

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ \* FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**OTOMOTİV ENDÜSTRİSİNDE KONVANSİYONEL ROBOTİK  
HATLARDA GÖRÜNTÜ İŞLEME TABANLI KONTROL**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Cengiz DENİZ**

**Anabilim Dalı: Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği**

**Danışman: Yrd. Doç. Dr. Mustafa ÇAKIR**

**KOCAELİ, 2011**

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ \* FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**OTOMOTİV ENDÜSTRİSİNDE KONVANSİYONEL ROBOTİK  
HATLARDA GÖRÜNTÜ İŞLEME TABANLI KONTROL**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Cengiz DENİZ**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 13 HAZİRAN 2011**

**Tezin Savunulduğu Tarih: 03 AĞUSTOS 2011**

**Tez Danışmanı  
Yrd. Doç.Dr. Mustafa ÇAKIR**

  
(.....)

**Üye  
Doç.Dr. Salman KURTULAN**

  
(.....)

**Üye  
Doç.Dr. Erhan BÜTÜN**

  
(.....)

**KOCAELİ, 2011**

## **ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR**

Günümüzde, endüstriyel işletmelerde sürekli iyileştirme artık bir felsefe haline gelmiş durumdadır. Sürekli iyileştirme felsefesi doğrultusunda daha kaliteli ve düşük çevirim sürelerinde imalat yapmak adına endüstriyel robotların kullanımı gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır. Özellikle seri imalatın vazgeçilmez ekipmanı haline gelmekte olan robotların bulunduğu hücre ve hatlarda yaşanan sorunlar ve bunları ortadan kaldırmak için sürekli yeni teknik ve uygulamalar geliştirmek her zaman güncelliğini korumuştur. Bu bağlamda konvansiyonel robotik imalat hatlarında kullanılmakta olan kontrol tekniğine yeni bir bakış açısı kazandırmak adına kamera tabanlı bir kontrol sistemi oluşturulmuş ve robotik uygulamalara dâhil edilmiştir.

Tez çalışmalarımın her aşamasında desteğini esirgemeyip değerli fikir ve katkılarıyla ışık tutan ve yönlendiren danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Mustafa ÇAKIR'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	iii
TABLolar DİZİNİ.....	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	v
ÖZET .....	vi
İNGİLİZCE ÖZET .....	vii
1. GİRİŞ .....	1
1.1. Tez Konusu ile İlgili Yapılan Çalışmalar.....	1
2. OTOMOTİV ENDÜSTRİSİ .....	3
2.1. Otomotivde İmalat Sistemi.....	4
2.2. Konvansiyonel Robotik İmalat Hatları .....	6
2.3. Konvansiyonel Robotik İmalat Hatlarında Yaşan Sorunlar .....	7
3. ROBOTİK SİSTEMLER .....	10
3.1. Endüstriyel Robotların Sınıflandırılması .....	11
3.2. Serbestlik Derecelerine Göre Robotlar .....	12
3.3. Kartezyen Robot .....	12
3.4. Silindirik Eklemlili Robot .....	13
3.5. Küresel Eklemlili Robot .....	13
3.6. SCARA Robot .....	14
3.7. Eklemlili Robot.....	15
4. ROBOT KİNEMATİĞİ .....	16
4.1. İleri Kinematik.....	16
4.2. Ters Kinematik .....	24
4.3. Kinematik Tabanlı Robot Konfigürasyon Uygulaması.....	28
4.3.1. Genel Kullanım.....	29
4.3.2. Konfigürasyon Sekmesi .....	30
4.3.3. Eksen Sınırları Sekmesi.....	32
4.3.4. Çalışma Uzayı Sekmesi.....	33
4.3.5. Çizim/Trend Sekmesi .....	34
4.3.6. Görsel Sekmesi .....	35
4.3.7. Çevirim Dışı Programlama.....	35
5. KAMERA DESTEKLİ ROBOTİK UYGULAMA.....	37
5.1. Sistemin Genel Yapısı ve Çalışma Prensibi .....	37
5.2. Kamera Uygulaması.....	39
5.3. Robot Yönelim ve Oryantasyonu .....	42
5.4. Robotik Al-Bırak Uygulaması.....	44
5.5. Kinematik Zincir Güvenlik Modeli .....	46
5.6. Kameranın Otomotiv Endüstrisinde Kullanılabileceği Yerler .....	50
6. SONUÇ VE ÖNERİLER .....	53
KAYNAKLAR.....	54
EKLER.....	57
ÖZGEÇMİŞ.....	63

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1: Otomotivde imalat akış yapısı .....	5
Şekil 2.2: Gövde imalat atölyesinde robotik hatlar .....	5
Şekil 2.3: Geleneksel kontrolde çevirim dışı programlama .....	6
Şekil 2.4: Geleneksel kontrolde bir robotik istasyon .....	7
Şekil 2.5: Kamera tabanlı robotik ölçüm istasyonu .....	9
Şekil 2.6: Robotik al-bırak uygulaması .....	9
Şekil 3.1: Seri kol yapısına sahip Kuka marka bir endüstriyel robot .....	11
Şekil 3.2: Paralel kol yapısına sahip ABB marka bir endüstriyel robot .....	11
Şekil 3.3: Kartezyen yapıya sahip Schunk marka bir endüstriyel robot .....	12
Şekil 3.4: Silindirik yapıya sahip ST Robotics marka bir endüstriyel robot .....	13
Şekil 3.5: Küresel robot .....	14
Şekil 3.6: SCARA yapıya sahip EPSON marka bir endüstriyel robot .....	14
Şekil 3.7: Mafsal yapıya sahip ABB marka bir endüstriyel robot .....	15
Şekil 4.1: Rotasyonun açı-eksen gösterimi .....	18
Şekil 4.2: Altı serbestlik derecesine sahip ABB IRB1600 robot modeli .....	19
Şekil 4.3: Endüstriyel robot eğitim stüdyosu (IRT) .....	29
Şekil 4.4: Eksen sınırlaması .....	30
Şekil 4.5: ABB IRB 6650S 125/3.5m robot ölçüleri sınırlaması .....	31
Şekil 4.6: Gerçek robot verisi ile oluşturulan programın karşılaştırılması .....	32
Şekil 4.7: IRT programında eksen sınırlama .....	32
Şekil 4.8: IRT programında çalışma uzayı belirleme .....	34
Şekil 4.9: Eksen değişkenleri belirleme .....	34
Şekil 4.10: Program sahne ayarları .....	35
Şekil 4.11: Çevirim dışı programlama modülü .....	36
Şekil 5.1: Sistemin Modeli .....	37
Şekil 5.2: Test ortamı .....	38
Şekil 5.3: Sistemin veri akış blok diyagramı .....	39
Şekil 5.4: Kamera-nesne ilişkisi .....	40
Şekil 5.5: Kare ve daire nesnelere için VS120 ekran görüntüsü .....	41
Şekil 5.6: Robot ve kameranın koordinat sistemi .....	42
Şekil 5.7: Sistem veri akış şeması .....	43
Şekil 5.8: Nesne bırakma yuvaları .....	45
Şekil 5.9: Nesnenin yuvaya yerleşim hassasiyeti .....	46
Şekil 5.10: Ortam aydınlatmasından bağımsız bir çalışma .....	46
Şekil 5.11: Tasarlanan kinematik zincir güvenlik kontrol sistemi akış diyagramı .....	47
Şekil 5.12: Kinematik zincir blok diyagramı .....	48
Şekil 5.13: Uygun olmayan iş parçası konumları .....	49
Şekil 5.14: Fren hortumu robotik test düzeneği çevirim dışı modeli .....	51
Şekil 5.15: Kamera tabanlı fren hortumu robotik test düzeneği .....	52
Şekil 5.16: Fren hortumunun yol şartlarına göre benzetimi .....	52

## **TABLÖLAR DİZİNİ**

Tablo 2.1: Üretimde robotların sağladığı avantaj ve dezavantajlar.....	4
Tablo 2.2: İmalat hatlarında yaşanan robot problemleri.....	8
Tablo 5.1: Otomotiv ana ve yan sanayisinde kameranın kullanılabileceği yerler.....	50

## **SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ**

- DOF: Serbestlik derecesi (Degree of freedom)  
TCP: İşlem Ucu Merkezi (Tool center point)  
PLC : Programlanabilir Mantık Denetleyici (Programmable Logic Controller)  
PPP: Prizmatik Prizmatik Prizmatik (Prismatic Prismatic Prismatic)  
RPP: Döner Prizmatik Prizmatik (Revolute Prismatic Prismatic)  
RRP: Döner Döner Prizmatik (Revolute Prismatic Prismatic)  
SCARA: Selektif uyumlu mafsallı yapıya sahip robot (Selective Compliant Articulated Robot Assembly)  
IRT: Endüstriyel Robot Eğitim Aracı (Industrial Robot Tool Training)  
IRB: Endüstriyel Robot (Industrial robot)  
SCL: Yapısal Kontrol Dili (Structured Control Language)  
ROI: Region Of Interest

# OTOMOTİV ENDÜSTRİSİNDE KONVANSİYONEL ROBOTİK HATLARDA GÖRÜNTÜ İŞLEME TABANLI KONTROL

Cengiz DENİZ

**Anahtar Kelimeler:** Endüstriyel Robot, PLC, Görsel Kontrol, Model Tabanlı Kontrol, Kinematik, Quaternion.

**Özet:** Bu çalışmada, altı serbestlik derecesine sahip endüstriyel bir robotun işlem yapması gereken noktalara hareketi esnasındaki konum ve oryantasyonu, herhangi bir nokta öğretme metodu kullanılmadan bir kameradan elde edilen veriler robot kinematik modeline göre işlenerek sağlanmıştır. Endüstride, kamera uygulaması içeren kontrol sistemlerinde ürünün güvenilirliği açısından yaygın olarak tercih edilen ve raf üstü ekipman olarak adlandırılan bir smart (akıllı) kamera kullanılmıştır. Smart kameradan alınan veriler gerçekleştirilen robotlu uygulamada robotun kinematiği için anlamlı bir veri formatına dönüştürülmesi sağlanmıştır. Robot'un işlem noktalarındaki konum ve oryantasyonu için kinematik bağıntılarını hesaplamak ve sistemin kontrolünü sağlamak için PLC (Programlanabilir Mantıksal Denetleyici) kullanılmıştır. PLC, kameradan aldığı verileri işleyerek robotun koordinat sistemine uygun bir formata dönüştürdükten sonra robot'a verileri göndermektedir. Bu veri alışverişi robot ve PLC'nin karşılıklı onay sistemi ile gerçekleştirilmektedir. Robot-PLC-kamera birleşiminden oluşan uygulamalarda sistemi standardize etmek için bir model geliştirilmiştir. Geliştirilen uygulama sayesinde, kamera tabanlı kontrol uygulamalarındaki çevresel bozucu etkenler dikkate alınarak robot'un işlem parçalarını 0.4mm'lik toleranslara sahip yuvalara bırakma işlemi başarı ile gerçekleştirilmiştir.



# IMAGE PROCESSING BASED CONTROL IN CONVENTIONAL ROBOTICS LINES IN AUTOMOTIVE INDUSTRY

Cengiz DENİZ

**Keywords:** Industrial Robot, PLC, Vision Control, Model Based Control, Kinematic, Quaternion.

**Abstract:** In this study, a control system which is smart camera based and PLC (programmable logic control) supervised for industrial robotics application is presented. In the application, an industrial robot with six DOF (degrees of freedom) is enabled to control TCP's (Tool Center Point) position and orientation in its workspace without using any teaching method. The position and orientation data of the robot are calculated by the PLC using coordinate data which comes from a camera application. In the designed control system, firstly camera data (x, y, z and rotation) related process is sent to PLC and this PLC converts camera data to robot workspace data format according to the robot kinematics. This process control is implemented in the PLC and all data transmission between the camera-PLC-robot is performed based on the handshake method. An industrial camera which called smart camera is preferred due to reliability in industry. A process which has 0.4mm tolerances was carried out with success in thanks to developed camera based robotics pick and place application.

## 1. GİRİŞ

Günümüzde, endüstrisinde sürekli iyileştirme artık bir felsefe haline gelmiş durumdadır. Özellikle seri imalatın vazgeçilmez ekipmanı haline gelmekte olan robotların bulunduğu hücre ve hatlarda yaşanan sorunlar ve bunları ortadan kaldırmak için sürekli yeni teknik ve uygulamalar geliştirmek her zaman güncelliğini korumuştur. Bu bağlamda konvansiyonel robotik hatlarda kullanılmakta olan kontrol tekniğine yeni bir bakış açısı kazandırmak adına kamera tabanlı bir kontrol yapısı oluşturulmuş ve robotik bir uygulamaya entegre edilmiştir. Bu çalışmada, imalat endüstrisindeki konvansiyonel robotik hatlarda kullanılmakta olan kontrol sistemlerinin yerine kamera tabanlı kontrol sistemi hedeflenmiştir. Özellikle kamera tabanlı robotik uygulamalar için standart nokta öğretme metotları kullanılmadan kamera verisini robot kinematiğine uygun bir veri formatına çevirerek robotu gerekli işlem noktalarına göndermesi hedeflenmektedir. Bu tez çalışması, “00718.STZ.2010-2” nolu San-Tez projesi kapsamında desteklenmektedir.

### 1.1. Tez Konusu ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Endüstriyel robotların yoğun olarak kullanıldığı seri imalat hatlarında, öncelikli ve en büyük öneme sahip işlerin başında kalite ve düşük imalat çevirim süresi gelmektedir. Ürün kalitesini arttırmak ve imalat çevirim süresini düşürmek için imalat hatlarında çeşitli kontrol ve otomasyon uygulamaları geliştirilmektedir. Geliştirilmekte olan bu uygulamalarda son zamanlarda görsel kontrol tekniği [1-5, 9] kullanılarak çözümler oluşturulmaktadır. Görsel kontrol tekniğinde genellikle model tabanlı yada resim tabanlı olmak üzere iki farklı metot kullanılmaktadır[2-9]. İmalat hatlarında kullanılan en yoğun uygulamalardan birisi olan bant üstü veya müstakil al-bırak operasyonları için gerçekleştirilen kontrol ve otomasyon uygulamalarına görsel tabanlı kontrol dâhil edilerek farklı çözümler üretilmeye çalışılmaktadır [6, 10-12]. Makine-insan etkileşiminin çok fazla olduğu montaj hatlarında kamera tabanlı kontrol sistemleri sayesinde daha verimli ve esnek prosesler geliştirilmiştir [13]. Endüstride, görüntü işleme uygulaması içeren kontrol sistemlerinde ürünün

güvenilirliği açısından smart kameralar tercih edilmektedir. Akıllı kamera uygulamalarında veya standart bir kamera uygulamasında kameradan alınan verilerin robotik bir uygulamada robotun kinematiği için anlamlı bir veri formatına dönüştürülmesi gerekmektedir [3, 8, 11, 14]. Robotik imalat hatlarında yaşanan en yaygın sorunlardan birisi olan robot kalibrasyon problemini çözümü için görüntü işleme tabanlı bir sistem sayesinde robot kalibrasyonunu otomatik olarak gerçekleştirmiş ve imalat ortamında sistem test edilmiştir [15]. Otomotiv montaj atölyelerinde seri imalat hatlarında parça montajında kullanılan sabitleme tezgâhları yerine kamera destekli görsel kontrol entegreli robot yardımı ile sabitleme ekipmanı kullanmadan bir montaj uygulaması gerçekleştirmiştir [16]. Bir otomotiv endüstri kuruluşunda parça boyutsal ölçümlerinde yaşanan sıkıntıları çözmek için bir robotun 6.eksenine bir lazer probu yerleştirerek gerek ölçüm hatalarını minimize edilmiş gerekse de daha hızlı bir çevirime sahip görsel robotik bir ölçüm sistemi gerçekleştirmiştir [17]. Yapılmış çalışmaların tamamında kamera verisi direk robotun uç işlevcisine aktarılmış ve robot kinematiği dikkate alınmadan işlem yapılmıştır. Ancak kamera tabanlı robotlu sistemlerde robotun işlem noktalarındaki konum ve oryantasyonu doğru ve güvenli bir şekilde yapılması için kamera verilerinin robot kinematik denklemlerinden geçirilmesi gerekir.

Tez beş bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, kamera tabanlı robotik uygulamalar konusunda tezin hedefi, yapısı açıklanmakta ve literatür taraması sunulmaktadır. İkinci bölümde, otomotiv endüstrisinde mevcut imalat hatlarındaki robotik sistemler konusunda bilgiler sunulmaktadır. Üçüncü bölümde, robot konusunda tanımlamalar, tarihçe, endüstriyel çeşitleri, kol yapıları ve robotların kullanım alanları konusunda bilgiler sunulmaktadır. Dördüncü bölümde robot kinematiği konusunda ileri ve ters kinematik bilgileri sunulmuş ve kinematik bilgisi kullanılarak tez konusuna paralel olacak şekilde bir robot modelleme çalışması yapılmıştır. Beşinci ve son bölümde, kamera tabanlı bir robotik uygulama geliştirilmiş ve bu sistemde kullanılan smart kamera, PLC ve robot konusunda bilgiler sunulmuştur. Geliştirilen uygulamada kameradan alınan verinin robot kinematiği için uygun veri formatına getirilmesi sunulmuştur. Robot-PLC-kamera birleşiminden oluşan endüstriyel uygulamalarda sistemi standardize etmek için bir model ortaya konulmuştur.

## 2. OTOMOTİV ENDÜSTRİSİ

Bu bölümde otomotiv endüstrisinde imalat sistemleri, robotik sistemlerin kullanımı ve uygulama örnekleri sunulmaktadır. Otomotiv endüstrisinde uygulanan imalat sistemleri genel olarak; “emek yoğun üretim”, “seri üretim” ve “esnek veya yalın üretim” modellerine dayalıdır. 19. Yüzyılın sonlarına kadar otomotiv sanayisinde emek yoğun bir üretim yapısı baskındır. Bu üretim yönteminde ürünler, tamamen özel taleplere dayalı, dolayısıyla küçük ölçekte ve standart dışı olarak imalat yapılmaktaydı. Emek yoğun üretim sisteminde imalatı yapılan her bir ürün adeta prototip gibi az sayıda üretildiğinden, söz konusu ürünleri tanımlayacak genel özelliklerden veya standarttan bahsetmek pek mümkün değildi. 1908 yılında Amerikan otomotiv sanayisinde Henry Ford tarafından başlatılan ve seri üretimin başlangıcı olarak kabul edilen yeni imalat süreci ile otomotiv sanayisinde yeni bir dönem başlamıştır. Endüstride seri üretim genel olarak bir imalat/montaj hattı ve yüksek oranda değişik iş bölümüne dayalı, sermaye yoğun, üretim hattında çok basit işlemleri gerçekleştiren vasıfsız veya yarı vasıflı operatörler vasıtasıyla yüksek miktarlarda ve standart ürünlerin üretildiği bir üretim sistemidir [18].

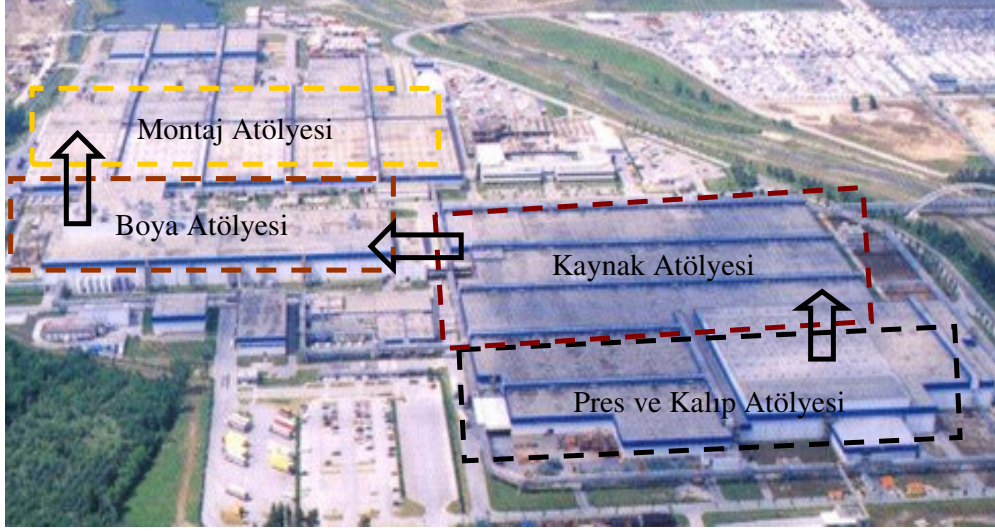
Otomotiv endüstrisinde işletmelerin imalat ve süreç yönetimi geçmişten günümüze büyük değişimler geçirmektedir. Kaliteli bir imalat ve süreç yönetimine sahip olan işletmeler sürekli olarak büyümekte ve değişen teknolojiyle birlikte kendini yenilemektedir. Bu durum dikkate alınarak otomotiv endüstrisinde yer alan işletmeler imalat alt yapılarını oluşturan endüstriyel otomasyona geçmişten günümüze büyük önem vermekteler. İşletmeler için önemli bir ihtiyaç olan endüstriyel otomasyon sistemleri kullandıkları yere ve ihtiyaca göre birçok farkı yapıyı bünyesinde barındırmaktadırlar. Bu otomasyon sistemlerinin büyük bir kısmını endüstriyel robotlar oluşturmaktadır. Günümüzde otomotiv sektöründe yer alan otomasyon sistemlerinin vazgeçilmez ekipmanı haline gelen endüstriyel robotların başta kalite olmak üzere birçok avantaj sunmaktadır. Robotların sağladığı avantajların yanı sıra sahip oldukları bir takım dezavantajlarda söz konusudur. Bu avantaj ve dezavantajlar Tablo 2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1: Üretimde robot kullanımının sağladığı avantaj ve dezavantajlar

Avantajlar	Dezavantajlar
<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ İşçilik maliyetinin düşürülmesi</li> <li>✓ Tehlikeli ve riskli yerlerde çalışanların yerine kullanılma imkânı</li> <li>✓ Daha esnek bir üretim sistemi sağlanmasına yardımcı olması</li> <li>✓ Daha tutarlı ve ölçülebilir bir kalite kontrol imkânı sağlamak</li> <li>✓ Yüksek adetlerde imalat yapma olanağının sağlanması</li> <li>✓ Vasıflı işçilik sıkıntısını ortadan kaldırılmasına imkân sağlanması</li> <li>✓ Üç vardiya boyunca aralıksız çalışma yeteneği,</li> <li>✓ İnsana göre daha fazla yük kaldırma kapasitesi,</li> <li>✓ İnsana göre daha çabuk sonuca ulaşma kabiliyeti,</li> <li>✓ Monoton ve tekrarlı işlerde yeterlilik,</li> <li>✓ Tehlikeli ortamlarda çalışabilme olanağı,</li> <li>✓ İnsan hatalarını elimine etme,</li> <li>✓ Yüksek hareket kabiliyeti,</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Yüksek yatırım maliyetleri vardır.</li> <li>✓ Bakım maliyetleri yüksektir.</li> <li>✓ İş güvenliği kuralları içerisinde kullanılmadığı durumlarda ölümcül olma riskleri vardır.</li> <li>✓ Düşünme yeteneği yoktur.</li> <li>✓ Sadece kendisine öğretilen işlemi yerine getirebilir.</li> <li>✓ Görsel kontrol sistemleri ile yalnızca kendisine öğretilen cisimleri görebilir,</li> <li>✓ Programlanmadan çalışamaz,</li> <li>✓ Kendisine öğretilenleri yapabildiğinden hareketleri kısıtlıdır,</li> </ul>

## 2.1. Otomotivde İmalat Sistemi

Otomotiv endüstrisinde imalat sistemi; aracın hammaddesi olan metal saçların şekillendirildiği bir Pres Atölyesi, bu şekillendirilmiş saç parçalarının ağırlıklı olarak kaynak işlemi kullanılarak birleştirildiği ve aracın bütün haline getirildiği Gövde İmalat Atölyesi, araç gövdelerinin müşterinin talebi doğrultusunda boyandığı Boyahane Atölyesi ve son işlem bölgesi olarak araca ait diğer parçaların montajının yapıldığı Montaj Atölyelerinden meydana gelir. Otomotiv imalatı sistemi için örnek bir üretim akış resmi şekil 2.1’de verilmiştir.



Şekil 2.1: Otomotivde imalat akış yapısı

Bütün atölyelerde seri imalat mantığı söz konusudur. Bu imalat atölyelerinde geliştirilen imalat tekniklerinden dolayı çok düşük çevirim sürelerinde araç imalatı mümkün kılınmıştır. İmalat çevirim süreleri, günümüzde binek araç gurupları için 45-80sn arası ve hafif ticari/ticari gurup için 90-300sn arası değişmektedir. Seri imalat sisteminin tamamında sorunların en fazla yaşandığı ve geliştirilmeye en açık olan atölyelerin başında Gövde İmalat atölyeleri gelmektedir. Çünkü bu atölyelerde aracın bütün olarak ortaya çıkarılması sürecinde geometrik anlamda yapılan işlemler montaj atölyesinin son işlem noktasına kadar yapılan bütün operasyonları etkilemektedir. Şekil 2.1’de bir gövde imalat atölyesinin robotik bir hat gösterilmiştir.

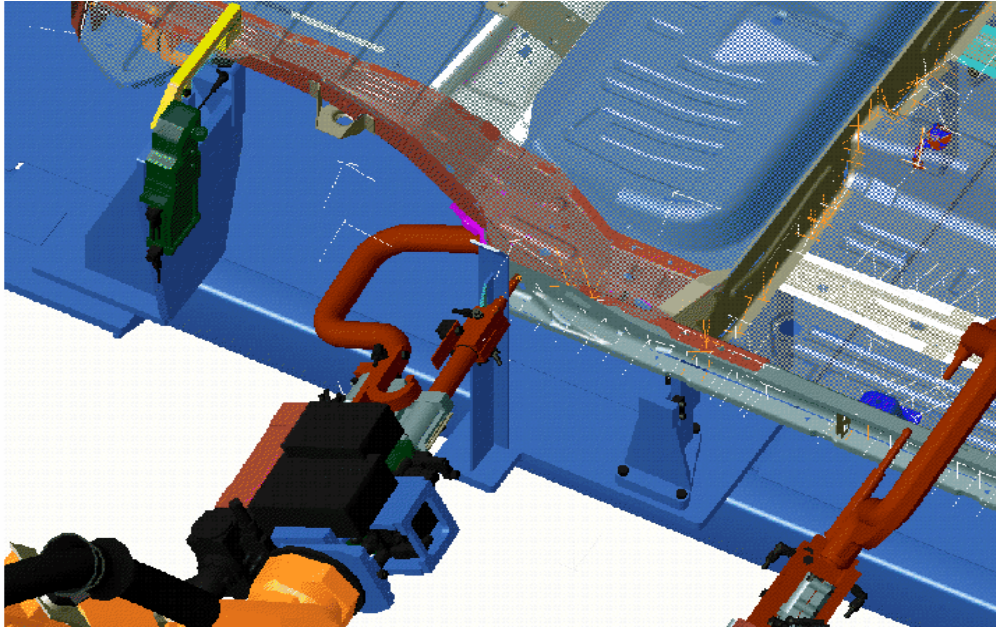


Şekil 2.2: Gövde imalat atölyesinde robotik hatlar

İmal edilen aracın kalitesini doğrudan belirleyen bir alan olma özelliğine sahip olan gövde imalat atölyeleri gerek teknolojik anlamda gerekse de imalat süreçleri açısından sürekli iyileştirme felsefesi doğrultusunda geliştirilmektedir.

## 2.2. Konvansiyonel Robotik İmalat Hatları

Endüstriyel robotların yoğun olarak kullanıldığı pres atölyelerindeki parça alma-bırakma, gövde atölyelerindeki parça kaynatma-taşıma, boyahane atölyelerinde parça taşıma-boyama ve montaj atölyelerindeki parça taşıma-yerleştirme operasyonlarının tamamında robotik sistemler için geleneksel kontrolün pek dışına çıkmamaktadır. Geleneksel robot kontrol sistemlerinde bir robot hücresi temel olarak bir çalışma tezgâhı, robot/robotlar, robot işlem ucu ve istasyonun kontrolünü sağlayan bir PLC'den meydana gelmektedir. Mevcut kontrol sistemlerinde, robotun yapacağı işlemlerin tamamı klasik nokta öğretme metotları ile ya da çevirim dışı olarak bir bilgisayar ortamında gerçekleştirilmektedir. Ancak bu durum gerek işlem parçalarındaki değişkenlik gerekse de imalat tezgâhından (fiktür) kaynaklı değişkenliklerden dolayı aracın kalitesi açısından farklı problemler ortaya çıkabilmektedir. Şekil 2.2'de robot kontrolünde kullanılan çevirim dışı programlama ve Şekil 2.3'de geleneksel robot kontrol istasyonlarından genel bir görünüm sunulmuştur.

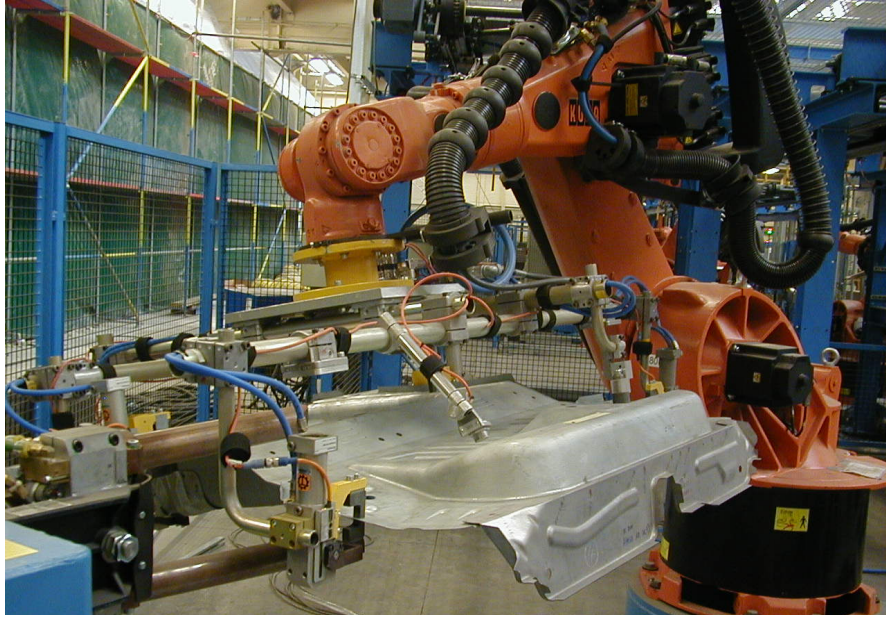


Şekil 2.3: Geleneksel kontrolde çevirim dışı programlama ekranı





Şekil 2.4: Geleneksel kontrolde bir robotik imalat istasyonu (çok robotlu)



Şekil 2.4: Geleneksel kontrolde bir robotik imalat istasyonu (tek robotlu)

### 2.3. Konvansiyonel Robotik İmalat Hatlarında Yaşan Sorunlar

Konvansiyonel robotik imalat hatlarında genel olarak yaşanan sorunlar ağırlıklı olarak robot, çalışma tezgâhı ve robota bağlı ekipmanların zaman içerisinde veya çevresel faktörlerden dolayı ortaya çıkan arızalardan kaynaklanmaktadır. Robotik imalat hatlarında yer alan sistemlerde yaşanan genel robot problemleri tablo 2.2’de verilmiştir.



Tablo 2.2: İmalat hatlarında yaşanan robot problemleri

Robotik Uygulama	Problem	Problemın Kaynağı
Genel	<i>Kalibrasyon</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Çalışma tezgâhı</li> <li>✓ Proses</li> <li>✓ Robot sistemi</li> </ul>
Genel	<i>Eksen zorlanmaları</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Yanlış programlama</li> <li>✓ Yanlış yörünge seçimleri</li> <li>✓ Çalışma uzayı yetersizliği</li> <li>✓ Çevresel faktörler</li> </ul>
Kaynak uygulamaları	<i>Kaynak tabancaların bağlantı takımlarında dönme problemi</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Proses</li> <li>✓ Kaynak parametreleri</li> <li>✓ Malzeme</li> <li>✓ Çevresel faktörler</li> </ul>
Kaynak veya mastik uygulamaları	<i>Kablo gruplarında hasarların meydana gelmesi</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Yanlış programlama</li> <li>✓ Yanlış yörünge seçimleri</li> <li>✓ Çevresel faktörler</li> <li>✓ Bakım işçilik kalitesi</li> </ul>
Al-Bırak uygulamaları	<i>Yerleştirme problemi</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Yanlış programlama</li> <li>✓ Yetersiz koordinat bilgisi</li> <li>✓ Parça değişkenliği</li> <li>✓ Tezgâh değişiklikleri</li> </ul>
Al-Bırak uygulamaları	<i>Parça tutucu problemleri ve Yanlış konumlama</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Tutuculardaki değişkenlik</li> <li>✓ Parçalarındaki değişkenlik</li> <li>✓ Çevresel faktörler</li> <li>✓ Tezgâh değişiklikleri</li> <li>✓ Yanlış oryantasyon bilgisi</li> <li>✓ Yanlış hedef bilgisi</li> </ul>

Son yıllarda görüntü işleme uygulamalarında gelinen aşama itibariyle kamera tabanlı robotik süreçlerin gerçekleştirilmesi mümkün hale gelmiştir. Kamera uygulamaları sayesinde işlem parçaları veya işlem parçalarının yapıldığı tezgâhlardan kaynaklı sorunları ortadan kaldırmak mümkün hale gelmiştir. Günümüzde birçok otomotiv işletmesinde kamera tabanlı robotik uygulamalar daha çok yerel yapıda kalmakla birlikte seri imalat sistemlerine entegre edilememiştir. Şekil 2.4’de yerel yapıdaki kamera tabanlı robotik bir ölçüm istasyonu verilmiştir. Bu ölçüm istasyonunda araç

üzerinde bazı referans noktalar dikkate alınarak araç gönyesinde herhangi bir ölçümsel problemin olup olmadığı tespit edilmektedir.



Şekil 2.5: Kamera tabanlı robotik ölçüm istasyonu

Ancak kamera tabanlı robotik sistemlerin lokal istasyon yapılarından ziyade seri imalat hatlarında kullanılması otomasyon sistemlerindeki karmaşık kontrol yapılarının daha kolay çözülmesine imkân sağlamaktadır. Bu çalışmada otomotiv endüstrisinde robotik al-bırak uygulamaları için tablo 2.2’de gösterilen sorunların ortadan kaldırılmasına yönelik bir çalışma sunulmaktadır. Seri imalat sistemlerinde şekil 2.5’te gösterilen bir robotik al-bırak uygulamasında, bant üstünden gelen ve belirli bir noktada parçalarından duruş pozisyonları başka bir sistem tarafından sağlandıktan sonra robot parçayı alıp bir sehpa da istiflemektedir. Bu sistemlerde kamera kullanılarak yaşanan problemlerin ortadan kaldırılması veya bazı problemlerin azaltılması edilmesi sağlanmaktadır.



Şekil 2.6: Robotik al-bırak uygulaması

### 3. ROBOTİK SİSTEMLER

Bu bölümde robot ile ilgili genel bilgiler, tarihçe, tanımlamalar, çeşitleri ve endüstriyel robot tipleri konusunda bilgiler sunulmuştur. Robot kelime olarak ilk defa 1920'li yıllarda ortaya çıkmış olsa da, robotlara ait ilk kavramlar ve robot olarak tanımlanabilecek ilk makinelere ait bilgiler M.Ö. 3000 yıllarına kadar uzanmaktadır. Robot terimi Çek ve Slovakça dillerinde köle veya işçi anlamına gelmektedir. Robot tanımı konusunda birçok tanımlama yapmak mümkündür. Bu tanımlardan bir kaçını aşağıda verilmiştir.

Amerikan Robot Enstitüsü tarafından yapılan bir tanımlamada robot için, işlem parçalarının ve araçların hareket ettirilebilmesi için tasarlanmış olan çok fonksiyonlu ve programlanabilir manipülatör veya farklı görevleri yerine getirebilmek için değişken programlı hareketleri gerçekleştirebilen özel araç şeklindedir.

Robot bir kaide üzerinde en az bir kol, tutma organları (genellikle pensler, vantuzlar veya elektromıknatıslar), pnömatik, hidrolik veya elektriksel sensörler ile konumu ve basınç algılayıcılarıyla, bilgi işlem organlarıyla donatılmış kontrollü mekanik manipülatörlerdir.

Robotlar verilen bir dizi görevleri önceden programlanmış hareketler aracılığıyla malzemeleri, materyalleri, el aletlerini veya özel donanımları hareket ettirmek amacıyla tasarlanmış çok işlevli manipülatörlerdir.

Sanayi robotunun en kapsamlı tanımı ve robot tiplerinin sınıflandırılması ISO 8373 standardında belirlenmiştir. Bu standarda göre bir robot şöyle tanımlanır; Endüstriyel uygulamalarda kullanılan, üç veya daha fazla programlanabilir eksenli olan, otomatik kontrollü, yeniden programlanabilir, çok amaçlı, bir yerde sabit duran veya hareket edebilen birden fazla motorlu makine veya el aletine robot denir [19].

### 3.1. Endüstriyel Robotların Sınıflandırılması

Endüstriyel robotlar temel olarak seri ve paralel robotlar olmak üzere iki gruba ayrılır. Seri robotlar genel olarak bir takım eklemler ve bu eklemleri birbirine bağlayan kollarla oluşur. Seri robotlar daha geniş bir çalışma uzayına ve az sayıda mekanik aksamla sahiptir. Paralel robotlar ise ana çerçeve (main frame) ile uç işlevcisi (TCP) arasında birden fazla paralel kolun bir araya gelmesinden oluşur. Bir kolun hareketi diğer kolun hareketine de bağlı olduğu için kinematik modelleri daha zordur. Paralel robotlar seri robotlara göre çok sağlam bir mekanik yapıya sahiptir. Şekil 3.1’de seri robot ve Şekil 3.2’de de paralel robot yapıları gösterilmiştir.



Şekil 3.1: Seri kol yapısına sahip Kuka marka bir endüstriyel robot



Şekil 3.2: Paralel kol yapısına sahip ABB marka bir endüstriyel robot

Robotlar serbestlik derecelerine, eklemlerin tahrik yapısında kullanılan güç kaynağına, kullanılan kontrol yöntemlerine, keskinlik derecelerine göre farklı sınıflandırmalar yapmak mümkündür. Bu bölümde endüstriyel robotlar serbestlik derecelerine göre sınıflandırılmıştır.

### 3.2. Serbestlik Derecelerine Göre Robotlar

Robotlar serbestlik derecesine göre sınıflandırılırken genellikle ilk üç kolun eklem yapısı dikkate alınmaktadır. İlk üç kol yapısı prizmatik (Prismatic-Prismatic-Prismatic, PPP) ise bu robota Kartezyen robot denir. İlk kol yapısı döner ikinci ve üçüncü kolları prizmatik ekleme (Revolute Prismatic Prismatic, RPP) sahipse bu robota Silindirik robot. İlk iki kol yapısı döner üçüncü kol yapısı ise prizmatik ekleme sahip ve bütün eklemler birbirine paralelse bu robota SCARA (Selective Compliant Articulated Robot Assembly), ilk iki kol yapısı döner ve üçüncü kol yapısı prizmatik ekleme sahipse bu robota Küresel robot denir. Ayrıca ilk üç uzuvu döner ekleme sahipse bu robota da Eklemlili robot denir. Robotik imalat hatlarında kullanılan robotlar genellikle altı serbestlik (6 DOF) derecesine sahip eklemlili robotlardır [20].

### 3.3. Kartezyen Robot

İlk üç kol bağlantı yapısı prizmatik eklem olacak şekilde tasarlanmış mekanik yapılara kartezyen robot denir. Kinematik yapıları en basit olan robot türüdür. Güçlü bir mekanik yapıları olmasına karşın çalışma uzayındaki hareket yetenekleri oldukça sınırlıdır. Sadece tutma ve taşıma yeteneği sahip olan kartezyen robotlar X,Y,Z, eksenlerinde doğrusal olarak hareket yapabilmektedirler. Basit yapılarından dolayı hareketlerin planlanması daha kolaydır. Bu tür robotlarda pozisyon hesaplamaları, robot uç elemanının bulunduğu pozisyon (TCP), mafsalların o anda olduğu noktada olmasından dolayı diğer robot tiplerine göre daha basittir.



Şekil 3.3: Kartezyen yapıya sahip Schunk marka bir endüstriyel robot

### 3.4. Silindirik Eklemlili Robot

Silindirik robotlarda kol yapısı; başlangıç eklemi döner, ikinci ve üçüncü eklemi prizmatik yapıda olan eklemlerden oluşmaktadır. Silindirik robot kendi etrafında dönebilen bir mafsals ve bunun üzerinde bulunan X,Y,Z düzleminde doğrusal hareket edebilen kollardan oluşmaktadır. Mekanik yapıları sağlam olmasına karşın bilek konum doğruluğu yatay harekete bağlı olarak değişir. Kartezyen robot gibi büyük hacimli ve ağırlıklı nesnelere taşınmasında kullanılır. Prizmatik eklemlerde hareketlendirici olarak genellikle hidrolik silindir kullanılır. Şekil 3.4'te endüstriyel bir silindirik robot gösterilmiştir.

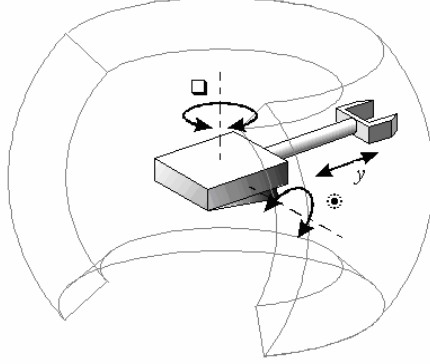


Şekil 3.4: Silindirik yapıya sahip ST Robotics marka bir endüstriyel robot

### 3.5. Küresel Eklemlili Robot

Küresel robotlarda birinci ve ikinci eklemler döner üçüncü eklem ise prizmatik eklem yapısına sahiptirler. Mekanik yapı açısından kartezyen sistemdeki robotlara göre sağlam olmamasına karşın çalışma uzayındaki hareket yetenekleri daha iyidir. Bel, omuz ve dirsek mafsallarından oluşan bir yapıdadırlar. Birinci ve ikinci eksen mafsals kendi etrafında dönme hareketi yapabilirken, üçüncü eksen mafsals uzama ve kısalma hareketi yaptırmaktadır. Şekil 3.5' görüldüğü gibi hareket alanı küresel bir koordinat sistemine sahiptir. Kinematik yapıları kartezyen ve silindirik robot kollara göre daha karmaşık ve çözümleri zordur. Bu robotların çalışma şeklinin

canlandırılması oldukça zor olduğu için hem programlama hem de robotun kontrolü zordur. Çalışma alanının büyüklüğü kolların büyüklüğüne bağlıdır.



Şekil 3.5: Küresel robot

### 3.6. SCARA Robot

SCARA robot yapısı genel olarak iki kol bağlantı noktasında elektrik motoru ve aşağı yukarı hareketi sağlayan bir pnömatik koldan oluşmuştur. Kol bağlantı noktalarındaki elektrik motorları eksenlerin kendi etrafında dönüşünü sağlamaktadır. İşlem ucunun bulunduğu kol pnömatik sistemli olup Z ekseninde aşağı-yukarı hareket etmeyi sağlamaktadır. Bu yapı daha esnek bir hareket imkânı sağlamaktadır. Robotun gerek hız gerekse de konum performansı oldukça yüksektir. Yüksek hız ve hassasiyetinden dolayı genellikle bu robotlar elektronik sanayisinde montaj işlemi için tercih edilmektedir. Şekil 3.6'da bir SCARA robot gösterilmiştir.



Şekil 3.6: SCARA yapıya sahip EPSON marka bir endüstriyel robot

### 3.7. Eklemlı Robot

Çalışma uzayındaki hareket yetenekleri en yüksek olan ve İnsan kolunun hareketlerini taklit etmeye en yakın robottur. Üretim sistemlerinde diğer kol yapısına sahip robotların hareket kabiliyetlerinin sınırlı olmasından dolayı kol bağlantı noktalarındaki eklem sayısı genellikle 5-6 adet olan robotlara ihtiyaç duyulmuştur. Bu robot yapısında, bir çalışma alanı içerisinde tanımlanan herhangi bir noktaya en kısa yoldan/yörüngeden ve kısa zamanda ulaşım imkânı sağlanmaktadır. Şekil 3.7’de mafsal yapısına sahip ABB marka IRB6640 modelindeki bir robot gösterilmiştir.



Şekil 3.7: Mafsal yapıya sahip ABB marka bir endüstriyel robot



## 4. ROBOT KİNEMATİĞİ

Kinematik hareket bilimi olarak tanımlanır ve hareketin konum, oryantasyon, hız ve ivme açılarından değerlendirilmesini sağlar. Robot uygulamalarında, kinematik bağıntılar kullanılarak komşu kolların birbirileri ile olan etkileri ve yapmaları gereken görevler modellenir. Her robot birbirlerine zincirleri gibi bağlanmış kollar kümesi olarak değerlendirilir ve genellikle  $n$  bağlantı  $n-1$  koldan oluşur. Her kol, uzunluk ve burulma açısı olmak üzere iki parametre ile tanımlanır. Ara kollar için, kol ofseti olarak adlandırılan bir bağlantı parametresi vardır. Komşu kollara atanan eksenler ile ilişkili dönüşümün genel yapısı bir sonraki kaymayı da belirler. Dolayısıyla ayrı ayrı her bir dönüşüm,  $n$ . kolun 0. kola göre konum ve oryantasyonunun hesaplanmasında kullanılır.

### 4.1. İleri Kinematik

Katı cisimlerde, hareket modellemenin birçok yolu vardır. Kinematik modelleme, Kartezyen üç boyutlu ve kartonom dört boyutlu olmak üzere iki farklı uzayda gerçekleştirilebilirler. Kartezyen uzayda modelleme yapılırken genelde üstel yöntem, Pieper-Roth yöntemi ve Denativ-Hartenberg yönteminden yararlanır. Bu modelleme yöntemlerinin en çok tercih edilen Denativ-Hartenberg (D-H) dir. D-H Modelinde en büyük problem işlemlerin matrisel olarak yapılmasıdır. Bu modelde, gerek matris çarpımları gerekse de diğer matematiksel işlemler çok fazla zaman aldığından çözüm süresi uzayacaktır. Başta çözüm süresini düşürmek ve daha az işlem ile sonuca ulaşmak için kartonom uzayda modelleme yapılmaktadır. Kartonom uzayda modelleme yaparken kullanılan tekniklerden bir tanesi de quaternion yöntemidir. Quaternion modeli sayesinde robot'un ileri ve ters kinematik denklemlerini çıkarmak oldukça kolaydır. Yaygın olarak kullanılan 6 eksenli endüstriyel robotların çalışma uzayında, üç tanesi robot bileğinin konumu için ve diğer üç tanesi ise bileğin yalpa, sapma ve burkulmasını gösteren uç elemanın yönlendirmesi için olmak üzere altı serbestlik derecesine sahiptir. Buradaki amaç uç işlevci elemanın bulunduğu ve gitmesi istenen konumlar arasında etkin ve güvenli bir

şekilde hareket ettirilmesidir. Bu nedenle robot uç işlevci konumunun bağlantı açılarına nasıl dönüştürüldüğü matematiksel olarak ifade edilmesi gerekir. Robot modellemede kartezyen, silindirik veya küresel koordinatlar kullanılır. Bu nedenle, taban eksene ( $x$ ,  $y$  ve  $z$ ) göre gerçekleşen seri rotasyonlar, rotasyon matrislerinin birbiri ile çarpılmasıyla elde edilmeleri mümkündür. Euler açı sisteminde, bir nesnenin oryantasyonundaki değişim nesnenin yerel eksenini etrafındaki üç rotasyonun kombinasyonu olarak tanımlanır. Bu üç rotasyon mutlaka aynı sırayla uygulanmalıdır: yalpa, sapma ve burkulma. Tanımlanan Euler gösterimini matris şeklinde yazmak oldukça kolaydır. Ancak, bir eksen etrafında  $90^\circ$ 'lik bir rotasyon için Euler sistemi kullanıldığında, bir eksen diğer iki eksenin sırayla dizilmesine ve kilitlemesine neden olabilir. Bu durumda serbestlik derecesi bir azalmış durumdadır. Ancak bu durum başka problemleri beraberinde getirecektir. Quaternion ise karmaşık sayıların genişletilmesi ile bulunmuşlardır [21] ve dört boyutlu bir uzay ile tanımlanabilirler. Bir quaternion ( $q$ ) aşağıdaki şekilde ifade edilebilir;

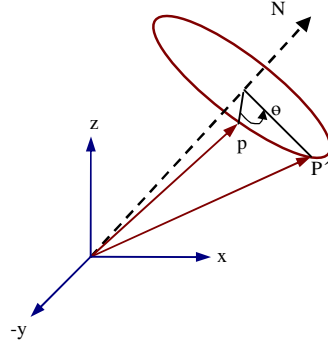
$$q = w + xi + yj + zk \quad (4.1)$$

Denklemdaki  $w$ ,  $x$ ,  $y$  ve  $z$  gerçekte sayılar olup  $i$ ,  $j$  ve  $k$  ise  $i^2 = j^2 = k^2 = -1$  eşitliğine sahiptir. Bir quaternion gerçekte sayılarla ifade edilebildiği gibi bir vektör olarak da 2. denklemden görüleceği şekilde de yazılabilir:

$$q = [w, \vec{v}] \quad (4.2)$$

Denklemden  $w$  yine bir gerçekte sayıdır ve  $v$  ise üç reel sayı olan  $x$ ,  $y$  ve  $z$  'den oluşmuş üç-parçalı bir vektörü ifade eder. Birim genlikli quaternion rotasyonları göstermekte kullanılırlar. Ayrıca bir quaternion ya birkaç rotasyonun kombinasyonunu ya da bir rotasyonun değerine göre tek bir rotasyonu gösterilmesinde kullanılabilir. Quaternion rotasyonları birbirleri ile çarpılarak kolaylıkla hesaplanabilir. Yapılan işlemler dört-boyutlu olduğundan ve dönüşler sırası ile belirli bir eksen üzerinden yapılması zorunlu olmadığından bahsedilen kilitleme gerçekleşmez.

Şekil 4.1.'de gösterilen rotasyonun açı-eksen gösteriminden yola çıkarak bir aks'ın bir pivot eksen etrafında döndürülmesi ile aks'ın çalışma uzayındaki konumu ve rotasyonu quaternion cebri kullanılarak bulunabilir.



Şekil 4.1: Rotasyonun açı-eksen gösterimi

Quaternion cebri kullanılarak,  $P$  noktasının  $\theta$  derece döndürülmesi ile elde edilen  $P'$  noktasının taban eksene göre konum ve rotasyonu 4.3 nolu denklemle bulunabilir.

$$q = (q_1, \vec{q}_v) \text{ ve } \vec{q}_v = i\vec{q}_2 + j\vec{q}_3 + k\vec{q}_4 \text{ olmak üzere;} \\ P' = R_q(P) = qPq^{-1} = (q^2_1 - \vec{q}_v \cdot \vec{P})\vec{P} + 2q_1(\vec{q}_v \otimes \vec{P}) + 2\vec{q}(\vec{q}_v \cdot \vec{P}) \quad (4.3)$$

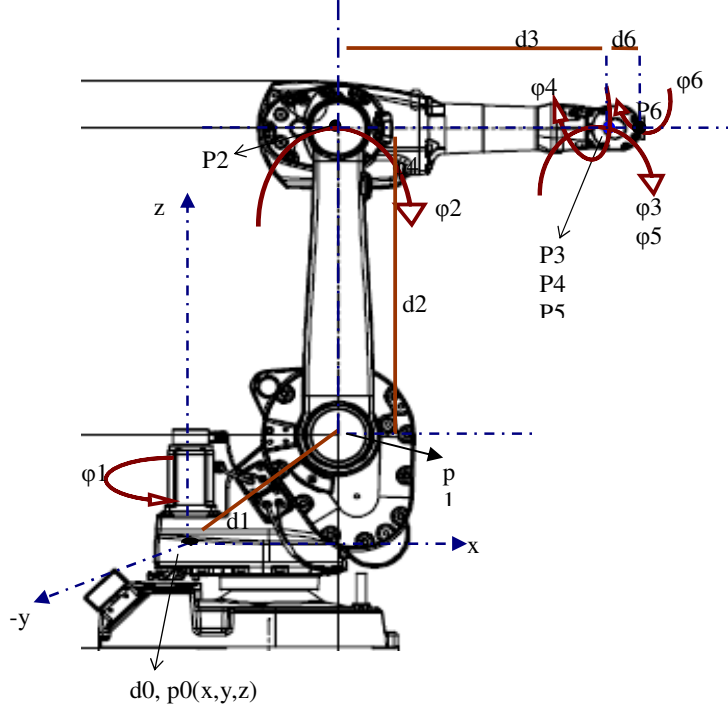
3 nolu denklemdeki  $P'$  noktasının çalışma uzayındaki koordinatları;

$$P'_x = q_1 \cdot q_1 \cdot p_x + 2 \cdot q_3 \cdot q_1 \cdot p_z - 2 \cdot q_4 \cdot q_1 \cdot p_y + q_2 \cdot q_2 \cdot p_x \\ + 2 \cdot q_3 \cdot q_2 \cdot p_y + 2 \cdot q_4 \cdot q_2 \cdot p_z - q_4 \cdot q_4 \cdot p_x - q_2 \cdot q_2 \cdot p_x \quad (4.4)$$

$$P'_y = 2 \cdot q_2 \cdot q_3 \cdot p_x + q_3 \cdot q_3 \cdot p_y + 2 \cdot q_4 \cdot q_3 \cdot p_z + 2 \cdot q_1 \cdot q_4 \cdot p_x \\ - q_4 \cdot q_4 \cdot p_y + q_1 \cdot q_1 \cdot p_y - 2 \cdot q_2 \cdot q_1 \cdot p_z - q_2 \cdot q_2 \cdot p_y \quad (4.5)$$

$$P'_z = 2 \cdot q_2 \cdot q_4 \cdot p_x + 2 \cdot q_3 \cdot q_4 \cdot p_y + q_4 \cdot q_4 \cdot p_z - 2 \cdot q_1 \cdot q_3 \cdot p_x \\ - q_3 \cdot q_3 \cdot p_z + 2 \cdot q_1 \cdot q_2 \cdot p_y - q_2 \cdot q_2 \cdot p_z + q_1 \cdot q_1 \cdot p_z \quad (4.6)$$

yazılabilir. Aşağıda Şekil 4.2'de gösterilen Altı serbestlik derecesine sahip ABB IRB1600 7/1.45 endüstriyel robot modeli [22] için aks bazında ileri kinematik fonksiyonu quaternionlar kullanılarak 4.7 nolu denklemde ifade edilmiştir.



Şekil 4.2: Altı serbestlik derecesine sahip ABB IRB1600 robot modeli

Aksların çalışma uzayındaki konum ve oryantasyon fonksiyonları aşağıda belirtilen şekilde yazılabilir.

$$f(d_{link}, Q, d_{offset}) = q \cdot \bar{d}_{link} \cdot q^* + \bar{d}_{offset} \quad (4.7)$$

Şekil2.'deki robot modelinde P3, P4 ve P5 noktaları çakışık olduğu için bu üç noktanın uzaydaki konumu  $(x, y, z)$  ve rotasyon değerleri  $(q1, q2, q3, q4)$  değerleri aynıdır. Bir aksında çalışma uzayındaki konum ve rotasyonu;

$$P = [ x, y, z ] [ q1, q2, q3, q4 ] \quad (4.8)$$

şeklinde ifade edilir. Bu denklemde yer alan rotasyon değerleri  $q1, q2, q3, q4$  ilgili aks'ın açı-eksen değerlerinin dönüşümden elde edilir. Herhangi bir eksenin uzaydaki konumu ve rotasyonu bulmak için öncelikle açı-eksen gösterimden quaternion'a dönüş yapılmalıdır. Bir eksenin açı-eksen gösterimi; o eksenin koordinat sistemine göre hangi eksen etrafında ve ne kadar döndüğü gösteren bir birim vektör ile ifade edilir. Açı-eksen gösterimi şu şekilde ifade edilebilir.

$$[ \varphi , \vec{N} ] \quad (4.9)$$

4.6 nolu denklemde yer alan ifadeler birim vektör olup  $\vec{\varphi}$  değeri aks'ın dönme açısını  $\vec{N}$  ise  $x, y, z$  eksenlerindeki birim vektörü göstermektedir. Dört elemanlı quaternion'un  $Q=[q_1, q_2, q_3, q_4]$  eleman değerleri açı-eksenden fonksiyon elemanlarından elde edilir;

$$\begin{aligned} q_1 &= \cos(\varphi/2) \\ q_2 &= \vec{N} \cdot \sin(\varphi/2) \\ q_3 &= \vec{N} \cdot \sin(\varphi/2) \\ q_4 &= \vec{N} \cdot \sin(\varphi/2) \end{aligned} \quad \Rightarrow \quad Q = q_1 + iq_2 + jq_3 + kq_4 \quad (4.10)$$

Arda arda eklenmiş iki aks'ın uç işlevci açısından oryantasyonunu bulmak için iki aks'ın rotasyon matrislerinin çarpılması gerekir. Uç işlevcinin rotasyonu;

$$q' = q_1 * q_2 = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_1 & -q_2 & -q_3 & -q_4 \\ q_2 & q_1 & -q_4 & -q_3 \\ q_3 & q_4 & q_1 & -q_2 \\ q_4 & -q_3 & q_2 & q_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_2 \\ q_2 \\ q_2 \\ q_2 \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

Çarpımın sonucu;

$$\begin{aligned} q'_1 &= q_1 \cdot q_2_1 - q_2 \cdot q_2_2 - q_3 \cdot q_2_3 - q_4 \cdot q_2_4 \\ q'_2 &= q_1 \cdot q_2_2 + q_2 \cdot q_2_1 + q_3 \cdot q_2_4 - q_4 \cdot q_2_3 \\ q'_3 &= q_1 \cdot q_2_3 - q_2 \cdot q_2_4 + q_3 \cdot q_2_1 + q_4 \cdot q_2_2 \\ q'_4 &= q_1 \cdot q_2_4 + q_2 \cdot q_2_3 - q_3 \cdot q_2_2 + q_4 \cdot q_2_1 \end{aligned} \quad (4.12)$$

n tane aks'tan oluşan bir robot için çalışma uzayındaki konum ve rotasyonu 4.14 numaralı denklem ile ifade edilebilir.

$$P_{n(x,y,z)} = (Q_n \cdot Q_{n-1...0}) \cdot D_n \cdot (Q_n \cdot Q_{n-1...0})^* + P_{n-1(x,y,z)} \quad (4.13)$$

10 nolu denklemde yer alan Q, dört elemanlı quaternion'u ifade etmekte olup aksın uzaydaki rotasyonunu gösterir. D ise ilgili aksın uzunluğunu gösterir. Şekil 4.2'de

yer alan ABB IRB1600 7/1.45m robotu için eksen bazında ileri kinematik denklemleri 4.9 ve 4.10 nolu denklemler kullanılarak her eksen için konum ve rotasyon bilgileri bulunabilir.

Taban ve 1,2 ve 3.eksenler için kol ve quaternion bilgileri;

$$P_0 = \begin{bmatrix} p_{0x} \\ p_{0y} \\ p_{0z} \end{bmatrix}, \quad Q_1 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) \\ 0 \\ 0 \\ \sin(\theta_1) \end{bmatrix}, \quad D_1 = \begin{bmatrix} d_{1x} \\ d_{1y} \\ d_{1z} \end{bmatrix}, \quad Q_2 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2) \\ 0 \\ \sin(\theta_2) \\ 0 \end{bmatrix}, \quad D_2 = \begin{bmatrix} d_{2x} \\ d_{2y} \\ d_{2z} \end{bmatrix},$$

$$Q_3 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_3) \\ 0 \\ \sin(\theta_3) \\ 0 \end{bmatrix}, \quad D_3 = \begin{bmatrix} d_{3x} \\ d_{3y} \\ d_{3z} \end{bmatrix}$$

şeklinde yazılabilir. 2, 3. eksenlerin konum bilgileri hesaplanırken kullanılacak olan quaternion çarpımları 4.12 nolu denkleme göre;

$$Q_{12} = Q_1 \cdot Q_2 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) \cdot \cos(\theta_2) \\ \cos(\theta_1) \cdot \sin(\theta_2) \\ \sin(\theta_1) \cdot \sin(\theta_2) \\ \sin(\theta_1) \cdot \cos(\theta_2) \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

$$Q_{123} = Q_1 \cdot Q_2 \cdot Q_3 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) \cdot \cos(\theta_2 + \theta_3) \\ \cos(\theta_1) \cdot \sin(\theta_2 + \theta_3) \\ \sin(\theta_1) \cdot \sin(\theta_2 + \theta_3) \\ \sin(\theta_1) \cdot \cos(\theta_2 + \theta_3) \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

olmak üzere; 1.eksen için konum bilgisi;

$${}^0P_1 = Q_1 \cdot D_1 \cdot Q_1^* + P_0$$

$$= \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1)d_{1x} - \sin(\theta_1)d_{1y} \\ \sin(\theta_1)d_{1x} + \cos(\theta_1)d_{1y} \\ d_{1z} \end{bmatrix} + P_0 \quad (4.16)$$

2. eksen için konum bilgisi;

$$\begin{aligned}
{}^0P_2 &= Q_{12} \cdot D_1 \cdot Q_{12}^* + {}^0P_1 \\
&= \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1)(d_{1x} + d_{2x}) - \sin(\theta_1)(d_{1y} + \cos(\theta_2)d_{2y} - \sin(\theta_2)d_{2z}) \\ \sin(\theta_1)(d_{1x} + d_{2x}) + \cos(\theta_1)(d_{1y} + \cos(\theta_2)d_{2y} - \sin(\theta_2)d_{2z}) \\ d_{1z} + \sin(\theta_2)d_{2y} + \cos(\theta_2)d_{2z} \end{bmatrix} + {}^0P \quad (4.17)
\end{aligned}$$

3. eksen için konum bilgisi;

$$\begin{aligned}
{}^0P_3 &= Q_{123} \cdot D_1 \cdot Q_{123}^* + {}^0P_2 = \\
&= \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1)(d_{1x} + d_{2x} + d_{3x}) - \sin(\theta_1)(d_{1y} + \cos(\theta_2)d_{2y} + \dots) \\ \cos(\theta_1)(d_{1x} + d_{2x} + d_{3x}) + \sin(\theta_1)(d_{1y} + \cos(\theta_2)d_{2y} + \dots) \\ d_{1z} + \sin(\theta_2)d_{2y} + \sin(\theta_{2+3})d_{3y} + \cos(\theta_2)d_{2z} + \dots \end{bmatrix} \dots \\
&= \begin{bmatrix} \dots + \cos(\theta_{2+3})d_{3y} - \sin(\theta_2)d_{2z} - \sin(\theta_{2+3})d_{3z} \\ \dots + \cos(\theta_{2+3})d_{3y} - \sin(\theta_2)d_{2z} - \sin(\theta_{2+3})d_{3z} \\ \dots + \cos(\theta_{2+3})d_{3z} \end{bmatrix} + {}^0P_2 \quad (4.18)
\end{aligned}$$

Şekil 4.2’de verilen robot dikkate alındığında robotun küresel bilek yapısına sahip olduğu görülmektedir. Bilek noktasındaki 4, 5 ve 6. eksen konumları bulmak için öncelikle ilgili eksenlerin oryantasyon ve aks bilgilerinin yazılması gerekir.

$$\begin{aligned}
Q_4 &= \begin{bmatrix} \cos(\theta_4) \\ \sin(\theta_4) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, D_4 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad Q_5 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_5) \\ 0 \\ \sin(\theta_5) \\ 0 \end{bmatrix}, \quad D_5 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad Q_6 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_6) \\ \sin(\theta_6) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \\
D_6 &= \begin{bmatrix} d_{6x} \\ d_{6y} \\ d_{6z} \end{bmatrix} \text{ şeklinde yazılabilir.}
\end{aligned}$$

Sadece bilekteki 4, 5 ve 6. eksenlerin konum bilgileri hesaplanırken kullanılacak olan quaternion çarpımları 4.12 nolu denkleme göre;

$$Q_{45} = Q_4 \cdot Q_5 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_4) \cdot \cos(\theta_5) \\ \sin(\theta_4) \cdot \cos(\theta_5) \\ \cos(\theta_4) \cdot \sin(\theta_5) \\ \sin(\theta_4) \cdot \sin(\theta_5) \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

$$Q_{456} = Q_4 \cdot Q_5 \cdot Q_6 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_5) \cdot \cos(\theta_4 + \theta_6) \\ \cos(\theta_5) \cdot \sin(\theta_4 + \theta_6) \\ \sin(\theta_5) \cdot \sin(\theta_4 - \theta_6) \\ \sin(\theta_5) \cdot \cos(\theta_4 - \theta_6) \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

olmak üzere; 4. eksenin 3. eksene göre konumu için;

$$\begin{aligned} {}^3P_4 &= Q_4 \cdot D_4 \cdot Q_4^* \\ &= \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_4)d_{4x} - \sin(\theta_4)d_{4y} \\ \sin(\theta_4)d_{4x} + \cos(\theta_4)d_{4y} \\ d_{4z} \end{bmatrix} + {}^0P_3 \end{aligned} \quad (4.21)$$

5. eksenin 3. eksene göre konumu için;

$$\begin{aligned} {}^3P_5 &= Q_{45} \cdot D_5 \cdot Q_{45}^* + {}^3P_4 = \\ \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos(\theta_4)d_{5x} - \sin(\theta_4)(\cos(\theta_5)d_{5y} - \sin(\theta_5)d_{5z}) \\ \cos(\theta_4)(\cos(\theta_5)d_{5y} - \sin(\theta_5)d_{5z}) + \sin(\theta_4)d_{5x} \\ \sin(\theta_5)d_{5y} + \cos(\theta_5)d_{5z} \end{bmatrix} + {}^3P_4 \end{aligned} \quad (4.22)$$

6. eksenin 3. eksene göre konumu için;

$$\begin{aligned} {}^3P_6 &= Q_{456} \cdot D_6 \cdot Q_{456}^* + {}^3P_5 = \\ \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos(\theta_4)(\cos(\theta_6)d_{6x} - \sin(\theta_6)d_{6y}) - \sin(\theta_4)(\cos(\theta_5)\sin(\theta_6)d_{6x} + \dots) \\ \sin(\theta_4)(\cos(\theta_6)d_{6x} - \sin(\theta_6)d_{6y}) + \cos(\theta_4)(\cos(\theta_5)\sin(\theta_6)d_{6x} + \dots) \\ \sin(\theta_5)\sin(\theta_6)d_{6x} + \sin(\theta_5)\cos(\theta_6)d_{6y} + \dots \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} \dots + \cos(\theta_6)\cos(\theta_6)d_{6y} - \sin(\theta_5)d_{6z} \\ \dots + \cos(\theta_6)\cos(\theta_6)d_{6y} - \sin(\theta_5)d_{6z} \\ \dots + \cos(\theta_5)d_{6z} \end{bmatrix} + {}^3P_5 \end{aligned} \quad (4.23)$$

denklemler yazılabilir. 6. eksenin taban eksen göre konumu,

$${}^0P_6 = Q_{456} \cdot Q_{123} \cdot D_6 \cdot Q_{456}^* \cdot Q_{123}^* + {}^0P_3 \quad (4.24)$$

denklemleri ile elde edilir.



## 4.2. Ters Kinematik

Robotun uç noktanın oryantasyon ve konumu bilgisi verildiği durum için ters kinematik bağıntıları kullanılarak eksenlerin alması gereken açı hesaplanabilir. Eğer uç elemanının oryantasyonu ve konumu için  $U = ({}^0P_6, Q_{123456})$  şeklinde verilmişse ters kinematik için aşağıdaki denklemler yazılabilir. Robot'un  $P_3, P_4$  ve  $P_5$  noktalarının konumları eşit olduğundan  $P_3$  için aşağıdaki denklem yazılabilir.

$${}^0P_3 = {}^0P_4 = {}^0P_5 = P_{6(x,y,z)} - (Q_d^* \cdot Q_{123456}) \cdot D_n \cdot (Q_d^* \cdot Q_{123456})^* \quad (4.25)$$

4.10 nolu denklemde yer alan  $Q_d$  ileri yön kinematiğinde TCP'yi robotun base ile aynı koordinat sistemine çevirmek için kullanılan sabit bir quaterniondur. 1. eksen açısı  $\theta_1$  için;

$$\theta_1 = 2 \cdot a \tan \left( \frac{-P_{3x} \pm \sqrt{P_{3x}^2 + P_{3y}^2 - (d_{1y} + d_{2y} + d_{3y})^2}}{P_{3y} + (d_{1y} + d_{2y} + d_{3y})} \right) \quad (4.26)$$

1. eksen açısı  $\theta_1$  denklemi iki farklı kök'e sahiptir.

$$\theta_{1\_1} = 2 \cdot a \tan \left( \frac{-P_{3x} + \sqrt{P_{3x}^2 + P_{3y}^2 - (d_{1y} + d_{2y} + d_{3y})^2}}{P_{3y} + (d_{1y} + d_{2y} + d_{3y})} \right) \quad (4.27)$$

$$\theta_{1\_2} = 2 \cdot a \tan \left( \frac{-P_{3x} - \sqrt{P_{3x}^2 + P_{3y}^2 - (d_{1y} + d_{2y} + d_{3y})^2}}{P_{3y} + (d_{1y} + d_{2y} + d_{3y})} \right) \quad (4.28)$$

2. eksen açısı  $\theta_2$  hesaplamak için önce 3. eksen açısı olan  $\theta_3$ 'ü hesaplamak gerekir.  $\theta_3$  için;

$$m_1 = \left( P_{3x} + \frac{\sin \left( \theta_1 \cdot \frac{\pi}{180} \right) \cdot (d_{1y} + d_{2y} + d_{3y})}{\cos \left( \theta_1 \cdot \frac{\pi}{180} \right)} \right) - d_{1x} \quad (4.29)$$

$$m_2 = (P_{3z} - d_{1z}) \quad (4.30)$$

$$m_3 = ((d_{2x} \cdot d_{3x}) + (d_{2z} \cdot d_{3x})) \quad (4.31)$$

$$m_4 = ((d_{2x} \cdot d_{3z}) - (d_{2z} \cdot d_{3x})) \quad (4.32)$$

$$m_5 = \frac{(m_1^2 + m_2^2 - (d_{2x}^2 + d_{2z}^2 + d_{3x}^2 + d_{3z}^2))}{2} \quad (4.33)$$

$$a = m_3 + m_5 \quad (4.34)$$

$$b = -2 \cdot m_4 \quad (4.35)$$

$$c = m_5 - m_3 \quad (4.36)$$

olmak üzere  $\theta_3$  aşağıdaki denklemde belirtildiği gibi tanımlanabilir.

$$\theta_3 = 2 \cdot a \tan\left(\frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4 \cdot a \cdot c}}{2 \cdot a}\right) \quad (4.37)$$

3. eksen açısı  $\theta_3$  denklemi iki farklı kök'e sahiptir. Bu kök değerlerine  $+\pi$  eklenmesi ile elde edilecek sonucun köklerin ters işaretlisine (+/-) eşit olmasında dolayı toplamda 4 farklı denklem değeri elde edilir.

$$\theta_{3\_1} = 2 \cdot a \tan\left(\frac{-b + \sqrt{b^2 - 4 \cdot a \cdot c}}{2 \cdot a}\right) \cdot \frac{180}{\pi} \quad (4.38)$$

$$\theta_{3\_2} = 2 \cdot a \tan\left(\frac{-b - \sqrt{b^2 - 4 \cdot a \cdot c}}{2 \cdot a}\right) \cdot \frac{180}{\pi} \quad (4.40)$$

$$\theta_{3\_3} = \theta_{3\_1} + 180 \quad (4.41)$$

$$\theta_{3\_4} = \theta_{3\_2} + 180 \quad (4.42)$$

2. eksen açısı  $\theta_2$  için;

$$n_1 = d_{2x} + \text{Cos}\left(\theta_3 \cdot \frac{\pi}{180}\right) \cdot d_{3x} + \text{Sin}\left(\theta_3 \cdot \frac{\pi}{180}\right) \cdot d_{3z} \quad (4.43)$$

$$n_2 = d_{2z} - \text{Sin}\left(\theta_3 \cdot \frac{\pi}{180}\right) \cdot d_{3x} + \text{Cos}\left(\theta_3 \cdot \frac{\pi}{180}\right) \cdot d_{3z} \quad (4.44)$$

$$n_3 = (P_{3z} - d_{1z}) \quad (4.45)$$

$$a_2 = n_2 + n_3 \quad (4.46)$$

$$b_2 = 2 \cdot n_1 \quad (4.47)$$

$$c_2 = n_3 - n_2 \quad (4.48)$$

olmak üzere  $\theta_2$  aşağıdaki denklemde belirtildiği gibi tanımlanabilir.

$$\theta_2 = 2 \cdot a \tan\left(\frac{-b_2 \pm \sqrt{b_2^2 - 4 \cdot a_2 \cdot c_2}}{2 \cdot a_2}\right) \quad (4.49)$$

2. eksen açısı  $\theta_2$  denklemi iki farklı kök'e sahiptir. Bu kök değerlerine  $+\pi$  eklenmesi ile elde edilecek sonucun köklerin ters işaretlisine (+/-) eşit olmasında dolayı toplamda 4 farklı denklem değeri elde edilir. Ancak  $\theta_2 = f(\theta_3)$  bağıntısına bağlı olarak değiştiği için  $\theta_2$  toplam 8 farklı çözüme sahiptir.

$$\theta_{2\_1} = 2 \cdot a \tan\left(\frac{-b_2 + \sqrt{b_2^2 - 4 \cdot a_2 \cdot c_2}}{2 \cdot a_2}\right) \quad (4.50)$$

$$\theta_{2\_2} = 2 \cdot a \tan\left(\frac{-b_2 - \sqrt{b_2^2 - 4 \cdot a_2 \cdot c_2}}{2 \cdot a_2}\right) \quad (4.51)$$

$$\theta_{2\_3} = \theta_{2\_1} + 180 \quad (4.52)$$

$$\theta_{2\_4} = \theta_{2\_2} + 180 \quad (4.53)$$

4, 5 ve 6. eksen açısı  $\theta_4, \theta_5, \theta_6$  değerini hesaplamak için 20 nolu denklemde gösterilen  $Q_{456}$ 'nın bulunması gerekmektedir.  $Q_{456}$ , bulunan 1, 2 ve 3. eksen açılarını kullanılarak  $Q_{123}$ 'ün hesapladıktan sonra aşağıda gösterilen denklemle bulunabilir.

$$Q_T = Q_{123456} \cdot Q_{123}^{-1} \quad (4.54)$$

$$Q_T = [q_{t1}, q_{t2}, q_{t3}, q_{t4}] \quad (4.55)$$

şeklinde yazılabilir.

$$a_3 = a \tan\left(\frac{q_{t2}}{q_{t1}}\right) \quad (4.56)$$

$$b_3 = a \tan\left(\frac{q_{t4}}{q_{t3}}\right) \quad (4.57)$$

olmak üzere, 4. eksen açısı  $\theta_4$ ;

$$\theta_{4\_1} = (a_3 + b_3) \quad (4.58)$$

$$\theta_{4\_2} = \theta_{4\_1} + 180 \quad (4.59)$$

5. eksen açısı  $\theta_5$ ;

$$\theta_{5\_1} = a \cos\left(\sqrt{q_{t1}^2 + q_{t2}^2}\right) \quad (4.60)$$

$$\theta_{5\_2} = -\theta_{5\_1} \quad (4.61)$$

6. eksen açısı  $\theta_6$ ;

$$\theta_{6\_1} = (a_3 - b_3) \quad (4.61)$$

$$\theta_{6\_2} = \theta_{6\_1} + 180 \quad (4.62)$$

### 4.3. Kinematik Tabanlı Robot Konfigürasyon Uygulaması

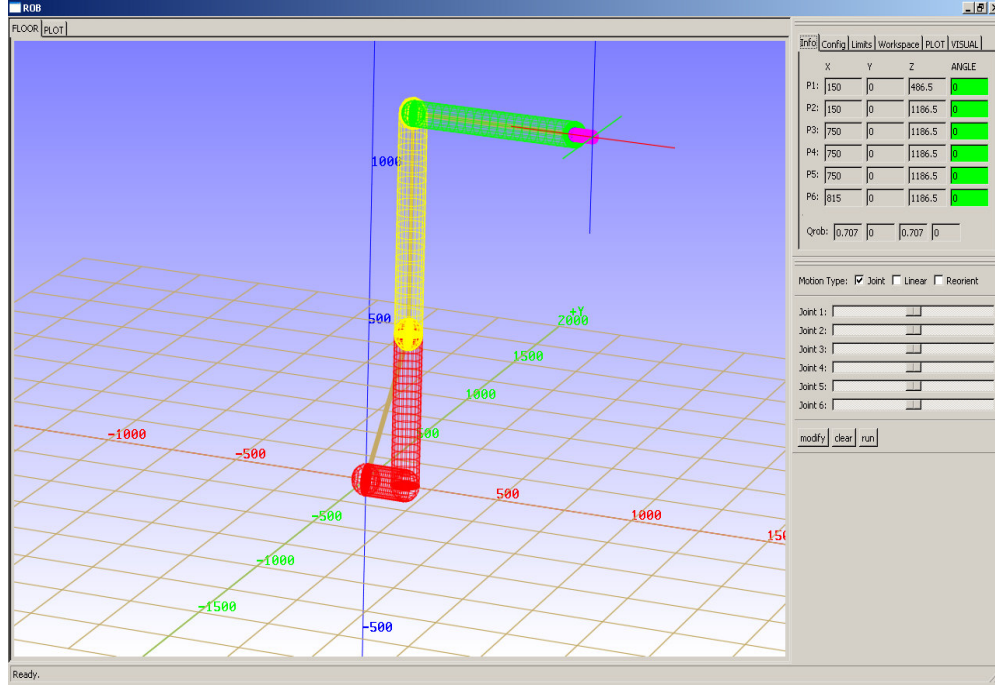
Tez çalışmasına paralel olarak bölüm 4.1 ve 4.2’de yer alan robot ileri ve ters kinematik bilgisi kullanılarak endüstriyel robotlar için bir benzetim programı geliştirilmiştir. Bu benzetim programı yardımı ile San-Tez çalışması kapsamında kamera destekli robotlu bir test istasyonunda gerçekleştirilen araç fren hortumu test düzeneği uygulamasında robotların çalışma uzayında hareketlerinin yakından incelenmesine olanak sağlanmıştır.

Geliştirilen benzetim programı, mühendislik eğitiminde endüstriyel robotlarla ilgili konular işlenirken robot marka ve modelinden bağımsız bir şekilde ve her marka ve modelinin ölçülerini sağlayacak bir benzetim programı meydana getirilmiştir.

Programda, temel robot hareketleri programlama, çalışma uzayı ve robotun dinamik parametreleri olan hız-ivme konuları her robot marka ve modeli için yapılabilmektedir. Bu program, C++’ta Fox ToolKit kütüphanesi kullanılarak oluşturulmuş ve “Endüstriyel robot eğitim aracı -IRT: Industrial Robot Training Tool” olarak isimlendirilerek görsel bir robotik eğitim materyali olması hedeflenmiştir.

Bu materyal sayesinde istenilen uzunluklara sahip robot kolları ile elde edilen konfigürasyonun çalışma uzayındaki sınırlarları, her bir kol’a ait açı limitleri, temel robot hareketleri (doğrusal, eksenel, yönelim) ve programlanma gibi konular görsel olarak öğrencilere aktarılma imkânı sağlanmıştır. Programının yapısı Şekil 4.3’de gösterilmiştir.

Programda 6 farklı etkileşim penceresi, info (genel bilgi), config (konfigürasyon), limits (sınırlar), workspace (çalışma uzayı), plot (çizim) ve visual (görsel) bulunmaktadır. Bu etkileşim pencereleri sırası aşağıda tanımlanmıştır.



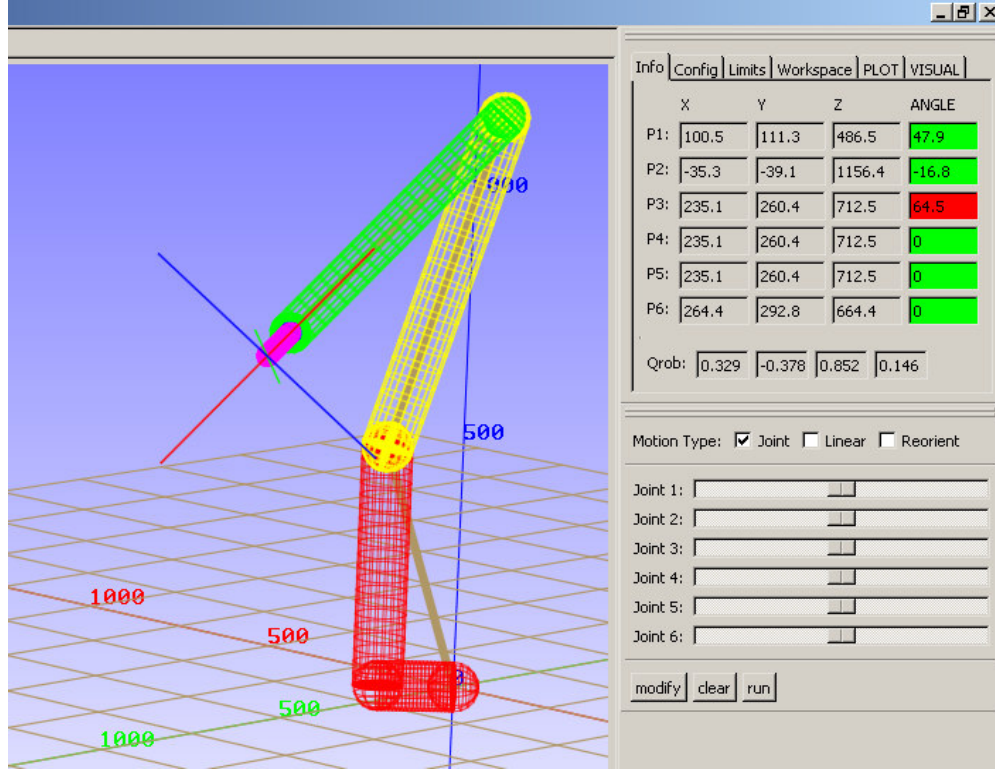
Şekil 4.3: Endüstriyel robot eğitim stüdyosu (IRT)

#### 4.4. Genel Kullanım

Geliştirilen sistem sayesinde tıpkı gerçek bir robotun teachpendat'ı (kumanda paneli) üzerindeki hareket komutları ve şekli taklit edilmiştir. Pek çok endüstriyel robot kumandasında olduğu gibi bu programda da panel üzerindeki yön tuşlarının hareket ettirilme oranına bağlı olarak ilgili aks yada robot TCP hızı oransal olarak artmaktadır.

Robotun, temel hareket tipleri olan Doğrusal, Eklemsel ve Oryantasyon şeklinde hareket ettirilmesi sağlanmıştır. Kullanıcı, bu sekme yardımı ile robot'u istenilen hareket tipinde hareket ettirebilmektedir. Bu hareketler esnasında aks'lara ait çalışma uzayındaki konum (x,y,z) ve aksların dönme açıları görülebilir.

Robot TCP oryantasyonu yine bu sekme vasıtasıyla kullanıcıya sunulmuştur. Robotun hareket ettirilmesi esnasında aksların limitleri dışında bir noktaya robot götürülmek istediğinde ilgili aks kırmızı renkle kullanıcıyı uymaktadır. Bu uyarı şekli Şekil 4.4'te verilmiştir.

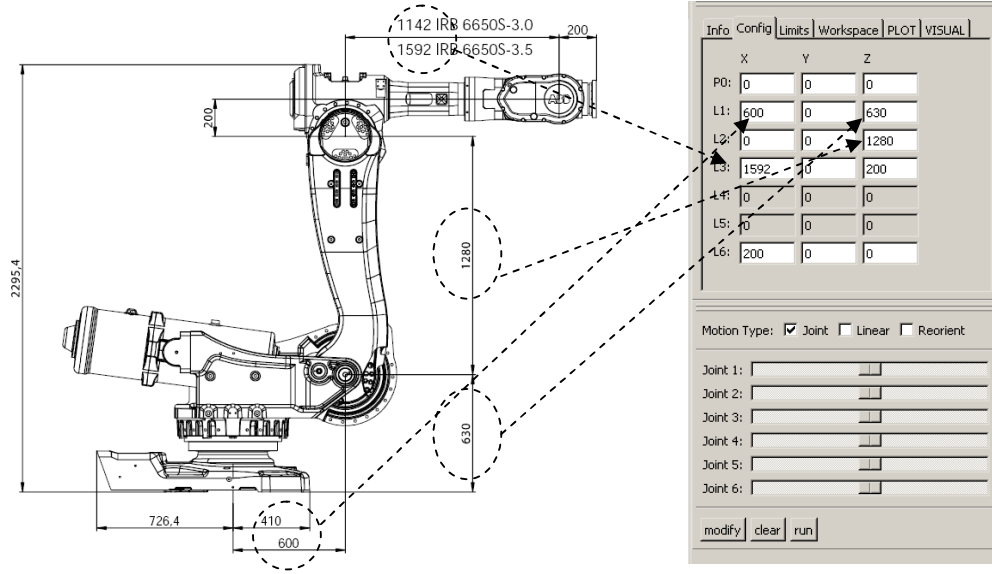


Şekil 4.4: Eksen sınırlaması.

#### 4.5. Konfigürasyon Sekmesi

Konfigürasyon sekmesinde, herhangi bir endüstriyel seri robot için bir model oluşturulabilir ve oluşturulan model sistemde test edilebilir. Bu sekme yardımı ile bir robot markasının (kuka, comau, abb, fanuc, etc, vs.) herhangi bir robot'u modellenmesi mümkündür.

Modellenecek olan robota ait aks dataları kartezyen koordinat sisteminde x,y ve z deki uzunlukları Config sekmesinde gösterilmiş olan L1,L2,...L6 kutularına girilir. Şekil 4.5'de verilen ABB IRB 6650S 125/3.5m robotu için IRT programının konfigürasyon giriş ekranı gösterilmiştir.

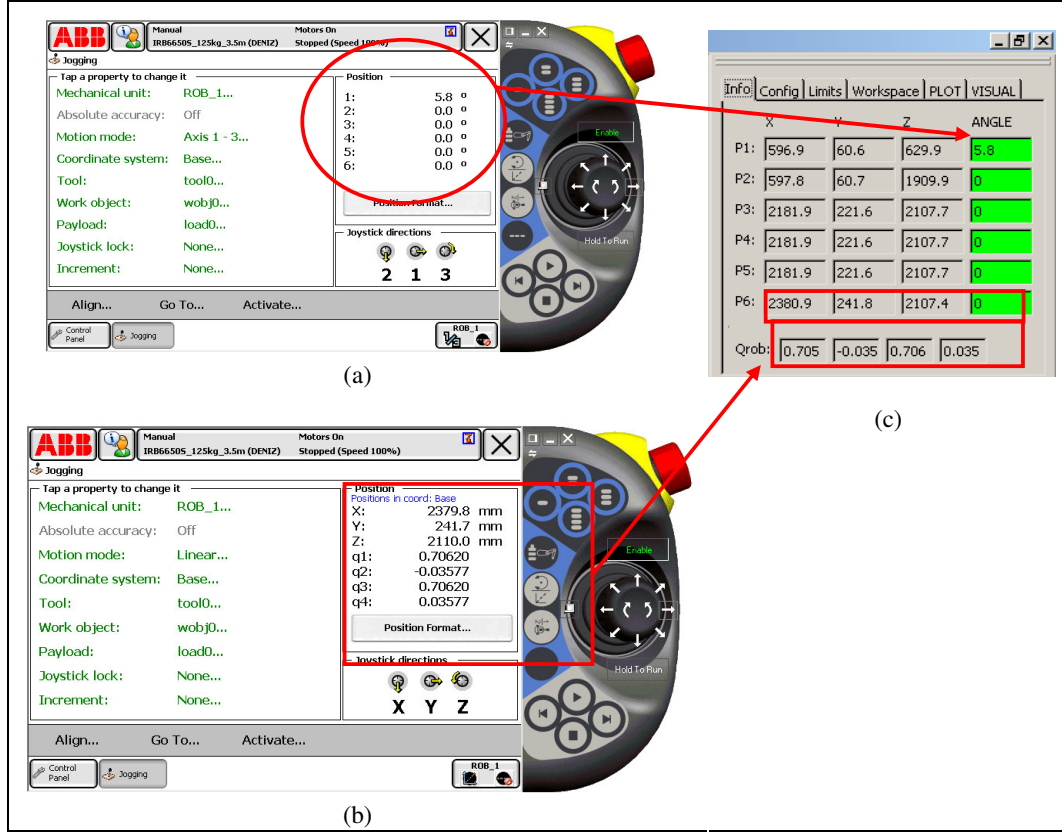


Şekil 4.5: ABB IRB 6650S 125/3.5m robot ölçüleri

Belirtilen robot modeli, ABB firmasının çevirim dışı programlama için geliştirmiş olduğu robot benzetim programı olan “Robot Studio”da ve IRT benzetim programında karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Gerçek robot verisi ile oluşturulan programın karşılaştırılması için Robot Studio programında oluşturulan IRB 6650S robotu Şekil-4.6.1’de gösterildiği 1.eksenin 5 derece döndürülmesi ile elde edilecek olan robotun yeni TCP değeri yine aynı program yardımı ile Şekil 4.6.2’de verilmiştir. IRT programında benzer işlemin uygulanması ile elde edilen sonucun ABB Robot Studio programı ile aynı olduğu Şekil 4.6.3’te ortaya konulmuştur.





Şekil 4.6: Gerçek robot verisi ile oluşturulan programın karşılaştırılması  
a- ABB IRB 6650 1. ekseninin 5.8 derece döndürülmesi. b- ABB IRB 6650 1. ekseninin 5.8 derece döndürülmesi. c- IRT programda ABB IRB 6650 modeli oluşturulan ve 1. ekseninin 5.8 derece döndürülmesi sonucunda elde edilen TCP ve oryantasyon değerleri.

#### 4.6. Eksen Sınırları Sekmesi

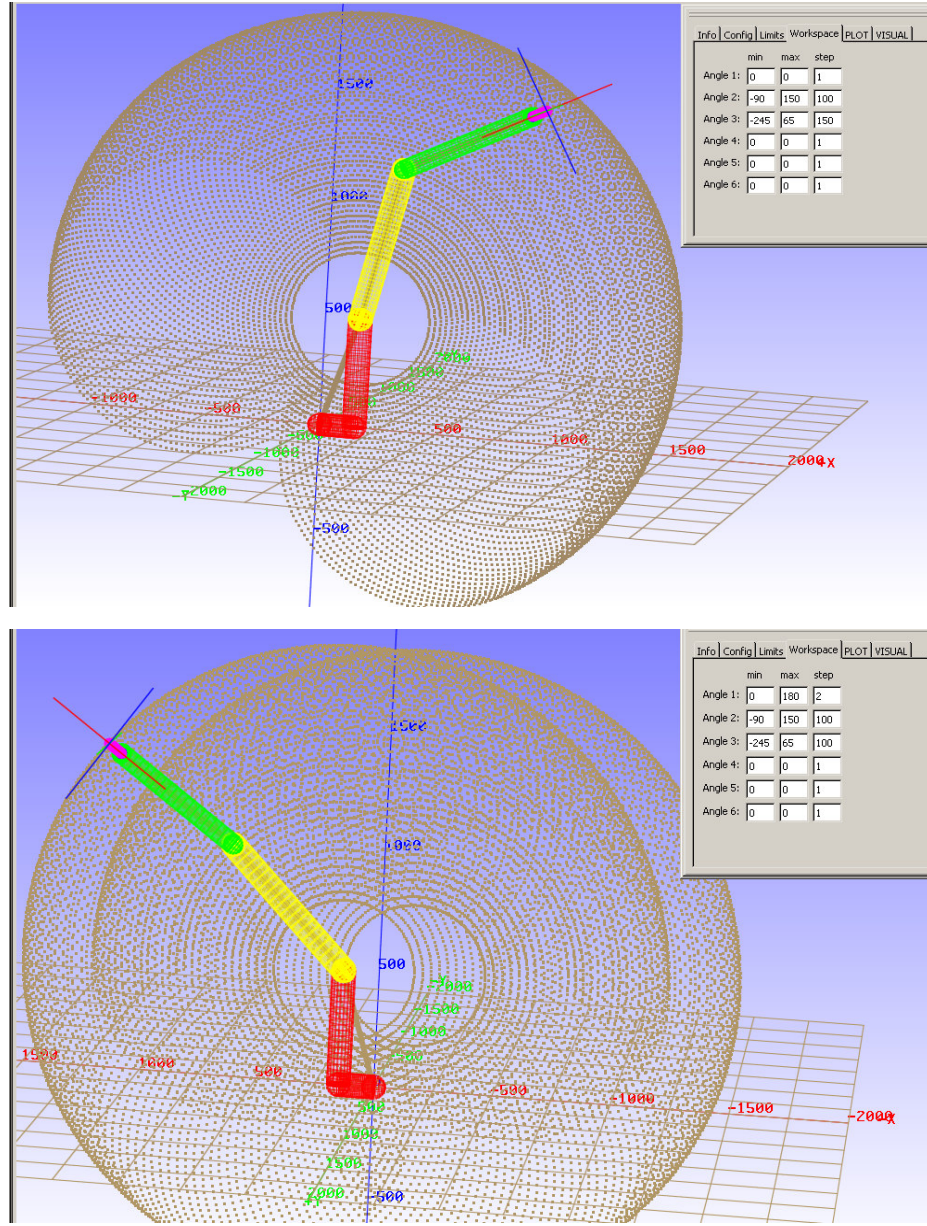
Robot kolların oluşturduğu dizayn gereği erişim sınırlarının tanımlanması gerekmektedir. Bu sekme sayesinde robotun çalışma uzayındaki sınırların ayarlanması mümkündür. Robotların kullanıldığı imalat ortamlarında iş güvenliği açısından bazı eksenlerin çalışma limitlerinin değiştirmesine ihtiyaç duyulur. IRT programında eksenlerin çalışma uzayı açısından sınırlandırılması Şekil 4.7’de gösterilmiştir.

	min	max
Angle 1:	-180	180
Angle 2:	-90	150
Angle 3:	-245	65
Angle 4:	-200	200
Angle 5:	-115	115
Angle 6:	-400	400

Şekil 4.7: IRT programında eksen sınırlama

#### 4.7. Çalışma Uzayı Sekmesi

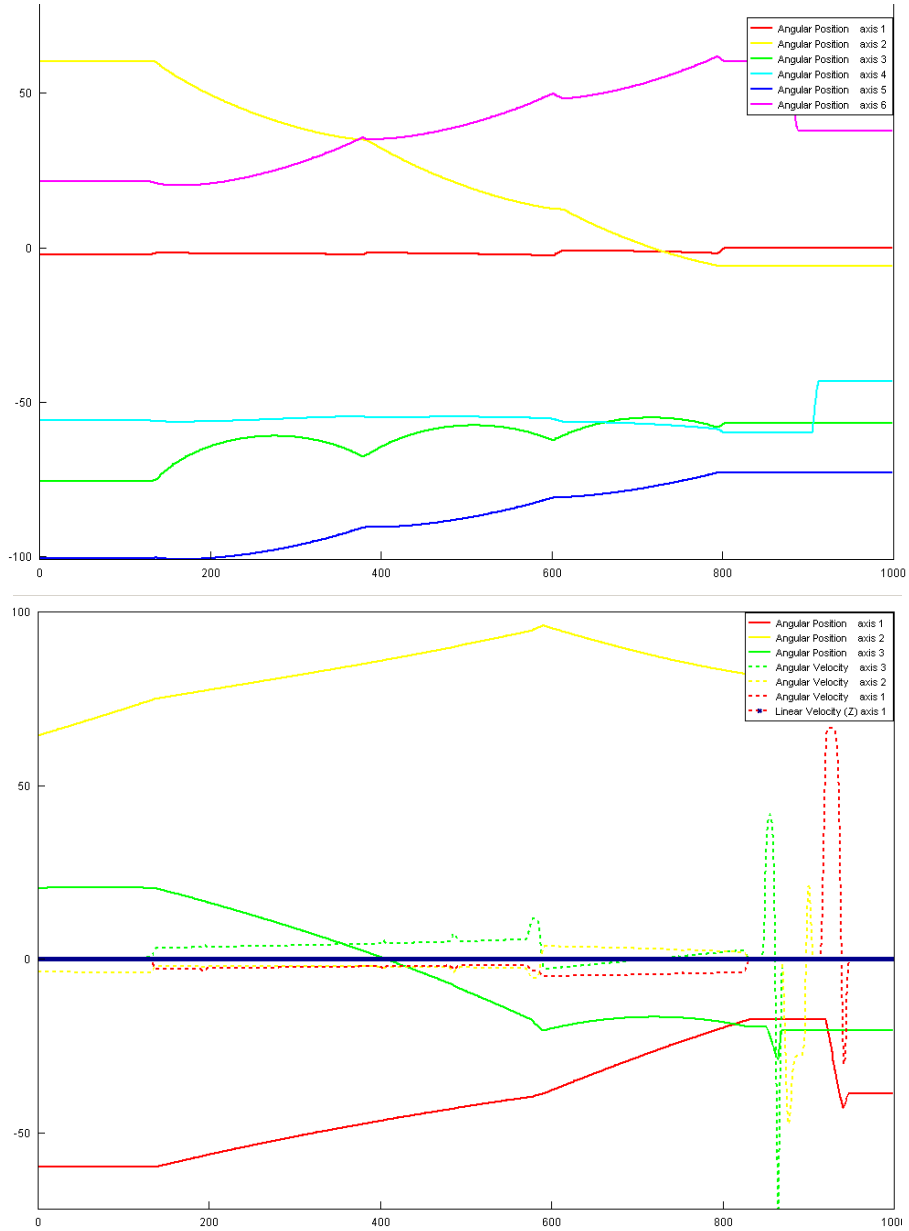
Endüstride, robotik bir imalat işlemi için kullanılacak robotun çalışma uzayında nasıl bir yörüngeye sahip olduğu ortaya konulması gerekir. Bu gereksinim robota daha fazla iş yaptırma yaklaşımından ortaya çıkmıştır. IRT programında konfigürasyonu oluşturulmuş bir robotun her bir eksen için çalışma uzayındaki sınırların ortaya konulması mümkündür. IRT programı yardımı ile Şekil 4.8’de ABB IRB 1600 1.45/5 robot modeli için çalışma uzayındaki çalışma sınırları verilmiştir.



Şekil 4.8: IRT programında çalışma uzayı belirleme

#### 4.8. Çizim/Trend Sekmesi

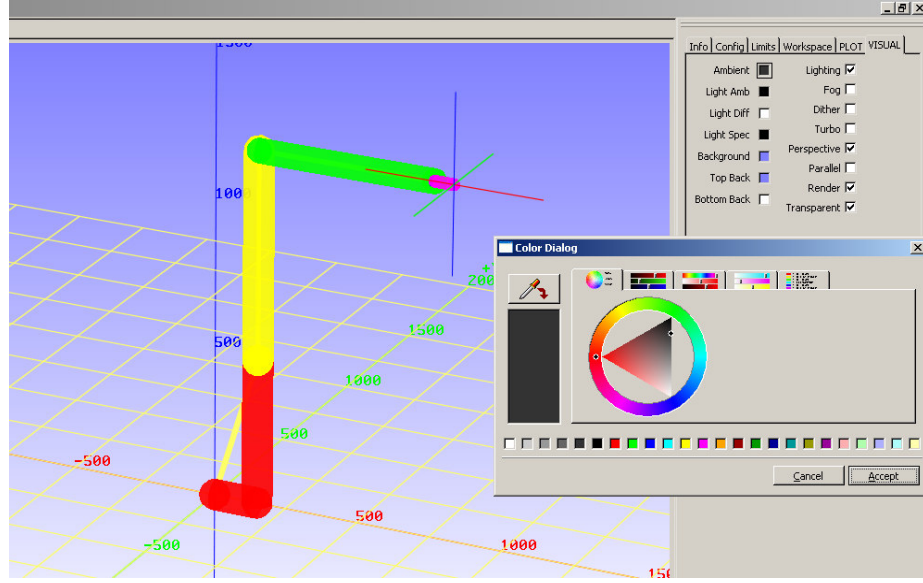
Bu sekme yardımı ile robotun her eksenine ait açısal ve doğrusal pozisyon, hız ve ivme değerlerinin çizdirilmesi sağlanmıştır. Bu fonksiyon sayesinde robotun herhangi bir yörüngede, hareketi esnasında davranışlarının ortaya konulması mümkün kılınmıştır. Gerek robotun ters kinematiği açısından gerekse de düz kinematiği açısından eksen hareketleri rahatlıkla izlenebilmektedir. Şekil 4.9'da robot'a öğretilmiş bir yörüngede 1, 2 ve 3. eksenlerin yörünge boyunca açısal pozisyonlarının gösterilmiştir.



Şekil 4.9: Eksen değişimleri

#### 4.9. Görsel Sekmesi

Bu sekme sayesinde konfigürasyonu oluşturulmuş robot ve robotun çalıştığı sahne açısından gerekli renklendirme ve ışıklandırmaların yapılması sağlanmıştır. Şekil 4.10'da IRT programının sahne ayarları ekranı gösterilmiştir.

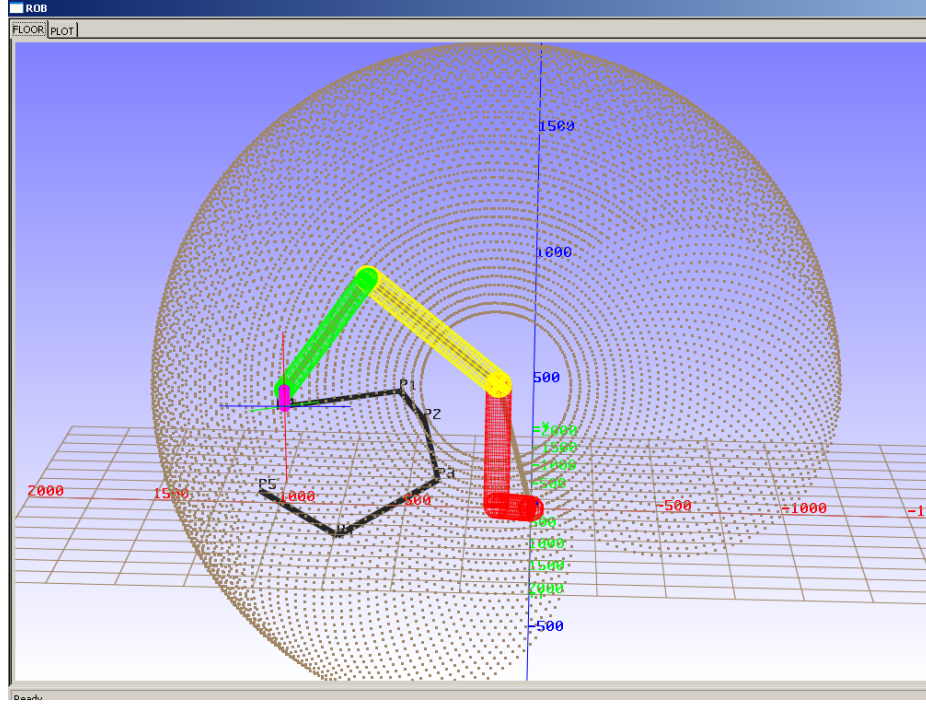


Şekil 4.10: Program sahne ayarları

#### 4.10. Çevirim Dışı Programlama

Endüstriyel robotların saha koşullarında bir proses ile ilgili noktaların tek tek öğretilmesi yöntemi oldukça zaman alan bir iştir. Son yıllarda robot imalatçıları çıkarmış oldukları çevirim dışı programlama yazılımları sayesinde sahada robotlara nokta öğretme işlemi azaltılmıştır ve saha tarafında harcanan zamanın ciddi anlamda indirgenmesi sağlanmıştır. Endüstriyel robotlarda çevirim dışı programlama, bir proses ile ilgili işlem noktalarının robot açısından doğru öğretilme metodudur. Bu öğretilme metodunda, robotun ilgili noktalara erişimi esnasında takip ettiği yörünge ve yörünge boyunca robotun oryantasyonuna dikkat edilmelidir. Günümüz mevcut endüstriyel robotların çevirim dışı programlanması için geliştirilen tüm yazılımlardaki temel operasyon olan nokta öğretme işlemi ve yörünge takibi için IRT programına bir modül eklenmiştir. Bu modül sayesinde robotun çalışma uzayında erişimi ve eksen sınırları dikkate alınarak oluşan çalışma yörüngesi içerisinde

noktalar öğretilmekte ve bu noktalar için robotun eksen hareketleri, hızı ve oryantasyonu gözlemlenebilmektedir. IRT programındaki off-line programlama için geliştirilen modül Şekil 4.11’da gösterilmiştir.



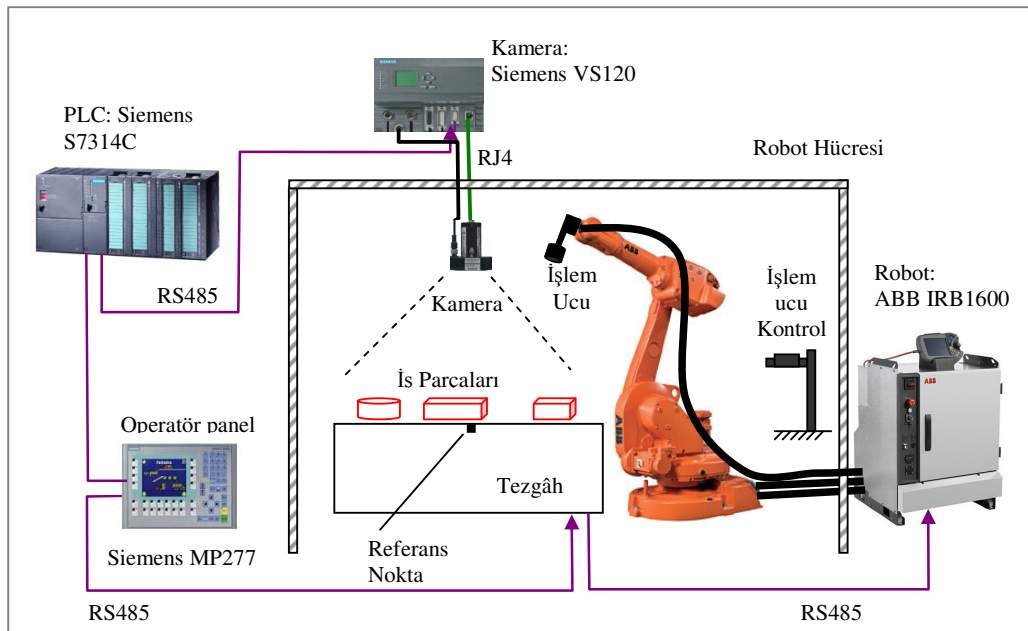
Şekil 4.11: Çevirim dışı programlama modülü

## 5. KAMERA DESTEKLİ ROBOTİK UYGULAMA

Bu bölümde, bölüm 4’te sunulan kinematik bilgisi kullanılarak bir kameradan alınan verilerin önce bir PLC yardımı ile robot kinematığı için anlamlı bir veri formatına dönüştürülmesi sağlanmıştır. PLC’de gerçekleştirilen yazılım sayesinde robotun konum ve oryantasyonu bilgileri doğru bir şekilde hesaplandıktan sonra bu veriler robota gönderilmektedir.

### 5.1. Sistemin Genel Yapısı ve Çalışma Prensibi

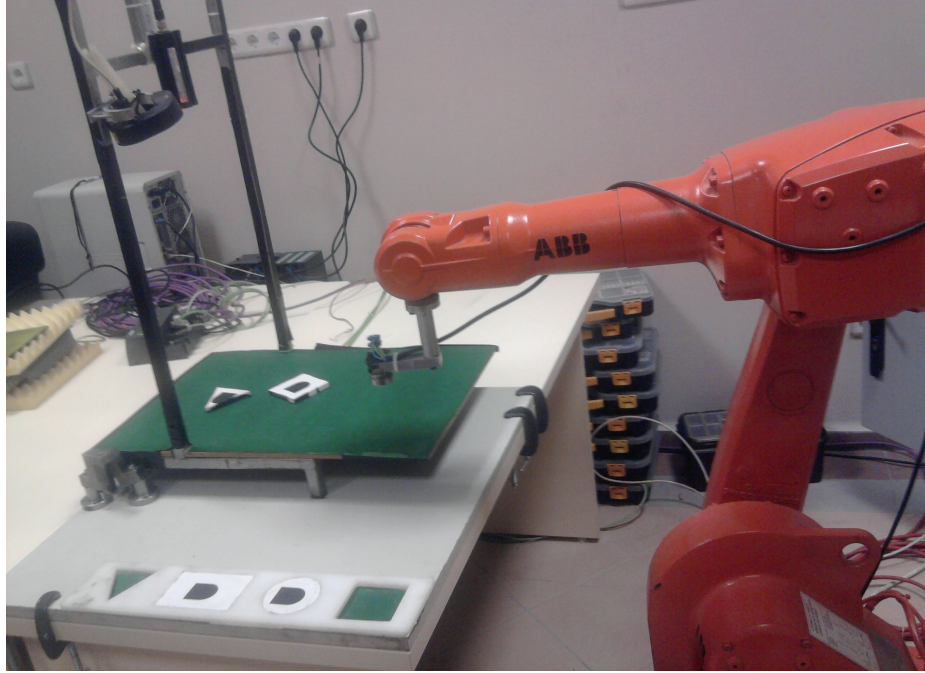
Sistemin yapısı, bir adet smart kamera, robot, PLC ve kullanıcı için bir adet Operatör panelinden meydana gelmektedir. Şekil 5.1’de sistemin modeli ve Şekil 5.2’de test ortamından gerçek bir görüntü sunulmuştur. Oluşturulan bu sistem modeline göre, kamera-PLC, Robot-PLC ve Operatör Panel (OP)-PLC kendi aralarında bir veri alışverişinde bulunmaktadır. Veri alışverişi ve sistem kontrolünü tamamen PLC sağlamaktadır.



Şekil 5.1: Sistemin Modeli



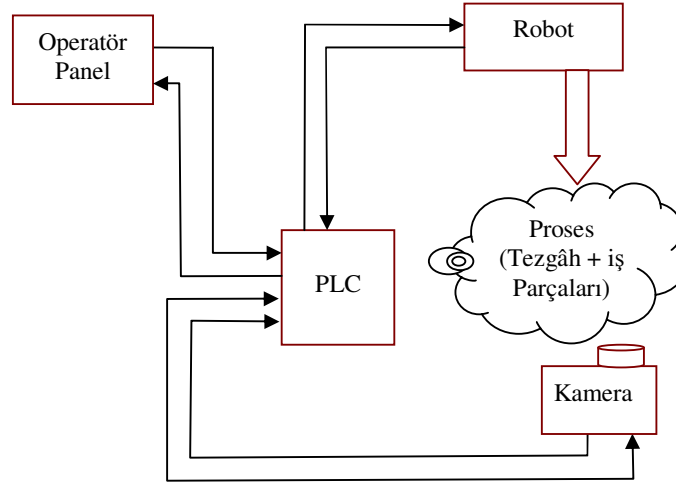
Sistemin çalışma prensibi; tezgâh üzerinde rast gele bırakılmış ve model olarak sisteme tanıtılmış farklı işlem parçaları (daire, üçgen, kare ve dikdörtgen) bulunmaktadır. Kamera tezgâh üzerinde bulunan işlem parçalarından hangi modeli tarayacağına PLC tarafından karar verilmektedir. Model tarama işlemi için PLC, daha önceden tanımlanmış dört modeli belirli bir çevirim sürecinde kameraya sırası ile kontrol ettirmektedir. Kamera, gördüğü işlem parçalarının bilgilerini PLC' ye göndermekte ve PLC aldığı bu veriyi işleyip hedef bilgisine dönüştürdüktan sonra robot'a göndermektedir. Robot, PLC tarafından gönderilen nesnenin konum bilgisini aldıktan sonra ilgili işlem parçasına yönelimini sağlayıp parçayı doğru rotasyon bilgisi ile almakta ve daha sonra istenilen parça bırakma noktasına koymaktadır.



Şekil 5.2: Test ortamı

Sistem yapısında yer alan ekipmanlar Şekil 5.1.'de gösterildiği gibi bir adet ABB marka IRB1600 endüstriyel robot, bir adet Siemens PLC S7314C 2DP CPU ve I/O üniteleri, bir adet Siemens OP277 Operatör Panel, bir adet Siemens VS120 smart kamera, tezgâh ve farklı işlem parçalar meydana gelmektedir. Ekipmanlar arasındaki haberleşme Profibus üzerinden gerçekleşme olup sistemde PLC ana (master)

konumunda ve diğer tüm ekipmanlar uydu (slave) konumundadır. PLC ve kamera arasında 32byte'lık bir veri akışı söz konusudur. Şekil 5.3' verilen sistemin veri akış blok diyagramına göre bu veri akışı gerçekleşmektedir. Bu veri akışı içerisinde işlem parçalarının konum bilgileri, açı bilgisi ve karşılıklı veri doğrulama bitleri yer almaktadır. Kameradan alınan bilgiler ham veri olup bu veriler robot'un koordinat sistemi ve ileri kinematik denklemlerine göre PLC tarafından işlenmektedir.

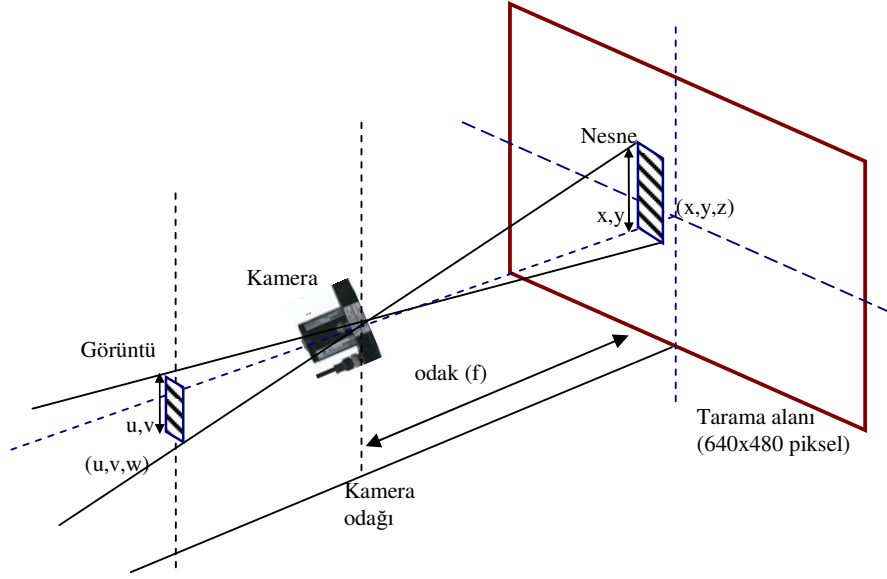


Şekil 5.3: Sistemin veri akış blok diyagramı

## 5.2. Kamera Uygulaması

Şekil 5.4'te yer alan sistem yapısındaki kamera için görüntü alanındaki referans noktaya göre işlem parçalarının konum bilgisini oluşturmaktadır. Çalışmada kullanılan Siemens VS120 smart kamerasının katalog bilgileri gereği 640x480 pixel'lik bir tarama alanına 400 mm uzaklıktan yaptığı ölçümlerdeki hassasiyeti ( $\eta$ ) 0.11 mm / pixeldir [23]. Bu ölçüm hassasiyeti kameranın klavuzunda yer alan gerekli ortam koşulları (ışık, nesne durumu, vs..) sağlanması durumu için geçerlidir. Şekil5.a.'da kamera-nesne ilişkisi dikkate alındığında standart akıllı kameralar spekleri dışında çalıştırılması durumu için (farklı bir odak uzaklığında) kameranın hesaplayacağı konum bilgileri gerçeği yansıtmayacağından alınan verinin bir düzeltme fonksiyonu geçirilmesi gerekmektedir.



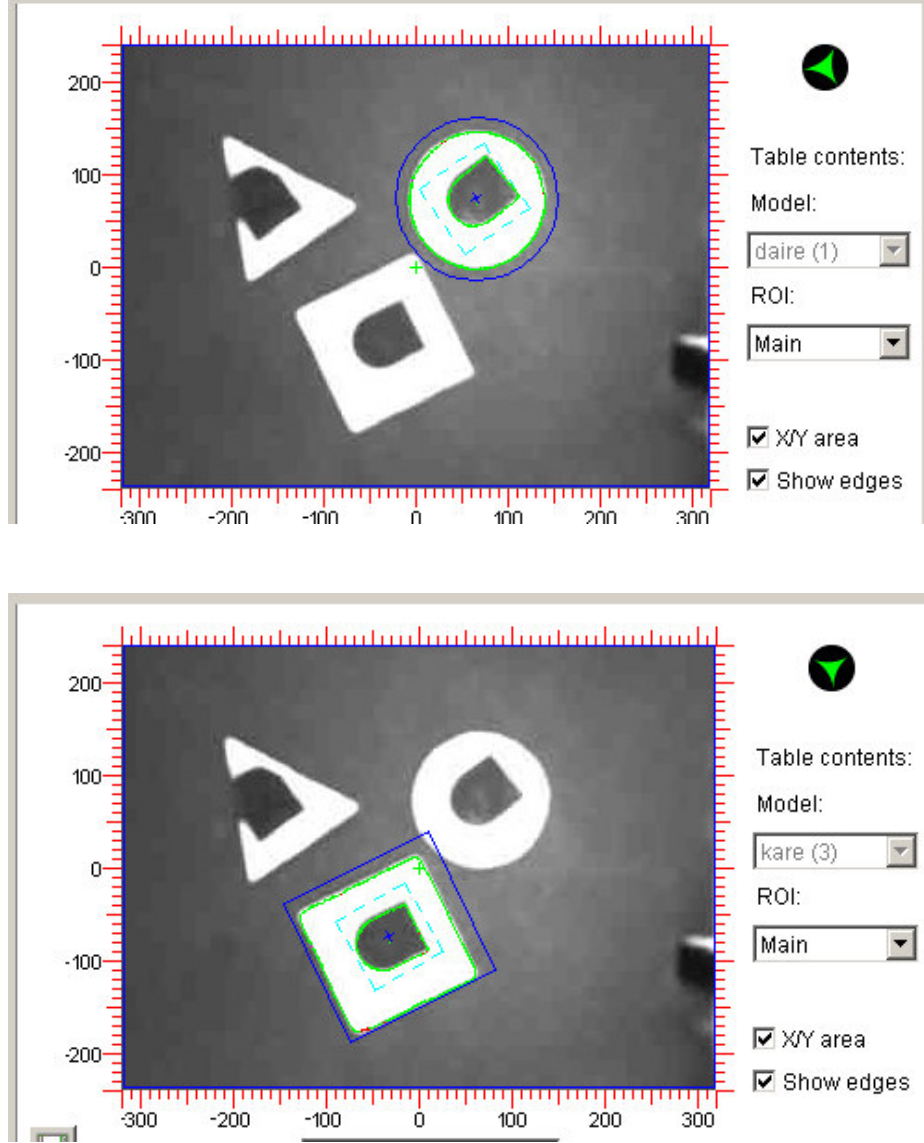


Şekil 5.4: Kamera-nesne ilişkisi

Bu düzeltme fonksiyonu şu şekilde yazılabilir;

$$F_d(x, y, u, v, f) = \tau \frac{F(u, v)}{F(x, y)} \quad (5.1)$$

Denklemden yer alan  $F_d$  düzeltme fonksiyonu,  $x, y, u, v$  nesnenin gerçek ve oluşan görüntü boyutu ve  $\tau$  düzeltme parametresini göstermektedir. Uygulamada kullanılan kameranın ölçtüğü nesnelere için nesnenin görüntü alanındaki  $x, y$  konumu ve dönme açısını ( $r$ ) vermektedir. Çalışma tezgâhındaki kamera konumu itibarıyla herhangi bir model için gönderdiği  $x, y, r$  değerleri PLC tarafında oluşturulan düzeltme fonksiyonundan geçirilmektedir. VS120 akıllı kamerasından alınan görüntüler Şekil 5.5'te verilmiştir. Şekilde görüleceği üzere ilgili nesnenin konumu, rotasyonunu ve görüntü yakalama kalitesi konusunda bilgiler bulunmaktadır.

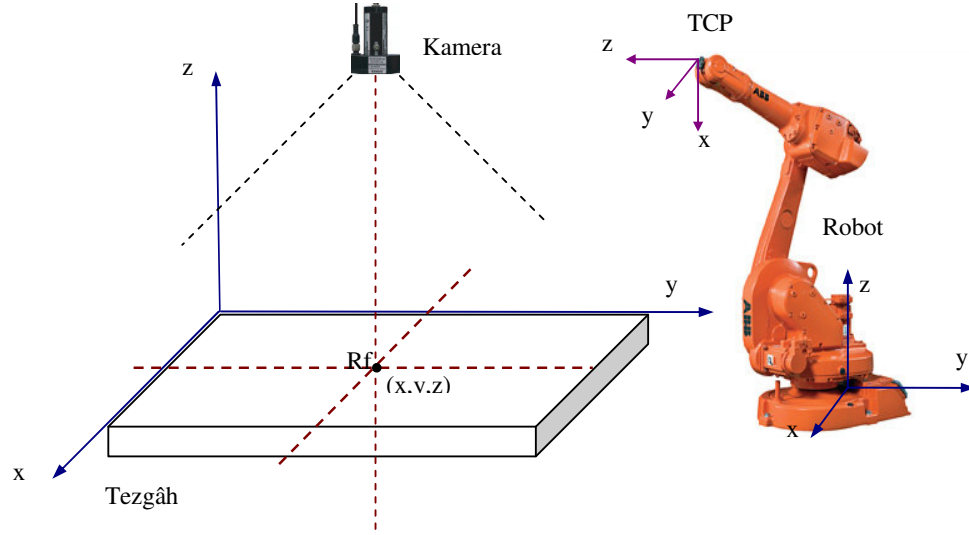


Şekil 5.5: Kare ve daire nesnelere için VS120 ekran görüntüsü

PLC tarafından kamera verileri işlendikten sonra elde edilen yeni verilen robot birim hareketi olan milimetre için anlamlı bir formata getirilmiştir. Bu veriler, robot ileri kinematik bağıntıları baz alınarak robotun nesnenin bulunduğu hedefe yönelim ve oryantasyonu sağlanmaktadır.

### 5.3. Robot Yönelim ve Oryantasyonu

Robotun nesnenin bulunduğu hedefe doğru yönelimi için hem robot için hemde kamera için ortak bir referans noktaya ihtiyaç vardır. Bu referans nokta robotun doğru yönelimi için gereklidir ancak robotun doğru rotasyonu için kameradan alınan nesnenin açı bilgisi robotun ileri kinematik bağıntısından geçirilmesi gerekmektedir. Robot ve kamera için referans noktanın seçimi ve koordinat sistemi Şekil 5.6'da gösterilmiştir.



Şekil 5.6: Robot ve kameranın koordinat sistemi

Tezgâh üzerinde kameranın taradığı 640x480px'lik alanın tam orta noktası işaretlenmiştir. Bu nokta gerek robot için gerekse de kamera için referans bir noktadır. Bu referans nokta dikkate alınarak robot tarafından gerekli dönüşümler yapılmaktadır. Gerekli dönüşüm işlemlerinin yapılabilmesi için robotun referans noktasındaki konum ve oryantasyonu ve aynı zamanda kameranın referans noktaya göre yine konum ve oryantasyon bilgisine ihtiyaç vardır. Kameranın gönderdiği veri paketi içerinden herhangi bir oryantasyon bilgisi bulunmadığından kamera için sabit bir oryantasyon tanımlanmalıdır. 4.5 nolu denklem dikkate alınarak robot ve kamera için konum ve oryantasyon denklemleri yazılabilir.

Kamera için;

$$P_{kamera} = [x_k, y_k, 0][qk_1, 0, 0, qk_4] \quad (5.2)$$

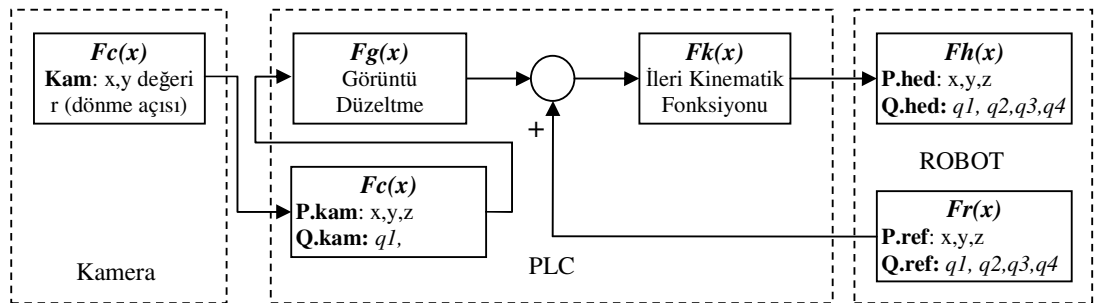
Yazılabilir. Bu arada z değerinin sıfır olmasının nedeni uygulamada kullanılan kameranın özelliği gereği sadece x,y ve rotasyon değerlerini veriyor olmasıdır. Kamera oryantasyonu dikkate alındığında, rotasyon değerinin sadece z eksenini etrafından olmasından dolayı x ve y eksenleri etrafındaki rotasyonlar sıfırdır. Kameradan alınan rotasyon değeri (açı bilgisi) 4.7 nolu denklem kullanılarak açı-eksenden quaternion'a dönüş yapıldıktan sonra  $qk$  değişkenine atanmaktadır. Kamera rotasyon değeri ve robotun referans noktasındaki rotasyonların çarpımının sonucu ile daha sonra bu yeni rotasyon değeri ile robotun referans noktasındaki konum bilgisine kameradan gelen x,y verisi eklenerek elde edilen sonuç 3.10 nolu denklemden geçirilerek hedef noktanın konum ve oryantasyon bilgisi elde edilir. Kamera, robot ve hedef için aşağıdaki konum ve oryantasyon tanımlaması yapılmıştır;

$$\text{Kamera: } P_{kamera} = [x_k, y_k, 0][qk_1, 0, 0, qk_4] ,$$

$$\text{Robot: } P_{Robot} = [x_r, y_r, z_r] [qr_1, qr_2, qr_3, qr_4] \text{ ve}$$

$$\text{Hedef: } P_{Hedef} = [x_h, y_h, z_h] [qh_1, qh_2, qh_3, qh_4] \text{ dır.}$$

Hedef bilgisinin elde edilmesi ile ilgili gerekli veri akış şeması Şekil5.7'de verilmiştir.



Şekil 5.7: Sistem veri akış şeması

Hedef noktasındaki oryantasyon değerinin hesaplamak için kamera rotasyonu ile robotun hedef noktasındaki rotasyonların çarpılması ile elde edilir. İki oryantasyon

değeri quaternion cinsinden olduğu için Quaternion çarpımı metodu ile elde edilir. Bu işlem 8 nolu denklemde tanımlanmıştır.

$$\begin{aligned}
qh_1 &= qr_1.qk_1 - qr_2.qk_2 - qr_3.qk_3 - qr_4.qk_4 \\
qh_2 &= qr_1.qk_2 + qr_2.qk_1 + qr_3.qk_4 - qr_4.qk_3 \\
qh_3 &= qr_1.qk_3 - qr_2.qk_4 + qr_3.qk_1 + qr_4.qk_2 \\
qh_4 &= qr_1.qk_4 + qr_2.qk_3 - qr_3.qk_2 + qr_4.qk_1
\end{aligned} \tag{5.3}$$

Elde edilen hedef oryantasyon değeri 4.10 nolu denklemden geçirilerek hedefin konum bilgisi tespit edilir.

Hedef x,y ve z bilgisi için;

$$\begin{aligned}
x_h &= x_r + qh_1.qh_1.x_k + 2.qh_3.qh_1.z_k - 2.qh_4.qh_1.y_k + qh_2.qh_2.x_k \\
&\quad + 2.qh_3.qh_2.y_k + 2.qh_4.qh_2.z_k - qh_4.qh_4.x_k - qh_2.qh_2.x_k
\end{aligned} \tag{5.4}$$

$$\begin{aligned}
y_h &= y_r + 2.qh_2.qh_3.x_k + qh_3.qh_3.y_k + 2.qh_4.qh_3.z_k + 2.qh_1.qh_4.x_k \\
&\quad - qh_4.qh_4.y_k + qh_1.qh_1.y_k - 2.qh_2.qh_1.z_k - qh_2.qh_2.y_k
\end{aligned} \tag{5.5}$$

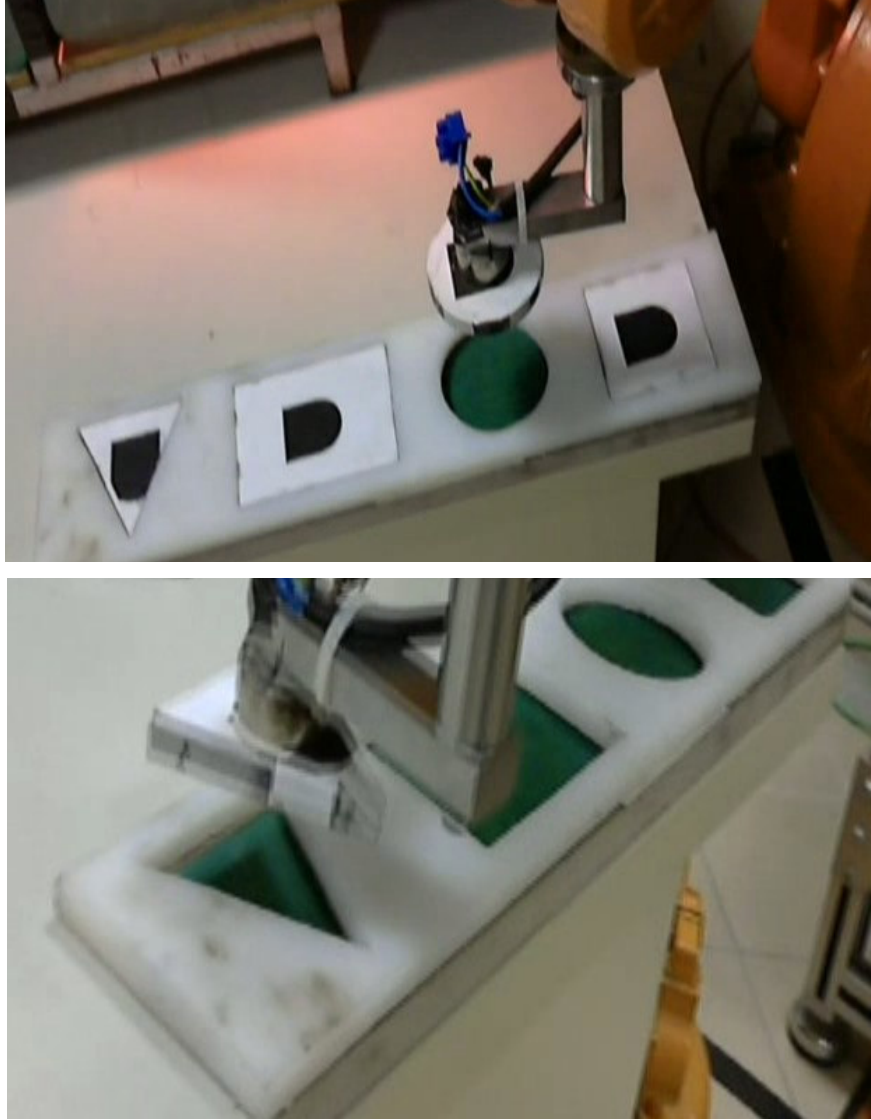
$$\begin{aligned}
z_h &= z_r + 2.qh_2.qh_4.x_k + 2.qh_3.qh_4.y_k + qh_4.qh_4.z_k - 2.qh_1.qh_3.x_k \\
&\quad - qh_3.qh_3.z_k + 2.qh_1.qh_2.y_k - qh_2.qh_2.z_k + qh_1.qh_1.z_k
\end{aligned} \tag{5.6}$$

denklemler yazılabilir. Kamera ve robot arasında PLC kullanılmasının nedeni endüstriyel ortam için PLC'lerin PC'lere göre daha güvenilir olmasıdır. Ayrıca geliştirilen sistem Siemens S7 CPU314C test edildiği için bu PLC'nin desteklediği Ladder, STL, SCL (Structured Control Language) dillerinden en hızlı ve karmaşık proseslerin programlamasında kullanılan S7-SCL [24] dili tercih edilmiştir.

#### 5.4. Robotik Al-Bırak Uygulaması

Bu bölümde, geliştirilen sistem ve model sayesinde bazı pratik uygulamalar ortaya konulmuştur. Uygulamada kullanılmak üzere belirli boyutlardaki kare, üçgen, daire ve dikdörtgen şeklindeki parçalar ve bu parçaların yerleştirileceği yuvalar hazırlanmıştır. Hazırlanan bu parçalar kamera tarama alanının bulunduğu düzleme rasgele atılmakta ve atılan bu parçalar kamera tarafından tarandıktan sonra ilgili parçanın konum bilgisi PLC içinde işlenmekte ve daha sonra bu verilen PLC 'den Robot'a aktarılmaktadır. Robot, aldığı bu veri ile nesneyi doğru bir rotasyonla

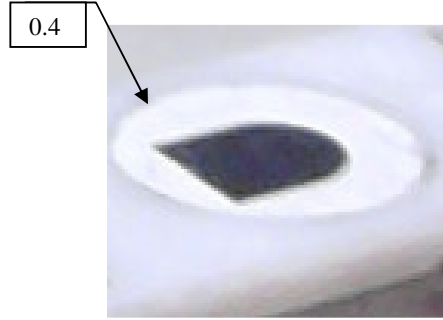
yakalamakta ve daha sonra Şekil 5.8'deki gösterilen bırak yuvalarına nesneyi yerleştirmektedir. Kamera ve PLC arasında, tanımlanmış modellerin taranması ve ilk yakalanan modelin bilgisinin oluşturulması konusundaki toplam işlem süresi ortalama 105ms dir. Bu süre içinde PLC tarafından robot'a ilk yakalanan nesnesinin konum ve rotasyon bilgileri ve daha sonra hangi yuva bırakma işlemi yapacağı konusundaki model bilgisi gönderebilmektedir.



Şekil 5.8: Nesne bırakma yuvaları

Bu işlem, Şekil 5.9'da görüldüğü gibi işlem parçaları, 0.4mm'lik toleranslara sahip yuvalarına bırakma işlemi başarı ile gerçekleştirilmektedir. Bu hassasiyette işlemi gerçekleştirmek için PLC tarafında yer alan görüntü düzeltme fonksiyonu ve

kinematik bağıntı fonksiyonlarının doğru bir şekilde tanımlanmış olması gerekmektedir.



Şekil 5.9: Nesnenin yuvaya yerleşim hassasiyeti

Akıllı kameraların kendi üzerindeki harici aydınlatma sistemi sayesinde çekim yaptığı ortamın aydınlatmasından bağımsız bir şekilde çalışabilmektedir. Bu özellikle birlikte diğer çevresel faktörlerden minimum düzeyde etkilenmesi akıllı kameraların güvenilirliğini ortaya koymaktadır. Şekil 5.10'da ortam aydınlatmalarının tamamen kapatıldığı ve kameranın sadece kendi ışığı ile yine aynı hassasiyette veri işlediğini görülmüştür.



Şekil 5.10: Ortam aydınlatmasından bağımsız bir çalışma

## 5.5. Kinematik Zincir Güvenlik Modeli

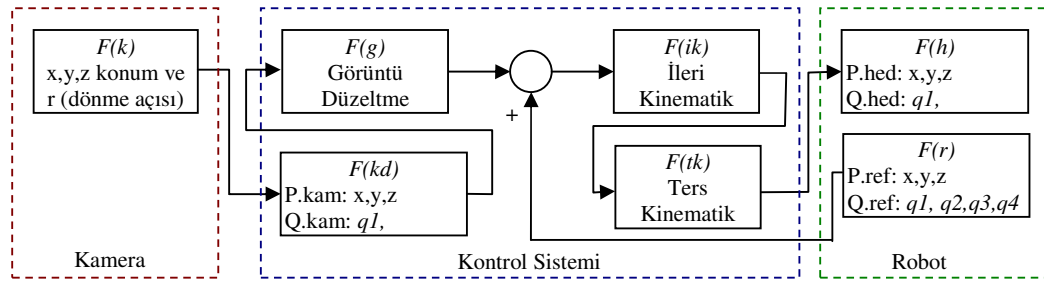
Robotik al-bırak uygulamalarında yer alan nesnenin konum verisi kamera tarafından elde edilmekte ve bu veri robot'un hedef verisine dönüştürülme işlemi tasarlanmış bir kontrol sistemi yardımı ile gerçekleştirilmektedir. Tasarlanan kontrol sisteminde,

kameradan alınan konum verileri robotun ileri ve ters kinematik matematiksel modelinden geçirilerek bir sonuç elde edilmektedir.

Elde edilen sonuç eğer robotun gerek konum gerekse de oryantasyonu açısından erişebileceği bir nokta olması durumunda veriler robota gönderilmektedir. Hedef bilgisinin, robotun çalışma uzayındaki konum ve oryantasyonu uygun olmaması veya çalışma tezgâhı açısından hedef noktaya yaklaşımı istenmeyen açıdan yapması durumunda kontrol sistemi ilgili hedef verisini otomatik olarak elemektedir. Geliştirilen bu sistem sayesinde kamera tabanlı sistemlerde gerek sistemin güvenilirliği gerekse de robotun meydana getirebileceği fiziksel hasarlar ortadan kaldırılmıştır.

Kamera, tanımlı olan iş parçalarını belirli bir çevirim süresi içinde sürekli tarayıp en uygun pozisyonda bulunan iş parçası model ve koordinatlarını ilgili kontrol sistemi göndermektedir. Tasarlanmış kinematik zincir güvenlik kontrol sisteminde, iş parçasının modeli dikkate alınarak koordinat bilgileri robotun ileri ve ters kinematik bağıntılarından geçirilerek hedef bilgisi için çözüm (ters kinematik) oluşması durumunda bu değer robot'a aktarılmaktadır.

Kameranın gerek dış faktörlerden dolayı gerekse de kendi sistemin kaynakları göndereceği istenmeyen hedef verileri için robotun oluşturacağı hasarlar bu kontrol sistemi sayesinde önlenmiştir. Tasarlanan kinematik zincir güvenlik kontrol sistemi akış diyagramı Şekilde 5.11'de gösterilmiştir.



Şekil 5.11: Tasarlanan kinematik zincir güvenlik kontrol sistemi akış diyagramı

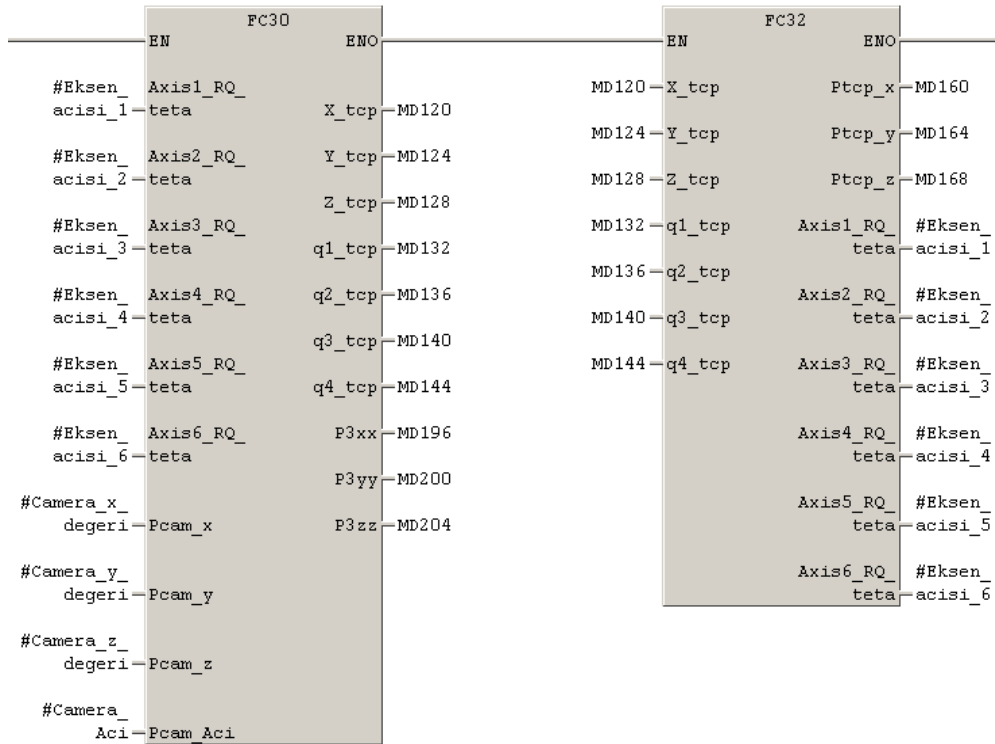
Akış diyagramında görüldüğü gibi kameradan alınan ham koordinat bilgisinin robot hedef bilgisi  $F(k)$  için bir dönüşüm yapılmaktadır. Bu dönüşüm konum ve rotasyon bilgisini kapsayacak şekildedir  $F(kd)$ . Elde edilen yeni veri, smart kameraların hata payları dikkate alınarak oluşturulan bir düzeltme fonksiyonundan geçirilerek yeni bir



koordinat ve rotasyon bilgisi  $F(g)$  elde edilmektedir. Elde edilen gerçek koordinat bilgisi  $F(g)$  ile robotu yönlendirmek için bölüm3'te verilen robotun ileri ve ters kinematik bilgilerinden yararlanılmıştır.

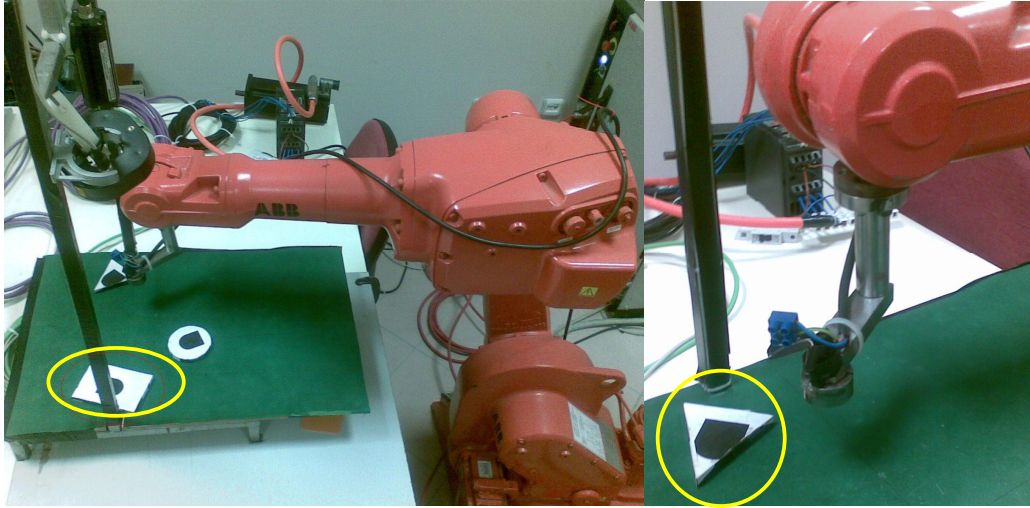
Robotun, nesnenin bulunduğu hedef koordinata doğru yönelimi için hem robot hemde kamera için ortak bir referans noktaya ihtiyaç vardır. Bu referans nokta robotun doğru yönelimi için gereklidir ancak robotun doğru rotasyonu için kameradan alınan nense açısı bilgisi robotun ileri kinematik bağıntısından geçirilmesi gerekmektedir. Tezgâh, kamera ve robot için koordinat sistemi dönüşümüne ihtiyaç vardır. Robot ileri kinematik modelinde taban eksen ile uç eksen arasında bir rotasyon dönüşümü ayrıca yapılması gerekir. Gerekli koordinat dönüşümler yapıldıktan sonra sistemin düzeltilmiş kamera verisi  $F(g)$  ile tezgâh üzerindeki robot için tanımlanmış referans nokta verisi  $F(r)$  toplanarak yeni bir veri elde edilmektedir.

Elde edilen bu veri robot ileri kinematik bağıntısından geçirilerek  $F(ik)$  ortaya çıkan sonucun ters kinematik bağıntısı için çözüm oluşturuyorsa bu veri robot erişim alanı içinde ve ilgili nesnenin hedef koordinat verisi için uygun bir oryantasyon olduğu anlamına gelir. Bu ilişki Şekil 5.12'te kinematik zincir blok diyagramında verilmiştir.



Şekil 5.12: Kinematik zincir blok diyagramı

Kamera tabanlı robot yönelim uygulamalarında ilgili işlem parçasının koordinat verileri için ileri ve ters kinematik çözümü olmasına karşın ilgili noktadaki robotun oryantasyonu gereği çevresel faktöre (tezgâh, kamera, iş parçası) çarpması söz konusudur. Şekil 5.13'te bant üstü kamera tabanlı robotik al-bırak uygulamasında robot oryantasyonu açısından uygun olmayan görüntüler sunulmuştur. Şekilde görüldüğü gibi robotun ilgili iş parçalarını alma noktasındaki oryantasyonu tezgâh üzerinde bulunan profile çarpmasına neden olmaktadır.



Şekil 5.13: Uygun olmayan iş parçası konumları

Çalışma tezgâhı, kamera ve robotun çalışma uzayı dikkate alınarak;

- İş parçasının tezgâh üzerindeki dönme açısının fazla olması,
- İş parçalarının üst üste gelmesi,
- Şekil itibariyle uygun olmayan iş parçası gelmesi,
- Kameranın çevresel bir etkenden dolayı konum değiştirmesi\*,
- Kameranda kaynaklı istenmeyen bir veri gönderilmesi gibi problemler söz konusudur.

Bu problemleri ortadan kaldırmak için hedefin gerek konum gerekse de robot oryantasyonu açısından sorun teşkil edecek bir pozisyonda olması durumunda robot'un ilgili hedef verisi eleyecek şekilde yazılımsal olarak sisteme entegre edilmiştir.

## 5.6. Kameranın Otomotiv Endüstrisinde Kullanılabileceği Yerler

Otomotiv ana ve yan sanayisinde yer alan imalat süreçleri dikkate alındığında birçok imalat aşamasında kameranın gerek robot ile birlikte gerekse de tek başına veya diğer ekipmanlar ile birlikte kullanılması mümkündür. Otomotiv ana imalat sanayide kameranın kullanıldığı veya kullanılabileceği yerler tablo 5.1’de verilmiştir.

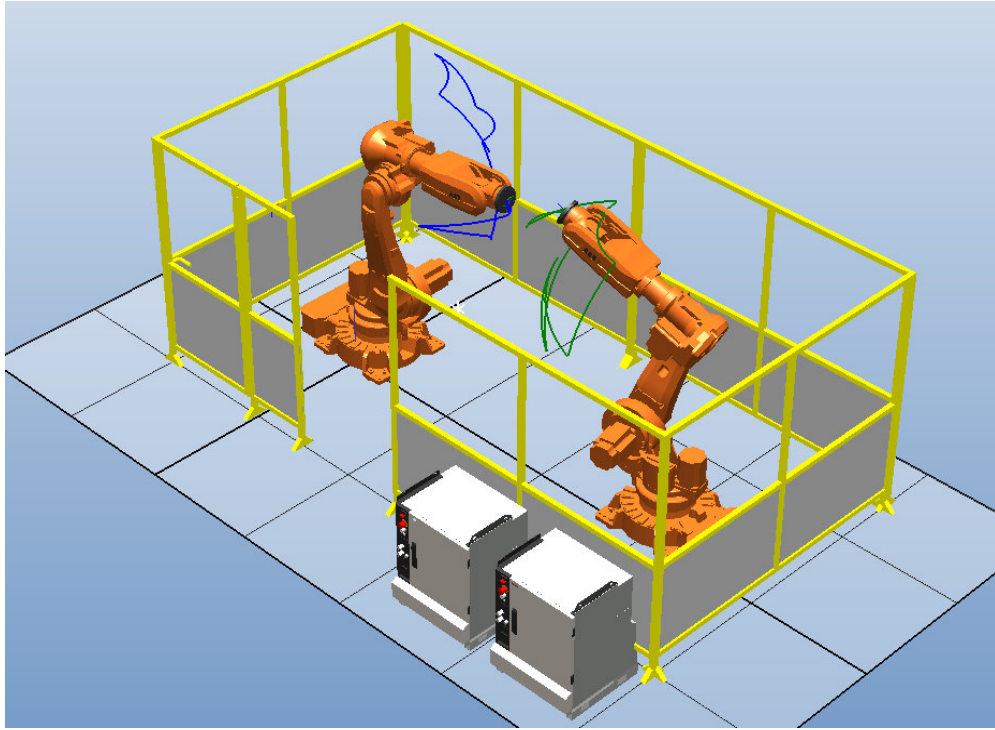
Tablo 5.1: Otomotiv ana ve yan sanayisinde kameranın kullanılabileceği yerler

<b>Kullanım yeri</b>	<b>Kullanılan uygulama</b>
Takım-Kalıp ve Pres Atölyelerinde	<ul style="list-style-type: none"><li>○ <i>Kestirimci bakım uygulamaları</i></li><li>○ <i>Parça yüzey kalite uygulamaları</i></li><li>○ <i>İş ve makine güvenliği uygulamaları</i></li><li>○ <i>Ölçüm ve kalite kontrol uygulamaları</i></li></ul>
Kaynak Atölyeleri	<ul style="list-style-type: none"><li>○ <i>Araç geometri ölçüm uygulamaları</i></li><li>○ <i>Kalite kontrol uygulamaları</i></li><li>○ <i>Hata önleme uygulamaları</i></li><li>○ <i>Robotik al-bırak uygulamaları</i></li><li>○ <i>Robotik ölçüm uygulamaları</i></li><li>○ <i>Robotik kesme ve kaynak uygulamaları</i></li><li>○ <i>Kestirimci bakım uygulamaları</i></li></ul>
Boya Atölyeleri	<ul style="list-style-type: none"><li>○ <i>Hata önleme uygulamaları</i></li><li>○ <i>Robotik boya uygulamaları</i></li><li>○ <i>Kestirimci bakım uygulamaları</i></li><li>○ <i>Yüzey uygulamaları</i></li></ul>
Montaj Atölyeleri	<ul style="list-style-type: none"><li>○ <i>Robotik al-bırak uygulamaları</i></li><li>○ <i>Ölçüm uygulamalarında</i></li><li>○ <i>Kalite kontrol uygulamaları</i></li><li>○ <i>Hata önleme uygulamaları</i></li></ul>

Yan sanayide benzer uygulamalarda kameranın kullanımının yanı sıra ürün testlerinde de kullanımı pek çok açıdan büyük olanaklar sağlamaktadır. Otomotiv sektöründe araç imalatının yanı sıra araçta kullanılan kritik ve güvenlik açısından büyük önem arz eden bir takım ekipmanların araca montajı yapılmadan önce gerçek

anlamda test edilmesi oldukça önemlidir. “00718.STZ.2010-2” nolu San-Tez projesi kapsamında araçlarda kullanılan fren hortumlarının imalat sonrası kullanılacak araç sınıfına göre bir test düzeneği yardımı ile ve yol şartları benzetimi yapılarak fren hortumunun dayanıklılığı tespit edilmesi sağlanmıştır.

Test düzeneği şekil 5.14’te çevirim dışı modeli ve şekil 5.15’te gerçek saha görüntüsü verilen iki adet ABB marka IRB6620 robotun uç işlem noktalarında yerleştirilen araç fren hortumu bağlantı kasmağı ve tekerlek hortum bağlantı aparatlarının yanı sıra bir adet kamera ve iklimlendirilmiş bir ortamdandır.

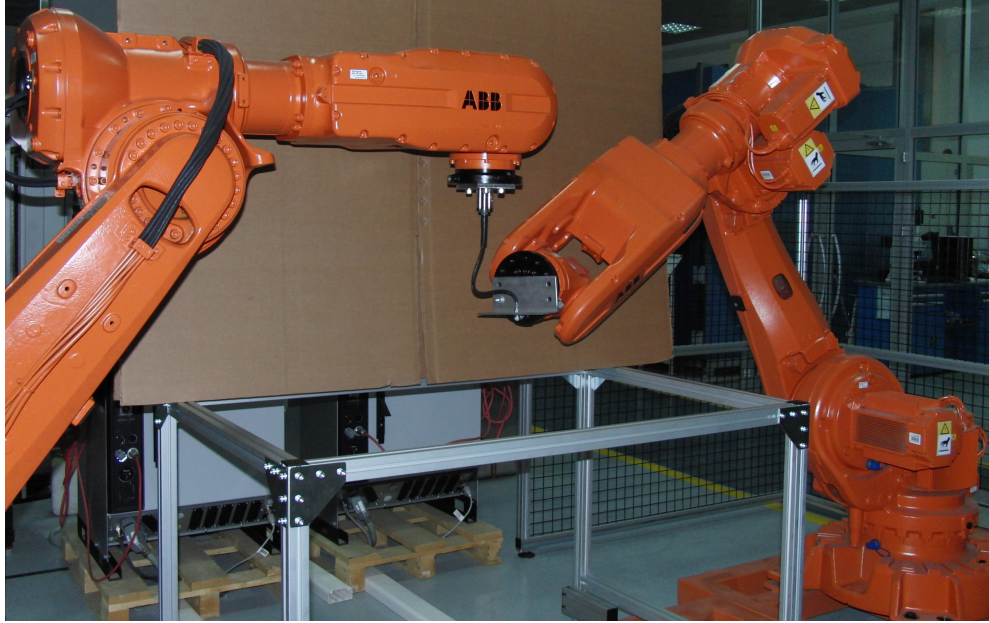


Şekil 5.14: Fren hortumu robotik test düzeneği çevirim dışı modeli

Bu test düzeneğinde öncelikle fren hortumunun kullanılacağı araç özellikleri seçildikten sonra araç tekerleğinin farklı yol karakteristiklerine göre ortaya koyacağı davranışlar dikkate alınarak robot uç işlevçileri arasına bağlanan fren hortumu hareket ettirilmeye başlanıyor.

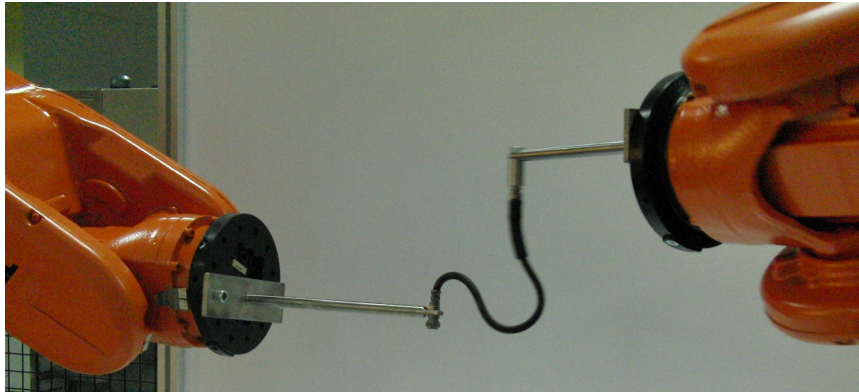
Bu hareket esnasında öncelikle bir hidrolik ünite yardımı ile hortum içinde basınç oluşturulmakta daha sonra mevsim normallerine göre ortam iklimlendirilmekte ve bir

kamera yardımı ile fren hortumunun çalışma uzayında oluşturduğu eğriler ortaya çıkarılmaktadır. Aynı zamanda test düzeneğinde yer alan bir termal kamera yardımı ile fren hortumunun en çok hangi notlarda ısındığı saptanmaktadır.



Şekil 5.15: Kamera tabanlı fren hortumu robotik test düzeneği

Bu sistemde kamera verisi ile robot uç işlemci arasında direk bir ilişki söz konusu değildir. Robotun çalışma uzayındaki konum ve rotasyonu tekerleğin yol şartlarına göre oluşturduğu hareket bilgisini barındıran bir veritabanından gelmektedir. Veri tabından gelen bilgiler robotun TCP'sine yazdırılmakta ve robot ilgili hedef noktaya yönlendirilmektedir. Fren hortumunun yol şartlarına göre bir benzetimi şekil5.16'da verilmiştir.



Şekil 5.16: Fren hortumunun yol şartlarına göre benzetimi

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Otomotiv endüstrisinde, son yıllarda başta gövde imalat atölyeleri ve montaj atölyelerindeki konveyör üstü robotik al-bırak uygulamalarında, standart robotik al-bırak işlemlerinde ve kalite uygulamalarında kullanımı yaygınlaşan kamera tabanlı robotik kontrol sistemleri için bir sistem modeli ortaya konulmuştur. Bu çalışmada, kamera tabanlı ve PLC denetimli endüstriyel robot kontrol sistemi oluşturulmuş ve bu sistem sayesinde robotun işlem noktasına, herhangi bir nokta öğretme metodu kullanılmadan, kameradan alınan veriler ve kinematik bağıntılar üzerinden robotun yönelim ve oryantasyonu sağlanmıştır.

Geliştirilen sistem sayesinde, gerçek imalat koşullarındaki çevresel bozucu etkenler dikkate alınarak robot'un işlem parçalarını 0.4mm'lik toleranslara sahip yuvalara bırakma işlemi başarı ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, gerek görsel tabanlı robotik kontrol sistemlerinde gerekse de görsel tabanlı otomasyon sistemlerinde yoğun olarak kullanılan ve çevresel faktörlerden minimum düzeyde etkilenen akıllı bir kamera tercih edilmiştir. Akıllı kameraların katalog bilgileri dışında çalıştırılması durumu için bir düzeltme fonksiyonu geliştirilmiş ve ayrıca bu kameralardan alınan verilen robotik uygulamalar için anlamlı bir veri formatına dönüştürülmesi sağlanmıştır. Üretim sistemlerinde kaçınılmaz ilk kural olan kalite ve düşük imalat çevirim süreleri için görsel denetimli robotik sistemlerin kullanılması ve geliştirilmesi gerekmektedir.

Bu görsel denetimli robotik sistemlerin geliştirilmesi için gerçek görüntünün işlenmesi gerekmektedir. Çünkü akıllı kameralarla yapılacak çalışma, kamera kontrol ünitesi içerisinde üretici firma tarafından önceden hazırlanmış ve değiştirilme olanağı olmayan olan sistem ile sınırlıdır. Gelecek çalışmalarda gerçek kamera görüntüsü işlenerek bir robot yardımı ile cisimlerin üç boyutlu modelinin çıkarılması hedeflenmektedir.



## KAYNAKLAR

- [1] Golnabi, H., and Asadpour. A., “Design and Application of Industrial Machine Vision Systems”, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 23, 630-637, (2007).
- [2] Deng, F.L., Janabi-Sharifi, W., and Wilson, J., “Hybrid Motion Control And Planning Strategies For Visual Servoing”, *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, Vol. 52, No. 4, (2005).
- [3] Lippiello, V., Siciliano, B., etc, Villani “Position-Based Visual Servoing in Industrial Multirobot Cells Using A Hybrid Camera Configuration”, *IEEE Transactions On Robotics*, Vol. 23, No. 1, (2007).
- [4] Xie, W., Li, Z., Tu, X-W., Peron, C., “Switching Control of Image-Based Visual Servoing with Laser Pointer in Robotic Manufacturing Systems”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 56, No. 2, (2009).
- [5] Motai, Y., Kosaka, A., “Hand–Eye Calibration Applied To Viewpoint Selection for Robotic Vision”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 55, No. 10, (2008).
- [6] Kristensen, S., Estable, S., Kossow, M., Brösel, R., “Bin-Picking with A Solid State Range Camera”, *Robotics and Autonomous Systems*, 35, 143–151, (2001).
- [7] Ryberg, A., Christiansson, A-K., Eriksson, K., and Lennartson, B., “A New Camera Model And Algorithms For Higher Accuracy And Better Convergence in Vision-Based Pose Calculations”, *Proceedings Of The 2006 IEEE International Conference On Mechatronics And Automation*, Luoyang, China. June 25 – 28, (2006).
- [8] Sulzer, J., and Kovač, I., “Enhancement Of Positioning Accuracy Of Industrial Robots With A Reconfigurable Fine-Positioning Module”, *Precision Engineering*, 34, 201–217, (2010).
- [9] Fawaz, K., Merzouki, R., and Ould-Bouamama, B., “Model Based Real Time Monitoring For Collision Detection Of An Industrial Robot”, *Mechatronics*, 19, 695–704, (2009).

- [10] Selver, M., Akay, O., Alim, F., Bardak, S., Olmez, M., “An Automated Industrial Conveyor Belt System Using Image Processing And Hierarchical Clustering For Classifying Marbleslabs”, *Robotics And Computer-Integrated Manufacturing*, 27, 164–176, (2011).
- [11] Bone, G.M., and Capson, D., “Vision-Guided Fixtureless Assembly of Automotive Components”, *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 19, 79–87, (2003).
- [12] Rousseau, P., Desrochers, A., and Krouglicof, N., “Machine Vision System for the Automatic Identification of Robot Kinematic Parameters”, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 17, No. 6, (2001).
- [13] Kruger, J., Lien, T.K., and Verl, A., “Cooperation of Human And Machines in Assembly Lines”, *Cirp Annals-Manufacturing Technology*, 58, 628–646, (2009).
- [14] Veiga, G., Pires, J.N., and Nilsson, K., “Experiments With Service-Oriented Architectures For Industrial Robotic Cells Programming”, *Robotics And Computer-Integrated Manufacturing*, 25, 746–755, (2009).
- [15] Liu, Y., Xi, N., Zhang, G., and Li, X., “An Automated Method to Calibrate Industrial Robot Joint Offset Using Virtual Line-based Single-point Constraint Approach”, *The 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, October, 11-15, (2009).
- [16] Bonea, G. M., And Capson, D., “Vision-guided fixtureless assembly of automotive components”, *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 19, 79–87, (2003).
- [17] Reinhart, G., and Tekouo W., “Automatic programming of robot-mounted 3D optical scanning devices to easily measure parts in high-variant assembly”, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 58, 25–28, (2009).
- [18] Gazi Üniversitesi, Otomotiv Sektöründe Üretim Sistemleri, [http://www.obitet.gazi.edu.tr/oto\\_sektor/otosektor.htm](http://www.obitet.gazi.edu.tr/oto_sektor/otosektor.htm), (*Ziyaret Tarihi: 20 Şubat 2011*).
- [19] Çetinkaya. Ö., “Bir kolun hareketlerini takip eden dört dönel mafsallı robot kolu tasarımı ve deneysel araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Trakya Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü*, 6-20, (2009).
- [20] Spong, M., Hutchinson, S., and Vidyasagar, M., “ Robot Modelling And Control“, *John Wiley&Sons*, 12-17, (2006).



- [21] Hamilton, W.R., “Elements of Quaternion”, *Chealse Publising, New York*, (1969).
- [22] ABB Robotics, *Product Manual and Procedures*, Document ID: 3HAC-023637-001.
- [23] Siemens, Vision Sensor Simatic Vs120, *Operating Instructions*, A5e00757507-01, Edition 02, (2006).
- [24] Siemens, otomasyon ve control sistemleri, Simatic S7-SCL, <http://www.Automation.Siemens.Com/Mcms/Simatic-Controller-Software/En/Step7/Simatic-S7-Scl/Pages/Default.aspx>, (*Ziyaret Tarihi: 05 Şubat 2011*).

## EKLER

### EK-1 Gerçekleştirilen uygulamanın PLC yazılım kodu

FUNCTION FC30: VOID // PLC FC Blok Icerigi.

```
////////////////////////////////////////////////////////////////  
// CENGİZ DENİZ, 07.11.2010, Robot Modeling and Control //  
// M.Sc. Thesis on Industrial Robot - University Of Kocaeli //  
////////////////////////////////////////////////////////////////
```

VAR\_INPUT

// Acı eksen için ACI , I, J, K deger girisleri:

Axis1\_RQ\_teta: REAL;

Axis2\_RQ\_teta: REAL;

Axis3\_RQ\_teta: REAL;

Axis4\_RQ\_teta: REAL;

Axis5\_RQ\_teta: REAL;

Axis6\_RQ\_teta: REAL;

END\_VAR

VAR

// Base degerleri (varsa eklenir):

Dx0,Dy0,Dz0: REAL;

// Acı eksen için I, J, K deger girisleri:

Axis1\_RQ\_x, Axis1\_RQ\_y, Axis1\_RQ\_z: REAL;

Axis2\_RQ\_x, Axis2\_RQ\_y, Axis2\_RQ\_z: REAL;

Axis3\_RQ\_x, Axis3\_RQ\_y, Axis3\_RQ\_z: REAL;

Axis4\_RQ\_x, Axis4\_RQ\_y, Axis4\_RQ\_z: REAL;

Axis5\_RQ\_x, Axis5\_RQ\_y, Axis5\_RQ\_z: REAL;

Axis6\_RQ\_x, Axis6\_RQ\_y, Axis6\_RQ\_z: REAL;

// Joint uzunluk girisleri:

Axis1\_Dx, Axis1\_Dy, Axis1\_Dz: REAL;

Axis2\_Dx, Axis2\_Dy, Axis2\_Dz: REAL;

Axis3\_Dx, Axis3\_Dy, Axis3\_Dz: REAL;

Axis4\_Dx, Axis4\_Dy, Axis4\_Dz: REAL;

Axis5\_Dx, Axis5\_Dy, Axis5\_Dz: REAL;

Axis6\_Dx, Axis6\_Dy, Axis6\_Dz: REAL;

// Eksen bazında uc nokta degeri

P1x, P1y, P1z: REAL;

P2x, P2y, P2z: REAL;

P3x, P3y, P3z: REAL;

P4x, P4y, P4z: REAL;

P5x, P5y, P5z: REAL;

P6x, P6y, P6z: REAL;

// Eksen bazında Quaternion degerleri-- R->Q'ya ( Acı-eksenden Quaterniyon'a donus)

```

Axis1_Q0, Axis1_Q1, Axis1_Q2, Axis1_Q3: REAL;
Axis2_Q0, Axis2_Q1, Axis2_Q2, Axis2_Q3: REAL;
Axis3_Q0, Axis3_Q1, Axis3_Q2, Axis3_Q3: REAL;
Axis4_Q0, Axis4_Q1, Axis4_Q2, Axis4_Q3: REAL;
Axis5_Q0, Axis5_Q1, Axis5_Q2, Axis5_Q3: REAL;
Axis6_Q0, Axis6_Q1, Axis6_Q2, Axis6_Q3: REAL;

```

```

// Quaternin Çarpimleri
Q12_Q0, Q12_Q1, Q12_Q2, Q12_Q3: REAL;
Q123_Q0, Q123_Q1, Q123_Q2, Q123_Q3: REAL;
Q1_4_Q0, Q1_4_Q1, Q1_4_Q2, Q1_4_Q3: REAL;
Q1_5_Q0, Q1_5_Q1, Q1_5_Q2, Q1_5_Q3: REAL;
Q1_6_Q0, Q1_6_Q1, Q1_6_Q2, Q1_6_Q3: REAL;
//-----

```

```

Rtcp_x, Rtcp_y, Rtcp_z, Rtcp_teta: REAL;
Qtcp_Q0, Qtcp_Q1, Qtcp_Q2, Qtcp_Q3: REAL;

```

```

// Teta değerleri (radyan cinsinden)
pi: REAL;
teta1, teta2, teta3, teta4, teta5, teta6, teta_tcp: REAL;

```

END\_VAR

```

VAR_OUTPUT
X_tcp, Y_tcp, Z_tcp: REAL;
q1_tcp, q2_tcp, q3_tcp, q4_tcp: REAL;
P3xx, P3yy, P3zz : REAL;

```

END\_VAR

BEGIN

```

P3xx:=P3x;
P3yy:=P3y;
P3zz:=P3z;

```

```

pi:= 4*ATAN(1);

```

```

//-----//
// ABB IRB 1600 5 Kg, 1.45M Robot Acı-eksen ve Uvuz Degerleri //
//-----//

```

```

// Acı eksen için I, J, K deger girisleri:
// 1. Eksen;
Axis1_RQ_x:=0.000000e+000; Axis1_RQ_y:=0.000000e+000; Axis1_RQ_z:=1.000000e+000;
// 2. Eksen;
Axis2_RQ_x:=0.000000e+000; Axis2_RQ_y:=1.000000e+000; Axis2_RQ_z:=0.000000e+000;
// 3. Eksen;
Axis3_RQ_x:=0.000000e+000; Axis3_RQ_y:=1.000000e+000; Axis3_RQ_z:=0.000000e+000;
// 4. Eksen;
Axis4_RQ_x:=1.000000e+000; Axis4_RQ_y:=0.000000e+000; Axis4_RQ_z:=0.000000e+000;
// 5. Eksen;
Axis5_RQ_x:=0.000000e+000; Axis5_RQ_y:=1.000000e+000; Axis5_RQ_z:=0.000000e+000;
// 6. Eksen;
Axis6_RQ_x:=1.000000e+000; Axis6_RQ_y:=0.000000e+000; Axis6_RQ_z:=0.000000e+000;

```

```

//-----//
// Joint uzunluk girisleri degerleri //
//-----//

// 1. Eksen
Axis1_Dx:=1.500000e+002; Axis1_Dy:=0.000000e+000; Axis1_Dz:=4.865000e+002 ;
// 2. Eksen
Axis2_Dx:=0.000000e+000; Axis2_Dy:=0.000000e+000; Axis2_Dz:=7.000000e+002 ;
// 3. Eksen
Axis3_Dx:=6.000000e+002; Axis3_Dy:=0.000000e+000; Axis3_Dz:=0.000000e+000 ;
// 4. Eksen
Axis4_Dx:=0.000000e+000; Axis4_Dy:=0.000000e+000; Axis4_Dz:=0.000000e+000 ;
// 5. Eksen
Axis5_Dx:=0.000000e+000; Axis5_Dy:=0.000000e+000; Axis5_Dz:=0.000000e+000 ;
// 6. Eksen
Axis6_Dx:=6.500000e+001; Axis6_Dy:=0.000000e+000; Axis6_Dz:=0.000000e+000 ;

// Robot base degerleri;
Dx0:=0.000000e+000; Dy0:=-0.000000e+000; Dz0:=0.000000e+000;

//-----//
// 1. Eksen x,y,z ve q1 -- q2, q3, q4 -- Q*Q çarpım degerleri //
//-----//

teta1:= Axis1_RQ_teta*pi/180;
Axis1_Q0:= COS(teta1*0.5); // q1
Axis1_Q1:= Axis1_RQ_x*SIN(teta1*0.5); // q2
Axis1_Q2:= Axis1_RQ_y*SIN(teta1*0.5); // q3
Axis1_Q3:= Axis1_RQ_z*SIN(teta1*0.5); // q4

Plx:=(Dx0+Axis1_Q0*Axis1_Q0*Axis1_Dx+2*Axis1_Q2*Axis1_Q0*Axis1_Dz-
2*Axis1_Q3*Axis1_Q0*Axis1_Dy+
Axis1_Q1*Axis1_Q1*Axis1_Dx+2*Axis1_Q2*Axis1_Q1*Axis1_Dy+2*Axis1_Q3*Axis1_Q1*Axis1_
Dz- Axis1_Q3*Axis1_Q3*Axis1_Dx- Axis1_Q2*Axis1_Q2*Axis1_Dx);
Ply:=(Dy0+2*Axis1_Q1*Axis1_Q2*Axis1_Dx+
Axis1_Q2*Axis1_Q2*Axis1_Dy+2*Axis1_Q3*Axis1_Q2*Axis1_Dz+2*Axis1_Q0*Axis1_Q3*Axis1_
Dx- Axis1_Q3*Axis1_Q3*Axis1_Dy+Axis1_Q0*Axis1_Q0*Axis1_Dy-
2*Axis1_Q1*Axis1_Q0*Axis1_Dz- Axis1_Q1*Axis1_Q1*Axis1_Dy);
Plz:=(Dz0+2*Axis1_Q1*Axis1_Q3*Axis1_Dx+2*Axis1_Q2*Axis1_Q3*Axis1_Dy+
Axis1_Q3*Axis1_Q3*Axis1_Dz-2*Axis1_Q0*Axis1_Q2*Axis1_Dx-
Axis1_Q2*Axis1_Q2*Axis1_Dz+2*Axis1_Q0*Axis1_Q1*Axis1_Dy-Axis1_Q1*Axis1_Q1*Axis1_Dz+
Axis1_Q0*Axis1_Q0*Axis1_Dz);

//-----//
// 2. Eksen x,y,z ve q1 -- q2, q3, q4 -- Q*Q çarpım degerleri //
//-----//

teta2:= Axis2_RQ_teta*(pi/180);
Axis2_Q0:= COS(teta2*0.5); // q1
Axis2_Q1:= Axis2_RQ_x*SIN(teta2*0.5); // q2
Axis2_Q2:= Axis2_RQ_y*SIN(teta2*0.5); // q3
Axis2_Q3:= Axis2_RQ_z*SIN(teta2*0.5); // q4

Q12_Q0:= ( Axis1_Q0*Axis2_Q0 - Axis1_Q1*Axis2_Q1 - Axis1_Q2*Axis2_Q2 -
Axis1_Q3*Axis2_Q3);

```

```

Q12_Q1:= ( Axis1_Q0*Axis2_Q1 + Axis1_Q1*Axis2_Q0 + Axis1_Q2*Axis2_Q3 -
Axis1_Q3*Axis2_Q2);
Q12_Q2:= ( Axis1_Q0*Axis2_Q2 - Axis1_Q1*Axis2_Q3 + Axis1_Q2*Axis2_Q0 +
Axis1_Q3*Axis2_Q1);
Q12_Q3:= ( Axis1_Q0*Axis2_Q3 + Axis1_Q1*Axis2_Q2 - Axis1_Q2*Axis2_Q1 +
Axis1_Q3*Axis2_Q0);

```

```

P2x:=(P1x + Q12_Q0*Q12_Q0*Axis2_Dx + 2*Q12_Q2*Q12_Q0*Axis2_Dz -
2*Q12_Q3*Q12_Q0*Axis2_Dy + Q12_Q1*Q12_Q1*Axis2_Dx + 2*Q12_Q2*Q12_Q1*Axis2_Dy +
2*Q12_Q3*Q12_Q1*Axis2_Dz - Q12_Q3*Q12_Q3*Axis2_Dx - Q12_Q2*Q12_Q2*Axis2_Dx);
P2y:=(P1y + 2*Q12_Q1*Q12_Q2*Axis2_Dx + Q12_Q2*Q12_Q2*Axis2_Dy +
2*Q12_Q3*Q12_Q2*Axis2_Dz + 2*Q12_Q0*Q12_Q3*Axis2_Dx - Q12_Q3*Q12_Q3*Axis2_Dy +
Q12_Q0*Q12_Q0*Axis2_Dy - 2*Q12_Q1*Q12_Q0*Axis2_Dz - Q12_Q1*Q12_Q1*Axis2_Dy);
P2z:=(P1z + 2*Q12_Q1*Q12_Q3*Axis2_Dx + 2*Q12_Q2*Q12_Q3*Axis2_Dy +
Q12_Q3*Q12_Q3*Axis2_Dz - 2*Q12_Q0*Q12_Q2*Axis2_Dx - Q12_Q2*Q12_Q2*Axis2_Dz +
2*Q12_Q0*Q12_Q1*Axis2_Dy - Q12_Q1*Q12_Q1*Axis2_Dz + Q12_Q0*Q12_Q0*Axis2_Dz);

```

```

//-----//
// 3. Eksen x,y,z ve q1 -- q2, q3, q4 -- Q*Q çarpım degerleri //
//-----//

```

```

teta3:= Axis3_RQ_teta*pi/180;
Axis3_Q0:= COS(teta3*0.5); // q1
Axis3_Q1:= Axis3_RQ_x*SIN(teta3*0.5); // q2
Axis3_Q2:= Axis3_RQ_y*SIN(teta3*0.5); // q3
Axis3_Q3:= Axis3_RQ_z*SIN(teta3*0.5); // q4

```

```

Q123_Q0:= (Q12_Q0*Axis3_Q0 - Q12_Q1*Axis3_Q1 - Q12_Q2*Axis3_Q2 - Q12_Q3*Axis3_Q3);
Q123_Q1:= (Q12_Q0*Axis3_Q1 + Q12_Q1*Axis3_Q0 + Q12_Q2*Axis3_Q3 - Q12_Q3*Axis3_Q2);
Q123_Q2:= (Q12_Q0*Axis3_Q2 - Q12_Q1*Axis3_Q3 + Q12_Q2*Axis3_Q0 + Q12_Q3*Axis3_Q1);
Q123_Q3:= (Q12_Q0*Axis3_Q3 + Q12_Q1*Axis3_Q2 - Q12_Q2*Axis3_Q1 + Q12_Q3*Axis3_Q0);

```

```

P3x:=(P2x + Q123_Q0*Q123_Q0*Axis3_Dx + 2*Q123_Q2*Q123_Q0*Axis3_Dz -
2*Q123_Q3*Q123_Q0*Axis3_Dy + Q123_Q1*Q123_Q1*Axis3_Dx +
2*Q123_Q2*Q123_Q1*Axis3_Dy + 2*Q123_Q3*Q123_Q1*Axis3_Dz -
Q123_Q3*Q123_Q3*Axis3_Dx - Q123_Q2*Q123_Q2*Axis3_Dx);
P3y:=(P2y + 2*Q123_Q1*Q123_Q2*Axis3_Dx + Q123_Q2*Q123_Q2*Axis3_Dy +
2*Q123_Q3*Q123_Q2*Axis3_Dz + 2*Q123_Q0*Q123_Q3*Axis3_Dx -
Q123_Q3*Q123_Q3*Axis3_Dy + Q123_Q0*Q123_Q0*Axis3_Dy -
2*Q123_Q1*Q123_Q0*Axis3_Dz - Q123_Q1*Q123_Q1*Axis3_Dy);
P3z:=(P2z + 2*Q123_Q1*Q123_Q3*Axis3_Dx + 2*Q123_Q2*Q123_Q3*Axis3_Dy +
Q123_Q3*Q123_Q3*Axis3_Dz - 2*Q123_Q0*Q123_Q2*Axis3_Dx -
Q123_Q2*Q123_Q2*Axis3_Dz + 2*Q123_Q0*Q123_Q1*Axis3_Dy -
Q123_Q1*Q123_Q1*Axis3_Dz + Q123_Q0*Q123_Q0*Axis3_Dz);

```

```

//-----//
// 4. Eksen x,y,z ve q1 -- q2, q3, q4 -- Q*Q çarpım degerleri //
//-----//

```

```

teta4:= Axis4_RQ_teta*pi/180;
Axis4_Q0:= COS(teta4*0.5); // q1
Axis4_Q1:= Axis4_RQ_x*SIN(teta4*0.5); // q2
Axis4_Q2:= Axis4_RQ_y*SIN(teta4*0.5); // q3
Axis4_Q3:= Axis4_RQ_z*SIN(teta4*0.5); // q4

```

```

Q1_4_Q0:= (Q123_Q0*Axis4_Q0 - Q123_Q1*Axis4_Q1 - Q123_Q2*Axis4_Q2 -
Q123_Q3*Axis4_Q3);

```

$$\begin{aligned}
Q1\_4\_Q1 &:= (Q123\_Q0*Axis4\_Q1 + Q123\_Q1*Axis4\_Q0 + Q123\_Q2*Axis4\_Q3 - \\
&Q123\_Q3*Axis4\_Q2); \\
Q1\_4\_Q2 &:= (Q123\_Q0*Axis4\_Q2 - Q123\_Q1*Axis4\_Q3 + Q123\_Q2*Axis4\_Q0 + \\
&Q123\_Q3*Axis4\_Q1); \\
Q1\_4\_Q3 &:= (Q123\_Q0*Axis4\_Q3 + Q123\_Q1*Axis4\_Q2 - Q123\_Q2*Axis4\_Q1 + \\
&Q123\_Q3*Axis4\_Q0);
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
P4x &:= (P3x + Q1\_4\_Q0*Q1\_4\_Q0*Axis4\_Dx + 2*Q1\_4\_Q2*Q1\_4\_Q0*Axis4\_Dz - \\
&2*Q1\_4\_Q3*Q1\_4\_Q0*Axis4\_Dy + Q1\_4\_Q1*Q1\_4\_Q1*Axis4\_Dx + \\
&2*Q1\_4\_Q2*Q1\_4\_Q1*Axis4\_Dy + 2*Q1\_4\_Q3*Q1\_4\_Q1*Axis4\_Dz - \\
&Q1\_4\_Q3*Q1\_4\_Q3*Axis4\_Dx - Q1\_4\_Q2*Q1\_4\_Q2*Axis4\_Dx); \\
P4y &:= (P3y + 2*Q1\_4\_Q1*Q1\_4\_Q2*Axis4\_Dx + Q1\_4\_Q2*Q1\_4\_Q2*Axis4\_Dy + \\
&2*Q1\_4\_Q3*Q1\_4\_Q2*Axis4\_Dz + 2*Q1\_4\_Q0*Q1\_4\_Q3*Axis4\_Dx - \\
&Q1\_4\_Q3*Q1\_4\_Q3*Axis4\_Dy + Q1\_4\_Q0*Q1\_4\_Q0*Axis4\_Dy - \\
&2*Q1\_4\_Q1*Q1\_4\_Q0*Axis4\_Dz - Q1\_4\_Q1*Q1\_4\_Q1*Axis4\_Dy); \\
P4z &:= (P3z + 2*Q1\_4\_Q1*Q1\_4\_Q3*Axis4\_Dx + 2*Q1\_4\_Q2*Q1\_4\_Q3*Axis4\_Dy + \\
&Q1\_4\_Q3*Q1\_4\_Q3*Axis4\_Dz - 2*Q1\_4\_Q0*Q1\_4\_Q2*Axis4\_Dx - \\
&Q1\_4\_Q2*Q1\_4\_Q2*Axis4\_Dz + 2*Q1\_4\_Q0*Q1\_4\_Q1*Axis4\_Dy - \\
&Q1\_4\_Q1*Q1\_4\_Q1*Axis4\_Dz + Q1\_4\_Q0*Q1\_4\_Q0*Axis4\_Dz);
\end{aligned}$$

//-----//  
// 5. Eksen x,y,z ve q1 -- q2, q3, q4 -- Q\*Q çarpım degerleri //  
//-----//

$$\begin{aligned}
teta5 &:= Axis5\_RQ\_teta*pi/180; \\
Axis5\_Q0 &:= COS(teta5*0.5); // q1 \\
Axis5\_Q1 &:= Axis5\_RQ\_x*SIN(teta5*0.5); // q2 \\
Axis5\_Q2 &:= Axis5\_RQ\_y*SIN(teta5*0.5); // q3 \\
Axis5\_Q3 &:= Axis5\_RQ\_z*SIN(teta5*0.5); // q4
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Q1\_5\_Q0 &:= (Q1\_4\_Q0*Axis5\_Q0 - Q1\_4\_Q1*Axis5\_Q1 - Q1\_4\_Q2*Axis5\_Q2 - \\
&Q1\_4\_Q3*Axis5\_Q3); \\
Q1\_5\_Q1 &:= (Q1\_4\_Q0*Axis5\_Q1 + Q1\_4\_Q1*Axis5\_Q0 + Q1\_4\_Q2*Axis5\_Q3 - \\
&Q1\_4\_Q3*Axis5\_Q2); \\
Q1\_5\_Q2 &:= (Q1\_4\_Q0*Axis5\_Q2 - Q1\_4\_Q1*Axis5\_Q3 + Q1\_4\_Q2*Axis5\_Q0 + \\
&Q1\_4\_Q3*Axis5\_Q1); \\
Q1\_5\_Q3 &:= (Q1\_4\_Q0*Axis5\_Q3 + Q1\_4\_Q1*Axis5\_Q2 - Q1\_4\_Q2*Axis5\_Q1 + \\
&Q1\_4\_Q3*Axis5\_Q0);
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
P5x &:= (P4x + Q1\_5\_Q0*Q1\_5\_Q0*Axis5\_Dx + 2*Q1\_5\_Q2*Q1\_5\_Q0*Axis5\_Dz - \\
&2*Q1\_5\_Q3*Q1\_5\_Q0*Axis5\_Dy + Q1\_5\_Q1*Q1\_5\_Q1*Axis5\_Dx + \\
&2*Q1\_5\_Q2*Q1\_5\_Q1*Axis5\_Dy + 2*Q1\_5\_Q3*Q1\_5\_Q1*Axis5\_Dz - \\
&Q1\_5\_Q3*Q1\_5\_Q3*Axis5\_Dx - Q1\_5\_Q2*Q1\_5\_Q2*Axis5\_Dx); \\
P5y &:= (P4y + 2*Q1\_5\_Q1*Q1\_5\_Q2*Axis5\_Dx + Q1\_5\_Q2*Q1\_5\_Q2*Axis5\_Dy + \\
&2*Q1\_5\_Q3*Q1\_5\_Q2*Axis5\_Dz + 2*Q1\_5\_Q0*Q1\_5\_Q3*Axis5\_Dx - \\
&Q1\_5\_Q3*Q1\_5\_Q3*Axis5\_Dy + Q1\_5\_Q0*Q1\_5\_Q0*Axis5\_Dy - \\
&2*Q1\_5\_Q1*Q1\_5\_Q0*Axis5\_Dz - Q1\_5\_Q1*Q1\_5\_Q1*Axis5\_Dy); \\
P5z &:= (P4z + 2*Q1\_5\_Q1*Q1\_5\_Q3*Axis5\_Dx + 2*Q1\_5\_Q2*Q1\_5\_Q3*Axis5\_Dy + \\
&Q1\_5\_Q3*Q1\_5\_Q3*Axis5\_Dz - 2*Q1\_5\_Q0*Q1\_5\_Q2*Axis5\_Dx - \\
&Q1\_5\_Q2*Q1\_5\_Q2*Axis5\_Dz + 2*Q1\_5\_Q0*Q1\_5\_Q1*Axis5\_Dy - \\
&Q1\_5\_Q1*Q1\_5\_Q1*Axis5\_Dz + Q1\_5\_Q0*Q1\_5\_Q0*Axis5\_Dz);
\end{aligned}$$

```

//-----//
// 6. Eksen x,y,z ve q1 -- q2, q3, q4 -- Q*Q çarpım degerleri //
//-----//

teta6:= Axis6_RQ_teta*pi/180;
Axis6_Q0:= COS(teta6*0.5); // q1
Axis6_Q1:= Axis6_RQ_x*SIN(teta6*0.5); // q2
Axis6_Q2:= Axis6_RQ_y*SIN(teta6*0.5); // q3
Axis6_Q3:= Axis6_RQ_z*SIN(teta6*0.5); // q4

Q1_6_Q0:= (Q1_5_Q0*Axis6_Q0 - Q1_5_Q1*Axis6_Q1 - Q1_5_Q2*Axis6_Q2 -
Q1_5_Q3*Axis6_Q3);
Q1_6_Q1:= (Q1_5_Q0*Axis6_Q1 + Q1_5_Q1*Axis6_Q0 + Q1_5_Q2*Axis6_Q3 -
Q1_5_Q3*Axis6_Q2);
Q1_6_Q2:= (Q1_5_Q0*Axis6_Q2 - Q1_5_Q1*Axis6_Q3 + Q1_5_Q2*Axis6_Q0 +
Q1_5_Q3*Axis6_Q1);
Q1_6_Q3:= (Q1_5_Q0*Axis6_Q3 + Q1_5_Q1*Axis6_Q2 - Q1_5_Q2*Axis6_Q1 +
Q1_5_Q3*Axis6_Q0);
P6x:=(P5x+Q1_6_Q0*Q1_6_Q0*Axis6_Dx+2*Q1_6_Q2*Q1_6_Q0*Axis6_Dz-
2*Q1_6_Q3*Q1_6_Q0*Axis6_Dy + Q1_6_Q1*Q1_6_Q1*Axis6_Dx +
2*Q1_6_Q2*Q1_6_Q1*Axis6_Dy + 2*Q1_6_Q3*Q1_6_Q1*Axis6_Dz -
Q1_6_Q3*Q1_6_Q3*Axis6_Dx - Q1_6_Q2*Q1_6_Q2*Axis6_Dx);
P6y:=(P5y + 2*Q1_6_Q1*Q1_6_Q2*Axis6_Dx + Q1_6_Q2*Q1_6_Q2*Axis6_Dy +
2*Q1_6_Q3*Q1_6_Q2*Axis6_Dz + 2*Q1_6_Q0*Q1_6_Q3*Axis6_Dx -
Q1_6_Q3*Q1_6_Q3*Axis6_Dy + Q1_6_Q0*Q1_6_Q0*Axis6_Dy -
2*Q1_6_Q1*Q1_6_Q0*Axis6_Dz - Q1_6_Q1*Q1_6_Q1*Axis6_Dy);
P6z:=(P5z + 2*Q1_6_Q1*Q1_6_Q3*Axis6_Dx + 2*Q1_6_Q2*Q1_6_Q3*Axis6_Dy +
Q1_6_Q3*Q1_6_Q3*Axis6_Dz - 2*Q1_6_Q0*Q1_6_Q2*Axis6_Dx -
Q1_6_Q2*Q1_6_Q2*Axis6_Dz + 2*Q1_6_Q0*Q1_6_Q1*Axis6_Dy -
Q1_6_Q1*Q1_6_Q1*Axis6_Dz + Q1_6_Q0*Q1_6_Q0*Axis6_Dz);

// TCP'de eksen düzelme hareketi için sabit bir TcpQ çarpanı.
Rtcp_x:= 0.000000e+000;
Rtcp_y:= 1.000000e+000;
Rtcp_z:= 0.000000e+000;
Rtcp_teta:= 9.000000e+001;

//----- QTCP, q1, q2, q3, q4 sabit quaternionun.
teta_tcp:= Rtcp_teta*pi/180;
Qtcp_Q0:= COS(teta_tcp*0.5); // q1
Qtcp_Q1:= Rtcp_x*SIN(teta_tcp*0.5); // q2
Qtcp_Q2:= Rtcp_y*SIN(teta_tcp*0.5); // q3
Qtcp_Q3:= Rtcp_z*SIN(teta_tcp*0.5); // q4

// Uç nokta X, Y, Z ve q1,q2,q3,q4 Degerleri.
X_tcp:= P6x;

Y_tcp:= P6y;
Z_tcp:= P6z;

// Quaternion değerleri
q1_tcp:= (Q1_6_Q0*Qtcp_Q0 - Q1_6_Q1*Qtcp_Q1 - Q1_6_Q2*Qtcp_Q2 - Q1_6_Q3*Qtcp_Q3);
q2_tcp:= (Q1_6_Q0*Qtcp_Q1 + Q1_6_Q1*Qtcp_Q0 + Q1_6_Q2*Qtcp_Q3 - Q1_6_Q3*Qtcp_Q2);
q3_tcp:= (Q1_6_Q0*Qtcp_Q2 - Q1_6_Q1*Qtcp_Q3 + Q1_6_Q2*Qtcp_Q0 + Q1_6_Q3*Qtcp_Q1);
q4_tcp:= (Q1_6_Q0*Qtcp_Q3 + Q1_6_Q1*Qtcp_Q2 - Q1_6_Q2*Qtcp_Q1 + Q1_6_Q3*Qtcp_Q0);

END_FUNCTION

```

## **ÖZGEÇMİŞ**

1982 Diyarbakır doğumludur. İlk, orta ve lise öğrenimini Diyarbakır'ın Çermik ilçesinde tamamladı. 2002 yılında lisans eğitimine başlamış olduğu Kocaeli Üniversitesi, Elektrik Eğitimi Bölümünü 2007 yılında bölüm birincisi ve fakülte üçüncüsü derecesi ile tamamladı. Aynı yıl Ford Otosan'da Elektrik Bakım Mühendisi olarak işe başladı. 2009 yılında Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği ana bilim dalında yüksek lisans öğrenimine başladı ve 2011 yılında mezun oldu. Halen Ford Otosan'da Gövde Üretim Alan Müdürlüğünde Bakım Proje Mühendisi olarak çalışmaktadır. İlgi Alanı: Kontrol, Robotik ve Otomasyon Sistemleri.