

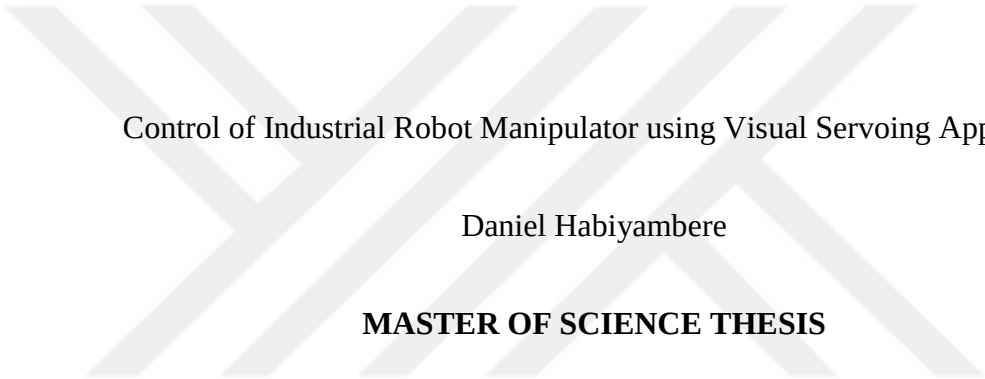
Görsel Servolama Yaklaşımı ile Endüstriyel Robot Kol Kontrolü

Daniel Habiymbere

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Temmuz 2018



Control of Industrial Robot Manipulator using Visual Servoing Approach

Daniel Habiyambere

**MASTER OF SCIENCE THESIS**

Department of Electrical and Electronics Engineering

July 2018

# Görsel Servolama Yaklaşımı ile Endüstriyel Robot Kol Kontrolü

Daniel Habiymbere

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca  
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı  
Kontrol ve Kumanda Sistemleri Bilim Dalında  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Doç. Dr. Metin ÖZKAN

Temmuz 2018

## ONAY

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Sezgin Seçil'in YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı “Görsel Servolama Yaklaşımı ile Endüstriyel Robot Kol Kontrolü” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

**Danışman:** Doç. Dr. Metin Özkan

**İkinci Danışman:** -

**Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:**

**Üye :** Doç. Dr. Metin Özkan

**Üye :** Prof. Dr. Osman Parlaktuna

**Üye :** Dr. Öğr. Üyesi Muammer Akçay

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ..... tarih ve .....sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Hürriyet ERŞAHAN  
Enstitü Müdürü

## ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Doç. Dr. Metin ÖZKAN danışmanlığında hazırlamış olduğum **“Görsel Servolama Yaklaşımı ile Endüstriyel Robot Kol Kontrolü”** başlıklı YÜKSEK LİSANS tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 13/07/2018

Daniel Habiymbere

## ÖZET

Endüstriyel robotlar ve otomasyon sistemleri, günümüzde endüstrinin ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir. Makineler artık endüstri, tarım, ilaç ve çok daha fazlası dahil olmak üzere hemen hemen tüm alanlarda teknolojinin sınırlarını zorlamaktadır. Endüstriyel robotik sistemlere birçok uygulamada giderek daha fazla güvenilmektedir.

Ancak, robotik sistemler genellikle yüksek yapılandırılmış ortamlarda çalışacak şekilde sınırlı kalmaktadır. Sensörle konumlandırma ve algılama için kullanılmasına rağmen, bu cihazlar çalışma ortamı ve işletim hızı ile oldukça sınırlıdır ve genellikle çok pahalıdır. Görüntü sensörlerinin robotik sistemlerle entegrasyonu ile görsel servolama sistemi, robotların çalışma alanının temassız ölçümleri yapılarak yapılandırılmamış alanlarda dahi çalışmasını sağlar. Görsel bilginin kontrol sistemlerinde kullanımı her zaman elektronik alanda büyük bir araştırma alanı olmuştur.

Görüntü özelliklerinden hareket kontrolüne doğrudan geri bildirim kullanan görsel servolama yöntemlerinin, görüş tabanlı kontrol sistemlerinde birçok kararlılık ve güvenlik sorununa sahip olacağı öngörülmektedir. 3 boyutlu uzayın 2 boyutlu uzaya yansıtılması veya tam tersi, kamerada meydana gelen boyut verilerinin kaybına neden olur ve görüş tabanlı kontrolde zorluklar oluşturur. Bu konu için görüntü işleme ve bilgisayarlı görme araçları, görüntü iyileştirmede zorunludur. Öte yandan, endüstriyel robotun manevra kabiliyeti ve esnekliği karmaşık çevre ile başa çıkabilme yeteneğine sahip olmalıdır. Ayrıca bir manipülatör robotunun doğrusal olmayan ve karmaşık yapısı, sorunu daha da zorlaştırmaktadır

Bu tez, öncelikle robot boyutlarını dikkate alarak ve manevra kabiliyetinin robot çalışma alanını en üst düzeye çıkardığından emin olmaya çalışarak kinematik gelişimi ortaya koymaktadır. İkinci olarak, görüntü özellik noktalarından el konfigürasyonu ve yörünge planlama algoritması ile dolaylı görüntü tabanlı görsel servolama tanıtılmaktadır. Görüntü mekanındaki özellik noktalarını uzaydaki noktalarla ilişkilendirmek için klasik orantılı bir kontrol stratejisi kullanılır. Görsel servolama ile kontrol yöntemi, robotun uç noktasını bir başlangıç noktasından hedef noktasına, görüntüde algılanabilen bir yol doğrultusunda taşımaktadır

**Anahtar Kelimeler:** endüstriyel robot manipülatör, ters kinematik, görüntü işleme, dolaylı görüntü tabanlı görsel servolama, hareket planlama.

## SUMMARY

Automation machineries and especially Industrial robot manipulators have become an imperative part of industry, nowadays. Industrial robotic systems have been increasingly being relied on in many applications. However, robotic systems are generally limited to operate in highly structured environments.

Though tracking systems and sensors are used for positioning and tracking, these devices are highly limited to the working environment and the speed. Thus, integration of vision sensors with robotic systems. generally visual servoing system allows the robots to work in unstructured spaces. vision-based control systems utilize direct feedback from image features to motion control. for that matter image processing and computer vision tools are highly used in image treatment for this subject. On the other hand the manoeuvrability and flexibility of the robot's joints has to be capable to deal with complex environment. however, the nonlinearities and complex structure of a manipulator robot makes the problem more challenging.

This thesis introduces at first the development of kinematics, taking consideration of the robot dimensions and make sure the manoeuvrability maximize the robot work space. Secondly the Indirect Image Based Visual Servoing with eye in hand configuration and trajectory planning algorithm from image feature points are introduced.

Finally a classical proportional control strategy is used to relate feature points in image space to points in world space. Therefore the path following task is experimented.

**Keywords:** industrial robot manipulator, inverse kinematics, image processing, indirect image based visual servoing, motion planning.

## TEŞEKKÜR

Beni büyük bir sabır ve özenle destekleyip motive eden proje sorumlusu Sayın Doc. Dr. Metin Ozkan'a bu projeye rehberliğinden, katkılarından ve teşviklerinden dolayı içten teşekkürlerimi sunarım. Yüksek Lisans çalışmalarım boyunca bana vermiş olduğunuz yardım ve önerileri unutmayacağım.

Aileme ve arkadaşlarıma tüm destekleri için teşekkür ederim. Bu çalışmanın sonuna kadar beni teşvik eden bu değerli insanlara sahip olmak benim için büyük onurdu.

Son olarak, özellikle Sayın Prof. Dr. Osman PARLAKTUNA'ya zamanı ve tavsiyeleri için ve her türlü destek için yanımda olan tüm profesörlerime özel teşekkürlerimi sunarım.



## İÇİNDEKİLER

|                                              | <u>Sayfa</u> |
|----------------------------------------------|--------------|
| <b>ÖZET</b> .....                            | vi           |
| <b>SUMMARY</b> .....                         | vii          |
| <b>TEŞEKKÜR</b> .....                        | viii         |
| <b>İÇİNDEKİLER</b> .....                     | ix           |
| <b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....                 | xi           |
| <b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....               | xiii         |
| <b>SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ</b> .....  | xiv          |
| <b>1. GİRİŞ VE AMAÇ</b> .....                | 1            |
| <b>2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI</b> .....        | 6            |
| 2.1. Görsel Servolama Stratejisi .....       | 7            |
| 2.1.1. Konum Tabanlı Görsel Servolama .....  | 7            |
| 2.1.2 Görüntü Tabanlı Görsel Servolama ..... | 8            |
| 2.1.3 Hibrit Görsel Servolama .....          | 9            |
| 2.2 Kamera Yapılandırma .....                | 10           |
| 2.3 Kameraların Miktarı .....                | 11           |
| 2.4. Hedefin Durumu .....                    | 13           |
| <b>3. GÖRSEL SERVOLAMANIN TEORİSİ</b> .....  | 14           |
| 3.1 Görünş Sistemi .....                     | 14           |
| 3.1.1 Görüntü Oluşumu .....                  | 14           |
| 3.1.2 Kamera kalibrasyonu .....              | 17           |
| 3.2.3 Görüntü yorumu .....                   | 18           |
| 3.2.4 Görüntü iyileştirme .....              | 20           |
| 3.2.4. Kenar algılama ve kenar bağlama ..... | 23           |
| 3.2 Endüstriyel Robot Kol Prototipi .....    | 31           |
| 3.2.1. Robot Kolu UR5 .....                  | 31           |

## İÇİNDEKİLER (devam)

|                                                                  |           |
|------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.2.2. Robotun Geometrisi .....                                  | 32        |
| 3.2.3. Kinematik Analiz .....                                    | 33        |
| 3.2.4 UR5 Çalışma Uzayı.....                                     | 44        |
| 3.3. Görsel Servo Kontrolündeki Kavramlar.....                   | 46        |
| 3.3.1. IBVS Kontrolü .....                                       | 46        |
| 3.3.2 PBVS Kontrolü.....                                         | 47        |
| 3.3.3 Dolaylı Görüntü Tabanlı Görsel Servolama Kontrolü .....    | 47        |
| <b>4. MATERYAL VE YÖNTEM .....</b>                               | <b>50</b> |
| 4.1. Robot Benzetim Platformu (V-REP).....                       | 50        |
| 4.1.1 V-REP Ortamı .....                                         | 50        |
| 4.1.2 V-REP'te Robot ve Kamera.....                              | 55        |
| 4.1.3 Matlab ile V-REP Arasında İletişim ve Senkronizasyon ..... | 56        |
| 4.2 Yöntemler ve Deneysel Çalışmalar .....                       | 57        |
| 4.2.1 Kinematik Yöntem .....                                     | 57        |
| 4.2.2 Yol planlaması.....                                        | 58        |
| 4.3 Sahne Açıklaması .....                                       | 61        |
| 4.4 Görsel Servolama Yöntemi .....                               | 63        |
| <b>5. BULGULAR VE TARTIŞMA .....</b>                             | <b>64</b> |
| 4.1 Ters Kinematik Deneyi ve Sonuçları .....                     | 64        |
| 5.2. Görüntü İşleme Deneyi ve Sonuçları .....                    | 67        |
| 4.2 Görsel Servo Deney ve Sonuçları.....                         | 70        |
| <b>6. SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>                                | <b>75</b> |
| <b>KAYNAKLAR DİZİNİ.....</b>                                     | <b>77</b> |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

| <u>Sekil</u>                                                                       | <u>Sayfa</u> |
|------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| 1.1. Çeşitli Görevlerde Kullanılan Robotlar.....                                   | 3            |
| 1.2. Tıbbi Uygulamalarda Kullanılan Görme Temelli Robotik (Samadi, 2012).....      | 4            |
| 1.3. Yörüngede Kullanılan Uzak robotik Sistemi (Ye vd., 2012).....                 | 4            |
| 2.1. Pozisyona Dayalı Görsel Servo Blok Şeması.....                                | 8            |
| 2.2. Görüntü Tabanlı Görsel Servolama Blok Şeması.....                             | 9            |
| 2.3. Hibrid Tabanlı Görsel Servolama Blok Şeması.....                              | 9            |
| 2.4. (a) Elde-göz(eye-in-hand) ve (b) Gözden-ele(eye-to-hand).....                 | 10           |
| 3.1. Perspektif model.....                                                         | 14           |
| 3.2. Bir kamera görüntü düzlemindeki pikseller.....                                | 16           |
| 3.3. Morfolojik Operasyon;(a) Orjinal Görüntü (b)Erozyon (c)Dilatasyon.....        | 23           |
| 3.4. Kenar Algılama Uygulamalarından Bazıları.....                                 | 25           |
| 3.5. UR5 Robotu Model.....                                                         | 32           |
| 3.6. Denavit-Hartenberg Notasyonu.....                                             | 33           |
| 3.7. Robot eklemin çerçeve paylaşım.....                                           | 35           |
| 3.8. Beşinci çerçeveye göre ilk eklem geometrisi.....                              | 38           |
| 3.9. Birinci ve 6. çerçevelere göre 5. eklem geometrisi (Hawkins; Ryan, 2013)..... | 39           |
| 3.10. Beşinci Eklem ile İlgili Altıncı Eklem Geometrisi.....                       | 41           |
| 3.11. Üçüncü Eklem ile İlgili İkinci Eklem Geometrisi.....                         | 42           |
| 3.12. Son Efektör Euler Dönüşümü.....                                              | 34           |
| 3.13. UR5'in Çalışma Alanı.....                                                    | 44           |
| 3.14. Ulaşılamaz Konfigürasyonlar.....                                             | 45           |
| 3.15. Görüntü Tabanlı Görsel Servolama Blok Diyagramı.....                         | 46           |
| 3.16. Dolaylı Görüntü tabanlı görsel servolama blok diyagramı.....                 | 48           |
| 3.17. Zayıf-Perspektif İzdüşümü.....                                               | 48           |

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

| <b><u>Sekil</u></b>                                                          | <b><u>Sayfa</u></b> |
|------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| 4.1. Engelleme Fonksiyonu Çağrısı ile V-REP'den Veri Okuma.....              | 54                  |
| 4.2. Bloke Olmayan Fonksiyon Çağrısı Üzerinden V-REP'den veri Gönderme ..... | 54                  |
| 4.3. V-REP'de UR5 Robot Kolu.....                                            | 55                  |
| 4.4. V_REP Kamera Modeli.....                                                | 56                  |
| 4.5. Görüntü Alanındaki Özellik Koordinatı.....                              | 59                  |
| 4.6. Görüntü Uzayındaki Yörünge.....                                         | 60                  |
| 4.7. V-rep Sahne: (a) Tam Ekran Görüntüsü (b) Sahne Yakın Önden Görünüş..... | 62                  |
| 5.1. Farklı Hedef Noktalardaki Ters Kinematik Robotun Sonucu.....            | 66                  |
| 5.2. Kameradan Orijinal Görüntü.....                                         | 67                  |
| 5.3. Görüntü Segmantasyon Sonucu.....                                        | 68                  |
| 5.4. Kenar Algılamadan Sonraki Sonuç.....                                    | 69                  |
| 5.5. Görüntü Alanındaki Yol Noktası.....                                     | 69                  |
| 5.4. Belirtilen Derinlikte Robot.....                                        | 70                  |
| 5.5. Başlangıç Konumunda Robot TCP.....                                      | 71                  |
| 5.6. TCP 'nin (a) Birinci ve (b) İkinci Iterasyonların Yörüngeleri.....      | 72                  |
| 5.7. Yol Boyunca Farklı Konumlarda Robot .....                               | 73                  |
| 5.8. Son Konumdaki Yolun Sonunda TCP.....                                    | 73                  |

## ÇİZELGELER DİZİNİ

| <b><u>Çizelge</u></b>                                                           | <b><u>sayfa</u></b> |
|---------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| 3.1. Eşik pseudocode.....                                                       | 21                  |
| 3.2. Canny pseudocode.....                                                      | 26                  |
| 3.3. Görüntü gradyanı (a) sütunlara yönünde Gr (b) satırlara yönünde Gc.....    | 27                  |
| 3.4. $3 \times 3$ kernel (a) sütunlara yönünde Kx (b) satırlara yönünde Ky..... | 28                  |
| 3.5. Sobel Detektörü Pseudocode .....                                           | 29                  |
| 3.6. UR5 robotu özellikler.....                                                 | 31                  |
| 3.7. DH parametreleri ve ölçümü.....                                            | 34                  |
| 3.8. Zayıf-Perspektif İzdüşüm ile Poz Tahmini için Pseudocode.....              | 49                  |
| 4.1. Tanımlı 3 Boyutlu Uzamsal Noktalar.....                                    | 57                  |
| 4.2. Yol Noktası Tespiti için Pseudocode.....                                   | 61                  |
| 4.3. Servolama uygulaması için algoritma.....                                   | 63                  |
| 5.1. Bir Kartezyen Nokta için Teta Çözümleri.....                               | 64                  |
| 5.2. V_REP'de Kinematik Uygulama için Algoritma.....                            | 65                  |

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### Simgeler

### Açıklama

|                         |                                                  |
|-------------------------|--------------------------------------------------|
| $P_i^n$                 | Çerçeve I'dan, n Çerçevesine Çeviri Vektörü      |
| $R_i^n$                 | Çerçeve I'dan, n Çerçevesine Dönüş Matrisi       |
| $\theta$                | Endüstriyel Robot Kolunun Eklem Açısı            |
| $T_i^n$                 | Homojen Dönüşüm                                  |
| $\alpha, \beta, \gamma$ | Roll-Pitch-Yaw Açıları                           |
| dx                      | Görüntü Alanında özellik Noktasının x Koordinatı |
| dy                      | Görüntü Alanında özellik Noktasının y Koordinatı |
| G                       | Gradyan Büyüklüğü                                |
| Gx                      | X ekseninde görüntü gradyanı                     |
| Gy                      | Ekseninde Görüntü Gradyanı                       |
| Kx                      | X ekseninde görüntü çekirdeği                    |
| Ky                      | Y ekseninde görüntü çekirdeği                    |
| x                       | Görüntü Alanında x Koordinatı                    |
| X                       | Kartezyen Uzayda x Koordinatı                    |
| y                       | Görüntü Alanında y Koordinatı                    |
| Y                       | Kartezyen Uzayda y Koordinatı                    |
| z                       | Görüntü Alanında z Koordinatı                    |
| Z                       | Kartezyen Uzayda z Koordinatı                    |

### Kısaltmalar

### Açıklama

|        |                                                |
|--------|------------------------------------------------|
| 2 1/2D | Two-and-a-half Dimensional (İki-buçuk Boyutlu) |
| 2D     | Two Dimensional (İki Boyutlu)                  |
| 3D     | Three Dimensional (Üç Boyutlu)                 |
| AI     | Artificial Intelligence (Yapay Zeka)           |

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ(devam)

| <u>Kısaltmalar</u> | <u>Açıklama</u>                                                      |
|--------------------|----------------------------------------------------------------------|
| API                | Application Programming Interface(Uygulama Programlama Arayüzü)      |
| BEM                | Binary Edge Map (İkili Kenar Haritası)                               |
| DH                 | Denavit Hartenberg                                                   |
| DoF                | Degree of Freedom (Serbestlik Derecesi)                              |
| FoV                | Field of View (Görüş Alanı)                                          |
| GB                 | Gigabyte (Gigabayt)                                                  |
| GPS                | Global Positioning System(Global Konumlandırma Sistemi)              |
| HVS                | Hybrid Visual Servoing (Hibrit Görsel Servolama)                     |
| IBVS               | Image Based Visual Servoing (Görüntü Tabanlı Görsel Servolama)       |
| MRA                | Magnetic Resonance Angiography (Manyetik Rezonans Anjiyografisi)     |
| PBVS               | Position Based Visual Servoing (Konum Tabanlı Görsel Servolama)      |
| PH                 | Pythagorean Hodograph (Pisagor Hodografi)                            |
| PID                | Proportional Integral Derivative (Oransal İntegral Türevi)           |
| PtP                | Point to Point (Noktadan Noktaya)                                    |
| RAM                | Random Access Memory (Rastgele Erişilebilir Bellek)                  |
| RGB-D              | Red-Green-Blue and Depth (Kırmızı-Yeşil-Mavi ve Derinlik)            |
| TCP                | Tip Center Point (İpucu Merkez Noktası)                              |
| ToF.               | Time of Flight (Uçuş Süresi)                                         |
| UR5                | Universal Robot 5 (Evrensel Robot 5)                                 |
| V_REP              | Virtual Robot Experimentation Platform (Sanal Robot Deneme Platform) |

## 1. GİRİŞ VE AMAÇ

Günümüzde teknoloji hayatımızın bir parçası hatta bir yaşam tarzı olmuştur. Robotik sistemleri içeren teknoloji son yıllarda çok büyümüştür. Birçok süreçlerin sistemleştirilmesi ve otomasyonu mümkün olmuş ve endüstrilerde yaygın olarak uygulanmaktadır. Otomasyonda, en önemli dallardan biri, çeşitli uygulamalar için üretilebilen endüstriyel robot kolları veya endüstriyel manipülatörlerdir. Robotik kollar, insan koluna benzer şekilde nesneleri hareket ettirmek için tasarlanmış mekanik, elektronik ve programlanabilir cihazlardır.

Robotik kol, 20. yüzyılda üretilen en faydalı teknolojilerden biridir ve hızla birçok üretim alanında bir mihenk taşı haline gelmiştir. Bu tezde, kullanılan robotun kinematikleri açıklanacaktır.

Otomasyon dünyası robotu kendi otonomisinden bir sonraki seviyesine taşımaktadır. Otonom robotik kollar programlanarak çevreye uyum sağlayacağı ve çevreyle etkileşime gireceği ortamlarda yalnız bırakılmak üzere tasarlanmaktadır. Bir robot içinde bulunduğu ortamı tanımak için sonarlar, lazerler, kontak sensörleri gibi birkaç çeşit sensör kullanabilir. Bu cihazlar normalde belirli bir görev için ölçü almada kullanılır. Son yirmi yılda çok gelişmiş olan farklı bir sensör ise kameralardır. Son yıllarda bu gelişmenin temel nedenleri, kameraların maliyetinin düşürülmesi ve görüntü işleme algoritmalarının gerçek zamanlı olarak çalışmasını sağlayan bilgisayarların işlem hızının artmasıdır. Kamera, veri girişinin uygulanabilirliğine daha büyük bir esneklik sağlama avantajına sahiptir ve gelişmiş görüntü işleme ve görüntüler üzerindeki gelişmiş çalışma için bilgisayar vizyonu sayesinde aynı sensörden farklı bilgi türleri elde etme olanağı sağlar.

Günümüzde otomasyon makinelerinin ve robotların kullanımı neredeyse zorunlu ve endüstrinin ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir. Ancak, robotik sistemler genellikle yüksek yapılandırılmış ortamlarda çalışacak şekilde sınırlandırılmıştır. Geleneksel olarak, endüstriyel robotik sistemler, bir iş parçasına göre son efektör konumunu hesaplamak için açık döngü algoritmaları kullanmaktadır. İş parçası, robotun temel koordinat çerçevesine



göre bilinen bir konuma yerleştirilmelidir, ancak robotik sistemdeki herhangi bir belirsizlik görevin başarısız olmasına neden olacaktır.

Görsel servolama, çevreye ve iş parçasına robotla ilgili gerçek zamanlı ölçümler sağlayarak bu problemi çözer ve açık çevrim kinematik hesaplamalarına dayanmaz.

İnsan görüşünün doğasından ilham alan görsel algılamanın, robotik alanında çok yararlı olduğu kanıtlanmıştır. Birçok kullanımından biri, robot kullanımındaki görsel servo kontrolüdür (Seth, 1996).

"Görsel Servolama" görsel geri bildirim sinyallerini kullanarak bir robotun hareketini kontrol etmektir (Hashimoto, 2003 ve Hutchinson vd., 1996). Başka bir deyişle, görsel servolamada robot, hedef nesnelerin ve son efektörün doğru konumunu elde etmek için bir kamera tarafından yakalanan vizyonu kullanır ve bu bilgiyi ise sistemi kontrol etmek için kullanır. Görsel servo, yüksek hızlı görüntü işleme, kinematik, dinamik, kontrol teorisi ve gerçek zamanlı hesaplama dahil olmak üzere birçok aktif araştırma alanının birleşimidir (Corke ve Hutchinson, 2001).

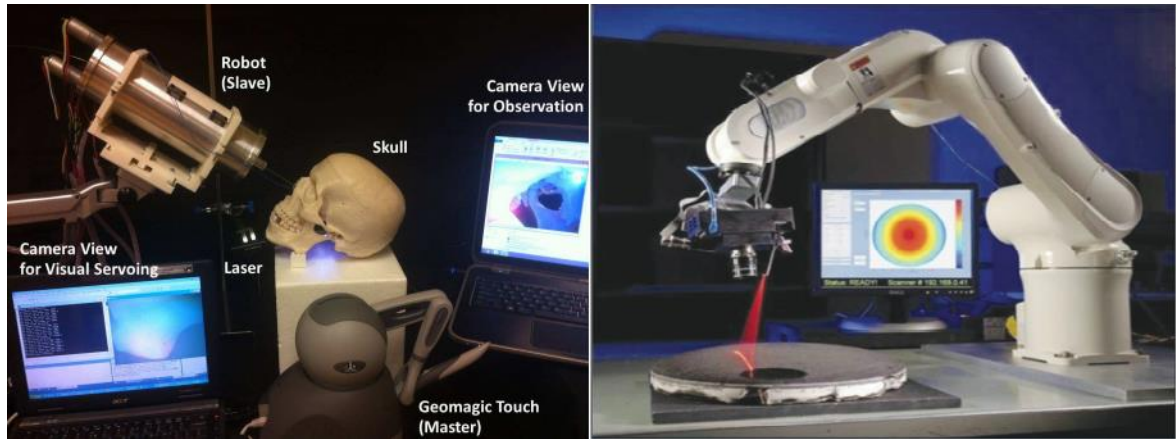
Robot endüstrisinde robotik sistemlerin zekasını arttırmak için görüş tabanlı kontrol veya görsel servolama kullanılmaktadır (Hutchinson vd., 1996). Robotun düz olmayan bir ortamda çalışması gereken durumlarda, görsel servolar daha önemli hale gelmektedir. Bu gibi durumlarda, sıradan sensörler robotun işlemleri için yeterli bilgi toplayamamaktadırlar. Diğer taraftan, görüş sistemleri çevresiyle ilgili yapı, renk, hareket ve daha fazlası hakkında geniş bir bilgi yelpazesi sunmaktadır. Ayrıca, görüntü sistemi kullanımı, insan görme sistemini taklit ederek robotik sistemde insan zekasının geliştirilmesine de olanak sağlamaktadır.

Görsel servo, arabalar için şerit takibi, mobil platformlar için navigasyon, teleoperasyon, füze takibi, meyve toplama, montaj veya kaynak uygulamaları, nesnelerin hareketi gibi çok çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Görüş sistemleri, 3 boyutlu uzayı, 2 boyutlu uzaya yansıtır ve bu da çevreden gelen tek boyutta veri kaybına neden olmaktadır ve kaybolan boyut, nesnelerin derinliğidir. Bu görme sistemi özelliği ve izdüşümde yer alan doğrusal olmama durumu, makine ve görüşün bütünleştirilmesindeki zorlukları ortaya

çıkartır ki görsel servo, bu tür sorunlara çözüm olarak sunulmuştur (Chaumette ve Hutchinson, 2006). Genel olarak servolamada, hibrit görsel servo(HVS), görüntü tabanlı görsel servo (IBVS) ve pozisyon tabanlı görsel servo (PBVS) olmak üzere üç yaklaşım vardır. IBVS, görüntü akışındaki son efektörün görüntüsü ile nesnenin görüntüsü arasındaki mesafeyi en aza indirmek için manipülatörü hareket ettirir. PBVS, nesnenin konumunu tahmin etmek için sahnenin 3 boyutlu yapılandırmasını kullanır ve manipülatörü bu 3 boyutlu koordinatlara taşır. Üçüncüsü, IBVS ve PBVS'nin bir kombinasyonu olan HVS hibrit görsel servolama, bu hibrid iki ilk yaklaşıma göre bazı potansiyel avantajlar sunar. Bu tezde tüm yaklaşımlara değinilecektir.

### 1.1 Görsel Servolama Uygulamaları

Görsel servolamalar çoğunlukla endüstriyel robotlarda kullanılmaktadır. Bu tür uygulamalarda amaç, robotun çalışma alanında durağan veya hareket edebilen nesnelerin veya engellerin konumu ve yönelimi ile ilgili olarak son efektörün konumunu ve pozunu kontrol etmektir. Kaynak, hareketli cisimler, konumlandırma nesneleri, elektronik veya mekanik parçaların montajı ve sökülmesi, robotik sistemler kullanılarak gerçekleştirilebilecek işlemlerden bazıları olarak örnek verilebilir görüntü Şekil 1.1'de gösterilmektedir (Corke ve Hager, 1998; Li vd., 2007; Song vd., 2005; Chen vd.,2012).



Şekil 1.1. Çeşitli Görevlerde Kullanılan Robotlar(techbriefs, 2010)

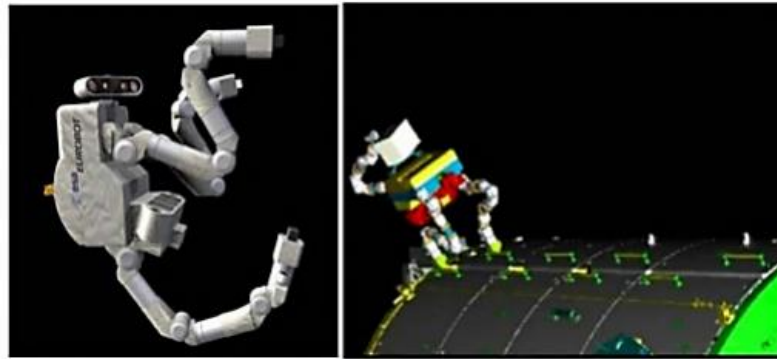
Endüstriyel uygulamalar görsel servolamanın tek uygulaması değildir, bu teknoloji tıbbi ve cerrahi uygulamalarda aletleri konumlandırmak veya tıbbi işlemleri gerçekleştirmek

için de kullanılma eğilimindedir. Örneğin, laparoskopik cerrahide, karın duvarı içinde sadece birkaç küçük kesiğe ihtiyaç duyulmaktadır, öyle ki cerrah sadece kamera görüntülerine bakarak robotik kollar sayesinde operasyonu gerçekleştirebilmektedir. Başka bir asistana olan ihtiyacı ortadan kaldırmak ve cerrahı kontrol görevinden kurtarmak için, laparoscopa otomatik olarak yardımcı olan ve rehberlik eden bağımsız bir sisteme ihtiyaç duyulmaktadır. Çeşitli araştırmacılar, operasyon sırasında aleti yönlendirmek için görsel servolama tekniklerini kullanmaya çalışmaktadırlar. Görüntü Şekil 1.2’de gösterildiği gibi (Ghanbari vd., 2009; Krupa vd., 2002).



Şekil 1.2. Tıbbi Uygulamalarda Kullanılan Görme Temelli Robotik (Samadi, 2012).

Görsel servo sistemlerinin başka bir uygulaması da uzay robotlarıdır. Bunlar bir hedef uduya yaklaşmayı, kenetlenmeyi, yakıt ikmali ve servisi gibi durumlarda bazı karmaşık parçaları kavramayı içeren otonom bir yörünge hizmetini gerçekleştirmede kullanılmaktadırlar (Ye vd., 2012). Görüntü Şekil 1.3’de gösterildiği gibi.



Şekil 1.3. Yörüngede Kullanılan Uzay Robotik Sistemi (Ye vd., 2012).

Bu tezde, farklı türde görsel servo yaklaşımları araştırılmış ve performansları ölçülmüştür. Amaç, tezde kullandığımız prototip robot için görsel bir servo algoritması geliştirmektir.

UR5 robot kol 6DoF ve altı adet döner eklemden oluşmaktadır. UR5 robot kinematikini ve ortak hesaplamalar için matematiksel denklemleri genişleterek anlatılmaktadır.

Son hedefimiz ise, V-REP üzerinde dolaylı Görüntü tabanlı görsel servolama testini, uygulamak ve MatLab ile senkronizasyonda geliştirilen algoritmayı bu ortamda performansını analiz etmektir.

Bu tezin içeriği şu bölümlerde anlatılmaktadır:

Bölüm 2’de literatürde araştırmacıların yaptığı ilgili çalışmaları verilmektedir. Kinematik çözümler için farklı yöntemler ve görüntü geliştirme teknikleri üzerine bir inceleme sunulmuştur. Önceki görsel servolama uygulamalarının bir özeti sunulmuştur.

Bölüm 3’de önerilen çözüm hakkında teorik bilgi verilmektedir. Problem tanımlanmakta ve önerilen yöntemler ayrıntılı olarak anlatılmaktadır. Robot kinematiği çözümleri için tüm yöntemler burada geniş ve detaylı bir şekilde anlatılmaktadır. Bu bölümde görüntü iyileştirme yöntemleri verilmektedir. Yapılan çalışmada kullanılan tüm araçlar anlatılmaktadır.

Bölüm 4’de sonuçlar ve tartışmalar göstermektedir. Bu bölümde sonuçlar beklenen sonuca ve ilgili bazı çalışmalara göre değerlendirilmiş ve kullanılan yöntemlerin performansı analiz edilmiştir.

Bölüm 5’de sonuçlar ve gelecekteki çalışmalarla ilgili önerilerimizi sunulmaktadır.

## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Araştırmacılar 30 yılı aşkın bir süredir görsel servolama konusunda çalışmaktadırlar (Shirai ve Inoue, 1973). Yüksek hızlı işlemciler, kameralar ve görüntü işleme konusundaki son gelişmeler, gerçek zamanlı uygulama ve endüstriyel uygulamalara olanak sağlamıştır. 1970 yılından bu yana görsel servolama tekniği incelenmiştir (Hashimoto, 2003). "Görsel Servolama" ifadesi ilk olarak 1979'da Hill ve Park tarafından kullanılmıştır. Dahası, araştırmacılar bu alanda önemli ilerlemeler kaydetmişlerdir

Literatürdeki görsel servolamayı daha iyi anlamak için farklı kategoriler ve görsel servolama sınıfları ayrı ayrı sunulmakta ve tartışılmaktadır. Birden çok uygulama ve yapılandırma türü nedeniyle, görsel servolamalar temel olarak aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir:

1. Görsel Servolama Stratejisi
  - (a) Konum Tabanlı Görsel Servolama (PBVS)
  - (b) Görüntü Tabanlı Görsel Servolama (IBVS)
  - (c) Hibit Görsel Servolama
2. Kamera Yapılandırması
  - (a) Robot kol sabit kameradan izlenir (Eye-to-Hand)
  - (b) Kamera robot kol üzerinde (Eye-in-Hand)
3. Kamera Sayısı
  - (a) Mono Vizyon
  - (b) Stereo Vizyon
  - (c) Çoklu Kameralar
4. Hedef Durum
  - (a) Statik Nesne
  - (b) Hareketli Nesne
5. Görüntü Özelliği
  - (a) Nokta Özellikleri
  - (b) Çizgi Özellikleri
  - (c) Görüntü Moment Özellikleri

Bunlar, daha önce yapılan işlerin çoğunda görsel servolamanın belirlenmesi için yapılan bazı önemli sınıflandırmalardır. Aşağıdaki literatür taraması, yukarıda tanıtılan kategorilere göre hazırlanmıştır.

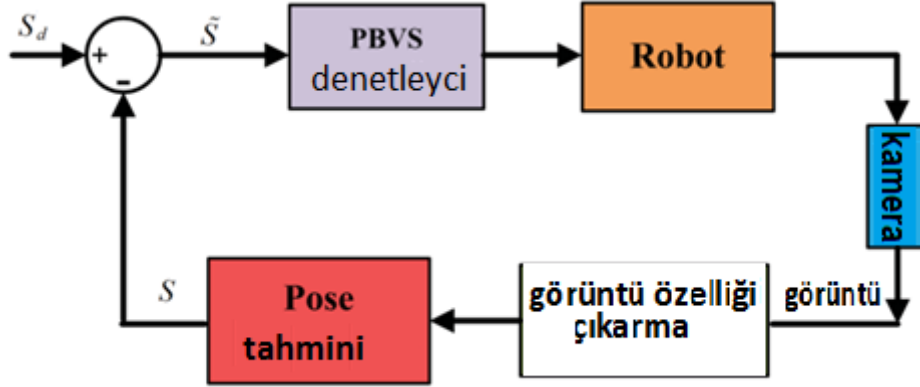
## **2.1. Görsel Servolama Stratejisi**

Görsel geribildirim robotu kontrol etmek için kullanıldığı yöntemlere dayanarak, görsel servolamalar üç ana grupta sınıflandırılabilir: Görüntü Tabanlı Görsel Servolama (IBVS), Konum Tabanlı Görsel Servolama (PBVS) ve Hibrid Görsel Servolama (HVS). Bu üç stratejinin her biri, aşağıdaki bölümlerde ayrı ayrı sunulmuştur.

### **2.1.1. Konum Tabanlı Görsel Servolama**

Pozisyona bağlı bir görsel servo (PBVS) kontrolünde, nesnelerin konumu ve yönü kameralar tarafından çekilen görüntüden çıkarılır. Nesne konumunu ve yönünü istenenlerle karşılaştırma ve konum, yönelim hataları girdi olarak hesaplanır. PBVS denetleyici, mevcut konum ve yönlendirme hatalarını azaltmak için bir kontrol sinyali üretir. Son olarak, bir ortak servo denetleyici, kartezyen denetleyici tarafından üretilen kontrol komutunu izler (Janabi-Sharifi, 2002). Bir PBVS kontrol cihazının blok şeması Şekil 2.1'de gösterilmiştir.

Robot kontrol problemi yaygın bir durumdur. Böylece temel zorluk, nesne pozisyonunu ve yönelimini hesaplamaktır (Li, 2007). Bu yöntem ayrıca 3 boyutlu görsel servolama olarak da bilinir. 2 boyutlu görüntüden 3 boyutlu bilgileri yeniden oluşturmak için doğru kamera kalibrasyonu gereklidir. Ayrıca, nesne pozunu hesaplayabilmek için, nesnenin tam bir geometrik modeline sahip olmak gereklidir. PBVS kullanılırken, görüntü yörüngesinde herhangi bir kontrol yoktur ve nesne kameranın görüş alanından (FOV) ayrılabilir. Bu durum ise görsel servolama görevinin başarısız olmasına neden olur (Chaumette, 1998).

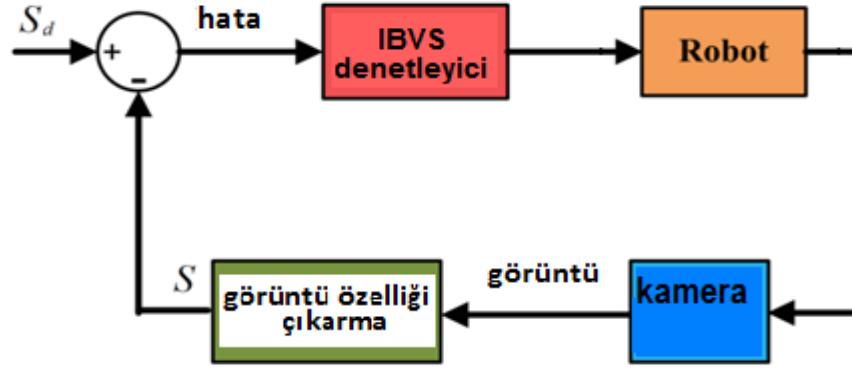


Şekil 2.1. Pozisyona Dayalı Görsel Servo Blok Şeması

### 2.1.2 Görüntü Tabanlı Görsel Servolama

Görüntü tabanlı görsel servolamada (IBVS), kontrol komutları doğrudan görüntü özelliklerine dayalı olarak hesaplanır. Mevcut özellikler ile istenenler arasındaki fark görsel servolama hatalarını yaratır ve denetleyici bu hatayı sıfırlayana kadar robotu hareket ettirir. Şekil 2.2 ile bir IBVS denetleyicisinin yapısını göstermektedir. Görüntü tabanlı görsel servolama, özellik tabanlı görsel servolama olarak da adlandırılır. Bu yaklaşımda kullanılan görüntü özellikleri, noktaların konumu, bir bölgenin boyutu, bir bölgenin merkezi, bir hattın uzunluğu, çizginin segmenti ve dönüş açısı olabilir.

IBVS'de görüntü interpolasyonu ve 3 boyutlu tekrar yapılandırma olmadığından, hesaplama maliyeti PBVS yönteminden önemli ölçüde daha azdır. Ek olarak IBVS, kamera ve robot kalibrasyon hataları için daha güvenilirdir. IBVS denetleyici, kalibrasyon hatalarının etkisini ortadan kaldırır. Ayrıca PBVS'nin aksine, bu yöntemde nesne modeli gerekli değildir (Deng, 2004; Malis, 2004). IBVS, görüntü düzlemi yörüngesini neredeyse düz bir çizgide kontrol etmesine rağmen, kontrolsüz kartezyen yörüngesi, özellikle de hedefe ulaşmak için büyük manevralar gerektiğinde robotun ortak sınırını ihlal edebilir. Ayrıca, potansiyel görüntü tekillikleri ve yerel minima oluşumu bu yöntemin diğer dezavantajlarıdır (Chaumette, 1998).

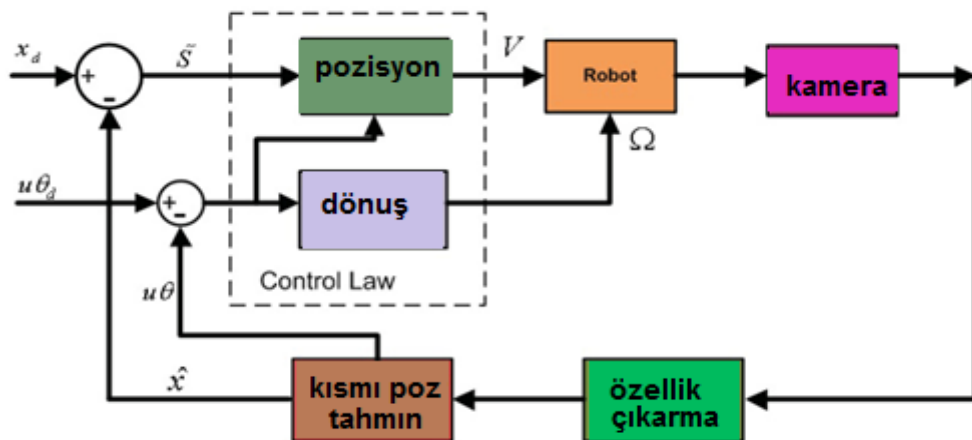


Şekil 2.2. Görüntü Tabanlı Görsel Servolama Blok Şeması

### 2.1.3 Hibrit Görsel Servolama

PBVS ve IBVS için belirtilen sakıncalar dikkate alındığında, önceki iki stratejiyi birleştiren Hibrit Görsel Servolama (HVS) yöntemi iyi bir alternatiftir. En iyi bilinen hibrit metodu 2-1/2D metodudur (Hutchinson vd., 1996). Bu yöntem, robotu kolu ucunun dönme hareketini doğrusal hareket kontrolünden ayırarak kontrol eder. 2-1/2D görsel servolama sistemi blok diyagramı Şekil 2.3'te gösterilmiştir.

Bu yöntemin avantajları, hem kartezyen hem de görüntü uzaylarında son efektörün yörüngelerinin aynı anda düz çizgiler olmasıdır. Ayrıca, bu yöntem serbest hedef model yöntem olarak bilinir. Yine de, hibrid sistem için bazı eksiklikler de vardır. İlk olarak, yönlendirmede sırasıyla düzlemsel ve düzlemsel olmayan bir hedef nesne için nesnenin en az 4 ve 8 farklı özellik noktası bulunması gerekir. İkincisi, kısmi poz tahmini gerektirir.



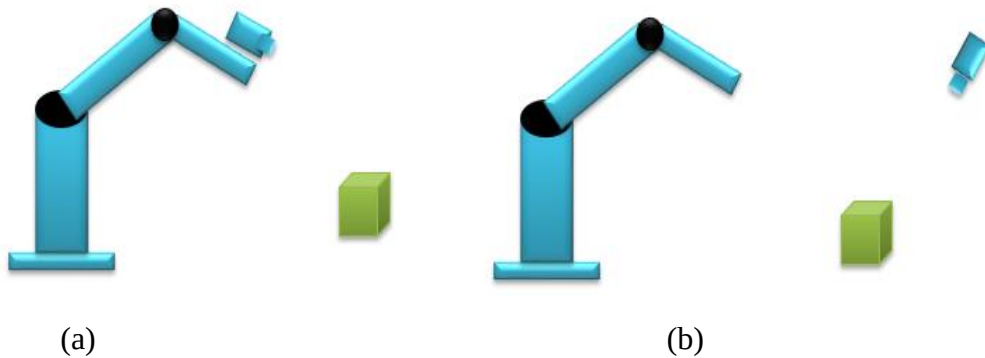
Şekil 2.3. Hibrit Tabanlı Görsel Servolama Blok Şeması



IBVS'nin kontrolsüz kartezyen yörüngesini ve PBVS'nin kontrolsüz görüntü izlerini kısmen çözmek için bir anahtarlama yöntemi önerilmektedir. Kontrol ünitesi, son efektörden hedef nesneye olan mesafe çok büyük olduğunda robot eklem limitlerinden kaçınmak için IBVS kontrolünden PBVS kontrolüne geçer ve eğer görüntü yörüngeleri görüntü sınırına yaklaşırsa görüntü tabanlı kontrole geri döner (Gans ve Hutchinson, 2002). Ayrıca, bu yöntem IBVS ve PBVS ile karşılaştırıldığında çok daha fazla hesaplama gerektirir. Araştırmacılar çeşitli hibrit türlerini formüle edip belirli bir görev için daha iyi çalışabilen başka bir hibrit üreterek bir üst seviyeye çıkmaktadırlar; (Cai, 2016) 'de, yeni ortogonal görüntü özelliklerini alan ve sabit stereo kameralardan gelen görsel geribildirimler ile bir robotun manevra kontrolünü gerçekleştiren 6 boyutlu görsel servolama (6DVS) adlı bir çeşit 2-1/2-D VS geliştirmişlerdir. Kesin olarak, klasik görsel özellikleri kullanmak yerine, 3 boyutlu bir konum vektöründen bir özellik çıkararak yeni bir sanal görsel alan (görüntü alanı) tanımlamışlardır. Temel görsel servolama stratejileri gözden geçirildiğinde, IBVS stratejisinin diğer iki yöneme göre çok daha faydalı olduğu sonucuna varılabilir. Bu, gerektirdiği daha az hesaplama ve sağladığı daha yüksek sağlamlıktan kaynaklanmaktadır.

## 2.2 Kamera Yapılandırma

Robot-kamera kurulum konfigürasyonuna bağlı olarak, görsel servolama gözden-ele(eye-to-hand) ve elde-göz(eye-in-hand) görsel servolama olarak iki ana sınıfa ayrılmıştır. Kameranın, robotun son efektörüne monte edildiği sistemlere elde-göz(eye-in-hand) yapılandırma denir. Şekil 2.4 (a)'da gösterilmiştir. Kameranın robot ve çalışma alanına doğru olarak monte edildiği duruma, gözden-ele(eye-to-hand) yapılandırma denir Şekil 2.4 (b)'de gösterilmiştir



Şekil 2.4. (a) Elde-göz(eye-in-hand) ve (b) Gözden-ele(eye-to-hand).

Görsel servolama uygulamalarının çoğu elde-göz(eye-in-hand) yapılandırma kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Elde-göz(eye-in-hand) yapılandırma yalnızca nesneye odaklanabilirken, gözden-ele(eye-to-hand) yapılandırma alakasız bilgiler içeren bir resim sağlamaktadır. Bir gözden-ele(eye-to-hand) yapılandırma kullanıldığında hedef nesnenin görüntüsü, manipülatörün kendisi veya diğer engeller tarafından engellenebilmektedir. Ancak, elde-göz(eye-in-hand) yapılandırma veya sabit kamera daha geniş bir görüş alanı sağlamak ve çoğunlukla hareketli nesneleri içeren uygulamalarda kullanılmaktadır.

Chesi ve Hashimoto, 2002 'daki her yapılandırmanın kararlılık problemini araştırmışlardır. Bu yapılandırmaların her biri, deneylerin ve uygulamaların sınırlamalarına dayanan çeşitli servolama görevlerinde kullanılmaktadır. Bu sistemlerde, odak uzaklığı, çözünürlük ve prensip noktası gibi kamera iç parametrelerini elde etmek için kamera kalibrasyonları yapılmalıdır. Önemli kamera kalibrasyon yöntemleri (Tsai ve Lenz, 1989; Tsai, 1987)'de belirtilmiştir.

Her konfigürasyonun vazgeçilmez avantajlarından dolayı görsel servolama, her iki konfigürasyondan da aynı anda faydalanabilmektedir. Elde-göz(eye-in-hand) ve gözden-ele(eye-to-hand) yapılandırmalarının bir kombinasyonu (Flandin vd., 2000; Lippiello vd., 2005)'de tanıtılmıştır. Kamerayı ve robotu kalibre etmek için hem zaman hem de para harcanmaktadır. Bu problemin üstesinden gelmek için araştırmacılar tarafından bazı kalibre edilmemiş görsel servolama yöntemleri sunulmuştur: Malis, kamera parametrelerine göre değişmez bir görsel servolama yöntemi önermiştir (Malis, 2002) ve büyük kalibrasyon hatalarının varlığında denetleyicinin kararlılığını kanıtlamıştır. Diğer kalibre edilmemiş ve otomatik kalibrasyon görsel servolama teknikleri (Sutanto, 1997; Qian ve Su, 2002)'de tanıtılmıştır.

### **2.3 Kameraların Miktarı**

Görsel servolamalar farklı sayıda kamera kullanılarak gerçekleştirilebilir; tek bir kamera kullanıldığında, monoküler, iki kamera söz konusu olduğunda stereo görüntü veya binoküler olarak adlandırılmaktadır, ayrıca sistemde birden fazla kamera bulunabilir. Bu kategorilerin her birinde, kameralar elde-göz(eye-in-hand) ve gözden-ele(eye-to-hand) yapılandırmaları şeklinde kurulabilir. Kragic ve Christensen'a 2002 göre her kategori için

kapsamlı bir anket yapmışlardır. Tüm kategoriler arasında tek kamera, görsel bilgileri çıkarmak için gereken işlem süresini en aza indirmektedir. 2 boyutlu görüntü düzlemindeki her nokta, 3 boyutlu alanda bir çizgiye karşılık geldiğinden tek bir kamera, kamera ile nesne arasındaki mesafenin iyi bir tahminini sağlayamaz (Hutchinson vd., 1996). Bu yüzden çözüm, nesnenin daha hassas konumunu ve derinliğini elde etmek için bir stereo kamera görüş sistemi kullanmaktır. Böylece derinlik hesaplaması, aynı sahnenin çoklu görüntüleri arasındaki küçük farklar karşılaştırılarak yapılmaktadır. Derinlik hesaplamasına izin veren görüntüler arasındaki mevcut kısıtlama Epipolar Geometri olarak adlandırılır. Kameraya göre bir 3 boyutlu noktanın derinliğinin, sol ve sağ görüntü düzlemindeki projeksiyonlarının konum farkı ile ters orantılı olduğu gösterilmiştir. Derinlik tahmini bu tezde ayrıntılı olarak tartışılmıştır. Stereo görüş kolayca uygulanabilmektedir, ancak stereo eşleştirme problemi veya doğru uyumu bulmak bilgisayar görüşündeki en aktif araştırma alanlarından biridir (Ng ve Ganapathy, 2009). İlgili bazı çalışmalar (Malis vd., 2000; Li vd., 2008)'de sunulmuştur.

Stereo görüş sistemi, elde-göz(eye-in-hand) yapılandırmasında nadiren kullanılır. Stereo görüş sistemleri genellikle mono görüşten daha küçük bir görüş alanına sahiptir. Bunun nedeni, stereo görüş sistemlerinin her kameranın sadece görüş alanının paylaşılan kısmı ile çalışmasıdır. Bu ayrıca derinlik tahmininin doğruluğunu etkileyen kamera taban çizgisi mesafesini de sınırlamaktadır. Tersine, tek başına stereo görüş konfigürasyonunun daha az sınırlaması vardır ve dolayısıyla görsel servolama sistemlerinde daha çok yaygındır. Kragic ve Christensen' de 2002 bazı elde-göz(eye-in-hand) ve bağımsız(stand-alone) stereo görüş konfigürasyon uygulamalarını açıklamıştır.

Birden fazla kamera sistemi en nadir sistemdir, ancak bu tür sistemler daha fazla bilgi sağlar ve nesnelerin ve derinliklerinin doğru bir şekilde algılanması için önemli olabilmektedir. Görüntü işleme ve eşleştirme özellikleri, diğer yapılandırma türlerine kıyasla daha fazla zaman almaktadır. Ancak hedef nesnenin çok büyük olduğu durumlarda birden fazla kamera kullanmak kaçınılmazdır. Zhao vd.,'a 2011 göre bir ya da iki kameranın tüm iş parçasını gözlemlemek için yeterli olmadığı büyük iş parçalarıyla başa çıkmak için bir görsel servolama sisteminde dört kamera yapılandırmasını önermişlerdir. Bazı ilgili çalışmalar Kragic ve Christensen' de 2002 sunulmuştur. Bu tezde ise tek kamera sistemi kullanılmıştır.

## 2.4. Hedefin Durumu

Görsel servolama sistemlerinde hedefin durumu çok önemlidir. Görme sisteminin temel özelliklerinden biri, hareketli nesneleri takip etme ve yakalama yeteneğidir. Bu nesneleri yakalamak için süreci duraklatmanın verimsiz olduğu durumlarda üretim döngüsünde çok yararlı olabilir. Böylece hareketli nesnelere yönelik görsel servo oluşturma yöntemleri, üretim verimliliğini arttırmak için kullanılabilir. Hareketli bir nesneyi bir robotla yakalamak, iyi tasarlanmış bir yörünge planlaması gerektiren görsel servolamada büyük bir sorundur. Bu konuda çeşitli yöntemler ve stratejiler geliştirilmiştir; yörünge rejenerasyon yöntemleri, potansiyel alan yöntemleri ve gezinme yönlendirme yöntemleri, görüntü tabanından oluşturulan potansiyel alan yöntemleri (Borg vd., 2002; Mezouar ve Chaumette, 2002).

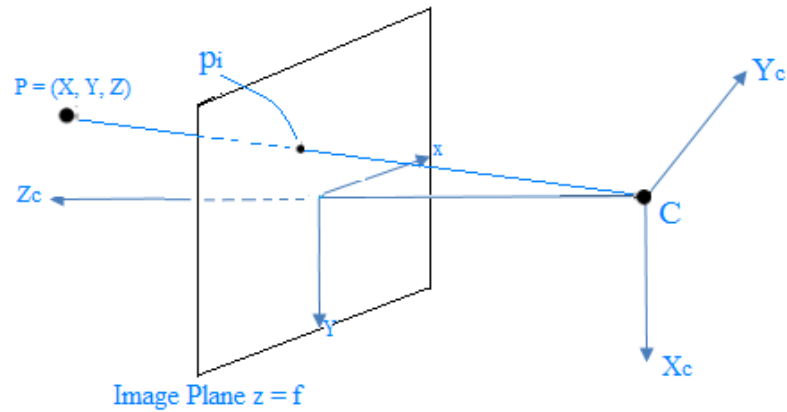
Hedef takip görevinde, görsel servolama nesnenin görüş alanında tutulmasından ve gerçek konum ile istenen konum arasındaki hatanın azaltılmasından sorumludur (Ge ve Jie 2007). Bu tür uygulamalarda, hareket tahmin algoritmaları nesneleri hassas bir şekilde izlemeye yardımcı olabilir. Bilinmeyen nesne hareketleri durumunda, Asada vd., (1999) adaptif bir görsel servolama yöntemi de sunulmuştur. Keshmiri vd.,'a (2010) göre nesnenin takip edilmesi ve kavranması için robotun bir on-line yörünge planlama algoritması kullandığı ve hareketli nesnenin yakalandığı bir örnek sunulmaktadır. On-line yörünge planlaması, uyarlanabilir tahmin, planlama ve yürütmeye dayanmaktadır. Bu algoritma süreç boyunca sürekli olarak yolu oluşturur ve değiştirir. Chang vd.,'a göre kontur takip uygulamaları için IBVS'ye uyumlu sistemlerde hareket planlama yaklaşımına dayalı bir PH-dişli sistemi önermektedirler. Uygun hızlanma/yavaşlama hareketi ile, istenen görüntü özelliği komutlarını üretmek için bir PH kuantik dişli yapılandırılmıştır, böylece geometrik olmayan bilinen bir nesnenin problemlerini takip eden IBVS uygulanabilmektedir.

### 3. GÖRSEL SERVOLAMANIN TEORİSİ

#### 3.1 Görüş Sistemi

##### 3.1.1 Görüntü Oluşumu

Görüntü oluşumu, nesnelerin bir görüntüsünü oluşturmak için nesnelerden yayılan radyasyonun toplandığı süreçtir (Jahne, 2004). Sensörler tarafından çekilen görüntülerden, gerçek dünyadaki nesnelerin boyutu, şekli ve konumu ile renk ve doku gibi diğer özellikler çıkarılabilmektedir. Bir dijital fotoğraf makinesinde, cam veya plastik lens, ışığı bir dijital görüntüye dönüştürmek için bir dizi ışık duyarlı cihaz ile bir yarı-iletken çipin yüzeyinde bir görüntü oluşturur. Bir göz veya bir kamerada görüntü oluşumu, 3 boyutlu dünyanın 2 boyutlu bir yüzeye yansıtılmasını içerir. Derinlik bilgisi kaybolur ve kişi, görüntüden uzaktaki büyük bir nesne mi yoksa daha küçük bir yakın nesne mi olduğunu söyleyemez. 3 boyuttan 2 boyuta bu dönüşüm perspektif projeksiyon olarak bilinir (Corke, 2011). Bilgisayar görüntüsünde, Şekil 3.1'de gösterilen merkezi perspektif görüntüleme modelinin kullanılması yaygındır. Kamera koordinat çerçevesinin kaynağı, kameranın izdüşümünün merkezinde yer alır; bu, kamera açıklığının bulunduğu yerdir. Z-ekseni kameranın optik eksenini olarak algılanır ve kameranın önündeki noktaların konumu pozitif z yönünde tanımlanır.



Şekil 3.1. Perspektif model

Işık ışınları, kamera çerçevesinin (C) kökeni üzerinde birleşir ve ters çevrilmemiş bir görüntü,  $z = f$  mesafesindeki görüntü düzlemine yansıtılır. Benzer üçgenleri kullanarak, dünyadaki bir  $P = (X; Y; Z)$  koordinatının,  $p_i = (x, y)$  'ye görüntü düzlemine yansıtılması.

$$x = f \frac{X}{Z}; y = f \frac{Y}{Z} \quad (3.1)$$

veya kompakt matris formunda yansıtılması:

$$p_i' = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

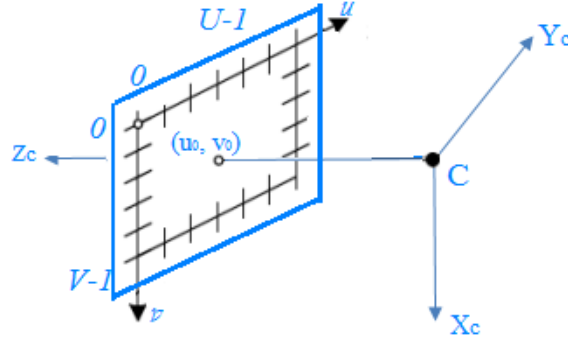
Perspektif  $p_i' = (x', y', z')$  ve görüntü düzlemi koordinatları aşağıdaki gibi elde edilir

$$x = \frac{x'}{z'}; y = \frac{y'}{z'} \quad (3.3)$$

Dünya boyutundan görüntü düzlemine bir perspektif izdüşümü aşağıdaki özelliklere sahiptir:

- 3 boyutlu uzaydan 2 boyutlu görüntü düzlemine bir haritalama gerçekleştirir.
- Dünyadaki düz çizgiler görüntü düzleminde düz çizgilerle yansıtılır.
- Dünyadaki paralel hatlar ufukta kesişen hatlara yansıtılır.
- Dünya uzayındaki konikler, görüntü düzlemi üzerinde konik olarak yansıtılır. Örneğin, bir daire, daire veya elips olarak yansıtılır.
- Haritalama bire bir değildir ve benzersiz bir tersi yoktur. Yani  $(x; y)$  benzersiz olarak belirlenir  $(X; Y; Z)$  ise mümkün değildir.
- Dönüştürme uygun değildir, örneğin iç açıları korunmadığı için şekli korunmaz

Kamera içerisinde görüntü düzlemi, şekil 3.2'nin görüntü piksellerini ifade eden küçük resim elemanlarına doğrudan karşılık gelen, fotosit denilen, ışığa duyarlı elemanların  $U \times V$  kafesidir.



Şekil 3.2. Bir kamera görüntü düzlemindeki pikseller

Piksel koordinatları, negatif olmayan tamsayıların 2-vektörü  $(u, v)$  'dir ve orijin, görüntü düzleminin sol üst köşesindedir. Pikseller, boyut olarak üniformdur ve düzenli bir kafes üzerinde ortalanır, böylece piksel koordinatı, görüntü düzlemi koordinatına  $(u; v)$  bağlı olarak  $(x; y)$  olur.

$$u = \frac{x}{\delta_w} + u_0; v = \frac{y}{\delta_h} + v_0 \quad (3.4)$$

Denklem (3.4)'de, her bir  $\delta_w$  ve  $\delta_h$  terimleri, pikselin genişliği ve yüksekliğidir, ve  $(u_0; v_0)$  asıl noktadır. Örneğin; optik eksenin görüntü düzlemini kestiği noktanın koordinatı. Matris formundaki önceki denklemleri de şu şekilde ifade edebiliriz:

$$p_i' = \begin{bmatrix} u' \\ v' \\ w' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{f}{\delta_w} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{f}{\delta_h} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = CP \quad (3.5)$$

Yukarıdaki denklemden, görüntü düzlemi koordinatlarını şu şekilde açıklayabiliriz:

$$p = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{u'}{w'} \\ \frac{v'}{w'} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Denklem (3.5)'da kamera içsel parametreler matrisi olarak adlandırılan bir C matrisi bulunur ve matrisin elementleri kamera ve sensörün özellikleridir.

### 3.1.2 Kamera kalibrasyonu

Bir kameranın genel modelini karakterize eden ana parametreler üç kategoriye ayrılabilir: Dış parametreler, iç parametreler ve distorsiyon parametreleri. parametreleri, İç bir noktanın görüntü koordinatları ile kamera çerçevesine göre ifade edilen mekansal koordinatlar arasındaki ilişkiyi karakterize eder. Dış parametreler, kamera çerçevesi ve taban çerçevesi arasındaki geometrik ilişkiyi karakterize eder. Son olarak, distorsiyon parametreleri geometrik çarpıklıkların modelini karakterize eder.

Kalibrasyon veya kamera kalibrasyonu, kameranın içsel ve dışsal parametrelerini dünya koordinat sistemine göre belirleme sürecidir. Kalibrasyon teknikleri, bilinen ilgili görüntü düzlemi ve göreceli koordinatları bilinen dünya noktalarının kümelerine dayanır (Clarke ve Fryer, 1998; Zhang, 1999; Fetic vd., 2012). Kamera kalibrasyon yöntemlerinde kamera iç geometrik ve optik parametreleri, kamera ve nesne arasındaki ilişkiyi tanımlamak için bilgi gerekir. Klasik kamera kalibrasyonu, (Zhang, 2004)'da anlatılan yöntem ile elde edilebilir.

Araştırmacıların görüntü tabanlı görsel servolama yaklaşımını çok kameralı bir sisteme uygulanmasını tavsiye etmelerine rağmen (Martinet ve Cervera, 2001; Hager vd., 1995), bazı kamera teknolojileri uygulamalarının kalibrasyona ihtiyacı yoktur. Stereo görüntü sistemi kullanıldığında, sol ve sağ görüntülerde 3 boyutlu bir nokta açıkça görülebiliyorsa, görüntüyü görsel özellikler olarak kullanmak mümkündür. Sadece tek bir kameranın söz konusu olduğu bir monoküler görüş sistemi kullanılması durumunda, kamera kalibrasyonu gibi belirli sayıda varsayımın yapılması kaçınılmazdır. Bu durumda robotun görsel servolama kontrolünü zorlaştıran ve bu konfigürasyonların yakınında neredeyse imkansız olan bazı tekillikler bulunmaktadır. Aslında bir binoküler görüş sisteminin



kullanılması, bu tür tekilliklerden kaçınmakta ve daha az kamera kalibrasyonu gerektirmektedir. Bu nedenle, stereo görüş konfigürasyonunda, 3 boyutlu parametrelerin, farklı açılardan ve farklı bakış açılarından gözlemlenen aynı sahnenin görüntülerinin epipolar geometri kullanılarak hesaplanması da mümkündür (Faugeras, 1992). Hem stereo görsel hem de monoküler görsel, belirli uygulamalara bağlı olarak avantajlara sahiptir.

Gereken hesaplamalar açısından, stereo görsel servolama klasik monoküler görsel servolama yaklaşımlarına göre birçok avantaja sahiptir, örneğin, gözlemlenen nesnenin herhangi bir geometrik modeli olmaksızın derinlik bilgisi geri kazanılabilir. Görüntü tabanlı görsel servolamada bile, görüntü etkileşimi matrisinin hesaplanması için bu bilginin gerekli olduğu belirtilmelidir. Yine de (Chenchen, 2014)'de, monoküler görmeye dayalı doğrusal kalibrasyon yönteminin engel mesafesi ölçümü için uygulandığı, monoküler görsel kullanılmaktadır. Algoritma, kamera kalibrasyon problemini, görüntü düzlemindeki ve gerçek dünyadaki noktalar arasındaki projeksiyon ilişkisini analiz ederek iki doğrusal denklemi çözmektedir. Doğrusal olmayan problemi doğrusal bir probleme dönüştürmekte ve hesaplama karmaşıklığını büyük ölçüde azaltan kalibrasyonu tamamlamak için sadece 3 sabit noktaya ihtiyaç duymaktadır.

### 3.2.3 Görüntü yorumu

Görüntü yorumu, ana görüntü özelliklerinin belirlenmesi ve çıkarılmasından oluşur. Özellikler, belirli türdeki değerli bilgileri tutan görüntülerde bölgeler olarak kabul edilir. Örneğin, insan vizyonu doğal olarak güçlü kontrast, renk, net kenarlar ve farklı şekillere sahip özelliklere meyyleder. Görüntü çerçevesi, ayıklanacak belirli görüntü özelliklerine uygun daha verimli yapılara dönüştürülmelidir.

Görsel servolama uygulamaları için büyük ilgi gören üç ana görüntü özelliği vardır; geometrik merkezler, köşeler ve çevreler. Uygulamada kullanılan en basit özellik ve en verimli görüntü özelliği geometrik merkezdir. Hem çevre hem de hedef nesnelerin yüksek ölçüde yapılandırıldığı düzlemsel görevler için özellikle belirtilir. Köşeler, yapılandırılmamış ortamlarda çıkarım için hesaplama verimliliği, geniş kullanılabilirlik ve sağlamlık arasında iyi bir alışverişe olanak sağlayan çok sağlam ve esnek bir görüntü özelliğidir. Ayrıca, kullanımı geometrik nesne modellerine dayalı uygulamalara da

uyarlanabilir. Son olarak çevreler, görsel servo uygulamaları için kullanılan en karmaşık ve gelişmiş görüntü özelliğidir. Bu özellik, öznitelik çıkarma işleminin kendisi için ve genellikle bu özelliği kullanan ilgili algoritma için önemli bir hesaplama gücü gerektirir.

- Geometrik Merkez

Geometrik merkezler, yüksek yapılandırılmış ortamlardaki düzlemsel uygulamalar için çok yaygın ve popüler bir görüntü özellikleri sınıfıdır. Özel olmayan donanımlarla da değerlendirmek kolay ve hızlıdır. Esas olarak, gözlemlenen sahnenin konumunun ve oryantasyonunun yeniden yapılandırılmasına izin veren, değişmezler olarak bilinen sayısal niceliklerin inşa edilmesi için uygulanır. Basit bir ikiye ayırma, hedef nesnenin arka plana göre göz önünde bulundurulması için kullanılan, merkezin değerlendirilmesi için gerekli olan görüntü işlemesidir. Nesnenin ve arka planın kolay ayırt edilebilir olması gerekir.

- Köşeler

Köşe, görsel algılama uygulamasında en çok kullanılan görüntü özelliklerinden biridir. Hesaplamadaki karmaşıklık ile sentetik görüntü bilgilerinin kalitesi ve sağlamlığı arasındaki dengeyi temsil eder. Köşeler, çeşitli uygulama türleri için çok farklı şekillerde uygulanmıştır, özellikle bunlar, yapay modellere dayalı uygulamalar için belirtilmiştir. Tipik olarak, bilinen bir modelin köşelerini görüntüdeki çıkarılan köşelere eşleştirmek için kullanılırlar, bu da sahnede hedef nesnelerin mevcudiyetini veya konumunu analiz eder.

Köşelerin değerlendirilmesi için gereken görüntü işleme, kullanılan algoritmanın türüne bağlıdır. Örneğin, sınırdaki önemli dönüşler için yapılan araştırmaya dayanan algoritmalar, dijital bir görüntü, keskinliğin segmentasyonu ve sınırının zincir kodu olarak çıkarılması, yani gözlemlenen bir nesnenin kenarının bir temsili olarak verilir. Kenar, kenarın bir sonraki pikselinin konumunu karşılık gelen ayrık yönü gösteren bir küçük tamsayı "zinciri" ile tanımlanır.

- Çevre

Kontur, görüntü işlemede çok heyecan verici bir konudur. Çizgiler ve eğriler, bilgisayar görüntü alanındaki önemli özelliklerdir çünkü bir nesnenin şeklini veya dış hatlarını tanımlarlar ve dolayısıyla bilgisayarın tanımasını sağlarlar. Kontur temsili, bir dizi nesne için yararlı olacak şekilde genel olarak şekil bulmakla ilgilidir, aynı zamanda görüntü verisinden hesaplanmasına izin verir ve benzer şekillerin karşılaştırılmasını kolaylaştırır. Çizgi ve eğri uydurma, şablonlar kullanılarak doğrudan yapılabilirken, bu yöntemler veri gereksiniminden dolayı genellikle zorluklarla karşılaşır.

Bir özelliğin yaşam döngüsü, özellik tabanlı tanıma açısından tipik olarak üç aşamadan oluşur. Özellikler ilk olarak özellik tespiti adı verilen bir aşamada algılanır, daha sonra etkili ve güvenilir bir şekilde diğerinden ayırt edilebilecek şekilde tarif edilirler. Son olarak, söz konusu özelliklerin eşleşip eşleşmediğini belirlemek için eğitim görüntülerinden özelliklerle eşleştirilirler.

### 3.2.4 Görüntü iyileştirme

Bu tezde PBVS ve IBVS'nin uygulanması için bazı görüntü işleme teknikleri kullanılmıştır. Burada bir veya daha fazla giriş görüntüsünü bir veya daha fazla çıktı görüntüsüne dönüştüren ve bir hesaplama işlemi olarak, görüntü işlemeyi tanımlamaktayız. Görüntü işlemede sıklıkla, görüntü iyileştirme kullanılır (Corke, 2011). Görüntü geliştirme tekniklerinin çoğu morfoloji ve görüntü parçalamadan gelir.

- Resim Sınıflandırma

Görüntü bölümleme terimi, bir görüntünün bir dizi bölgeye bölünmesini ifade eder. Birçok görevdeki amaç, bölgelerin görüntünün anlamlı alanlarını temsil etmeleridir. Önplan piksel olarak görüntü piksellerinin bir alt kümesini seçen bir işlemle renkli bir görüntüden ikili bir görüntü elde edilebilir. Bir görüntü analizi görevinde ilgilenilen pikseller, geri kalanı yok sayılacak arka plan pikselleri olarak bırakılır. Seçim işlemi, eşikleme operatörü kadar basit olabilir veya karmaşık bir sınıflandırma algoritması olabilir. Bir dizi uygulamada, yararlı görevler gerçekleştiren algoritmalara giriş olarak ikili görüntüler kullanılabilir. Bu algoritmalar, çok basit sayma görevlerinden çok daha karmaşık tanıma, yerelleştirme ve denetim görevlerine kadar olan görevleri gerçekleştirebilir (Shapiro ve Stockman, 2000).

En basit segmentasyon tekniği, sadece iki bölgeyi dikkate alan ikili segmentasyondur. Tipik olarak, segmentasyon işlemi, bir eşik  $T$  ile piksellerin karşılaştırmasını içerir.  $P_{ij}$ 'in,  $(i, j)$  koordinatlı piksellerin değeri olduğunu ve  $S_b$  ve  $S_f$ 'nin sırasıyla arka plan ve önplan piksellerinin kümeleri olduğunu varsayalım. İkili segmentasyon süreci aşağıdaki gibi kolay temsil edilebilir:

$$p_{ij} = \begin{cases} S_b & \text{if } I_{ij} < T \\ S_f & \text{if } I_{ij} \geq T \end{cases} \quad (3.7)$$

Bu tekniğın en önemli avantajı, gerçek zamanlı uygulamaları uygun kılan daha az hesaplama karmaşıklığıdır. Bu yaklaşımın en önemli adımı uygun bir eşiğın seçilmesidir.

Çizelge 3.1. Eşik pseudocode

#### **Algoritma 1**

*I*: giriş gri tonlamalı görüntü vektörü

*thresh*: bir eşik değeri

*Wins*: bir pencere boyutu

*Bin*: görüntü vektörü ikiye ayırma

**For** her satır 1'den yüksekliğe kadar tanımlanır **do**

**For** sütun 1'den genişliğe kadar tanımlanır **do**

        Geçerl. piksel =  $I$  [satır, sütun];

**If** (geçerli piksel < ortalama-thresh) **then**

            Bini Etiketle [satır, sütun] = 0;

**else**

            Etiket Kutusu [satır, sütun] = 1;

**End if**

**End for**

**End for**

Bine Geridön

Literatürde, otomatik eşik seçimine yönelik birçok yaklaşım geliştirilmiştir. Bazı adaptif teknikler de önerilmiştir, ancak yine de ikili segmentasyonun etkin kalite

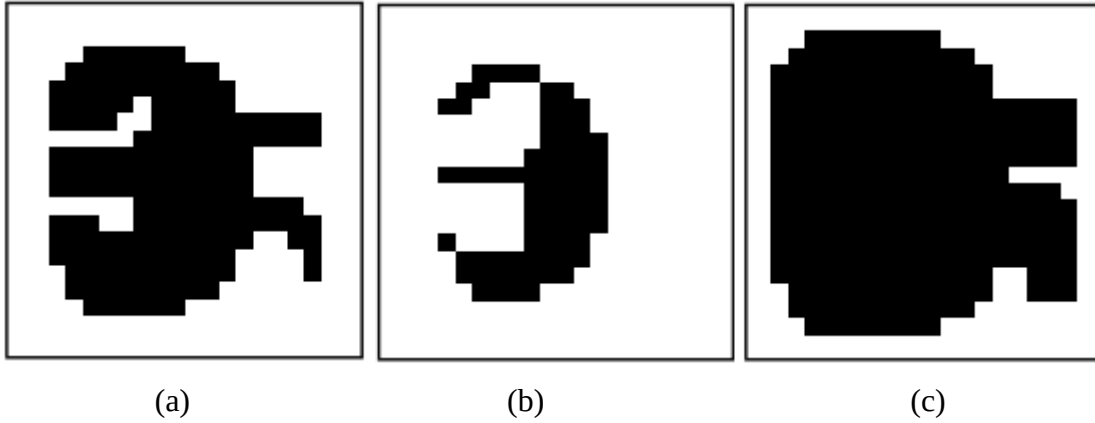
indekslerinin belirlenmesi ile ilgili problemleri vardır. En çok kullanılan çözüm, olası piksel değerlerinin her biri için piksel sayısını sağlayan gri seviyelerinin histogramı olarak da adlandırılan görüntü histogramına dayanan çözümdür. Bu tekniğin 3 boyutlu nesnelerle sahneler için uygulanması, özellikle her bir pikselin gri seviyelerini farklı bir şekilde değiştiren görüntü gürültüsü nedeniyle çalışma koşulları daha karmaşıktır.

- Morfoloji

Morfoloji sözcüğü, biçim ve yapıya atıfta bulunur ki bilgisayar görüşünde bir bölgenin şekline başvurmak için kullanılabilir. En yaygın ikili görüntü işlemlerine morfolojik işlemler denir çünkü bunlar temeldeki ikili nesnelerin şeklini değiştirirler (Szeliski, 2011). İkili morfolojinin işlemleri, bir ikili görüntü B'yi ve genellikle çok daha küçük, ikili bir görüntü olan bir yapılandırma elemanı olan S'yi girer. Yapılandırma elemanı bir şekli temsil eder; herhangi bir boyutta veya yapıda olabilir. Bununla birlikte, belirli boyutlarda dikdörtgen veya belirtilen çapta dairesel bölge gibi bir dizi ortak yapılandırma elemanı vardır, yapılandırma elemanlarının amacı, ikili görüntünün problemleri olarak hareket etmeleridir. Yapılandırma elemanının bir pikseli, onun kaynağı olarak belirtilmektedir; bu genellikle simetrik bir yapılandırma elemanının merkezi pikselidir. Bazı temel morfoloji operasyonları, genişleme ve erozyondur.

Dilatasyon işlemi bir bölgeyi büyütürken, erozyon küçültür. Bu işlemler, gürültünün azaltılması, tek tek elemanların izole edilmesi ve bir görüntüdeki farklı unsurların birleştirilmesi gibi çok çeşitli bağlamlarda ortaya çıkar. Dilatasyon, bazı görüntü B'lerin çekirdek veya yapı elemanı S ile bir sarmalıdır. Çekirdek S görüntü üzerinde tarandıkça, S ile örtüşen maksimum piksel değeri hesaplanır ve kaynak altındaki görüntü pikselinin değeri o maksimum değerle değiştirilir. Bu, görüntüdeki parlak bölgelerin büyümesine neden olur. Erozyon, konuşma operasyonudur.

Erozyon operatörünün hareketi, çekirdeğin alanı üzerindeki yerel minimum hesaplamaya eşdeğerdir. Çekirdek S görüntü üzerinde tarandıkça, S ile örtüşen minimum piksel değeri hesaplanır ve orijin altındaki görüntü pikselinin değeri o minimum değerle değiştirilir (Bradski ve Kaehler, 2008). İki temel morfolojik işlem Şekil 3.3'teki gibi ikili görüntülerin işlenmesinde kullanılır.



Şekil 3.3. Morfolojik operasyon;(a) orjinal görüntü (b)erozyon (c)dilatasyon (Steven, W, 1998)

### 3.2.4. Kenar algılama ve kenar bağlama

Sınır algılama ve kenar bağlama işlemleri, görüntü anlayışındaki temel adımlardır. Kenar algılama, birçok bilgisayarın görme ve görüntü işleme uygulamasında en önemli adımlardan biridir. Kenarlar kabaca yerel yoğunluğun değiştiği görüntü konumları olarak tanımlanabilir. Yoğunluk ne kadar güçlü olursa, bu pozisyonda bir kenar için iz o kadar belli olur (Burger ve Burge, 2009). Kenarlarla çalışırken kenarların, bağlantıyı bozan linki kurtarmaya çalışmak için harekete geçtiği ve ayrılan kenar parçalarına ayırdığı görülür.

- **Kenar algılama**

Kenarlar ve çevreler, insan ve diğer görüş sistemlerinde baskın bir rol oynamaktadır. Kenarlar, hem biyolojik görüşde hem de bilgisayar görüntü analizinde görüntü bilgilerinin analiz ve yorumlanmasına yönelik çok önemli ipuçlarıdır (Mlsna ve Rodriguez, 2009). Kenarlar sadece görsel olarak çarpıcı değildir, herhangi bir nesne sadece birkaç anahtar kenar ile yeniden oluşturulabilir. İnsanlar, görüntüdeki sınırları otomatik olarak algılayan çok iyi bir görsel sisteme sahiptir. Oysa, makinelerin aynısını kopyalaması için önemli miktarda çaba gerekmektedir (Akhtar vd., 2008).

Matematiksel kenar algılama, parlaklık veya yoğunluk seviyesinin keskin bir şekilde değiştiği veya süreksizliklerin olduğu dijital bir görüntüdeki noktaları tanımlamayı amaçlayan bir işlev olarak tanımlanabilir. Kenar algılama, basitleştirilmiş bir görüntü elde etmek için kullanışlı, düşük seviyeli bir görüntü işleme şeklidir (Danahy, 2006), İşlenecek

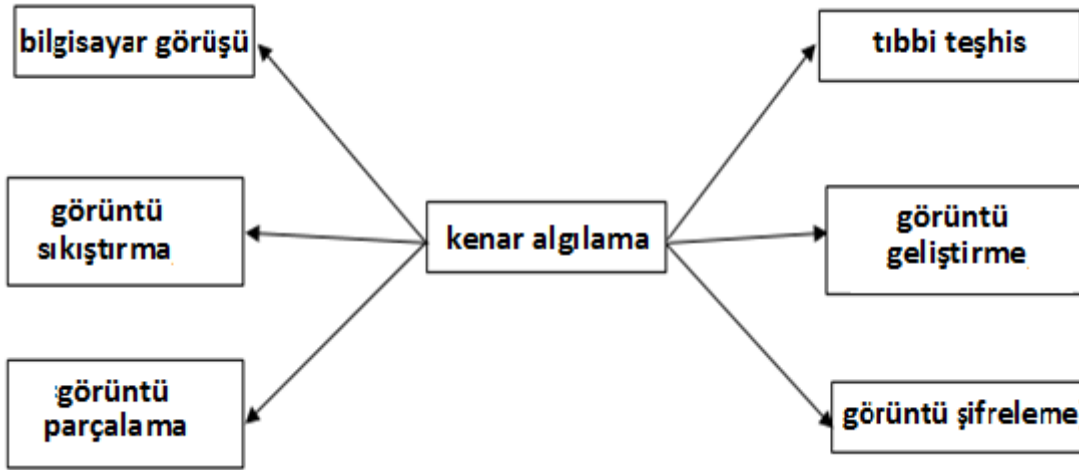
veri miktarını büyük ölçüde azaltarak ve aynı zamanda nesne sınırları ile ilgili yararlı yapısal bilgileri koruyarak görüntü analizini basitleştirir (Elmabrouk ve Aggoun, 2005)

Kenar algılama, gri tonlamalı bir görüntüyü ikili görüntüye dönüştüren, bir kenarın varlığını veya yokluğunu gösteren bir işlemdir (Jevtic vd., 2009) Daha spesifik olarak, kenar algılama, hangi piksellerin kenar pikselleri olduğunu belirleme işlemi olarak tanımlanabilir. Bir kenar algılamasının sonucu genellikle her bir orijinal pikselin kenar sınıflandırmasını ve büyüklük ve yönelim gibi olası kenar özniteliklerini açıklayan bir kenar haritasıdır. Geleneksel kenar algılama algoritması, giriş olarak gri tonlamalı bir görüntü alır ve bir kenar pikseli (edgel) işaretlendiğinde (örneğin, kenar haritasındaki değeri 255) ve kenar olmayan bir piksel işaretlenmediğinde ikili kenar haritası (BEM) üretir. (ör. Kenar haritasındaki değeri 0'dır).

Önemi nedeniyle, kenar saptama aktif bir araştırma alanı olmaya devam etmektedir ve araştırma alanı geçtiğimiz yıllarda çok dikkat çekmiştir. Bu, yıllar içinde önerilmiş olan birçok kenar tespit algoritmasıyla kanıtlanmıştır. Bu algoritmaların, uygun filtreler ve eşikler seçimi gibi çok çeşitli dış etkenlere bağlı olduğuna dikkat çekilmiştir. Dahası, bunlar sadece dijital görüntüler ile sınırlıdır. Diğer zorluk ise, tüm durumlarda (görüntülerde bulunan farklı görüntü ve sahneler) geçerli olan tek bir kenar algılama algoritması olmamasıdır. Literatürde önerilen çok sayıda kenar tespit algoritması olmasına rağmen, hala insan gözüne kıyastan çok uzaktırlar.

- **Kenar algılama uygulamaları**

Görüntü işleme, analiz, görüntü tanıma ve bilgisayarla görme uygulamaları gibi çok çeşitli uygulamalarda kenar algılama büyük önem taşımaktadır. Sınır çizgileri, bir görüntüdeki nesnenin en önemli özelliklerinden biri olarak kabul edilir. Birçok bilgisayarın görme uygulaması nesne ve şekil tanıma görevleri için sınır bilgilerine dayanır (Zhu vd., 1996).



Şekil 3.4. Kenar algılama uygulamalarından bazıları

Tespit edilen sınırlar, model eşleştirmesi için uygun bir takım özellikler sağladığından, nesne tespiti için kenar algılama kullanılmıştır, Şekil 3.4 göstermektedir. Günümüzde ise farklı şekillerde uygulanmaktadır. Görüntü parçalama gibi birçok uygulamada ön işlem olarak kullanılmaktadır.

Kenar algılama algoritmaları, işlenecek veri miktarını büyük ölçüde azaltabilir, alakasız verileri filtreleyebilir ve aynı zamanda işlenecek ilgili verileri koruyabilir. Kenar algılama algoritmalarının amacı, bir görüntüden daha fazla bilgi elde etmektir (Petrou ve Petrou, 2010). Kenarlar, tanıma nesneleri veya eşleme özellikleri olarak kullanılabilirken, resim düzenleme için de kullanılabilirler. Benzer bir nesne, kenar dedektörleri tarafından elde edilen kenar bilgisi sayesinde yeniden oluşturulabilir.

Kenar tespiti, medikal görüntülemelerde de önemlidir; burada vücut parçası tanıma ve manyetik rezonans anjiyografi (MRA) gibi tümör tanısı için kullanılmaktadır (Law ve Chung, 2007). Teşhis tespitinde ve özellik çıkarımında büyük önem taşır. Örneğin, tıbbi görüntülemelerde, kenarlar bir tümör ve ilgili diğer özellikleri temsil edebilir. Sınır özellikleri belirlendikten sonra, iç dokuları analiz etmek için yüksek dereceli yeniden kurma yöntemleri kullanılabilir (Saxena, 2008).

Aslında, örtüşen nesneler arasındaki sınırların belirlenmesi, çeşitli makinelerin tespit uygulamaları için doğru nesne tanımlama ve hassas hareket analizine olanak tanır. Bu ilk prosedür genellikle arka plandan izole edildikten sonra sahne elemanlarının alan,



parametreler ve şekil sınıflandırması gibi daha ileri hesaplamalarına yol açar. Kenar algılamayı kullanan algoritmaların örnekleri arasında eğri evrimini saptamak için kenar bilgisini kullanan yılanlar da vardır (Nercessian, 2009). Bu çalışmada Canny kenar tespiti üzerine odaklanılmıştır. Görsel servolama uygulamaları için kenar algılama, kullanışlı özelliklerin ortaya çıkarılmasına yardımcı olur.

- **Canny Kenar Algılama**

Canny kenar algılama, görüntü işlemedeki kenar dedektörlerden biridir. Canny kenar algılamanın ana amaçları üç ana şartta özetlenmiştir; iyi tespit, iyi lokalizasyon, minimal cevap.

Çizelge 3.2. Canny pseudocode

**Algoritma 2**

*I*: Giriş gri tonlamalı görüntü  
*sigma*: Gaussian  
*smoothing*: kernel  
*low Thresh*: Düşük gradyan eşiği  
*high Thresh*: Yüksek gradyan eşiği  
*S*: Düzeltilmiş görüntü  
*G*: Gradyan büyüklükleri  
*Dir*: Kenar yönergeleri  
*BEM*: İkili kenar haritası

**Canny (*l*, *sigma*, *lowThresh*, *highThresh*)**

1. *S* = Pürüzsüz Görüntü (*l*, *sigma*);
2. (*G*, *Dir*) = CGradient hesapla (*S*, Sobel);
3. *BEM* = Maksimum Olmayan Baskı(*G*, *Dir*);
4. Hysteresis (*BEM*, *lowThresh*, *highThresh*);
5. *BEM*'e Geridön;

**End-Canny**

Algoritmadan da görüldüğü gibi, Canny, 4 parametreyi, yani Gaussian yumuşatma çekirdeğinin sigma girişini, düşük ve yüksek gradyan eşik değerlerini alır ve 4 ana adımda kenar algılamayı gerçekleştirir. Aşağıda her adım kısaca vurgulanmıştır.

**Yumuşatma:** Bir I görüntüsü verildiğinde, görüntü önce bir Gauss çekirdeği tarafından belirli bir sigma ile düzeltilir çünkü Gaussian filtresi basit bir maske kullanılarak hesaplanabilir. Gaussian maskesinin genişliği ne kadar büyük olursa, dedektördeki gürültü de o kadar azalır. Bu adımın temel amacı, gürültüyü bastırmak ve görüntüden bazı gürültülü eserleri eksiltmektir.

**Gradyanın hesaplanması:** Bir sonraki aşama, gradyan büyüklüğünü ve yönlerini belirlemeyi içerir. Gradyan büyüklüğü ve yönleri, düzeltilmiş görüntü (S) üzerinde hesaplanmaktadır. Prewitt, Sobel ve Scharr operatörleri gibi iyi bilinen operatörler bu aşamada kullanılabilir. Sobel operatörü bir çift ( $3 \times 3$ ) sarım maskesi kullanır; biri de c-doğrultusundaki (sütunlar) gradyanı tahmin eder ve diğeri de gradyanı r-yönünde (satırlar) tahmin eder. Bunlar aşağıda Çizelge 3.3'de gösterilmiştir:

|    |    |    |    |   |    |
|----|----|----|----|---|----|
| +1 | +2 | +1 | -1 | 0 | +1 |
| 0  | 0  | 0  | -2 | 0 | +2 |
| -1 | -2 | -1 | -1 | 0 | +1 |

(a)                      (b)

Çizelge 3.3. Görüntü gradyanı (a) sütunlara yönünde  $G_r$  (b) satırlara yönünde  $G_c$

Gradyanın büyüklüğü veya kenar kuvveti daha sonra yaklaşık olarak şu şekilde tahmin edilir:

$$G = |g_r| + |g_c| \quad (3.8)$$

**Maksimal olmayan baskı:** Bu aşamada, sadece yerel maksimumlar kenarlar olarak işaretlenir. Kenarlar, gradyan büyüklüğü, onun gradyan yönündeki komşularından daha büyükse, bir pikselin kenar üzerinde olduğu düşünülen azami süpresim olarak bilinen bir yöntemle hesaplanır. Bu aşamada, sadece yerel maksimumlar kenar olarak işaretlenir. Kenarlar, maksimum olmayan baskı olarak bilinen bir yöntemle hesaplanır. Örneğin, belirli bir pikselin gradyan yönü 90 dereceyse, o zaman kuzey ve güneyindeki pikseller onunla karşılaştırılır. Geçerli pikselin gradyan büyüklüğü her iki komşundan daha yüksekse, mevcut

pikselin olası bir kenar olduğu belirtilir. Aksi halde piksel ortadan kaldırılır ve kenar olarak kabul edilmez. Bu, çıktı görüntüsünde ince bir çizgi verecektir. Bu adımın sonunda beyaz piksellerin, maksimum baskılama işleminden kurtulan pikseller olduğu bir ikili kenar haritası elde edilir.

**Histerezis:** Bu, gerçek kenarları tutmayı ve ikili kenar haritasında (BEM) yanlış olanları elemeyi amaçlayan son adımdır. Bir alt ve bir üst olmak üzere iki eşik kullanır. Gradyan büyüklüğünün alt eşikten daha küçük olduğu kenarlar elimine edilir. Daha yüksek ve daha düşük eşik arasında yer alan kenarlar zayıf kenar olarak kabul edilirler ve sadece güçlü kenarlara bağlanmışlarsa hayatta kalırlar. Aksi halde zayıf kenarlar yanlış tespit olarak ortadan kaldırılır.

Gerçek görüntü uygulamasındaki kenar algılama işleminde birçok zorluk vardır. Kenar gruplarının arasında gürültü, karışma, parazit veya bir kılavuzun kullanımından kaynaklanan süreksizlikler ve boşluklar vardır. Bu ise kenarlarda eksilik, yanlış tespit ve hatalarla sonuçlanır. Böylece kenar bağlama ihtiyacı, genellikle kenarlar, katılsız kenarlar ve gürültülü çentik benzeri yapılar, düzensiz ve çoklu piksel geniş kenar oluşumları arasında eksiklikler oluşur.

- **Sobel kenar dedektörü**

Sobel kenar dedektörü, gradyan tabanlı bir yöntemdir. Birinci mertebeden türevlerle çalışır. X ve Y eksenleri için görüntünün ilk türevlerini ayrı ayrı hesaplar. Türevler sadece yaklaşık değerlerdir, çünkü görüntüler sürekli değildir. Yaklaşık olarak  $3 \times 3$  kernel çifti, sarım için kullanılır Çizelge 3.4 gibi.

|    |   |   |    |    |    |
|----|---|---|----|----|----|
| -1 | 0 | 1 | -1 | -2 | -1 |
| -2 | 0 | 2 | 0  | 0  | 0  |
| -1 | 0 | 1 | 1  | 2  | 1  |

(a)

(b)

Çizelge 3.4.  $3 \times 3$  Kernel (a) Sütunlara Yönünde  $K_x$  (b) Satırlara Yönünde  $K_y$

İlk maskeyi görüntüye uyguladığımızda, dikey kenarları ön plana çıkarır. Basitçe birinci dereceden türev gibi çalışır ve bir kenar bölgesindeki piksel yoğunluklarının farkını hesaplar. Merkez sütun sıfır olduğundan, görüntünün orijinal değerlerini içermez, aksine bu kenardaki sağ ve sol piksel değerlerinin farkını hesaplar. Ayrıca, hem birinci hem de üçüncü sütunun merkezi değerleri sırasıyla 2 ve -2'dir. Bu, kenar bölgesinin etrafındaki piksel değerlerine daha fazla ağırlık verir, kenar yoğunluğunu artırır ve orijinal görüntüyle karşılaştırmalı olarak geliştirilir.

İkinci maske, bir görüntüdeki yatay kenarları belirler. Ayrıca, yukarıdaki maskenin prensibiyle çalışır ve belirli bir kenarın piksel yoğunlukları arasındaki farkı hesaplar. Maskenin merkez satırı sıfırdan oluştuğu için, görüntüdeki kenarın orijinal değerlerini içermez, aksine belirli kenardaki piksel yoğunluklarının üstündeki ve altındaki farkları hesaplar. Böylece, ani yoğunluk değişimlerini artırır ve kenarı daha görünür hale getirir. Maskeye daha fazla ağırlık aldığında daha fazla kenar elde edilir.

Bu çekirdekler, dikey ve yatay olarak çalışan kenarlara maksimum olarak, iki dikey yönelimin her biri için bir çekirdek olan piksel ızgarasına göre tepki vermek üzere tasarlanmıştır. Çekirdekler, her bir gradyanlar yönündeki gradyan bileşeninin ayrı ölçümlerini üretmek için giriş görüntüsüne ayrı olarak uygulanabilir, Bunlar daha sonra her noktada gradyanın mutlak büyüklüğünü ve bu gradyanın oryantasyonunu bulmak için bir araya getirilebilirler.

Çizelge 3.5. Sobel Detektörü Pseudocode

### **Algoritma 3**

*I*: gri tonlamalı görüntüyü gir

#### **SobelDetector(I,kx,ky)**

1. Örnek giriş *I* görüntüsünü yükle.
2. Verilen görüntüde maskeleme yap.
3. Algoritma ve gradyanı uygula.
4. Giriş görüntüsünde her iki yönde de maske manipülasyonu gerçekleştir(kx,ky).
5. Degradenin mutlak büyüklüğünü bul.
6. Kenara Geridön

**End**

- **Kenar bağlama**

Kenar bağlama işlemi, sıralı bir kenar listesi oluşturmak için bir kenar algılayıcısı tarafından girdi olarak üretilen sıralanmamış kenar piksellerini alır (Nagabhushana, 2010). Nesne sınırlarını çıkarması beklenen ortak kenar dedektörleri, yüksek kısıtlı ortamlarda elde edilen görüntüler haricinde, farklılaştırma işlemlerinden ve görüntülerde yer alan gürültüden kaynaklanan sorunlardan dolayı zorluk çeker (Zhu vd., 1996). İlk kenar bilgisi tamamlamak için ek kenar bağlama adımı gereklidir. Kenar bağlama, büyük önem taşır ve sahte kenarların ortadan kaldırılmasında ve eksik parçaların eklenmesinde önemli bir rol oynar.

Konvansiyonel kenar algılama algoritmaları her zaman kenarların eksik kısımlarına ve eklenmiş sahte kenarlara neden olur (Jevtic vd., 2009), Kısmi türevlere dayanan verimli kenar operatörleri sürekli kenar haritaları üretemezler.

Geleneksel kenar algılama algoritmaları kenarları tespit etmek için bir eşik ve bazı filtreler kullanır, sonuç olarak bundan sonra üretilen kenar haritaları, gerçek bir ilişki ve bağlantı olmaksızın bireysel kenar piksellerinden oluşur (Topal vd., 2010). Bazı kenar algılama algoritmaları global bir eşik kullanır, global eşik görüntüyü ikili bir görüntüye dönüştürür; bununla birlikte, bu, düşük kontrastlı bölgelerde ince kenarların çıkarılmasıyla sonuçlanır. Sonuç olarak, kenarlar kırılacak ve önemli kenarlar kaybolacaktır.

Sobel'a (1968) veya Canny'a (1986) göre geleneksel kenar dedektörleri yerel gradyan operatörlerini kullanır ve zaman zaman gürültü giderme için ek yumuşatma ile bazı önemli kenarlar gürültü olarak kabul edilebilir ve bu nedenle atılır. Kapalı çevreleri kurtarmak için farklı teknikler kullanılmıştır. Kenar bağlama yöntemleri iki ana kategoride sınıflandırılabilir: (1) yerel kenar bağlama, (2) küresel kenar bağlama. Başka bir grup, bölgesel bağlantı olarak adlandırılan üçüncü birisini ekleyerek üç kategoriye ayırır (Gonzalez ve Woods, 2011).

## 3.2 Endüstriyel Robot Kol Prototipi

### 3.2.1. Robot Kolu UR5

Robot UR5, piyasada sadece üç ürüne sahip bir Danimarka şirketi olan Universal Robots Company'nin bir ürünüdür.

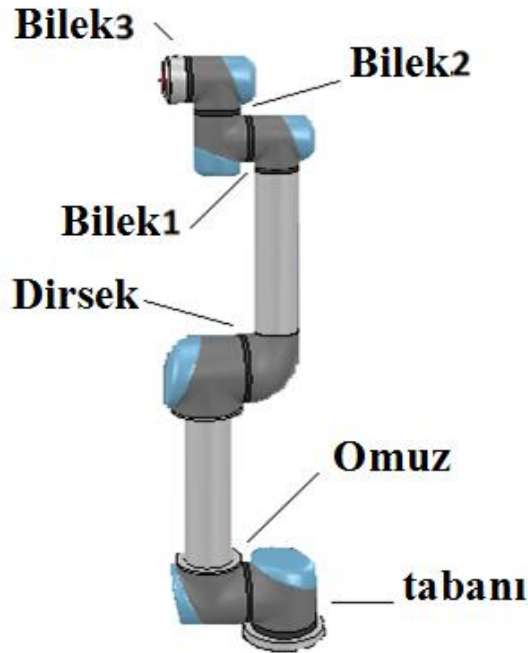
Çizelge 3.6. (a-b)UR5 robotu özellikler

|                               |                                                                          |
|-------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| Ağırlık                       | 18,4 kg / 40,6 lbs                                                       |
| Yük kapasitesi                | 5 kg / 11 lbs                                                            |
| Erişim                        | 850 mm / 33,5 inç                                                        |
| Ortak aralıklar               | +/- 360 °                                                                |
| Hız                           | Tüm eklemler: 180 ° / s. Araç: Tipik 1 m / s. / 39.4 in / s.             |
| Tekrarlanabilirlik            | +/- 0.1 mm / +/- 0.0039 in (4 mils)                                      |
| Ayak izi                      | Ø149 mm / 5.9 in                                                         |
| Serbestlik Dereceleri         | 6 dönen eklemler                                                         |
| Kontrol kutusu boyutu (WxHxD) | 475 mm x 423 mm x 268 mm / 18,7 x 16,7 x 10,6 inç                        |
| G / Ç güç kaynağı             | Kontrol kutusunda 24 V 2A ve alette 12 V / 24 V 600 mA                   |
| İletişim                      | TCP / IP 100 Mbit: IEEE 802.3u, 100BASE-TX Ethernet soketi ve Modbus TCP |
| Programlama                   | Montajlı 12 inç dokunmatik ekranda Polyscope grafik kullanıcı arayüzü    |
| Gürültü                       | Nispeten gürültüsüz                                                      |
| IP sınıflandırması            | IP54                                                                     |
| Güç tüketimi                  | Tipik bir program kullanarak yaklaşık 200 watt                           |
| İşbirliği operasyonu          | EN ISO 10218-1: 2006'nın 5.10.1 ve 5.10.5'e göre test edilmiştir.        |
| Malzemeler                    | Alüminyum, PP plastik                                                    |
| Sıcaklık                      | Robot 0-50 ° C sıcaklık aralığında çalışabilir                           |
| Güç kaynağı                   | 100-240 VAC, 50-60 Hz                                                    |
| Hesaplanan kullanım ömrü      | 35.000 saat                                                              |
| Kablolama 1                   | Robot ve kontrol kutusu arasındaki kablo (6 m / 236 inç)                 |
| Kablolama 2                   | Dokunmatik ekran ve kontrol kutusu arasındaki kablo (4,5 m / 177 inç)    |

UR5, Universal Robots'un UR3 ve UR10 ile geliştirilen üç farklı robotundan biridir. Şirkete göre, robotlarının temel avantajları ve yararları, kullanımı kolay, kolay programlanabilen, güvenli ve hafif olması, özellikle UR5'in esnek olması ve 5 kg'lık yüklerle tekrarlanan ve tehlikeli görevleri otomatikleştirebilmesidir. Toplama, yerleştirme ve test etme gibi düşük ağırlıklı işbirlikçi süreçleri optimize etmek için idealdir (Universal Robots, 2017). UR5, 5 tane ile sınırlıdır UR10, büyüklük ve kapasite bakımından daha büyüktür, aynı zamanda maksimum on kilogramı idare edebilir. Bu durum, çoğunlukla araştırma ortamında birçok robot arasında UR5'e avantaj sağlar. Bu robotun özellikleri ve performansı aşağıdaki Çizelge 'de gösterilmiştir.

### 3.2.2. Robotun Geometrisi

Boyutlar Şekil 3.5'te gösterilmiştir. UR5, 6DoF robotik kolu, tüm bağlantılarını bağlayan altı adet döner bağlantıdan oluşur; eklemlerin adı, ilk üç için taban, omuz, dirsek, son üç için ise bilek1, bilek2 ve bilek3 olarak adlandırılacaktır. Omuz ve dirsek eklemleri, taban eklemlerine dik olarak dönmektedir ve bu iki eklem uzun bir bağlantı ile bağlanmıştır, böylece robotun uzun bir çalışma alanı vardır, aynı şekilde uzun bir bağlantı dirseği ve bilek 1 arasında aynı şekilde büyük bir çalışma alanı vardır.



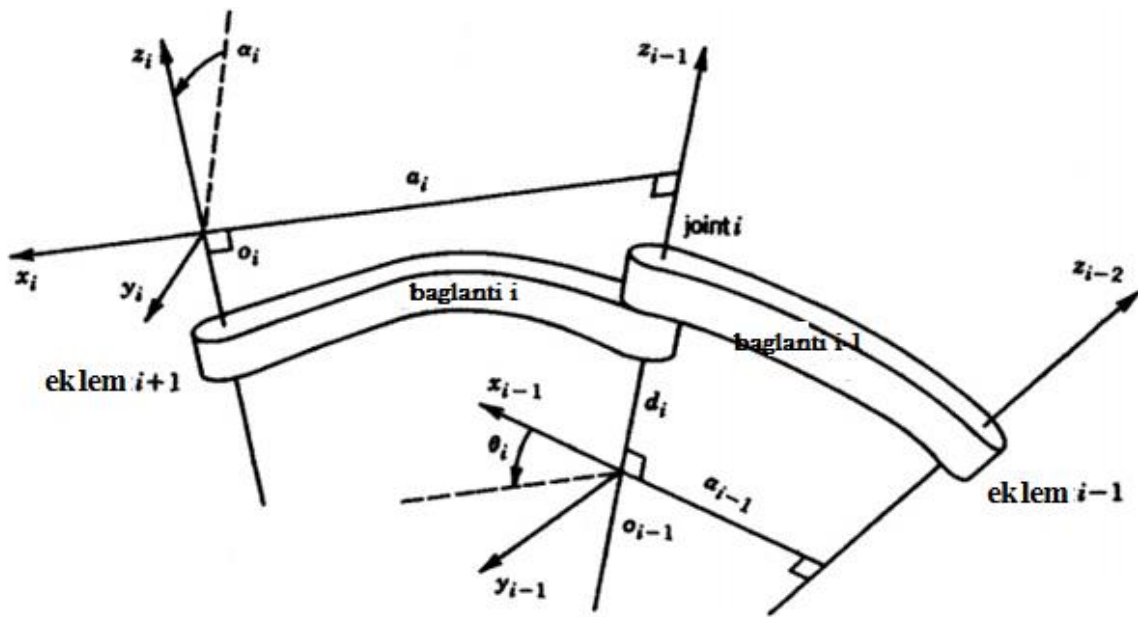
Şekil 3.5. UR5 robotu Model

Üç bilek eklemi temel olarak doğru oryantasyonda Aracı Merkezi Noktası (TCP) olarak adlandırılan manevraları hareket ettirir. Benzer düzenlerdeki 6 DoF'a sahip robotik sistemlerin çoğunun genellikle üç adet döner eklem yerine küresel bir mafsal kullandığı görülmektedir.

### 3.2.3. Kinematik Analiz

Nesneye neden olan kuvvetleri dikkate almadan özneye davranan hareket bilimi olarak tanımlanan kinematik, manipülatörlerin kinematiği çalışması, hareketin tüm geometrik ve zamana dayalı özelliklerini ifade eder (Craig, 2005). Bu hareketler, onları oluşturan kuvvetler ve torklar arasındaki ilişkiler, burada bizim kapsamımız altında olmayan dinamik problemlere tabidir. UR5 robotunun karmaşık geometrisini ele almamız için, mekanizma sisteminin tüm parçalarına koordinat çerçevesi atar ve daha sonra atanan koordinat çerçevesi arasındaki ilişkileri inceleriz.

Her bir bağlantı bir koordinat çerçevesine atanır. Şekil 3.6, çerçevelerin bağlantılara nasıl eklendiğine dair bir hatırlatma görevi görür, her bir birleşim Denavit-Hartenberg notasyonu kullanılarak bir koordinat çerçevesine atanır.



Şekil 3.6. Denavit-Hartenberg Notasyonu (Spong ve Vidyasagar, 2008)



Bağlantı parametreleri aşağıdaki uzaklık ve açı ölçümlerini sağlayacak şekilde atanır. UR5 robotunun parametreleri Tablo 3.7'den gösterilmiştir.

$a_i$  öyle ki  $X_i$ 'ye göre  $Z_i$ 'den  $Z_{i+1}$ 'e ölçülen mesafe

$\alpha_i$  öyle ki  $X_i$ 'ye göre  $Z_i$ 'den  $Z_{i+1}$ 'e ölçülen açı

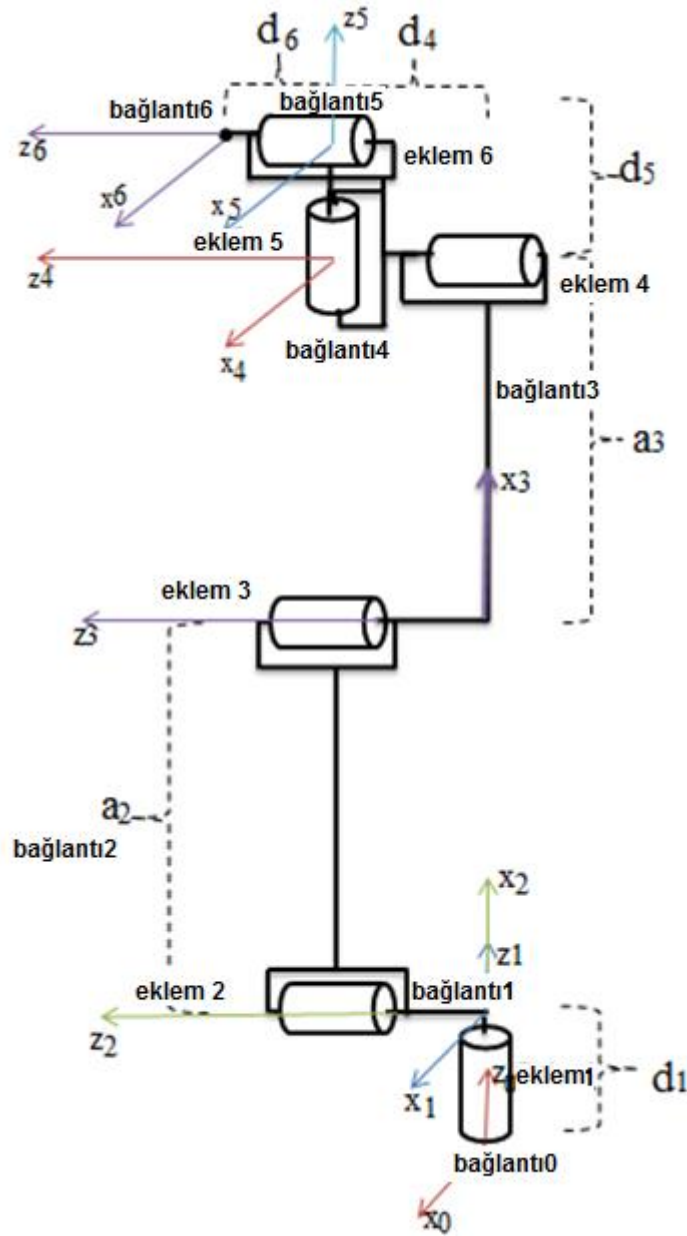
$d_i$  öyle ki  $Z_i$ 'ye göre  $X_{i-1}$ 'den  $X_i$ 'ye ölçülen mesafe

$\theta_i$  öyle ki  $Z_i$ 'ye göre  $X_{i-1}$ 'den  $X_i$ 'ye ölçülen olan açı

Çizelge 3.7. UR5 için DH Parametreleri ve Ölçümü

| $i$ | $a_i$   | $\alpha_i$ | $d_i$   | $\theta_i$ |
|-----|---------|------------|---------|------------|
| 0   | 0       | 0          | -       | -          |
| 1   | 0       | $\pi/2$    | 0.08916 | $\theta_1$ |
| 2   | 0.425   | 0          | 0       | $\theta_2$ |
| 3   | 0.39225 | 0          | 0       | $\theta_3$ |
| 4   | 0       | $\pi/2$    | 0.10915 | $\theta_4$ |
| 5   | 0       | $-\pi/2$   | 0.09456 | $\theta_5$ |
| 6   | -       | -          | 0.0823  | $\theta_6$ |

Şekil 3.7'de, her bir ekleme ayrılan çerçeve ile robot kolunun çizimi vardır. Kinematik parametreler ve kinematik matrisler, taban bağlantısı 0'a göre herhangi bir bağlantının pozisyonu ve yönelimi için dönüşüm sağlayan tahsis edilmiş çerçevelere dayanmaktadır. UR5 robot kolunun DH parametreleri Çizelge 3.7'de verilmiştir. Burada kullanacağımız DH parametreleri ve ölçümleri birçok araştırma ve modelde en çok bilinenlerdir (Spong ve Vidyasagar, 2008; Craig, 2005).



Şekil 3.7. Robot eklem çerçeve paylaşım

- **İleri kinematik:**

İleri kinematik, robot denklemlerini eklem uzayından kartezyen uzayına eşler. Robot son efektörü için kartezyen alan tanımlanır ve bu, tutucunun Kartezyen pozisyonudur. Çerçeveden çerçeveye ilişkin homojen dönüşüm şöyledir:

$$T_i^{i-1} = \begin{bmatrix} R_i^{i-1} & P_i^{i-1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Xx & Yx & Zx & (P_i^{i-1})_x \\ Xy & Yy & Zy & (P_i^{i-1})_y \\ Xz & Yz & Zz & (P_i^{i-1})_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Matrisin elemanları, DH parametrelerinin fonksiyonları olduğunda :

$$\begin{bmatrix} Xx \\ Xy \\ Xz \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\theta_1 c\theta_{234} c\theta_5 c\theta_6 + s\theta_1 s\theta_5 c\theta_6 - c\theta_1 s\theta_{234} s\theta_6 \\ s\theta_1 c\theta_{123} c\theta_5 c\theta_6 - s - c\theta_1 s\theta_5 c\theta_6 - s\theta_1 s\theta_{234} s\theta_6 \\ s\theta_{234} c\theta_5 c\theta_6 + c\theta_{234} s\theta_6 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

$$\begin{bmatrix} Yx \\ Yy \\ Yz \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -c\theta_1 c\theta_{234} c\theta_5 s\theta_6 - s\theta_1 s\theta_5 c\theta_6 - c\theta_1 s\theta_{234} s\theta_6 \\ -s\theta_1 c\theta_{123} c\theta_5 s\theta_6 + c\theta_1 s\theta_5 s\theta_6 - s\theta_1 s\theta_{234} s\theta_6 \\ -s\theta_{234} c\theta_5 s\theta_6 + c\theta_{234} c\theta_6 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$\begin{bmatrix} Zx \\ Zy \\ Zz \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -c\theta_1 c\theta_{234} s\theta_5 + s\theta_1 c\theta_5 \\ -s\theta_1 c\theta_{234} s\theta_5 - c\theta_1 c\theta_5 \\ -s\theta_{234} s\theta_5 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

$$\begin{bmatrix} (P_i^{i-1})_x \\ (P_i^{i-1})_y \\ (P_i^{i-1})_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\theta_1 c\theta_2 a_2 + c\theta_1 c\theta_{23} a_3 + s\theta_1 d_4 + c\theta_1 s\theta_{234} d_5 + (-c\theta_1 c\theta_{234} s\theta_5 + s\theta_1 c\theta_5) d_6 \\ s\theta_1 c\theta_2 a_2 + s\theta_1 c\theta_{23} a_3 - s\theta_1 d_4 + s\theta_1 c\theta_{234} d_5 - (s\theta_1 c\theta_{234} s\theta_5 + c\theta_1 c\theta_5) d_6 \\ d_6 + s\theta_2 a_2 + s\theta_{23} a_3 - c\theta_{234} d_5 - s\theta_{234} s\theta_5 d_6 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Homojen dönüşüm, koordinat çerçevesi i-1'den çerçeve i'ye dönüşümü ve rotasyondan oluşur.  $P_i^{i-1}$ , atalet veya taban çerçevesi ve  $3 \times 3$  rotasyon matrisine göre son efektör veya kavrayıcının pozisyonunu ve yönünü ifade eden üç vektördür. UR5 robotunun DH parametresinden homojen dönüşüm aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$${}^{1-1}_i T = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1}d_i \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1}d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

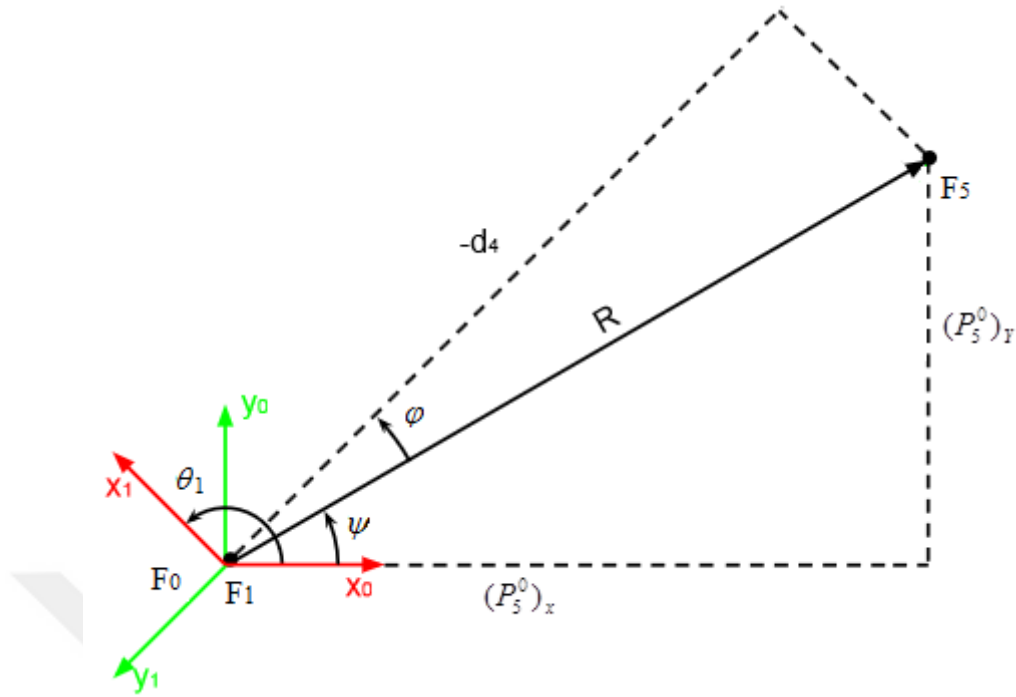
Herhangi bir n-DoF robotu için, tabandan son efektöre eklenen homojen dönüşüm, sistemdeki tüm dönüşümlerin bir ürünü olarak tanımlanır, 6-DOF UR5 robotu için tabandan uç noktaya dönüşüm şu şekilde elde edilir:

$$T_6^0(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6) = T_1^0(\theta_1)T_2^1(\theta_2)T_3^2(\theta_3)T_4^3(\theta_4)T_5^4(\theta_5)T_6^5(\theta_6) \quad (3.15)$$

- **Ters kinematik**

Ters kinematik problemi doğrudan kinematiğin zıttıdır ve başa çıkılması daha zordur. Bu sorun, UR5 ve genel olarak tüm yüksek DoF'lar için daha zor hale gelmektedir. İleri konfigürasyon için sadece tek bir çözüm vardır, ters kinematik için ise aynı kartezyen koordinatlarla sekiz farklı çözüm vardır. Bu çalışmada, tekrarlı teknikler üzerinde kapalı form çözümleri kullanmayı tercih ediyoruz ve eğer kapalı formlu bir ortak çözüm varsa, birden fazla çözümden uygun olanı seçilebilir. Bilinmeyen eklemler, arctan fonksiyonuyla hesaplanabiliyorsa, ortak çözümün “kapalı biçim” olduğu söylenilebilir [93]. Tüm olası çözümlerin ortak konfigürasyon seti (eklemlerin toplamı), Hawkins ve Ryan (2013)'den kabul edilen ters kinematik ile bulunmuştur.

İlk olarak,  $\theta_1$  eklemini buluruz. 6. eklemin yeri, 5. koordinat çerçevesinin taban koordinat çerçevesine göre konumunu verir. Son efektörün kartezyen koordinatlarını bildiğimiz için, 5. koordinat çerçevesi ile ilişkisini anlayabiliriz (Şekil 3.8). Robotun geometrisini göz önünde bulundurarak ve Şekil 3.8, x-y düzlemine bakarak, robotun üstten bir görünümünü analiz edip  $\theta_1$ 'i bulabiliriz.



Şekil 3.8. Beşinci çerçeveye göre ilk eklem geometrisi

Yukarıdaki geometriden:  $\theta_1 = \psi + \varphi + \pi/2$

$$\tan \psi = \frac{(P_5^0)_y}{(P_5^0)_x} \quad (3.16)$$

$$\cos \varphi = \frac{d_4}{D} ; D = \sqrt{(P_5^0)_x^2 + (P_5^0)_y^2} \quad (3.17)$$

$$\theta_1 = a \tan \frac{(P_5^0)_y}{(P_5^0)_x} \pm a \cos \frac{d_4}{\sqrt{(P_5^0)_x^2 + (P_5^0)_y^2}} + \pi/2 \quad (3.18)$$

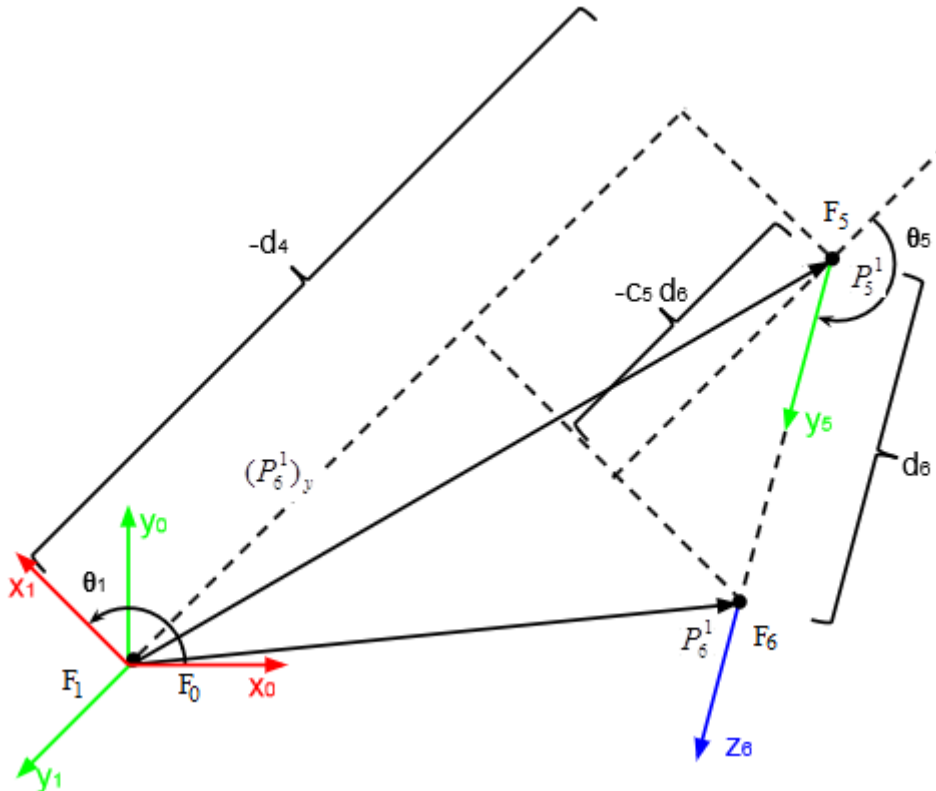
Robotun omzuna “sağ” veya “sol” olan karşılık gelen eklem1 için iki farklı çözüme sahip olacağımız açıktır. Yukarıdaki denklemden, sıfıra eşit olan için herhangi bir konfigürasyonun olamayacağını görürüz.

Elimizde  $\theta_1$  değeri varken  $\theta_5$ 'i çözebiliriz. Çerçeveden çerçeveye dönüşümleri kullanarak, denklem (3.15) ile çerçeve 1'den kare 6'ya olan dönüşümü hesaplarız, bu da 4x4 matrisini aşağıdaki gibi sonuçlandırır:

$$(T_1^0)^{-1}T_6^0 = (T_1^0)^{-1}T_1^0T_2^1T_3^2T_4^3T_5^4T_6^5 \quad (3.19)$$

Son sütunun ilk üç unsurunu bıraktığımızda; Her iki tarafın (1, 4), (2, 4), (3, 4) 'ü sırasıyla eşit olacaktır ve y-koordinatındaki 6. Çerçevenin  $P_6^1$  değeri:

$$P_6^1 = \begin{bmatrix} -s1 & c1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} = p_x(-s1) + p_y(c1) \quad (3.20)$$



Şekil 3.9. Birinci. ve 6. Çerçevelere göre Beşinci Eklem Geometrisi (Hawkins; Ryan, 2013).

Robotun geometri perspektifini gösteren Şekil 3.9'dan,  $P_6^1$  noktasının y koordinatını çıkarabiliriz.

$$(P_6^1)_y = -d4 - c5d6 \quad (3.21)$$

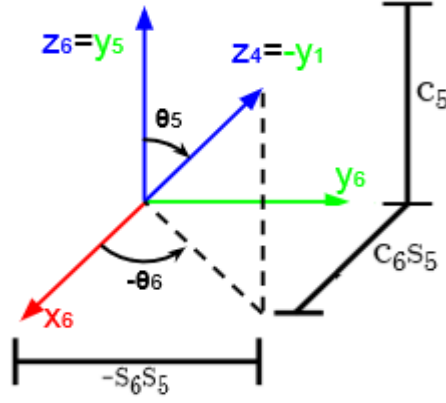
$$\theta_5 = \pm a \cos \frac{p_x s1 - p_y c1 - d4}{d6} \quad (3.22)$$

Robotun “in / down”(içeri/aşağı) veya “out / up”(dışarı/yukarı) bileklerine karşılık gelen  $\theta_5$  için iki farklı yapılandırma olacaktır. 5. ekleme bildiğimizde, 6. eklemi bulabilmek için Hawkins (2013) göre yapabiliriz, 6. eklem için çözülecek bir sistem önermektedir.  $y_1^6$  (vektör  $y_1$ , 6. Ekleme göre) koordinat eksenine bakarsak:

$$y_1^6 = \begin{bmatrix} -x_x s1 + x_y c1 \\ -y_x s1 + y_y c1 \\ -z_x s1 + z_y c1 \end{bmatrix} \text{ ve } y_1^6 = \begin{bmatrix} -c6s5 \\ s6s5 \\ -c5 \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

Yukarıdaki eşitlik,  $-y_1^6$  vektörünün  $\theta_6$  azimut açısı ve  $\theta_5$ 'in Şekil 3.10'daki kutup açısı olduğu için küresel bir koordinat ifadesi oluşturur. Bu vektörün x ve y koordinatları, kolayca çözülebilen bir sistem oluşturur:

$$\theta_6 = a \tan 2 \left( \frac{-y_x s1 + y_y c1}{s5}, \frac{-(-x_x s1 + x_y c1)}{s5} \right) \quad (3.24)$$



Şekil 3.10. Beşinci Eklem ile İlgili Altıncı Eklem Geometrisi

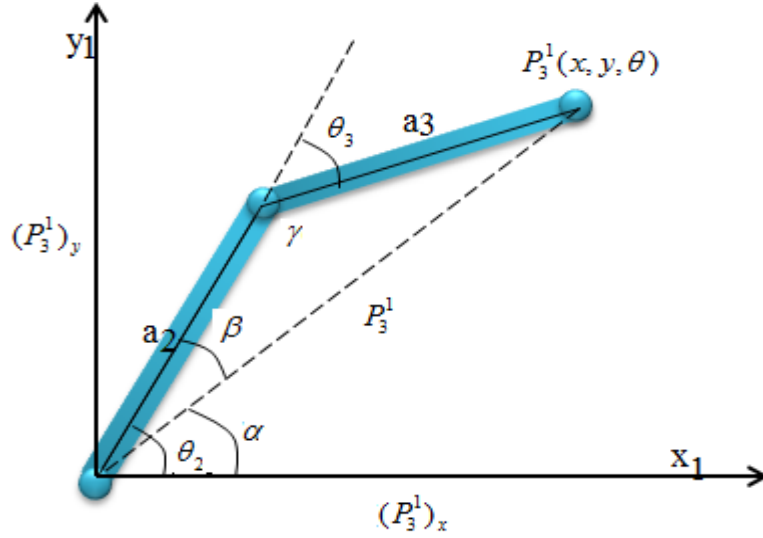
Son 3 eklem 3-RRR düzlemsel bir kol gibi davranır, eklem konfigürasyonu kapalı formulu bir çözümden ve aşağıdaki 2RR'nin geometrik özelliklerinden türetilebilir. İlk üç karenin Şekil 3.11'i ikinci ve üçüncü eklemleri bulmamıza yardımcı olacaktır, üçüncü karede bulunan bir  $P_3^1$  noktası x-koordinatındaki  $(P_3^1)_x$  ve y-koordinatındaki  $(P_3^1)_y$  ile tanımlanır, burada  $\cos(\gamma)$  eşittir  $\cos(\theta_3)$

$$(P_3^1)_x^2 + (P_3^1)_y^2 = a_2^2 + a_3^2 + 2a_2a_3 \cos(\theta_3) \quad (3.25)$$

$$\theta_3 = \pm \arccos \left( \frac{(P_3^1)_x^2 + (P_3^1)_y^2 - a_2^2 - a_3^2}{2a_2a_3} \right) \quad (3.26)$$

İkinci ve üçüncü eklemler için iki farklı olası konfigürasyon olacaktır, bu çözümler “elbow up” (dirsek yukarı) ve “elbow down.”(dirsek aşağı) olarak bilinir.





Şekil 3.11. Üçüncü Eklem ile İlgili İkinci Eklem Geometrisi

Şekli 3.11 kullanarak ve Önceki geometrilere göre aynı çerçeve yönelimini göz önünde bulundurarak.

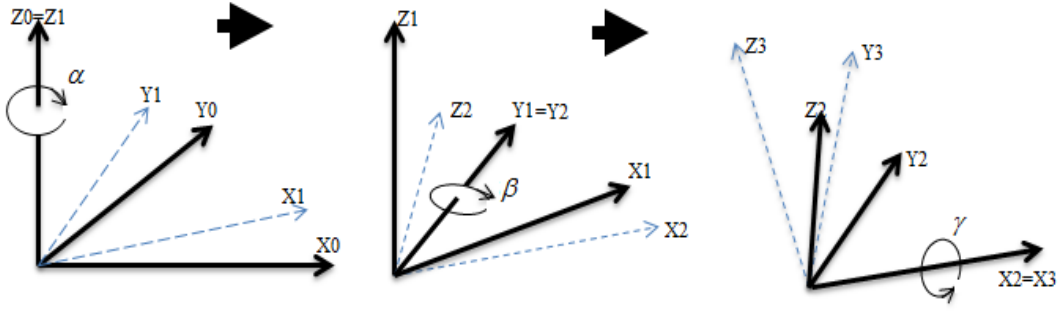
$$\theta_2 = -\arctan \frac{(P_3^1)_y}{-(P_3^1)_x} + \arcsin \frac{a_3 \sin(\theta_3)}{\sqrt{(P_3^1)_x^2 + (P_3^1)_y^2}} \quad (3.27)$$

Dördüncü eklem, (3.14) ve (3.15) denklemleri ve üçüncü eklemden dördüncü kareye dönüşümü kullanılarak hesaplanır, ilk sütunu kullanılarak dördüncü eklemi şu şekilde elde ederiz:

$$\theta_4 = a \tan 2(x_y, x_x) \quad (3.28)$$

- **Uç eyleyici yönelimi**

Uç eyleyici yönünü tanımlamak için birkaç yöntem vardır. Örneğin, uç eyleyici matrisini tanımlayan homojen matrisinin T kullanımı. En bilinen ve en çok kullanılan yöntem, x, y, z eksenleri ile ilgili son-efektör pozisyonundaki dönüşler için  $\alpha$ ,  $\beta$  ve  $\gamma$  olarak gösterilen rulo-pitch-yaw açılarını kullanmaktır. Şekil 3.12, 3 boyutlu çalışma alanında son efektörün Euler dönüşümünü göstermektedir.



Şekil 3.12. Son efektör Euler dönüşümü.

Bir açı  $\alpha$  'nın  $z_0$  dönüşü artı bir açı  $y_1$  'in yaklaşık 1 'lik dönüşü ve ardından bir açı  $\gamma$  'nin yaklaşık 2 'lik bir dönüşü, ZYX Euler açılarını veren genel bir dönüş matrisini üretir.

$$R = \begin{bmatrix} c\alpha & -s\alpha & 0 \\ s\alpha & c\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} c\beta & 0 & s\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\beta & 0 & c\beta \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\gamma & -s\gamma \\ 0 & s\gamma & c\gamma \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

$$R = \begin{bmatrix} c\alpha c\beta & c\alpha s\beta s\gamma - s\alpha c\gamma & c\alpha s\beta c\gamma + s\alpha s\gamma \\ s\alpha c\beta & s\alpha s\beta s\gamma + c\alpha c\gamma & s\alpha s\beta c\gamma - c\alpha s\gamma \\ -s\beta & c\beta s\gamma & c\beta c\gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

Yukarıdaki dönüşüm denkleminde ve  $r_{11}$  ve  $r_{22}$ 'nin sıfıra eşit olmadığından, genel bir durum için Euler ZYX açılarını hesaplayabiliriz:

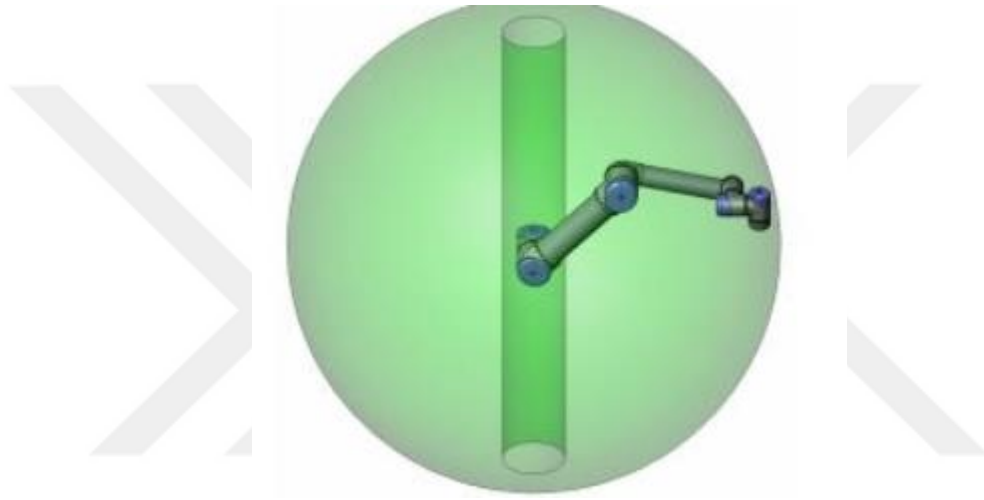
$$\alpha = a \tan 2(r_{21}, r_{11}) \quad (3.31)$$

$$\beta = a \tan 2(-r_{31}, \sqrt{r_{11}^2 + r_{21}^2}) \quad (3.32)$$

$$\gamma = a \tan 2(-r_{32}, r_{33}) \quad (3.33)$$

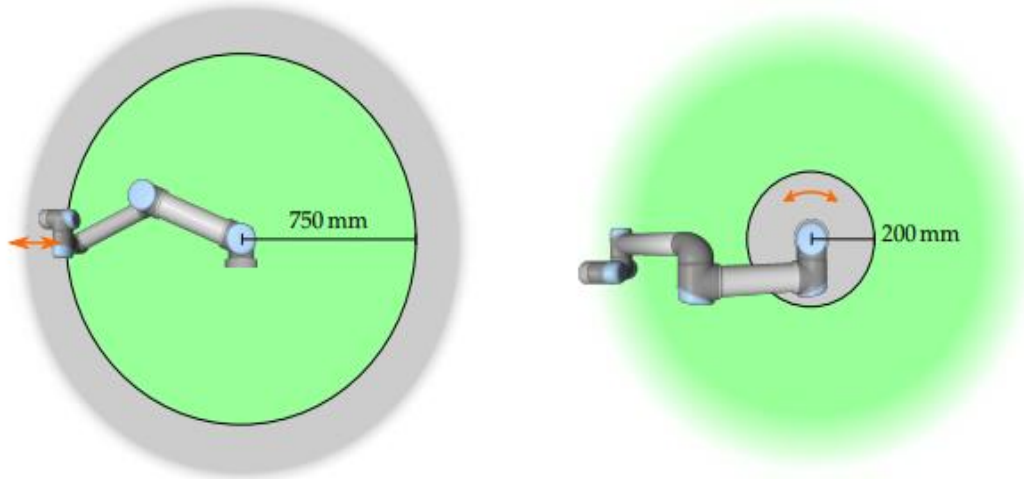
### 3.2.4 UR5 Çalışma Uzayı

UR5 robotik kolunun diğer robotlarla karşılaştırıldığında faydalarından biri de çalışma uzayıdır. UR5, bir kutu alanıyla sınırlı değil, daha ileriye uzanabilir. Şekil3.13'te UR5'in çalışma uzayı tasvir edilmiştir. Yeşil alan, TCP'nin ulaşabileceği alandır. Kürenin dış çapı 1,7 m'dir ve ulaşamayan silindirin çapı 0,3 m'dir. Ancak ulaşamayan konfigürasyonlar da vardır. Bazı konumlarda robot (yakın) -tekil konfigürasyondan etkilenecektir. Ayrıca robotik kol kendisi veya çevre ile çarpışabilir.



Şekil 3.13. UR5'in Çalışma Alanı

Robot tekil bir konfigürasyonda olduğunda, istenilen yörüngeyi takip edemez. Bu kaçınılmazı gereken bir şeydir. Ortak hız uzayından uç eyleyici hız uzayına dönüşüm matrisi, Jacobian olarak adlandırılır, Jacobian bir rütbe kaybettiğinde, tekillik oluşur. Çalışma uzayının bazı alanları, robot kolunun fiziksel özellikleri nedeniyle sıkışan tehlikelere dikkat edilmelidir. El bileği eklemi, robotun tabanından en az 750 mm mesafede olduğunda, bir alan radyal hareketler için tanımlanır. Diğer alan teğetsel yönde hareket ederken robot tabanının 200 mm içindedir, (Şekil 3.14).



Şekil 3.14. Ulaşılamaz Konfigürasyonlar(Coppelia Robotics, 2016)

Robotik silahlar, sınır tekillikleri ve iç tekillikler için iki tip tekil konfigürasyon vardır. Robotun çalışma alanının dışına taşınması istendiğinde sınır tekilliklerine neden olur. Tipik olarak, bu robot tam kapsamlı olarak gerildiğinde ortaya çıkar. Daha sonra her yöne olan hareket özgürlüğünü kaybeder.

İç tekillikler genellikle robotun iki veya daha fazla eksenini hizalandığında ortaya çıkar. Bu durumda, bir eklemin hareketi, başka bir eklemin tarafından iptal edilebilir, bu nedenle hareket için sonsuz olasılıklar vardır, eylemi belirsiz bırakır.

Yakın-tekillikler, Jacobian'ı tersine çevirirken de bir sorun teşkil etmektedir. Yakın-tekilliklerle, Jacobian'ın belirleyicisi küçülürken, tersine çevrilmiş Jacobian büyük olacaktır. Bu, son efektörün küçük bir hareketi için bazı eklemlerin büyük bir harekete geçmek zorunda olduğu anlamına gelir. Bu nedenle, eklemin hızı, fiziksel sınırının dışında çalışır, dolayısıyla son efektör, verilen referans yörüngeye göre hareket edemez.

Öte yandan, çarpışmayı önlemek için en kolay yol, eklemleri hiçbir çarpışma olmayacak şekilde minimum ve maksimum bir açı ile sınırlandırmaktır. Örneğin, taban ekleminin her açıdan hareket etmekte özgür olacaktır. Ancak, çarpışmayı önlemek için omuz, 0 ile  $\pi$  arasında hareket etmelidir. Bu yaklaşımın uygulanması çok basittir, ancak robotun hareketini çok fazla sınırlandırır. UR5 çalışma alanındaki bazı konfigürasyonlara çarpmadan

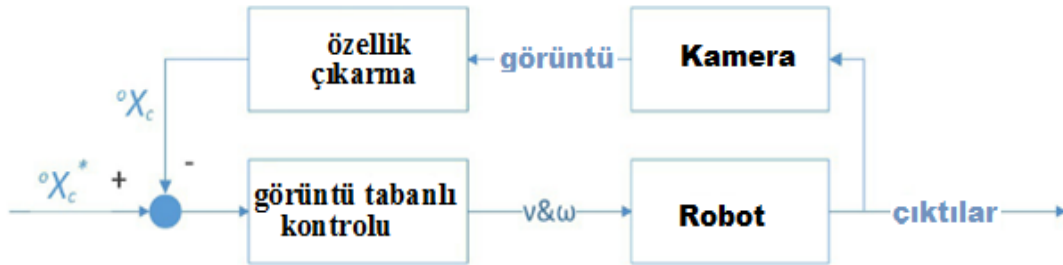
ulaşılabilir, ancak bağlantı noktalarını sınırlandırarak robotun performansı da tehlikeye atılabilir.

### 3.3. Görsel Servo Kontrolündeki Kavramlar

#### 3.3.1. IBVS Kontrolü

Robotik kolun uç eyleyicisinin konumunu ve nesnelerin pozisyonunu hesaplamak için hızlı segmentasyon problemi çözölmelidir. 3 boyutlu poz tahmini, uçuş süresi (ToF) kameraları, RGB-D kameraları veya stereo görüş sistemleri gibi çeşitli sensörler ile yapılabilir.

Bu sistemlerde, robotun veya kavrayıcılarının istenen pozisyonu 2 boyutlu görüntü bilgisi ile ölçölür. Görsel kontrolör, robotun mevcut görüntü özelliği ile görüntü düzlemindeki istenen görüntü arasındaki görüntü mesafesi hatalarını azaltarak robota hareket etmesini söyler.



Şekil 3.15. Görüntü tabanlı görsel servolama blok diyagramı

Stereo görüş sistemleri, özellikle tespit edilecek nesneler küçük olduğunda bir problem olabilir. Daha yakın nesnelerle uğraşırken, bu sensörlerin çoğunun benzer sorunları vardır. Örneğin, ToF ve RGB-D kameraları sadece 60 cm'den daha uzun mesafelerde nesneleri algılar. Görsel bir servolama sistemi için, örneğin kafadaki görsel sensörler ve etkili derinlik algılama mesafesi, bu konfigürasyonun kullanılabilirliğini kısıtlar.

Bu sorunu önlemek için daha yakın nesneleri tespit etmek üzere bir stereo kamera kullanılabilir. Ancak görsel alan azalır, bu yüzden kol konfigürasyonunu tespit etme yetenekleri de azalır. Geleneksel monoküler görsel servolama tekniklerinin birçoğunda,

servolama görevindeki yakınlaştırma prosedürünün hızını yavaşlatan kontrol yasası için bir "sabit" görüntü etkileşimi matrisini hesaplamak üzere bir derinlik/mesafe parametresi veya nesne modeli hakkında önceden bilgi sahibi olunmalıdır. Stereo görüşün kullanılmasıyla, iki görüntünün epipolar geometrisi, gözlemlenen nesnenin herhangi bir geometrik modeline gerek olmaksızın, görüntü etkileşim matrisini herhangi bir pozisyonda hesaplamak için kullanılabilir böylece daha iyi ve daha hızlı performans özellikleri ile sonuçlanır. Etkileşim matrisi vasıtasıyla derinlik bilgisi çıkarılır ve hesaplanır. Görüntü tabanlı görsel servolamada, görüntü alanında hata sinyali ve kontrol komutu hesaplanır. Kontrolün görevi, özellik parametresinin hatasını en aza indirmektir.

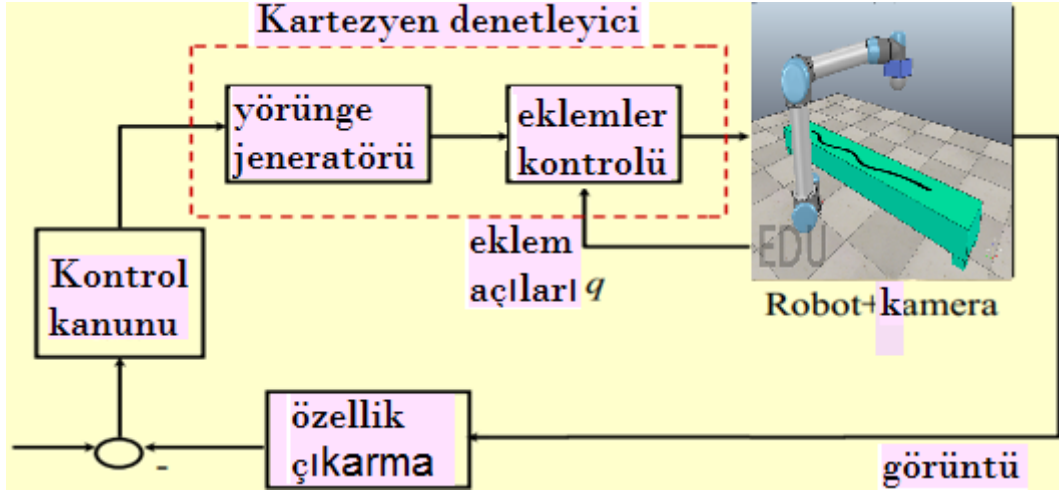
### 3.3.2 PBVS Kontrolü

Konum tabanlı görsel servolama kontrol şemalarında, görsel özellik vektörü, bir referans koordinat çerçevesine göre kamera pozu (konum ve yönlendirme) kullanılarak tanımlanmaktadır. Bir görüntüdeki bir dizi ölçümden kamera pozunun belirlenmesi kameranın içsel parametrelerini ve gözlemlenen nesnenin 3 boyutlu modelini gerektirir, bu klasik 3 boyutlu konumlandırma problemidir. PBVS yaklaşımı 3 boyutlu yeniden yapılandırmaya ihtiyaç duyar ve kalibrasyon hatalarından dolayı karmaşık olması muhtemeldir. Stereo görüşte, iki kamera düzenlemesinin her biri tarafından yakalanan bir 2 boyutlu görüntü verisinden çalışma alanındaki bir nesnenin 3 boyutlu pozunu yeniden oluşturmak mümkündür. Robot son efektörü tarafından ele alınan bir nesnenin istenen bir pozu verildiğinde, gerçek nesne pozu ile istenen arasında bir hata tanımlamak mümkündür. Bu tezde Zayıf-Perspektif kullanılmıştır.

### 3.3.3 Dolaylı Görüntü Tabanlı Görsel Servolama Kontrolü

Bu tezde, sistemi dolaylı olarak kartezyen pozisyonu ile kontrol ediyoruz. Geri bildirim görüntü tabanlı, ancak kontrol sistemi konum tabanlıdır. Kameradan özellikleri. Şekil 3.16'de gösterildiği gibidir.

Geribildirim aşamasında görüntülerden çıkarılan özelliklere vardır. Kontrol seviyesine geldiğinde kartezyen bir kontrolör kullanılır. Bu kontrolör bir yörünge jeneratörü ve bir eklemler kontrol algoritmalarıdır.

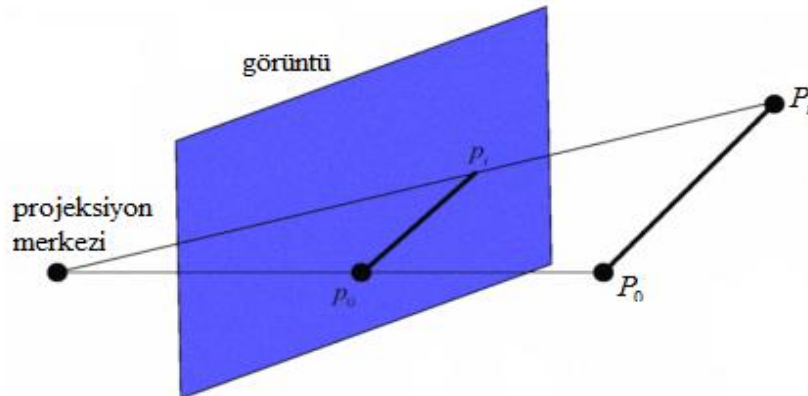


Şekil 3.16. Dolaylı Görüntü tabanlı görsel servolama blok diyagramı

- **Zayıf-Perspektif İzdüşüm ile Poz Tahmini**

Yaygın olarak kullanılan perspektif modeli yerine, somut noktaları ve bunlara karşılık gelen imaj noktalarını birbirine bağlamak için zayıf perspektif modeli kullanılır.  $p_i = (x_i, y_i)$  ve onun somut noktası  $P_i = (X_i, Y_i, Z_i)$  olan bir görüntü noktası tanımlarsak, zayıf perspektifli projeksiyon modeli, tüm  $Z$  için bir temsili  $\tilde{Z}$  ile değiştirerek projeksiyon denklemini basitleştirir, böylece  $s = f / \tilde{Z}$  eksenini tüm noktalar için sabit bir ölçek olur. Projeksiyon denklemleri o zaman:

$$x_i = s * X_i; y_i = s * Y_i \quad (3.34)$$



Şekil 3.17. Zayıf-Perspektif İzdüşümü

Zayıf-Perspektif izdüşümünü kullanarak, dünyadaki tüm koordinat noktalarının vektör olarak tanımlanabildiği bir dünya koordinatında  $P_0$  referans noktası seçilmiştir:  $\vec{P} = P_i - P_0$ . Benzer şekilde, bu noktanın izdüşümü,  $P_0$  görüntü noktaları için bir referans noktasıdır:  $\vec{p} = p_i - p_0$ . Zayıf perspektif varsayımından,  $\vec{p}$  'nin x bileşeni  $\vec{P}$  x bileşeninin küçültülmüş bir formudur.

$$x_i - x_0 = s(X_1 - X_0) = s(\vec{P}_0, \hat{i}) \quad (3.34)$$

$I$  ve  $J$ 'yi,  $i$  ve  $j$ 'nin birim vektörlerinin büyütülmüş halleri olarak, daha sonra  $x_i - x_0 = P_i * I$  ve  $y_i - y_0 = P_i * J$ , denklemlerini ise  $I$  ve  $J$ 'nin bilinmediği her nokta için kullanılabilen iki denklem olarak tanımlarız.

Çizelge 3.8. Zayıf-Perspektif Izdüşüm ile Poz Tahmini için Pseudocode

#### **Algoritma 4**

SC: özel yer değiştirme ölçekleme faktörü

Dev: sapma açısı ölçekleme faktörü

**For** 1'den  $dx$  boyutuna kadar say **do**

**If**  $dx$  sıfırdan büyüktür **then**

        mevcut  $y$  konumuna  $dy$  ekle  $dy * S$  ile yer değiştir

**Else** mevcut  $y$  pozisyonuna  $dy$  çıkar  $dy * S$  ile yer değiştir

**End if**

**If**  $dy$  negatif bir değer **then**

        mevcut  $x$  pozisyonuna  $dx$  ekle  $dx * SC$  ile yer değiştir

**else**

        mevcut  $x$  pozisyonuna  $dx$  çıkar  $dx * SC$  ile yer değiştir

**end if**

**end for**



## 4. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde görsel servolama ve robot kolunu kontrol etmek için kullanılan tüm yöntemlerin uygulanmasında kullanılan malzemeleri açıklanacaktır.

Bu çalışmada, hesaplama yazılımı Matlab/Simulink ile benzetim yazılımı V-REP arasında entegrasyon kullanılmaktadır V-REP. Matlab/Simulink ortamı, hızlı bir prototip oluşturma ve test etme konusunda karmaşık kontrol algoritmalarının geliştirilmesi, hata ayıklanması ve test etmesi için yaygın ve kolay bir kullanıma sahiptir. Matlab, robotik uygulamalar ve test algoritmaları için kullanımı kolay bir 3B fiziksel simülasyon motoru içermez. Bu benzetimi yapmak üzere 3 boyutlu modelleme ve fiziksel çevre etkileşim araçlarından biri olan Robot Benzetim Platformunu (V-REP) kullanılmaktadır.

### 4.1. Robot Benzetim Platformu (V-REP)

Çalışmamızda, Robot Benzetim Platformunu (V-REP) kullanılmaktadır. V-REP, esneklik, dinamiklik ve özelleştirilebilirlik özelliklerine sahip robotik uygulamalarda kullanımı gittikçe yaygınlaşan, açık kaynaklı, son teknoloji ürünü bir 3B benzetim aracıdır.

#### 4.1.1 V-REP Ortamı

(V-REP), robot simülasyonunun genel amacı için geliştirilen Coppelia Robotics ürünüdür. Özelleştirilmiş kullanıcı arayüzü ve modüler yapısı ile entegre geliştirme ortamı, simülatörün ana özellikleridir. Modülerlik, hem simülasyon nesneleri hem de kontrol yöntemleri için yüksek seviyededir. Simülatör içindeki geliştirme ortamının kolay kullanımı robot tabanlı senaryoları ve simülasyon durumlarını yaratmak için motivasyon sağlar. Bu özellik hızlı prototipleme, algoritma tasarımı ve uygulamasına izin verir. Aktif simülasyon sırasında bu platform gerçek 3 boyutlu dünya ortamı gibi hareket eder ve modellerin davranışlarına göre gerçek zamanlı geri bildirim verir. Simülatörün üç ana işlevi, sahneyi oluşturan nesneleri, kontrol mekanizmasını ve hesaplama modüllerini içerir. Aşağıdakiler, V-REP simülasyon ortamını oluşturan nesne türlerinden bazılarıdır:

**Şekiller:** Şekiller, üçgen yüzlerden oluşan sert örgü nesnelerdir. Bu şekiller, katlanabilir, ölçülebilir, algılanabilir, yenilenebilir ve kesilebilir nesnelerdir. Bu nesneler, diğer ölçülebilir nesnelerle minimum mesafe hesaplamalarında ve diğer çarpışabilir nesnelere karşı çarpışma tespitlerinde kullanılabilir. Şekiller ayrıca yakınlık ve görüş sensörleri tarafından tespit edilebilir.

**Eklemler:** Eklemler, yapı mekanizmaları ve hareket eden nesneler için kullanılan araçlardır, eklem en az bir içsel serbestlik derecesine (DOF) sahip olan bir nesnedir. Döner, prizmatik, küresel ve vidalı eklemler eklemlerde dört yapı tipi olup, bu eklemlerin bazı çalışma modları pasif mod, ters kinematik mod, bağımlı mod, hareket modu ve son olarak tork veya kuvvet modudur. Aktüatörün dinamik modeli, aynı zamanda pozisyon kontrolü (PID) yöntemine sahip olan tork veya kuvvet modunu mümkün kılarak modellenenebilir.

**Görüş sensörleri:** Tüm yenilenebilir nesneleri simülasyon sahnesinde (renkler, nesneler, derinlik haritaları vb.) oluşturur ve karmaşık görüntü bilgilerini ayıklar. Görüş sensörleri 2 farklı tipte gelir ve farklı amaçlar için ayarlanabilir, bunlar Ortografik projeksiyon tipi ve Perspektif projeksiyon tipidir.

**Kuvvet sensörleri:** Kuvvet sensörü, iki veya daha fazla nesne arasında iletilen kuvvet ve tork değerlerini ölçen nesnelerdir. Kuvvet sensörü çalışma prensibi gerçek bir model olarak modellenenebilir, böylece aşırı basınç kuvvetinde ve tork değerlerinde bile kırılabilirler.

**Yakınlık sensörleri:** Yakınlık sensörlerini simüle etmek için ultrasonikten kızıl ötesine kadar neredeyse her tür yakınlık sensörü modellenenebilir. Algılama noktaları ve algılama hacmine müdahale eden tespit edilebilir varlık arasında tam bir mesafe hesaplaması yaparlar.

**Kameralar:** Kameralar, simülasyonunuzu farklı bakış açılarından izleyebileceğiniz nesnelerdir. Kameralar nesneleri otomatik olarak izleyebilir ve bir izleme kamerası konumunu her zaman korur, ancak nesneyi kendi görünüm alanında izleyecek şekilde tutmak için izleme yönünü otomatik olarak ayarlar. Bu, ebeveyn-çocuk ilişkisi aracılığıyla bu nesneye bağlı bir kameradan farklıdır.

**Grafikler:** Bir grafik simülasyon, verilerini kaydetmek ve görselleştirmek için kullanılır. Grafikler, verileri bir simülasyondan kaydetmek, görselleştirmek veya dışa aktarmak için kullanılabilecek nesnelerdir. Veriler, üç farklı şekilde görselleştirilebilen bir veri akışı (veri değerlerinin ardışık listesi) olarak kaydedilir: zaman grafikleri, x / y grafikleri ve 3 boyutlu eğriler.

**Yollar:** Uzayda bir yol veya yörünge, yol adlı bir nesne tarafından tanımlanır. Yollar, yenilenebilir nesnelerdir ve bunlar, görme sensörleri tarafından görülebilecekleri anlamına gelir. Bazı yol verilerinin grafik nesneleriyle kaydedilebileceği dikkate alınmalıdır.

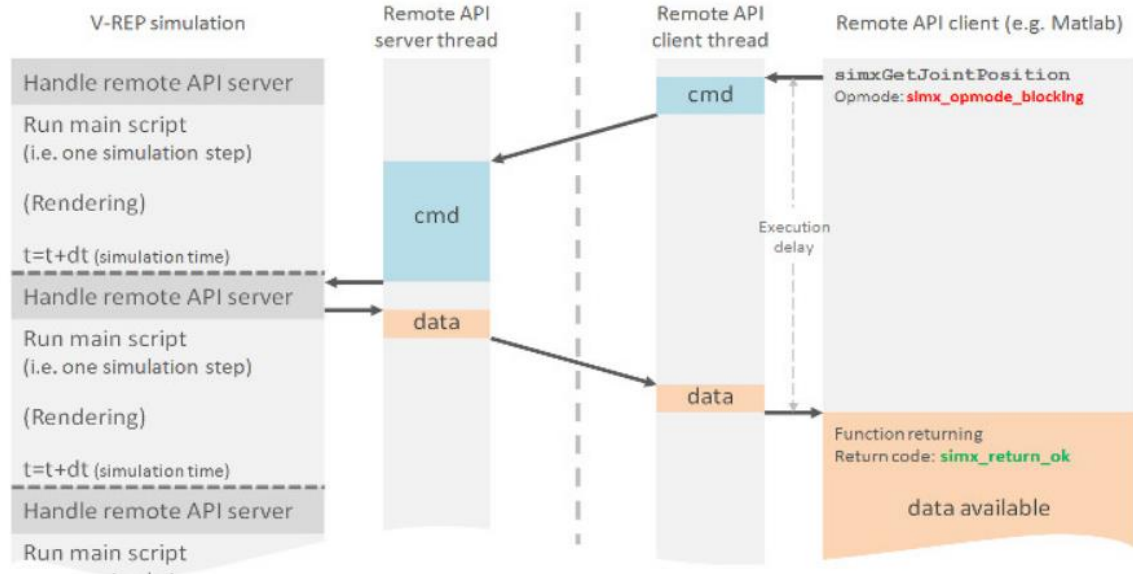
**Modeller:** Model, nesneye bağlı bir referans çerçevesi veya yön noktası olarak tanımlanabilen bir nesne türüdür. Özellikle yol güzergâhı planlaması ve takibi için faydalıdır. Modeller genellikle diğer nesnelerle birlikte çok amaçlı yardımcı nesnelerdir. Tek başına çok kullanışlı değildir.

Yukarıda tarif edilen sahne objelerinin kombinasyonu, karmaşık sensörlerin (ivmeölçer, jiroskop, GPS, Kinect, vb.) ve manipülatörlerden tekerlekli robotlara kadar karmaşık modellerin oluşturulmasına izin verir. VREP ortamında, sahneye kolayca eklenebilecek geniş bir sensör ve robot model kütüphanesi bulunmaktadır. Ayrıca, bu modellerin tamamen özelleştirilebilir olduğu fark edilmelidir.

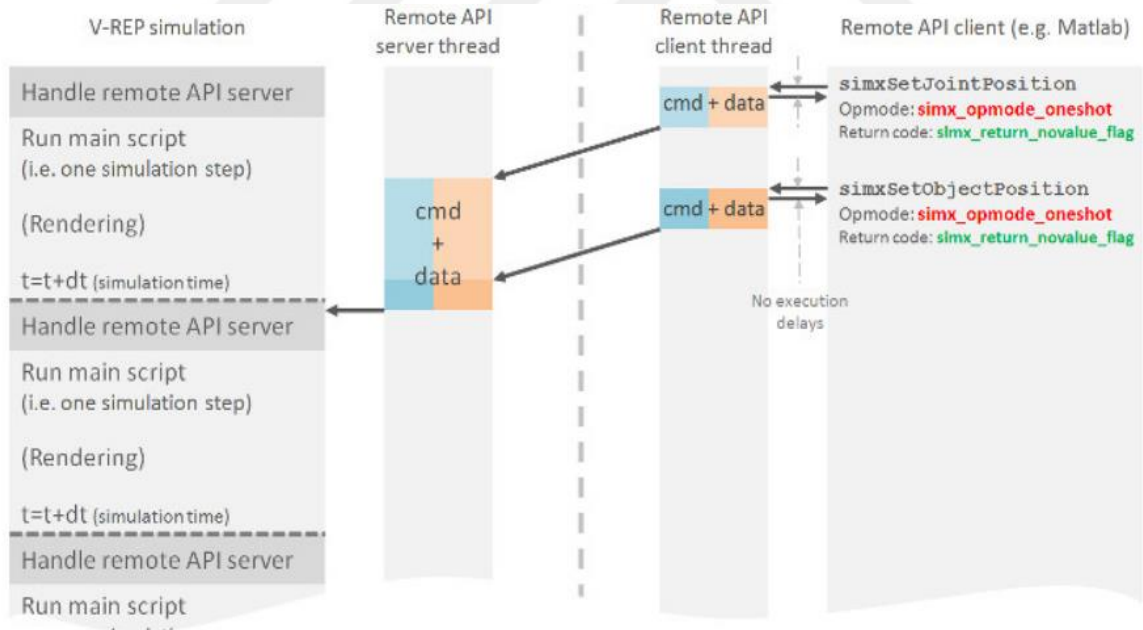
Her simülasyon nesnesinin tüm davranışlarını ele almak için çok sayıda kontrol mekanizması vardır. Bu kontrolörler, sadece simülasyon ortamının içinde değil, aynı zamanda simülasyon ortamının dışında da uygulanabilir. Ana iç kontrol mekanizması, olay yerinde herhangi bir unsurla ilişkilendirilebilecek alt yazıların kullanılmasıdır. Çocuk komut dosyaları, simülasyonun belirli bir kısmını ele alır ve ilişkili nesnelerin ayrılmaz bir parçasıdır. Bu özellik nedeniyle onlar ile birlikte çoğaltılabilir ve serileştirilebilir. Bu nedenle, model parametrelerini içeren, taşınabilir ve ölçeklenebilir kılan, tek bir pakettir. Çocuk komut dosyalarının iki yürütme modu vardır.

İşlenmemiş çocuk komut dosyaları, her çağrıldığında, bir görev yürüttükleri ve daha sonra da kontrole geri döndükleri anlamına gelen geçişli komutlardır. Dışlı çocuk komut dosyaları iş parçacığıyla başlatılır ve ana komut dosyası koduyla işlenir. Dışlı çocuk komut dosyaları, alt çocuk komut dosyalarına kıyasla daha gelişmiş programlama bilgisi gerektirir. Ayrıca, işlenmiş çocuk komut dosyaları, iş parçacıklı olmayanlara göre daha fazla işlem gücü ve zaman harcayabilir, simülasyon komutlarına yanıtlarda bazı gecikmeler gözlemlenebilir. Ana komut dosyası hem işlenmiş hem de işlenmemiş çocuk komut dosyalarını işler. Bu yerleşik komut dosyaları iletişim hatlarını açar ve yönetir, uzak API sunucularını başlatır, yürütülebilir dosyaları başlatır, eklentileri yükler ve boşaltır.

Döngü konfigürasyon testlerinde simülatör için V-REP, simülasyonu harici denetleyici algoritması ile simülatörden kontrol etmek için bir yöntem sunar. V-REP'de uzak API arayüzünde geliştirilen kontrolör, soket iletişimi kullanarak simülasyon sahnesi ile haberleşmeyi sağlar. Uzak API sunucu hizmetleri ve uzak API istemcileri tarafından oluşturulur. İsteyen tarafı C / C ++, Python, Matlab ve diğer dillerden geliştirilebilir, ayrıca uzaktan kumanda donanımı veya gerçek robotlar üzerinde çalışan herhangi bir yazılıma gömülebilir ve hızlı veri akışının yanı sıra uzaktan işlev çağrılmasına da olanak tanır. İşlevler herhangi bir yapılandırmaya uyum sağlamak için iki çağrı yöntemini destekler; engelleme, sunucu yanıtlarına kadar beklemek. Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de göstermektedir



Şekil 4.1. Engelleme Fonksiyonu Çağrısı ile V-REP'den Veri Okuma(V-REP Kullanım kılavuzu, 2016)



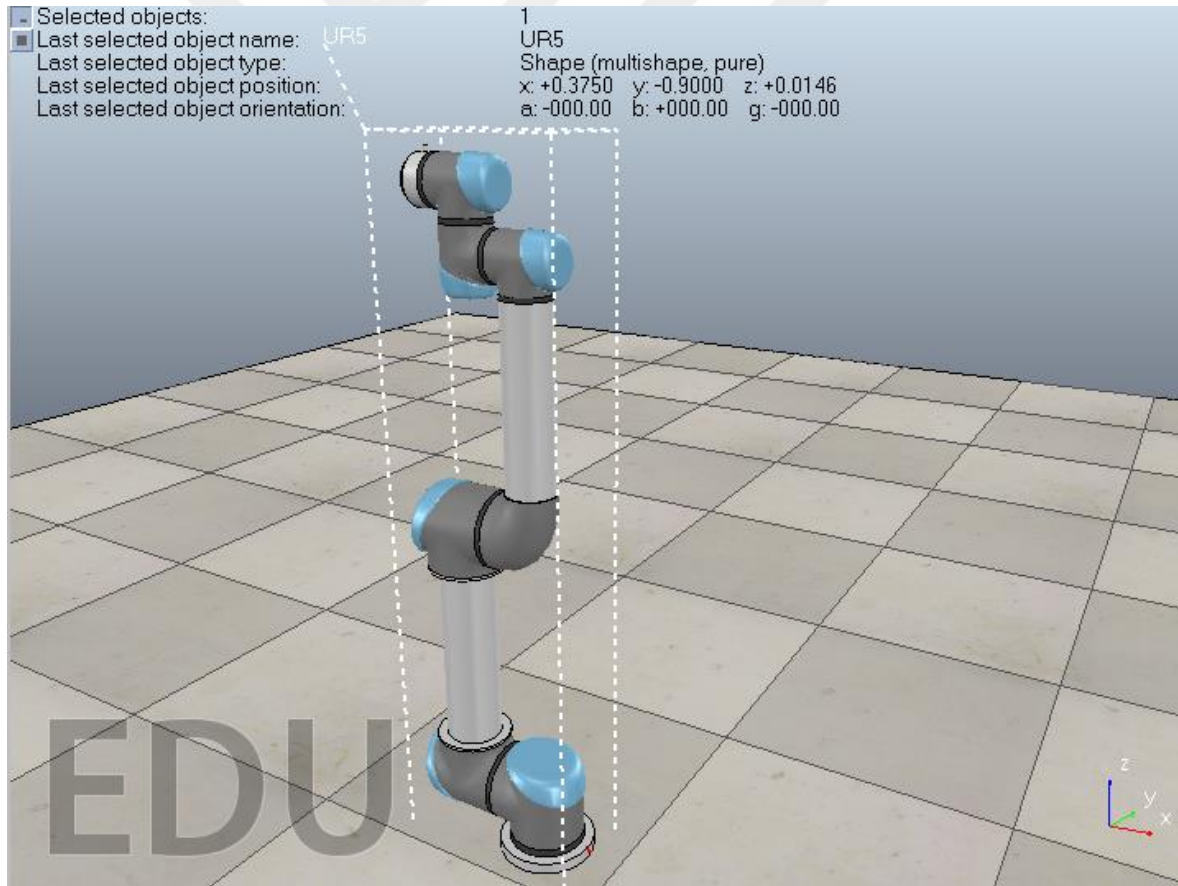
Şekil 4.2. Bloke olmayan fonksiyon çağrısı üzerinden V-REP'den veri gönderme (V-REP Kullanım kılavuzu, 2016).

Sahne nesneleri hesaplamaları arasındaki etkileşimleri destekleyen çeşitli hesaplama modlarıdır. V-REP'nin dinamik modülü şu anda dört farklı fizik motorunu desteklemektedir: bullet fizik kütüphanesi, açık dinamik motor, vortex dinamiği motoru ve newton dinamiği

motoru. Herhangi bir zamanda, simülasyon gereksinimlerine göre bir motordan diğerine mümkün olduğunca hızlı geçiş yapmak oldukça kolaydır.

#### 4.1.2 V-REP'te Robot ve Kamera

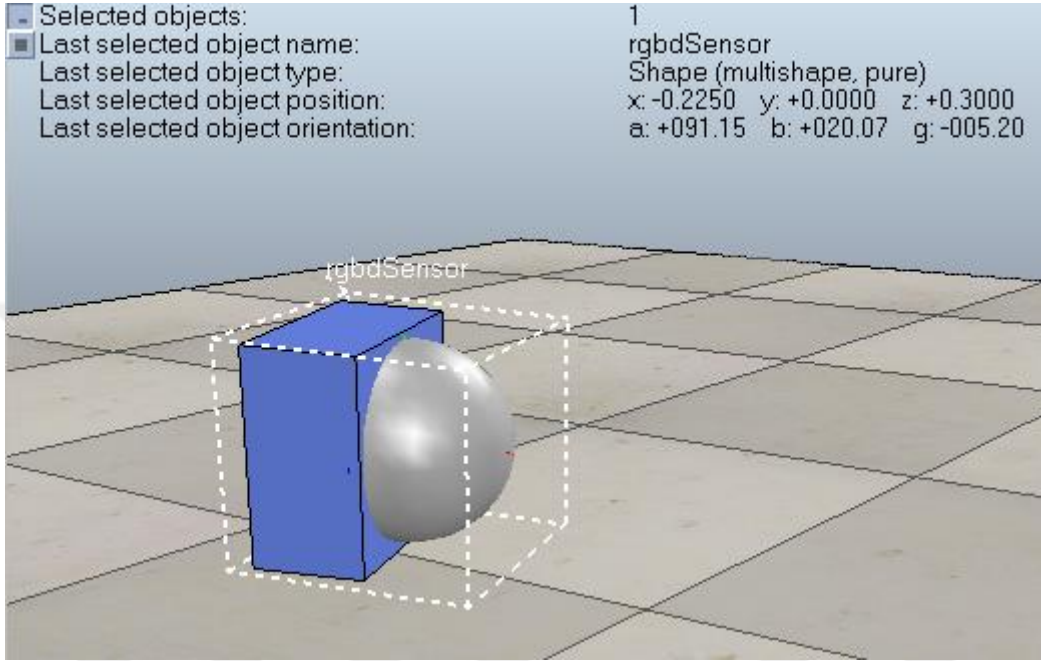
V-REP, mobil olmayan robotlardan mobil robotlara kadar geniş bir yelpazede robotlara sahiptir. Her kategoride çeşitli robot tipleri vardır. V-REP, sensörler ve aktüatörler gibi basit robotik bileşenlerin yanı sıra karmaşık tam fonksiyonel robotik sistemlerin modellenmesinde de kullanılabilir. Bu yazılımda bulabileceğiniz UR5, gerçeği gibi tam işlevselliklere sahiptir. Bu tezde, endüstriyel manipülatör prototipimiz olan UR5'i kullanıyoruz Şekil 4.3 gösteriliği gibi, bu yazılım tüm robot özelliklerini yönetebilir; doku / geometri özellikleri, dinamik özellikler ve tüm genel özellikler.



Şekil 4.3. V-REP'de UR5 Robot Kolu

V-REP'de çok farklı türde kamera ve görüntü sensörleri vardır. Uygulamamız için RGBD kamerayı kullandık. Bu geniş bir uygulamaya sahip bir kamera sensörü türüdür,

hassasiyeti robotik uygulamalar için mükemmeldir. Algılayıcı boyutunun ötesinde, görüş alanı, yakın/uzak kırpma düzlemi, perspektif açısı ve çözünürlük gibi en özelliklerinin ayarlanabilmesi robot sistemlerinde tercih sebebidir. Şekil 4.4’de kamera modeli görülmektedir.



Şekil 4.4. V-REP Kamera Modeli

#### 4.1.3 Matlab ile V-REP Arasında İletişim ve Senkronizasyon

Herbiri dinamik bir sistemi simüle eden iki farklı yazılımı bir araya getirdiğimiz için, Simulink ve V-REP'nin simülasyon zamanlarının simülasyon sırasında senkronize olması çok önemlidir. Bu amaçla her iki yazılım da gerçek zamanlı sistemle senkronize edilir. Bu strateji, Simulink'in gerçek bir robot ile arayüzlenmesi açısından da kullanışlıdır.

V-REP, harici bir uygulamadan veya uzak bir donanımdan simülasyonu kontrol etmenizi sağlayan uzak bir API sunar. Bu uzak API, Matlab/Octave programından çağrılabilen birçok özel ve genel işlev tarafından oluşturulur. Fonksiyonları, gecikmeyi ve ağ yükünü büyük ölçüde azaltacak şekilde soket haberleşmesi yoluyla V-REP ile etkileşim halindedir. Uzak API, bir veya birkaç harici uygulamanın senkronize olan veya senkronize olmayan bir uzaktan kumandada V-REP ile etkileşime girmesine ve uzaktan kumandaya destek vermesine izin verir.

Uzak API işlevselliğini Matlab programında kullanmak için şu 3 dosyaya ihtiyacı vardır: remoteApiProto.m, remApi.m ve remoteApi.dll. Bu dosyalar, remoteApi paylaşılan kütüphanesini oluşturmak için kullandığımız V-REP'nin kurulum dizininde bulunur. Matlab remoteApi kütüphanesi olarak 64 bit mimariyi kullanır. Windows 8.1, 64 bit İşletim Sistemi, x64 tabanlı işlemci çalıştıran ve 500 GB, 2 GB RAM ve 2,13 GHz kapasiteli bir bilgisayara 64 bit MATLAB 2017b yüklenir. Aynı şekilde, iki sistem arasında köprü yapmak için V-REP ve remApi.m, remoteApiProto.m ve remoteApi.dll dosyalarının uyumlu bir sürümü yüklenir.

V-REP kullanarak herhangi bir MATLAB komut dosyasını çalıştırırken, uzak API dosyasının doğru sürümünü kullanmak gerekir bunun nedeni yüklenen işletim sistemiyle uyumluluk sorunudur.

## 4.2 Yöntemler ve Deneysel Çalışmalar

### 4.2.1 Kinematik Yöntem

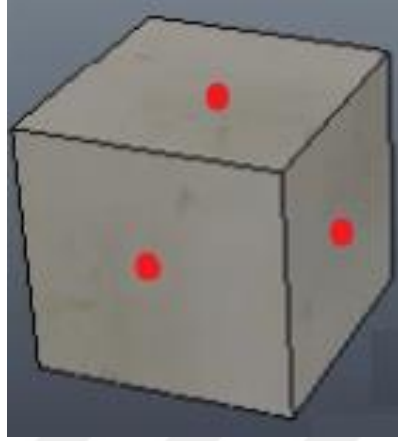
Bölüm 3'te geliştirilen kinematiği uygulamak için kullanılan yöntemdir. Burada noktadan noktaya hareketi işaret eden PTP yöntemini benimsiyoruz. Bu durumda, görev tanımlanmış bir başlangıç noktasından  $q(t_0)$  tanımlı bir son noktaya  $q(t_f)$  doğru bir yörünge planlamaktır, yani yol, ilk ve son konfigürasyonlarla belirtilir. Bu tür hareket, çalışma alanının engellerden arındırılması durumunda malzeme transfer görevleri için uygundur; uç eyleyici yolu engelden kaçınma için ilk ve nihai konfigürasyonlarda ara noktaların ilavesiyle daha da kısıtlanabilir.

Çizelge 4.1: Tanımlı 3 Boyutlu Uzamsal Noktalar

| Noktaları | X    | Y     | Z    |
|-----------|------|-------|------|
| 1         | 0.55 | 0.17  | 0.35 |
| 2         | 0.25 | 0.17  | 0.35 |
| 3         | 0.25 | -0.13 | 0.35 |
| 4         | 0.55 | -0.13 | 0.35 |



Çizelge 4.1'deki hedef noktalar, bir kutu üzerinde tanımlanmış noktalardır (Şekil 4.5). Robot kol tarafından kutuya çarpmadan bu noktalara uç etleyicinin hareket ettirilmesi beklenmektedir

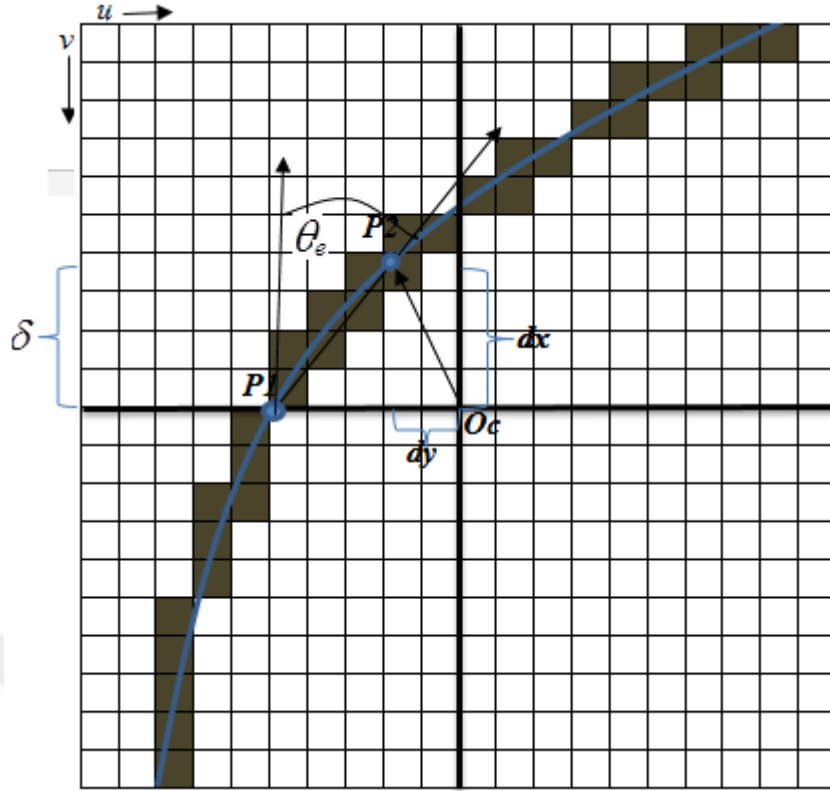


Şekil 4.5. kutu üzerinde tanımlanmış noktalardır

İlk olarak UR5 uç eyleyicisi için eklem çerçevesi inşa edilmelidir. Dünya çerçevesindeki hedef noktalar taban çerçevesine göre işlendiğinden, tabandan her bir kareye dönüşümü hesaplanır. Eklem açılarındaki hatayı kontrol etmek için, tüm eklemlerin tanımlanması gereken bir eşik oluşturulur.

#### 4.2.2 Yol planlaması

Yol planlaması, önceki bölümlerde şimdiye kadar tanımlanan görsel sisteme dayanmaktadır. İlk olarak kamera tarafından bir görüntü çekilir ve görüntüye geliştirme teknikleri uygulanır. İlgilendiğimiz özellikleri netleştirdiğimizden emin olmak için hem yükseklik hem de genişlik üzerinde bir eşik uygulayarak başlanır. Çıktı görüntüsü daha sonra kenar algılayıcısı ile işleme tabi tutulur ve daha sonra algılanan kenarların piksel koordinatları çıkarılır. Eşikten sonra özellik çok büyük gibi görünür ve bazı istenmeyen kenarlarla birçok kenar oluşur. İstenen kenar, her bir tanımlanmış yatay çizgideki kenar piksellerinin değerlerinin ortalaması alındıktan sonra alınacak ve satır başına bir pikseli tutacaktır. Teknik sonuç, görüntüdeki özellik koordinatını temsil eden istenen piksellerdir.



Şekil 4.5. Görüntü Alanındaki Özellik Koordinatı

Kenar tespiti sonrası, parametreler üzerinde bazı kısıtlamalar gereklidir. Bir kare boyutu olan bir görüntü üzerinde çalışmak istediğimiz için görüntünün yüksekliğini, genişliğini veya bunlardan en az birini  $d$  olarak yeniden boyutlandırıyoruz ve bir nokta yolunun bulunacağı görüntünün yüksekliğinde bir sigma değeri tanımlıyoruz. Bu değer, görüntü matrisinin tüm sırasını kontrol etmemize ve kenarların geçtiği tüm pikselleri kaydetmemize izin verecektir. Görüntünün bir yarısında çalıştığımız için, yol noktaları arasındaki sapma açısının mutlak değeri 90 dereceden fazla olmamalıdır.

$$d = \min(\text{height}, \text{width}) \quad (4.1)$$

$$\delta \in \{0, \frac{d}{2}\} \quad (4.2)$$

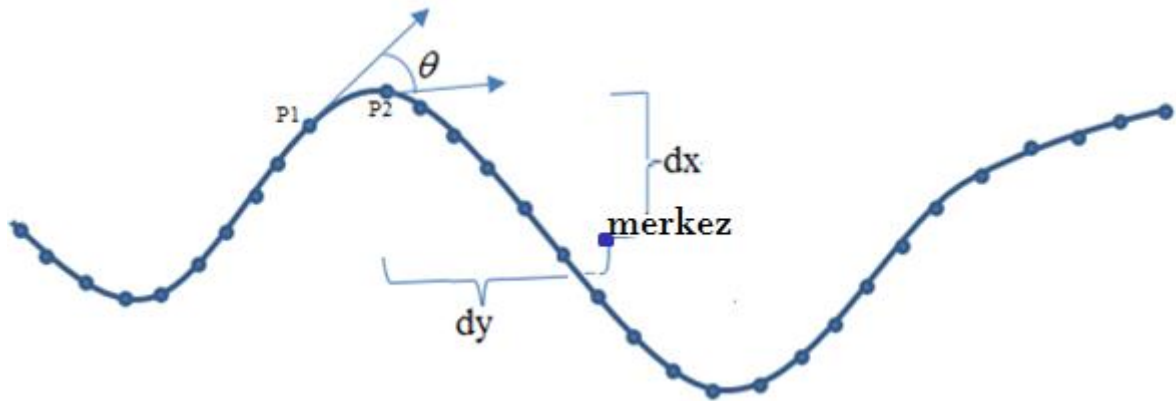
$$\theta_e < \frac{\pi}{2} \quad (4.3)$$

Bir özellik noktasından sonraki en yakın olana ve her iki normalleştirilmiş  $(x_1, y_1, \theta_1)$  ve  $(x_2, y_2, \theta_2)$  noktalarından gelen hatalarla ilgileniyoruz. Hata şöyle tanımlanır;

$$dx = \frac{(p1)_x - height/2}{cheight/2} \quad (4.4)$$

$$dy = \frac{(p2)_x - width/2}{cwidth/2} \quad (4.5)$$

cheight ve cwidth, görüntü yüksekliği ve genişliği merkezleridir



Şekil 4.6. Görüntü Uzayındaki Yörünge

Görüntü koordinat sisteminde, bir nokta, normal konumdaki bir dx ve dy ile görüntünün merkezine ve bir önceki noktanın yönüne göre sapma yönü olan açı teta ile tanımlanır.

$$\theta = \begin{cases} \arccos\left(\frac{dx}{|p2 - p1|}\right) & ; (p2)_x > (p1)_x \text{ için} \\ -\arccos\left(\frac{dx}{|p2 - p1|}\right) & ; (p2)_x \leq (p1)_x \text{ için} \end{cases} \quad (4.6)$$

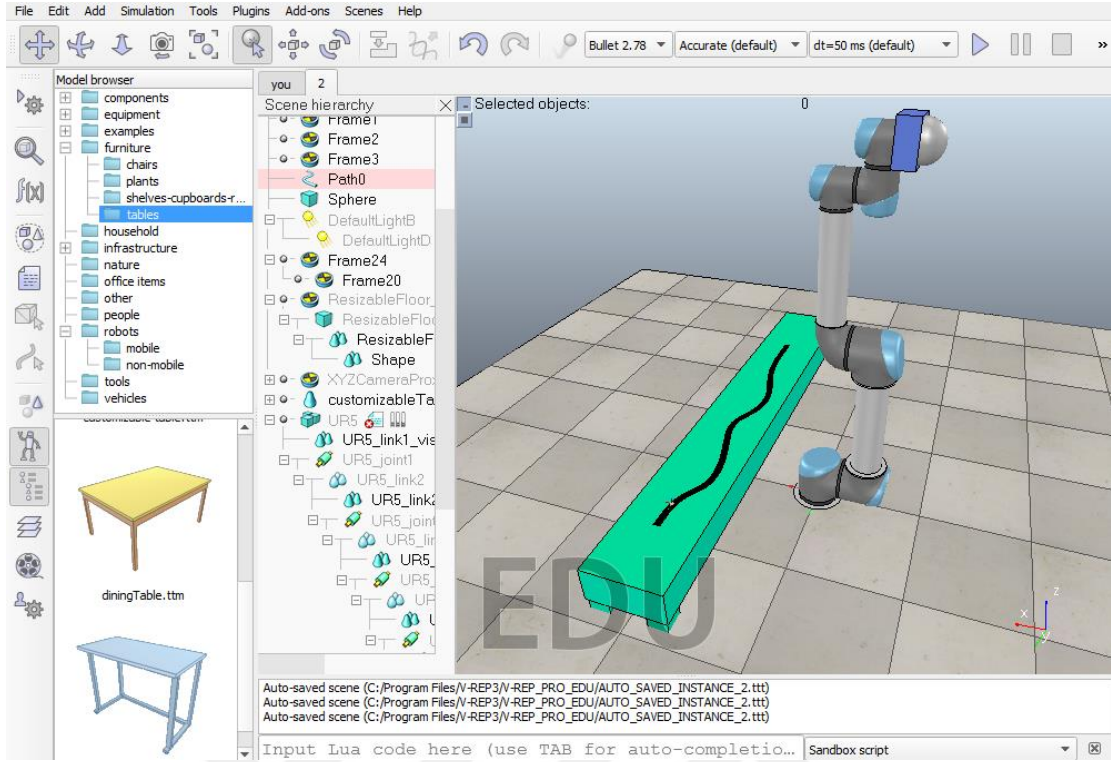
Cizelge 4.2. Yol Noktası Tespiti için Pseudocode

**Algoritma 5**

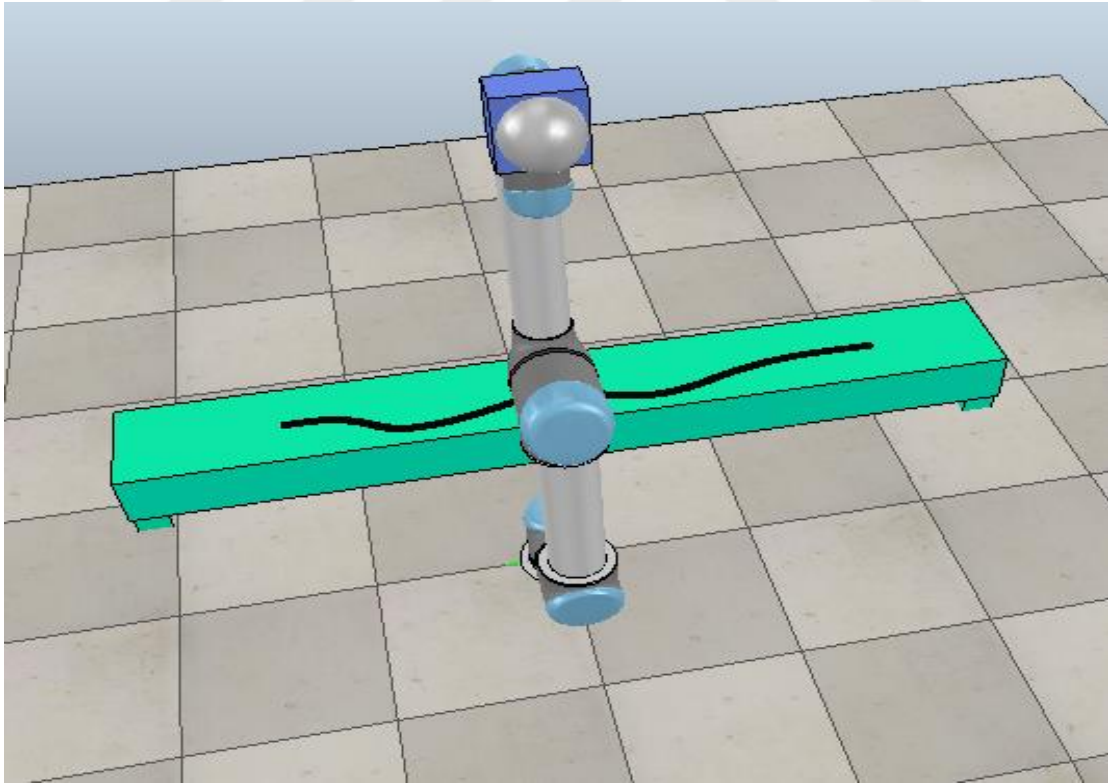
*ImgA*: kamera tarafından çekilmiş görüntü  
*Th*: eşik değeri  
*K*: örnekleme değeri  
**for** 1' den ila boyut(*ImgA*) kadar sayı **do**  
     **if** pikselin boyutu *Th*'den büyüktür **then**  
         =1  
     **End if**  
**End for**  
'de 'ye kenar algılama uygula  
**For** 1'den boyut() kadar sayı **do**  
     **if** piksel değeri 1 **then**  
         Görüntü alanında piksel koordinatını kaydet  
     **End if**  
**End for**  
**For** *K*/2'den *K*'ye kadar sayı **do**  
     **For** 1'den resmin genişliğine kadar sayı **do**  
         Her örnek çizgideki tüm piksel koordinatlarını kaydet  
     **End for**  
**End for**  
 Örnek çizginin bir kenarı yakaladığı tüm piksel koordinatlarını hesapla  
 $d_x \leftarrow$  Görüntünün merkezini *x* eksenine wrt merkezinde hesapla  
 $d_y \leftarrow$  *y* eksenine wrt yerleştirme görüntünün merkezini hesapla  
 Açı  $\leftarrow$  bir piksel koordinatından diğerine olan sapma açısı

**4.3 Sahne Açıklaması**

Ortam şunlardan oluşmaktadır: UR5 robot kol; görüntüleri 512x512 piksel çözünürlükte alan RGBD sensörü; yeniden boyutlandırılabilir bir masa, robot uç eyleyici tarafından boyunca hareket ettirilmesi beklenen bir yol. Kamera, göz-ele ile bir konfigürasyon sağlayan manipülatöre monte edilmiştir. Kamera sensörü, manipülatörün uç eyleyicisine eklenmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.7. V-rep Sahne: (a) Tam Ekran Görüntüsü (b) Sahne Yakın Önden Görünüş

#### 4.4 Görsel Servolama Yöntemi

Modelimiz, birbirine bağlanmış görsel sistem ve robot kol sisteminden oluşmaktadır. İki ana görev, hem robot kolunun hem de sensörün hareketine başlamasıyla, konum tahmini ve konum kontrolüdür. Yörüngedeki hareket, görsel geri bildirim sistemine dayalı bir döngüdür. Robot, görsel sistemin başlayacağı koordinatlara gönderilir. Göz-ele yapılan konfigürasyon, robotun ucuna monte edilen kameranın sadece yola odaklanmasını sağlamak için kullanılır. Kameranın bir sonraki konumu ve yönü görüntü geri bildirimi ile sağlanır. Görüntü özelliklerinden elde edilen koordinat, bu tespit edilen özelliklerin mekansal koordinatlarına orantılı bir algoritma ile yapılır. Hareket kontrolü ileri ve ters kinematiğe dayanmaktadır, nihai yörünge ise yol noktaları üzerinden olan bir PTP hareketidir.

Cizelge 4.3. Servolama uygulaması için algoritma.

##### **Algoritma 6**

*TCP\_reached*: ipucu pozisyonunun durumu  
**While** *TCP\_reached* istenen konumda **do**  
      $I \leftarrow$  RGB görüntüyü kamerayla çekin  
     Pose  $\leftarrow$  V\_REP'den TCP konumunu al  
     Rot  $\leftarrow$  V\_REP'den TCP rotasyon matrisini al  
      $k \leftarrow$  Görüntü örnekleme değeri  
      $\theta = \text{Euler\_inverse}(\text{Rot})$   
      $d_x, d_y$ , 'yi algoritma 5 ile hesapla.  
      $\theta_i$  'yi algoritma 5 ile hesapla.  
     Algoritma 4 ile dünya pozisyonları G hesaplayın.  
     Algoritma 4 ile dünya açısı Th hesaplayın.  
     **for** sayı 1 den ila boyutu(G)'ye kadar **do**  
         Konum G derinliğine koordinat ekleyin  
         Z eksenini etrafındaki theta'yı  $\theta + \theta_i$  ile güncelle  
         Teta'dan gelen Rotasyonu hesapla  
         TCP'yi algoritma 4 ile taşı.  
     **End for**  
**End while**

## 5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde simülasyon testleri kurulumu görselleştirilmiştir, elde edilen tüm sonuçlar sunulmuştur ve görev alanındaki tüm uç eyleyici yörünge yakibi sonuçları tartışılmıştır. Bölüm 4’de gibi, bu tezde test yapmak için Matlab ve V\_REP kullanılmıştır. Simülasyon test senaryoları açıklanmış ve bunu tüm alt-simülasyon testleri için elde edilen sonuçların sunumu takip etmiştir.

### 4.1 Ters Kinematik Deneyi ve Sonuçları

Bu tezin ilk görevi olan kinematik testi yaparak başlıyoruz. Bölüm 3'te geliştirilen ileri ve ters dönüşümleri kullanarak robot kolun bir kutunun yüzeylerine dokunmasını kapsayan bir test gerçekleştirilmektedir. Şekil 5.1'deki gibi bir ortam ele alınmaktadır. Bu senaryo, bir kutudan ve kutu üzerindeki bazı noktalara hareket etmesi gereken robot kolundan oluşur. Çizelge 5.2, V\_REP'nin kinematik sürecini yürüten bir özet algoritmadır. Her adımda, ulaşılan noktadan bir sonrakine, ters kinematik hesaplamalar ileri geri çağrılır. Bölüm 3'te geliştirilen kinematik modelin uygulanması, bir nokta konumu için sekiz olası çözüm ile sonuçlanmaktadır. Çizelge 5.1. seçilen bir nokta koordinatına göre tüm çözümlerin bir örneğidir. En iyi çözüm, Tablo 5.2'de özetlenen algoritmadır.

Çizelge 5.1. Bir Kartezyen Nokta için Teta Çözümleri

| Çöz/nokta | Çöz 1   | Çöz 2   | Çöz 3   | Çöz 4   | Çöz 5   | Çöz 6   | Çöz 7   | Çöz 8   |
|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Eklem 1   | 2.9155  | 2.9155  | 2.9155  | 2.9155  | 0.3260  | 0.3260  | 0.3260  | 0.3260  |
| Eklem 2   | -1.3628 | -0.0585 | -1.8121 | -0.1032 | -3.0384 | -1.3295 | -3.0830 | -1.7788 |
| Eklem 3   | 1.3697  | -1.3697 | 1.8109  | -1.8109 | 1.8109  | -1.8109 | 1.3697  | -1.3697 |
| Eklem 4   | 1.5639  | 2.9991  | -1.5696 | 0.3434  | 2.7982  | -1.5720 | 0.1425  | 1.5777  |
| Eklem 5   | 1.5708  | 1.5708  | -1.5708 | -1.5708 | 1.5708  | 1.5708  | -1.5708 | -1.5708 |
| Eklem 6   | 1.3447  | 1.3447  | -1.7969 | -1.7969 | -1.2448 | -1.2448 | 1.8968  | 1.8968  |

Çizelge 5.2. V-REP'de Kinematik Uygulama için Algoritma

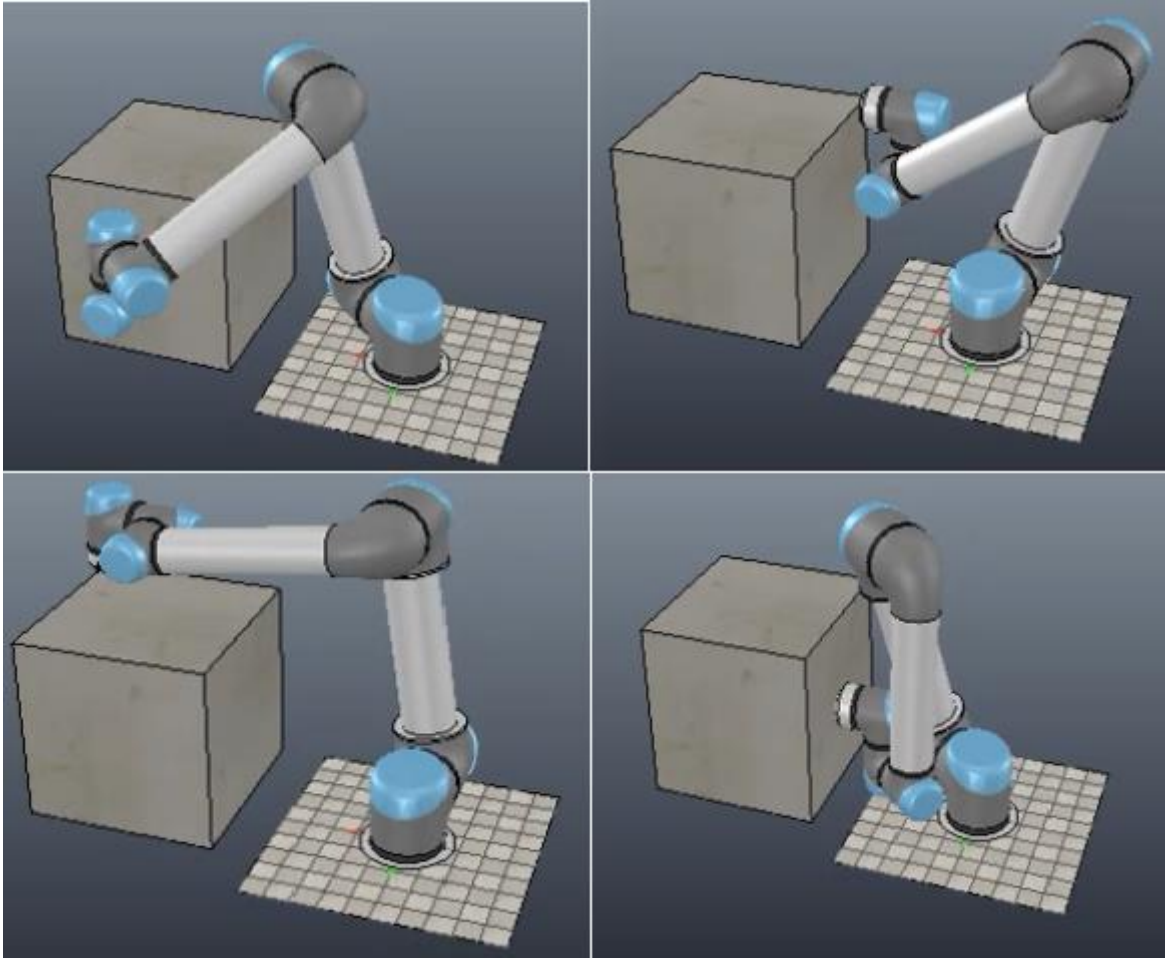
**Algoritma 7**

```

StartJ ← eklemleri başlat
Start_coord ← çeviri vektörünü başlat (başlangıç dünya koordinatı)
Start_rot ← rotasyon matrisi başlat
for StartJ'deki her bir eklem do
    ur5Joints ← Eklem Hedef Konumunu StartJ olarak ayarla
end for
Tran ← dönme ve çeviriden dönüşüm matrisi
Sensor_orien ← sensörün yönünü UR5 referans çerçevesine göre theta'ya ayarla
moveframe ← çerçeveyi taban çerçevesine göre Tran ile hareket ettirin
Ters kinematik ile Tran'dan Teta'yı hesapla
yenieklem = Teta + başlangıçeklemleri
for YeniEklemdeki her eklem do
    if YeniEklemde pi'den büyük then
        YeniEklemden 2 pi çıkar
    elseif
        YeniEklemde 2 pi ekle
    end if
end for
for YeniEklemdeki her eklem do
    ur5Joints ← Eklem Hedef Konumunu YeniEklem olarak ayarla
end for
while TCP_ulaşım durumu yanlış do
    for YeniEklemdeki her eklem do
        V-REP'den mevcutEklemi al
        Tran = ileri_kinematik (mevcutEklem-başlangıçEklemi)
        moveframe ← taban çerçevesine göre, çerçeveyi Tran dönüşümle
            hareket et
        EklemHatası = mevcutEklem – yeniEklem
        if EklemHatası pi'den büyük then
            EklemHatası'ndan 2pi çıkar
        elseif
            EklemHatası'na 2pi ekle
        end if
    end for
    if EklemHatası HataEşiği'nden küçük do
        TCP ulaşımı durumu doğru olarak işaretlendi
    end if
end while

```



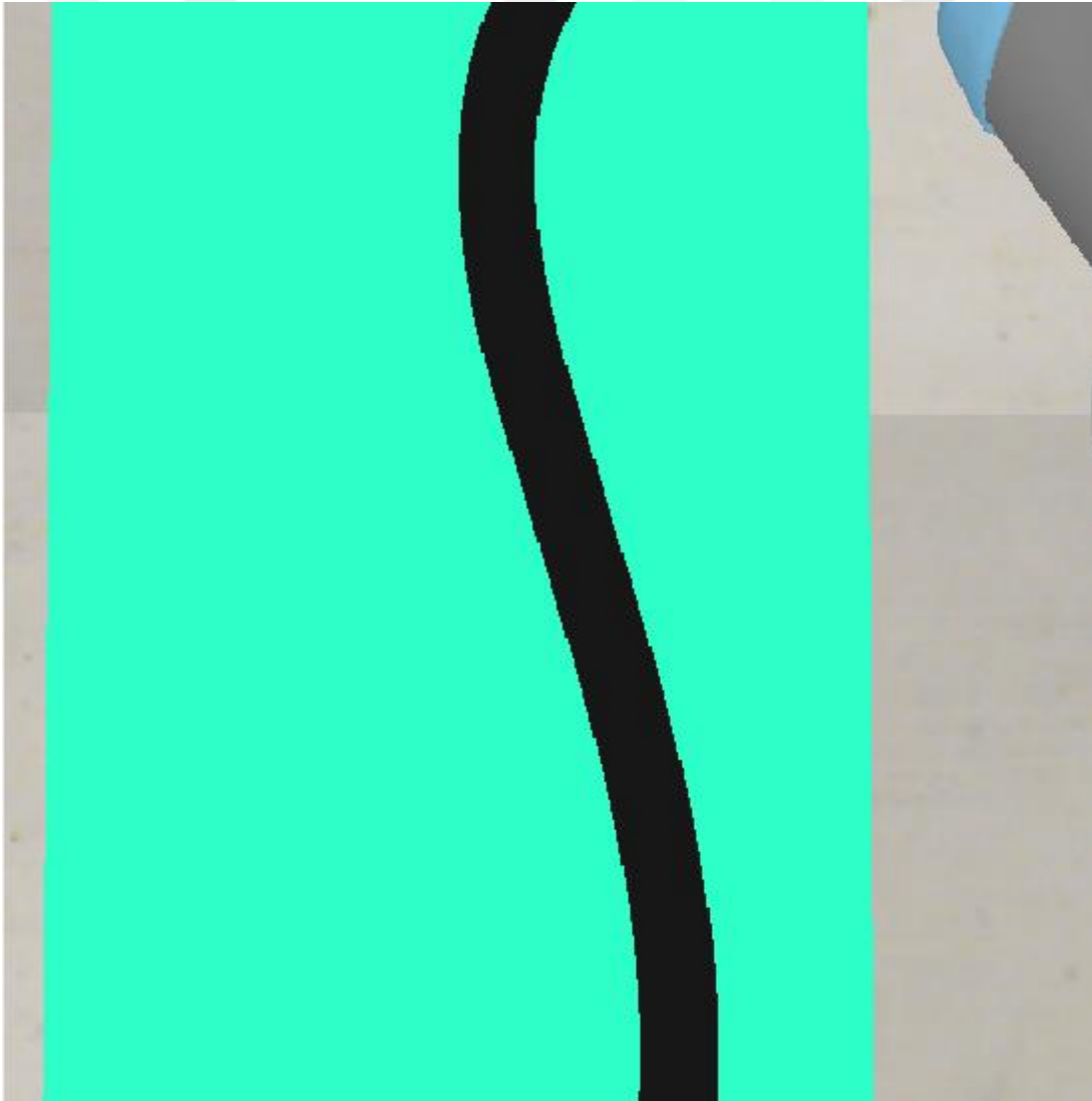


Şekil 5.1: Farklı Hedef Noktalardaki Ters Kinematik Robotun Sonucu

İstenen hedef noktadan bir sonraki istenen hedef noktaya hareket etme işlemi, her bir bağlantıya ve TCP'ye bağlanan çerçevelerle yapılır. Robot çalışma uzayı ulaşamaz konfigürasyonlara sahiptir ve bazı çözümler için robot kolu (yakın) -singüler konfigürasyondan dolayı sorun teşkil eder, aynı zamanda kendisiyle veya çevre ile çarpışabilir. Ortak çözümler dizisinden en iyi ortak çözüm, çalışma alanında herhangi bir sorun yaşamadan hedefe ulaşan çözümdür. Yukarıdaki konfigürasyon problemlerinden kaçınmak için dönüşüme rotasyon matrisi anlamına gelen TCP yönelimini uyguladık ve daha sonra robotun kutuyla çarpışmasını önlemek için çalışma alanında tanımlanan ekleme pozisyonlarından geçmesini sağladık. Sonunda, Bölüm 3'de vurgulanan kinematik teknikleriyle görevi başardık. Şekil 5.1'de farklı hedef pozisyonlarda TCP'yi göstermektedir.

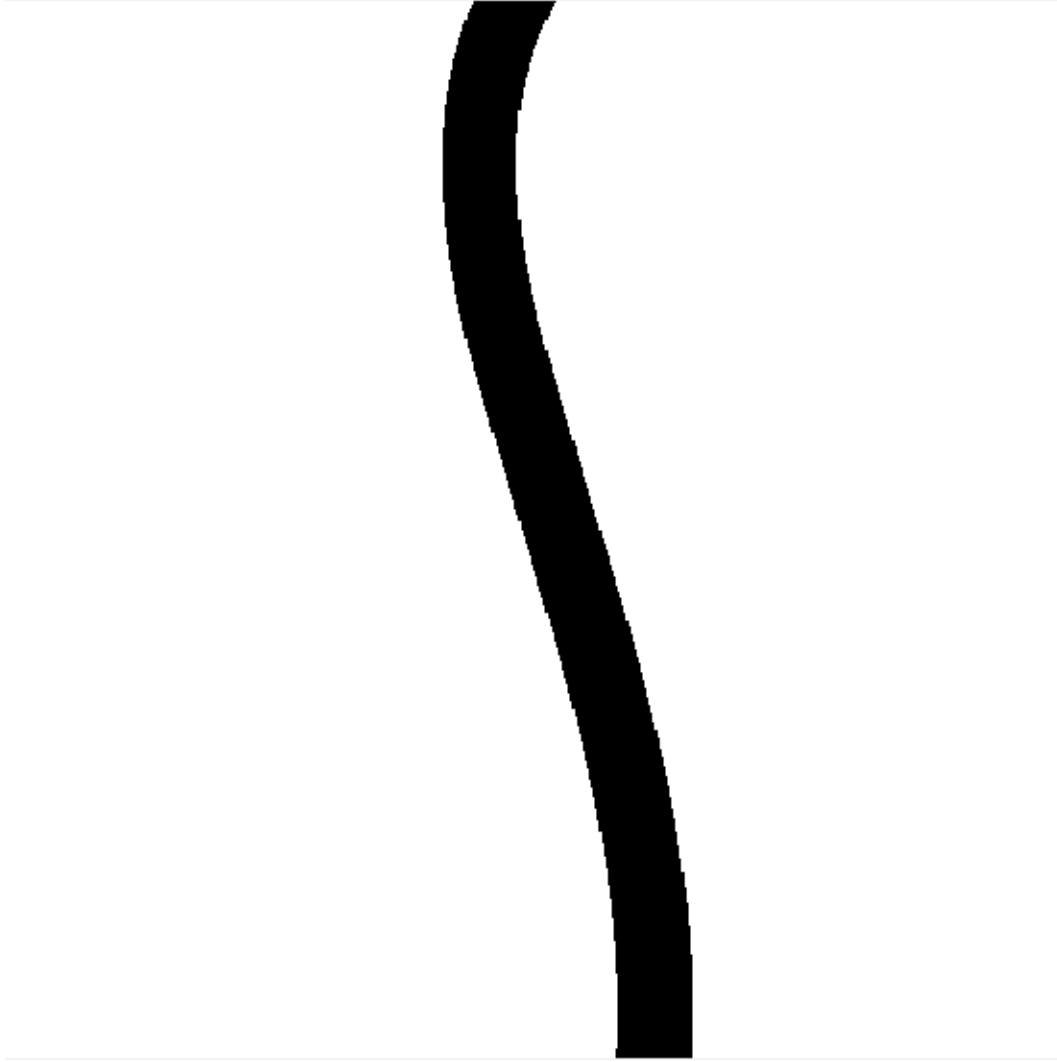
## 5.2. Görüntü İşleme Deneyi ve Sonuçları

Önceki bölümlerde açıklandığı gibi, üzerinde çalışmak istenen bir görüntüyü elde etmek için bazı görüntü geliştirme deneyleri kullanılmıştır. İstenilen özelliklere sahip olduğumuzdan emin olmak için görüntüye Morfoloji ve Görüntü Segmentasyon algoritmaları uygulanmıştır. Kameranın konfigürasyonu, görüntü düzleminin sahnenin düzlemine paralel olacak şekildedir. Kamera, belirli bir TCP konumunda görüş alanında görünen her şeyi yakalar. Orijinal görüntü, sahnenin RGB görüntüsüdür; Bu, kameranın pozisyonundan gördüğü masanın etrafındaki ek alanlara sahip olan yoldur. Şekil 5.2, sensör tarafından yakalanan ham görüntülerden biridir.



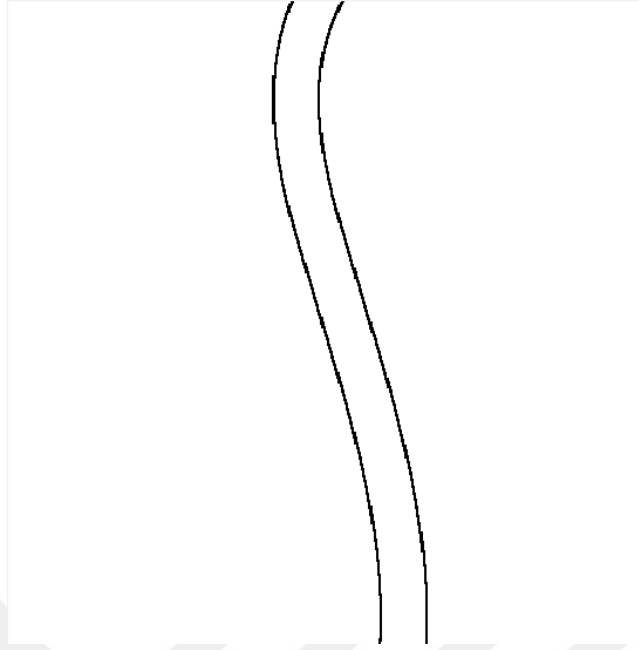
Şekil 5.2. Kameradan Orijinal Görüntü

Ham görüntü, Bölüm 3'te açıklanan çeşitli görüntü işleme algoritmalarından geçer. İlk adım, istenmeyen bazı alanları ortadan kaldırmak ve istenen özelliklere göre görüntünün anlamlı alanlarını temsil eden bölgeleri tutmaktır. Şekil 5.3, görüntü üzerinde segmentasyon teknikleri uygulandıktan sonraki halidir.



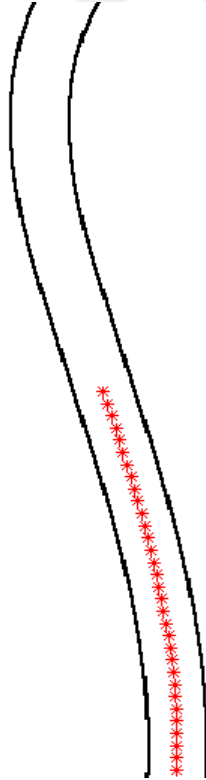
Şekil 5.3. Görüntü Segmentasyon Sonucu

Görüntü üzerinde ön çalışmadan sonra, istenen özellikleri vurgulamak için kenar algılama algoritması kullanılır. Kenarın kırılması ya da bir sonraki algoritmalar için sürekli olmama durumu söz konusu olabilir. Burada, kenar boyunca süreksizliği geri yüklemek ve bağlamak için kenar bağlama tekniği gelir, Şekil 5.4 gösterilmektedir.



Şekil 5.4. Kenar Algılamadan Sonraki Sonuç

Çok kalın olan yol ve yukarıdaki kenar algoritmaları, ortadan kaldırılması gereken ekstra kenarlarla sonuçlanır. Bir kenarı tutmak için, paralel kenarların bulunduğu yerde kütle merkezi dikkate alınır.

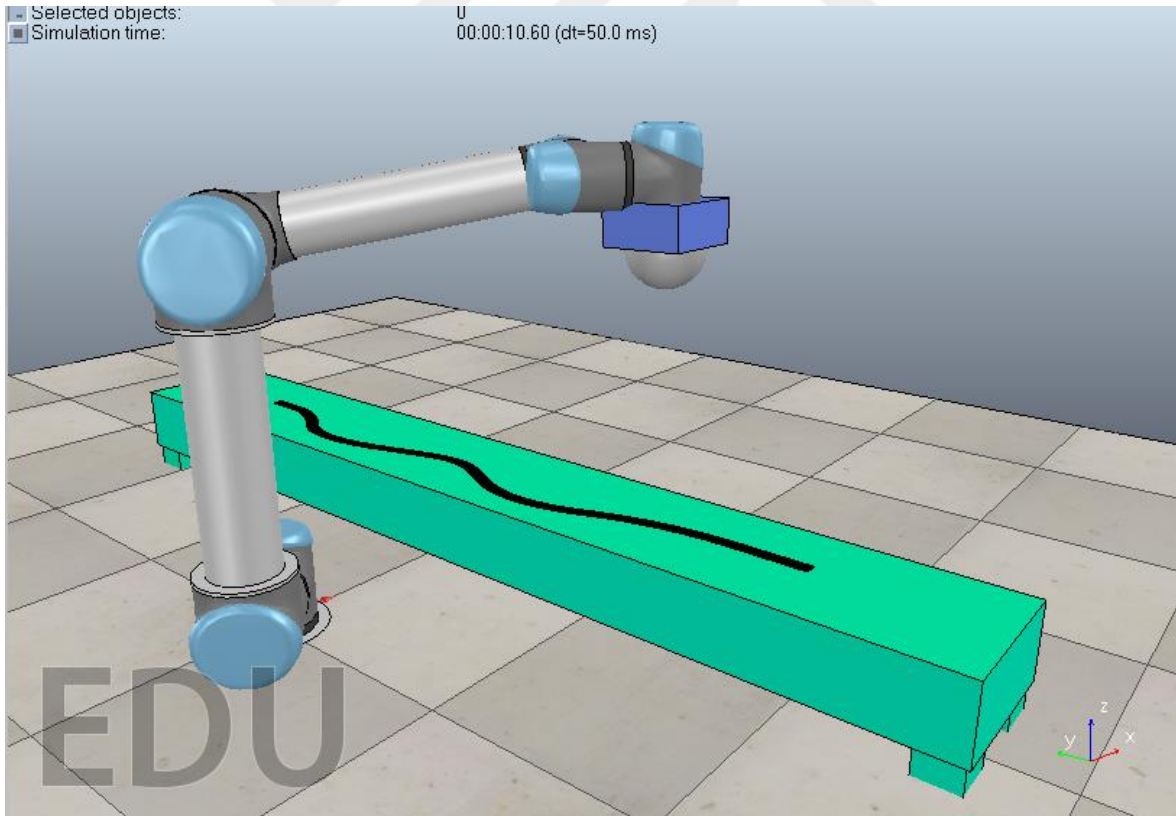


Şekil 5.5. Görüntü Alanındaki Yol Noktası.

Önceki bölümde geliştirilen yol planlaması 2 ayrı yöntemle simüle edilmiştir. İlk düşündüğümüz, görüntü başına bir özellik noktasıdır ve bu resim başına tek bir nokta yol demektir. İkinci yöntem ise, yol boyunca çoklu özellik noktaları demektir, Şekil 5.5 gösterilmektedir.

#### 4.2 Görsel Servo Deney ve Sonuçları

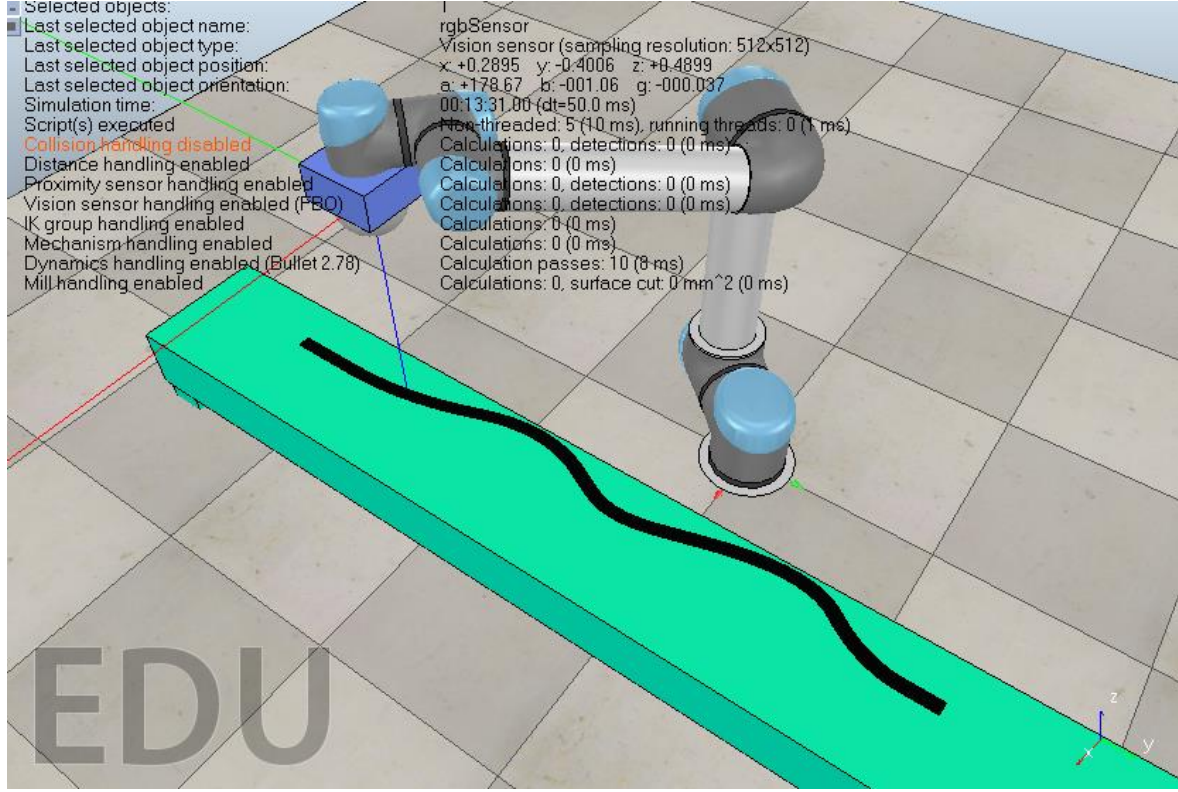
Konum tabanlı görsel servo sistemi burada uygulanmaktadır. Robot TCP'ye geri bildirim, önceki sonuçlarımızdan dolayı tahmin ettiğimiz bir durumdur. Her tekrar için bir görüntü çekilir, bir dizi pozisyon noktası hesaplanır ve döngüye verilir. Görme ve hareket burada olmaktadır. Önceki bölümde bahsedildiği gibi, amaç robot TCP'nin belirtilen bir konumdaki yolu takip etmesini sağlamaktır. Derinliği, yerden 0.5 metre olacak şekilde seçtik ve 0,5 m'de kamera, sahnenin daha iyi bir görüntüsüne sahip oldu ve yolun büyük bir kısmını yakaladı, Şekil 5.4 gösterildiği gibi.



Şekil 5.4. Belirtilen Derinlikte Robot

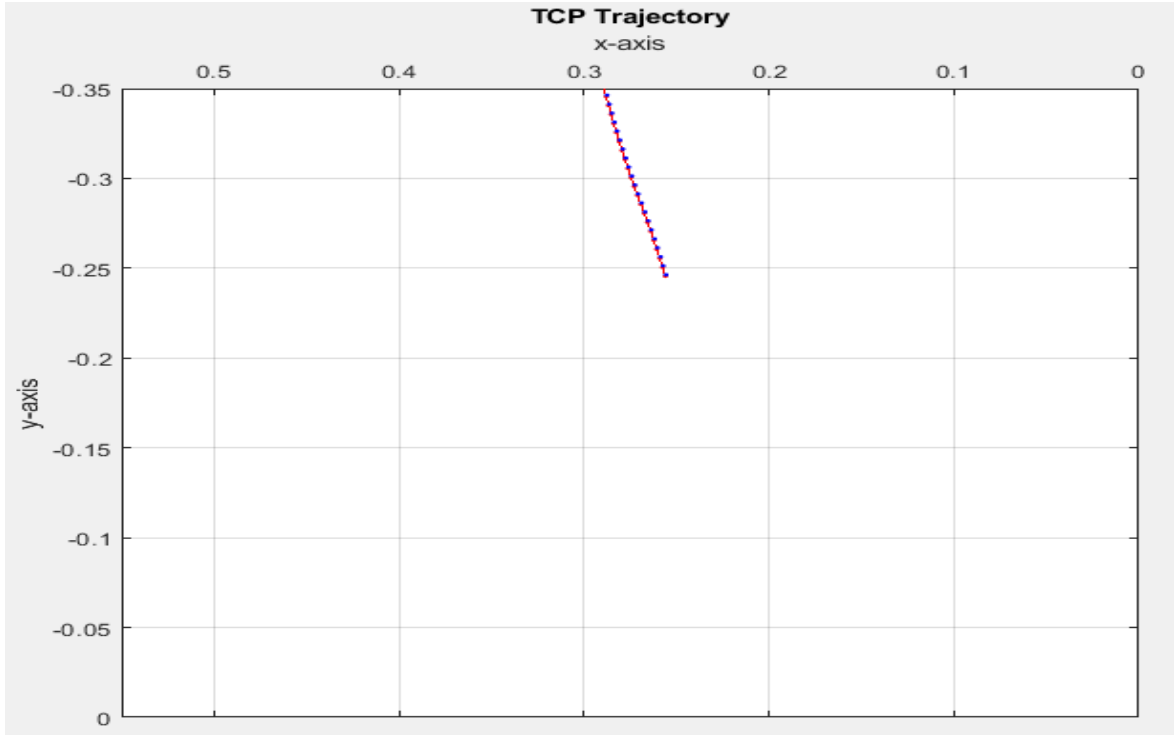
Simulasyonu başlatmak için, robotu belirli bir başlangıç konumuna yönlendiririz, bu pozisyon TCP'nin yolun başlangıcından daha fazla olması için seçilir. Şekil 5.5, robot TCP'yi

başlangıç konumunda göstermektedir. Poz hesaplamaları için geri besleme aşamasında, en iyi oran faktörünün 0.015 olduğu tahmin edilir, bu sayının çok daha yüksek veya daha düşük olması, manipülatör pozisyonlarının yanlış tahminlerine neden olur.

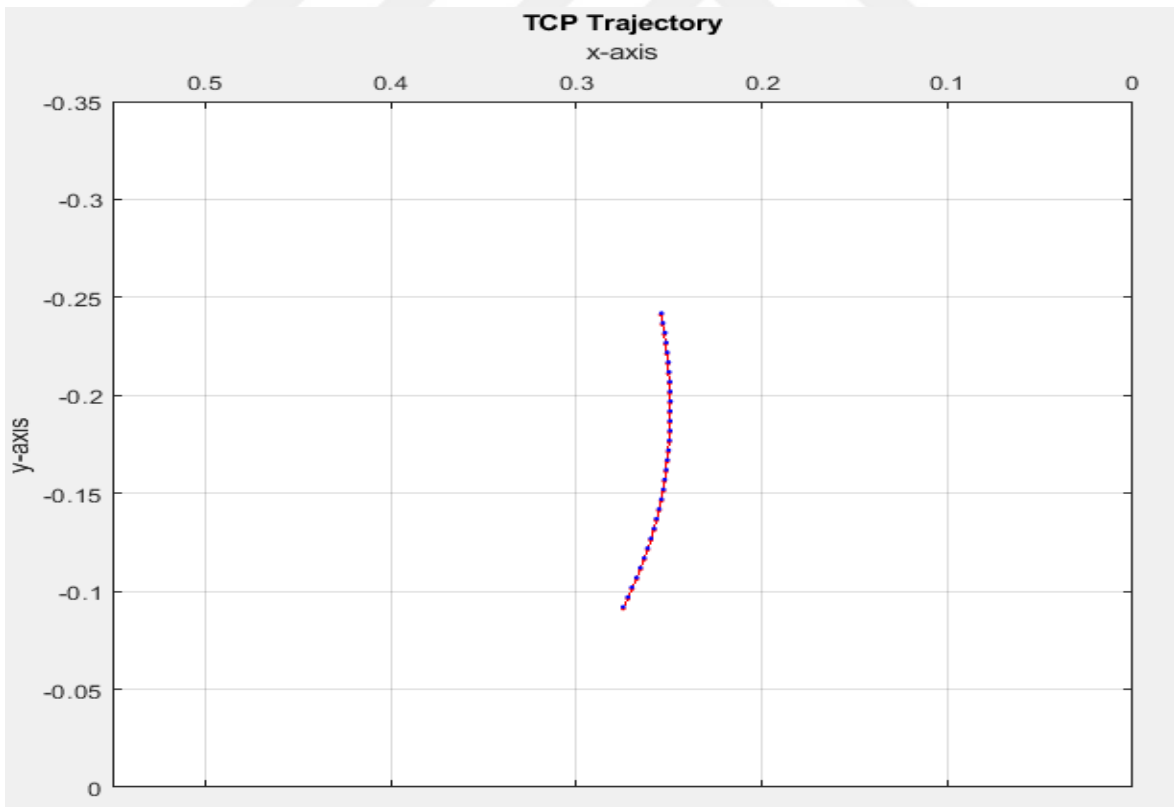


Şekil 5.5. Başlangıç Konumunda Robot TCP.

Şekil 5.6 gösterildiği gibi, birinci ve ikinci yinelemelerin TCP yörüngelerini, kırmızı yörüngenin geri besleme kartezyen konumlarını ve kesikli yörüngenin robot TCP konumu olduğunu gösterir. Eksen, robotun gerçek konumunu görselleştirmek için doğru olan sahnedeki gerçek boyutları ifade eder. Kamera, bir görünüm olarak tanımlanan her yinelemede tek bir fotoğraf çeker ve hareket poz tahmini algoritmalarından hesaplanan birkaç nokta konumundan geçer.



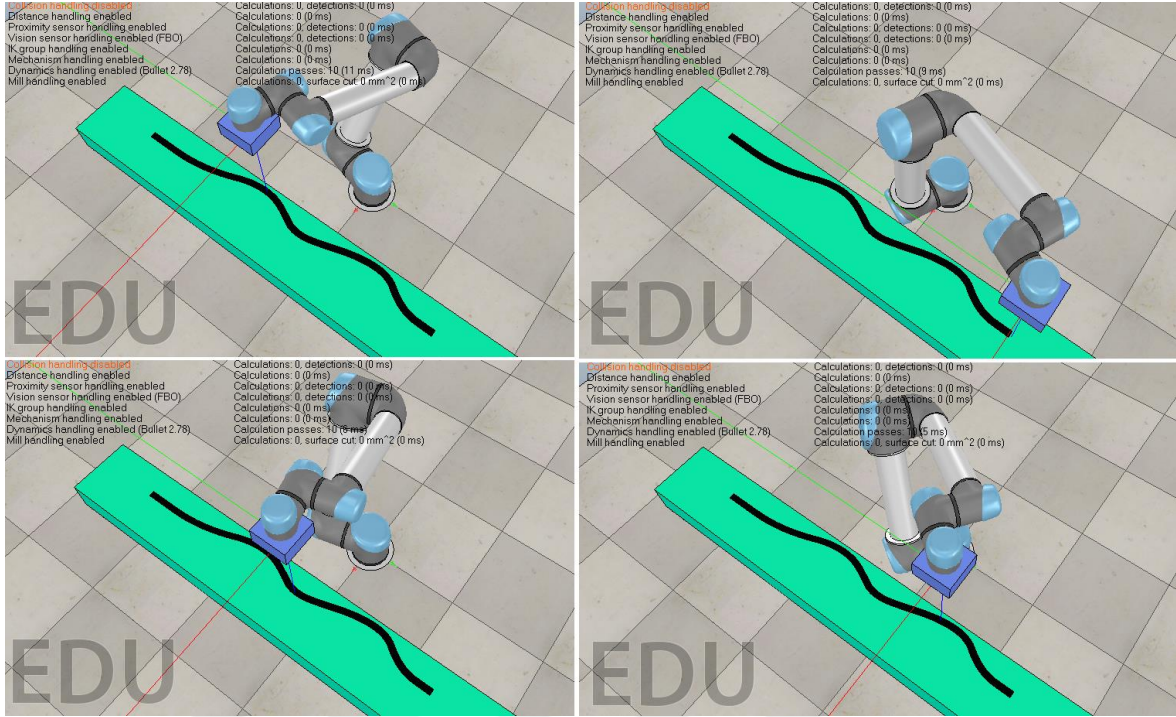
(a)



(b)

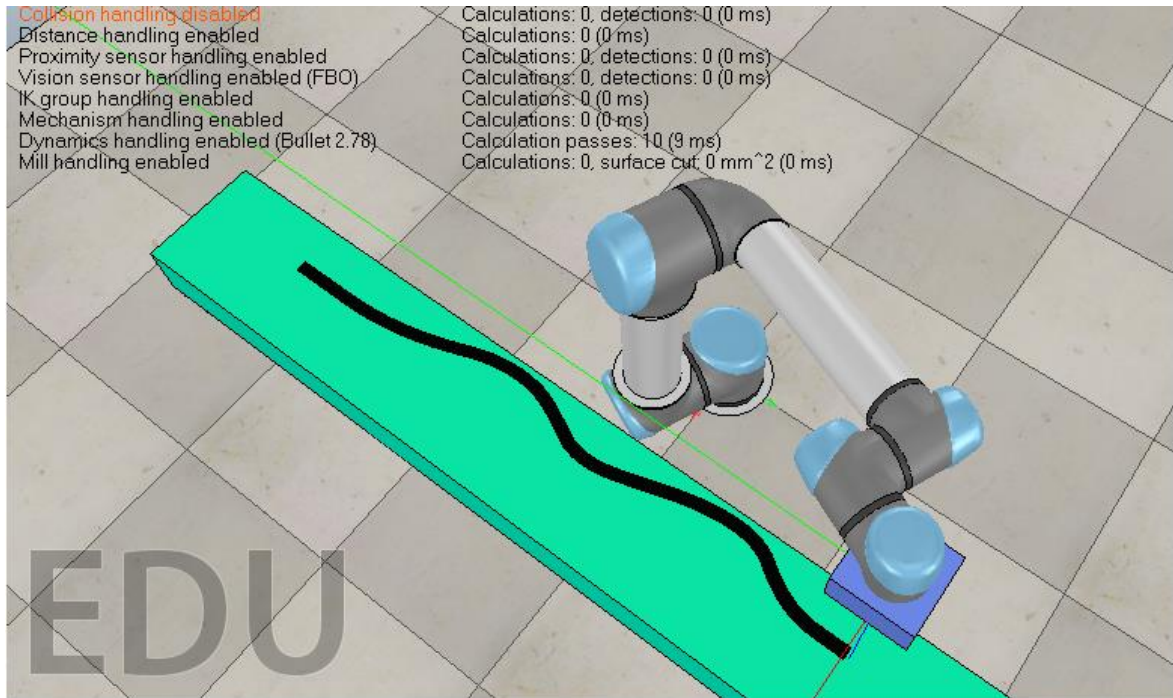
Şekil 5.6. TCP 'nin (a) Birinci ve (b) İkinci İterasyonların Yörüngeleri.





Şekil 5.7. Yol Boyunca Farklı Konumlarda Robot

Şekil 5.7’de yolu takip eden robotu farklı konumlarda göstermektedir. Son iterasyon, robota geri bildirim olmadığında meydana gelir ki bu, robotun kamerasının çektiği fotoğraftaki yolun sonuna ulaştığı anlamına gelir. Şekil 5.8, yolun sonunda TCP’yi gösterir.



Şekil 5.8. Son Konumdaki Yolun Sonunda TCP.



Bu bölümde simülasyonları görüntüledik. Tartışılacak pek çok nokta vardır, çünkü sonuçların bazıları tam olarak beklendiği gibi olmayabilir. Tezin ilk ödevi olarak uygulanan ters kinematik, iyi ele alınmalı, homojen dönüşümün dönüş matrisinin küçük bir varyasyonu, TCP'nin pozisyonu değişmese de eklem değerlerinin değişmesine neden olabilir. Bazı dönüşlerde ters kinematik hesaplaması hatayla, diğerleri için gerçek değerlerle sonuçlanabilir ancak robot, bağlantı boyutları nedeniyle veya kutunun kenarları ve köşeleriyle çarpışabilir. TCP'yi tanımlanmış konuma getiren sekiz olası çözümden herhangi bir çözümün atlandığı görülmüştür.

Toplama noktaları oluşturmak, çarpışmayı önlemek için kullanılan çözümlerden biridir ve çok başarılı olmuştur, ancak TCP'nin bu görevi yerine getirmesi için çok zamana ihtiyacı vardır. Görme aşamasında kamera oryantasyonu iyi ayarlanmalıdır, her bir özellik konumunda kamera oryantasyonu görüntüyü sahnede tutmak için değişecektir. TCP'ye bağlı olan kamera, birinin yönünün diğerini etkilediği anlamına gelir. Simülasyonlarımızda, kamerayı FoV'daki yolu koruyan yönde tutmak için bir oran faktörü tanımladık. Poz tahmini, BPVS'nin temel görevidir. Algoritmamızda tahmin, bozulma görüntüsüne sahip olmamız durumunda daha zor olabilen görüntü özelliğine dayanmaktadır. Görüntü işleme teknikleri mevcuttur, ancak yine de bazı hatalar meydana gelebilir ve görüntü uzayındaki özellik konumunu etkileyebilir ve bu da uzaydaki konum tahminini etkileyebilir.

Görsel servolama aşamasında robota geri bildirim ve poz tahminlerinin yürütülmesi beklenenden daha uzun zaman alır. Ayrıca, Matlab'ın TCP hareketlerinde gecikmeye neden olan resimleri simüle etmek için çok zaman ayırması da dikkat çekicidir. Her tekrarda tek bir görüntüden birçok özellik elde etmeyi sağlayan algoritmayı oluşturmayı seçtik. Bu nedenle her bir resimden birçok pozisyon elde ettik. Bu durum, her yinelemede döngüye beslenecek bir konuma sahip olduğundan dolayı çok daha iyi çalışmaktadır.

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tezde, iki ana konu üzerinde çalışılmıştır: UR5 ve Dolaylı IBVS kinematiğinin gelişimi ki bunlar UR5 robotunun manipulatörü için tasarlanmıştır. MATLAB aracı ve V\_REP ortamını kullanarak robot manipulatörünü simüle ettik.

Bu tezde işlenen görüş sistemi, genel olarak otomatik makineler, robotlar ve endüstriyel makinelerin zekasını geliştiren nispeten yeni bir teknolojidir. Gözetim, kalite kontrol, izleme gibi farklı uygulamalarda bu görüş sistemi kullanılabilir. Bu tez, endüstriyel robotik kol sistemindeki görüş tekniklerinin kullanımına ve görsel geribildirim dayanan robot kol hareketlerine odaklanmaktadır. Bu görsel servolama olarak da adlandırılır. Araştırmacılar görsel servolamanın görevlerini yerine getirmek için çeşitli yöntemler geliştirmişlerdir ve V\_REP gibi çeşitli simülasyon ortamları gerçek robotu kullanmadan önce uygulama öncesi için de kullanılabilir. Bu tezde, endüstriyel robotik kol sistemindeki görüş tekniklerinin kullanımına ve görsel geribildirim dayanan robot kol hareketlerine odaklanmaktadır. Bu görsel servolama olarak da adlandırılır. Araştırmacılar görsel servolamanın görevlerini yerine getirmek için çeşitli yöntemler geliştirmişlerdir ve V\_REP gibi çeşitli simülasyon ortamları gerçek robotu kullanmadan önce uygulama öncesi için de kullanılabilir.

Bu tez çalışmasında birinci alt görev, kinematiği incelemektir, geliştirilen kinematiğin iyi performansları olduğu kanıtlanmıştır, ancak bazı durumlarda endüstriyel robotun kısıtlanması veya en azından sisteme bazı şartlar getirmesi gerekmektedir. Koşullar robot çalışma alanına ve ayrıca boyutsal bağlantılara bağlıdır. Sonuçlar, ters kinematik kavramının endüstriyel robot çalışma alanı içinde tanımlanan son efektör pozisyonu için oldukça iyi çalıştığını kanıtlamaktadır. Simülasyon tarafında V-REP, harici bir uygulama ve uzak bir donanımdan simülasyonu kontrol etmeyi sağlayan uzak API sunar. Uzak API, Matlab programından çıkartılabilen çok sayıda özel ve genel işlev tarafından oluşturulur. Fonksiyonları, gecikme ve ağ yükünü büyük ölçüde azaltacak V-REP ile etkileşim halindedir. Uzak API, bir veya daha fazla harici uygulamanın senkronize olan veya olmayan uzaktan bir kumandada V-REP ile etkileşime girmesine izin verir.

Bu çalışmada dolaylı görüntü tabanlı görsel servolama, endüstriyel robot için tasarlanmıştır. Görsel servolama, robotun görme geri bildirimi ile kontrol edildiği anlamına gelir, normalde ise robotlar, kapalı döngü kontrolü oluşturmak için kameralar tarafından kontrol edilir. Dolaylı IBVS, inşa edilmesi zor görsel servolama sistemlerinden biridir. Özellik tanıma için yüksek algoritmalar ve görüntü işleme için daha az hesaplama gerektiren

poz tahmini gerekir. Burada kullanılan orantı kontrolü, bazı performansları belli bir seviyede kanıtlamaktadır. Çeşitli görüntü işleme teknikleri, görüntüyü ham durumdan istenen çıktıya getirir. Görüntü iyileştirme işleminden, kenar algılamasına ve istenmeyen kenarların giderilmesine kadar olan işlemler görüntü işleminde yapılır. Sonuçlar görüntü işleme algoritmalarının güvenilirliğini kanıtlasa da, çok zaman alır ve sonunda tüm uygulama sürecini geciktirir.

Bu tez genel amacına ulaşmıştır. Endüstriyel robot TCP, istenen yolu belirli bir mesafede takip eder. Gözlenen TCP yörüngesi, simülasyonun iyi performansını kanıtlamıştır. Bahsedildiği gibi, robotun belirli bir derinlikte, örneğin güç hattı veya boru araştırmasında bulunması için birden fazla uygulama vardır, bu nedenle bu çalışmanın başarısı birçok uygulama için büyük avantaj sağlamaktadır.

Bu tez sürecinde, bu teknolojiyi bir üst performans seviyesine getirmek için gelecekte geliştirilebilecek noktalar fark edilmiştir. Görüntü işlem süresi, gelecekte çalışılabilecek başlıca sorunlardan biridir. Algoritmaların iyi çalıştığı doğrudur, ancak istenen çıktıya ulaşmak için çeşitli yöntemler ve algoritmalar devreye girer ve Matlab her adımda görüntüyü simüle etmek için çok zaman harcar, dolayısıyla Matlab'dan daha hızlı bir ortam önerilir. Yol takip uygulamaları robot kolunun çok esnek olmasını gerektirir çünkü yol boyunca karmaşık şekiller olabilir, bu nedenle gerekli görevi daha fazla esneklikle gerçekleştirmek için 7'den fazla DOF yedek robot kolunun kullanılması tavsiye edilir. Eklem limit kaçınması, robotun çarpmasını önleme ve engellerden kaçınması gibi kontrol seviyesindeki ek alt çalışmalar da gelecekteki çalışmalara eklenebilir. Ayrıca bu durumda, ters kinematiği bulmak için pseudo ters çevirme yöntemi kullanmaktan ziyade başka yöntemler tavsiye edilebilir, çünkü pseudo ters çevirme yöntemini kullanmak daha fazla matematik hesaplamalarına yol açacaktır. Ayrıca denetleyici, doğruluğu artırabilen ve hatayı en aza indirgeyebilen AI algoritmaları gibi yüksek performanslı algoritmalar kullanmak için genişletilebilir.

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Asada, M., T. Tanaka, K. Hosoda, 1999, Visual tracking of unknown moving object by adaptive binocular visual servoing, in Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, MFI, IEEE/SICE/RSJ International Conference, pp. 249–254.
- Borg, J.M., M. Mehrandezh, R. G. Fenton, B. Benhabib, 2002, Navigationguidance-based robotic interception of moving objects in industrial settings, Journal of Intelligent Robotics Systems, vol. 33, no. 1, pp. 1–23.
- Bradski, G., A. Kaehler, 2008, Learning OpenCV: Computer vision with the OpenCV Library, 2<sup>nd</sup> ed, [O'Reilly Media](#).
- Burger, W., M. J. Burge, 2009, Principles of Digital Image Processing: Fundamental Techniques. Springer-Verlag.
- Buttazzo, G., B. Allotta, F. Fanizza, 1994, Mousebuster: a robot for real-time catching, Control Systems, IEEE, vol. 14, no. 1, pp. 49–56.
- Cai, C., N. Somani, A. Knoll, 2016, Orthogonal Image Features for Visual Servoing of a 6 DOF Manipulator with Uncalibrated Stereo Cameras, IEEE Transactions on robotics,VOL. 32, NO. 2.
- Canny, J., 1986, A computational approach to edge detection, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI), vol. 8, no. 6, pp. 679-698.
- Chang, W.-C., M.-YCheng, H.-J. Tsai, 2017, Image feature command generation of contour following tasks for SCARA robots employing Image-Based Visual Servoing-A PH spline approach, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 44, pp57–66.
- Chaumette, F., 1998, Potential problems of stability and convergence in image based and position based visual servoing, in The Confluence of Vision and Control, D. Kriegman, G. Hager, and A. Morse, Eds. LNCIS Series, No. 237, SpringerVerlag, pp. 66–78.
- Chaumette, F., ve S. Hutchinson, 2006, Visual servo control. i. basic approaches, Robotics Automation Magazine, IEEE, vol. 13, no. 4, pp. 82–90.
- Chen, H., J. Li, X. Zhang, ve Z. Deng, 2005, Application of visual servoing to an x-ray based welding inspection robot, in Control and Automation, ICCA, International Conference, Vol. 2, pp. 977–982.

### KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Chen, Q., S. Zhu, X. Wang, ve W. Wu, 2012, Analysis on an uncalibrated image based visual servoing for 6 dof industrial welding robots, in Mechatronics and Automation, ICMA, International Conference, pp. 2013–2018
- Chenchen, L., S. Fulin, W. Haitao, G. Jianjun, 2014, A Camera Calibration Method for Obstacle Distance Measurement based on Monocular Vision, Fourth International Conference Communication Systems and Network Technologies.
- Chesi, G., K. Hashimoto, 2002, Static-eye against hand-eye visual servoing, in Decision and Control, CDC, 41st IEEE Conference on, vol. 3, pp. 2854–2859.
- Clarke, T. A., J. G. Fryer, 1998, The development of camera calibration methods and models, The Photogrammetric Record, vol. 16, no. 91, pp. 51–66.
- Coppelia Robotics, 2016, V-REP User Manual, [http://www.coppeliarobotics.com/helpFiles/en/remoteApiModu Operandi.htm](http://www.coppeliarobotics.com/helpFiles/en/remoteApiModuOperandi.htm). erişim tarihi: 20.05.2016
- Corke, P., ve G. Hager, 1998, Vision based robot control, in Control Problems in Robotics and Automation, ser. Lecture Notes in Control and Information Sciences, B. Siciliano and K. Valavanis, Eds. Springer Berlin Heidelberg, vol. 230, pp. 177–192.
- Corke, p., ve S. Hutchinson, 2001, A new partitioned approach to image based visual servo control, Robotics and Automation, IEEE Transactions, vol. 17, no. 4, pp. 507–515.
- Corke, P.I., 2011, Robotics, Vision and Control, Springer.
- Craig, J. J., 2005, Introduction to Robotics: Mechanics and Control”, Pearson/Prentice Hall Upper Saddle River, NJ, USA.
- Craig, John J., 2005, Introduction to Robotics, Mechanics and Control” Third Edition, Pearson Prentice Hall
- Danahy, E. E., S. Agaian, K. Panetta, 2006, Directional edge detection using the logical transform for binary and grayscale images, Proc. SPIE Defence and Security Symposium: Mobile Multimedia/image Processing for Military and Security Applications, vol. 625008.
- Deng, L., 2004, Comparison of image based and position-based robot visual servoing methods and improvements, Ph.D. dissertation, Waterloo, Ont., Canada.

### KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Deng, L., F. Janabi, W. Wilson, 2002, Stability and robustness of visual servoing methods, in Robotics and Automation, ICRA, IEEE International Conference on, vol. 2, pp. 1604-1609.
- du Preez, R., 2014, 3D 6-DOF SERIAL ARM ROBOT - Kinematics and Implementation in LinuxCNC,
- Elmabrouk, A., A. Aggoun, 2005, A new edge detection algorithm, Computational Intelligence and Security: International Conference, CIS 2005, Xi'an, China, December.
- Faugeras, O. D., 1992, What can be seen in three dimensions with an uncalibrated stereorig, presented at the Proceedings of the Second European Conference on Computer Vision.
- Fernandes, D., P. Lima, 1998, A testbed for robotic visual servoing and catching of moving objects, in Electronics, Circuits and Systems, IEEE International Conferenceon, vol.2, pp. 475–478.
- Fetic, A., D. Juric, D. Osmankovic, 2012, The procedure of a camera calibration using cameracalibration toolbox for matlab, MIPRO, 35th International Convention, pp. 1752–1757.
- Flandin, G., F. Chaumette, E. Marchand, 2000, Eye-in-hand/eye-to-hand cooperation for visual servoing, in Robotics and Automation, ICRA, IEEE International Conference on, vol. 3, pp. 2741–2746.
- Gans, N., S. Hutchinson, 2002, A switching approach to visual servo control, in Intelligent Control, IEEE International Symposium, pp. 770–776.
- Ge, L., Z. Jie, 2007, A real-time stereo visual servoing for moving object grasping based parallel algorithms, in Industrial Electronics and Applications, ICIEA, 2nd IEEE Conference, pp. 2886–2891.
- Ghanbari, A., W. Wang, C. Hann, J. Chase, ve X. Chen, 2009, Cell image recognition and visual servo control for automated cell injection, in Autonomous Robots and Agents, ICARA, 4th International Conference, pp. 92–96.
- Gonzalez, R. C., R. E. Woods, 2011, Image processing. Pearson Prentice Hall, 3 ed.

### KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Hager, G.D., et al., 1995, Robot hand-eye coordination based on stereo vision, Control Systems, IEEE, vol. 15, pp. 30-39.
- Hashimoto, K., 2003, A review on vision-based control of robot manipulators, Advanced Robotics, vol. 17, pp. 969–991.
- Hawkins, K, P., 2013, Analytic Inverse Kinematics for the Universal Robots UR-5/UR-10 Arms, Technical report, Georgia Institute of Technology Publications.
- Hill, J., ve Park, W. T., 1999, Real time control of a robot with a mobile camera, in 9<sup>th</sup> ISIR
- Hutchinson, S., Hager, G. ve Corke, P., 1996, A tutorial on visual servo control, Robotics and Automation, IEEE Transactions on, vol. 12, no. 5, pp. 651–670.
- Jahne, B., 2004, Practical Handbook on Image Processing for Scientific and Technical Applications, CRC Press, Second Edition.
- Janabi-Sharifi, F., 2002, Visual Servoing: Theory and Applications, OptoMechatronic Systems Handbook.
- Jevtic, A., I. Melgar, D. Andina, 2009, Ant based edge linking algorithm, Proceedings of 35<sup>th</sup> Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2009), pp. 3353-3358.
- Keshmiri, M., M. Keshmiri, A. Mohebbi, 2010, Augmented online point to point trajectory planning, a new approach in catching a moving object by a manipulator, Control and Automation, ICCA, 8th IEEE International Conference, pp. 1349–1354.
- Kim Mathiassen, K., Jørgen Enger Fjellin, Kyrre Glette , Per Kristian Hol and Ole Jakob Elle, 2016, Supplementary Material: An Ultrasound Robotic System Using the Commercial Robot UR5, Frontiers in Robotics and AI.
- Kragic, D., H. I. Christensen, 2002, Survey on visual servoing for manipulation, Computational Vision and Active Perception Laboratory, Tech. Rep., 2002.
- Krupa, A., C. Doignon, J. Gangloff, ve M. de Mathelin, 2002, Combined image based and depth visual servoing applied to robotized laparoscopic surgery, in Intelligent Robots and Systems, 2002. IEEE/RSJ International Conference, vol. 1, pp. 323–329.

### KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Law, M, W, K., A. C. S. Chung, 2007, Weighted local variance-based edge detection and its application to vascular segmentation in magnetic resonance angiography, IEEE Transactions on Medical Imaging, vol. 26, no. 9, PP. 1224-1241.
- Li, H., M. Jin, L. Zou, 2008, A new binocular stereo visual servoing model, in Computational Intelligence and Industrial Application, PACIIA, Pacific-Asia Workshop on, vol. 1, pp. 461–465.
- Li, Z., W. Xie, ve X. Tu, 2007, Switching control of image based visual servoing with laser pointer in robotic assembly systems, in Systems, Man and Cybernetics, ISIC. IEEE International Conference, pp. 2383–2389.
- Lippiello, V., B. Siciliano, L. Villani, 2005, Eye-in-hand/eye-to-hand multicamera visual servoing, in Decision and Control, European Control Conference, CDC-ECC, 44<sup>th</sup> IEEE Conference on, pp. 5354–5359.
- Liu, S., 2008, Image based visual servoing using improved image moments in 6-dof robot systems, master's thesis, Department of Mechanical and Industrial Engineering, Concordia University.
- Malis, E., 2002, Vision based control invariant to camera intrinsic parameters: stability analysis and path tracking, in Robotics and Automation, ICRA, IEEE International Conference on, vol. 1, pp. 217–222.
- Malis, E., 2004, Visual servoing invariant to changes in camera-intrinsic parameters,” Robotics and Automation, IEEE Transactions on, vol. 20, no. 1, pp. 72–81.
- Malis, E., F. Chaumette, S. Boudet, 2000, Multi-cameras visual servoing, in Robotics and Automation, ICRA, IEEE International Conference on, vol. 4, pp. 3183–3188.
- Mark W. Spong., Seth Hutchinson, M. Vidyasagar, 2004, Robot Dynamics and Control, Second Edition.
- Martinet, P., E. Cervera, 2001, Stacking Jacobians properly in stereo visual servoing, Robotics and Automation, Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference, vol.1. pp. 717-722.
- Masoud, A., M. Bayoumi, 1994, Intercepting a maneuvering target in a multidimensional stationary environment using a wave equation potential field strategy,” in Intelligent Control, IEEE International Symposium, pp. 243–248.



### KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Mezouar, Y., F. Chaumette, 2002, Path planning for robust image based control, Robotics and Automation, IEEE Transactions on, vol. 18, no. 4, pp. 534–549.
- Mlsna, P. A., J. J. Rodriguez, 2009, Gradient and laplacian edge detection, The Essential Guide to Image Processing, 2nd ed, Al Bovik, ed. San Diego, CA: Elsevier, pp. 495-524.
- Muhammad A. Ali., H. Andy Park, C. S. George Lee, 2010, Closed-Form Inverse Kinematic Joint Solution for Humanoid Robots, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.704-709.
- Nagabhushana, S., 2010, Computer vision and Image processing. New Age International Publishers.
- Namiki. A., M. Ishikawa, 2003, Vision-based online trajectory generation and its application to catching, Springer Tracts in Advanced Robotics, vol. 5.
- Nercessian, S., 2009, A new class of edge detection algorithms with performance measure, Master of Science, Tufts University, Electrical Engineering.
- Ng, O.-E., V. Ganapathy, 2009, A novel modular framework for stereo vision, in Advanced Intelligent Mechatronics, AIM, IEEE/ASME International Conference, pp. 857–862.
- P. Akhtar, P, T. J. Ali, M. I, Bhatti, M. A. Muqeet, 2008, A framework for edge detection and linking using wavelets and image fusion, International Congress on. Image and Signal Processing (CISP 2008), Sanya, Hainan, China, pp. 273-277.
- Petrou, M., C. Petrou, 2010, Image Processing: The Fundamentals. John Wiley and sons.
- Qian, J., J. Su, 2002, Online estimation of image jacobian matrix by kalman-bucy filter for uncalibrated stereo vision feedback, in Robotics and Automation, ICRA, IEEE International Conference on, vol. 1, pp. 562–567.
- Rosin, P. L., X. Sun, 2014, Cellular Automata in Image Processing and Geometry. Springer.
- Samadi, D.B., 2012, da Vinci Si robotic system wants to be your surgeon. Available, <http://www.roboticoncology.com>, erişim tarihi: 30.10.2017.

### KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Saxena, R., 2008, High order methods for edge detection and applications, PHD Thesis, Arizona State University, USA.
- Seth, H., Gregory D H., ve Corke, p., et al., 1996, A tutorial on visual servo control. Robotics and Automation., IEEE Transactions on, 12(5), pp.651–670,
- Shapiro, L., G. Stockman, 2000, Computer Vision, prentice-hall.
- Shirai, Y., ve H. Inoue, 1973, Guiding a robot by visual feedback in assembling tasks, Pattern Recognition, vol. 5, no. 2, pp. 99–108.
- Sobel, L., G. Feldman, 1973, A 3x3 isotropic gradient operator for image processing, Pattern Classification and Scene Analysis, pp. 271-272. (unpublished)
- Song Y., M. Li., L. Sun., ve J. Ji, 2005, Global visual servoing of miniature mobile robot inside a micro-assembly station, in Mechatronics and Automation, IEEE International Conference, Vol. 3, pp. 1586–1591.
- Spong, M. W., M. Vidyasagar, 2008, Robot Dynamics and Control, John Wiley & Sons.
- Steven, W. Smith., 1998, The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing, California technical publishing,
- Sutanto, H., R. Sharma, V. Varma, 1997, Image based autodocking without calibration, in Robotics and Automation, IEEE International Conference on, vol. 2, pp. 974–979.
- Szeliski, R., 2010, Computer Vision: Algorithms and Applications. Springer.
- Szeliski, R., 2011, Computer Vision Algorithms and Applications, Springer.
- Topal, C., C. Akinlar, Y. Genc, 2010, Edge drawing: A heuristic approach to robust real time edge detection, IEEE 20th International Conference on Pattern Recognition (ICPR), pp. 2424—2427.
- Tsai, R., 1987, A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3d machine vision metrology using off-the-shelf tv cameras and lenses, Robotics and Automation, IEEE Journal of, vol. 3, no. 4, pp. 323–344.
- Tsai, R., R. Lenz, 1989, A new technique for fully autonomous and efficient 3d robotics hand/eye calibration, Robotics and Automation, IEEE Transactions on, vol. 5, no. 3, pp. 345–358.

### KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Tsai, R.Y., 1987, A Versatile Camera Calibration Technique for High Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-Shelf TV Cameras and Lenses, IEEE J. Robotics and Automation, vol. 3, no. 4, pp. 323-344.
- Universal Robots., 2016, Universal Robots 5 Technical specifications, <https://www.universalrobots.com/media/50588/ur5en.pdf>, erişim tarihi: 30.10.2017
- Wei, G.-Q, K. Arbter, ve G. Hirzinger, 1997, Real-time visual servoing for laparoscopic surgery. controlling robot motion with color image segmentation, Engineering in Medicine and Biology Magazine, IEEE, vol. 16, no. 1, pp. 40–45.
- Ye, S., et al., 2012, Study on intelligent visual servoing of space robot for cooperative target capturing, in Information and Automation (ICIA), International Conference, pp. 733-738.
- Ying Wang, Y., 2016, A Visual Servoing Approach to Human-Robot Interactive Object Transfer, pp.41-60.
- Zhang, Z., 1999, A Flexible New Technique for Camera Calibration, Microsoft Research, pp.121.
- Zhang, Z., 1999, Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations, Computer Vision, 1999. The Proceedings of the Seventh IEEE International Conference, vol. 1, pp. 666–673.
- Zhang, Z., 2004, Camera calibration with one-dimensional objects, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, pp.892-899.
- Zhao, Y., W.-F. Xie, X.-W. Tu, 2011, Multiple cameras visual servoing used for large scale 3d positioning,” in Intelligent Control and Automation, WCICA, 9th World Congress on, Jun. 2011, pp. 462–467
- Zhu, Q., M. Payne, V. Riodan, 1996, Edge linking by a directional potential function (dpf), Elsevier Image and Vision Computing, vol. 14, pp. 59-70.