarılı bir şekilde robotun çalışmasını belirleyen kritik

unsurlardır. Bu tür sistemlerde derin öğrenme yöntemlerinin nesnelerin tanınması için kullanılması doğruluğu ve hızı önemli ölçüde arttırmaktadır [18].

Gerçek zamanlı üç boyutlu nesne tanıma ve nesne yakalama görevleri için iki aşamalı yeni bir yöntem önerilmiştir. Bu yöntemde, ilk aşamada derin sinir ağları kullanılarak iki boyutlu görüntülerde nesne tanıma yapılarak, ikinci aşamada ise Point Pair Feature tabanlı bir yöntem ile hızlı ve hassas bir şekilde altı boyutlu poz tahmini yapılmaktadır. Bu yöntem yüksek doğruluk ve zaman verimliliği sağlayarak, al bırak uygulamaları deneyinde yüzde 90 başarı oranı elde etmiştir [19].

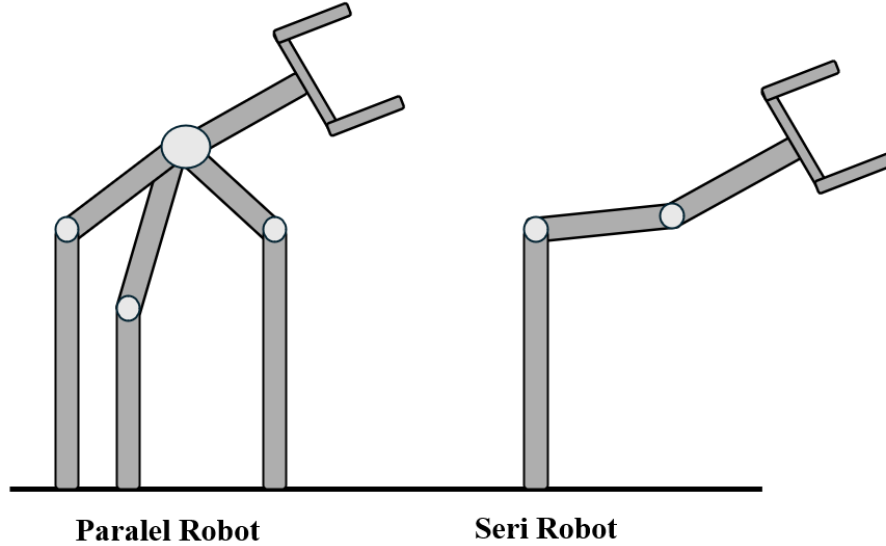
Park ve arkadaşları, endüstriyel robotlar için otonom bir şekilde kutu içinden nesneleri alan bir yeni bir yöntem önerilmiştir. İki boyutlu kamera tabanlı yöntemler ışık, yansıma gibi sebeplerden dolayı sorunlar yaşanmaktadır. Bu yöntemde ICP algoritması için nokta bulutu modeli elde etme yöntemi açıklanmıştır [20].

2. BEŞ EKSENLİ HİBRİT DELTA ROBOT MODELİ

2.1 Paralel Robotlar

Robotlar kinematik modellerine göre genelde paralel ve seri robot olmak üzere ikiye ayrılır. Seri robotlar, eklemlerin art arda eklenerek geliştirilen açık kinematik zincir yapısına sahip robotlardır. Seri robotlarda, her bir eksenindeki hata bir sonraki eksene aktarılır ve kümülatif olarak toplam hata oranı artmaktadır. Her bir eksenin hızı, bir sonraki eksenin hızına eklendiği için paralel robotlara göre daha yavaş kalmaktadır.

Paralel robotlar, hareketi sağlamak için birden fazla eksenlerin birbirine art arda eklenmesi yerine paralel olacak şekilde eklenmesiyle oluşmaktadır. Eksenlerin birbirine paralel olacak şekilde oluşturulması sebebiyle seri robotlardan farklı olarak kapalı kinematik zincir oluşmaktadır. İki den fazla birbirinden bağımsız kinematik zincirlerden oluşan bu eklemler genellikle bir taban ile hareketli bir platform arasında yer almaktadır. Seri ve paralel robotların arasındaki fark Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1 : Paralel ve seri robot karşılaştırması.

Paralel robotlar, klasik seri robotlardan farklı olarak eksenlerin aynı anda hareket etmesiyle uç işlev elemanının daha hassas ve hızlı bir şekilde konumlandırılmasını sağlar bu da yüksek rijitlik, düşük titreşim ve yüksek ivmelenme performansı anlamına

gelmektedir. Paralel robotlar, doğruluk ve yüksek hız açısından seri robotlara kıyasla daha iyi bir seçenek olmaktadır [21].

2.2 Delta Robot Çeşitleri

Delta robotlar, en çok bilinen ve yaygın kullanılan paralel robot türlerindendir. Delta robotlar, özellikle hız, hassasiyet ve yük taşıma kapasitesinin çok yüksek olmadığı uygulamalarda öne çıkar. Hafif yapıları ve paralel kinematik tasarımları hem hızlı hareket kabiliyeti hem de tekrarlanabilirlik açısından önemli avantajlar sundukları için al-bırak, paketleme, montaj gibi uygulamalarda sıklıkla tercih edilir. Delta robotlar elektronik, gıda, ilaç gibi sektörlerde vazgeçilmez bir seçenek haline gelmektedir.

Eklem türlerine göre delta robotlar, prizmatik eklemli, döner eklemli ve hibrit olmak üzere üçe ayrılmaktadır.

2.2.1 Prizmatik (linear) eklemli delta robot

Prizmatik delta robot, doğrusal hareket kontrolüne dayalı olarak çalışmakla birlikte genellikle 3 eksenli bir yapıya sahiptirler. Her bir aktüatörün doğrusal hareket ederek robotun uç işlevcisini kartezyen ekseninde istenilen pozisyona taşımaktadır. 3 prizmatik eksenin hareketi, uç işlevcisini 3 boyutlu uzayda hızlı ve hassas bir şekilde konumlanmasını sağlamaktadır. Delta robotlarda elektrik motorları, kayış-kasnak mekanizması yardımıyla lineer kızaklı milleri hareket ettirerek doğrusal hareket sağlar. Kayış-kasnak mekanizması, düşük ağırlık ve yüksek hız avantajı sunarak robotun dinamik performansını artırmaktadır. Lineer kızaklı miller ise doğrusal hareketin düzgün ve hassas bir şekilde iletilmesini sağlamaktadır. Bu mekaniksel yapı sayesinde delta robotların yüksek ivme ve tekrarlanabilirlik gerektiren uygulamalarda etkin bir şekilde kullanılmasına olanak tanımaktadır. Prizmatik delta robot, nesnelerin yer değiştirmesini hassas bir şekilde gerçekleştirebilir, ancak 3 eksenli olan kinematik yapısından dolayı nesneleri döndürme yeteneğine sahip değildir. 3 eksenli prizmatik delta robot Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



Şekil 2.2 : Prizmatik eklemlili 3 eksen delta robot [22].

- Hareket, doğrusal (prizmatik) eklemler aracılığıyla sağlanır.
- Genellikle daha yüksek doğruluk ve rijitlik gerektiren uygulamalarda tercih edilir.
- Avantajları arasında doğrusal hareketin hassas kontrolü yer alır.

2.2.2 Döner (revolute) eklemlili delta robot

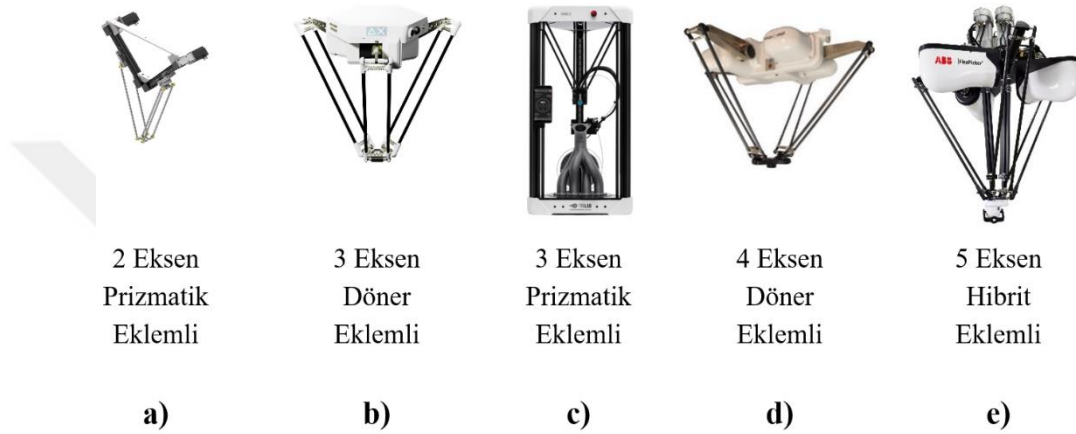
Döner eklemlili delta robot yüksek hız gerektiren uygulamalarda sıklıkla tercih edilir. Kinematik yapı olarak prizmatik eklemlili delta robota benzerdir. Prizmatik eklemlili delta robotla kıyaslandığında karbon fiber kollar daha uzun olabilmektedir. Her bir eksen iki ayrı kolun birleşmesiyle oluşmaktadır. Delta robotlarda uç işlevci merkezden kenarlara doğru eriştiğinde hassasiyet artar. 3 eksenli döner eklemlili delta robot Şekil 2.3'te gösterilmiştir.



Şekil 2.3 : Döner eklemlili 3 eksen delta robot [23].

- Hareket, döner (revolute) eklemlerle sağlanır.
- Daha yüksek hız ve esneklik gerektiren uygulamalarda kullanılır.
- Prizmatik eklemlili delta robotlara kıyasla etrafını kapatacak yapı yoktur.

Günümüzde endüstriyel robot firmalarının geliştirdiği 5 eksenli hibrit delta robotlar halihazırda kullanılmaktadır. Bu hibrit delta robotlar fazla eksenleri bulunması, yüksek hız, hassasiyet ve doğruluk sunarak endüstride önemli bir rol oynamaktadır. Delta robotların farklı türleri Şekil 2.4’te sunulmuştur.



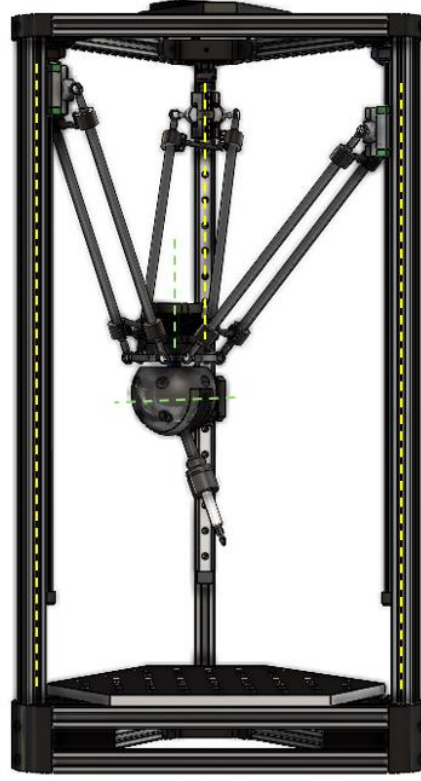
Şekil 2.4 : Delta robot türleri, a)2 DOF igus marka [24], b) 2 DOF Deltax marka [23], c)3 DOF Trilab3D marka [22], d)4 DOF Omron marka [25], e)5 DOF ABB marka [26].

2.3 Beş Eksenli Hibrit Delta Robot Kinematik Modeli

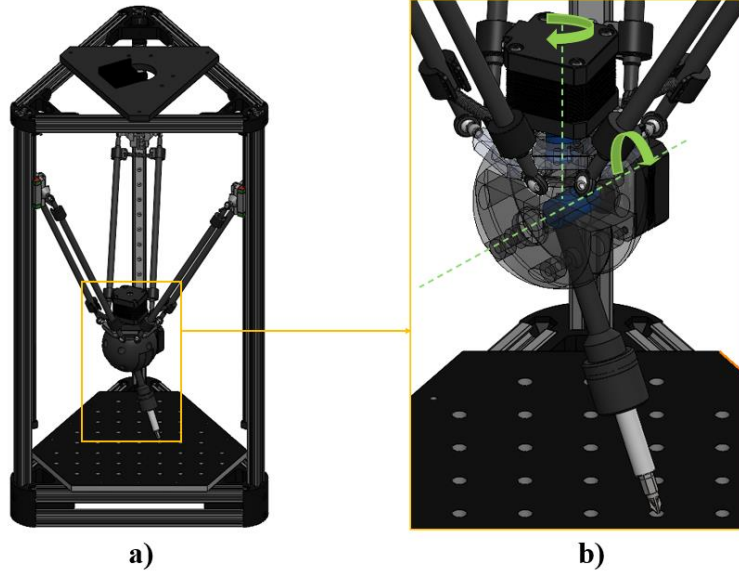
Günümüzde endüstriyel robot üreticilerinin geliştirdiği 5 eksenli hibrit delta robotlar halihazırda birçok alanda kullanılmaktadır. Bu hibrit delta robotlar, 3 eksenenden fazla eksene sahip olmaları ve yüksek hız, hassasiyet, doğruluk sunarak endüstride önemli bir rol oynamaktadır. Ancak bu tür endüstriyel robotların üretim maliyetleri 3 eksenli delta robotlara kıyasla yüksektir. Bu durum, özellikle sınırlı bütçeye sahip akademik çalışmalar ve araştırma projelerinde kullanımını kısıtlamaktadır. Bu nedenle, görsel servo sistemlerin test edilebilmesi amacıyla, bu tez kapsamında düşük maliyetli yeni bir 5 eksenli hibrit delta robot kinematik modeli geliştirilmiştir. Bu hibrit kinematik model, yüksek tork olmadan tekrarlanabilirlik doğruluk açısından başarılı performans sergilemesi hedeflenerek tasarlanmıştır.

Geliştirilen 5 eksenli hibrit delta robotun katı modelinin önden görünümü Şekil 2.5’te gösterilmiştir. Prizmatik eklem olan ilk üç eksen Şekil 2.5’te sarı kesikli çizgilerle

gösterilmiştir. Döner eklem olan son iki eksen ise yeşil kesikli çizgilerle gösterilmiştir. Şekil 2.6’de robotun döner eklemleri yakından gösterilmiştir.

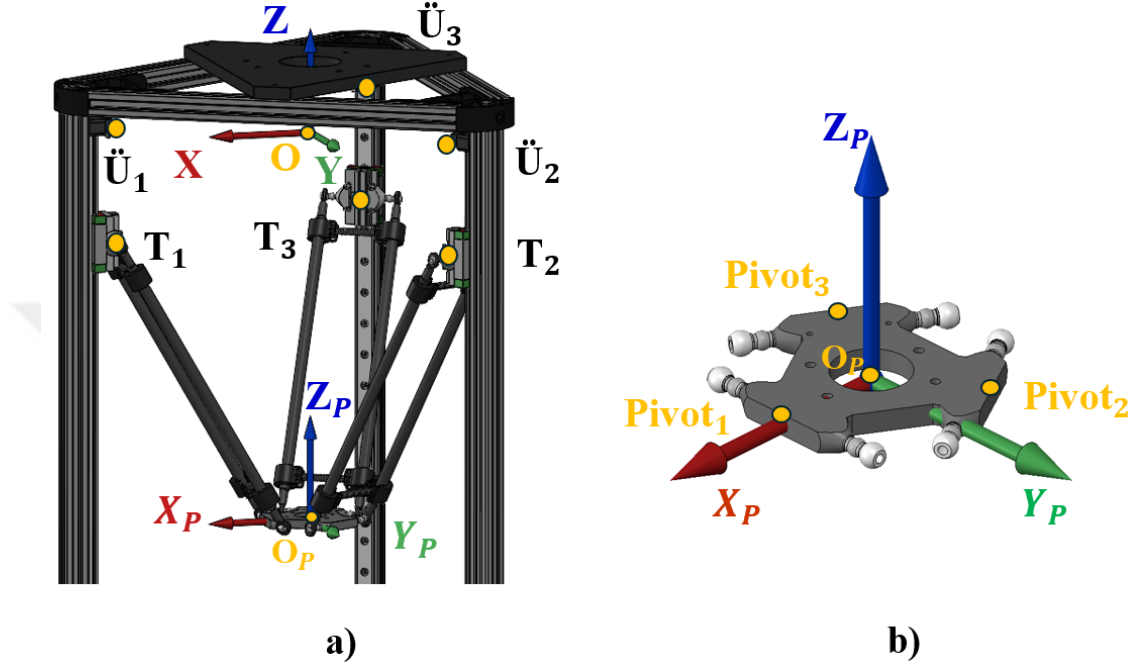


Şekil 2.5 : Geliştirilen 5 eksenli hibrit delta robotun önden görünümü.



Şekil 2.6 : Robot görünümü, a)izometrik görüntüsü, b)döner eksenlerin yakından görüntüsü.

Bu tez kapsamında 5 eksenli hibrit delta robotun kinematik denklemleri Pieper yöntemine benzer şekilde iki farklı aşamadan oluşmaktadır [27]. İlk aşamada ilk 3 eksen için geometrik çözüm kullanılmıştır [28]. İkinci aşamada ise son 2 eksen için Modifiye Denavit Hartenberg yöntemi kullanılmıştır. İlk 3 eksen için kinematik model Şekil 2.7'ye göre oluşturulmuştur.



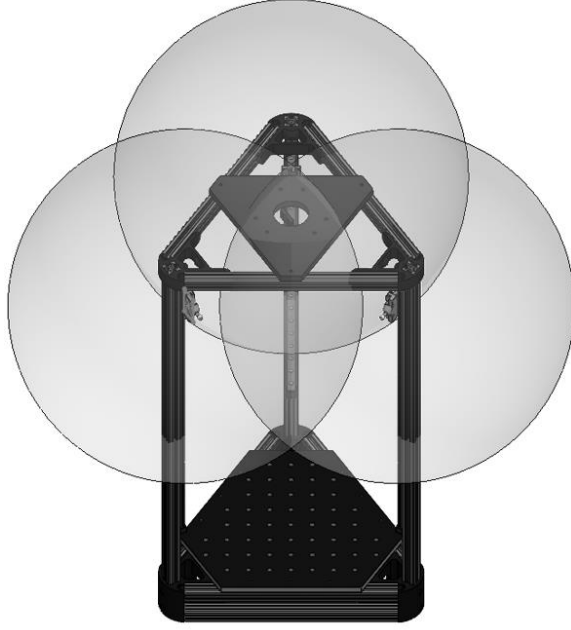
Şekil 2.7 : Noktaların gösterilmesi, a)kinematik denklemler için ilk üç eksen gösterimi, b)hareketli pivot olan kısmın gösterimi.

Şekil 2.7'de ki kapalı döngüye göre vektörel denklem çıkarılır. $i = 1, 2, 3$ olmak koşuluyla vektörel denklem, Denklem 2.1'de gösterilmiştir.

$$\overrightarrow{OO_P} = \overrightarrow{OT_i} + \overrightarrow{T_i \text{Pivot}_i} + \overrightarrow{\text{Pivot}_i O_P} \quad (2.1)$$

Her zaman sabit ve başlangıcı sıfır kabul edilen Dünya koordinat sistemi O harfi ile gösterilmiştir. Diğer bütün koordinat sistemleri Dünya koordinat sistemine göre referans alınarak tanımlanmıştır. Üst olan köşeler Ü harfi ile gösterilmiştir. Prizmatik olan lineer şekilde hareket eden taşıyıcı arabalar ise T harfi ile formüle eklenmiştir. $O\ddot{U}_1, O\ddot{U}_2, O\ddot{U}_3$ vektörleri birbirine eşit olup R harfi ile gösterilecektir. $\text{Pivot}_1 O_P, \text{Pivot}_2 O_P, \text{Pivot}_3 O_P$ vektörleri de aynı zamanda birbirine eşittir ve r harfi ile temsil edilecektir. Karbon fiber malzemeden imalat edilen paralel kollar $T_1 \text{Pivot}_1, T_2 \text{Pivot}_2, T_3 \text{Pivot}_3$ sembolleri de birbirine eşit olup Kol olarak bahsedilecektir.

2.3.1 İleri kinematik denklemler



Şekil 2.8 : Trilateration ile 3 kürenin kesişimi kullanılarak kinematik zincir oluşturulması.

Kinematik denklemlerin çıkarılmasında ilk üç eksene ait kürelerin kesişiminden faydalanılır. Kürelerin kesişim geometrisi Şekil 2.8’de gösterilmektedir. Bu yaklaşımla, her bir eksen için vektörel ifadelerden yola çıkılarak denklemler türetilmiştir. Pozisyon vektörlerinin koordinat düzlemindeki bileşenleri kullanılarak, sırasıyla Denklem 2.2, Denklem 2.3, Denklem 2.4 ve Denklem 2.5 elde edilir.

İleri kinematik denklemlerinin çözümünde, ilk üç prizmatik eksene ait konumların hesaplanmasında geometrik çözüm, son iki döner eksen için ise Modifiye Denavit Hartenberg yöntemi uygulanmıştır. İlk üç eksene ait olan pivot merkezinin Dünya eksenine göre x , y , z konum değerleri olan P_x , P_y , P_z bulunmaktadır [28]. Sonrasında 4, 5 ve TMN (Takım Merkez Noktası) eksenleri arasındaki 4×4 boyutunda homojen dönüşüm matrislerinin çarpımıyla ileri kinematik çözümü tamamlanır. İleri kinematik çözümü sonucunda TMN merkezinin Dünya eksenine göre x , y , z konum değerleri ve x , y , z dönme açıları hesaplanmaktadır.

İleri kinematik denklemlerinde delta robotun yarıçapı R sembolü, pivotun yarıçapı r sembolü, birbirine eşit paralel kolların sembolü Kol ile gösterilmektedir.

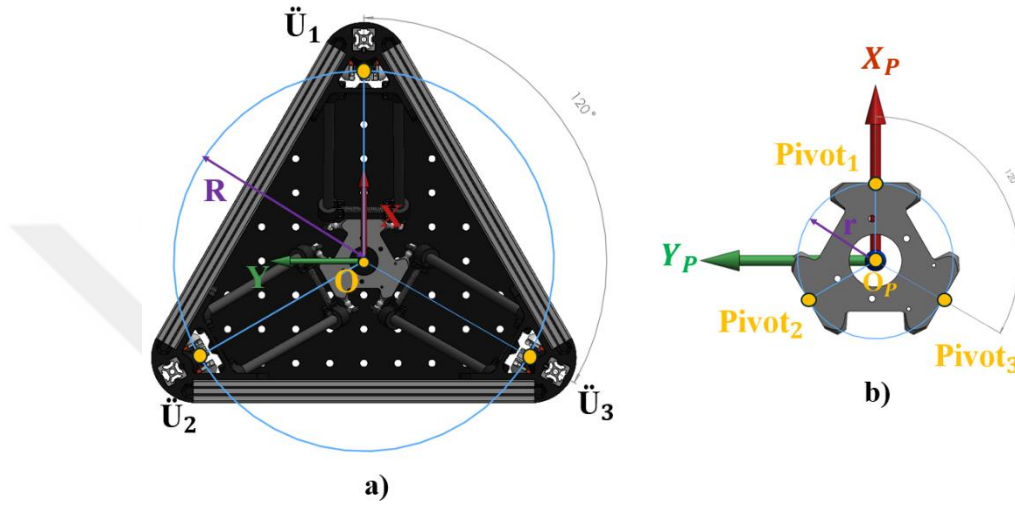
$$(P_x - x_i)^2 + (P_y - y_i)^2 + (P_z - z_i)^2 = Kol^2 \quad (2.2)$$

Denklem 2.2 'de i yerine 1, 2, 3 yazılarak ilk üç eklem içinde ayrı denklem çıkartılır.

$$(P_x - x_1)^2 + (P_y - y_1)^2 + (P_z - z_1)^2 = K_0 l^2 \quad (2.3)$$

$$(P_x - x_2)^2 + (P_y - y_2)^2 + (P_z - z_2)^2 = K_0 l^2 \quad (2.4)$$

$$(P_x - x_3)^2 + (P_y - y_3)^2 + (P_z - z_3)^2 = K_0 l^2 \quad (2.5)$$



Şekil 2.9 : Noktaların gösterilmesi, a)delta robotun üstten görünümü, b)pivotun üstten görünümü.

Şekil 2.9'a göre Denklem 2.6 elde edilir. $\beta_i = (i - 1)2\pi / 3$ eşitliğinde i yerine 1, 2, 3 yazılarak, ilk üç eksen için Denklem 2.6, Denklem 2.7 ve Denklem 2.8 elde edilir.

$$x_i = (R - r) \cos \beta_i, \quad y_i = (R - r) \sin \beta_i, \quad z_i = d_i \quad (2.6)$$

$$x_1 = (R - r) \cos 0^\circ, \quad y_1 = (R - r) \sin 0^\circ, \quad z_1 = d_1 \quad (2.7)$$

$$x_2 = (R - r) \cos 120^\circ, \quad y_2 = (R - r) \sin 120^\circ, \quad z_2 = d_2 \quad (2.8)$$

$$x_3 = (R - r) \cos 240^\circ, \quad y_3 = (R - r) \sin 240^\circ, \quad z_3 = d_3 \quad (2.9)$$

Denklem 2.7'deki eşitlikler Denklem 2.3'e, Denklem 2.8'deki eşitlikler Denklem 2.4'e, Denklem 2.9'deki eşitlikler Denklem 2.5'e yazılır ve üç yeni denklem elde edilir.

$$P_x^2 - 2P_x x_1 + x_1^2 + P_y^2 - 2P_y y_1 + y_1^2 + P_z^2 - 2P_z z_1 + z_1^2 = Kol^2 \quad (2.10)$$

$$P_x^2 - 2P_x x_2 + x_2^2 + P_y^2 - 2P_y y_2 + y_2^2 + P_z^2 - 2P_z z_2 + z_2^2 = Kol^2 \quad (2.11)$$

$$P_x^2 - 2P_x x_3 + x_3^2 + P_y^2 - 2P_y y_3 + y_3^2 + P_z^2 - 2P_z z_3 + z_3^2 = Kol^2 \quad (2.12)$$

Denklem 2.11'den Denklem 2.10 çıkartılarak Denklem 2.13, aynı şekilde Denklem 2.12'den Denklem 2.10 çıkartılarak Denklem 2.14 elde edilir. Denklemlerin daha sade görünmesi için E_1 , E_2 , E_3 kısaltmaları kullanılmıştır ve Denklem 2.15'te gösterilmiştir.

$$P_x(x_2 - x_1) + P_y(y_2 - y_1) + P_z(z_2 - z_1) = \frac{E_2 - E_1}{2} \quad (2.13)$$

$$P_x(x_3 - x_1) + P_y(y_3 - y_1) + P_z(z_3 - z_1) = \frac{E_3 - E_1}{2} \quad (2.14)$$

$$E_1 = x_1^2 + y_1^2 + z_1^2, E_2 = x_2^2 + y_2^2 + z_2^2, E_3 = x_3^2 + y_3^2 + z_3^2 \quad (2.15)$$

Denklem 2.13 $\frac{x_3 - x_1}{x_2 - x_1}$ ile çarpılarak sonrasında da Denklem 2.14'ten çıkartılarak Denklem 2.16 elde edilir. Denklem 2.16'nın daha kolay gösterilmesi için V_1 ve V_2 denklemleri tanımlanarak sırasıyla Denklem 2.17 ve Denklem 2.18'de gösterilmiştir.

$$V_1 P_y + V_2 P_z = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{x_3 - x_1}{x_2 - x_1} \right) (E_2 - E_1) + E_1 - E_3 \right] \quad (2.16)$$

$$V_1 = \left(\frac{x_3 - x_1}{x_2 - x_1} \right) (y_2 - y_1) + y_1 - y_3 \quad (2.17)$$

$$V_2 = \left(\frac{x_3 - x_1}{x_2 - x_1} \right) (z_2 - z_1) + z_1 - z_3 \quad (2.18)$$

P_y elde edilmesi için Denklem 2.16 düzenlendiğinde, Denklem 2.19 elde edilir.

$$P_y = \frac{-V_2}{V_1} P_z + \frac{\frac{1}{2} \left[\left(\frac{x_3 - x_1}{x_2 - x_1} \right) (E_2 - E_1) + E_1 - E_3 \right]}{V_1} \quad (2.19)$$

Denklem 2.13 $\frac{y_2 - y_1}{y_3 - y_1}$ ile çarpılarak sonrasında da Denklem 2.14'ten çıkartılarak Denklem 2.20 elde edilir. Denklem 2.20'nin daha kolay gösterilmesi için N_1 ve N_2 denklemleri tanımlanarak sırasıyla Denklem 2.21 ve Denklem 2.22'de gösterilmiştir.

$$N_1 P_x + N_2 P_z = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{y_2 - y_1}{y_3 - y_1} \right) (E_2 - E_1) + E_1 - E_3 \right] \quad (2.20)$$

$$N_1 = \left(\frac{y_2 - y_1}{y_3 - y_1} \right) (x_2 - x_1) + x_1 - x_3 \quad (2.21)$$

$$N_2 = \left(\frac{y_2 - y_1}{y_3 - y_1} \right) (z_2 - z_1) + z_1 - z_3 \quad (2.22)$$

Denklem 2.20 düzenlenerek P_x değeri Denklem 2.23'te elde edilmiştir.

$$P_x = \frac{-N_2}{N_1} P_z + \frac{\frac{1}{2} \left[\left(\frac{x_3 - x_1}{x_2 - x_1} \right) (E_2 - E_1) + E_1 - E_3 \right]}{N_1} \quad (2.23)$$

P_z değeri elde etmek için düzenlenerek Denklem 2.19'da bulunan P_y ve Denklem 2.23'te bulunan P_x değeri Denklem 2.10'da yerine koyularak düzenlendiğinde Denklem 2.24 elde edilmektedir.

$$AP_z^2 + BP_z + C = 0 \quad (2.24)$$

$$A = \left(\frac{-V_2}{V_1} \right)^2 + \left(\frac{-N_2}{N_1} \right)^2 + 1 \quad (2.25)$$

$$B = 2 \left[\frac{-V_2}{V_1} (k_2 - y_1) + \frac{-N_2}{N_1} (m_2 - x_1) - z_1 \right] \quad (2.26)$$

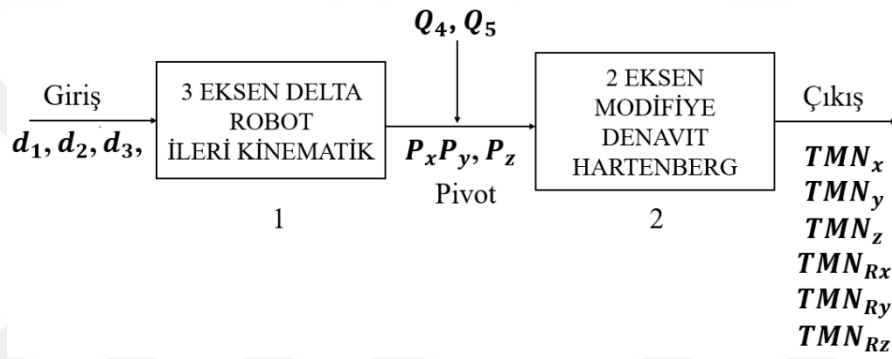
$$k_2 = \frac{\frac{1}{2} \left[\left(\frac{x_3 - x_1}{x_2 - x_1} \right) (E_2 - E_1) + E_1 - E_3 \right]}{V_1} \quad (2.27)$$

$$m_2 = \frac{\frac{1}{2} \left[\left(\frac{y_2 - y_1}{y_3 - y_1} \right) (E_2 - E_1) + E_1 - E_3 \right]}{N_1} \quad (2.28)$$

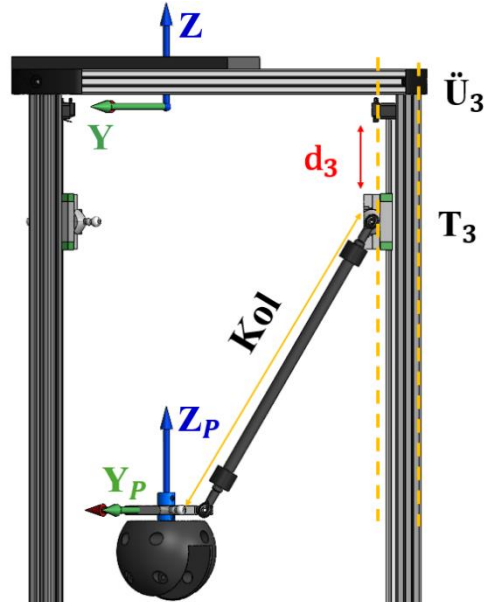
$$C = (k_2 - y_1)^2 + (m_2 - x_1)^2 + z_1^2 - K_0 l^2 \quad (2.29)$$

$$P_z = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (2.30)$$

P_z değerinin bulunması Denklem 2.24'te ikinci dereceden bir bilinmeyenli denklem çözülerek iki farklı kök bulunur. Bu delta robotta kollar aşağıya doğru olduğu için negatif kök seçilmektedir. Şekil 2.10'da gösterilen birinci aşamada Pivot merkezinin değerleri bulunmaktadır ve sonrasında ikinci aşamada Pivot merkezinin değerleri ve Θ_4, Θ_5 değerleri kullanılarak TMN'nin hem konumu ve hem oryantasyonu bulunmaktadır.



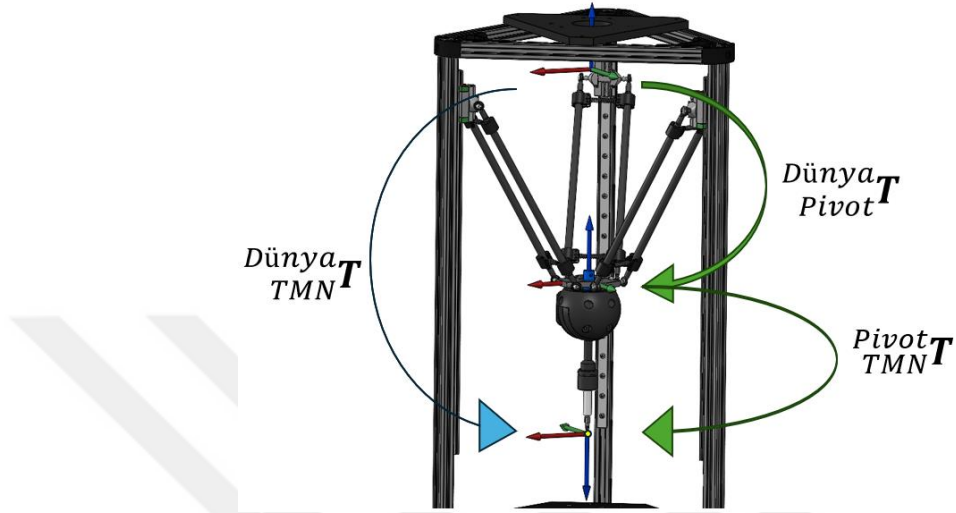
Şekil 2.10 : 5 eksenli hibrit delta robotun ileri kinematik çözüm aşamaları.



Şekil 2.11 : Üçüncü prizmatik eksenin geometrisi.

Pivota ait olan P_x, P_y, P_z değerleri bulunduktan sonra 4x4 boyutunda homojen dönüşüm matrisleri tanımlanır. Şekil 2.12'de gösterilmiştir. Bu matrislerden ilki Pivot

ekseninin Dünya koordinat sistemine göre konumunu ve oryantasyonunu tanımlamak amacıyla kullanılır. Denklem 2.31’de gösterilmiştir. İlk üç eksen kinematik çözümünde yalnızca yer değiştirme hareketi olduğundan, herhangi bir dönme hareketi gerçekleşmemektedir. Bu nedenle, Dünya ve Pivot eksenlerinin oryantasyonları her zaman birbiriyle aynıdır.



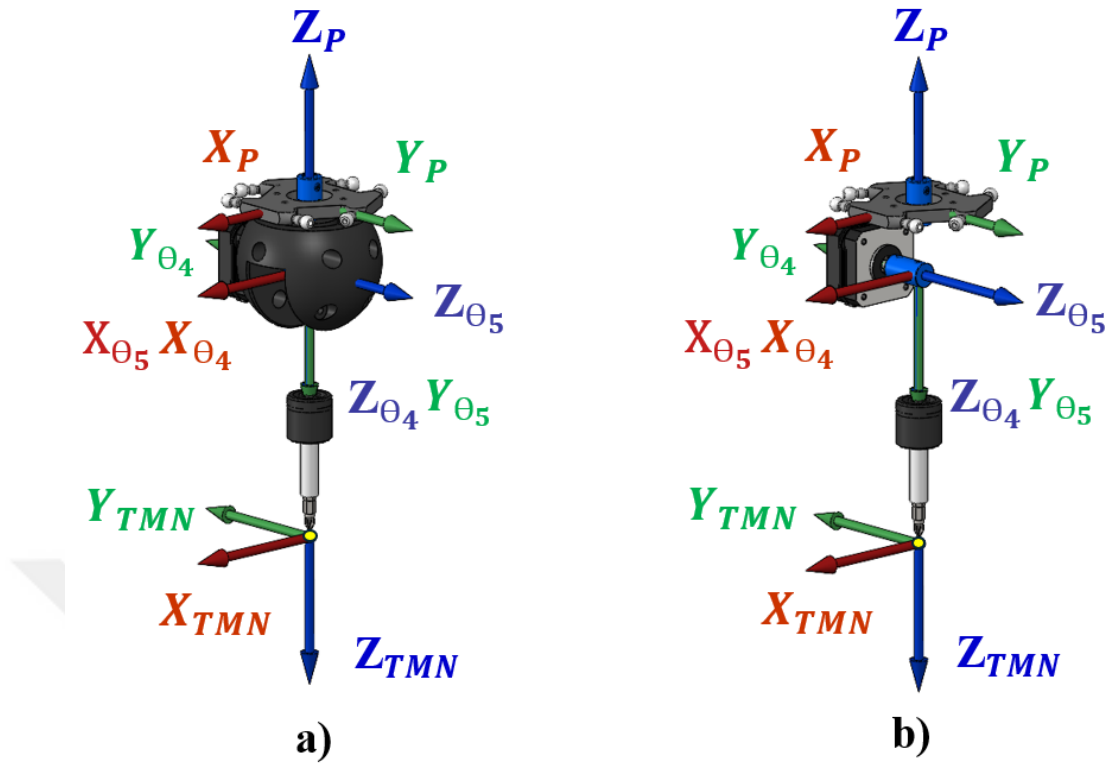
Şekil 2.12 : Dünya, Pivot, TMN eksenleri arasındaki dönüşüm matrisleri.

$${}_{Pivot}^{Dünya}T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & P_x \\ 0 & 1 & 0 & P_y \\ 0 & 0 & 1 & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

${}_{Pivot}^{Dünya}T$ homojen dönüşüm matrisi tanımlandıktan sonra Modifiye Denavit Hartenberg yöntemi kullanılarak sırasıyla 4.eksen, 5.eksen ve TMN eksenine ait homojen dönüşüm matrisleri hesaplanmaktadır. Hesaplanan 4x4 boyutundaki dönüşüm matrisleri aracılığıyla TMN ekseninin x, y, z konum değerleri ve x, y, z dönme açıları bulunmaktadır. Dönüşüm matrisleri için oluşturulan Modifiye Denavit Hartenberg parametreleri Çizelge 2.1’de ve kullanılması gereken koordinat sistemleri Şekil 2.13’te gösterilmiştir.

Çizelge 2.1 : Dönme eksenleri için Modifiye Denavit Hartenberg parametreleri.

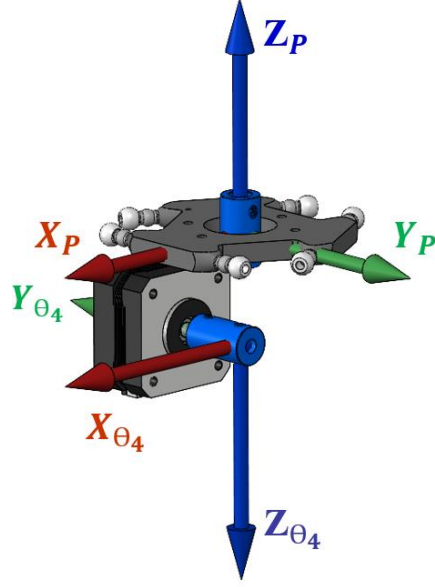
Eksen	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	Θ_i
4	180°	0	$d_{Pivot-4}$	Θ_4
5	90°	0	0	Θ_5
TMN	-90°	0	d_{5-TMN}	0



Şekil 2.13 : Modifiye Denavit Hartenberg için eksenlerin gösterimi, a)plastik parça ile görünümü, b)plastik parça olmadan görünümü.

$${}_{4.\text{Eksen}}^{\text{Pivot}}T = \begin{bmatrix} \cos(\Theta_4) & -\sin(\Theta_4) & 0 & 0 \\ -\sin(\Theta_4) & -\cos(\Theta_4) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -d_{\text{Pivot-4}} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

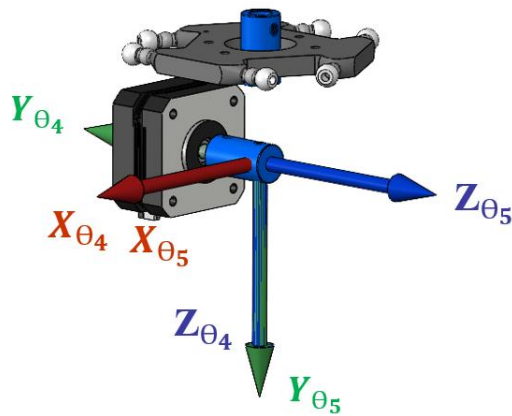
Modifiye Denavit Hartenberg yöntemi kullanılarak, Pivot eksenini ile 4. eksen arasındaki homojen dönüşüm matrisi hesaplanarak Denklem 2.32’de gösterilmiştir. Denklem 2.32’de verilen dönüşüm matrisine göre tanımlanan eksen takımları ise Şekil 2.14’te yer almaktadır.



Şekil 2.14 : Pivot eksen ve 4.eksen arasında dönüşüm.

$${}_{4.\text{Eksen}}^{5.\text{Eksen}}T = \begin{bmatrix} \cos(\Theta_5) & -\sin(\Theta_5) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin(\Theta_5) & \cos(\Theta_5) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

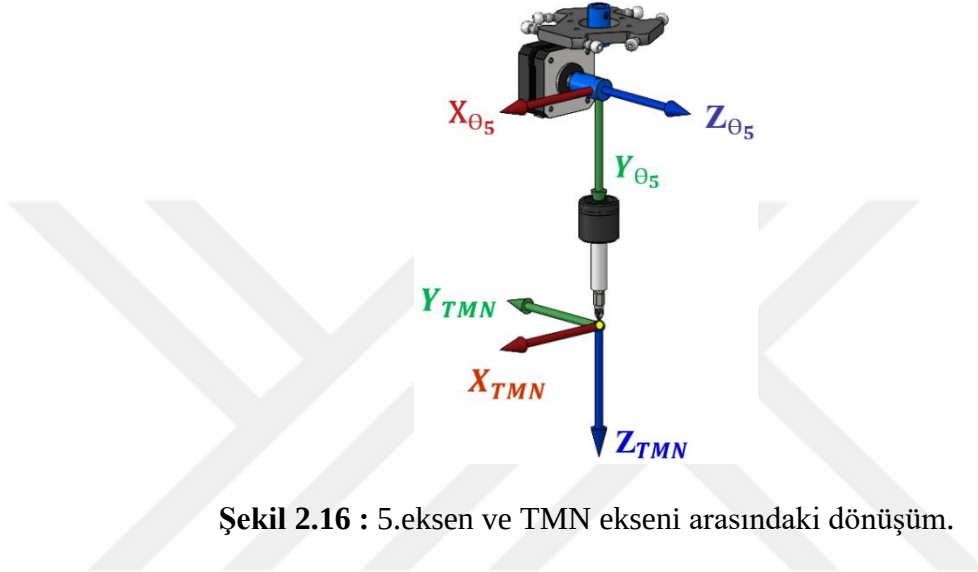
4.eksen ve 5.eksen arasındaki dönüşüm matrisi Denklem 2.33'te gösterilmiştir. Denklem 2.33'te gösterilen dönüşüm matrisine göre eksen takımları Şekil 2.15'te gösterilmiştir.



Şekil 2.15 : 4.eksen ve 5.eksen arasındaki dönüşüm.

$${}^{5.\text{Eksen}}_{\text{TMN}}\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_{5\text{-TMN}} \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

5.eksen ve TMN eksenleri arasındaki dönüşüm matrisi Denklem 2.34'te gösterilmiştir. Denklem 2.34'te gösterilen dönüşüm matrisine göre eksen takımları Şekil 2.16'de gösterilmiştir.



Şekil 2.16 : 5.eksen ve TMN eksenleri arasındaki dönüşüm.

${}^{\text{Dünya}}_{\text{TMN}}\mathbf{T}$ homojen dönüşüm matrisinin nasıl hesaplandığı Denklem 2.35'te gösterilmiştir. Bu hesaplama ile ileri kinematik çözümleri tamamlanmaktadır. ${}^{\text{Dünya}}_{\text{TMN}}\mathbf{T}$ matrisinde TMN ekseninin Dünya eksenine göre hem konumu hem oryantasyonu yer almaktadır.

$${}^{\text{Dünya}}_{\text{TMN}}\mathbf{T} = {}^{\text{Dünya}}_{\text{Pivot}}\mathbf{T} \cdot {}^{\text{Pivot}}_{4.\text{Eksen}}\mathbf{T} \cdot {}^{4.\text{Eksen}}_{5.\text{Eksen}}\mathbf{T} \cdot {}^{5.\text{Eksen}}_{\text{TMN}}\mathbf{T} \quad (2.35)$$

2.3.2 Ters kinematik denklemler

Ters kinematik denklemlerin çözümünde iki aşamalı olarak önce Modifiye Denavit Hartenberg yöntemi kullanılarak, sonrasında geometrik çözüm ile ilk üç eksen değeri hesaplanmaktadır. Ters kinematik hesaplaması için 4x4 boyutundaki ${}^{\text{Dünya}}_{\text{TMN}}\mathbf{T}$ dönüşüm matrisinden, oryantasyonu temsil eden ${}^{\text{Dünya}}_{\text{TMN}}\mathbf{R}$ yani 3x3 boyutundaki dönme matrisi elde edilir. Denklem 2.37'de gösterilmiştir. Bu dönme matrisi kullanılarak, robotun 4. ve 5. eksenlerine karşılık Θ_4, Θ_5 açıları hesaplanır. Ardından Modifiye Denavit Hartenberg yöntemi kullanılarak ${}^{\text{Pivot}}_{4.\text{Eksen}}\mathbf{T}, {}^{4.\text{Eksen}}_{5.\text{Eksen}}\mathbf{T}, {}^{5.\text{Eksen}}_{\text{TMN}}\mathbf{T}$ homojen dönüşüm matrisleri hesaplanır. Bu matrisler ve TMN ekseninin Dünya eksenine göre konumunu

ifade eden TMN_x , TMN_y , TMN_z değerleri kullanılarak, Pivot konum değerleri P_x , P_y , P_z bulunur. Pivot konum değerleri ile üç eksenli delta robot ters kinematik çözümü yapılarak ilk üç prizmatik eksen değeri hesaplanır [28].

$${}^{Dünya}_{TMN}T = {}^{Dünya}_{Pivot}T \cdot {}^{Pivot}_{4.Eksen}T \cdot {}^{4.Eksen}_{5.Eksen}T \cdot {}^{5.Eksen}_{TMN}T \quad (2.36)$$

$${}^{Dünya}_{TMN}T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & TMN_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & TMN_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & TMN_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad {}^{Dünya}_{TMN}R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

${}^{Dünya}_{Pivot}R$ dönme matrisi, birim matris olduğu için denklemin sonucunu değiştirmez, ${}^{5.Eksen}_{TMN}R$ dönme matrisi ise her zaman sabittir.

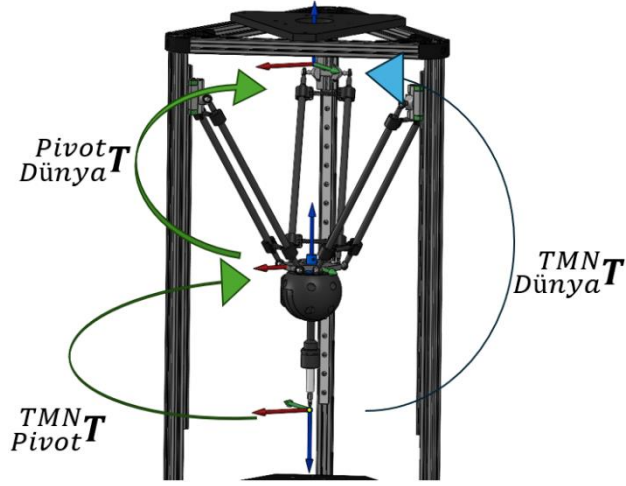
$${}^{Dünya}_{TMN}R = \begin{bmatrix} \cos\Theta_4 \cos\Theta_5 & -\sin\Theta_4 & -\sin\Theta_5 \cos\Theta_4 \\ -\sin\Theta_4 \cos\Theta_5 & -\cos\Theta_4 & \sin\Theta_4 \sin\Theta_5 \\ -\sin\Theta_5 & 0 & -\cos\Theta_5 \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

${}^{Dünya}_{TMN}R$ matrisi hesaplanarak Θ_4 , Θ_5 değerleri bulunur. Θ_4 , Θ_5 değerleri bulunduğundan sonra ${}^{4.Eksen}_{Pivot}T$, ${}^{5.Eksen}_{4.Eksen}T$, ${}^{TMN}_{5.Eksen}T$ matrisleri hesaplanır. ${}^{Pivot}_{4.Eksen}T$, ${}^{4.Eksen}_{5.Eksen}T$, ${}^{5.Eksen}_{TMN}T$ dönüşüm matrisleri ileri kinematik bölümünde nasıl hesaplandığı gösterilmektedir.

$$\left[{}^{Pivot}_{4.Eksen}T \right]^{-1} = {}^{4.Eksen}_{Pivot}T \quad (2.39)$$

$$\left[{}^{4.Eksen}_{5.Eksen}T \right]^{-1} = {}^{5.Eksen}_{4.Eksen}T \quad (2.40)$$

$$\left[{}^{5.Eksen}_{TMN}T \right]^{-1} = {}^{TMN}_{5.Eksen}T \quad (2.41)$$



Şekil 2.17 : Dünya, Pivot, TMN eksenleri arasındaki dönüşüm matrisleri.

TMN_x , TMN_y , TMN_z değerleri birlikte ${}^{4.Eksen}_{Pivot}T$, ${}^{5.Eksen}_{4.Eksen}T$, ${}^{TMN}_{5.Eksen}T$, ${}^{Dünya}_{TMN}T$ dönüşüm matrislerinin bileşenleri kullanılarak, Pivot noktasının konum değerleri P_x , P_y , P_z hesaplanmaktadır.

$$\begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} = {}^{Dünya}_{TMN}R \cdot {}^{TMN}_{Pivot}p + \begin{bmatrix} TMN_x \\ TMN_y \\ TMN_z \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

$${}^{TMN}_{Pivot}T = {}^{TMN}_{5.Eksen}T \cdot {}^{5.Eksen}_{4.Eksen}T \cdot {}^{4.Eksen}_{Pivot}T \quad (2.43)$$

$${}^{TMN}_{Pivot}T = \begin{bmatrix} {}^{TMN}_{Pivot}R & {}^{TMN}_{Pivot}p \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

P_x , P_y , P_z noktaları ile 3 eksenli delta robot ters kinematik hesaplaması yapılır. Denklem 2.2'de Denklem 2.6 yerine koyulursa yeni denklem elde edilir.

$$(P_x - (R - r) \cos \beta_i)^2 + (P_y - (R - r) \sin \beta_i)^2 + (P_z - (d_i))^2 = Kol^2 \quad (2.45)$$

Şekil 2.10'a göre aşağıdaki denklem elde edilir. $\beta_i = (i-1)2\pi/3$ eşitliğinde i yerine 1, 2, 3 yazılarak, 3 ayrı denklem elde edilir.

$$(P_x - (R - r) \cos 0^\circ)^2 + (P_y - (R - r) \sin 0^\circ)^2 + (P_z - (d_1))^2 = Kol^2 \quad (2.46)$$

$$(P_x - (R - r) \cos 120^\circ)^2 + (P_y - (R - r) \sin 120^\circ)^2 + (P_z - (d_2))^2 = K_0 l^2 \quad (2.47)$$

$$(P_x - (R - r) \cos 240^\circ)^2 + (P_y - (R - r) \sin 240^\circ)^2 + (P_z - (d_3))^2 = K_0 l^2 \quad (2.48)$$

Denklemlerde d_1, d_2, d_3 yalnız bırakılarak yeni 3 denklem elde edilir.

$$d_1 = \pm \sqrt{K_0 l^2 - [P_x - (R - r)]^2 - P_y^2} + P_z \quad (2.49)$$

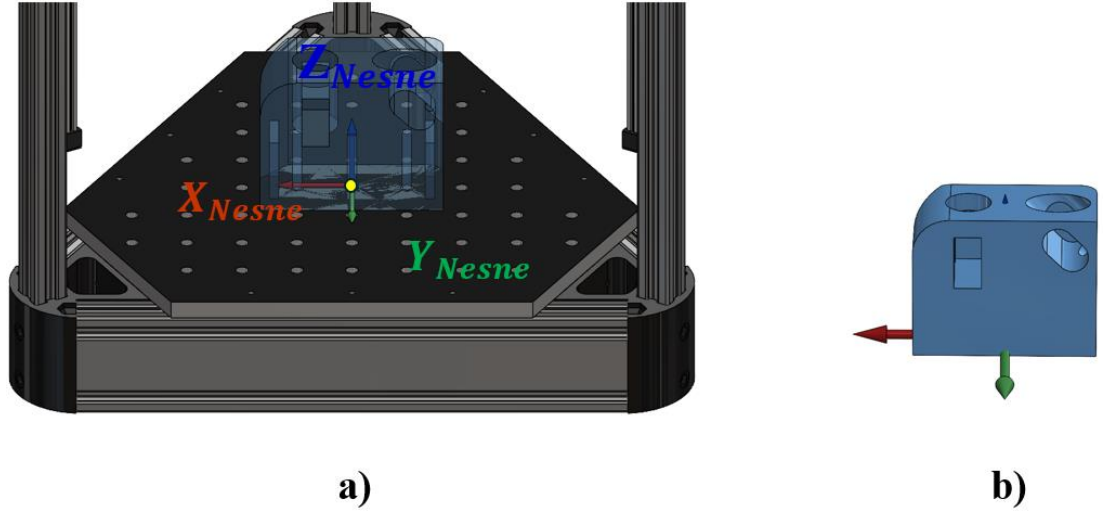
$$d_2 = \pm \sqrt{K_0 l^2 - \left[P_x + \frac{1}{2}(R - r)\right]^2 - \left[P_y - \frac{\sqrt{3}}{2}(R - r)\right]^2} + P_z \quad (2.50)$$

$$d_3 = \pm \sqrt{K_0 l^2 - \left[P_x + \frac{1}{2}(R - r)\right]^2 - \left[P_y + \frac{\sqrt{3}}{2}(R - r)\right]^2} + P_z \quad (2.51)$$

Ters kinematik çözümünden sonra d_1, d_2, d_3 değerleri prizmatik eklemlerin konum değerleri milimetre cinsinden ve Θ_4, Θ_5 değerleri ise döner eklemlerin açı değerleri derece cinsinden motorlara gönderilmektedir. Bu adım ile ters kinematik çözümü tamamlanmış olur.

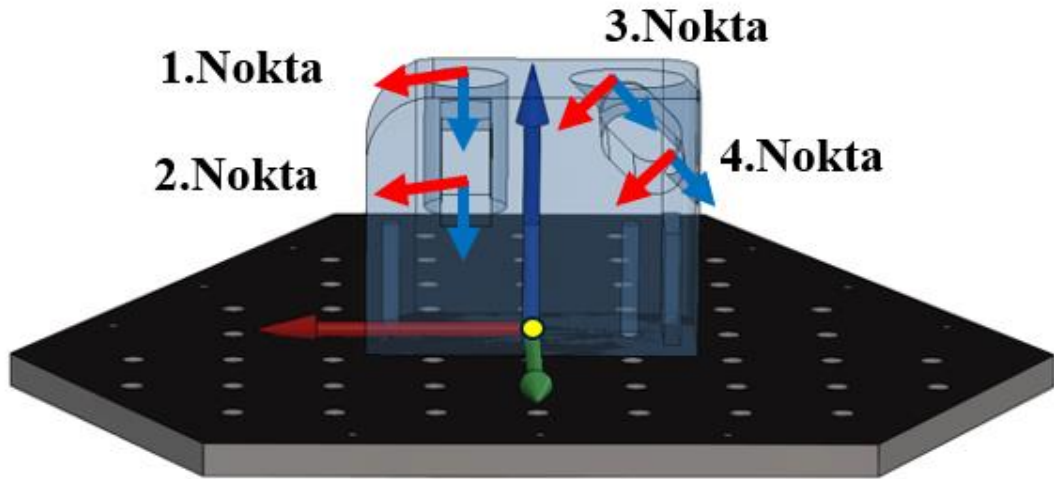
2.3.3 Dinamik robot yörünge planlanması

Bu tez kapsamında, 5 eksenli hibrit delta robotun ileri ve ters kinematik çözümleri incelenmiştir. Ancak, bu çalışma kapsamında hareket planlama algoritmalarına yer verilmemiştir. Robotun belirli pozisyonlara ulaşabilmesi için hedef noktalar doğrudan tanımlanmış ve bu pozlara noktadan noktaya (point-to-point) robotun hareket etmesi sağlanmıştır. Zaman, hız, ivme veya robot dinamiği gibi konular dikkate alınmaksızın yalnızca ileri ve ters kinematik çözümler gerçekleştirilmiştir. Tezin bu bölümünde robotun hareket edeceği noktalar oryantasyon ve pozisyon olarak tanımlanarak ve ters kinematik çözümleri hesaplanarak robotun konumlara doğru ulaşım ulaşmadığı kontrol edilmiştir.



Şekil 2.18 : Montaj yapılacak nesne, a) eksen tanımlanması, b) nesnenin CAD modeli.

Robotun tam orta noktasına montaj yapılacak nesne sabitlenmiştir. Nesnenin tabanının tam orta noktasında Dünya eksenine göre Nesne eksenini tanımlanmıştır. Tanımlanan bu homojen dönüşüm matrisi ${}^{Dünya}_{Nesne}T$ olarak hesaplanmıştır. Şekil 2.18’de gösterilmiştir.



Şekil 2.19 : Nesne eksenine göre tanımlanan robotun gideceği 4 nokta.

Robotun nesne üzerindeki deliklere girdiği noktalar Nesne eksenine göre tanımlanmıştır. Şekil 2.19’da gösterilmiştir. Bu noktalar birden çok n tane olabilmektedir. Şekil 2.19’da örnek olması açısından sadece 4 nokta tanımlanmıştır.

Nesne eksenine göre tanımlanan noktalar için homojen dönüşüm matrisleri sırasıyla ${}_{1.Nokta}^{Nesne}T$, ${}_{2.Nokta}^{Nesne}T$, ${}_{3.Nokta}^{Nesne}T$, ${}_{4.Nokta}^{Nesne}T$ ile gösterilmiştir.

$${}_{1.Nokta}^{Dünya}T = {}_{Nesne}^{Dünya}T \cdot {}_{1.Nokta}^{Nesne}T \quad (2.52)$$

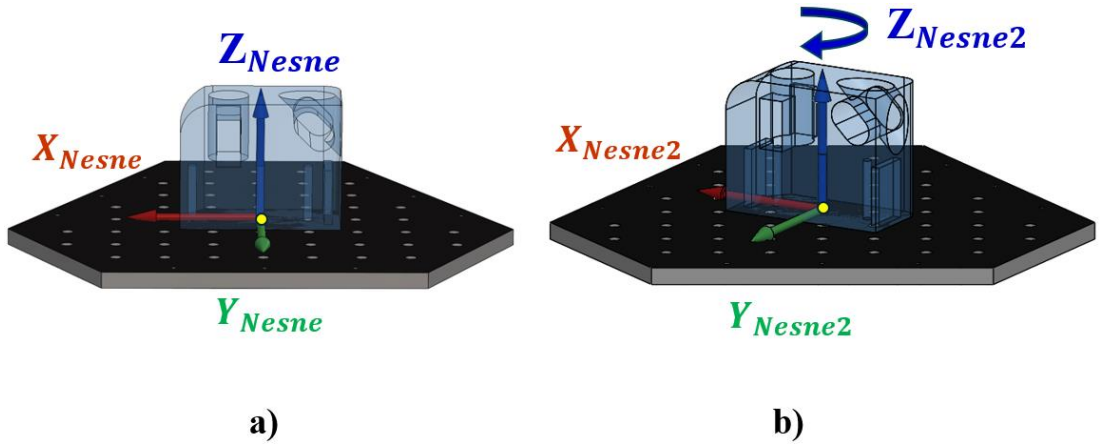
$${}_{2.Nokta}^{Dünya}T = {}_{Nesne}^{Dünya}T \cdot {}_{2.Nokta}^{Nesne}T \quad (2.53)$$

$${}_{3.Nokta}^{Dünya}T = {}_{Nesne}^{Dünya}T \cdot {}_{3.Nokta}^{Nesne}T \quad (2.54)$$

$${}_{4.Nokta}^{Dünya}T = {}_{Nesne}^{Dünya}T \cdot {}_{4.Nokta}^{Nesne}T \quad (2.55)$$

$${}_{n.Nokta}^{Dünya}T = {}_{Nesne}^{Dünya}T \cdot {}_{n.Nokta}^{Nesne}T \quad (2.56)$$

Robot montaj yapılacak nesnenin başlangıç pozuna göre bir kere programlanmaktadır. Daha sonrasında nesne Nesne ekseninin Z'si etrafında 45 derece döndürülerek sabitlenmiştir. Şekil 2.20'de gösterilmiştir.



Şekil 2.20 : Nesnenin farklı pozları, a)nesnenin başlangıç pozu, b)nesnenin z ekseninde 45 derece döndürülmüş poz.

Montaj yapılacak nesnenin, Nesne eksenine 45 derece döndürüldüğü için ${}_{Nesne2}^{Dünya}T$ homojen dönüşüm matrisi yeniden tanımlanmıştır. Tanımlanan noktalar için homojen dönüşüm matrisleri sırasıyla ${}_{1.Nokta}^{Nesne}T$, ${}_{2.Nokta}^{Nesne}T$, ${}_{3.Nokta}^{Nesne}T$, ${}_{4.Nokta}^{Nesne}T$ değişmemiştir, nesne başlangıç konumundan farklı konumlandırılmış olsa da noktaların Nesne eksenine

göre konumları sabittir. Bu yüzden hesaplanan robot noktaları ${}^{Dünya}_{Nesne2}T$ dönüşüm matrisine göre otomatik olarak yeniden hesaplanabilir. Böylelikle robotun yörüngesindeki noktalar otomatik olarak güncellenmektedir. Yeni oluşan robot noktaları Şekil 2.21’de gösterilmiştir.

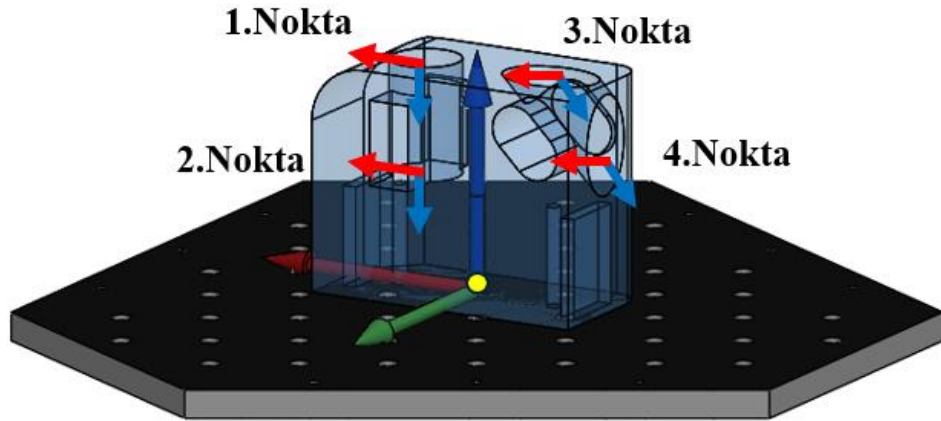
$${}^{Dünya}_{Yeni\ 1.Nokta}T = {}^{Dünya}_{Nesne2}T \cdot {}^{Nesne}_{1.Nokta}T \quad (2.57)$$

$${}^{Dünya}_{Yeni\ 2.Nokta}T = {}^{Dünya}_{Nesne2}T \cdot {}^{Nesne}_{2.Nokta}T \quad (2.58)$$

$${}^{Dünya}_{Yeni\ 3.Nokta}T = {}^{Dünya}_{Nesne2}T \cdot {}^{Nesne}_{3.Nokta}T \quad (2.59)$$

$${}^{Dünya}_{Yeni\ 4.Nokta}T = {}^{Dünya}_{Nesne2}T \cdot {}^{Nesne}_{4.Nokta}T \quad (2.60)$$

$${}^{Dünya}_{Yeni\ n.Nokta}T = {}^{Dünya}_{Nesne2}T \cdot {}^{Nesne}_{n.Nokta}T \quad (2.61)$$



Şekil 2.21 : Nesnenin 45 derece döndürülmüş pozuna göre otomatik oluşan robotun gideceği noktalar.

Yeniden hesaplanan ${}^{Dünya}_{Yeni\ 1.Nokta}T$, ${}^{Dünya}_{Yeni\ 2.Nokta}T$, ${}^{Dünya}_{Yeni\ 3.Nokta}T$, ${}^{Dünya}_{Yeni\ 4.Nokta}T$ dönüşüm homojen matrislerinin her biri için yeniden ters kinematik çözüm yapılarak robotun beş eksen değeri hesaplanır. Böylelikle robot, nesnenin ilk pozuna göre dönme veya yer değiştirme hareketi yapmasına rağmen otonom olarak kendi yörünge noktalarını

hesaplayabilmektedir. Nesnenin 45 derece döndürüldüğü senaryo 5 eksenli fiziksel delta robotta test edilmiştir. Robotun tekrardan programlamasına gerek kalmadan, robotun nesnenin üzerindeki deliklere başarılı bir şekilde montaj yaptığı gözlenmiştir.

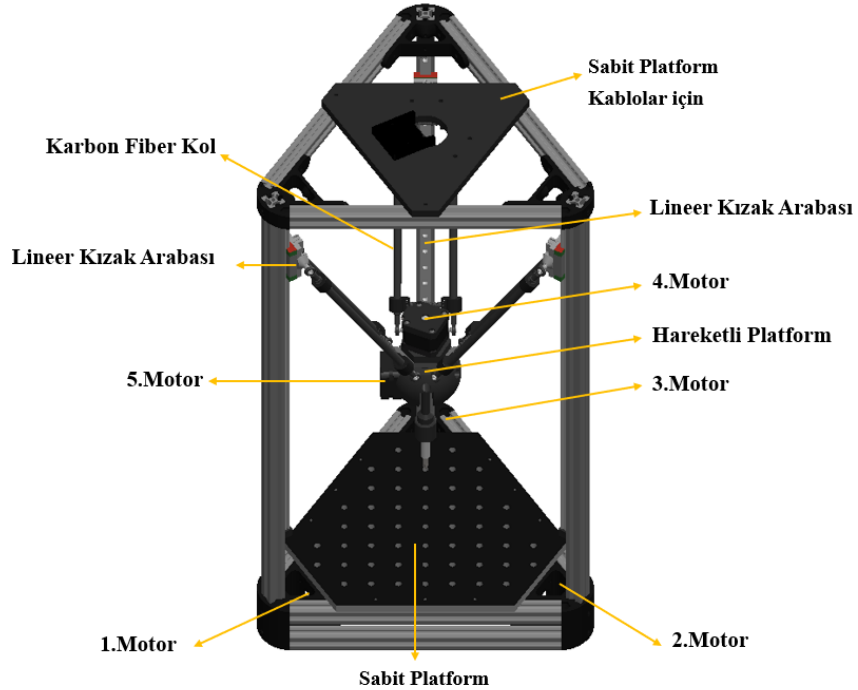


3. BEŞ EKSENLİ HİBRİT DELTA ROBOT GELİŞTİRİLMESİ

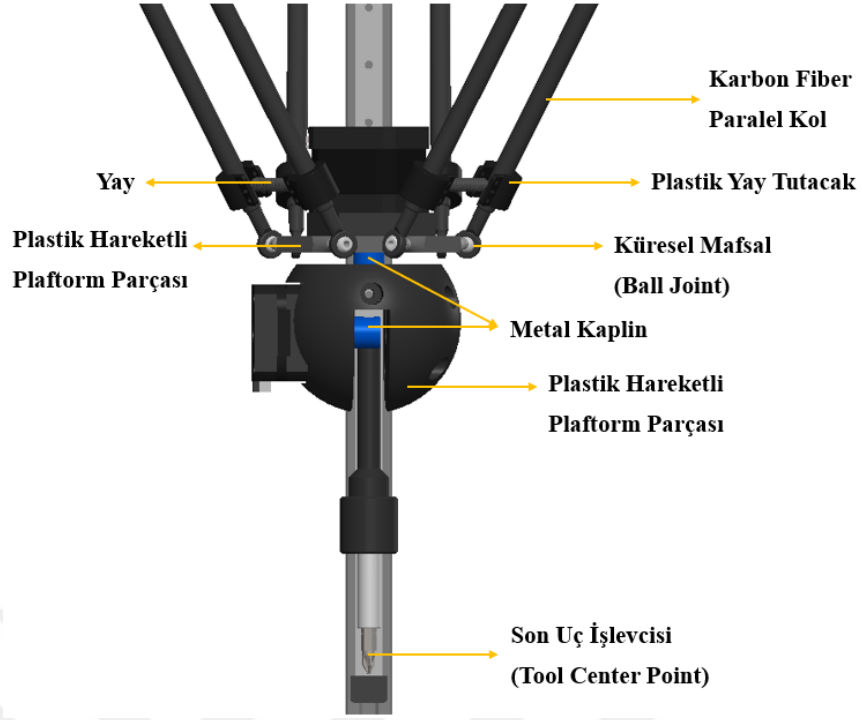
3.1 Mekanik Tasarım

Hibrit delta robotun temel mekaniği için açık kaynak olan üç boyutlu Kossel Delta Yazıcı modeli referans alınmıştır [29]. Maliyeti düşürmek için bazı parçalar üç boyutlu yazıcı ile üretilmiştir, ancak tekrarlanabilirlik ve doğruluğu olumsuz olarak etkileyebilecek kritik bileşenler metal ve karbon fiberden malzemelerden tercih edilmiştir. Birçok parça, maliyeti arttırmamak için Anycubic Kossel Plus marka yazıcının parçalarından kullanılmıştır [30]. Aktüatörlerde doğrudan motor tahriki kullanılarak redüktör maliyetinden kaçınılmıştır ve böylelikle hassasiyetin korunması amaçlanmıştır.

Delta robotun CAD programından alınan katı model görüntülerinin üzerinde robot elemanları gösterilerek Şekil 3.1 ve 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 : Robotun genel görünümü ve elemanları.



Şekil 3.2 : Hareketli platform üzerindeki robot elemanları.

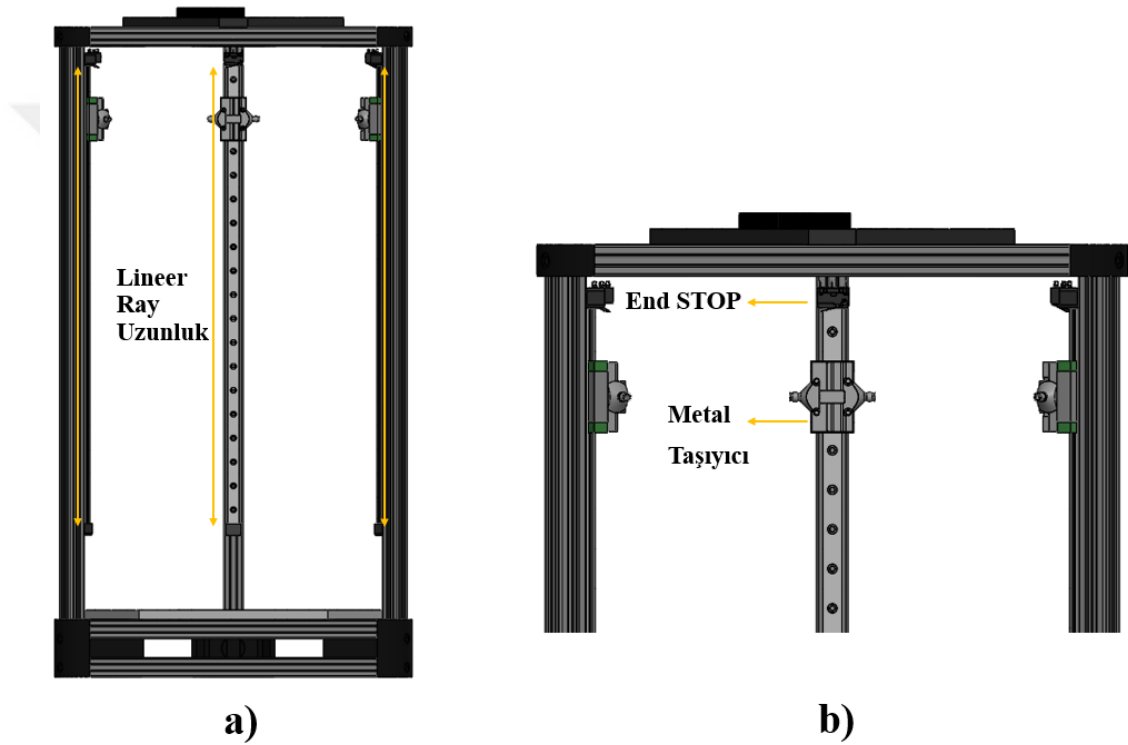
Delta robotun ilk üç eksen prizmatik eklemdir. Bu ilk üç eksen, motor miline takılmış kasnak ile kayışlara bağlanmıştır. Motorların hareketleri kayış kasnak yardımıyla lineer kızak arabalarına aktarılır. Kayışlar lineer arabaların üzerindeki metal taşıyıcılara bağlanarak, motorların senkron hareketiyle birlikte eksenler yüksek hızlarda hareket edebilmektedirler. Delta robotta kullanılan dişli kasnak, dişsiz rulmanlı kasnak ve kayış malzemeleri Şekil 3.3’te gösterilmiştir.



Şekil 3.3 : İlk üç eksen de kullanılan parçalar, a)dişli kasnak, b)avare kasnak, c)zamanlayıcı kayış.

Delta robotun ilk üç prizmatik ekseninde kullanılan lineer rayların her biri 480 milimetre uzunluğundadır. Eksenlerin hareket sınırlarını belirlemek amacıyla rayların alt kısımlarında mekanik limit sonlandırıcılar eklenmiştir. Bu yaklaşım, robotun

güvenli çalışmasını ve mekanik sınırların korunmasını sağlar. Lineer eksenlerin üst kısımlarına elektronik end-stop sensörleri eklenmiştir. Bu sensörler, robot her başlatıldığında ilk üç eksenin referans noktalarını belirleyerek, eksenlerin konumunu doğru bir şekilde tespit edilmesini sağlar. Bu sayede robot, ilk başlangıçta bir kereye mahsus doğru bir sıfırlama yaparak tekrarlanabilirlik ve doğruluk açısından performanslı bir şekilde çalışmaktadır. Lineer eksenler ve end-stop sensörler Şekil 3.4b’de gösterilmiştir. Motorlarda bulunan mutlak enkoder sayesinde 4. ve 5. döner eksenler için end-stop sensörlerine ihtiyaç duyulmamaktadır.



Şekil 3.4 : Robotun ilk üç eksen görünümü, a)lineer rayların görünümü, b)üst tarafının yakından görünümü.

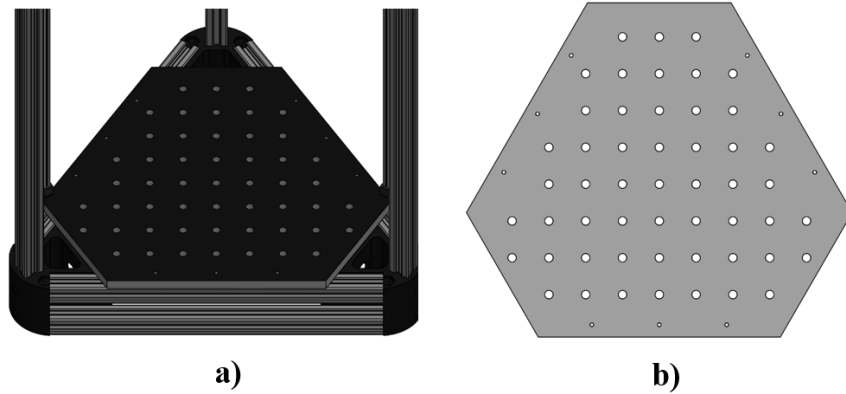
İlk üç eksenin hareketinin sağlanması için redüksiyon gibi malzemeler olmadan motor mili kayış ile eksenleri doğrudan hareket ettirmektedir. İlk üç eksenin değeri için step motor, kayış ve kasnağa göre basit bir hesaplama yapılmaktadır. 2 milimetre adıma sahip GT2 kayış, 20 dişli kasnak, 16 microstep çözünürlüğe ayarlanmış $1,8^\circ$ dereceli step motor için 1 tam tur için 200 adım atılmalıdır. Step motor 16 microstep ayarlandığında 200 adım için 3200 pulse gönderilmelidir. Kasnak için her bir diş 2 milimetre olduğundan 20 dişli bir kasnak tam bir turda 40 milimetre hareket etmektedir. 3200 pulse ile 40 milimetre lineer hareket sağlanmaktadır. Bu yüzden 1 milimetre doğrusal bir hareket için 80 pulse gönderilmelidir. İlk üç eksenin milimetre

cinsinden hareket etmesi için oranlama yapılarak motorlar için gerekli pulse değeri hesaplanmaktadır. Prizmatik eksenin hareketi Şekil 3.5’te gösterilmiştir.



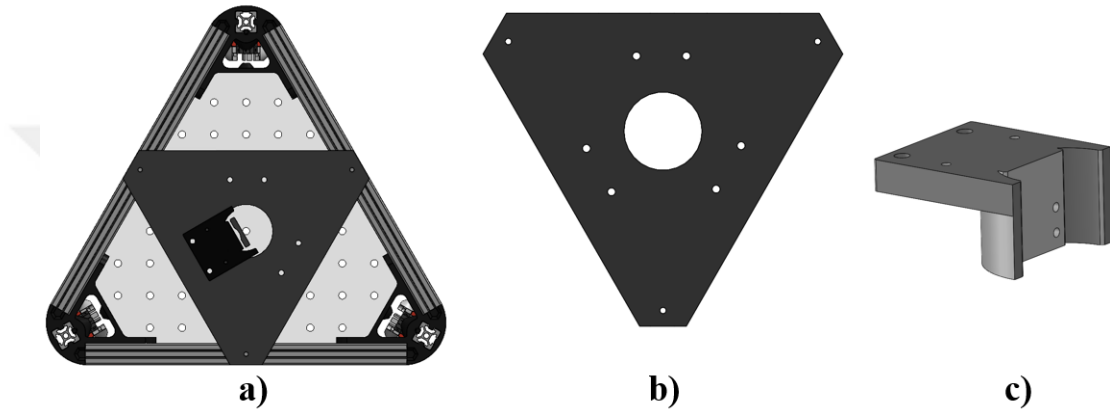
Şekil 3.5 : Prizmatik eksenlerin hareketi.

Delta robotun tabanında bulunan sabit platform özel olarak tasarlanarak lazer kesim ile siyah pleksi malzemeden imal edilmiştir. Siyah pleksi üzerinde referans delikler açılarak, her bir deliğe somun perçin eklenmiştir. Bu perçinler, cıvataların sabitlenmesini sağlayarak iş parçalarının platforma güvenle monte edilmesine olanak tanımaktadır. İş parçalarının platforma sabitlenerek, robot ile daha stabil bir şekilde çalışması amaçlanmıştır. İkinci bir sebep olarak da açılan delikler CNC lazer kesim kullanılarak kesildiği için robotun tekrarlanabilirlik ve doğruluk parametrelerinin test edilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Herhangi büyük iki delik arasında yatay ve dikey uzaklık olarak 30 milimetre olarak tasarlanmıştır. Kenar bölgelerde bulunan küçük delikler sabit platformun robota sabitlenmesi için kesilmiştir. Siyah pleksiden üretilen sabit platform Şekil 3.6’de gösterilmiştir.



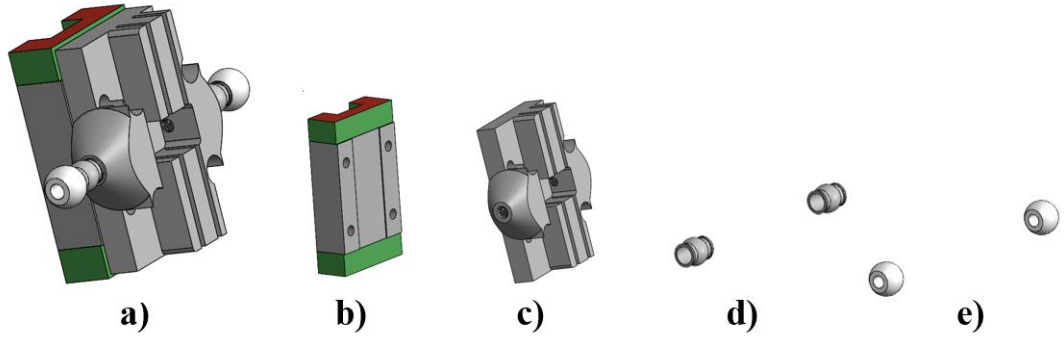
Şekil 3.6 : Robotun alt kısmı, a)taban görünümü, b)tabanda bulunan sabit platform.

Aynı şekilde robotun üst tarafında bulunan üçgensel levha da CNC lazer kesim kullanılarak siyah pleksi malzemeden imal edilmiştir. Bu pleksi malzemenin tam ortasına 50 milimetre çapında delik açılarak 4. ve 5. eksenlerin kabloların montajı yapılmıştır. 4. ve 5. eksenlerin hareketli olması sebebiyle kabloların soketlerinin birbirinden kolayca ayrılabilmesi ve hata oluşmaması için üç boyutlu plastik parça tasarlanarak, kabloların üzerine sabitlenmesi sağlanmıştır. Siyah pleksi ve üç boyutlu plastik parçalarının ayrı ayrı ve robota montajlanmış görüntüleri Şekil 3.7’de gösterilmiştir.



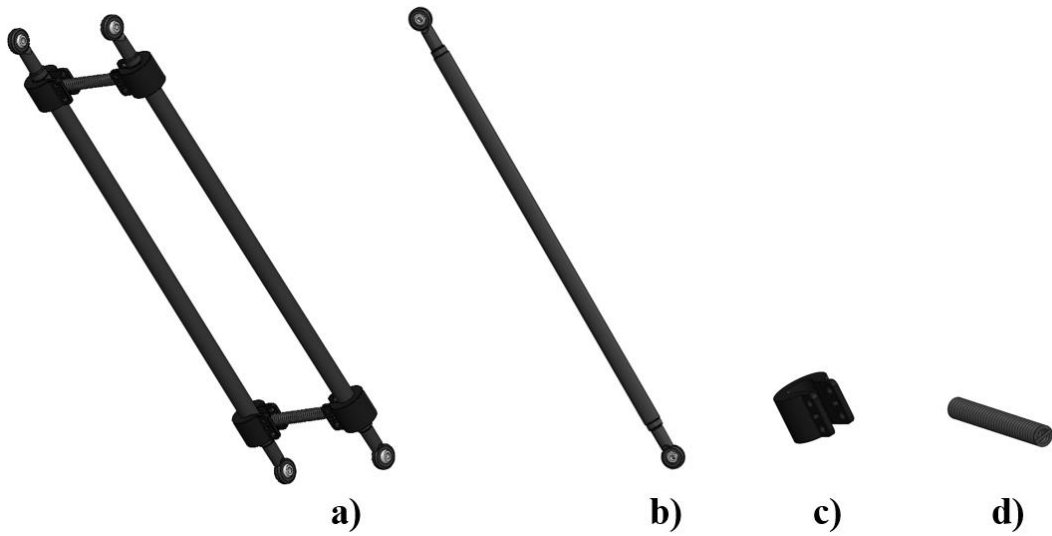
Şekil 3.7 : Robotun üst kısmı, a)üstten görünüm, b)pleksi parça, c)kablolar için plastik parça.

Robotun lineer eksenlerinin hareketini kollara ileten bağlantı parçalarının hassasiyeti, sistemin doğruluğu için kritik öneme sahiptir. Bu nedenle tüm parçalar metal malzemeden üretilmiş ve montaj sırasında sıkılık ve uyum konusuna özen gösterilmiştir. Bu yaklaşım, eksen hareketlerinin doğru şekilde iletilmesini sağlarken, robotun çalışması sırasında titreşimi azaltarak daha stabil bir performans elde edilmesine katkı sağlamaktadır. Bu durum hem hassasiyetin artırılmasına hem de sistemin dayanıklılığının güçlendirilmesine yardımcı olur. Lineer araba, lineer kızakların üzerine monte edilerek eksenlerin kaymasını sağlar. Metal taşıyıcı, lineer arabaya dört noktadan sabitlenir ve kayışların eksenlere bağlantısı için kullanılır. Metal mesafe aparatı, küresel eklemlerin hareketinin kısıtlanmaması için metal taşıyıcı ve küresel eklemin arasına yerleştirilmektedir. Küresel eklem ise paralel kollardan serbestçe dönmesini sağlayarak robotun hareket kabiliyetini artırır. Parçaların ayrı ayrı ve birbirine montajlanmış görüntüsü Şekil 3.8’de gösterilmiştir.



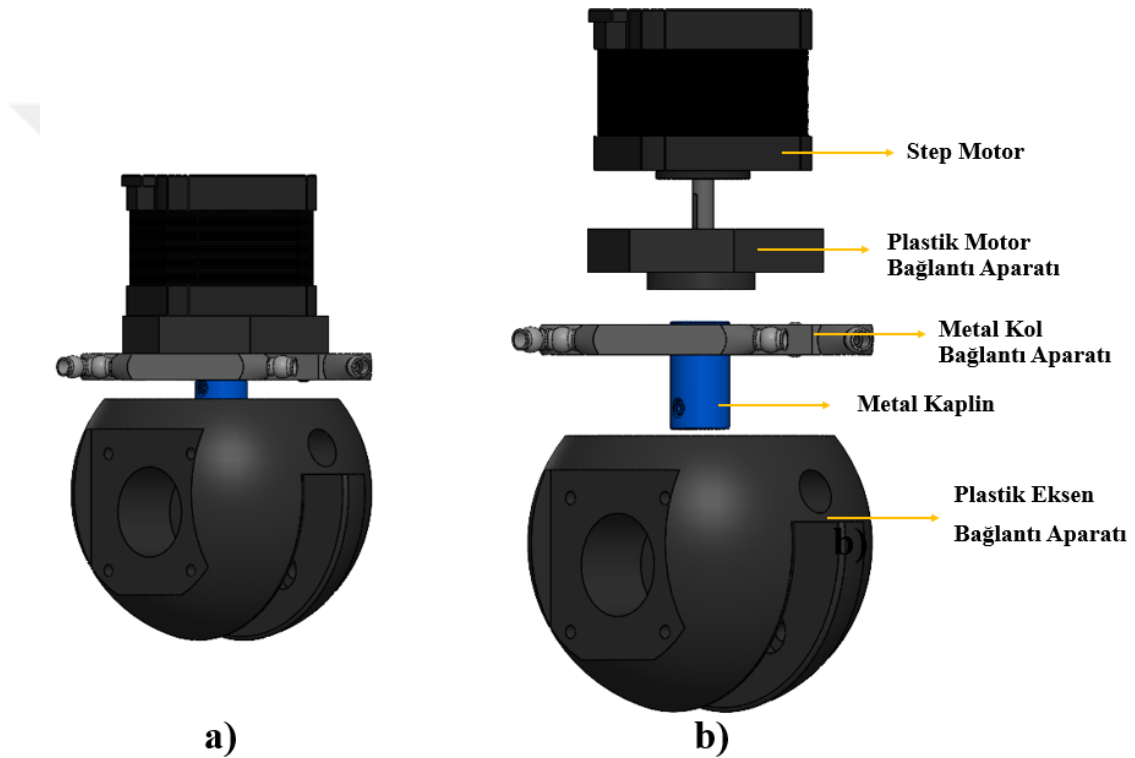
Şekil 3.8 : Prizmatik eksen parçaları, a)arabanın montajlanmış görünümü, b)lineer araba, c)metal taşıyıcı, d)metal mesafe aparatı, e)küresel eklem.

Robotun 4. ve 5. eksenin olduğu hareketli kısımda bulunan parçalarının hafif olması gerekmektedir. Bununla birlikte kolların da hafif malzemeden seçilmesi fakat hassasiyet için esnememesi gerekmektedir. Bu yüzden delta robotlarda kollar genellikle karbon fiber malzemeden imal edilmektedir. Küresel eklemler karbon fiber millere monte edilir, ancak bu süreç sırasında kolların uzunlukları arasında oluşabilecek farkların önlenmesi kritik öneme sahiptir. Bu tolerans farkları, robotun hassasiyetini ve tekrarlanabilirliğini olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle, üretim ve montaj süreçlerinde dikkatli ölçüm ve kontrol yöntemleri uygulanmalıdır. Uç işlevcinin titreşimsiz ve stabil hareketini sağlamak için iki kol arasında metal yaylar kullanılmış, bu yayların paralel kollara montajı için üç boyutlu yazıcıyla plastik aparatlar tasarlanarak üretilmiştir. Parçalar Şekil 3.9’da gösterilmiştir.



Şekil 3.9 : Paralel kolların görünümü, a)kolun bütün görünümü, b)karbon fiberden üretilen tekli kol, c)yayların sabitlenmesi için plastik aparat, d)metal yay.

Delta robotun hareketli kısmında paralel kolların sabitlendiği metal kol bağlantı aparatı özellikle hazır metal parça olarak seçilmiştir. Böylelikle kolların bağlandığı kısımlarda esnemenin önüne geçilmiştir. 4. eksen için 17HS4401S Nema17 Step motor tercih edilmiştir. 17HS4401S motorun metal kol bağlantı aparatına sabitlenmesi için ayrıca plastik parça tasarlanarak üç boyutlu yazıcı ile üretilmiştir. Plastik eksen bağlantı aparatı için özellikle minimal bir tasarım yapılarak üç boyutlu yazıcıdan düşük doluluk oranıyla üretilmiştir. Parçanın hafif olması için çalışılmıştır. 4. eksen için gerekli bütün parçalar Şekil 3.10'da gösterilmiştir.

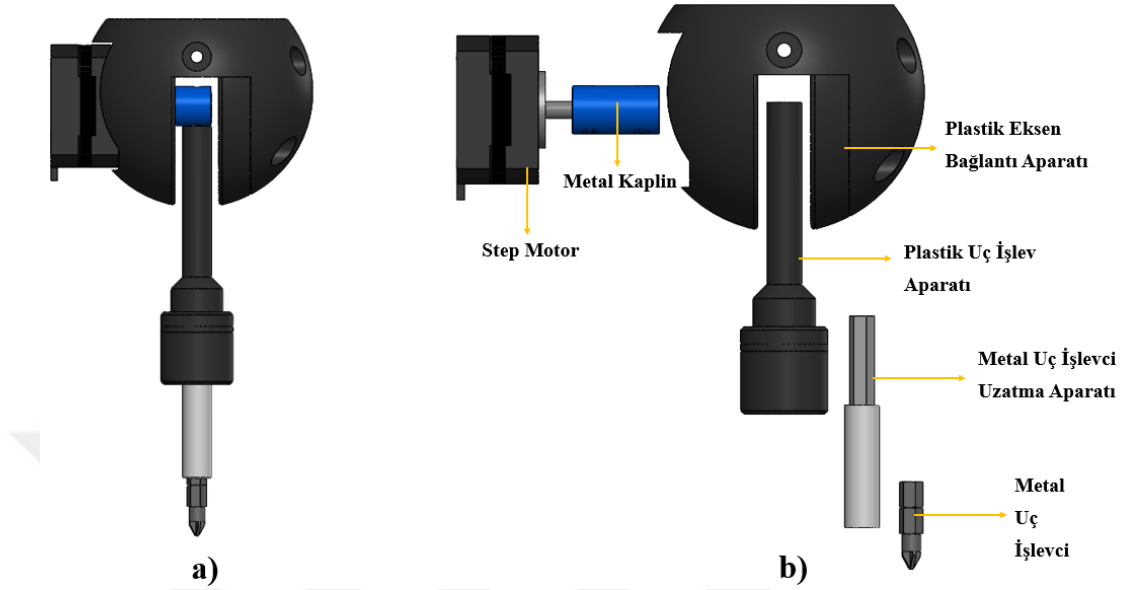


Şekil 3.10 : 4. eksen görünümü, a) bağlantı elemanlarının montajlanmış görünümü, b) montajlanmamış görünümü.

5. eksen için özellikle düşük torklu Nema17 tür 17HS4023 step motor tercih edilmiştir. 5. eksen motorunda sadece uç işlevcisi bağlanmaktadır bu yüzden yüksek tork gerektirmemektedir. Bu tez kapsamında robotun ağır yükler taşınması yerine kinematik hesaplamalarının sonuçlarının test edildiği deneysel çalışmalar hedeflenmiştir.

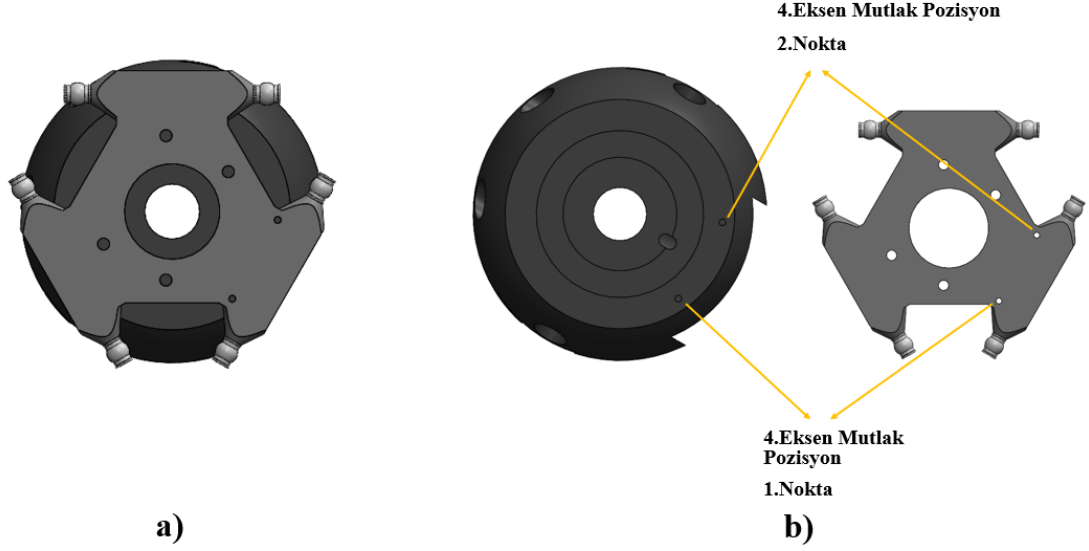
5. eksen motoruna bağlanan plastik uç işlev aparatının iç kısmına mıknatıs yerleştirilmiştir. Matkap uçları gibi metal parçalar kolaylıkla sök tak yapılabilir. Bu tez kapsamında robotun montaj prosesini test edilmesi amaçlandığı için matkap ucuna ekstra uzatma aparatı takılarak uzunluğunun

arttırılması sağlanmıştır. Uç işlevci belirlenen deliklere farklı oryantasyonlarda montaj yapılması test edilecektir. Kullanılan malzemeler Şekil 3.11’de gösterilmiştir.



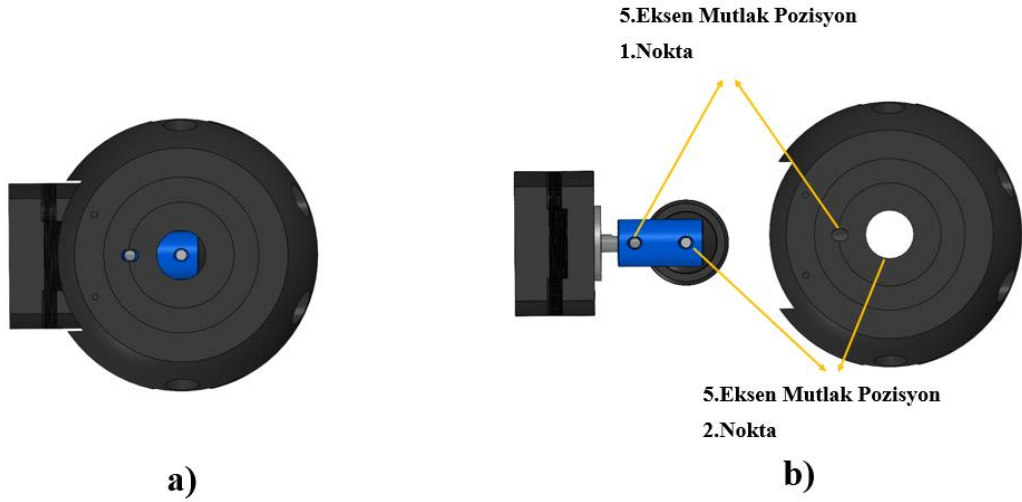
Şekil 3.11 : 5. eksen görünümü, a) bağlantı elemanlarının montajlanmış görünümü, b) montajlanmamış görünümü.

İlk 3 prizmatik eksen robotun ilk enerji verildiğinde pozisyonlarını bulması end-stop sensörler kullanılmıştır. 4. eksen döner eklemlidir için end-stop kullanılması gerek yoktur. Makerbase Servo 42D ürünün manyetik enkoderi motora her enerji verildiğinde hangi konumda olduğunu bilmektedir. Motorların pozisyonlarını kaybetmemesi için enerjili kalmasına gerek yoktur. Sadece 4. eksen montajı yapılırken Şekil 3.12b’de gösterilen iki parçanın üzerinde bulunan iki delik üst üste getirilerek motorun mutlak değeri girilir. Bu işlem robot her açıldığında değil sadece bir kereye mahsus yapılması gerekmektedir. Eğer motor eksenden sökülürse tekrardan yapılması gerekmektedir.



Şekil 3.12 : 4.eksen referans noktaları, a)montajlı görünümü, b)montajlanmamış görünümü.

4.eksende olduğu gibi 5.eksen de manyetik enkoder sayesinde bir kereye mahsus motorun başlangıç noktası ayarlanmalıdır. Bu işlem 5.eksen montajı yapıldıktan sonra Şekil 3.13b’de gösterilen iki ayrı parçanın üzerindeki iki delik üst üste geldiğinde sıfırlama işlemi yapılmalıdır. 4.eksende yapılan işlemler aynen tekrarlanmalıdır.

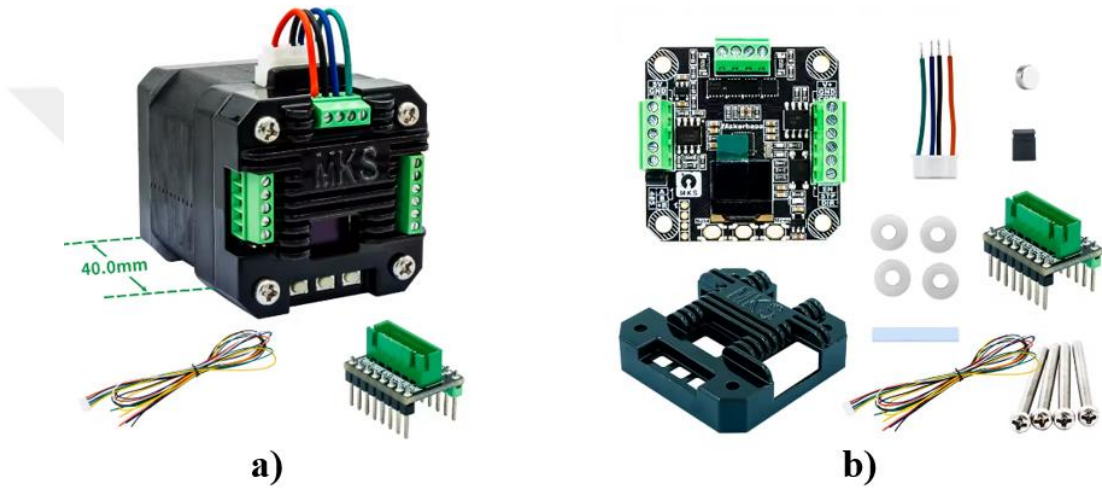


Şekil 3.13 : 5.eksen referans noktaları, a)montajlı görünümü, b)montajlanmamış görünümü.

3.2 Donanım

Hibrit delta robotun beş ekseninde step motor kullanılmıştır. Kullanılan bu step motorlar açık çevrim oldukları için pozisyon ve hız değerleri kaybolabilmektedir. Step

motorların pozisyon, hız ve ivme parametrelerini kontrol etmek için MKS firmasının SERVO42D ürünü kullanılmıştır. Bu ürün sayesinde step motorların arkalarında bulunan millerine manyetik enkoder monte edilerek, motorun en arka kısmına bir kontrolcü eklenmesini sağlamaktadır. Böylelikle step motorlar da servo motorlar gibi pozisyon, hız ve ivme parametreleri ile kapalı çevrimde kontrol edilebilmektedir. SERVO42D ürününün CAN ve RS485 olmak üzere iki farklı haberleşme seçeneği bulunmaktadır. Bu tez kapsamında bu robotun endüstriyel otomasyon sistemleriyle gelecekte uyumlu çalışabilmesi için RS485 haberleşme seçeneği tercih edilmiştir. SERVO42D ürününün içeriği Şekil 3.14’te gösterilmiştir.



Şekil 3.14 : Makerbase Servo42D ürünü, a)montajlı görünümü, b)parçaların ayrı ayrı görünümü [31].

Makerbase Servo42D ürünü için toplamda dört bağlantı yapılması gerekmektedir: 12-24V arası voltaj, toprak (GND), RS-485 A, ve RS-485 B. Bu bağlantılar, motorun enerjisini beslemek ve RS-485 haberleşmesi için gereklidir. Her bir motora, kontrol sistemi tarafından tanımlanabilmesi için benzersiz bir kullanıcı numarası atanmalıdır. RS-485 haberleşmesi sayesinde, her bir motorun kullanıcı numarası belirtilerek, motorun pozisyon, hız ve ivme değerleri hassas bir şekilde kontrol edilmesi sağlanmaktadır. Bu sistem sayesinde, aynı haberleşme hattında sadece iki kablo hattı kullanılarak birden fazla motorun sorunsuz şekilde yönetilmesini sağlar.

Servo42D ürünün kontrolcüsü olarak Cortex-M4 işlemcisi kullanılmıştır. Bu kontrolcünün içinde FOC ve kapalı çevrim algoritmaları gömülmüştür ve kullanıcıya seçenek olarak sunulmuştur. Ürünün özellikleri Çizelge 3.1’e eklenmiştir.

Çizelge 3.1 : Makerbase Servo42D ürünün özellikleri [31].

Kategori	Özellikler
Mikroişlemci	N32L403 (Cortex-M4)
Enkoder	14 Bit Manyetik Enkoder
Çalışma Voltajı	12-24 V
Çalışma Akımı	0-3000 mA
Çalışma Frekansı	Pozisyon 10 Khz, Hız 20 Khz, Tork 20 Khz
Maksimum Hız	3000 RPM +
Arayüz Oranı	9600 – 256000
Arayüz Adresi	1 Master, 255 Slave
Ekstra Özellik 1	MODBUS-RTU
Ekstra Özellik 2	Eğri İvmelenmesi ve Yavaşlaması
Ekstra Özellik 3	End Stop Sayesinde Başlangıç Pozisyonu
Ekstra Özellik 4	Bulma
	Göreceli Pozisyon ve Mutlak Pozisyon

İlk üç eksen için, yüksek tork gereksinimlerini karşılamak amacıyla Nema17 step motorlarının en yüksek torklu modeli olan 17HS8401s tercih edilmiştir. Bu motorlar, aynı zamanda 4. ve 5. eksen motorlarını da taşıdığı için yüksek torklu bir seçenek kullanılması avantaj sağlamaktadır. Nema24 step motorların kullanımı, maliyetin artmasına ve bu motorların bağlantı yapıldığı parçaların boyutlarının büyümesine neden olduğu için tercih edilmemiştir.

4. eksen motoru, 5. eksen de taşıdığı için yüksek torka sahip olması gerekmektedir. Buna karşılık, 5. eksen motoru ağır yük taşımayacağından, Nema17 modelleri arasından en düşük torklu seçenek tercih edilmiştir. 5 eksen için kullanılan step motor türleri ve özellikleri Çizelge 3.2’de verilmiştir.

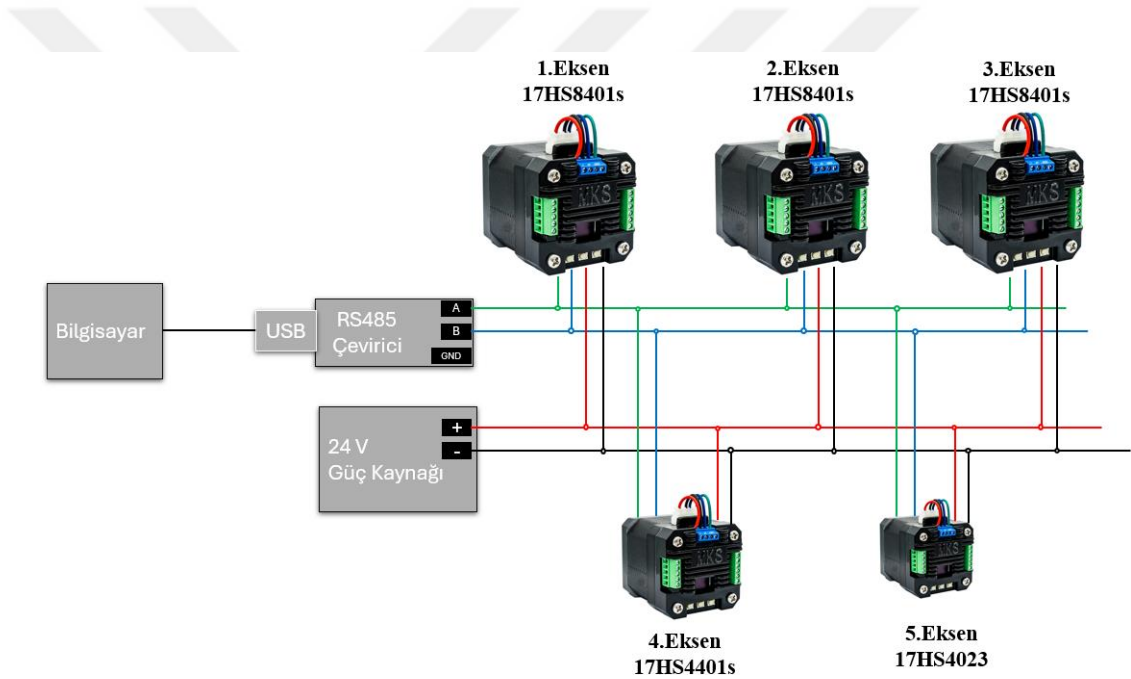
Çizelge 3.2 : Robotun eksenlerinde kullanılan step motorlar ve özellikleri [32].

Eksen Türü	1,2,3. Eksen	4.Eksen	5.Eksen
Motor Modeli	17HS8401s	17HS4401s	17HS4023
Adım Açısı	1,8 °	1,8 °	1,8 °
Motor Uzunluk	48 mm	38 mm	40 mm
Anma Akımı	1,7 A	1,5 A	1 A
Faz Direnci	1,8 ohm	1,8 ohm	3,5 ohm
Faz Endüktansı	3,2 mH	4,2 mH	3,2 mH
Tutunma Torku	48 N.cm	40 N.cm	13 N.cm
Ağırlık	312 g	300 g	132 g

Step motorlar, servo motorlara kıyasla daha uygun maliyetli olmaları nedeniyle robot tasarımlarında maliyet optimizasyonu sağlamak için tercih edilmektedir. Düşük yüklerde yapılan deneysel çalışmalarda pozisyon, hız ve ivme kontrolü açısından yeterli performans sunarlar. Bu özellikleri, özellikle prototip geliştirme ve araştırma

amaçlı uygulamalar için idealdir. Step motorların MKS Servo42D ile kombinasyonu, hassasiyet ve tekrarlanabilirlik gereksinimlerini karşılayan başarılı sonuçlar sağlamaktadır.

Eksen bağlantılarının nasıl yapılması gerektiği Şekil 3.15'te detaylı şekilde gösterilmektedir. Haberleşme için iki kablo kullanımı, sistemin hem düzenini sadeleştirir hem de kurulum süresini kısaltarak avantaj sağlar. Bu yöntem, birden fazla motorun senkronize bir şekilde çalışmasını sağlarken, kablo karmaşasını ve maliyetini de önemli ölçüde azaltır. Ayrıca, kablolardaki veri kayıplarını en aza indirmek ve motor kontrol sinyallerinin gürültülerini azaltmak için kaliteli kablo ve bağlantı elemanları tercih edilmiştir. Bu ürün hem modülerlik hem de bakım kolaylığı açısından da üstünlük sunar.



Şekil 3.15 : Robotun motorlarının bağlantıları ve haberleşmesi [31].

3.3 Yazılım

Beş motorun RS-485 protokolü üzerinden motorların senkronize bir şekilde kontrol edilebilmesi için Python programlama dilinde Serial kütüphanesi kullanılmıştır. Kinematik hesaplamalar gerçekleştirildikten sonra, her bir eksene özel olarak belirlenen pozisyon bilgilerinin hızlı bir haberleşme bandında gönderilmesi sağlanmıştır. Motorlara pozisyon, hız ve ivme değerleri Serial kütüphanesi üzerinden aktarılmaktadır. Bu iletişim yöntemi, sistemin senkronize çalışmasını sağlarken aynı zamanda motorların performansını optimize etmek için kritik bir rol oynamaktadır.

Ayrıca, RS-485 protokolünün sağladığı güvenilirlik ve uzun mesafe iletişim avantajları, sistemin stabilitesini artırmaktadır.

İlk üç eksen için motorlara gönderilen konum bilgisi, milimetre cinsinden hedef konumun karşılığı olan pulse birimi olarak gönderilir. Bu eksenlerin kontrolü, RS-485 haberleşme protokolü ile sabit uzunlukta 11 byte'lık bir veri paketi üzerinden gerçekleştirilir. Bu pakette 2. byte için hedeflenen prizmatik eksen numarası, 4. ve 5. byte için istenen hız değeri (0–3000 RPM), 6. Byte için ivme değeri (0–255), 7. ila 10. byte için hedef konum pulse cinsinden mutlak değeri, 11. byte için 10 byte'ın sağlama değeri yer almaktadır. Şekil 3.16'da ilk üç eksen için paket uzunluğu ve byte değerleri gösterilmiştir.

1. Byte	2. Byte	3. Byte	4-5. Byte	6. Byte	7-10. Byte	11. Byte
Başlık	Slave Adres	Fonksiyon	Hız	İvme	Mutlak Eksen	Kontrol
FA	adres	FE	hız	ivme	absPulses	CRC

Şekil 3.16 : Prizmatik eksenler için RS485 paketi [33].

Döner eklemler için kullanılan RS-485 veri paketi formatı, lineer eksenlere benzer şekilde 11 byte'tan oluşur. Ancak bu pakette 3. byte'taki fonksiyon kodu farklıdır ve 7–10. byte'ta gönderilen değer bir açının karşılığı olan mutlak eksen değeridir. Şekil 3.17'de son iki eksen için paket uzunluğu ve byte değerleri gösterilmiştir.

1. Byte	2. Byte	3. Byte	4-5. Byte	6. Byte	7-10. Byte	11. Byte
Başlık	Slave Adres	Fonksiyon	Hız	İvme	Mutlak Eksen	Kontrol
FA	adres	F5	hız	ivme	absAxis	CRC

Şekil 3.17 : Döner eksenler için RS485 paketi [33].

5 eksenli hibrit delta robotun kinematik çözümlerinin doğrulanması için görselleştirilmesi gerekmektedir. Üç boyutlu görselleştirme için robotun hareketlerini kontrol etmek amacıyla Matplotlib ve Tkinter kütüphanesi kullanılmıştır. Matplotlib kullanılarak geliştirilen bütün kinematik denklemlerin hesaplandığı arayüz Şekil 3.18'de gösterilmiştir.

4. GÖRSEL SERVO İLE KONTROL

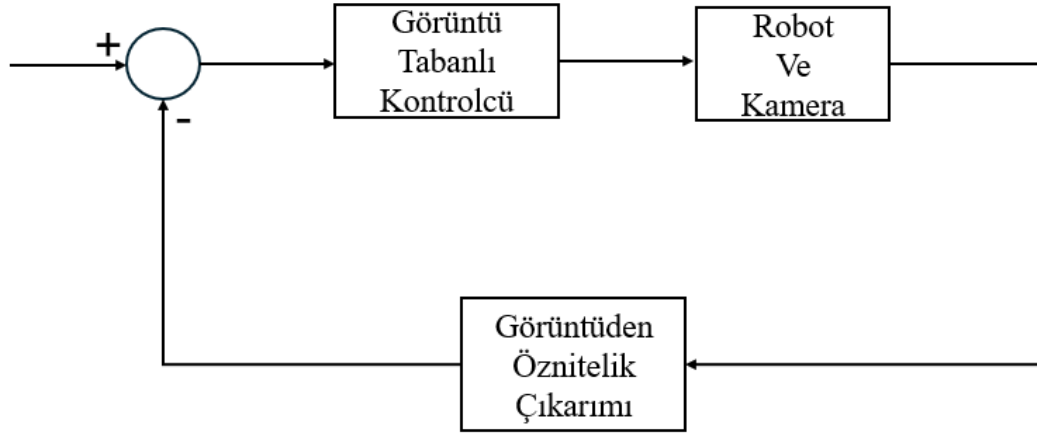
Görsel servo, robotik ve hareket sistemlerinde, kamera gibi görsel veri sağlayan sensörlerden elde edilen bilgilerin gerçek zamanlı olarak işlenmesiyle, robotun hareketlerinin dinamik bir şekilde güncellenmesini sağlayan bir tekniktir. Bu yöntem, görsel verilerin geri besleme prensibine dayanır ve robotun çevresindeki nesnelere göre belirli görevleri yerine getirebilmesi için iki boyutlu ve üç boyutlu görsel verilerin kullanılmasını hedefler.

Görsel servo sistemleri, robotun konumunu ve hareketini hassas bir şekilde kontrol etmek için çevreden sürekli olarak görsel veri toplar ve işler. Bu süreçte, robotun mevcut durumu ile hedef durum arasındaki fark analiz edilir ve bu farkı minimize edecek şekilde robotun aksiyon alması sağlanır.

Genelde 2 farklı görsel servo yöntemi sıklıkla kullanılır. Bu yöntemler görüntü tabanlı görsel servo (IBVS) yöntemi ve pozisyon tabanlı görsel servo (PBVS) yöntemleridir.

4.1 Görüntü Tabanlı Görsel Servo Yöntemi (IBVS)

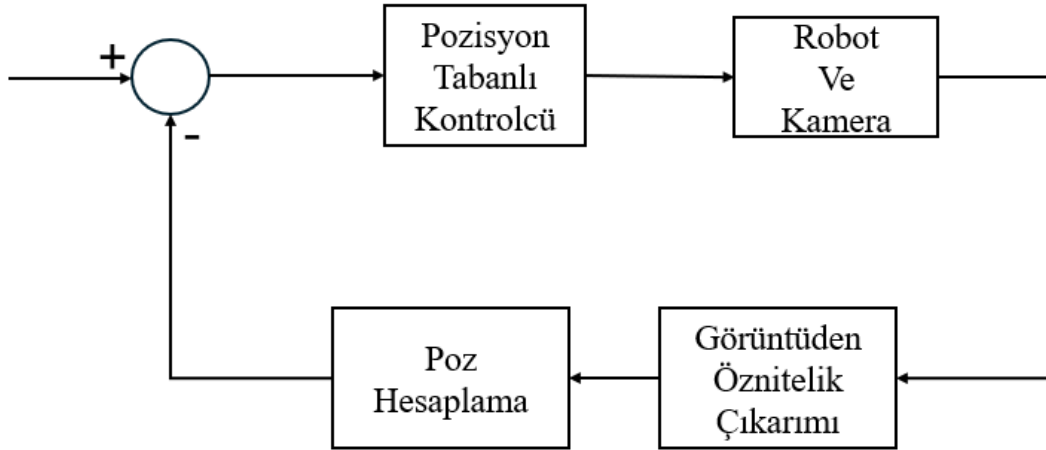
Bu yaklaşım, robot kontrolünü kamera görüntüsünde görsel özniteliklere (örneğin; kenar, daire, işaretçi) göre gerçekleştirir. Görüntüdeki hedef özelliklerin istenen konuma ulaşması için robot hareket eder. Görüntü tabanlı görsel servo, doğrudan görüntü düzleminde çalıştığı için genellikle hızlıdır, ancak üç boyutlu işlem olmadığı için karmaşık hareketlerde zorluk çıkarabilir. Kontrol blok diyagramı Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1 : Görüntü tabanlı görsel servo yöntemi [34].

4.2 Pozisyon Tabanlı Görsel Servo Yöntemi (PBVS)

Görüntüden çıkarılan görsel bilgiler kullanılarak hedef nesnenin üç boyutlu poz bilgisi tahmin edilir ve bu poz bilgisine göre robot yörüngesi dinamik olarak güncellenir. Bu yöntem, daha karmaşık hareketler ve geniş çalışma alanları için uygundur, ancak üç boyutlu poz bilgisinin tahmin edilmesinde hesaplamalar daha maliyetli olabilmektedir. Pozisyon tabanlı olan bu yöntemin kontrol blok diyagramı Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



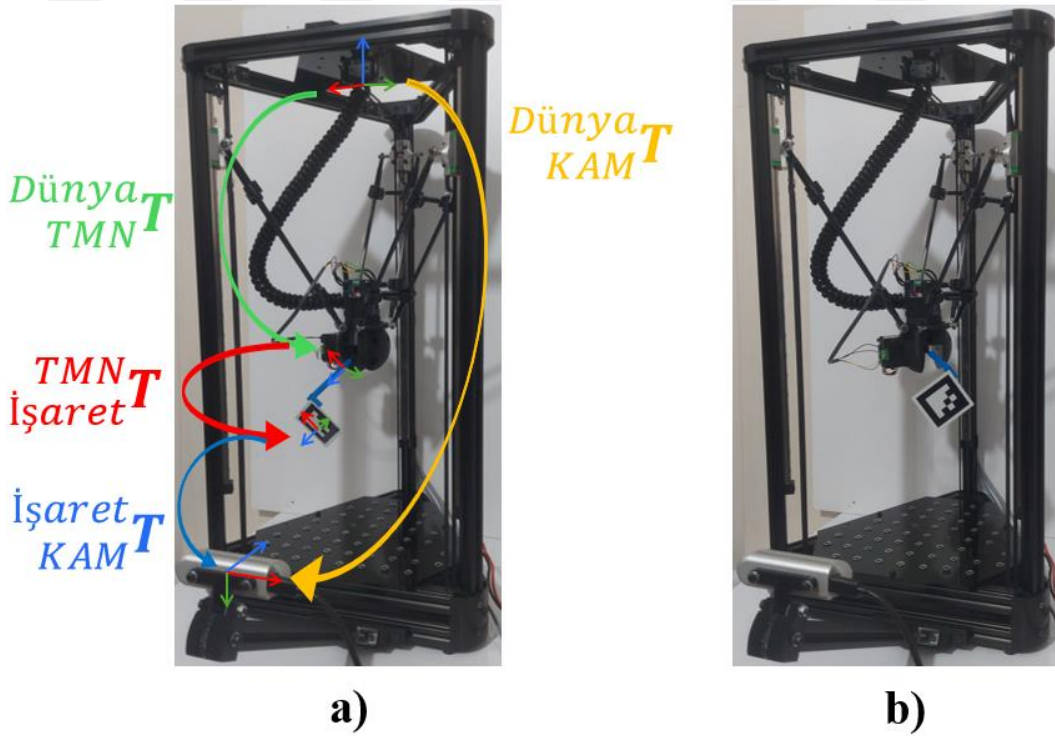
Şekil 4.2 : Pozisyon tabanlı görsel servo yöntemi [34].

4.3 Kamera Robot Kalibrasyonu

ICP algoritması kullanılarak, montajı yapılacak nesnenin başlangıç ve son pozisyonları arasındaki dönüşüm matrisi, kamera koordinat sistemi referans alınarak hesaplanmaktadır. Robotun hareket etmesi gereken noktaların, nesnenin son pozuna göre güncellenebilmesi için bu noktaların da kamera eksenine göre tanımlanması

gerekmektedir. Noktaların kamera eksenine göre tanımlanması için robot kamera kalibrasyonu yapılması gerekmektedir. Robotun başlangıç eksenini olan Dünya koordinat ekseninden, kamera koordinat sistemine göre 4x4 boyutunda homojen dönüşüm matrisi hesaplanmalıdır. Böylece, kamerada tespit edilen nesnenin pozisyonundaki değişime bağlı olarak, robotun hedef noktaları kamera eksenine göre otomatik olarak güncellenebilecektir. Robotun, gerçekleştirmesi gereken montaj gibi görevleri tekrar programlamaya ihtiyaç duymadan, tamamen otonom olarak yerine getirmesi sağlanacaktır.

Kameranın iç (intrinsic) kalibrasyonundan farklı olarak, robotla olan konum ilişkisine bağlı şekilde yapılan robot kamera kalibrasyonu için iki temel yaklaşım bulunmaktadır. Bu kalibrasyon türlerinden ilki, kameranın doğrudan robota monte edildiği ve robot hareket ettikçe kameranın da hareket ettiği Eye-in-Hand kalibrasyon yöntemidir. Diğerinde ise kamera, robotun görüş alanında olacak şekilde sabit bir konuma yerleştirilir; bu yönteme ise Eye-to-Hand kalibrasyon denir. Bu çalışma kapsamında kameranın sabit olduğu robot kamera kalibrasyonu gerçekleştirilmektedir [35-37]. Robot kamera kalibrasyonu için Aruco işaretçi (marker) ve OpenCV kütüphanesi kullanılmıştır.



Şekil 4.3 : Robot kamera kalibrasyonu, a)dönüşüm matrislerinin gösterilmesi, b) kalibrasyon için robotun farklı konumu.

Kameranın Dünya koordinat sistemine göre konumunun bulunması için ${}_{KAM}^{Dünya}T$ homojen dönüşüm matrisinin hesaplanması gerekmektedir. Dünya, TMN, Aruco işaretçi ve Kamera eksenleri arasındaki homojen dönüşüm matrisleri ${}_{TMN}^{Dünya}T$, ${}_{İşaret}^{TMN}T$, ${}_{KAM}^{İşaret}T$, ${}_{KAM}^{Dünya}T$ olarak belirlenmiştir. Şekil 4.3'e göre ${}_{KAM}^{Dünya}T$ matrisinin hesaplaması Denklem 4.1'de gösterilmiştir.

$${}_{KAM}^{Dünya}T = {}_{TMN}^{Dünya}T \cdot {}_{İşaret}^{TMN}T \cdot {}_{KAM}^{İşaret}T \quad (4.1)$$

${}_{KAM}^{Dünya}T$ dönüşüm matrisinin hesaplanması basit değildir [38]. ${}_{TMN}^{Dünya}T$ matrisi robot kinematik denklemleri ile, ${}_{KAM}^{İşaret}T$ veya ${}_{İşaret}^{KAM}T$ matrisleri birbirinin tersi olup kameradan Aruco işaretçi poz hesaplama ile bulunmaktadır. ${}_{KAM}^{İşaret}T$ ve ${}_{İşaret}^{KAM}T$ matrislerinin hesaplanması içinde OpenCV kütüphanesi kullanılmıştır. Bu matrislerin hesaplanmasında kameranin iç kalibrasyon parametreleri için fabrika kalibrasyon verileri kullanılabilir veya kameranin iç kalibrasyonu yapılabilir. ${}_{İşaret}^{TMN}T$ matrisi bilinmemektedir, fakat bu matris robot farklı pozlarda olsa bile her zaman sabit kalmaktadır. Bu matrisin her zaman sabit kalması referans alınarak, yeni denklem oluşturulur.

$${}_{İşaret}^{TMN}T = {}_{Dünya}^{TMN}T \cdot {}_{KAM}^{Dünya}T \cdot {}_{İşaret}^{KAM}T \quad (4.2)$$

$$\begin{bmatrix} {}_{İşaret}^{TMN}T \\ {}_{İşaret}^{TMN}T \\ {}_{İşaret}^{TMN}T \\ \dots \\ {}_{İşaret}^{TMN}T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}_{Dünya}^{TMN}T_1 \cdot {}_{KAM}^{Dünya}T_1 \cdot {}_{İşaret}^{KAM}T_1 \\ {}_{Dünya}^{TMN}T_2 \cdot {}_{KAM}^{Dünya}T_2 \cdot {}_{İşaret}^{KAM}T_2 \\ \dots \\ {}_{Dünya}^{TMN}T_n \cdot {}_{KAM}^{Dünya}T_n \cdot {}_{İşaret}^{KAM}T_n \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

${}_{İşaret}^{TMN}T$ matrisinin her zaman sabit olması sebebiyle, birinci denklem ile ikinci denklem birbirine eşitlenir.

$${}_{Dünya}^{TMN}T_1 \cdot {}_{KAM}^{Dünya}T_1 \cdot {}_{İşaret}^{KAM}T_1 = {}_{Dünya}^{TMN}T_2 \cdot {}_{KAM}^{Dünya}T_2 \cdot {}_{İşaret}^{KAM}T_2 \quad (4.4)$$

Bu denklemde sol taraftan $\left[{}_{Dünya}^{TMN}T_2 \right]^{-1}$ matrisi ile sağ taraftan ise $\left[{}_{İşaret}^{KAM}T_1 \right]^{-1}$ ile çarpılır.

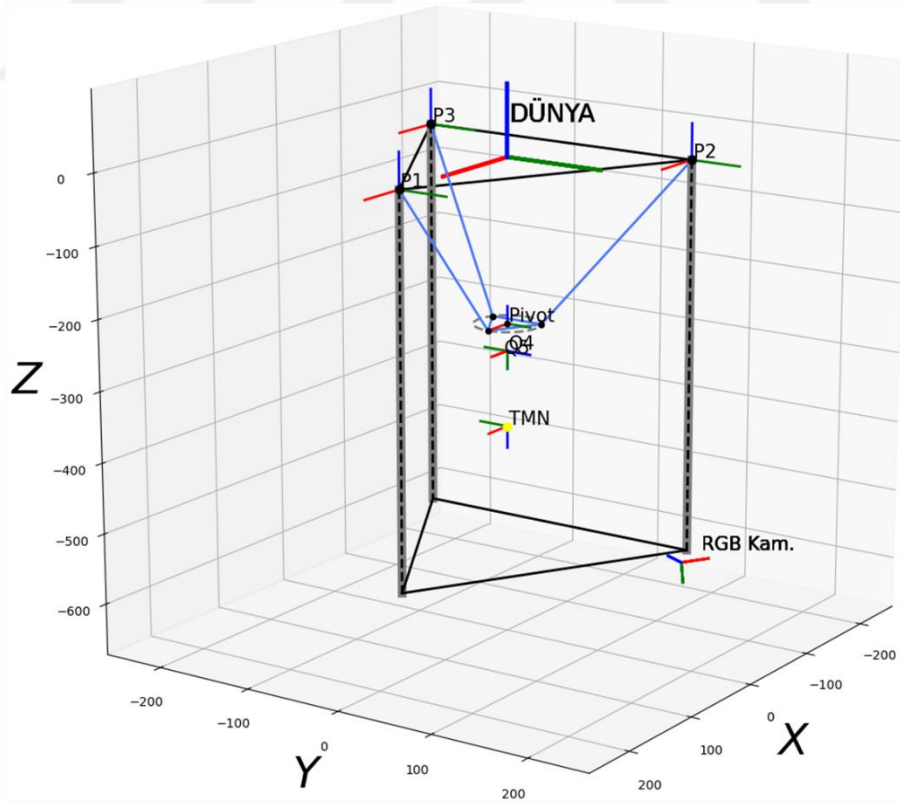
${}_{KAM}^{Dünya}T$ matrisi bilinmeyen yani X olarak ifade edilir. Yeni denklem elde edilir.

$${}_{\text{Dünya}}^{TMN}T_2^{-1} \cdot {}_{\text{Dünya}}^{TMN}T_1 \cdot X = X \cdot {}_{\text{İşaret}}^{KAM}T_2 \cdot {}_{\text{İşaret}}^{KAM}T_1^{-1} \quad (4.5)$$

Bu denklem n sayıda farklı robot pozu için matris formunda yazılır.

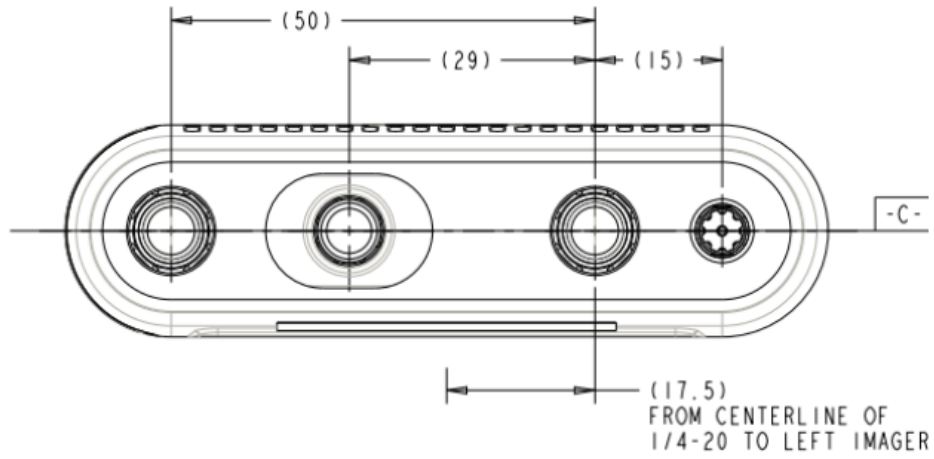
$$\begin{bmatrix} {}_{\text{Dünya}}^{TMN}T_2^{-1} \cdot {}_{\text{Dünya}}^{TMN}T_1 \cdot X \\ {}_{\text{Dünya}}^{TMN}T_3^{-1} \cdot {}_{\text{Dünya}}^{TMN}T_2 \cdot X \\ \dots \\ {}_{\text{Dünya}}^{TMN}T_n^{-1} \cdot {}_{\text{Dünya}}^{TMN}T_{n-1} \cdot X \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \cdot {}_{\text{İşaret}}^{KAM}T_2 \cdot {}_{\text{İşaret}}^{KAM}T_1^{-1} \\ X \cdot {}_{\text{İşaret}}^{KAM}T_3 \cdot {}_{\text{İşaret}}^{KAM}T_2^{-1} \\ \dots \\ X \cdot {}_{\text{İşaret}}^{KAM}T_n \cdot {}_{\text{İşaret}}^{KAM}T_{n-1}^{-1} \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Bu matriste ${}_{\text{Dünya}}^{TMN}T_2^{-1} \cdot {}_{\text{Dünya}}^{TMN}T_1$ çarpımı yerine A, ${}_{\text{İşaret}}^{KAM}T_2 \cdot {}_{\text{İşaret}}^{KAM}T_1^{-1}$ çarpımı yerine B yazıldığında $A.X = X.B$ denklemi elde edilir. ${}_{\text{Dünya}}^{KAM}T$ yani X hesaplanarak Dünya ekseninde kameranın nerde olduğu bulunmaktadır. $A.X = X.B$ matrisinin çözülmesi için OpenCV kullanılmıştır [39]. Bu çözüm için en az üç robot pozu gerekmektedir. Uygulama sürecinde OpenCV kütüphanesindeki `calibrateHandEye` fonksiyonu kullanılmış ve Tsai yöntemi bu fonksiyon aracılığıyla uygulanmıştır. Şekil 4.4'te RGB (Red Green Blue) kamera eksenini gösterilmiştir.



Şekil 4.4 : Dünya eksenine göre RGB kameranın gösterimi.

X matrisi ile RGB kameranın merkezi Dünya eksenine göre bulunmaktadır. Intel Realsense D435i kamerasında RGB kameranın optik merkezi ile derinlik ekseninin merkezi aynı değildir. Kameranın RGB ve derinlik eksenleri arasındaki konumsal ilişkisi kamera üreticisi tarafından sağlanmaktadır. ICP algoritması derinlik eksenine göre hesaplanması gerektiği için RGB kamera merkezinden derinlik eksenine göre 4x4 boyutunda homojen dönüşüm matrisi hesaplanmalıdır. Bu dönüşüm matrisi üreticinin sağladığı SDK ile fabrika kalibrasyon verilerinden elde edilebilir. İkinci yöntem ise yine üreticinin sağladığı teknik belge ile hesaplanabilmektedir. Kamera merkezleri arasındaki konum ilişkisi Şekil 4.5'te gösterilmiştir. Kameradan alınan nokta bulutları milimetre olacak şekilde ayarlanmıştır.



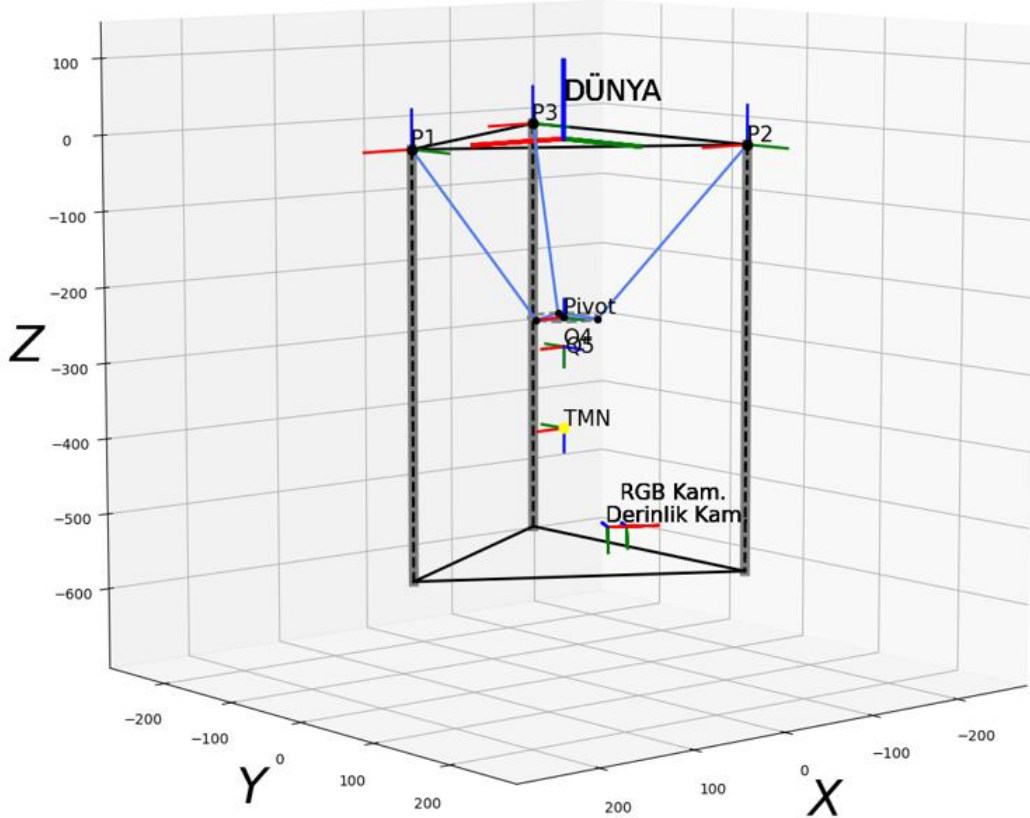
Depth Camera	From Centerline of 1/4-20 ¹ To Left Imager
D415	20mm
D435/D435i	17.5mm
D455	47.5mm

Şekil 4.5 : Intel Realsense kamerasının RGB ve derinlik eksenlerinin birbirine göre konumsal ilişkisi [40].



Şekil 4.6 : Derinlik kamera ekseninin RGB eksenine göre dönüşüm matrisi [41].

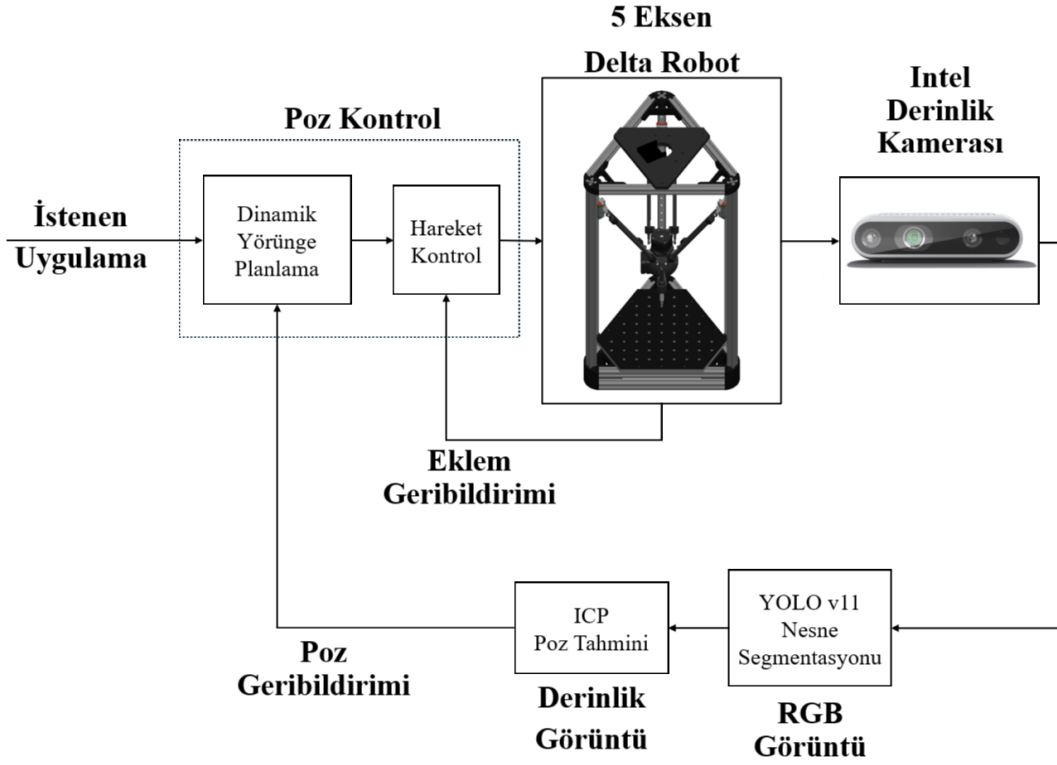
${}^{Dünya}_{KAM}T \cdot {}^{RGB}_{Derinlik}T$ matrislerinin çarpımı sonucunda kameranın derinlik ekseninin Dünya eksenine göre dönüşüm matrisi bulunmaktadır. Intel Realsense D435i kamerasının RGB ve derinlik eksenlerinin konumsal ilişkisi Şekilde 4.6’da gösterilmiştir. Kameranın RGB ve derinlik eksenlerinin, Dünya eksenine göre konumu Şekil 4.7’de gösterilmiştir.



Şekil 4.7 : Robot kamera kalibrasyonu ile bulunan kameranın RGB eksen ve derinlik ekseninin birlikte gösterilmesi.

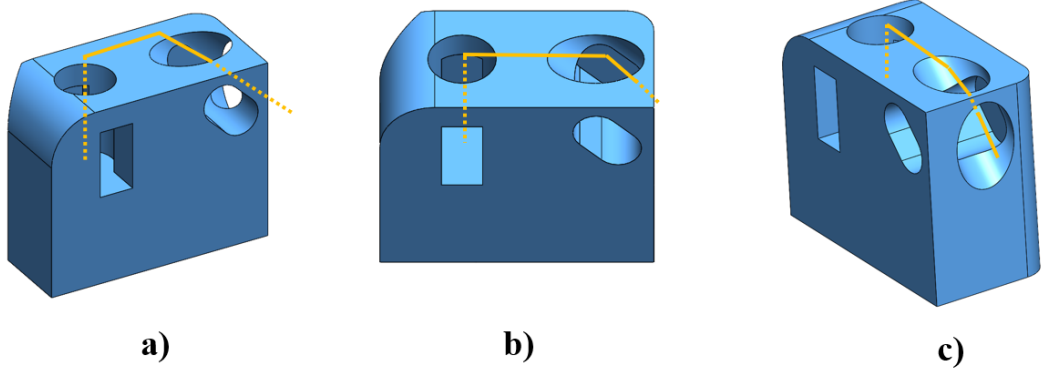
4.4 Geliştirilen Pozisyon Tabanlı Görsel Servo Yöntemi

Delta robotun gerçekleştirmesi gereken uygulamaya göre robot bir programlanır. Bu tez çalışması kapsamında montaj uygulaması senaryosu test edilecektir. Robotun görsel servo ile nasıl yönlendirildiğini anlatan kontrol blok diyagramı Şekil 4.8’de gösterilmiştir.



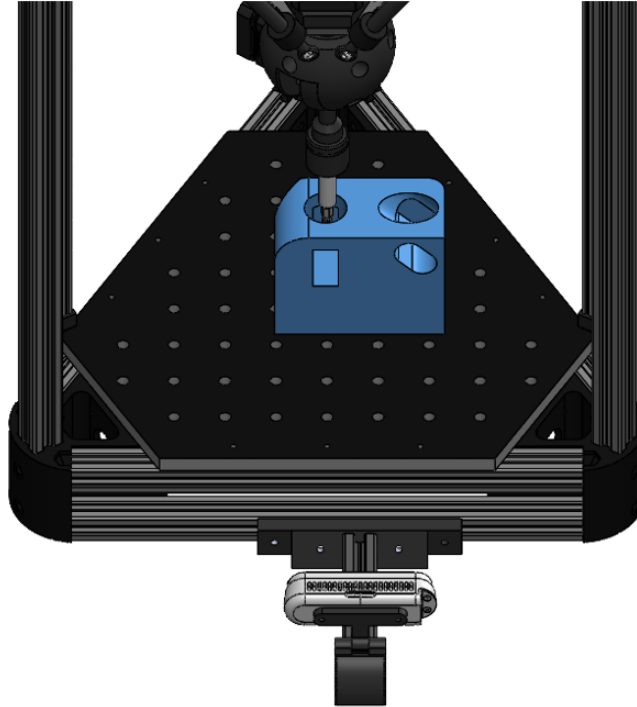
Şekil 4.8 : 5 eksenli delta robot için geliştirilen görsel servo yöntemi [41].

Robotun oluşturulan ilk yörüngesi, montaj yapılacak nesnenin başlangıç poz bilgisine göre programlanmaktadır. Nesnenin başlangıç poz bilgisi, ICP algoritmasında kaynak olarak belirlenmektedir. Derinlik kamerasından öncelikle RGB görüntü üzerinde YOLO11 segmentasyon kullanılarak nesne RGB görüntüde tespit edilmektedir. Görüntü üzerinde segmentasyonu bulunan nesnenin, RGB görüntüsünden derinlik görüntüsüne geçilmektedir. Böylelikle nokta bulutu kümesinde ilgili nesne tespit edilmektedir. Nokta bulutu kümesinde ilgili nesnenin nokta bulutları ayrıştırılarak ICP algoritması ile nesnenin farklı pozları tahmin edilebilecektir. Poz tahmini ile elde edilecek 4x4 boyutunda dönüşüm matrisi kullanılarak robotun yörüngesi güncellenmektedir. İlk pozundan farklı pozlara hareket eden nesnenin robota göre yörüngesi de dinamik olarak uyarlanmaktadır. Montaj uygulaması için test edilecek nesnenin 5 eksenli delta robot ile robotun gitmesi gereken noktalar ve farklı pozlardaki görüntüleri Şekil 4.9’da gösterilmiştir.

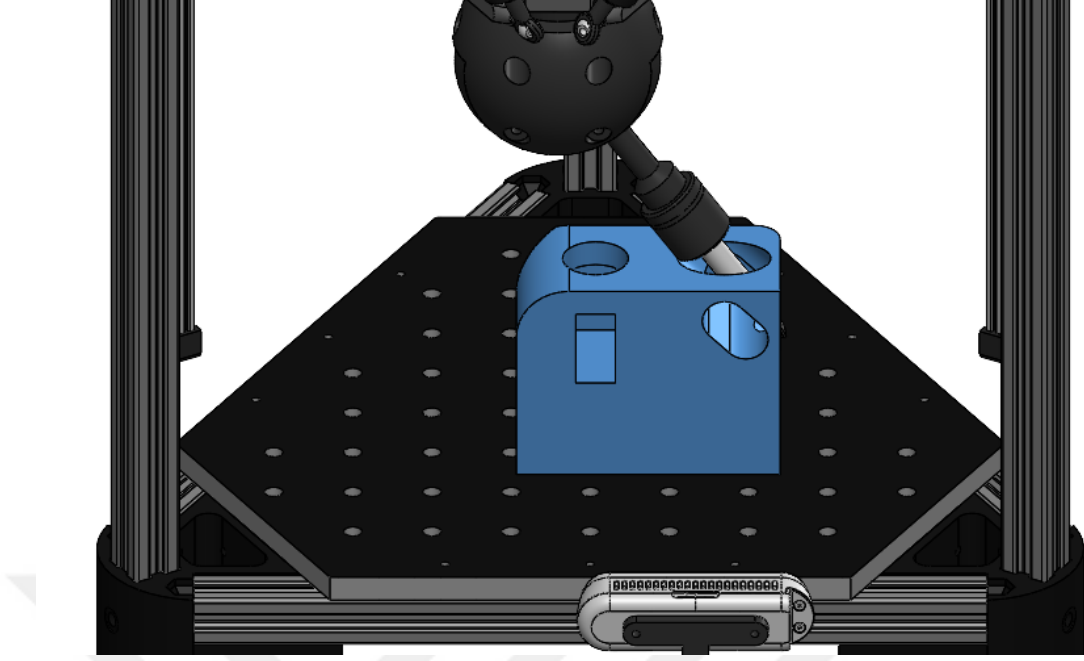


Şekil 4.9 : Montaj yapılacak nesne ve robot noktaları a)farklı bir pozu, b)başlangıç pozu, c)farklı bir pozu.

Delta robotun nesnenin başlangıç pozuna göre montaj uygulamasını gerçekleştirirken örnek görünümü Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de verilmiştir. Şekil 4.10’da robotun ilk deliğe göre montajı gösterilmiştir. Şekil 4.11’de ise robotun dik yerine eğimli bir şekilde ikinci deliğe montajı gösterilmiştir. Beş eksen sayesinde eğimli bir şekilde montaj yapabilmektedir.



Şekil 4.10 : Delta robotun iş parçasının ilk deliğine dik açıda montaj yapması [42].

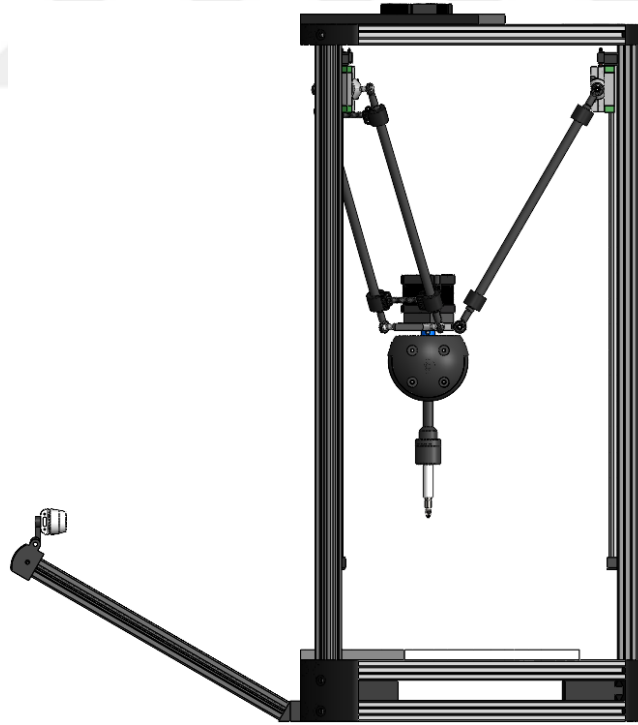


Şekil 4.11 : Delta robotun nesnenin ikinci deliğine eğimli açıda montaj yapması [42].

Intel RealSense D435i kamera, robotun sabit platformu üzerindeki nesnelerin en iyi şekilde görüntülenmesini sağlamak amacıyla, en ideal görüntü referans alınarak monte edilmiştir. Kamera sabitlenirken hem RGB görüntü hem de nokta bulutları incelenmiştir. Tespit edilen bu uzaklığa göre tasarım yapılarak kameranın montajı için parçalar üretilmiştir. Tasarımda kameranın açısının ayarlanabilir olmasına dikkat edilmiştir. Intel Realsense D435i derinlik kamerasının robota montajının görüntüleri Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'te gösterilmiştir.



Şekil 4.12 : Intel derinlik kamerasının delta robota montajının genel görünümü [42].



Şekil 4.13 : Intel derinlik kamerasının robota montajının yandan görünümü [42].

Görsel servo geliştirmek için derinlik kameraları incelenmiştir. Structured light, TOF ve RGBD kameraları arasında maliyeti arttırmamak amacıyla RGBD kamera tercih

edilmiştir. Geliştirilen robot ve robotun sabit platformu referans alınarak en uygun kameranın Intel Realsense D435i modeli olduğuna karar verilmiştir. Kameranın görüntüsü ve özellikleri Şekil 4.14 ve Çizelge 4.1’de paylaşılmıştır.

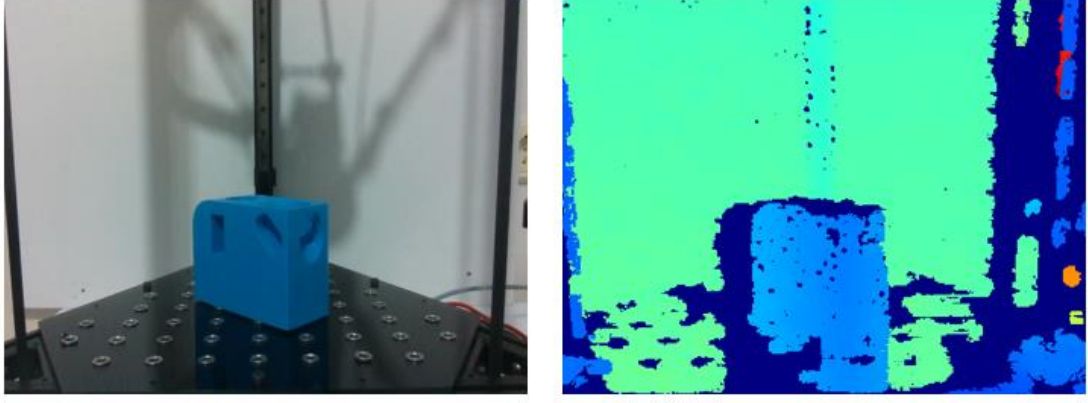


Şekil 4.14 : Intel Realsense D435i derinlik kamerası [41].

Çizelge 4.1 : Intel Realsense D435i kamera özellikleri [40].

Kategori	Özellik
Kullanım Alanı	İç Mekan – Dış Mekan
İdeal Aralık	0,3-3 m
Maksimum Çözünürlükte Minimum Derinlik Mesafesi (Min-Z)	~28 cm
Derinlik Görüş Alanı (FOV)	87 ° × 58 °
Derinlik frame hızı	90 FPS
Maksimum derinlik çıkış çözünürlüğü	1280 × 720
RGB frame çözünürlüğü	1920 × 1080
RGB sensör teknolojisi	Rolling Shutter
RGB sensör çözünürlüğü	2 MP
Renk Sensör	OV2740
Görüntü İşleme Kartı	Intel RealSense Vision Processor D4- IMU
Konnektör	USB-C 3.1 Gen 1

Kamera ve robotun montajı gerçekleştirildikten sonra montaj yapılacak nesne olmak üzere tek bir sınıf seçilerek veri seti oluşturulmuştur. Bu veri seti oluşturulurken nesnelerin pozları değiştirilerek RGB kamerasından alınan görüntüler kaydedilmiştir. Derinlik kamerası RGB görüntü ve derinlik görüntüsü olmak üzere 2 farklı kaynak sunmaktadır. Derinlik görüntüsünün içindeki nokta bulutları renklidir. Kameradan alınan veriler RGB görüntü, derinlik görüntüsü Şekil 4.15’te gösterilmektedir.



a)

b)

Şekil 4.15 : Intel Realsense D435i kamerasından elde edilen görüntüler, a)RGB görüntü, b)aynı kameradan elde edilen derinlik görüntüsü.

4.5 YOLO11 ile Segmentasyon

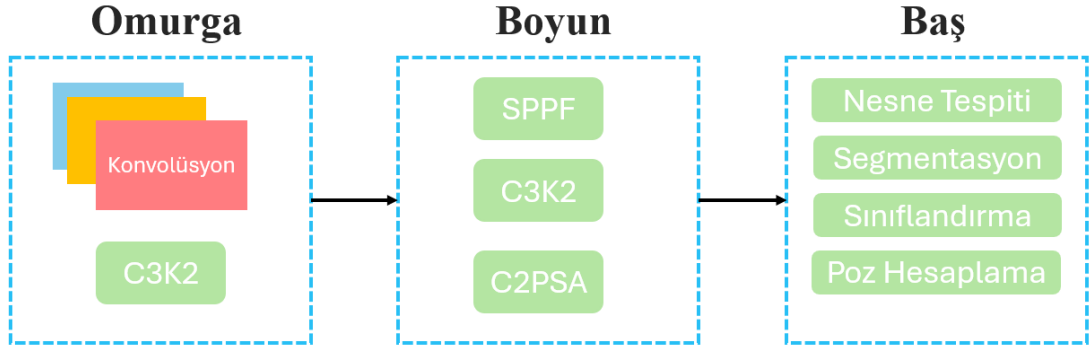
YOLO, görüntü işleme ve bilgisayarla görme alanında kullanılan, nesne tespiti için geliştirilmiş bir derin öğrenme mimarisidir. Bu algoritma, görüntü veya video kareleri üzerinde yer alan nesneleri tespit etmek amacıyla kullanılır. Görüntüdeki nesneler birden fazla sınıfa ait olabilir ve her bir sınıf için ayrı bir etiket tanımlanır.

Derin öğrenme modeli eğitimi için çeşitli görüntülerden oluşan veri seti oluşturulur. Görüntüler içindeki her bir sınıf için ad ve konum bilgisi içerecek şekilde etiketleme yapılır. Etiket bilgileri kullanılarak derin öğrenme modeli olan YOLO eğitimi yapılır. Eğitim için veri seti, eğitim ve doğrulama olmak üzere iki kategoriye ayrılır. Eğitim kategorisindeki veriler derin öğrenme modelinin öğrenmesini sağlarken doğrulama kategorisindeki veriler ise modelin performansını değerlendirmek, doğrulamak için kullanılır. Modelin başarımını değerlendirmek amacıyla test sürecinde, eğitim sırasında kullanılmamış ve modele daha önce hiç girdi olarak sağlanmamış görüntülerden oluşan bir test veri kümesi kullanılır. Bu yaklaşım, modelin öğrenilen veriler dışında karşılaşacağı yeni veriler üzerinde ne kadar başarılı olduğunu ve performans kriterlerini ölçmek için önemlidir.

YOLO derin öğrenme modeli, birçok nesne tespiti modeline kıyasla daha hızlı çalışmaktadır. R-CNN (Region Convolutional Neural Networks) gibi bölge tabanlı nesne tespiti algoritmaları, görüntü üzerinde potansiyel nesnelerin yer aldığı alanları belirledikten sonra, her bir bölgeyi ayrı ayrı evrişimsel sinir ağlarından geçirerek

sınıflandırmaktadır. Bu yöntem, her bölge için tekrar eden işlemler gerektirdiğinden, toplam işlem sayısını artırmakta ve modelin çalışma hızını önemli ölçüde düşürmektedir. Tek aşamalı nesne tespiti algoritması olan YOLO, bölge önerisine ihtiyaç duymadan tek geçişte bir görüntü içindeki nesneleri tespit edebilmektedir. Bu nedenle, gerçek zamanlı uygulamalarda tek aşamalı mimarilere sahip YOLO gibi modeller, hız açısından bölge tabanlı modellere kıyasla daha iyi performans sağlamaktadır.

YOLO11 modeli diğer versiyonlarına göre çok yönlüdür ve bilgisayar görme uygulamalarında sadece nesne tespiti için kullanılmakla kalmayıp, aynı zamanda segmentasyon, görüntü sınıflandırma, poz hesaplama, yönlendirilmiş nesne tespiti gibi yöntemler içinde kullanılmaktadır. Bu tez kapsamında robotun montaj yapacağı RGB görüntüde nesneyi tespit etmek amacıyla YOLO11 modelinin segmentasyon özelliğinden yararlanılmıştır. RGB görüntüde tespit edilen nesnenin segmentasyon maskesi, RGB görüntüsüne karşılık gelen derinlik görüntüsünde de kullanılarak nokta bulutlarının içinde yalnızca montaj yapılacak nesnenin ayrıştırılması sağlanmaktadır. YOLO11 modeli sadece RGB görüntüde tahmin yapmaktadır ve segmentasyon maskesinin çıktısında bulunan koordinatlar ile derinlik görüntüsündeki nokta bulutlarına uyarlanmaktadır. Bu yaklaşım sayesinde, derinlik kamerasının tüm ortamdan elde ettiği karmaşık nokta bulutları verisi yerine, yalnızca montaj yapılacak nesneye ait nokta bulutları bilgisi izole edilmiştir. Böylelikle, ICP (Iterative Closest Point) gibi üç boyutlu hizalama algoritmalarının daha doğru ve hızlı bir şekilde çalıştırılması mümkün hale gelmektedir. Bu sayede, yalnızca RGB görüntüsü üzerinde çalışan YOLO11 modelinin segmentasyon çıktısı kullanılarak, doğrudan nokta bulutları üzerinde çalışan ve yüksek hesaplama maliyetine sahip nokta bulutu tabanlı derin öğrenme yöntemlerine gerek kalmadan, hedef nesne başarıyla tespit edilebilmektedir.



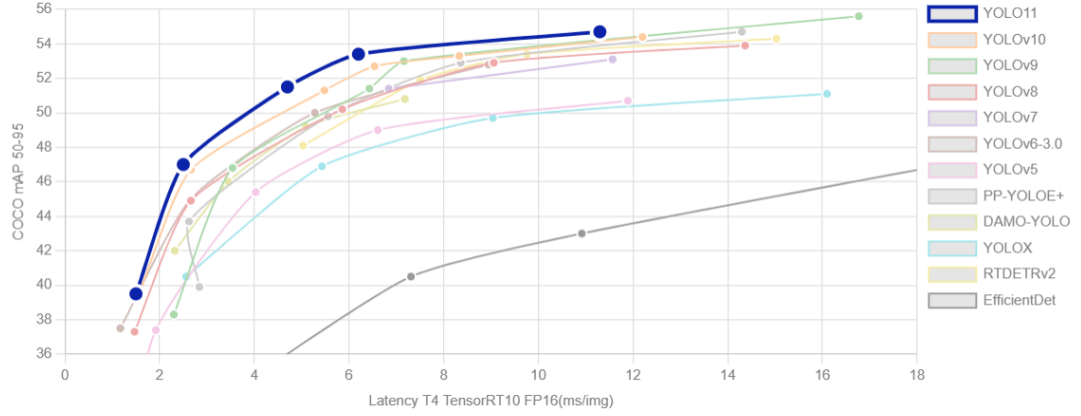
Şekil 4.16 : YOLO11 modeli mimari özeti [43].

YOLO11 modeli omurga, boyun ve baş olmak üzere üç temel bileşenden oluşmaktadır. Mimarının özeti Şekil 4.16'da gösterilmiştir. Omurga kısmında, evrişimli sinir ağları ile anlamlı özellik çıkarma fonksiyonu sağlanır. YOLO11'de C3K2 bloklarının eklenmesi bu modeli ayrıcalıklı kılmaktadır. Omurga kısmı konvolüsyon ve C3K2 bloklarından oluşmaktadır.

Boyun kısmı, omurganın farklı katmanlarında çıkarılan özellik haritalarını bir araya getirir ve bu bilgileri baş kısmına iletmektedir. Bu aşama, nesne tespiti için kritik öneme sahiptir. Özellikle SPPF bloğu, küçük nesnelerin daha başarılı şekilde tespit edilmesine katkı sağlar. C3K2 ve C2PSA blokları bu modelde yeni eklenen özelliklerdir.

Baş kısmı ise nesne tespiti ve sınıflandırma için tahminlerin üretilmesini sağlamaktadır. Boyun kısmından sağlanan özellikleri işleyerek, görüntüdeki nesneler için sınırlayıcı kutuları ve sınıf etiketlerinin üretilmesinde önemli rol oynamaktadır.

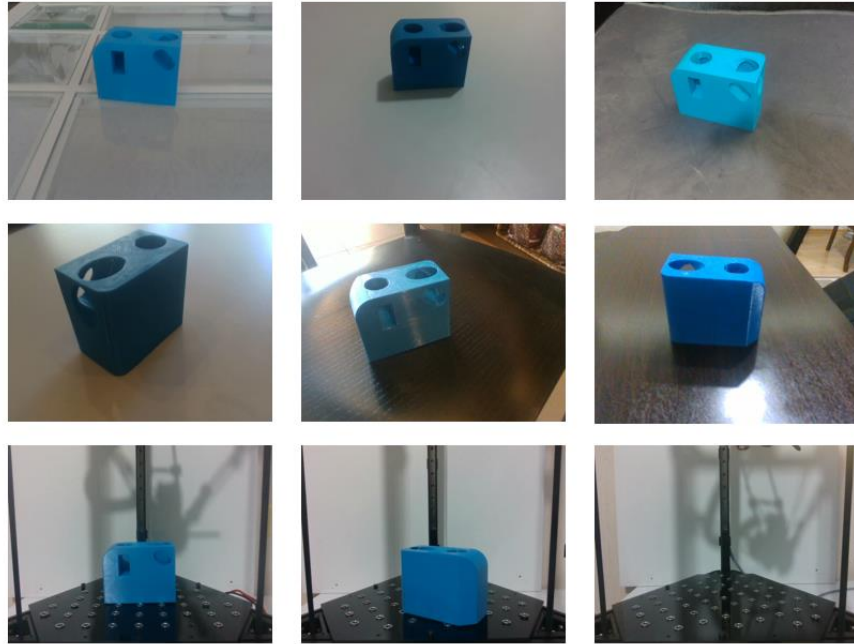
YOLO11, yalnızca nesne tespiti değil, aynı zamanda segmentasyon gibi daha karmaşık bilgisayarla görme görevlerinde de önceki YOLO sürümlerine kıyasla daha başarılı sonuçlar sunmaktadır. Özellikle gerçek zamanlı uygulamalarda yüksek doğruluk ve işlem hızı gerektiren durumlarda daha başarılı sonuçlar vermektedir. YOLO11'in diğer YOLO modelleri ile karşılaştırmalı performansı Şekil 4.17'de detaylı şekilde sunulmuştur.



Şekil 4.17 : YOLO modellerinin birbiri ile performans karşılaştırılması [44].

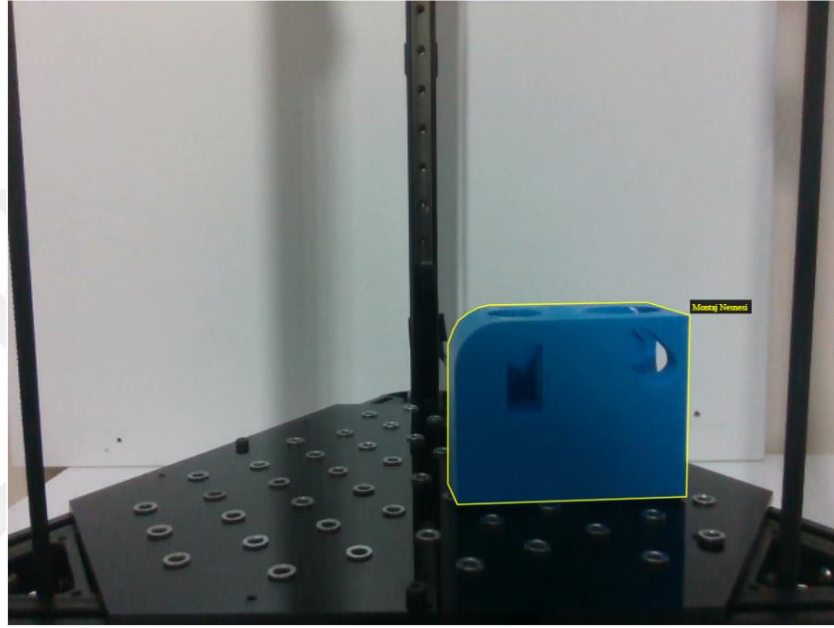
YOLO11 modelinin, COCO veri seti kullanılarak önceden eğitilmiş farklı varyasyonları mevcuttur. Bu varyantlar; nano, small, medium, large ve xlarge olmak üzere modelin boyutuna ve karmaşıklığına göre sınıflandırılmıştır. YOLO11 varyantları arasından seçim yapılırken, donanım kaynakları özellikle işlemci, ekran kartı ve bellek kapasitesi önemli faktörler arasında yer almaktadır.

Bu tez kapsamında, derin öğrenme modelinde fazla sınıf olmadığı için ve veri setindeki görüntüler çok fazla olmaması sebebiyle YOLO11 nano varyasyonu seçilerek eğitim yapılmıştır.



Şekil 4.18 : Montaj yapılacak nesnenin tespiti için veri seti oluşturulması.

Veri seti oluşturulurken, montaj işlemi gerçekleştirilecek olan mavi nesnenin çeşitli görüntüleri kaydedilmiştir. Aşırı öğrenmenin önüne geçmek amacıyla, nesne farklı arka planlar ve çeşitli aydınlatma koşulları altında görüntülenmiştir. Veri seti, 136 adet görüntü eğitim, 29 adet görüntü doğrulama ve 30 adet görüntü test kategorileri olmak üzere toplamda 195 görüntüden oluşturulmuştur. Bu kapsamda, veri setinin %70'i eğitim, %15'i doğrulama ve %15'i test olacak şekilde gruplandırılmıştır. Şekil 4.18'de oluşturulan veri setinden bazı görüntüler gösterilmiştir.



Şekil 4.19 : Montaj yapılacak nesnenin segmentasyon için etiketlenmesi.

Veri setinin etiketleme işlemleri için açık kaynaklı VGG Image Annotator yazılımı kullanılmıştır. Etiketleme sürecinde nesnelerin sınırlarının daha hassas bir şekilde belirlenebilmesi amacıyla poligon etiketleme yapılması gerekmektedir. Bu etiketleme ile montaj nesnesinin karmaşık konturlarının ve detaylı kenarlarının en doğru şekilde etiketlenmesi hedeflenmiştir. Etiketleme dosyaları, YOLO11 segmentasyon modeliyle uyumlu olacak formata dönüştürülmüş eğitim aşamasında kullanılmak üzere ayarlanmıştır. Veri setinden örnek bir görüntünün etiketlenmesi Şekil 4.19'da gösterilmiştir.

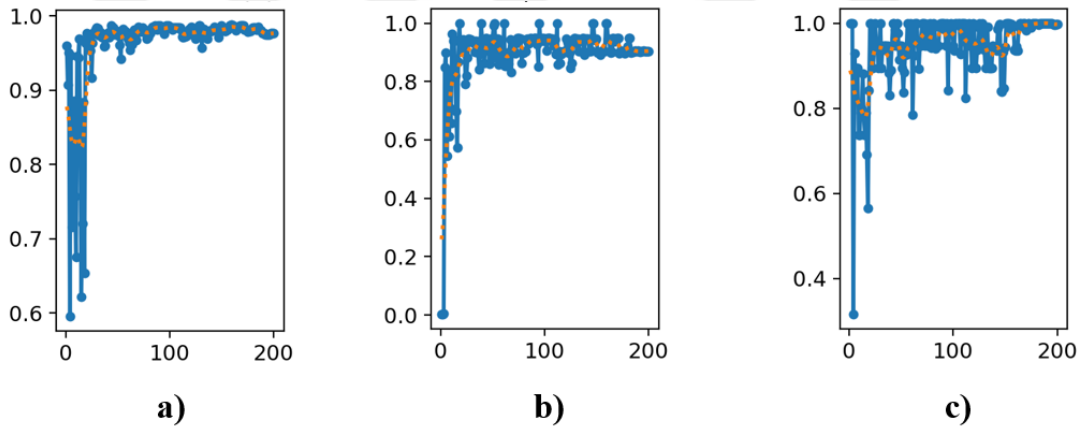
Model eğitimi, 12 GB bellek kapasitesine sahip NVIDIA RTX 3060 ekran kartı üzerinde gerçekleştirilmiştir. YOLO11 derin öğrenme modelinin eğitimi için Python programlama dili ve Ultralytics kütüphanesi kullanılmıştır [44]. Eğitimde, YOLO11 nano varyantı kullanılmıştır. YOLO11 modelinin eğitim parametreleri Çizelge 4.2'de paylaşılmıştır. Model, 200 epoch boyunca eğitilmiş olup, her bir iterasyonda ağa

gönderilen görüntü sayısı 8 olarak belirlenmiş ve bu değer batch size parametresi olarak kullanılmıştır. Eğitimde YOLO11'in varsayılan giriş boyutu yapılandırması esas alınarak, tüm görüntüler 640×640 piksel boyutunda modele aktarılmıştır.

Çizelge 4.2 : YOLO11 derin öğrenme modelinin parametreleri.

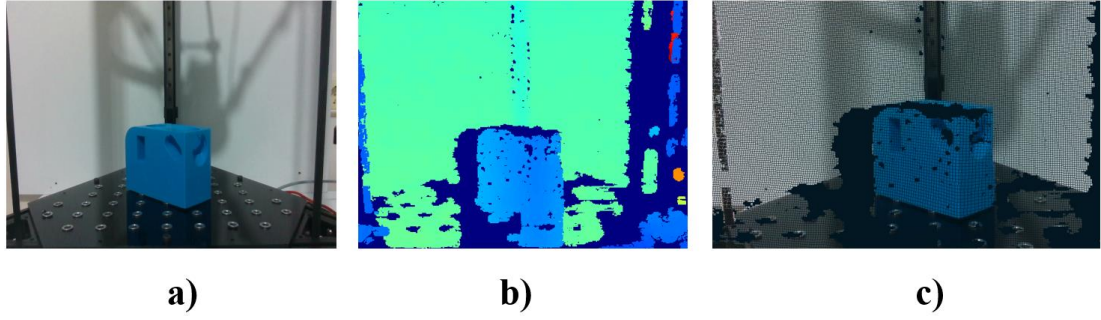
Kategori	Özellik
Model Türü	Segmentasyon
Epoch Sayısı	200
Batch Sayısı	8
Görüntü Boyutları	640 × 640
Önceden Eğitilmiş Model	Nano
Başlangıç Öğrenme Oranı	0,003
Son Öğrenme Oranı Çarpanı	0,01
Optimizer	AdamW
Momentum	0,937
Veri Arttırma	Evet

Model eğitim sırasında elde edilen performans metriklerinin grafikleri Şekil 4.20'de gösterilmiştir. Grafiklerde yatay eksen epoch sayısını, dikey eksenle farklı performans metrikleri gösterilmektedir. Şekil 4.20a'da mAP50 değeri, Şekil 4.20b'de kesinlik (precision) değeri, Şekil 4.20c'de duyarlılık (recall) değeri gösterilmektedir.



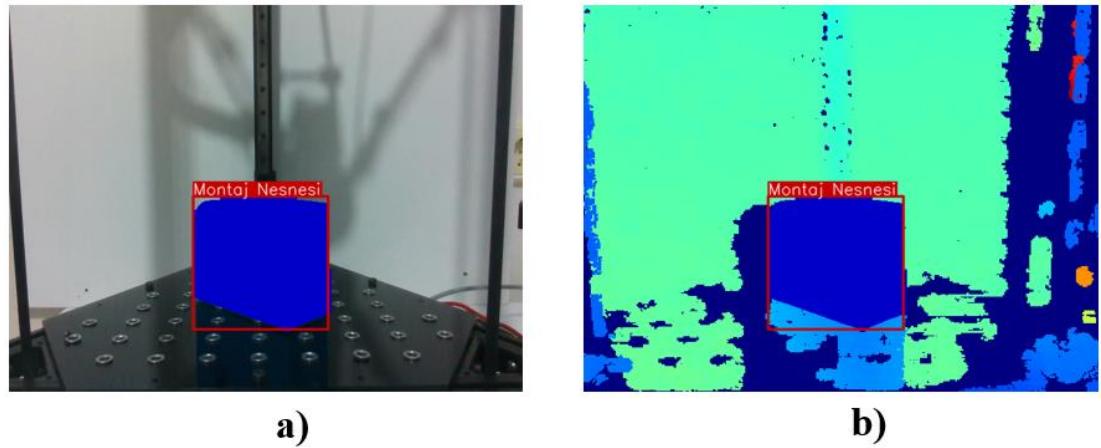
Şekil 4.20 : YOLO11 nano modelinin eğitim sırasındaki performans metrik grafikleri, a)mAP50 metriği, b)kesinlik metriği, c)duyarlılık metriği.

Intel RealSense D435i derinlik kamerasından elde edilen RGB görüntü, derinlik haritası ve bu derinlik görüntüsüne karşılık gelen nokta bulutları örnek olarak Şekil 4.21'de sunulmuştur. Kameradan alınan RGB görüntü üzerinde nesne tespiti, YOLO11 derin öğrenme modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.21 : RGBD kameradan alınan veriler, a)RGB görüntü, b)derinlik görüntüsü, c)derinlik görüntüsüne göre oluşturulan nokta bulutları.

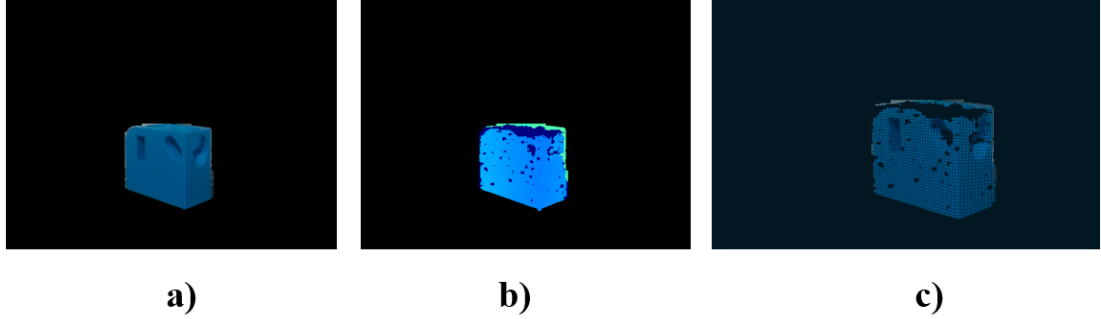
YOLO11 derin öğrenme modeli sadece RGB görüntüye uygulanmaktadır. YOLO11 modelinin test görüntüsündeki nesne tespiti Şekil 4.22a’da gösterilmiştir. Koyu mavi renkle segmentasyon maskesi, kırmızı renkle sınırlayıcı kutu gösterilmiştir. RGB görüntü kullanılarak elde edilen segmentasyon maskesi koordinatları kullanılarak derinlik görüntüsüne uygulanmaktadır.



Şekil 4.22 : YOLO11 modelinin tahmin çıktıları, a)Intel Realsense D435i kamerasından alınan RGB tahmini, b)segmentasyon maskesinin derinlik görüntüsüne uygulanması.

YOLO11 derin öğrenme modeli kullanılarak, kameradan alınan RGB görüntü üzerinde gerçekleştirilen segmentasyon sonucunda elde edilen maske, Şekil 4.23a’da gösterilmiştir. Bu maskede, yalnızca nesneye ait alanlar korunmuş, geri kalan bölgeler ise siyah olarak gösterilmiştir. RGB görüntü ile elde edilen segmentasyon maskesinin derinlik görüntüsüne uygulanması sonucu Şekil 4.23b’de gösterilmiştir. Derinlik görüntüsünün segmentasyon maskesine göre elde edilen nokta bulutları Şekil 4.23c’de gösterilmiştir. YOLO11 derin öğrenme modeli sayesinde kameradan alınan nokta bulutları içerisinde sadece tespit edilen nesnenin nokta bulutları elde edilmiştir. Bu sayede, nesneye ait olan nokta bulutları kameradan alınan nokta bulutları içinden

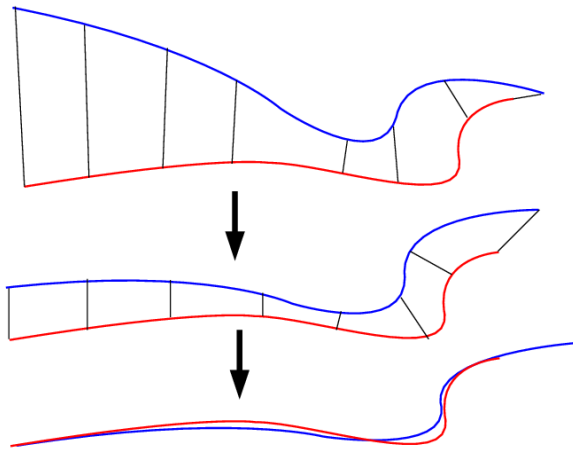
ayrıştırılmakta ve yalnızca hedef nesneye ait veriler elde edilmektedir. Böylelikle sadece nesneye ait nokta bulutları bulunarak, ICP gibi üç boyutlu hizalama algoritmalarının çalıştırılması sağlanmaktadır.



Şekil 4.23 : YOLO11 modelinin segmentasyon maskesi çıktıları, a)RGB görüntü segmentasyon maske çıktısı, b)derinlik görüntüsü çıktısı, c)RGB görüntüye göre elde edilen nokta bulutları.

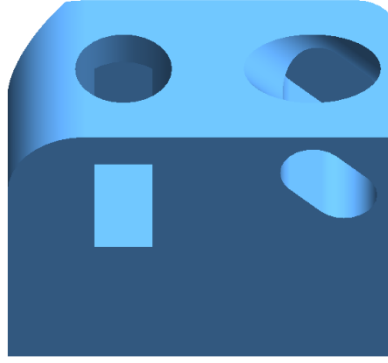
4.6 ICP ile Yörünge Noktalarını Güncelleme

ICP, iki nokta bulutu kümesini geometrik olarak birbirine göre hizalamaya çalışan yinelemeli bir algoritmadır. Robotik ve bilgisayarla görme alanında sıklıkla kullanılır. Algoritma iki nokta bulutu kümesinden birini kaynak nokta bulutu, diğerini hedef nokta bulutu olarak sınıflandırır. Kaynak nokta bulutu kümesini, hedef nokta bulutu kümesine hizalayacak şekilde döndürme ve öteleme işlemlerini yinelemeli olarak gerçekleştirir. Böylelikle kaynak nokta bulutu ve hedef nokta bulutu arasındaki homojen dönüşüm matrisini hesaplanarak hedef nokta bulutunun pozı tahmin edilmektedir. ICP algoritmasının çalışmasını adım adım uygulamalı şekilde gösterimi Şekil 4.24’te paylaşılmıştır.



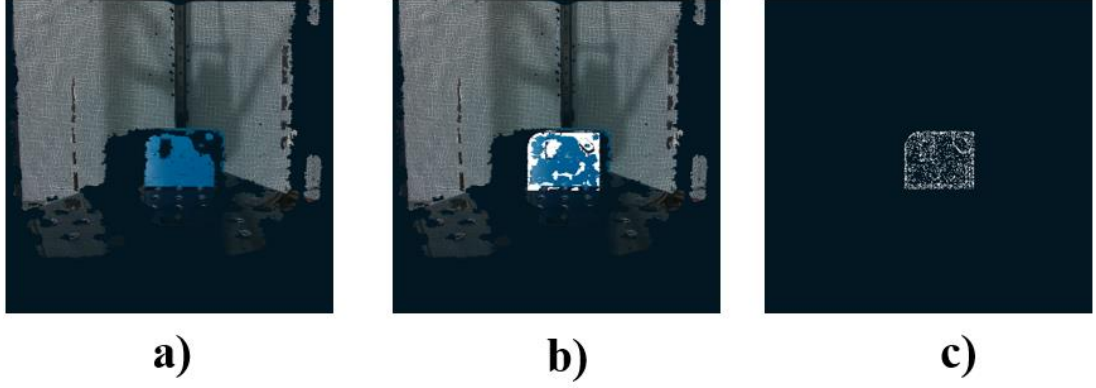
Şekil 4.24 : ICP’nin çalışma mantığı gösteren görsel [45].

Montaj yapılacak nesnenin başlangıç pozunun belirlenebilmesi için, CAD modeline ait nokta bulutunun kameradan elde edilen nokta bulutuna göre bir defaya mahsus olmak üzere hizalanması gerekmektedir. Bu hizalama işlemi manuel olarak gerçekleştirilmiştir. CAD modelinin nokta bulutuna dönüştürülmesi, ardından bu nokta bulutun kameradan alınan ham nokta bulutlarında hizalanması amacıyla gereken öteleme ve döndürme işlemleri CloudCompare yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Montajı yapılacak nesnenin CAD modelinin başlangıç pozunu Şekil 4.25’te gösterilmiştir.



Şekil 4.25 : Montaj yapılacak iş parçası nesnenin CAD modelinin başlangıç pozunu.

Şekil 4.26a’da, kameradan elde edilen ham nokta bulutları gösterilmektedir. Bu veriler ile CAD modeli birleştirilmiş; montajı yapılacak nesnenin mavi renkli nokta bulutları referans alınarak CAD modeli hassasiyetle hizalanmıştır. Şekil 4.26b’de, beyaz renkli CAD modeli ile referans nokta bulutları arasındaki hizalama sonucu gösterilmektedir. Hizalama işleminin ardından CAD modeli nokta bulutuna dönüştürülmüş ve kameradan alınan ham nokta bulutları dışarıda bırakılarak yalnızca CAD modelin nokta bulutu formatında kaydedilmiştir. Böylece, CAD modelinin başlangıç pozunun derinlik kamerasının eksenine göre hizalanmış hali bağımsız bir nokta bulutu olarak elde edilmiştir. Bu nokta bulutu ICP algoritmasında kaynak model olarak kullanılmıştır. ICP algoritması için Python’da Open3D kütüphanesi kullanılmıştır [46]. Kaynak model olarak kullanılacak nokta bulutu modeli Şekil 4.26c’de gösterilmiştir.



Şekil 4.26 : Nokta bulutları, a)kameradan alınan nokta bulutları, b)kameradan alınan nokta bulutları ile CAD modelin hizalanması, c)hizalanan CAD modelin nokta bulutlarının içinden ayrıştırılması.

Robotun, başlangıç pozunda olan nesne üzerindeki deliklere girdiği noktalar kameranın derinlik eksenine göre tanımlanır. Bu noktalar çok sayıda yani n tane olabilir. Tanımlanan noktalar için homojen dönüşüm matrisleri sırasıyla ${}^{Derinlik}_{1.Nokta}T$, ${}^{Derinlik}_{2.Nokta}T$, ${}^{Derinlik}_{3.Nokta}T$, ${}^{Derinlik}_{4.Nokta}T$ ile gösterilmiştir.

$${}^{Dünya}_{1.Nokta}T = {}^{Dünya}_{Derinlik}T \cdot {}^{Derinlik}_{1.Nokta}T \quad (4.7)$$

$${}^{Dünya}_{2.Nokta}T = {}^{Dünya}_{Derinlik}T \cdot {}^{Derinlik}_{2.Nokta}T \quad (4.8)$$

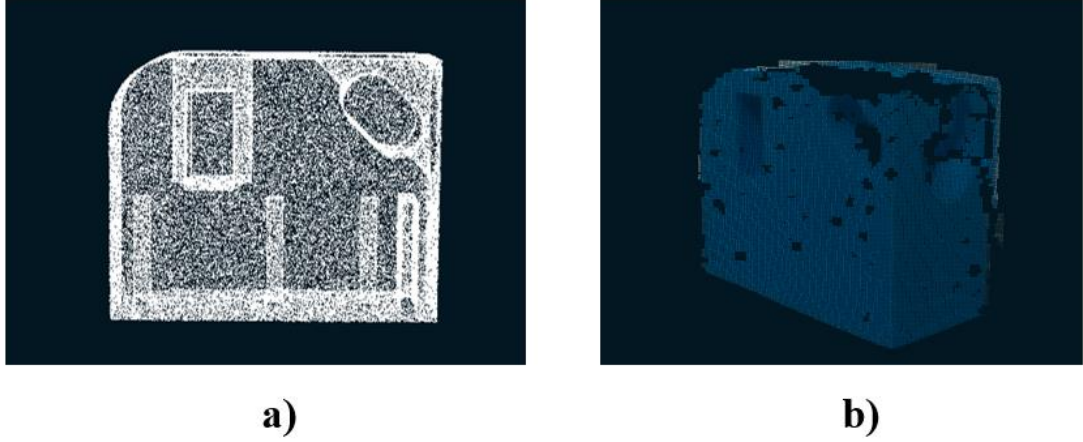
$${}^{Dünya}_{3.Nokta}T = {}^{Dünya}_{Derinlik}T \cdot {}^{Derinlik}_{3.Nokta}T \quad (4.9)$$

$${}^{Dünya}_{4.Nokta}T = {}^{Dünya}_{Derinlik}T \cdot {}^{Derinlik}_{4.Nokta}T \quad (4.10)$$

$${}^{Dünya}_{n.Nokta}T = {}^{Dünya}_{Derinlik}T \cdot {}^{Derinlik}_{n.Nokta}T \quad (4.11)$$

Montaj yapılacak nesnenin yer değiştirmesi ve dönmesi durumunda, sistem kameradan güncel bir görüntü alarak öncelikle nesneyi RGB görüntü üzerinde YOLO11 segmentasyon modeli aracılığıyla tespit eder. Ardından, elde edilen RGB görüntüde tahmin edilen segmentasyon maskesi kullanılarak derinlik görüntüsünde yalnızca ilgili nesneye ait konumu içeren ayrıştırılmış nokta bulutları elde edilir. Elde edilen nokta bulutları nesnenin hedef modeli olmaktadır.

Kaynak modelin nokta bulutları Şekil 4.27a’da, hedef modelin nokta bulutları Şekil 4.27b’de gösterilmiştir.



Şekil 4.27 : Montaj yapılacak nesnenin nokta bulutları, a)CAD modelden oluşturulan kaynak modelin nokta bulutları, b)kameradan alınan hedef modelin nokta bulutları.

Şekil 4.27’de gösterilen kaynak model ile hedef model arasında ICP algoritması hesaplanır. ICP algoritması kullanılarak kaynak ile hedef model arasında 4x4 homojen dönüşüm matrisleri ${}_{Hedef}^{Kaynak}T$, ${}_{Kaynak}^{Hedef}T$ elde edilir. Bu matrisler birbirinin tersidir. ${}_{Hedef}^{Kaynak}T$ matrisi kullanılarak montaj yapılacak nesnenin başlangıç pozunda kameranın derinlik eksenine göre tanımlanan noktalar güncellenir.

$${}_{Yeni\ 1.Nokta}^{Dünya}T = {}_{Derinlik}^{Dünya}T \cdot {}_{Hedef}^{Kaynak}T \cdot {}_{1.Nokta}^{Derinlik}T \quad (4.12)$$

$${}_{Yeni\ 2.Nokta}^{Dünya}T = {}_{Derinlik}^{Dünya}T \cdot {}_{Hedef}^{Kaynak}T \cdot {}_{2.Nokta}^{Derinlik}T \quad (4.13)$$

$${}_{Yeni\ 3.Nokta}^{Dünya}T = {}_{Derinlik}^{Dünya}T \cdot {}_{Hedef}^{Kaynak}T \cdot {}_{3.Nokta}^{Derinlik}T \quad (4.14)$$

$${}_{Yeni\ 4.Nokta}^{Dünya}T = {}_{Derinlik}^{Dünya}T \cdot {}_{Hedef}^{Kaynak}T \cdot {}_{4.Nokta}^{Derinlik}T \quad (4.15)$$

$${}_{Yeni\ n.\ Nokta}^{Dünya}T = {}_{Derinlik}^{Dünya}T \cdot {}_{Hedef}^{Kaynak}T \cdot {}_{n.\ Nokta}^{Derinlik}T \quad (4.16)$$

Montaj yapılacak nesnenin başlangıç pozuna göre tanımlanan noktalar ${}_{1.Nokta}^{Derinlik}T$, ${}_{2.Nokta}^{Derinlik}T$, ${}_{3.Nokta}^{Derinlik}T$, ${}_{4.Nokta}^{Derinlik}T$ sabit kalmaktadır. ICP algoritması kullanılarak elde edilen

$\begin{matrix} \text{Kaynak} \\ \text{Hedef} \end{matrix} T$ matrisi kullanılarak montaj yapılacak nesnenin yeni pozuna göre noktalar için matrisler yeniden hesaplanır. $\begin{matrix} \text{Dünya} \\ \text{Yeni 1.Nokta} \end{matrix} T$, $\begin{matrix} \text{Dünya} \\ \text{Yeni 2.Nokta} \end{matrix} T$, $\begin{matrix} \text{Dünya} \\ \text{Yeni 3.Nokta} \end{matrix} T$, $\begin{matrix} \text{Dünya} \\ \text{Yeni 4.Nokta} \end{matrix} T$, $\begin{matrix} \text{Dünya} \\ \text{Yeni n. Nokta} \end{matrix} T$ matrisleri kullanılarak her bir nokta için ters kinematik hesaplanır. Böylelikle montaj yapılacak nesnenin yeni konumuna göre robotun gideceği hedef noktaları otomatik olarak güncellenmektedir.

Şekil 4.27’de gösterilen montaj yapılacak nesnenin CAD modelinden oluşturulan nokta bulutu ile derinlik kamerasından elde edilen nesnenin farklı pozda nokta bulutu arasında ICP algoritması başarılı sonuç vermemiştir. Bu durumun temel nedeni olarak, derinlik kamerası tarafından üretilen nokta bulutlarında yüksek düzeyde gürültü ve yüzey bozulmalarının bulunması değerlendirilmektedir.

Şekil 4.27’de gösterilen CAD model kullanılarak oluşturulan nokta bulutları ile derinlik kamerasından elde edilen nesnenin nokta bulutları arasında ICP algoritması çalışmamıştır. Bunun sebebi derinlik kamerasından alınan nokta bulutlarında fazla gürültü olması olarak tahmin edilmektedir.

5. SONUÇ

Bu tez kapsamında, mevcut 5 eksenli delta robotlardan farklı bir yapıda 5 eksenli hibrit bir delta robot geliştirilmiştir. Delta robotun ilk üç eksenli prizmatik, son iki eksenli ise döner eklem olacak şekilde yapılandırılmış ve buna uygun mekanik tasarım ile fiziksel prototip gerçekleştirilmiştir. Delta robotun tercih edilmesinin temel nedeni, yüksek doğruluk ve tekrarlanabilirlik gibi performans kriterlerinin sağlanmasıdır. Robotun hassasiyetini etkileyen kritik bileşenler hazır olarak alınmış; geri kalan büyük bir kısmı ise üç boyutlu yazıcı kullanılarak üretilmiştir. Geliştirilen hibrit delta robotun ileri ve ters kinematik denklemleri modellenmiş ve Python ile bir arayüz geliştirilerek programlanması sağlanmıştır. Gerçekleştirilen algoritmalar ve fiziksel testler aracılığıyla robotun hem ileri kinematik hem de ters kinematik çözümlerinin doğruluğu test edilmiştir.

Robotun montaj uygulamalarında otonom çalışabilmesini sağlamak amacıyla, yapay zekâ destekli bir görsel servo sistemi geliştirilmiştir. Bu sistemde, Intel RealSense D435i derinlik kamerası kullanılarak hem iki boyutlu hem de üç boyutlu bilgisayarla görme algoritmaları entegre edilmiştir. Nesne tespiti için YOLO11 derin öğrenme modeli kullanılarak RGB görüntü üzerinden segmentasyon maskeleri elde edilmiş, bu maskeler derinlik görüntüsüne uygulanarak yalnızca montaj yapılacak nesneye ait nokta bulutları ayrıştırılmıştır. Ardından, nesnenin üç boyutlu konumunu belirlemek amacıyla, CAD modelinden oluşturulan referans nokta bulutu ile derinlik kamerasından elde edilen farklı bir poza ait nesnenin nokta bulutu arasında ICP algoritması kullanılmıştır. Ancak, ICP algoritması ile hizalama işlemi başarılı sonuç vermemiştir. Bu durumun temel nedeni, derinlik kamerası ile elde edilen nokta bulutlarında gözlemlenen yüksek düzeydeki gürültü olduğu tahmin edilmektedir. Gürültüden kaynaklanan bu tür bozulmalar, nokta bulutlarının doğru hizalanmasını zorlaştırmakta ve ICP algoritmasının yakınsama başarısını olumsuz yönde etkilemektedir. Bu nedenle, nokta bulutları üzerinde ön işleme için filtreleme yöntemlerinin uygulanması önerilmektedir. Voxel downsampling, outlier removal, bilateral filtering gibi filtreleme yöntemleri kullanılarak nokta bulutlarındaki gürültü

azaltılabilir ve bu sayede daha doğru ve kararlı hizalama sonuçları elde edilebilir. ICP algoritmasına ek olarak başlangıç tahmini için Global Registration, Fast Point Feature Histograms gibi yöntemlerinde kullanılması sistemin genel başarımını arttırabilecektir.

Sonuç olarak geliştirilen hibrit delta robot sistemi; yapay zekâ, görüntü işleme ve üç boyutlu veri işleme algoritmalarının fiziksel olarak test edilebilen yüksek maliyet gerektirmeyen bir sistemdir. Yapay zekâ ve bilgisayarla görmeye ek olarak, hareket planlama algoritmaları ve delta robot dinamiği gibi konular üzerinde teorik çalışmalar yapılarak bu fiziksel sistemde test edilebilir.



KAYNAKLAR

- [1] **Zsombor-Murray, P. J.** (2004). Descriptive geometric kinematic analysis of clavel's "Delta" Robot. *Centre of Intelligent Machines*, McGill University.
- [2] **Ayyıldız, M., & Ayyıldız, E. A.** (2020). Lineer Delta Robotun Doğruluk ve Tekrarlanabilirlik Performansı. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8(1), 869-879.
- [3] **Hendriko, H., Nurkhamdi, J. J., & Imam, M. M.** (2018). Analytical based inverse kinematics method for 5-axis delta robot. *International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing*, 6(4).
- [4] **Bouri, M., & Clavel, R.** (2010, June). The linear delta: Developments and applications. In *ISR 2010 (41st International Symposium on Robotics) and ROBOTIK 2010 (6th German Conference on Robotics)* (pp. 1-8). VDE.
- [5] **Wu, Y., Fu, Z., Xu, J. N., Yan, W. X., Liu, W. H., & Zhao, Y. Z.** (2015). Kinematic analysis of 5-DOF hybrid parallel robot. In *Intelligent Robotics and Applications: 8th International Conference, ICIRA 2015, Portsmouth, UK, August 24-27, 2015, Proceedings, Part II* 8 (pp. 153-163). Springer International Publishing.
- [6] **Mehrafrooz, B., Mohammadi, M., & Masouleh, M. T.** (2017, October). Kinematic sensitivity evaluation of revolute and prismatic 3-dof delta robots. In *2017 5th RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM)* (pp. 225-231). IEEE.
- [7] **Stan, S. D., Manic, M., Maties, V., & Balan, R.** (2008, May). Evolutionary approach to optimal design of 3 DOF translation exoskeleton and medical parallel robots. In *2008 Conference on Human System Interactions* (pp. 720-725). IEEE.
- [8] **Gao, Z., & Wang, W.** (2024, August). Design, Manufacturing, and Visual Servoing of a 3D-Printed Delta Robot. In *2024 IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)* (pp. 769-773). IEEE.
- [9] **Yamtuan, K., Radomngam, T., & Prempraneerach, P.** (2023). Visual servo kinematic control of delta robot using YOLOv5 algorithm. *Journal of Robotics and Control (JRC)*, 4(6), 818-831.
- [10] **Lin, C. J., Shaw, J., Tsou, P. C., & Liu, C. C.** (2016, March). Vision servo based Delta robot to pick-and-place moving parts. In *2016 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)* (pp. 1626-1631). IEEE.

- [11] **Guedri, N., Guedri, B., & Gharbi, R.** (2023, April). Detection and Recognition of Objects in Real Time Using an Intelligent Camera by a Delta Robot. In *2023 IEEE International Conference on Advanced Systems and Emergent Technologies (IC_ASET)* (pp. 1-5). IEEE.
- [12] **Cong, V. D., & Hiep, T. T.** (2023). Design a Low-cost Delta Robot Arm for Pick and Place Applications Based on Computer Vision. *FME Transactions*, 51(1).
- [13] **Chen, Z., Li, S., Zhang, N., Hao, Y., & Zhang, X.** (2019). Eye-to-hand robotic visual tracking based on template matching on FPGAs. *IEEE Access*, 7, 88870-88880.
- [14] **Kansal, S., & Mukherjee, S.** (2022). Vision-based kinematic analysis of the Delta robot for object catching. *Robotica*, 40(6), 2010-2030.
- [15] **Yang, M., Xiao, L., Chen, C., Hu, Y., Sun, Y., Pu, H., & Jia, W.** (2023, December). Fast Visual Servo for Rapidly Seafood Capturing of Underwater Delta Robots. In *2023 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)* (pp. 1-6). IEEE.
- [16] **Zhang, W., Mei, J., & Ding, Y.** (2012). Design and development of a high speed sorting system based on machine vision guiding. *Physics Procedia*, 25, 1955-1965.
- [17] **Liu, Z., Chen, J., Chen, C., Qi, B., Guo, J., & Xu, J.** (2024). Target reconstruction and process parameter decision-making for bolt intelligent assembly based on robot and multi-camera. *Expert Systems with Applications*, 256, 124871.
- [18] **Zhang, Y., Li, N., Zhang, L., Lin, J., Gao, X., & Chen, G.** (2025). A review on the recent developments in vision-based apple-harvesting robots for recognizing fruit and picking pose. *Computers and Electronics in Agriculture*, 231, 109968.
- [19] **Le, T. T., Le, T. S., Chen, Y. R., Vidal, J., & Lin, C. Y.** (2021). 6D pose estimation with combined deep learning and 3D vision techniques for a fast and accurate object grasping. *Robotics and Autonomous Systems*, 141, 103775.
- [20] **Park, J., Jun, M. B., & Yun, H.** (2022). Development of robotic bin picking platform with cluttered objects using human guidance and convolutional neural network (CNN). *Journal of Manufacturing Systems*, 63, 539-549.
- [21] **Tanev, T. K.** (2000). Kinematics of a hybrid (parallel–serial) robot manipulator. *Mechanism and machine theory*, 35(9), 1183-1196.
- [22] **Url-1** <<https://trilab3d.com/3d-printer-deltiq-2/>>, erişim tarihi 15.01.2024.
- [23] **Url-2** <<https://deltaxrobotics.com/delta-x-3/>>, erişim tarihi 15.01.2024.
- [24] **Url-3** <<https://www.igus.eu/roboLink/2-axis-delta>>, erişim tarihi 15.01.2024.
- [25] **Url-4** <<https://industrial.omron.com.tr/tr/products/quattro>>, erişim tarihi 15.05.2024.

- [26] **Url-5** <<https://new.abb.com/products/robotics/robots/delta-robots/irb-365>>, erişim tarihi 15.05.2024.
- [27] **Pieper, D. L.** (1969). *The kinematics of manipulators under computer control*. Stanford University.
- [28] **Pacheco-Escamilla, L. A., Cortés-Hernández, T., Meda-Campaña, J. A., & Tapia-Herrera, R.** (2022). Kinematic, Dynamic and Control of a 3-DOF Parallel Robot (3-PSS). *International Journal of Combinatorial Optimization Problems & Informatics*, 13(3).
- [29] **Url-6** <<https://reprap.org/wiki/Kossel>>, erişim tarihi 15.06.2024.
- [30] **Url-7** <<https://store.anycubic.com/products/anycubic-kossel-3d-printer>>, erişim tarihi 16.08.2024.
- [31] **Url-8** <<https://tr.aliexpress.com/i/1005005593922187.html#nav-specification>>, erişim tarihi 16.08.2024.
- [32] **Url-9** <<https://usongshine.tr.aliexpress.com/store/1358970>>, erişim tarihi 05.12.2024.
- [33] **Url-10** <<https://github.com/makerbase-motor/MKS-SERVO57D>>, erişim tarihi 16.08.2024.
- [34] **Cong, V. D., & Hanh, L. D.** (2023). A review and performance comparison of visual servoing controls. *International Journal of Intelligent Robotics and Applications*, 7(1), 65-90.
- [35] **Lin, W., Liang, P., Luo, G., Zhao, Z., & Zhang, C.** (2022). Research of Online Hand-Eye Calibration Method Based on ChArUco Board. *Sensors*, 22(10), 3805.
- [36] **Yan, T., Li, P., Liu, Y., Jia, T., Yu, H., & Chen, G.** (2023). Research on Hand-Eye Calibration Accuracy Improvement Method Based on Iterative Closest Point Algorithm. *Agriculture*, 13(10), 2026.
- [37] **Url-11** <<https://develop.realman-robotics.com/en/AI/developerGuide/hand/>>, erişim tarihi 18.01.2025.
- [38] **Url-12** <<https://support.zivid.com/en/latest/academy/applications/hand-eye/hand-eye-calibration-solution.html>>, erişim tarihi 05.01.2025.
- [39] **Url-13** <https://docs.opencv.org/4.x/d9/d0c/group__calib3d.html>, erişim tarihi 05.02.2025.
- [40] **Url-14** <<https://www.intelrealsense.com/wp-content/uploads/2020/06/Intel-RealSense-D400-Series-Datasheet-June-2020.pdf>>, erişim tarihi 10.02.2025.
- [41] **Url-15** <<https://www.intelrealsense.com/depth-camera-d435i>>, erişim tarihi 16.12.2024.

- [42] **Url-16** <<https://dev.intelrealsense.com/docs/stereo-depth-camera-d400>>, erişim tarihi 16.12.2024.
- [43] **Banduka, N., Tomić, K., Živadinović, J., & Mladineo, M.** (2024). Automated Dual-Side Leather Defect Detection and Classification Using YOLOv11: A Case Study in the Finished Leather Industry. *Processes*, 12(12), 2892.
- [44] **Url-17** <<https://docs.ultralytics.com/tr/models/yolo11/>>, erişim tarihi 16.01.2025.
- [45] **Smistad, E., Falch, T. L., Bozorgi, M., Elster, A. C., & Lindseth, F.** (2015). Medical image segmentation on GPUs—A comprehensive review. *Medical image analysis*, 20(1), 1-18.
- [46] **Url-18** <https://www.open3d.org/docs/0.7.0/tutorial/Basic/icp_registration.html>, erişim tarihi 16.12.2024.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Özgür KURT

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2020, Türk Hava Kurumu Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** : 2025, Bursa Teknik Üniversitesi, Mekatronik Mühendisliği, Mekatronik Mühendisliği Yüksek Lisans Programı

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Kurt, Ö., Adar, N.** (2024, June). *Design of 5 DOF hybrid delta robot* [Oral presentation]. 5th International Eurasian Conference on Science, Engineering and Technology (EurasianSciEnTech 2024), Ankara, Turkey