KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRONİK VE HABERLEŞME MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

OTOMOTİV ENDÜSTRİSİNDE NOKTA DİRENÇ KAYNAĞININ ENDÜSTRİYEL ROBOT İLE TAHRİBATSIZ MUAYENESİ

CENGİZ DENİZ

KOCAELİ 2017

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRONİK VE HABERLEŞME MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

OTOMOTİV ENDÜSTRİSİNDE NOKTA DİRENÇ KAYNAĞININ ENDÜSTRİYEL ROBOT İLE TAHRİBATSIZ MUAYENESİ

CENGİZ DENİZ

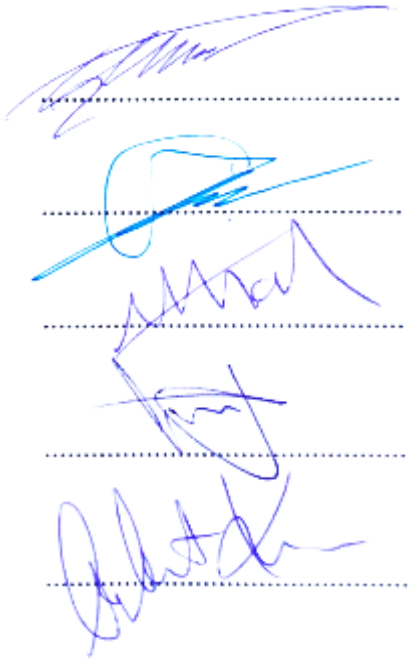
Doç. Dr. Mustafa ÇAKIR
Danışman, Kocaeli Üniversitesi

Prof. Dr. Hakan TEMELTAŞ
Jüri Üyesi, İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Melih İNAL
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi

Doç. Dr. Serhat YILMAZ
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Mevlüt KARAÇOR
Jüri Üyesi, Manisa Celal Bayar Üniv.



Tezin Savunulduğu Tarih: 19 / 06 / 2017

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Otomotiv endüstrisinde son yıllarda, tüketici beklentilerinin çok hızlı değişimine ayak uydurmak ve daha fazla sayıda ürün satmak için çok kısa üretim çevirim sürelerine sahip imalat tezgah ve hatların dizayn edilmesi oldukça popüler hale geldi. Bu doğrultuda, daha kaliteli ve düşük çevirim sürelerinde imalat yapmak adına endüstriyel robotların kullanımı dramatik bir şekilde artış göstermektedir. Otomotiv imalatında robotların büyük bir kısmı nokta direnç kaynak işleminde kullanılmaktadır. Nokta direnç kaynak işlemi otomotiv imalatında kullanılan birleştirme işlemlerin halen %80-90'ını oluşturmaktadır. Endüstriyel robotlar ile yapılan bu birleştirme işleminin kalite kontrolü, günümüzde bütün otomotiv imalat atölyelerinde hala manuel olarak operatörler tarafından yapılmaktadır. Bu muayene işlemi, ana sanayilerde atölyelerin büyüklük ve kapasite kullanımlarına bağlı olarak ortalama 30-40 kişi tarafından günlük olarak yapılmaktadır. Bu muayene işlemini robot ile yapmak için aşılması gereken problemler bilimsel açıdan analiz edilip mühendislik çözümleri ortaya konulmuştur. Elde edilen bu çözümün, başta otomotiv ana sanayisinde olmak üzere nokta direnç uygulamasının kullanıldığı tüm sanayilerde kalite kontrol için önemli bir avantaj sağlayacağı inancındayım.

Bu çalışmayı gerçekleştirmem için başta, deneyim ve bilgisini master eğitimimden beri benimle paylaşan danışmanım Sayın Doç. Dr. Mustafa ÇAKIR, tez izleme sürecinde jüri üyelerinden Sayın Prof. Dr. Hakan TEMELTAŞ, Sayın Prof. Dr. Melih İNAL, Sayın Doç. Dr. Serhat YILMAZ'a, çalıştığım işyeri Ford Otosan'da en büyük desteğini aldığım değerli yöneticim Sayın Güner DEMİRURAL'a, Gölcük fabrikasındaki yöneticilerime, mesai arkadaşlarıma ve doktora eğitimi boyunca daimi desteğini aldığım eşim Zeynep DENİZ'e teşekkürlerimi sunarım.

Haziran - 2017 Cengiz DENİZ

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ iv
TABLOLAR DİZİNİ vi
SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR vii
ÖZET viii
ABSTRACT ix
GİRİŞ 1
1. OTOMOTİV ENDÜTRİSİ VE ARAÇ İMALATI 4
2. ENDÜSTRİYEL ROBOTLAR 8
2.1. Endüstriyel Robotların Sınıflandırılması 8
2.2. Endüstriyel Robotların Kullanım Alanları 10
2.3. Endüstriyel Robot Tipleri 10
2.3.1. Serbestlik derecelerine göre robotlar 10
2.3.2. Kartezyen robot 11
2.3.3. Silindirik eklemli robot 11
2.3.4. Küresel eklemli robot 12
2.3.5. SCARA robot 13
2.3.6. Eklemli robot 14
2.4. Endüstriyel Robot Türleri ve Kinematik Modelleri 14
2.5. Endüstriyel Robot Uygulamaları 16
2.6. Robot Tasarımında Yeni Yönelimler 19
2.7. Endüstriyel Robot Standartları 19
2.8. Endüstriyel Robotlar Konusunda İstatistikler 21
2.8.1. Dünya geneli robot kullanım adetleri 21
2.8.2. Endüstrilere göre robot kullanım yoğunluğu 22
2.8.3. Yakın gelecek kullanım trendleri 23
2.8.4. Yeni kullanım alanlarına göre trendler 26
3. NOKTA DİRENÇ KAYNAK UYGULAMASI 28
4. ENDÜSTRİYEL ROBOTLARDA KİNEMATİK 32
4.1. Endüstriyel Robotlarda İleri Kinematik 33
4.2. Endüstriyel Robotlarda Ters Kinematik 40
5. NOKTA DİREÇ KAYNAĞI ROBOTİK TAHRİBATSIZ MUAYANESİ 45
5.1. Yazılım Platformu Tasarımı (IRT) 47
5.2. Yazılım Platformu İçin Robot Modeli Çıkarma 51
5.3. IRT Yazılım Platformunun Özellikleri 55
5.4. IRT Yazılım Platformunun Kontrol Paneli Menü Öğeleri 59
5.5. Kamera, Kamera kalibrasyonu ve Koordinat Sistemi Dönüşümü 68
5.6. Robotik Kamera Uygulamaları İçin Hand-Eye Kalibrasyonu 71
5.7. Kamera Optimizasyon Tercihleri ve Metlikler 76
5.8. Konum ve Rotasyon Tespitini İçin Yeni Yöntem Önerisi 78
5.9. Stereo-Kamera Tabanlı Çevirimiçi Robotik NDT Uygulaması 91
5.9.1. Punta kaynak noktalarının merkez tespiti 95

5.9.2. Gradient tabanlı arama 96
5.9.3. Symmetry tabanlı arama 96
5.9.4. Güvenilirlik ve sağlamlığı artırma 97
5.9.5. Hand-eye kalibrasyonu ve sistem kinematiği 99
5.10. Test İstasyonu, Endüstriyel Uygulaması ve Ölçüm Sonuçları 106
SONUÇ VE ÖNERİLER 121
KAYNAKLAR 122
EKLER 130
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER 138
ÖZGEÇMİŞ 139

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Otomotivde imalat üretim akış yapısına göre yerleşim planı 5
Şekil 1.2. Gövde imalat atölyesinde robotik hatlar 6
Şekil 1.3. Çevirim dışı (offline) programlama – Gönüm1 7
Şekil 1.4. Çevirim dışı (offline) programlama – Gönüm2 7
Şekil 2.1. Seri kol yapısına sahip Kuka marka bir endüstriyel robot 9
Şekil 2.2. Paralel kol yapısına sahip ABB marka bir endüstriyel robot 9
Şekil 2.3. Kartezyen yapıya sahip bir endüstriyel robot 11
Şekil 2.4. Silindirik yapıya sahip bir endüstriyel robot 12
Şekil 2.5. Küresel eklemli robotun yörüngesi 13
Şekil 2.6. SCARA yapıya sahip EPSON marka bir endüstriyel robot 13
Şekil 2.7. Mafsal yapıya sahip ABB marka bir endüstriyel robot 14
Şekil 2.8. Robotik nokta kaynak direnç uygulaması 16
Şekil 2.9. Robotik klinç uygulaması 16
Şekil 2.10. Robotik gazaltı kaynak uygulaması 17
Şekil 2.11. Robotik mastik (macun/tutkal/siler) uygulaması 17
Şekil 2.12. Robotik parça alma-bırakma uygulaması 18
Şekil 2.13. Robotik lazer kaynak uygulaması 18
Şekil 2.14. Endüstriyel robot tasarımında yeni yönelimler 19
Şekil 2.15. Dünya geneli yıllık robot teslimat trendi 21
Şekil 2.16. Dünya geneli yıllık gerçekleşen robot teslimat trendi 21
Şekil 2.17. Endüstri bazlı dünya geneli yıllık robot teslimat trendi 22
Şekil 2.18. Endüstri bazlı dünya geneli yıllık gerçekleşen teslimat trendi 22
Şekil 2.19. Kıta bazlı dünya geneli yıllık robot teslimat trendi 23
Şekil 2.20. Büyük ana pazarlara göre yıllık robot teslimat trendi 23
Şekil 2.21. Çin'e yapılan yıllık robot teslimat adet trendi 24
Şekil 2.22. Taiwan'a yapılan yıllık robot teslimat adet trendi 24
Şekil 2.23. Ana 5 lokasyondaki robot yoğunluğu 25
Şekil 2.24. Asya, Avrupa ve Amerika yıllık robot teslimat adet trendi 25
Şekil 2.25. Asya, Avrupa ve Amerika yıllık robot teslimat adet trendi 26
Şekil 2.26. Çin pazarına yapılan yıllık robot teslimat adet trendi 26
Şekil 2.27. Kuzey Ameriaya yapılan yıllık robot teslimat adet trendi 27
Şekil 2.28. Almanya'ya yapılan yıllık robot teslimat adet trendi 27
Şekil 3.1. Nokta direnç kaynağı işlem fazları 29
Şekil 3.2. Manual nokta direnç kaynak makinası 29
Şekil 3.3. Robotik nokta direnç kaynak uygulaması 30
Şekil 4.1. Rotasyonun açı-eksen gösterimi 34
Şekil 4.2. Altı serbestlik derecesine sahip ABB IRB1600 robot modeli 35
Şekil 5.1. Robotik nokta direnç kaynağı tahribatsız muayene konsepti 45
Şekil 5.2. Keyence ve Point Grey kamera spekleri 46
Şekil 5.3. IRT - Endüstriyel Robot Eğitim Platformu 51
Şekil 5.4. Quaternion ile komposit koordinat dönüşümü 53
Şekil 5.5. Ticari platformlarla karşılaştırma-örnek1 54
Şekil 5.6. Ticari platformlarla karşılaştırma-örnek2 54

Şekil 5.7. IRT çalışma uzayı 57
Şekil 5.8. IRT Platformu kontrol paneli 57
Şekil 5.9. IRT Sterio kontrol widgeti 58
Şekil 5.10. IRT- Nokta bulutu gösterimi, robot-kamera transformasyonu 59
Şekil 5.11. IRT menü sekmeleri (info) 60
Şekil 5.12. IRT menü sekmeleri (config) 60
Şekil 5.13. ABB Robot Studio Programı ve IRT programında gösterim 61
Şekil 5.14. Robotun 5.8 derece döndürülmesi 61
Şekil 5.15. IRT ‘de elde edilen TCP ve oryantasyon değerleri 62
Şekil 5.16. Döndürülmesi sonucunda elde edilen TCP ve oryantasyon değeri 62
Şekil 5.17. IRT programında eksen sınırlama 63
Şekil 5.18. IRT workspace sekmesi 63
Şekil 5.19. IRT Robot eksen trendleri 64
Şekil 5.20. IRT – Hareke halinde robot eksen trendleri 65
Şekil 5.21. IRT Platformu View menüsü 65
Şekil 5.22. IRT Platformu Automation menüsü 65
Şekil 5.23. IRT Platformu Windows menüsü 66
Şekil 5.24. IRT Offline programlama modülü 67
Şekil 5.25. Tabandan göreli nokta ile dönüşümler 72
Şekil 5.26. Farklı indekslere gürültü jenerasyonu. 82
Şekil 5.27. Kalibrasyon algoritmalarının standart metriklerle karşılaştırılma... 84
Şekil 5.28. Metaverse veriler için standart metriklerle karşılaştırma-1 85
Şekil 5.29. Projektif geometriye dayalı optimizasyon. 87
Şekil 5.30. Metaverse veriler için yansıtmalı metriklerle karşılaştırma-2 88
Şekil 5.31. Farklı gürültü seviyeleri ile kıyaslama-örnek1 89
Şekil 5.32. Farklı gürültü seviyeleri ile kıyaslama-örnek2 90
Şekil 5.33. Klasik punta kaynak görüntü kalıpları 95
Şekil 5.34. Gradient tabanlı arama 96
Şekil 5.35. Symmetry tabanlı arama 97
Şekil 5.36. Stereo kamera uygulaması 98
Şekil 5.37. ABB IRB1600 7/1.45 endüstriyel robot 99
Şekil 5.38. Base-kamera frame arası ilişki 102
Şekil 5.39. Base-kamera çalışma uzayı ilişkisi 103
Şekil 5.40. Algoritmaların karşılaştırılması 104
Şekil 5.41. Hata projeksiyonu 105
Şekil 5.42. Punta merkez lokazizasyonu 106
Şekil 5.43. Nokta direnç kaynağı robotik tahribatsız muayene test istasyonu 107
Şekil 5.44. Nokta direnç kaynağı robotik tahribatsız muayene test robotu 108
Şekil 5.45. Robot, kamera ve ölçüm noktasının koordinat dönüşümü 108
Şekil 5.46. Kamera ile nokta direnç kaynak noktasının tespiti 109
Şekil 5.47. Robot ile nokta direnç kaynak noktasının ultrasonik ölçümü 110
Şekil 5.48. Kamera ile nokta direnç kaynak noktasının konum tespiti 114
Şekil 5.49. Robotik nokta direnç kaynak noktasının UT testi 115
Şekil 5.50. Nokta direnç kaynak noktasının yırtma (teardown) testi 115
Şekil 5.51. Robot ile nokta direnç kaynak noktasının ultrasonik ölçümü 120

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 2.1. Endüstriyel Robot Türleri ve Kinematik Diyagramları 15
Tablo 2.2. Uluslararası Robot Standartları (ISO)..... 19
Tablo 3.1. Sac Sınıfı: A-B (DIN 1623) için kaynak parametre tablosu..... 30
Tablo 3.2. Sac Sınıfı: C (DIN 1623) için kaynak parametre tablosu 31
Tablo 3.3. Sac Sınıfı: C (DIN 17441) için kaynak parametre tablosu 31
Tablo 5.1. Robotik nokta direnç kaynağı tahribatsız muayene ekipmanları..... 46
Tablo 5.2. Robotik nokta direnç kaynağı tahribatsız muayene değerleri..... 110
Tablo 5.3. Robotik ultrasonik muayene test ölçüm sonuçlarını karşılaştırma 116

SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR

Kısaltmalar

DOF	:	Degree Of Fredom (Serbestlik Derecesi)
IRB	:	Industrial Robot (Endüstriyel Robot)
IRT	:	Industrial Robot Training (Endüstriyel Robot Eğitimi)
ISO	:	International Organization for Standardization (Uluslararası Standartlar Organizasyonu)
PLC	:	Programmable Logic Controller (Programlanabilir Mantık Denetleyici)
PPP	:	Prismatic Prismatic Prismatic (Prizmatik Prizmatik Prizmatik)
RPP	:	Revolute Prismatic Prismatic (Döner Döner Prizmatik)
RRP	:	Revolute Prismatic Prismatic (Döner Prizmatik Prizmatik)
SCARA	:	Selective Compliant Articulated Robot Assembly (Selektif Uyumlu Mafsal Yapısına Sahip Robot)
TCP	:	Tool Center Point (İşlem Ucu Merkezi)

OTOMOTİV ENDÜSTRİSİNDE NOKTA DİRENÇ KAYNAĞININ ENDÜSTRİYEL ROBOT İLE TAHRİBATSIZ MUAYENESİ

ÖZET

Bu tez çalışmasında, otomotiv endüstrisinde nokta direnç kaynak işleminin kalite kontrolünde kullanılan ve tahribatsız yöntemlerden en yaygın olan ultrasonik kontrol prosesinin robot yardımı ile gerçekleştirilmesi için gerekli olan platform tasarlanmış ve sunulmuştur. Tasarlanan platformda başta robot, kamera ve PLC (Programlanabilir Mantıksal Denetleyici) gibi sistem bileşenleri için ilişkisel koordinat dönüşümleri, kinematik bağıntıları ve kontrol algoritmaları ortaya konulmuştur. Özellikle robotun uç işlevcisi (end effector) üzerindeki kamera (Hand-Eye) sistemi için robotun çalışma uzayında yönlendirilmesi gereken ilgili hedef noktanın konum ve oryantasyonu en doğru şekilde bulmak adına yapılması gereken kamera kalibrasyonu için yeni bir öneri ortaya konulmuştur. Geliştirilen bu yöntem sayesinde otomotiv endüstrisinin tamamında manuel olarak operatörler tarafından gerçekleştirilen ultrasonik kontrol tahribatsız muayenesinin tamamen otomatik olarak endüstriyel robot ile yapılması hedeflenmiştir. Diğer bir tahribatsız kontrol yöntemi olan görsel muayene işleminde yine robot üzerinde yer alan kamera yardımı ile nasıl gerçekleştirilebileceği sistematik olarak sunulmuştur.
Ayrıca bu tez çalışması sayesinde robot eğitimi ve uygulamaları alanında temel ihtiyaç haline gelen offline (çevrimdışı) robot platformu için C++ programlama dilinde ve Fox ToolKit kütüphanesi kullanılarak bir yazılımda geliştirilmiştir. Bu yazılım sayesinde, endüstride ve mühendislik eğitiminde endüstriyel robotlar ile ilgili konuların robot marka ve modelinden bağımsız bir şekilde ve her marka ve modelinin ölçülerini sağlayacak başta programlama, kinematik, çalışma uzayı, robot-kamera uygulamaları ve PLC sistemleri ile olan bağlantıların nasıl yapılabileceği sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Endüstriyel Robot, Hand-Eye Kalibrasyonu, Kinematik, Nokta Direnç Kaynağı, Tahribatsız Muayene.

NON-DESTRUCTIVE TEST OF SPOT WELDING WITH INDUSTRIAL ROBOT IN AUTOMOTİVE INDUSTRY

ABSTRACT

In this thesis study, the platform required for the ultrasonic control process, which is the most common non-destructive method used in quality control of point resistance welding process in the automotive industry, is realized with industrial robot is designed and presented. In the designed platform, relational coordinate transformations, kinematic relations and control algorithms for system components such as robot, camera and PLC (Programmable Logic Controller) are presented. In particular, a new proposal has been put forward for camera calibration for the camera (Hand-Eye) system on the end effector of the robot, which needs to be guided in the working space, in order to find the most accurate position and orientation of the target point. Thanks to the developed method, it is aimed to make the ultrasonic control nondestructive inspection, which is carried out manually by the operators in the automotive industry, completely automatically with the industrial robot. It is also presented that the visual inspection process, which is another non-destructive control method, is realized by the camera on the robot.

Thanks to this thesis work, it has also been developed in a software using the C ++ programming language and the Fox ToolKit library for the offline robot platform which has become a basic necessity in robot education and applications. Programming, kinematics, workspace, robot-camera applications and PLC systems are presented in detail, which will provide all brands and models independently of robot brand and model of industrial robots in industrial and engineering education with developed software platform.

Keywords: Industrial Robot, Hand-Eye Calibration, Kinematic, Spot Welding, Non-destructive Test.

GİRİŞ

Otomotiv endüstrisi gelişmiş ve gelişmekte olan bütün ülkelerde sanayinin ana lokomotifi durumundadır. Bu endüstride kullanılan teknolojiler çok hızlı bir şekilde yenilenmekte olup diğer sanayi alanları içinde bir örnek teşkil etmektedir. Özellikle imalat teknolojileri, ürün geliştirme ve tedarik zinciri konuları otomotivde en hızlı değişim gösteren ana başlıklardır.

Otomotiv imalat teknolojilerinde son yıllarda gerek otomotiv sanayisinin anavatanı olan Amerika Birleşik Devletlerinde, gerek Avrupa'da ve gereksede diğer uzak doğu ülkelerinde büyük değişimler yaşanmaktadır. Bu büyük değişimin temelinde üretim süreçlerinin tamamını otomasyona dönüştürerek daha düşük çevirim sürelerinde araç üretip ve pazara daha erken ürün sunma strateji yer almaktadır. Otomotiv üretim süreçlerinde kullanılan otomasyonun sistemlerinin en temel enstrümanı endüstriyel robotlardır. Endüstriyel robotlar günümüzde otomotiv imalatında yer alan Takım-Kalıp, Pres Hatları, Gövde Kaynak Atölyeleri, Boyahane ve Montaj atölyelerinde yer alan süreçlerin neredeyse tamamında yer almaktadırlar. Endüstriyel robotlarla bu atölyelerde; parça taşıma, nokta direnç kaynak uygulamaları, ark kaynak (gaz altı) kaynak uygulamaları, mastik uygulamaları, lazer veya plazma kesim uygulamaları, parça alma-yerleştirme uygulamalarını, boya uygulamaları, klinç uygulamaları, görsel muayene işlemlerinde, cam takma, koltuk takma uygulamalarında ve daha birçok farklı proseste kullanılmaktadırlar.

Üretim sistemlerinin tamamını otomasyona dönüştürme stratejisi doğrultusunda üretim operatörleri tarafından yapılan bütün prosesler mercek altına alınmakta ve ilgili proseslerin otomasyon dönüştürülmesi fırsatı için mühendislik çözümleri aranmaktadır. Bu strateji doğrultusunda otomotiv endüstrisinde bugün hala üretim operatörleri tarafından yapılan ve otomasyon sistemine dönüştürülme çözümü henüz bulunmamış işlerden birisi gövde atölyelerinde yapılmakta olan nokta direnç kaynak uygulamasının kalite kontrolüdür.

Elektrik nokta direnç kaynağı (punta kaynağı), 126 yıldır [1-2] kullanılmakta olup günümüzde otomotiv imalatında birleştirme uygulamalarında en çok tercih edilen yöntemdir[3, 5-8]. Binek, hafif ticari ve orta seviye ticari araçlarda modellere bağlı olarak her bir araçta ortalama 4.000 – 11.000 adet nota direnç kaynak noktası bulunmaktadır. Bu kaynak noktalarının operasyonu, operatörlerin kullanıdığı bir kaynak tabancası yardımıyla ve/veya robot ucuna takılmış kaynak tabancası yardımı ile gerçekleştirilmektedir. Üretim hatlarında nokta direnç kaynak işlemi temel olarak 2 veya 2 den fazla sac parçalarının üst üste konularak ve elde edilmek istenen kaynak düğme çapı yüzeyine uygulanan kuvvet yardımı ile malzemeden gerekli olan elektrik akımının geçirilmesi sonucu elde edilir [4-13].

Nokta direnç kaynağı işlemi için piyasada kullanılmakta olan çeşitli tipte ve güçte onlarca makara mevcuttur. Bu kaynak makinalarında nokta kaynak direnç prensip devre şemasına göre, malzemelerin (Sac parçaları) sahip olduğu elektriksel direnç, birleştirme işleminde kullanılan bakır elektrod, arm, adaptör gibi ara bağlantı aparatlarının sahip olduğu dirençler dikkate alınarak toplam bir direnç hesaplanır.

Kaynak ergiyiği elde etmek için bu toplam dirence uygulanması gereken akım (Amper), akımın genliğini ve süresini ayarlayan denetleyici (kaynak zamanlayıcısı) tarafından sağlanır. Nokta direnç kaynak işlemi ile yapılan kaynakların kalite kontrolü tahribatlı ve tahribatsız olmak üzere 2 yöntem ile yapılmaktadır. Tahribatlı yöntemde kaynak noktasına uygulanan kuvvet ile iki sac parça bir birinden ayırtılır. Ayırma işlemi sonrası kaynak düğme çapı istenen seviyenin oluşup oluşmadığı kumpas veya benzeri bir ölçü aleti ile) ölçülerek kabul veya red kararı verilir.

Diğer yöntem olan tahribatsız muayene, muayene işlemi yapılacak malzemeye herhangi bir zarar vermeden incelenmesi, malzemenin dinamik ve statiği ile ilgili bilgi edinmesini sağlar. Tahribatsız muayene (Non-Destructive Test) yöntemi ağırlıklı olarak bir malzemenin üretim sürecinde veya üretim sonrası malzemenin kullanımından bir süre sonra (malzemede korozyon, aşınma vb. nedenlerden ile çatlak oluşması) içyapısındada meydana gelen distokasyonlar, malzeme kesitinde azalma gibi hataların tespitinde kulanılmaktadır. Bu işlemlerde, malzemelerden herhangi bir numune alma ihtiyacı gerekmemektedir. İlgili test doğrudan iş parçası üzerinde yapılır ve böylece parçaların muayenesi gerçekleştirilir.

Otomotiv endüstrisinde, tahribatsız muayenede çeşitli yöntemler kullanılmakla beraber bu yöntemlerden en yaygın olanı ultrasonik kontroldür. Utrasonik kontrol, bir ses dalgasının kaynak yapılan malzeme içinde zamana göre aldığı mesafe prensibine dayanır. Ses yüzeyden gönderildiğinde bir yansıtıcıya çarpar ve geri döner. Ses dalgasının kaynak noktası içindeki hızının sabit olması nedeniyle ses dalgasının geri yankılması sonucu aldığı toplam mesafe bulunabilmektedir [14-18]. Otomotiv sektöründe kullanılmakta olan ultrasonik ölçüm cihazlarından bir örnek sunulmuştur. Bu cihazların toplam 3 ana bileşeni vardır. Bu bileşenler, ek-E'de gösterilen ölçüm probları, dönüştürücü kart ve bilgisayarda yüklü olan bir yazılım paketi olarak tanımlanabilir.

Ultrasonik kontrol muayene yöntemi, otomotiv imalat sisteminde operatörler tarafından ve el becerisi ile yapılan bir kontrol yöntemidir. Operatörler tarafından yapılan bu proses çok fazla sayıda iş gücü gerektirdiğinden gerek maliyet gereksede kontrol periyodu açısından olumsuz etkileri vardır. Manual yapılan bu kontrol yönteminde üretilen araçlar %100 kontrol edilemediğinden örnekleme yöntemi ile bir değerlendirme yapılmaktadır. Son yıllarda, ultrasonik ölçüm kontrol sisteminde insan kaynaklı hataları engellemek, üretim çevirim süresini arttırmak ve kalite kontrol frekansını arttırmak adına çeşitli otomasyon sistemleri üzerinde çalışılmaktadır [19-30]. Otomotiv endüstrisinde nokta direnç kaynağı için tam olarak insandan bağımsız kullanılabilir bir uygulama günümüz itibariyle piyasada gerçek anlamda yer almamaktadır.

Bu tez çalışmasında amaç, insan tarafından yapılan bu işlemlerin robot yardımı ile gerçekleştirilmesidir. Böylece hem maliyetin azaltılması hem de daha fazla sayıda kaynak noktası ölçülerek aracın punta kalite kontrolünün doğruluğu artırması hedeflenmektedir.

1. OTOMOTİV ENDÜTRİSİ VE ARAÇ İMALATI

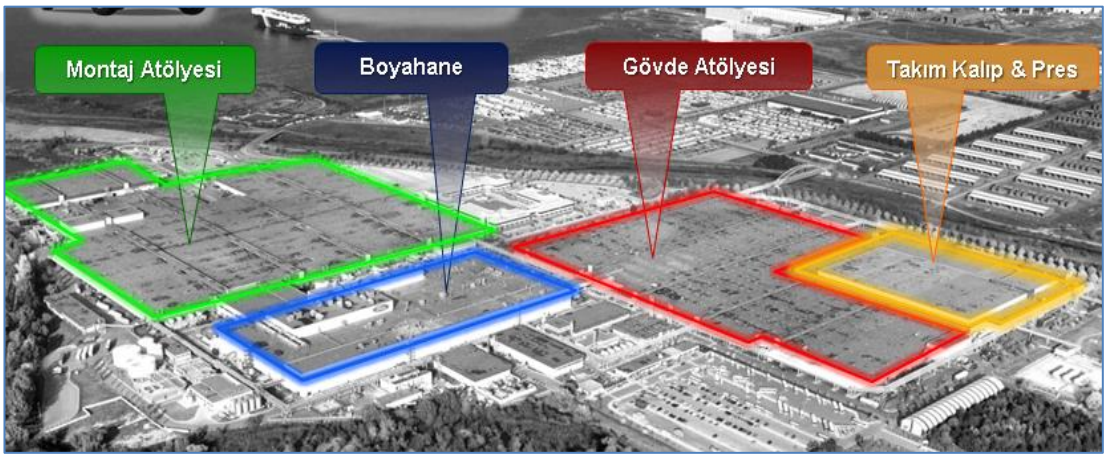
Türkiyede otomotiv sanayisinin temelleri, ilk yerli otomobilin geliştirilmesi ve üretilmesi faaliyetlerinin başlandığı 1960 ve sonrasındaki yıllara kadar uzanmaktadır. Otomotiv sanayisi, temellerinin ilk olarak atıldığı yıllardan bu yana hızlı bir ilerleme ve gelişme süreci içerisinde montaj ağırlıklı ortaklıklardan tasarım yeteneği ve geniş üretim kapasitesine sahip dünya çapında bir endüstriye dönüşmüştür. Orijinal ürün üreticileri (OEM), 2000-2014 yılları arasında Türkiye'deki faaliyetlerine 12 milyar ABD dolarının üzerinde yatırım yapmıştır. Bu yatırımlar üreticilerin imalat yeteneklerini önemli ölçüde geliştirerek Türkiye'nin, uluslararası OEM'lerin küresel değer zincirinin önemli bir parçası haline gelmesini sağlamıştır. Uluslararası kalite ve güvenlik standartlarını karşılayan, hatta bu standartların ötesine geçen günümüz Türk otomotiv endüstrisi, katma değerli üretim anlayışı sayesinde son derece verimli ve rekabetçidir [31].

Türkiye'nin Orta ve Doğu Avrupa otomotiv üretimindeki payı % 25 seviyesindedir. Otomotiv endüstrisi, Türkiye'deki imalat sektörünün ana itici güçlerinden biridir. 400.000'i aşkın kişiye istihdam sağlayan otomotiv sektörü aynı zamanda ülkedeki temel işverenlerden biri konumundadır. En fazla ihracat yapan beş şirketten üçünün faaliyet gösterdiği otomotiv endüstrisi, toplam ihracattaki % 16'lık payıyla ihracat şampiyonudur. Ford, Fiat ve Daimler, Türkiye'de ürün geliştirme, tasarım ve mühendislik faaliyeti yürüten küresel markalar arasında dikkate değer örnekler olarak göze çarpmaktadır.

Ford Otosan'ın Ar-Ge merkezi Ford'un küresel çaptaki en büyük üç Ar-Ge merkezinden biriyken, Fiat'ın Bursa'daki Ar-Ge merkezi İtalyan şirketin kendi ülkesi dışında Avrupa pazarına hizmet sunan tek merkezidir. Öte yandan, Daimler' in İstanbul'daki Ar-Ge merkezi Alman şirketin Türkiye'deki kamyon ve otobüs üretimini tamamlayıcı niteliktedir. Türkiye'yi dünyanın en büyük 17. otomotiv üreticisi konumundadır. 2014 yılı sonu itibarıyla Türkiye, Avrupa'nın en büyük hafif ticari araç üreticisidir [31].

1.1. Araç Üretim Süreçleri

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 yapıldı Montaj Atölyelerinden meydana gelir [32]. Otomotiv imalatı sistemi için örnek bir üretim akış resmi Şekil 1.1'de verilmiştir.



Şekil 1.1. Otomotivde imalat üretim akış yapısına göre yerleşim planı

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 80-350sn 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 1.2'de bir gövde imalat atölyesinden robotik hatlar gösterilmiştir.

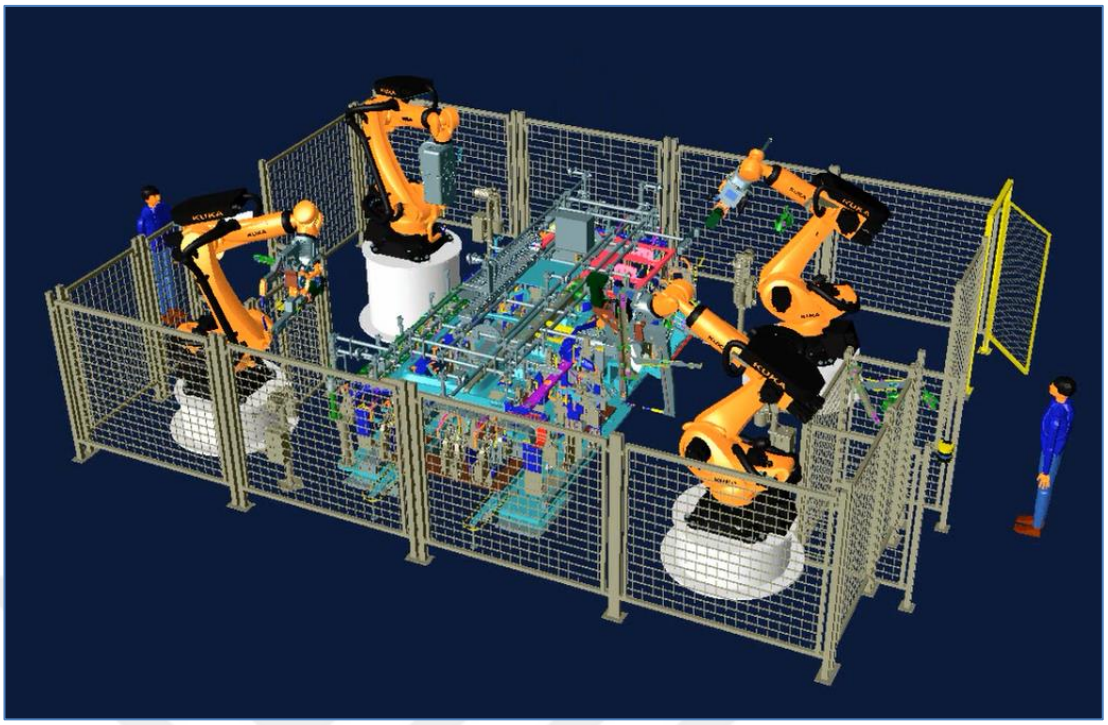


Şekil 1.2. Gövde imalat atölyesinde robotik hatlar

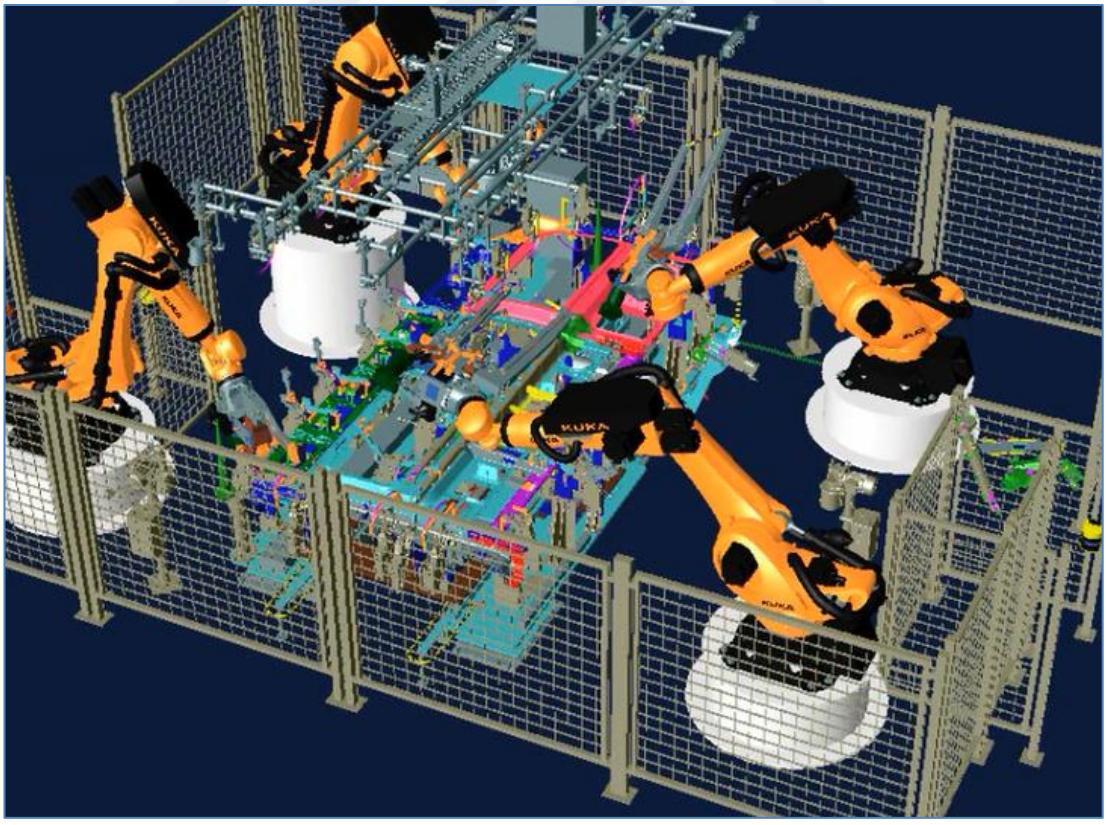
İmal edilen aracın kalitesini doğrudan belirleyen bir alan olma özelliğine sahip olan gövde imalat atölyeleri gerek teknolojik anlamda gerekse de imalat süreçleri açısından sürekli iyileştirme felsefesi doğrultusunda geliştirilmektedir.

1.2. Robotik İmalat Hatları ve Robotik Uygulamalar

Endüstriyel robotların yoğun olarak kullanıldığı üretim atölyelerinden, 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 (fikstür) kaynaklı değişkenliklerden dolayı aracın kalitesi açısından farklı problemler ortaya çıkabilmektedir. Şekil 1.3'de robot kontrolünde kullanılan çevirim dışı programlama ve Şekil 1.4'de geleneksel robot kontrol istasyonlarından genel bir görünüm sunulmuştur.



Şekil 1.3. Çevirim dışı (offline) programlama – Gönüm1



Şekil 1.4. Çevirim dışı (offline) programlama – Gönüm2

2. ENDÜSTRİYEL ROBOTLAR

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 kaçı 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 [32].

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 ekseni olan, otomatik kontrollü, yeniden programlanabilir, çok amaçlı, bir yerde sabit duran veya hareket edebilen birden fazla motorlu makine veya el aletine robot denir [33].

2.1. Endüstriyel Robotların Sınıflandırılması

Endüstriyel robotlar, seri ve paralel kol yapılarına sahip olmaları açısından iki gruba ayrılır. Seri robotlar, bir takım eklem ve bu eklemleri birbirine seri bir şekilde bağlayan kollardan oluşur. Seri robotlar geniş bir çalışma uzayına ve az sayıda mekanik aksamlara sahiptir. Paralel robotlar, temel çerçeve (base frame) ile uç işlevcisi (TCP)

arasındaki birden fazla kolun paralel olarak bir araya gelmesinden oluşur. Bir kolun hareketi diğer kolun hareketine de bağlı olduğu için kinematik modellemeleri daha zordur. Paralel kol yapısına sahip robotlar, seri eklemli robotlara göre daha dayanıklı bir mekanik yapıya sahiptir. Şekil 2.1'de seri robot ve Şekil 2.2'de de paralel robot yapıları gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Seri kol yapısına sahip Kuka marka bir endüstriyel robot



Şekil 2.2. Paralel kol yapısına sahip ABB marka bir endüstriyel robot

Robotlar serbestlik derecelerine, eklemlerin tahrik yapısında kullanılan güç kaynağına, kullanılan kontrol sisemlerine ve hassasiyet derecelerine göre farklı sınıflandırılmaktadır. Bu bölümde endüstriyel robotlar serbestlik derecelerine göre sınıflandırılmıştır.

2.2. Endüstriyel Robotların Kullanım Alanları

Endüstriyel robotlar, günümüzde aşağıdaki alanlarda yoğun olarak kullanılmaktadırlar. Bu alanlar;

- Punta kaynağı, ark kaynağı, lazer kaynağı,
- Parça yükleme ve boşaltılma operasyonlarında,
- Boyama, kesme ve muayene operasyonlarında
- Mekanik ve elektrik ile ilgili parçaların montajı,
- Elektronik sanayinde parçaların montajı işlemlerinde
- Deri ile ilgili işlemler ve ayakkabı imalatı,
- Kauçuk ile ilgili üretim operasyonlarında
- Gıda maddeleri ile ilgili proseslerde,
- Kil ve çimento kullanılarak yapılan imalatlar,
- Cam endüstrisi, giyim endüstrisi, ağaç endüstrisi.

2.3. Endüstriyel Robot Tipleri

2.3.1. Serbestlik derecelerine göre robotlar

Robotlar serbestlik derecesine göre sınıflandırılırken genellikle ilk üç kolun eklem yapısı dikkate alınmaktadır. Robot ana mekanik sisteminde ilk üç kol yapısı prizmatik (Prismatic-Prismatic-Prismatic, PPP) ise bu robota kol yapısı nedeniyle 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 kol bağlantı noktası döner ekleme sahipse bu robota da döner eklemli robot denir. Endüstrinin genelinde robotik imalat hatlarında kullanılan robotlar çoğunlukla altı serbestlik (6 DOF) derecesine sahip döner eklemli robotlardır [34].

2.3.2. 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.

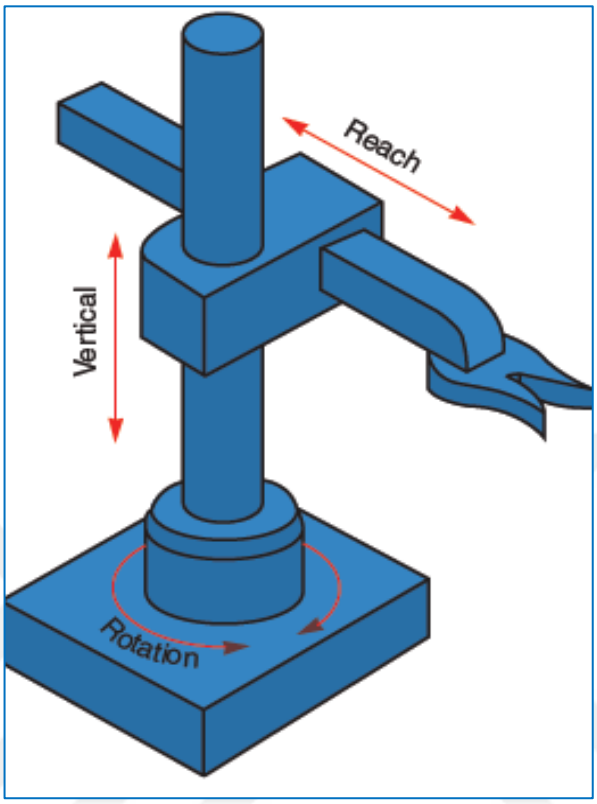


Şekil 2.3. Kartezyen yapıya sahip bir endüstriyel robot

2.3.3. Silindirik eklemli robot

Silindirik robotlarda kol yapısı; başlangıç eklemi döner, ikinci ve üçüncü eklemi prizmatik yapıda olan eklemlerden oluşmaktadır. Silindirik robot kendi temel çerçevesi etrafında dönebilen bir mafsal ve bunun üzerinde bulunan X,Y ve Z düzleminde doğrusal hareket edebilen bağlantı kollardan oluşmaktadır. Mekanik olarak yapıları çok daha güçlü ve sağlam olmasına rağmen robotun doğruluğu ve hassasiyeti yatayda yaptığı hareketlerde değişkenlik göstermektedir. Kartezyen robot gibi büyük hacimli ve ağırlıklı nesnelerin taşınmasında kullanılır. Prizmatik eklemde

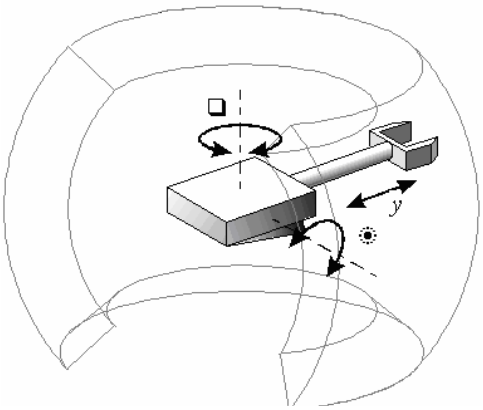
hareketlendirici olarak genellikle hidrolik silindir kullanılır. Şekil 2.4'te endüstriyel bir silindirik robot gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Silindirik yapıya sahip bir endüstriyel robot

2.3.4. Küresel eklemli 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 mafsalı kendi etrafında dönme hareketi yapabilirken, üçüncü eksen mafsalı uzama ve kısalma hareketi yaptırmaktadır. Şekil 2.5' görüldüğü gibi hareket alanı küresel bir koordinat sistemine sahiptir. Robot kinematik yapıları kartezyen ve silindirik robot yapılarına göre daha karmaşık ve çözümleri oldukça zordur. Bu robotların çalışma şeklinin canlandırılması oldukça zor olduğu için hem programlama hem de robotun kontrolü zordur. Çalışma alanının büyüklüğü kolların büyüklüğüne bağlıdır.



Şekil 2.5. Küresel eklemli robotun yörüngesi

2.3.5. 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 2.6'da bir SCARA robot gösterilmiştir.



Şekil 2.6. SCARA yapıya sahip EPSON marka bir endüstriyel robot

2.3.6. Eklemli 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 5-6-7 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 2.7'de mafsal yapısına sahip ABB marka IRB6640 modelindeki bir robot gösterilmiştir.

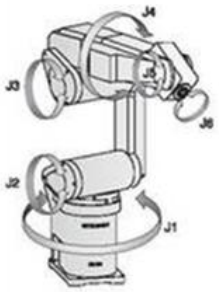
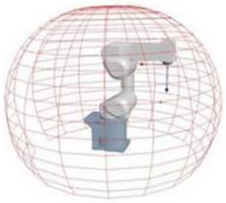
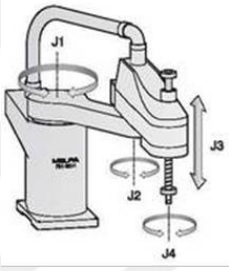
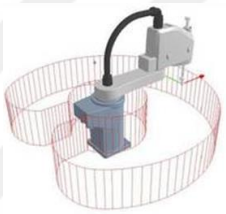
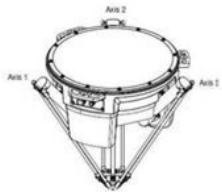


Şekil 2.7. Mafsal yapıya sahip ABB marka bir endüstriyel robot

2.4.Endüstriyel Robot Türleri ve Kinematik Modelleri

Uluslararası Robot Federasyonu (IFR) tarafından tanımlanmış endüstriyel robot türleri ve kinematik diyagramları Tablo 2.1'de [35] verilmiştir. Robot tipleri ve bu robot tiplerine ait prensip tasarım, kinematik diyagramları ve temsili fotoğrafları detaylı olarak verilmiştir.

Tablo 2.1. Endüstriyel Robot Türleri ve Kinematik Diyagramları

Robot Tip	Prensip Tasarımı	Kinematik Diyagramı	Temsili Fotoğraf
Eklemli Robot			
SCARA Robot			
Kartezyen / Gantry Robot			
Paralel Robot			

2.5. Endüstriyel Robot Uygulamaları

Endüstride kullanılan robot uygulamaları konusunda örnek görseller aşağıda verilmiştir. Bu görseller robot uygulamalara konusunda tez çalışmasının öneminin anlaşılması açısından tez çalışmasında yer verilmiştir. Aşağıda verilen görseller ağırlıklı olarak otomotiv imalatında kullanılan robot teknolojilerini kapsamaktadır.



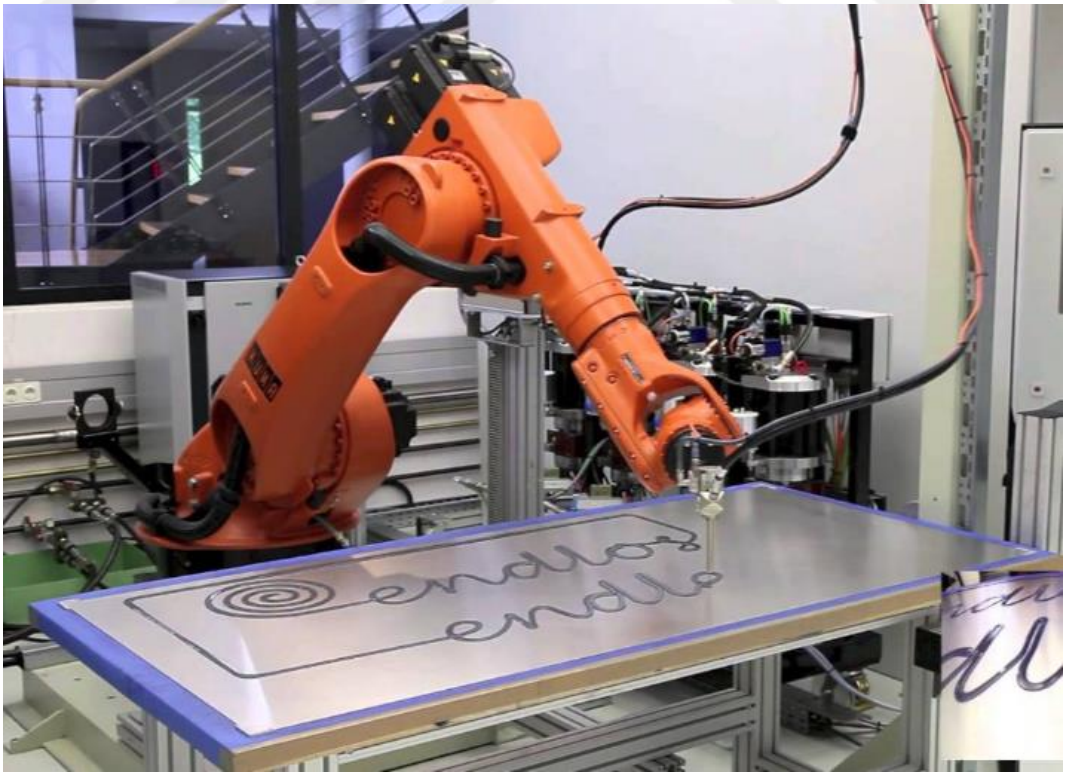
Şekil 2.8. Robotik nokta kaynak direnç uygulaması



Şekil 2.9. Robotik klinç uygulaması



Şekil 2.10. Robotik gazaltı kaynak uygulaması



Şekil 2.11. Robotik mastik (macun/tutkal/siler) uygulaması



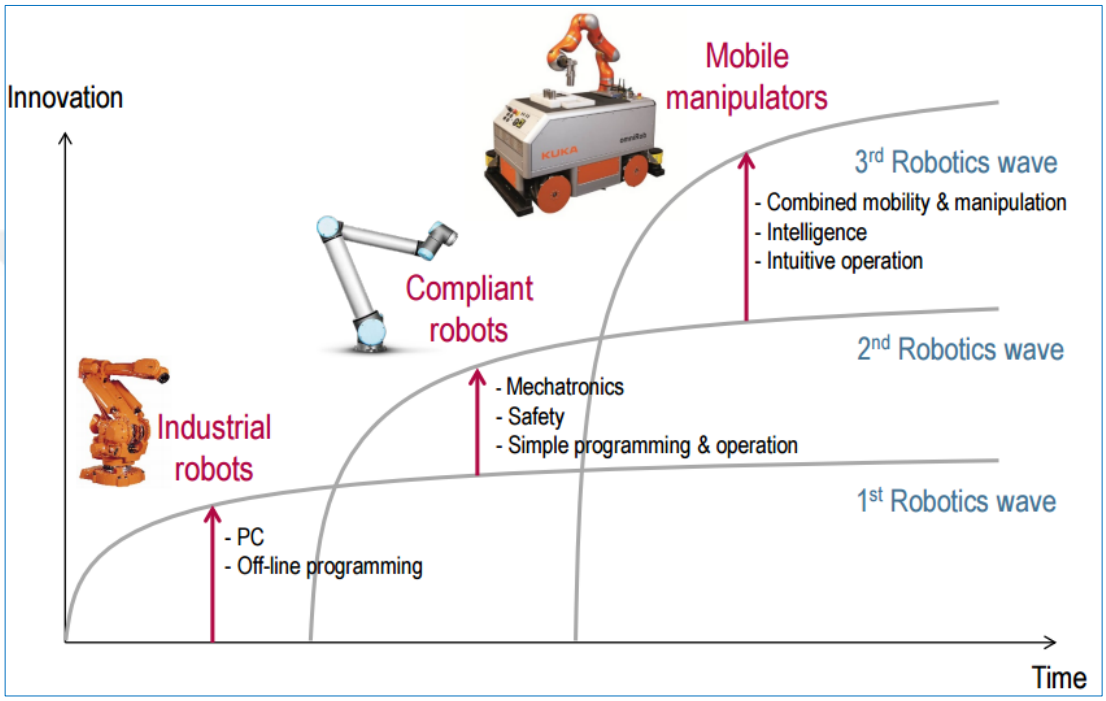
Şekil 2.12. Robotik parça alma-bırakma uygulaması



Şekil 2.13. Robotik lazer kaynak uygulaması

2.6. Robot Tasarımında Yeni Yönelimler

Son yıllarda gerek seri eklemli endüstriyel robot alanındaki gelişmeler ve gereksede mobil platformlu robot sistemlerindeki ilerlemeler ile beraber endüstrinin ihtiyaç duyduğu esnek üretim sistemleri için yeni çözümlerin ortaya çıkmasını sağlamaktadır. Şekil 2.14'te [36] endüstriyel robotlardaki gelişmeler aşamaları olarak verilmiştir.



Şekil 2.14. Endüstriyel robot tasarımında yeni yönelimler

2.7. Endüstriyel Robot Standartları

Endüstriyel robotlar konusunda güncel kullanılmakta olan ISO (The International Organization for Standardization) standartları tablo.2.2'de verilmiştir. Bu standartlar robot imalatı, kullanımı ve uygulama alanları ile ilgili bütün süreçleri içermektedir.

Tablo 2.2. Uluslararası Robot Standartları (ISO)

No	Standart Numarası	Yıl	Standardın Konusu (EN)
1	ISO 18646-1	2016	Robotik - Hizmet robotları için performans kriterleri ve ilgili test metotları - Bölüm 1: Tekerlekli robotlar için lokomotif.
2	ISO/TS 15066	2016	Robotlar ve robotik cihazlar - Collaborative robots

Tablo 2.2. (Devam) Uluslararası Robot Standartları (ISO)

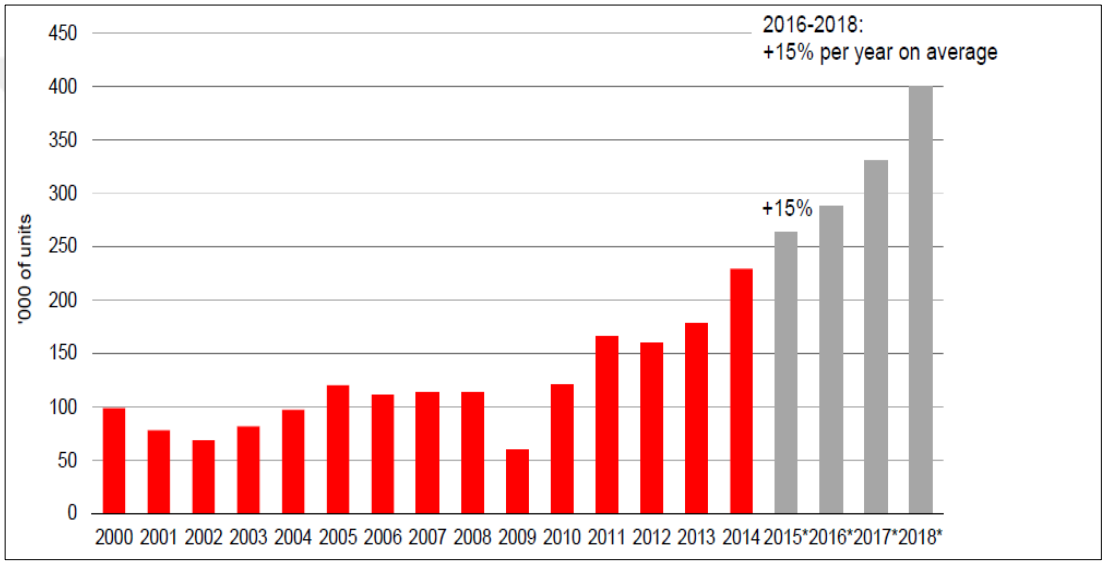
3	ISO 1348	2014	Robotlar ve robotik cihazlar - Kişisel bakım robotları için güvenlik gereksinimleri.
4	ISO 9787	2013	Robotlar ve robotik cihazlar - Koordinat sistemleri ve hareket nomenklatürleri.
5	ISO 8373	2012	Robotlar ve robotik cihazlar -- Vocabulary
6	ISO 10218-1	2011	Robotlar ve robotik cihazlar - Endüstriyel robotlar için güvenlik gereksinimleri - Bölüm 1: Robotlar
7	ISO 10218-2	2011	Robotlar ve robotik cihazlar - Endüstriyel robotlar için güvenlik gereksinimleri - Bölüm 2: Robot sistemleri ve entegrasyon
8	ISO 9409-1	2004	Endüstriyel robotların manipüle edilmesi - Mekanik arayüzler - Bölüm 1: Plakalar
9	ISO 9409-2	2002	Endüstriyel Robotların Değiştirilmesi - Mekanik Arayüzler - Bölüm 2: Miller
10	ISO 14539	2000	Endüstriyel robotların manipüle edilmesi - Sap kavramalı tutucularla nesne taşıma - Kelimeler ve karakteristiklerin sunumu.
11	ISO 9946	1999	Endüstriyel robotların manipüle edilmesi - Özelliklerin tanıtımı.
12	ISO 9283	1998	Endüstriyel robotların manipüle edilmesi - Performans kriterleri ve ilgili test yöntemleri
13	ISO 11593	1996	Endüstriyel robotların değiştirilmesi - Otomatik tool değişim sistemleri - Kısaltmalar ve özeliklerin sunumu.
14	ISO/TR 13309	1995	Endüstriyel robotların değiştirilmesi -- ISO 9283'e uygun olarak robot performans değerlendirmesi için test ekipmanı ve metroloji çalışma yöntemleri hakkında bilgilendirici kılavuz.
15	ISO/CD TR 23482-1	NA	Robotik - ISO 13482 Uygulaması - Kısım 1: Güvenlikle ilgili test yöntemleri.
16	ISO/CD TR 23482-2	NA	Robotik - ISO 13482 Uygulaması - Bölüm 2: Uygulama rehberi
17	ISO/DIS 19649	NA	Robotlar ve robotik cihazlar - Mobil robotlar için kelime hazinesi.

2.8. Endüstriyel Robotlar Konusunda İstatistikler

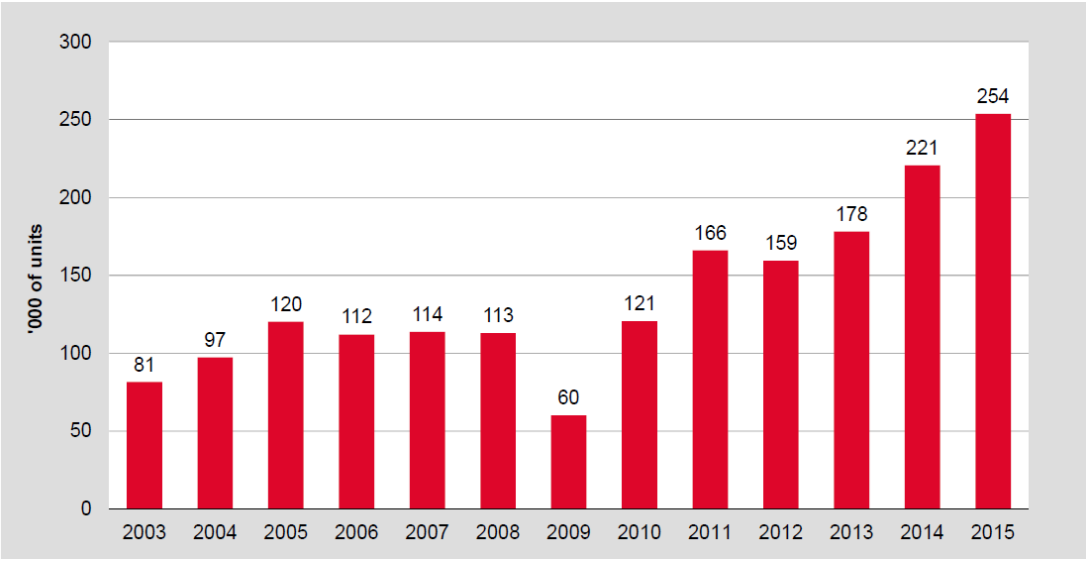
Endüstriyel robotlar konusunda, IFR (Uluslararası robot federasyonu)'nin yayınlamış olduğu 2015 -2016 yıllarına ait ve 2020 yılına kadar uzanan tahmin değerleri [37] aşağıdaki görsellerde sunulmuştur.

2.8.1. Dünya geneli robot kullanım adetleri

Dünya geneli robot kullanım adetleri Şekil 2.15 ve Şekil 2.16'da verilmiştir.



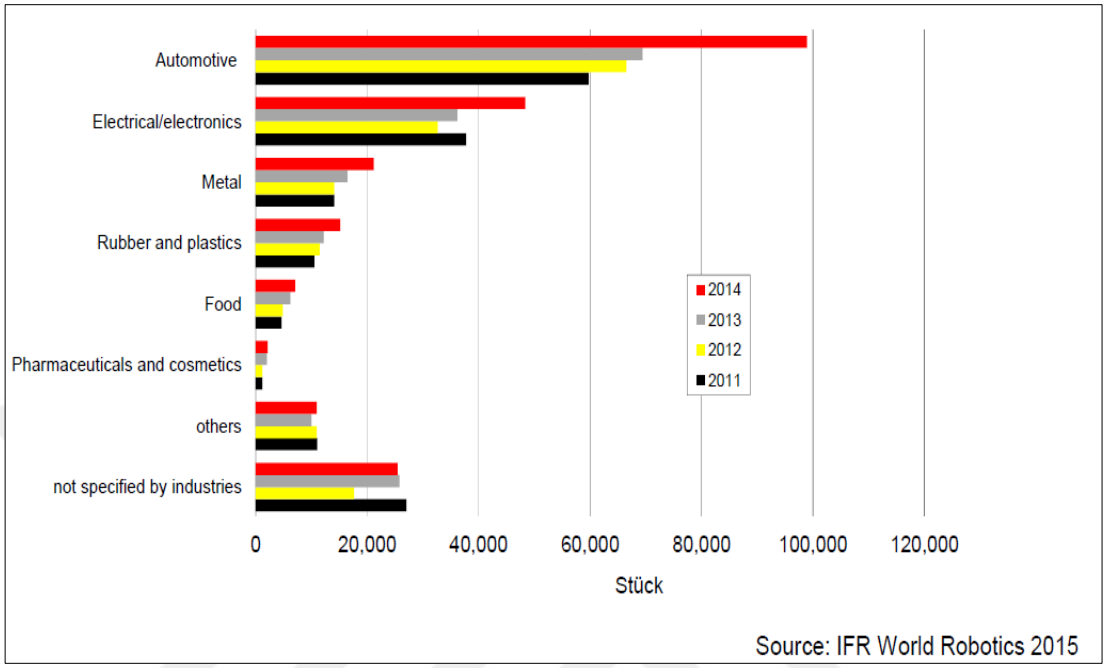
Şekil 2.15. Dünya geneli yıllık robot teslimat trendi



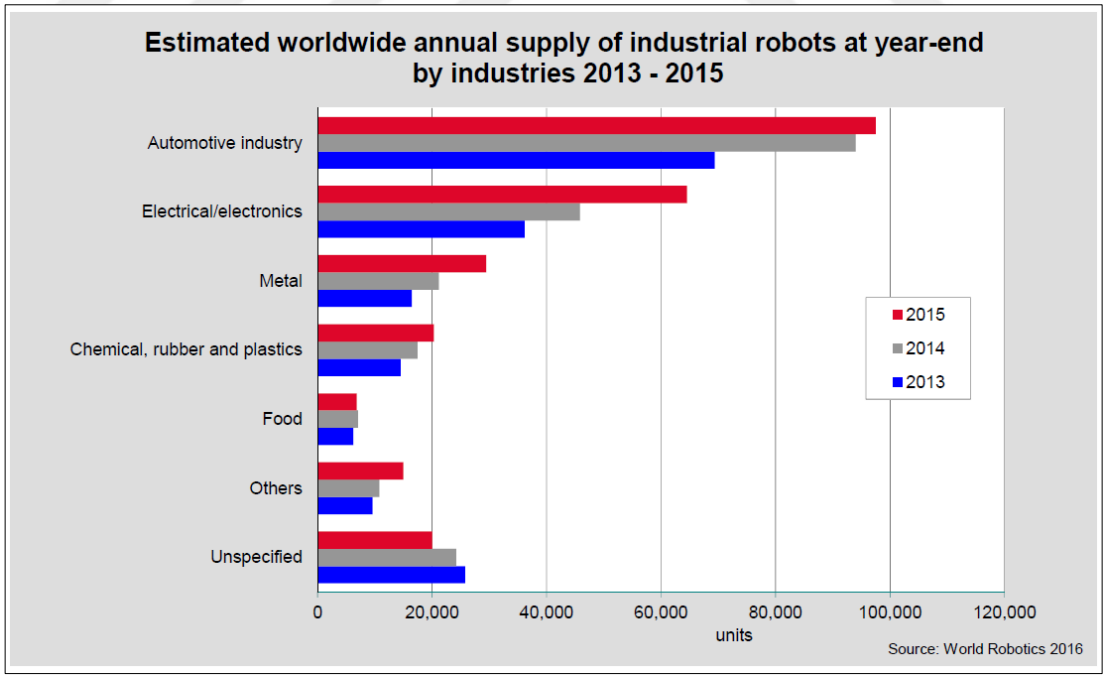
Şekil 2.16. Dünya geneli yıllık gerçekleşen robot teslimat trendi

2.8.2. Endüstrilere göre robot kullanım yoğunluğu

Endüstri bazlı robot kullanım adetleri Şekil 2.17 ve Şekil 2.18'de verilmiştir.



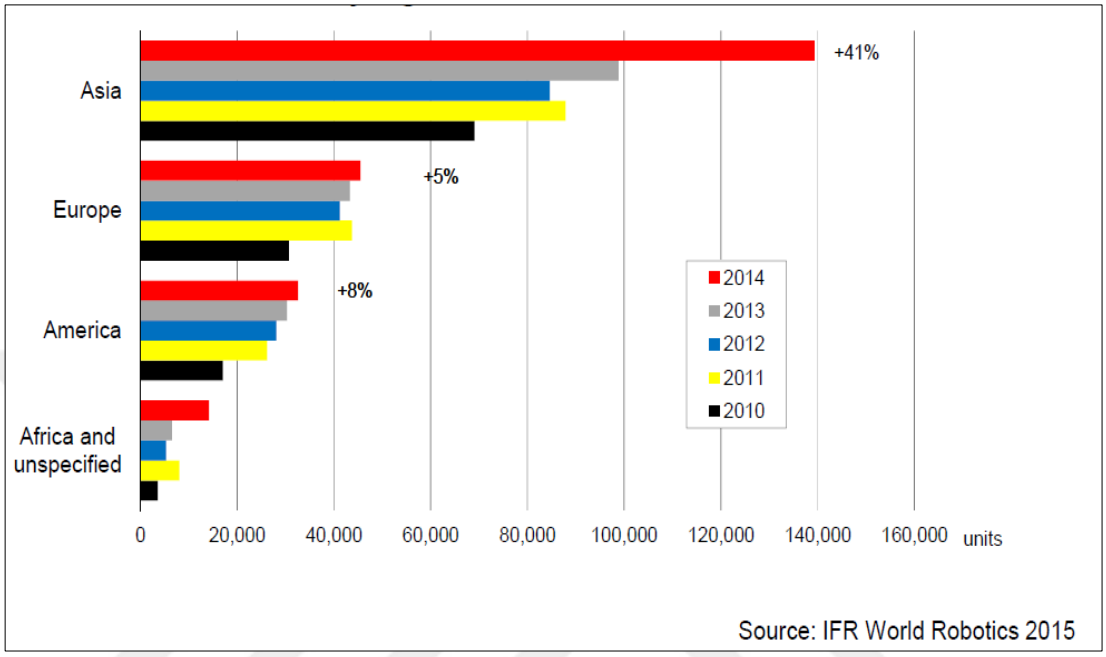
Şekil 2.17. Endüstri bazlı dünya geneli yıllık robot teslimat trendi



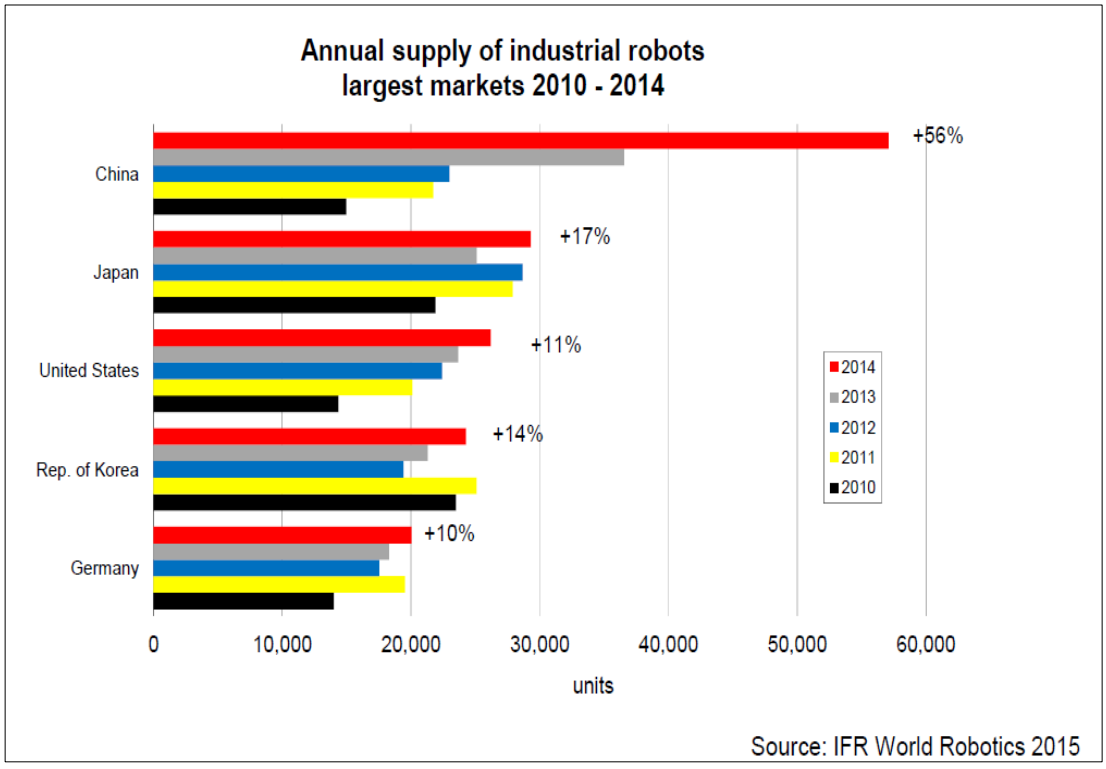
Şekil 2.18. Endüstri bazlı dünya geneli yıllık gerçekleşen robot teslimat trendi

2.8.3. Yakın gelecek kullanım trendleri

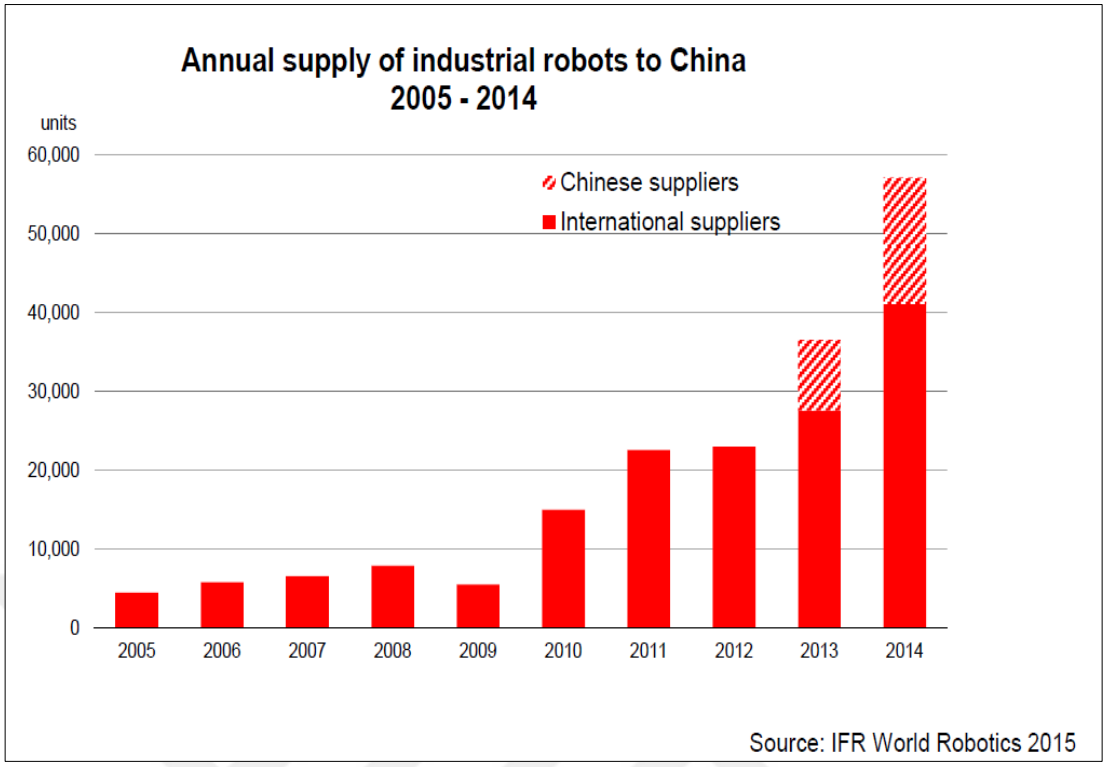
Yakın gelecek için robot kullanım adetleri Şekil 2.19 ‘dan Şekil 2.25’e kadar verilmiştir.



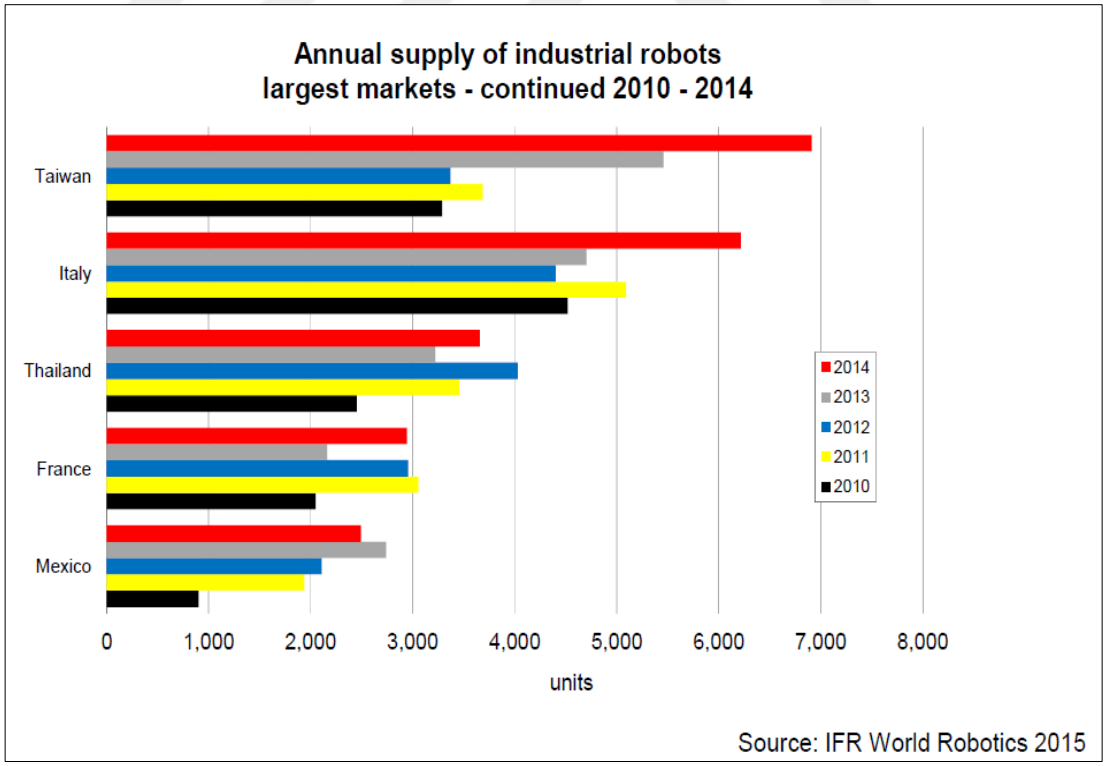
Şekil 2.19. Kıta bazlı dünya geneli yıllık robot teslimat trendi



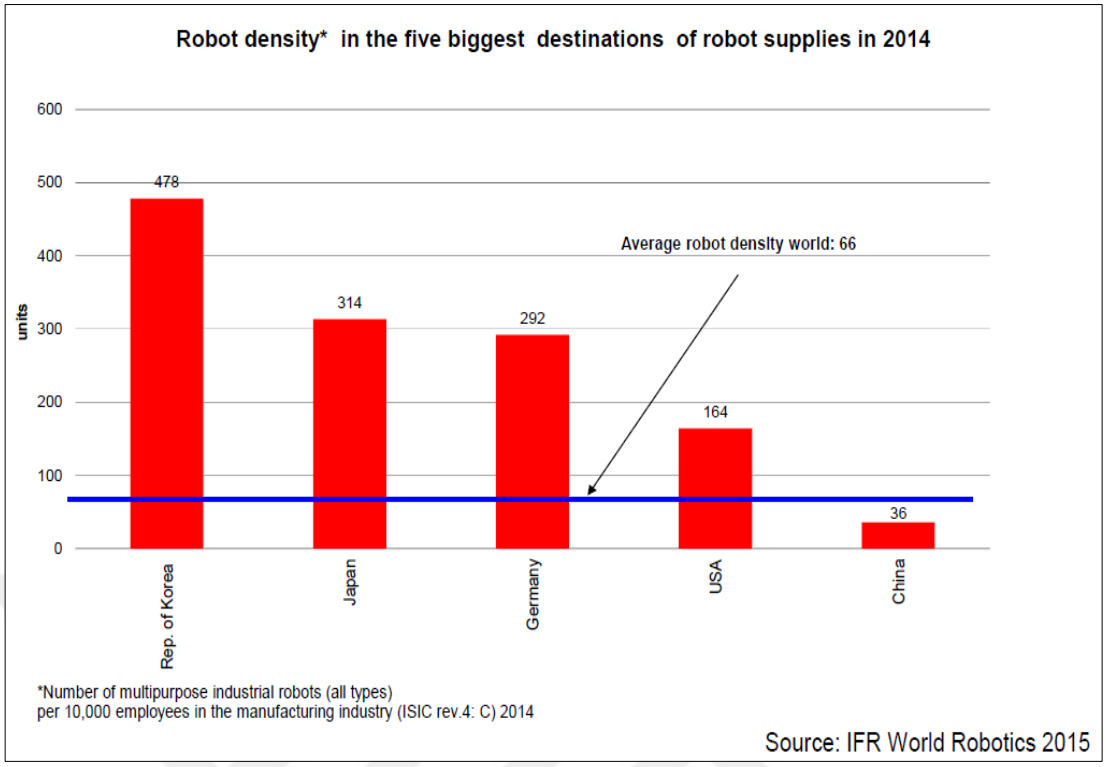
Şekil 2.20. Büyük ana pazarlara göre yıllık robot teslimat trendi



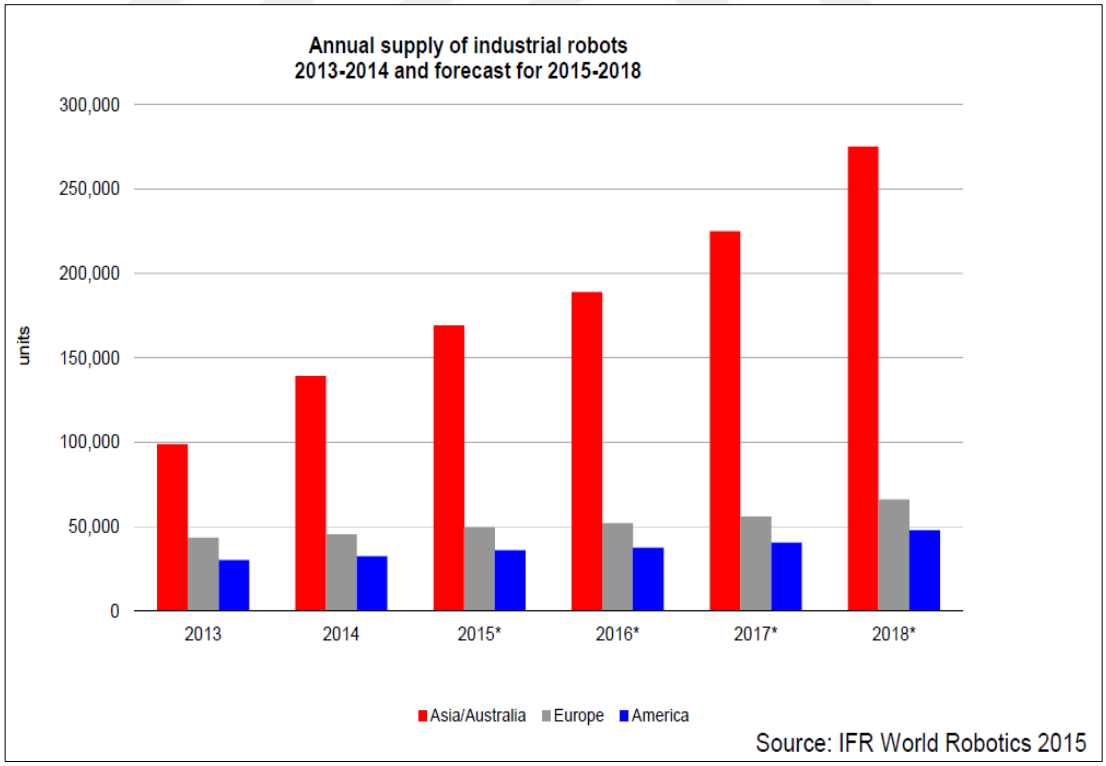
Şekil 2.21. Çin'e yapılan yıllık robot teslimat adet trendi



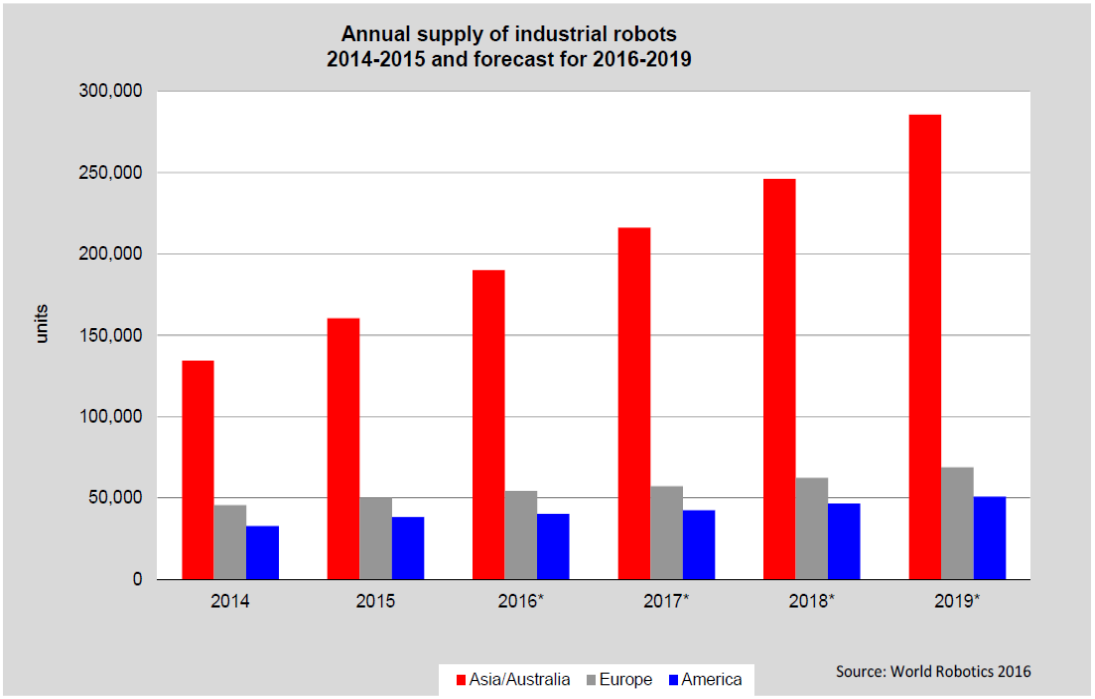
Şekil 2.22. Taiwan'a yapılan yıllık robot teslimat adet trendi



Şekil 2.23. Ana 5 lokasyondaki robot yoğunluğu



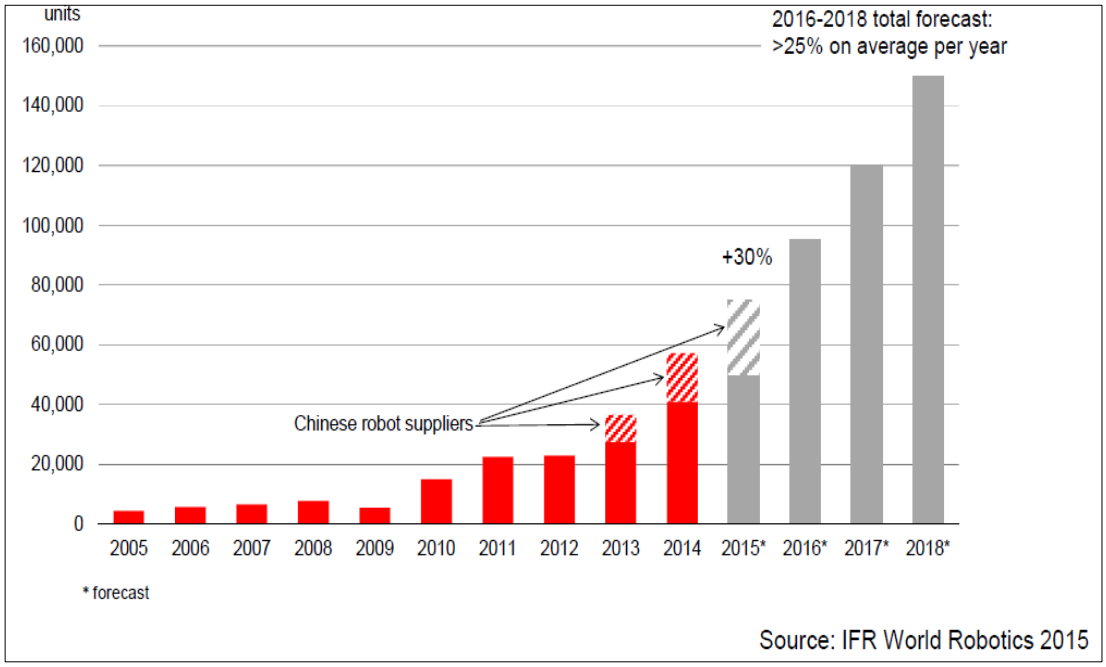
Şekil 2.24. Asya, Avrupa ve Amerika yıllık robot teslimat adet trendi



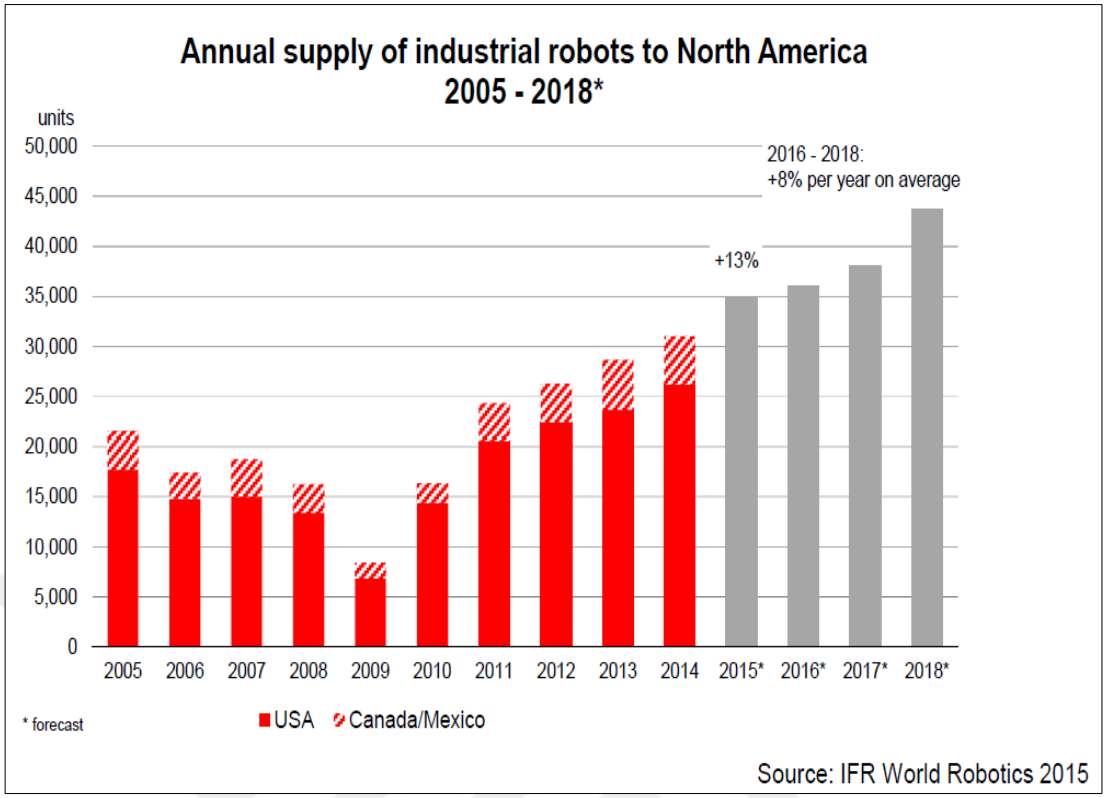
Şekil 2.25. Asya, Avrupa ve Amerika yıllık robot teslimat adet trendi

2.8.4. Yeni kullanım alanlarına göre trendler

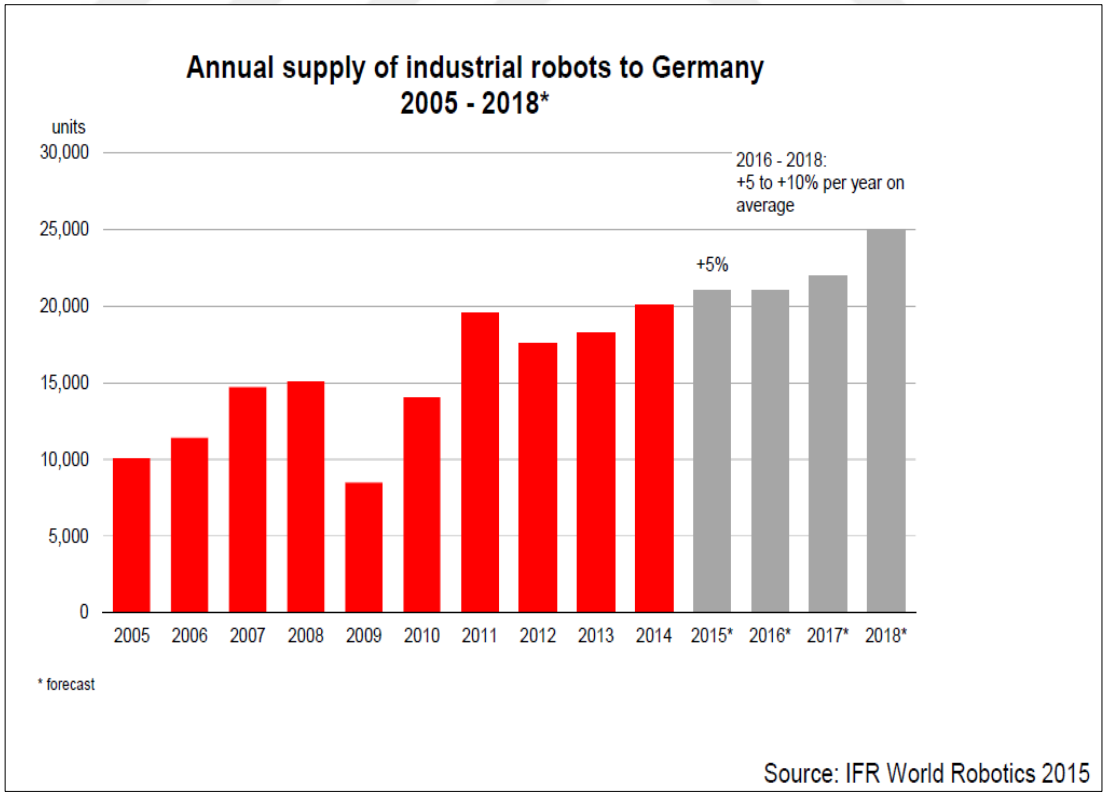
Yeni kullanım alanlarına göre robot kullanım adetleri Şekil 2.26'dan Şekil 2.29'a kadar verilmiştir.



Şekil 2.26. Çin pazarına yapılan yıllık robot teslimat adet trendi



Şekil 2.27. Kuzey Ameriaya yapılan yıllık robot teslimat adet trendi



Şekil 2.28. Almanya'ya yapılan yıllık robot teslimat adet trendi

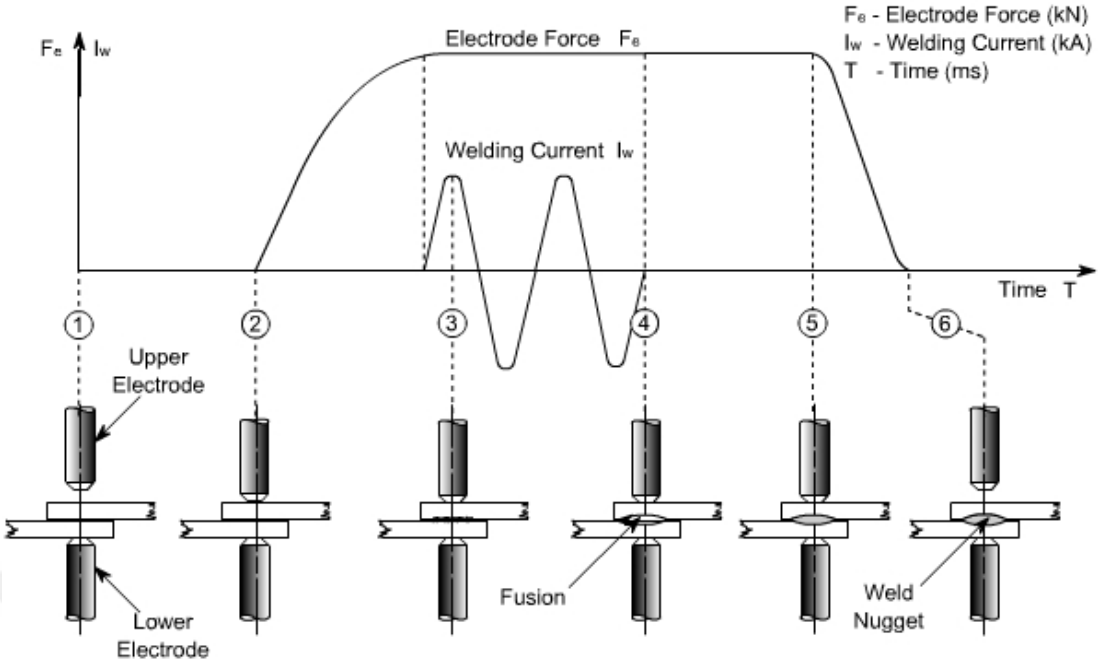
3. NOKTA DİRENÇ KAYNAK UYGULAMASI

Otomotiv sektöründe son dönemlerde özellikle güvenlik standartlarının gelişmesi ve araç hafifletme çalışmaları, araştırmacıları farklı malzemelere dolayısıyla farklı imalat yöntemlerine yöneltmiştir. Araç imalat süreçlerinin en önemli adımlarından biri olan gövde imalatında birleştirme yöntemleri sürekli olarak gelişmektedir. Araç imalatında yeni bir birleştirme yöntemi olmasa da hala en önemli birleştirme yöntemi elektrik direnç nokta kaynak (punta kaynağı) yöntemidir. Diğer kaynak yöntemlerine göre araç gövdesinin oluşturulmasında %85 oranında direnç nokta kaynağı kullanılır [38]. Punta kaynağının tarihçesi kısa, 1877 yılında Elihu Thomson tarafından bulunmuştur. 1898 yılında düşük karbonlu çeliklerde direnç nokta kaynak prosesi olarak uygulandı. 1960 yılında ilk kez otomotiv sektöründe galvanizli çelik malzemelerde direnç nokta kaynağı kullanılmaya başlanmıştır [39].

Punta kaynak işlemi temel olarak aşağıda belirtilen aşamalarda meydana gelir.

- 1. Faz: Kaynak makinasının çenelerinin kapanıp saca temas ettiği süre,
- 2. Faz: Çeneleri kapalı konuma gelen kaynak makinasının ayarlanan baskı kuvvetine ulaşmak için geçen süre,
- 3. Faz: Kaynak akımının kademeli ve rampalı olarak artarak hedef değere gelmesidir. Bu fazda kullanılan rampanın nedeni sacları yavaş yavaş ısıtarak (tavlayarak) saclar arasında meydana gelen boşluğun kapanmasını sağlamaktır.
- 4. Faz: Kaynak akımının verilerek kısmi olarak metal sacın eritilip sıvı hale geçişini kapsar.
- 5. Faz: Kaynak makinasının çenesi kapalı ve basınç altındayken erimiş metalin soğuyarak katı hale geçmesini kapsar.
- 6. Faz: Son faz ise kaynak işleminin sona ermesi ile beraber çenelerin açılıp bir sonraki kaynak için hazır konuma geçme evresidir [40].

Bu fazlarda meydana gelen işlemlerin tamamı Şekil 3.1'de [39] verilmiştir.



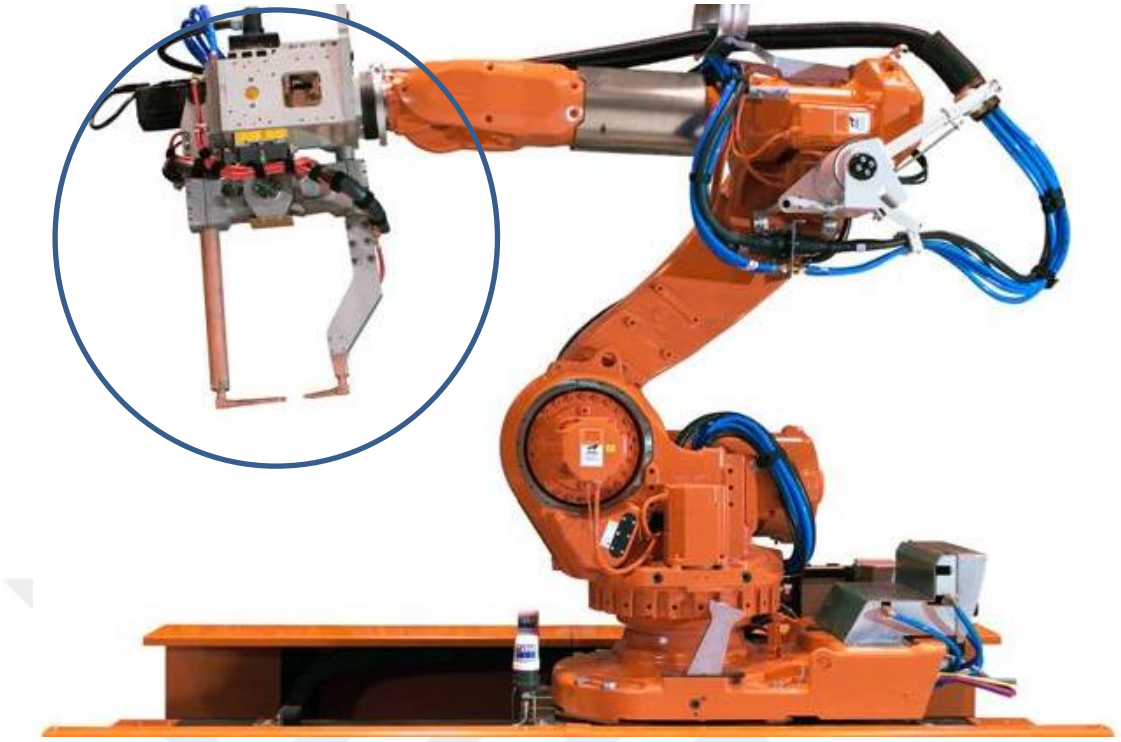
Şekil 3.1. Nokta direnç kaynağı işlem fazları

Şekil 3.2'de manuel olarak operatör yardımı ile nokta direnç kaynak işlemini gerçekleştiren bir kaynak makinası gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Manual nokta direnç kaynak makinası

Şekil 3.3'de otomatik olarak bir robot yardımı ile nokta direnç kaynak işlemini gerçekleştiren bir uygulama gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Robotik nokta direnç kaynak uygulaması

Nokta direnç kaynak işlemini gerçekleştirmek için gerekli olan örnek bir kaynak parametre verileri farklı malzeme sınıfları için Tablo 3.1, Tablo 3.2 ve Tablo 3.3'te verilmiştir.

Tablo 3.1. Sac Sınıfı: A-B (DIN 1623) için kaynak parametre tablosu

Sac Kalınlığı	Çekirdek Çapı	Elektrod			Elektrodun Uygulaması Gereken Kuvvet	Kaynak Zamanı	Kaynak Akımı
		elektrod çapı	kaynak çapı	kaynak radusu			
s (mm)	**d (mm)**	**D (mm)**	**d1 (mm)**	**R (mm)**	**F (kN)**	**t (döngü)**	**I (KA)**
0,50	3,50	10-16	5	50	1,50	5	8
0,75	4,50	12-16	5	50	2,30	8	9
1,00	5,00	12-16	6	75	3,00	10	10
1,25	5,50	16-20	6	75	3,80	13	11
1,50	6,00	16-20	7	75	4,50	15	12
2,00	7,00	16-20	7	75	6,00	20	13
2,50	8,00	20,00	8	75	7,50	25	15
3,00	8,50	20-25	9	100	9,00	30	17
4,00	10,00	20-25	10	-	12,00	40	20
5,00	11,00	25,00	11	-	15,00	50	23
6,00	12,50	25-30	13	-	18,00	60	25

Tablo 3.2. Sac Sınıfı: C (DIN 1623) için kaynak parametre tablosu

Sac Kalınlığı	Çekirdek Çapı	Elektrod			Elektrodun Uygulaması Gereken Kuvvet	Kaynak Zamanı	Kaynak Akımı
		elektrod çapı	kaynak çapı	kaynak radusu			
s (mm)	**Dı (mm)**	**D (mm)**	**d (mm)**	**R (mm)**	**F (kN)**	**t (döngü)**	**I (KA)**
0,50	3,50	10-16	5,00	50	0,50	10	5
0,75	4,50	12-16	5,00	50	0,75	15	6
1,00	5,00	12-16	6,00	75	1,00	20	7
1,25	5,50	16-20	6,00	75	1,25	25	7.5
1,50	6,00	16-20	7,00	75	1,50	30	8
2,00	7,00	16-20	7,00	75	2,00	40	9
2,50	8,00	20,00	8,00	75	2,50	50	10
3,00	8,50	20-25	9,00	100	3,00	60	11
4,00	10,00	20-25	10,00	-	4,00	80	12,5
5,00	11,00	25,00	11,00	-	5,00	100	14,5
6,00	12,50	25-30	13,00		6,00	120	16

Tablo 3.3. Sac Sınıfı: C (DIN 17441) için kaynak parametre tablosu

Sac Kalınlığı	Çekirdek Çapı	Elektrod			Elektrodun Uygulaması Gereken Kuvvet	Kaynak Zamanı	Kaynak Akımı
		elektrod çapı	Saç Kalınlığı	Çekirdek Çapı			
s (mm)	**Dı (mm)**	**D (mm)**	**d (mm)**	**R (mm)**	**F (kN)**	**t (döngü)**	**I (KA)**
0.50	3,50	16	4,00	50	1,80	2,5 - 4	6,0 - 7,5
0.75	4,50	16	4,50	75	3	3,0 - 6,0	6,8 - 8,5
1.00	5,00	20	5,00	75	4	4,0 - 7,0	7,5 - 9,0
1,25	5,50	20	5,50	75	5	5,0 - 8,0	8,3 - 10,5
1,50	6,00	20	6,00	75	6,5	5,0 - 10,0	9,0 - 12,5
2,00	7,00	20	7,00	100	9	5,5 - 13	10,5 - 15
2,50	8,00	25	8,00	100	12	6,0 - 16,0	12,0 - 18,0
3,00	8,80	25	8,50	100	15	6,5 - 19,0	13,5 - 20,0

4. ENDÜSTRİYEL ROBOTLARDA KİNEMATİK

Robot kinematik bilimi, mekanik ünitelerin bağlantı kolları ve uç işlevcisinin pozisyon, hız ve ivmelenmeleri arasındaki ilişkiyi ortaya koymaktadır. Bu mekanik üniteler farkı geometrik şekillere ve tasarımlara sahip olabilirler. Robot kinematiğinde temel olarak bağlantı kolları sabit bir gövde olarak elelanır ve kol eklem noktalarının dönme işlemini gerçekleştirdiği varsayılır [41-43]. Bu robot kollarının çalışma uzayındaki birbiri ile olan ilişkileri ve uç işlevcinin konum ve rotasyon bilgileri bulabilmek için robotun ileri ve ters kinematik modellerinin çıkarılması gerekir. İleri kinematik, robot bağlantı kollarında yer alan eksen açıklarını kullanarak robotun uç işlevcisinin çalışma uzayındaki konum ve oryantasyonunu hesaplarken, ters kinematik ise robotun uç işlevcisinin çalışma uzayındaki konum ve oryantasyon bilgilerini kullanarak robotun eksen açılarının bulunmasını sağlar [44-46].

Endüstriyel robotların kinematik modelleri ortaya konulurken genellikle 3 farklı metottan birisine başvurulur. Bu metotlar sırası ile iteratif yaklaşım, geometrik model ve analitik yöntemdir. İteratif yöntemde robot uç işlevcisini (TCP: Tool Center Point) istenilen noktaya götürmek için her bir eksen açısı için tahminleme yöntemi kullanılır. Ancak bu işlem oldukça zaman alıcıdır. Geometrik model ise robot mekaniği temel olarak geometrik olarak analiz edilir ve temel geometri bileşenleri kullanılarak robot modellenir. Bu yöntemde ortaya konulan model sadece ilgili mekanik kol için geçerli olup kol yapısı değiştiğinde model yeniden kurulması gerekir. Analitik model ise robot mekanik yapısından bağımsız olarak kinematik denklemler oluşturulabilmktedir. Bu sayede robot mekanik kol bilgilerine değişkenler atanarak dinamik olarak istenilen robot kol ölçüsü için kinematik çözümleri sağlanmaktadır.

Analitik metotta, robot ileri ve ters kinematik modelleleri yapılırken genelde Üstel yöntem, Pieper-Roth yöntemi, Denativ-Hartenberg (D-H) ve Qaternion cebiri yöntemlerinden yararlanılır. D-H yönteminde en büyük problem işlemlerin matrissel olarak yapılmasıdır. Bu modelde, gerek matris çarpımları gerekse de diğer matematiksel işlemler çok fazla zaman aldığından çözüm süresi uzundur. Başta çözüm süresini düşürmek ve daha az işlem ile sonuca ulaşmak için quaternion yönteminde

başvurulmaktadır. Quaternion modeli sayesinde robotun ileri ve ters kinematik denklemlerini çıkarmak oldukça kolay ve çözüm süreleri daha kısadır. Quaternion, 1843 yılında ilk kez İrlandalı matematikçi William Rowan Hamilton tanımla ise karmaşık sayıların genişletilmesi ile bulunmuşlardır. Bir quaternion, üç boyutlu uzayda dönüşü 4 elemanlı bir vektör olarak tanımlanması sağlar [42, 47-48].

4.1. Endüstriyel Robotlarda İleri Kinematik

Quaternion ise karmaşık sayıların genişletilmesi ile bulunmuşlardır [49] ve dört boyutlu bir uzay ile tanımlanabilirler.

Bir quaternion (q) aşağıdaki şekilde ifade edilebilir;

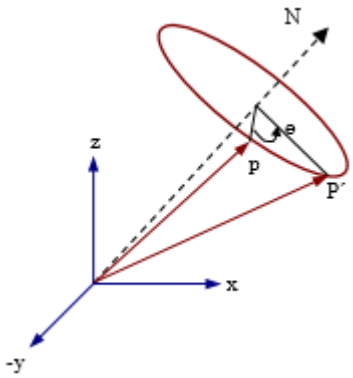
$$q = w + xi + yj + zk \tag{4.1}$$

Denklemdeki w, x, y ve z gerçek sayılar olup i, j ve k ise $i^2 = j^2 = k^2 = -1$ eşitliğine sahiptir. Bir quaternion gerçek sayılarla ifade edilebildiği gibi bir vektör olarakda Denklem (4.2)'de görüleceği şekilde de yazılabilir:

$$q = [\mathrm{w}, \vec{\mathrm{v}}] \tag{4.2}$$

Denklemdeki w yine bir gerçek 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 diğerine 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 kilitlenme 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 aksının θ derece döndürülmesi ile elde edilen $P^{'}$ noktasının taban eksene göre konum ve rotasyonu Denklem (4.3)'de bulunabilir.

$q=(q_1,\ \vec{q}_V)$ ve $\vec{q}_v = i\vec{q}_2 + j\vec{q}_3 + k\vec{q}_4$ olmak üzere;

$$\boldsymbol{P^{'} = R_q(P) = qPq^{-1} =}$$
$$\boldsymbol{(q^2{}_1 - \vec{q}_v \cdot \vec{P})\vec{P} + 2q_1(\vec{q}_v \otimes \vec{P}) + 2\vec{q}(\vec{q}_v \cdot \vec{P})} \tag{4.3}$$

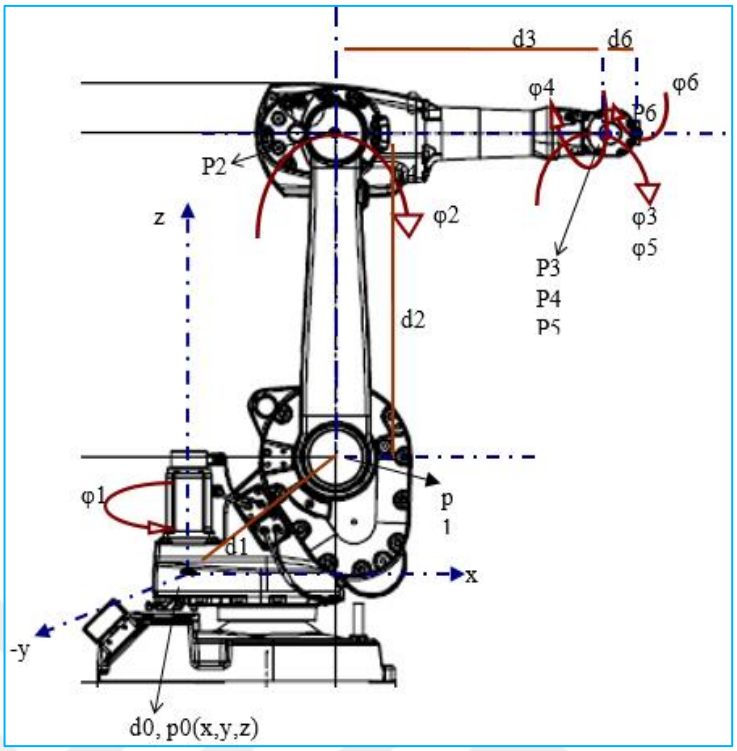
Denklem (4.3)'deki $P^{'}$ noktasının çalışma uzayındaki koordinatları;

$$P^{'}{}_x = q_1 \cdot q_1 \cdot p_x + 2 \cdot q_3 \cdot q_1 \cdot p_z - 2 \cdot q_4 \cdot q_1 \cdot p_y + q_2 \cdot q_2 \cdot p_x + 2 \cdot q_3 \cdot q_2 \cdot p_y + 2 \cdot q_4 \cdot q_2 \cdot p_z - q_4 \cdot q_4 \cdot p_x - qh_2 \cdot q_2 \cdot p_x \tag{4.4}$$

$$P^{'}{}_y = 2 \cdot q_2 \cdot q_3 \cdot p_x + q_3 \cdot q_3 \cdot p_y + 2 \cdot q_4 \cdot q_3 \cdot p_z + 2 \cdot q_1 \cdot q_4 \cdot p_x - q_4 \cdot q_4 \cdot p_y + q_1 \cdot q_1 \cdot p_y - 2 \cdot q_2 \cdot q_1 \cdot p_z - q_2 \cdot q_2 \cdot p_y \tag{4.5}$$

$$P^{'}{}_z = 2 \cdot q_2 \cdot q_4 \cdot p_x + 2 \cdot q_3 \cdot q_4 \cdot p_y + q_4 \cdot q_4 \cdot p_z - 2 \cdot q_1 \cdot q_3 \cdot p_x - q_3 \cdot q_3 \cdot p_z + 2 \cdot q_1 \cdot q_2 \cdot p_y - q_2 \cdot q_2 \cdot p_z + q_1 \cdot q_1 \cdot p_z \tag{4.6}$$

yazılabilir. Aşağıda Şekil 4.2'de gösterilen Altı serbestlik derecesine sahip ABB IRB1600 7/1.45 endüstriyel robot modeli [50] için aks bazında ileri kinematik fonksiyonu quaternionlar kullanılarak Denklem (4.7) ifade edilmiştir.



Şekil 4.2. Altı serbestlik derecesine sahip ABB IRB1600 robot modeli

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

$$f\ (d_{link}, Q\ , d_{ofset}) = \ q \cdot \vec{d}_{link} \cdot q^{*} + \vec{d}_{ofset} \tag{4.7}$$

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;

$$P = \ [\ x, y, z\ ]\ [\ q1, q2, q3, q4\ ] \tag{4.8}$$

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.

$$\left[\ \varphi\ ,\ \vec{N}\ \right] \tag{4.9}$$

Denklem (4.9)'da 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=[q1,q2,q3,q4] eleman değerleri açı-eksenden fonksiyon elemanlarından elde edilir;

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

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

$$q' = q1xq2 = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q1_1 & -q1_2 & -q1_3 & -q1_4 \\ q1_2 & q1_1 & -q1_4 & -q1_3 \\ q1_3 & q1_4 & q1_1 & -q1_2 \\ q1_4 & -q1_3 & q1_2 & q1_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q2_1 \\ q2_2 \\ q2_3 \\ q2_4 \end{bmatrix} \tag{4.11}$$

Çarpımın sonucu;

$$\begin{aligned} q'_1 &= q1_1 \cdot q2_1 - q1_2 \cdot q2_2 - q1_3 \cdot q2_3 - q1_4 \cdot q2_4 \\ q'_2 &= q1_1 \cdot q2_2 + q1_2 \cdot q2_1 + q1_3 \cdot q2_4 - q1_4 \cdot q2_3 \\ q'_3 &= q1_1 \cdot q2_3 - q1_2 \cdot q2_4 + q1_3 \cdot q2_1 + q1_4 \cdot q2_2 \\ q'_4 &= q1_1 \cdot q2_4 + q1_2 \cdot q2_3 - q1_3 \cdot q2_2 + q1_4 \cdot q2_1 \end{aligned} \tag{4.12}$$

n tane aks'tan oluşan bir robot için çalışma uzayındaki konum ve rotasyonu Denklem (4.13) ile ifade edilebilir.

$$\begin{aligned} &P_{n\,(x,y,z)} = \\ &(Q_n \cdot Q_{n-1\ldots0}) \cdot D_n \cdot (Q_n \cdot Q_{n-1\ldots0})^* + P_{n-1(x,y,z)} \end{aligned} \tag{4.13}$$

Denklem (4.10)'da 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, Denklem (4.9 ve 4.10) 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, Denklem (4.12)'ye göre;

$$Q_{12} = Q_1 \cdot Q_2 = \begin{bmatrix} Cos(\theta_1) \cdot Cos(\theta_2) \\ Cos(\theta_1) \cdot Sin(\theta_2) \\ Sin(\theta_1) \cdot Sin(\theta_2) \\ Sin(\theta_1) \cdot Cos(\theta_2) \end{bmatrix} \tag{4.14}$$

$$Q_{123} = Q_1 \cdot Q_2 \cdot Q_3 = \begin{bmatrix} Cos(\theta_1) \cdot Cos(\theta_2 + \theta_3) \\ Cos(\theta_1) \cdot Sin(\theta_2 + \theta_3) \\ Sin(\theta_1) \cdot Sin(\theta_2 + \theta_3) \\ Sin(\theta_1) \cdot Cos(\theta_2 + \theta_3) \end{bmatrix} \tag{4.15}$$

olmak üzere; 1.eksen için konum bilgisi;

$$\begin{aligned} {}^0P_1 &= Q_1 \cdot D_1 \cdot Q_1^* + P_0 \\ &= \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Cos(\theta_1)d_{1x} - Sin(\theta_1)d_{1y} \\ Sin(\theta_1)d_{1x} + Cos(\theta_1)d_{1y} \\ d_{1z} \end{bmatrix} + P_0 \end{aligned} \tag{4.16}$$

2.eksen için konum bilgisi;

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

3.eksen için konum bilgisi;

$$
{}^{0}P_3 = Q_{123}\cdot D_1\cdot {Q_{123}}^{*} + {}^{0}P_2 =
$$

$$
\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Cos(\theta_1)(d_{1x}+d_{2x}+d_{3x}) - Sin(\theta_1)(d_{1y}+Cos(\theta_2)d_{2y}+.... \\ Cos(\theta_1)(d_{1x}+d_{2x}+d_{3x}) + Sin(\theta_1)(d_{1y}+Cos(\theta_2)d_{2y}+... \\ d_{1z} + Sin(\theta_2)d_{2y} + Sin(\theta_{2+3})d_{3y} + Cos(\theta_2)d_{2z} + ... \end{bmatrix} ...
$$

$$
\begin{bmatrix} ...+Cos(\theta_{2+3})d_{3y} - Sin(\theta_2)d_{2z} - Sin(\theta_{2+3})d_{3z} \\ ...+Cos(\theta_{2+3})d_{3y} - Sin(\theta_2)d_{2z} - Sin(\theta_{2+3})d_{3z} \\ ...+Cos(\theta_{2+3})d_{3z} \end{bmatrix} + {}^{0}P_2 \tag{4.18}
$$

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.

$$
Q_4 = \begin{bmatrix} Cos(\theta_4) \\ Sin(\theta_4) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},\ D_4 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},\ Q_5 = \begin{bmatrix} Cos(\theta_5) \\ 0 \\ Sin(\theta_5) \\ 0 \end{bmatrix},\ D_5 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},\ Q_6 = \begin{bmatrix} Cos(\theta_6) \\ Sin(\theta_6) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},\ D_6 = \begin{bmatrix} d_{6x} \\ d_{6y} \\ d_{6z} \end{bmatrix}
$$

şeklinde yazılabilir.

Sadece bilekteki 4, 5 ve 6. eksenlerin konum bilgileri hesaplanırken kullanılacak olan quaternion çarpımları Denklem (4.12)'ye göre;

$$
Q_{45} = Q_4\cdot Q_5 = \begin{bmatrix} Cos(\theta_4)\cdot Cos(\theta_5) \\ Sin(\theta_4)\cdot Cos(\theta_5) \\ Cos(\theta_4)\cdot Sin(\theta_5) \\ Sin(\theta_4)\cdot Sin(\theta_5) \end{bmatrix} \tag{4.19}
$$

$$Q_{456} = Q_4 \cdot Q_5 \cdot Q_6 = \begin{bmatrix} Cos(\theta_5) \cdot Cos(\theta_4 + \theta_6) \\ Cos(\theta_5) \cdot Sin(\theta_4 + \theta_6) \\ Sin(\theta_5) \cdot Sin(\theta_4 - \theta_6) \\ Sin(\theta_5) \cdot Cos(\theta_4 - \theta_6) \end{bmatrix} \tag{4.20}$$

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

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

5.eksenin 3. eksene göre konumu için;

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

6.eksenin 3. eksene göre konumu için;

$$\begin{aligned} &{}^3P_6 = Q_{456} \cdot D_6 \cdot Q_{456}^{*} + {}^3P_5 = \\ &\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Cos(\theta_4)(Cos(\theta_6)d_{6x} - Sin(\theta_6)d_{6y}) - Sin(\theta_4)(Cos(\theta_5)Sin(\theta_6)d_{6x} + ...) \\ Sin(\theta_4)(Cos(\theta_6)d_{6x} - Sin(\theta_6)d_{6y}) + Cos(\theta_4)(Cos(\theta_5)Sin(\theta_6)d_{6x} + ...) \\ Sin(\theta_5)Sin(\theta_6)d_{6x} + Sin(\theta_5)Cos(\theta_6)d_{6y} + ... \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} ... + Cos(\theta_6)Cos(\theta_6)d_{6y} - Sin(\theta_5)d_{6z}) \\ ... + Cos(\theta_6)Cos(\theta_6)d_{6y} - Sin(\theta_5)d_{6z}) \\ ... + Cos(\theta_5)d_{6z} \end{bmatrix} + {}^3P_5 \tag{4.23}$$

denklemeler yazılabilir. 6.eksenin taban eksen göre konumu,

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

denklemi ile elde edilir.

4.2. Endüstriyel Robotlarda 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 $U = ({}^{0}P_{6}, Q_{123456})$ şeklinde verilmişse ters kinematik için aşağıdaki denklemler yazılabilir. Robotun P_3, P_4 ve P_5 noktalarının konumları eşit olduğundan P_3 için aşağıdaki denklem yazılabilir.

$$ {}^{0}P_3 = {}^{0}P_4 = {}^{0}P5 = P_{6(x,y,z)} - (Q_d^{*} \cdot Q_{123456}) \cdot D_n \cdot (Q_d^{*} \cdot Q_{123456})^{*} \tag{4.25} $$

Denklem (4.10)'da yer alan Q_d ileri yön kinematiğinde TCP'yi robotun base ile aynı koordinat sistemine çevirmek için kullanılan sabit bir quaterniondur. 1. eksen açısı θ_1 için;

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

1.eksen açısı θ_1 denklemi iki farklı Kök'e sahiptir.

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

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

2.eksen açısı θ_2 hesaplamak için önce 3.eksen açısı olan θ_3'ü hesaplamak gerekir. θ_3 için;

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

$$m_2 = \left(P_{3z} - d_{1z}\right) \tag{4.30}$$

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

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

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

$$a = m_3 + m_5 \tag{4.34}$$

$$b = -2 \cdot m_4 \tag{4.35}$$

$$c = m_5 - m_3 \tag{4.36}$$

olmak üzere θ_3 aşağıdaki denklemde belirtildiği gibi tanımlanabilir.

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

3.eksen açısı θ_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.

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

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

$$\theta_{3_3} = \theta_{3_1} + 180 \tag{4.41}$$

$$\theta_{3_4} = \theta_{3_2} + 180 \tag{4.42}$$

2.eksen açısı θ_2 için;

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

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

$$n_3 = \left(P_{3z} - d_{1z}\right) \tag{4.45}$$

$$a_2 = n_2 + n_3 \tag{4.46}$$

$$b_2 = 2 \cdot n_1 \tag{4.47}$$

$$c_2 = n_3 - n_2 \tag{4.48}$$

olmak üzere θ_2 aşağıdaki denklemde belirtildiği gibi tanımlanabilir.

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

2.eksen açısı θ_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 θ_2 toplam 8 farklı çözüme sahiptir.

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

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

$$\theta_{2_3} = \theta_{2_1} + 180 \tag{4.52}$$

$$\theta_{2_4} = \theta_{2_2} + 180 \tag{4.53}$$

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

$$\boldsymbol{Q}_T = \boldsymbol{Q}_{123456} \cdot \boldsymbol{Q}_{123}^{-1} \tag{4.54}$$

$$Q_T = [q_{t1}, q_{t2}, q_{t3}, q_{t4}] \tag{4.55}$$

şeklinde yazılabilir.

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

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

olmak üzere, 4.eksen açısı θ_4;

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

$$\theta_{4_2} = \theta_{4_1} + 180 \tag{4.59}$$

5.eksen açısı θ_5;

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

$$\theta_{5_2} = -\theta_{5_1} \tag{4.61}$$

6.eksen açısı θ_6;

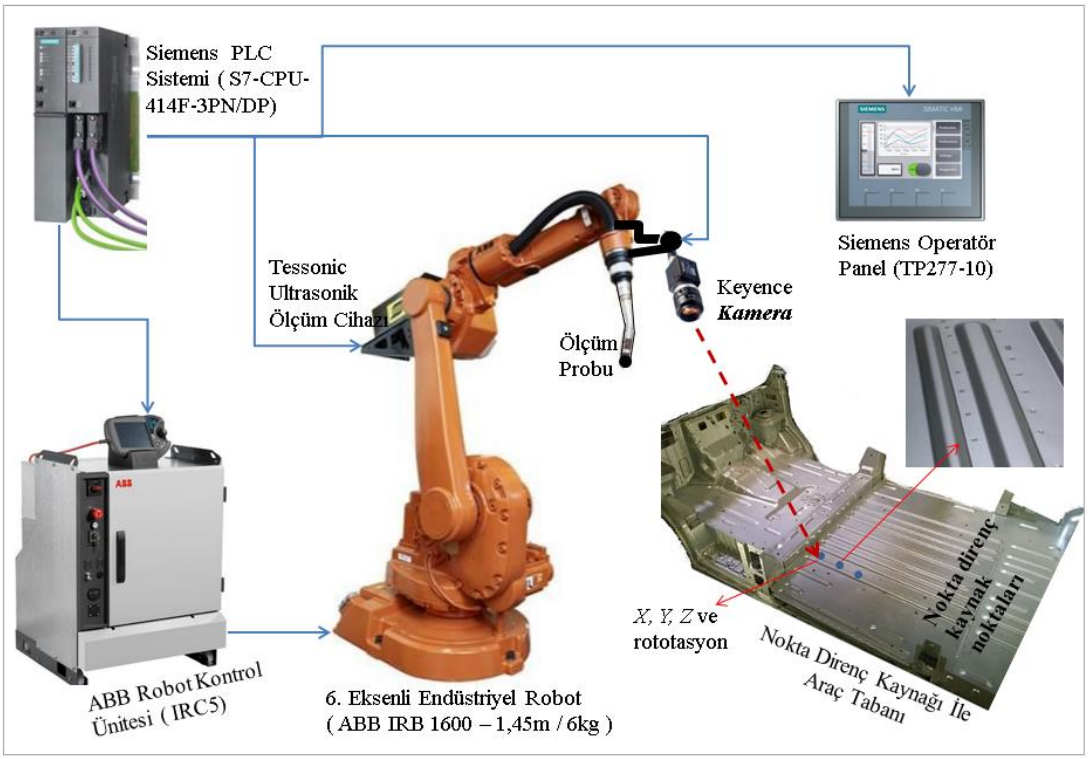
$$\theta_{6_1} = \left(a_3 - b_3\right) \tag{4.61}$$

$$\theta_{6_2} = \theta_{4_1} + 180 \tag{4.62}$$

5. NOKTA DİREÇ KAYNAĞI ROBOTİK TAHRİBATSIZ MUAYANESİ

Bu tez çalışması kapsamında, nokta direnç kaynağının robotik tahribatsız muayenesi için şekil.5.1'de verilen bir konsept tasarlanmış ve bu konseptin uygulamasını gerçekleştirmek 3.bölümdeki "Nokta Direnç Kaynağı" ve 4.bölümdeki "Robot Kinematik" bilgileri ile beraber;

- Konsept simülasyonu için C++ yazılım dilinde ve FOK Toolkit tabanlı bir offline endüstriyel robot eğitim platformunun (IRT) oluşturulması,
- Nokta direnç puntasının konum tespiti için kamera, kamera kalibrasyonu ve koordinat dönüşümü konularının IRT platformuna adaptasyonu,
- Platform sayesinde elde edilen model ile endüstriyel ortamda ve gerçek şartlarda test işlemlerinin yapılması,
- Elde edilen test sonuçlarının değerlendirilesi ve gerçek zamanlı olarak üretim sisteminde entegre edilmesi konuları sistematik olarak aşağıda verilmiştir.



Şekil 5.1. Robotik nokta direnç kaynağı tahribatsız muayene konsepti

Şekil 5.1'de yer alan konsept uygulamada kullanılacak endüstriyel komponentlerin marka, model ve özellikleri aşağıda tablo5.1'de verilmiştir. Bu malzeme seçimleri yapılırken sistem gereksinimleri ve endüstriyel güvenilirlikleri dikakte alınarak tercih edilmiştir.

Tablo 5.1. Robotik nokta direnç kaynağı tahribatsız muayene ekipmanları

Ekipman	Marka	Model	Adet
Endüstriyel Robot	ABB	IRB1600 – 7/1.45	1
PLC Sistemi	Siemens	S7-CPU414F-3PN/DP	1
Ultrasonik ölçüm cihazı	Tessonics	RSWA-F1	1
Kamera*	Point Grey Research	Bumblebee2 BB2 08S2C (Sn: 11051707)	1
Kamera**	Keyence	CV-X150*	1
Field PG	Siemens	M4 Serisi	1
Fixtür Tezgâhı	Ford Otosan	Underbody 8Y55	1
Operatör Panel	Siemens	MP277 10inch	1

Platformda kullanılan kameralardan Keyence marka, saha uygulaması için tercih edilmiş ve Point Grey ise laboratuvar aşamasında sistemi geliştirmek için kullanılmıştır. Bu kameralara ait özellikler şekil 5.2'de verilmiştir.

Controller model*1*2	CV-X170	CV-X150
Number of pixels	With CV-H500C/H500M connected • 5,000,000-pixel mode: 2432 (H) X 2050 (V), approx. 4.99 megapixel With CV-200C/S200C/H200C/200M/S200M/H200M connected • 2,000,000-pixel mode: 1600 (H) X 1200 (V), 1.92 megapixel • 1,000,000-pixel mode: 1024 (H) X 960 (V), approx. 980,000 pixels With CV-H100C/H100M connected • 1,000,000-pixel mode: 1000 (H) X 1000 (V), 1 megapixel With CV-035C/S035C/035M/S035M/H035C/H035M connected • 310,000-pixel mode: 640 (H) X 480 (V), approx. 310,000 pixels • 240,000-pixel mode: 512 (H) X 480 (V), approx. 240,000 pixels	With CV-200C/S200C/H200C/200M/S200M/H200M connected • 2,000,000-pixel mode: 1600 (H) X 1200 (V), 1.92 megapixel • 1,000,000-pixel mode: 1024 (H) X 960 (V), approx. 980,000 pixels With CV-H100C/H100M connected • 1,000,000-pixel mode: 1000 (H) X 1000 (V), 1.00 megapixel With CV-035C/S035C/035M/S035M/H035C/H035M connected • 310,000-pixel mode: 640 (H) X 480 (V), approx. 310,000 pixels • 240,000-pixel mode: 512 (H) X 480 (V), approx. 240,000 pixels
Camera input	2 Colour/monochrome cameras (Supports CV-H500C/200C/S200C/H200C/H100C/035C/S035C/H035C/H500M/200M/S200M/H200M/H100M/035M/S035M/H035M, mixed connection possible)	2 Colour/monochrome cameras (Supports CV-200C/S200C/H200C/H100C/035C/S035C/H035C/200M/S200M/H200M/H100M/035M/S035M/H035M, mixed connection possible)
Number of connected units	Supports 2 camera expansion and simultaneous capture with up to 4 cameras via connection with the CV-E500 expansion unit	

Keyenece Kamera**

Point Grey Kamera*

```
Serial number_____ 11051707
Camera model_____ Bumblebee2 BB2-08S2C
Camera vendor_____ Point Grey Research
Sensor_____ 1024x768
Resolution_____ 1024x768
Firmware version_____ 0.9.1.44
Firmware build time_____ Sat Aug 14 01:00:13 2010
DCAM compliance_____ 1.31
Bus position_____ 200 65472
Triclops Version_____ Triclops Stereo Vision SDK 3.4 Alpha 2
**********
Max image pixels_____ 1024 - 768
Image Unit size_____ 1024 - 768
Offset Unit size_____ 1024 - 768
Pixel format bitfield_____ 2097152
**********
BASE LINE_____ 12.0047
FOCAL LENGTH_____ 1291.47
CENTER ROW_____ 386.942
CENTER COL_____ 534.692
RESOLUTION_____ 768 1024
Configuration_____ 2 Camera horizontal
```

Şekil 5.2. Keyence ve Point Grey kamera spekleri

5.1. Yazılım Platformu Tasarımı (IRT)

Mühendislik uygulamalarında gerçek düzenekler üzerinde iş yapmadan önce bazı hesaplamaların, denemelerin yapılması için benzetim ve modelleme programlarının kullanılması gerekmektedir. Bu yazılımlar sayesinde pratik koşullarda deneme imkânı olmayan koşullar test edilebilir, farklı bakış açıları geliştirilebilir. Ancak denemeler ile tecrübe edildikten sonra olgun bir sistem oluşturabilir. Yalnız uygulamaların olgunlaştırılması sağlanılmakla kalmaz aynı zamanda mühendisler de bu denemeler sonucunda yeni bilgi, tecrübe kazanımları sağlarlar. Dolayısı ile bu tür modelleme, benzetim yazılımları aynı zamanda mühendisler için saha tecrübesini, ofis/dershane/ev ortamında kazanabilecekleri bir eğitim platformu olarak değerlendirilebilir. Tecrübeli, pratik ve teorik ön bilgiye sahip kişiler için yazılımların yalnız nihai sonuç vermesi yeterlidir. Oysa mesleğin başlangıcında olan kişiler, öğrenciler ilk adımı atmakta zorlanmaktadırlar.

Mühendislik, sosyal veya tıbbi bilimlerin aksine teorik bilgilerin direk uygulamaya konulabileceği bir alandır. Ancak matematiksel hesaplamaların, parametrelerin ve bunların değişimlerinin etkilerini zihinde canlandırmak, hafızada tutmak güçtür. Bu sebeple hesaplamaların grafikler üzerinde gösterilmesi gerekir. Bilgisayar ortamında statik grafikler yerine animasyonlu canlandırmalar konuların daha etkili anlaşılmasını sağlarlar. Bilgisayar grafiklerinin kullanılması ile soyut kavramların canlandırılmasında önemlidir. Ama buna ilave olarak nasıl bir adresin sözle tarifi yerine krokisinin çizilmesi adrese ulaşmayı kolaylaştırıyorsa benzer şekilde net fiziksel ifadelerin de bilgisayar ekranlarında görselleştirilmesi kavramayı kuvvetlendirir.

Gerçekçi modeller ile görselliği arttırılmış etkileşimli yazılımların özelikle robot kinematiği konusunun kavranılmasını kolaylaştırdığı [51]'de işlenmiştir. Sundukları yazılım ile katılımcıların kendi manipülatör tasarımlarını oluşturmalarına imkân vermişlerdir. Denavit-Hartenberg notasyonu klasik eğitimde tahta önünde anlatılması en sıkıntılı konulardan biridir. Düzlemdeki çizimleri öğrencilerin zihinlerinde birleştirerek 3 boyutlu canlandırmalarını beklemek büyük haksızlıktır. [51]'de sunulan grafikler arasında yer alan, görsel materyal destekli eğitim sonucunda sorulara cevap verme oranlarının %10'lara varan seviyede artmış olması bilgisi, özenli bir tasarımla

görsel etkileşimli eğitim yazılımlarının değerini bir kere daha vurgulamıştır. Ancak bu yazıda sunulan arayüz robotik dalında özel bir konunun incelenmesi için geliştirilmiştir. Elde böyle güzel bir program varken küçük bir çaba ile ilave pencereler üzerinden geliştirilen aracın destekleyebileceği konular arttırılabilirdi. Robotik konusunda uzmanlaşmış olmak için bilinmesi gerekenleri tek bir kurs altında toplamak imkânsızdır. Matematik, mekanik, kontrol, devreler gibi temel konularda da katılımcılar yeterli bilgi seviyesinde olmalıdır. [52]'de robotik sistemlerle bağlantılı alanlara değinilmiştir. Bu yayında robot eğitim stratejileri üzerinde durulmuştur.

Geleneksel teorik derslik faaliyetlerinin yanında etkileşimli yazılımların kullanımı ile öğrenci motivasyonunun yükseldiği ve ders veriminin arttığı belirtilmiştir. Bu yayında eğitici tecrübelerini içeren referanslar ve robot eğitim platformu örnekleri bulunabilir. Yazarların kurs sonralarında katılımcılardan elde ettikleri geri beslemeler ile ulaştığı en önemli nokta bizce, etkileşimli yazılım araçlarının gerçek robot yapıları ile de etkileşimde olma gereğidir. Bu ihtiyaç [53]' de detaylandırılmıştır. Sanal laboratuvar uygulamaları ile eğitim veriminin arttırıldığı kabul edilmekle beraber, burada kullanılan yazılımlar ve donanımların temel robot parametrelerini değiştirme imkânı sunmamasındaki yetersizlik değerlendirilmiştir. Endüstriyel robotik yazılımları verildikten sonra bu yayında, ayrıca ticari robot programlama konusuna değinilmiştir. Ancak matlab toolbox'ı şeklinde sundukları kütüphaneler akademik öğrenciler için uygun görünmekle beraber pratisyenler için kullanışlı olmayabilir. [54] yayınında da benzer durum söz konusudur. Master derecesindeki öğrencilere yönelik geliştirilmiş araç oldukça kapsamlı özellikler sunmaktadır.

Yazarlar da robotiğin disiplinler arası doğasının göz önüne alındığında aktif öğrenme ve proje temelli çalışma ile robotik eğitimi veriminin arttırıldığını söylemektedir. Bu durumun ancak ön bilgiye sahip katılımcıların yer aldığı kurslarda geçerli olduğu uyarısını da yapmaktadırlar. Literatür incelendiğinde genel durum şudur. Görselliği arttırılmış yazılımlar ile klasik tahta kullanarak sunum yapılan sınıflara göre daha verimli eğitim gerçekleştirilmektedir. Bu doğrultuda çok sayıda örnek yazılım sunulmuştur. Sunulan yazılımların kimisi dar kapsamlı, tekil konuların anlaşılması için geliştirilmiştir. Bir kısmı da mekanik, programlama, kontrol gibi ön bilgilere sahip katılımcılar için tasarlanmıştır. Programın kullanımının basit ve anlaşılır olması, en az düzeyde ön bilgi gerektirmesi ama bunlarla beraber geniş alandaki konuları kapsaması

en iyi programlama tasarımıdır. Katılımcı motivasyonunu arttırmak, algıyı kuvvetlendirmek için görsellik gerçek modellemeler ile desteklenmeli, gerçek endüstriyel uygulamalar ile yazılım bağlantı kurabilmeli.

Bu çalışmada, robotik süreçlerde tasarım ve işletim aşamasında göz önüne alınması gereken kısıtlamaları görselleştiren, yüksek etkileşimli izleme becerisine sahip operatör arayüzü geliştirilmiştir. Profesyonel offline robot platformlarının sunduğu imkânlar birebir programa yansıtmak gibi bir amaç güdülmemiştir. Programda yer alan, detaylı çalışma hacmi görselleştirme, eklem kinematiği takibi, özgün manipülatör tasarımı, PLC denetimi, henüz hiçbir ticari arayüzün sağlamadığı desteklerdir. Eklenen bu özelliklerin profesyonel offline programlarda da yer almasını öneriyoruz.

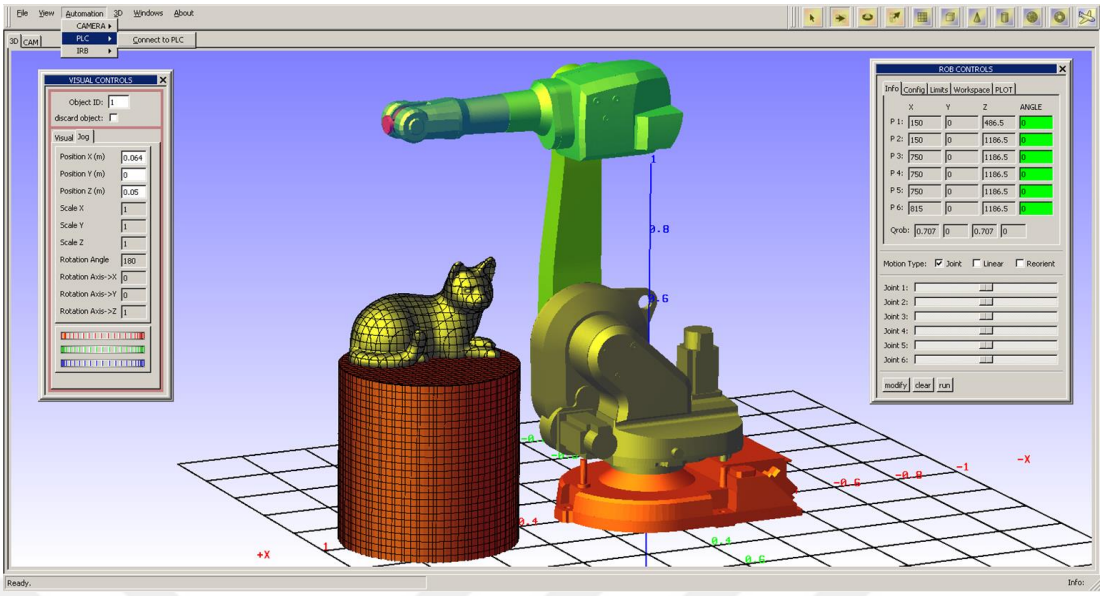
Günümüzde istekler, yöntemler hızla değişmektedir. Mevcut kurulumlar bu değişikliklere uyabilmek için esnek olmalıdırlar. Bu bazen modüler yapı tercihleri ile sağlanırken bazen de çok amaçlı, yeniden kurgulanabilir araçlar ile sağlanabilir. Esnek otomasyon sistemlerinin yaygınlaşması ile donanım maliyetleri azaltılmaktadır. Bunun yanında programlama maliyetleri ve verimi büyük önem kazanmaktadır. Endüstride güvenilirlik esas olduğu için, akademik çevrelerde çalışmalara sıklıkla konu edilmesine karşın; otonomi, sezgisel yaklaşımlar kullanılmamaktadır. Geleneksel programlama tercih edilmektedir. Söz konusu esnek otomasyon olduğunda robotik imalat ilk akla gelen çözümdür. Bunun doğal sonucu olarak robot ve robotik imalat bilgisine sahip personele duyulan ihtiyaç artmaktadır. Robot tasarımı yüksek uzmanlık gerektiren, farklı disiplinlerden akademisyen ve mühendislerin bir araya gelerek gerçekleştirilebilecek bir konudur.

Robot programcılığı ise kolej ya da lisans seviyesindeki bilgilerin üzerine kısa kurslarla yetkinlik kazanılabilecek bir alandır. Bu çalışmada biz robot programcılığı eğitimi için eğitimci olarak kullandığımız yazılımı tanıtma hedefindeyiz. Robot programlama için birbirlerini tamamlayan iki yöntem vardır. Kurulum süresini kısaltmak için önce masa başı hat-dışı CAD yazılımları ile fizibilite, erişim hesaplamaları yapılır. Robot programının çatısı oluşturulur. Kurulum sırasında ise operatörler el terminalleri aracılığı ile manipülatörün konum kontrollerini yaparlar. Günümüzde hat dışı programlama yazılımlarının kullanımı yaygınlaşmaktadır. [55]

yayınında mevcut teknolojik yönelim konu edinilmiştir. Bu yayında farklı programlama opsiyonları karşılaştırılmıştır. Sistem entegrasyonu için en kolay hat içi konumlandır/öğret yöntemi araştırmacılar tarafından maliyet, iş riski gibi sebeplerle dezavantajlı olarak nitelenmiştir.

Tercih edilen programlama yöntemlerinin hızla hat dışı programlamaya kaydığı vurgulanmıştır. İster jenerik yazılımlar olsun ister robot imalatçısının sunduğu ticari yazılımlar olsun, son kurulum anına kadar saha çalışmasından kaçınılabildiği için avantajlı bulunan bu yöntemlerin olumsuz tarafları olarak marka ve modeller arası uyumsuzluk ve uzman robotik CAD-CAM yazılımcısı ihtiyacı olduğu belirtilmiştir. Belirli robot imalatçılarının kendi modellerini destekleyen yazılımlara örnek olarak; Robot Studio (ABB), KukaSim (KUKA), Roboguide (FANUC) sayılabilir. Delmia, RobCad, RoboMaster, Robsim ise pek çok farklı marka için kullanılabilen jenerik yazılımlardır. [51-55] yayınlarında bu kısa listeye ilave olabilecek diğer yazılımlar ve akademik çalışma ürünü yazılımlar detaylı tablolar halinde sunulmuştur. Mühendislik eğitiminde endüstriyel robotlar ile ilgili, robot yapısı, programlanması, kinematiği, dinamiği ve çalışma uzayı konularında öğrencilere bilgiler aktarılırken gerçek anlamda bir robota ve endüstriyel ortamdaki saha koşullarına ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak gerek endüstriyel ortamdaki saha koşullarını yaratmak ve gerekse de fiziksel olarak bir robotu laboratuvar ortamında bulundurmak her zaman mümkün olmayabilir. Bir robot bulundurma imkânının sağlandığı durumlarda bile robotik tekniği ile ilgili anlatılan konular bulundurulan robot marka ve modeli ile sınırlı kalmaktadır.

Bu tez çalışmasında sunduğumuz yazılım sayesinde istenilen uzunluklara sahip robot kolları ile elde edilen konfigürasyonun çalışma uzayındaki sınırları, her bir kola ait açı limitleri, temel robot hareketleri (eklemsel, doğrusal ve dairesel) ve programlanma gibi konular görsel olarak öğrencilere aktarılma imkânı sağlanmıştır. Tasarlanan bu eğitim materyalini "IRT" (Industrial Robot Training Tool) olarak isimlendirdiğimiz bu yazılımın ana ekran görüntüsü şekil 5.1'de verilmiştir.



Şekil 5.3. IRT - Endüstriyel Robot Eğitim Platformu

Yazılıma ait çalıştırılabilir dosyaları ve kaynak kodlarını C++ kullanılarak açık kaynak lisanslı Fox toolkit kullanılarak hazırlanmıştır. PLC haberleşmesi için Libnodave, Steryo kamera erişimi içinde Ptgrey FlyCapture SDK'sı kullanılmıştır. Platform bağımsız olan bu kodlar istenirse Linux ortamı için de derlenebilir. Yazının devamında 6 eksenli seri eklemli yapı referans alınarak temel robot kinematiğine ait tanıtımlar yapılacaktır. Sonraki bölümde derslerimizde lisans seviyesindeki öğrencilerimiz için kullandığımız, aynı zamanda da imalat sanayiinde işbaşı eğitimlerine destek olarak operatör eğitimleri için de kullanılabilen programımız tanıtılacaktır. Örnek bir uygulama çalışması ile elde edilen bulgularımız ve önerilerimize yazının sonunda yer verilmiştir.

5.2. Yazılım Platformu İçin Robot Modeli Çıkarma

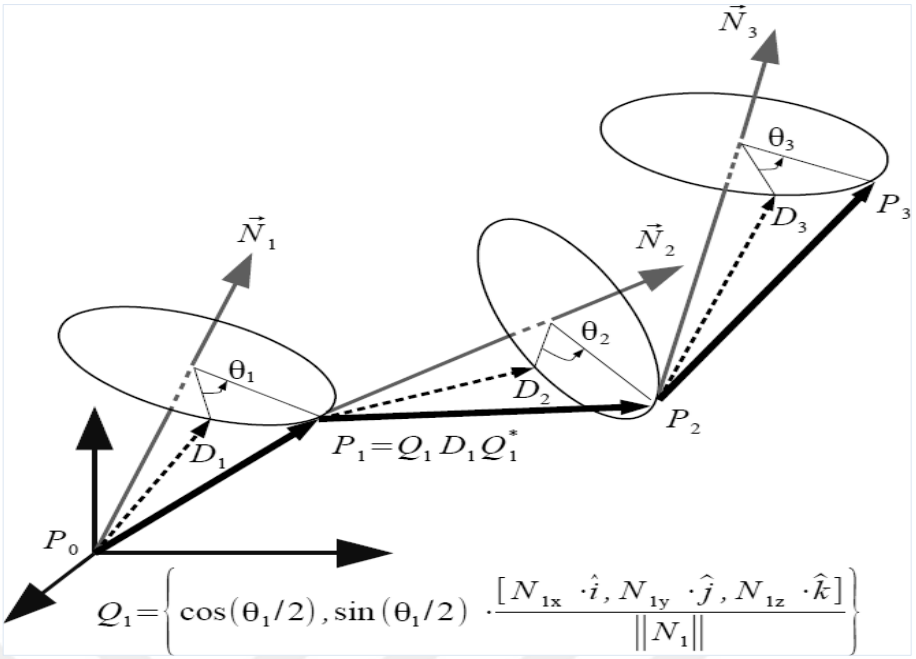
Robot kinematik bilimi, mekanik ünitelerin bağlantı kolları ve uç işlevcisinin pozisyon, hız ve ivmelenmeleri arasındaki ilişkiyi ortaya koymaktadır. Bu mekanik üniteler farkı geometrik şekillere ve tasarımlara sahip olabilirler. Robot kinematiğinde temel olarak bağlantı kolları sabit bir gövde olarak elelanır ve kol eklem noktalarının dönme işlemini gerçekleştirdiği varsayılır [56-58]. Bu robot kollarının çalışma uzayındaki birbiri ile olan ilişkileri ve uç işlevcinin konum ve rotasyon bilgileri bulabilmek için robotun ileri ve ters kinematik modellerinin çıkarılması gerekir. İleri kinematik, robot bağlantı kollarında yer alan eksen açıklarını kullanarak robotun uç

işlevcisinin çalışma uzayındaki konum ve oryantasyonunu hesaplarken, ters kinematik ise robotun uç işlevcisinin çalışma uzayındaki konum ve oryantasyon bilgilerini kullanarak robotun eksen açılarının bulunmasını sağlar [59-61].

Robot manipülatörlerin kinematik hesaplamaları yapılırken genellikle 3 farklı metottan birisine başvurulur. Bunlar iteratif yaklaşım, geometrik model ve analitik yöntemdir. İteratif yöntemde robot uç işlevcisini (TCP: Tool Center Point) istenilen noktaya götürmek için her bir eksen açısı için tahminleme yöntemi kullanılır. Ancak bu işlem oldukça zaman alıcıdır. Geometrik model ise robot mekaniği trigonometrik bağıntılarla analiz edilir ve temel geometri formülleri kullanılarak robot modellenir. Bu yöntemde ortaya konulan model sadece ilgili mekanik kol için geçerli olup kol yapısı değiştiğinde model yeniden kurulması gerekir. Analitik model ise robot mekanik yapısından bağımsız olarak kinematik denklemler oluşturulabilmektedir. Bu sayede robot mekanik kol bilgilerine değişkenler atanarak dinamik olarak istenilen robot kol ölçüsü için kinematik çözümleri sağlanmaktadır.

İleri ve ters kinematik modelleleri çıkarılırken neredeyse herkesin başlangıç noktası DH (Denavit-Hartenberg) parametre tablosunun oluşturulmasıdır. Bu tablolardan yola çıkılarak homojen transformasyon matrisleri oluşturulur.[60,61] DH yönteminde esas minimum sayıda parametre ile iki koordinat uzayını birbiri ile ilişkilendirmektir. En az sayıda parametre kaygısı yüzünden karmaşık ve zor bir yaklaşımdır. Aynı zamanda homojen dönüşüm matrisleri ile rotasyonları tanımlamanın da zaafları vardır.

Basta öğrencilerin anlayışlarını kolaylaştırmak, bununla beraber çözüm süresini düşürmek ve daha az işlem ile sonuca ulaşmak için bu çalışmada kinematik modellemede quaternion cebri kullanılmıştır. Quaternion modeli sayesinde robotun ileri ve ters kinematik denklemlerini çıkarmak oldukça kolay ve çözüm süreleri daha kısadır. Quaternion, 1843 yılında ilk kez İrlandalı matematikçi William Rowan Hamilton tanımla ise karmaşık sayıların genişletilmesi ile bulunmuşlardır. Bir quaternion, üç boyutlu uzayda dönüsü 4 elemanlı bir vektör olarak tanımlanması sağlar [62,63]. Açı eksen gösteriminden rahatlıkla türetilebilen quaternion ile komposit koordinat dönüşümü Şekil 5.4'te gösterilmiştir.



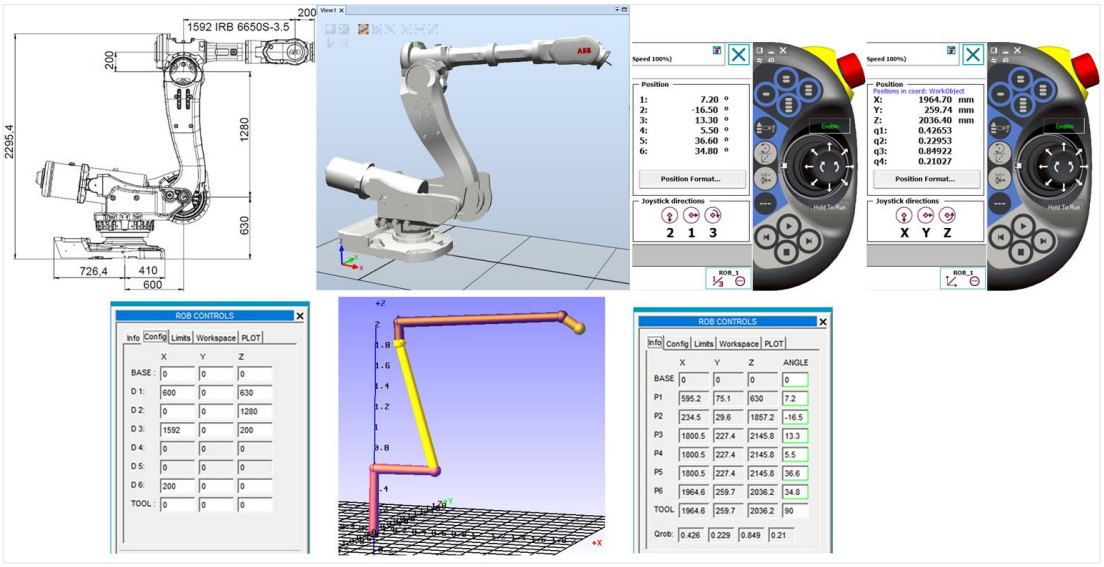
Şekil 5.4. Quaternion ile komposit koordinat dönüşümü

$$q = (\theta, \vec{N}) = (q_s, \overrightarrow{q_v}) = \left(q_0 + q_1\hat{\imath} + q_2\hat{\jmath} + q_3\hat{k}\right) = (q_0, q_1, q_2, q_3) = \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) + \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot \frac{\vec{N}}{\|\vec{N}\|} \quad (5.1)$$

Quaternionları araştırmacılar (5.1)'de tanımlanabileceği üzere çok farklı notasyonlarla göstermektedirler. Açı eksen gösterimindeki dönüş miktarı θve $\vec{N}$dönüş eksenini gösteren pivot vektör bilindiğinde bir skaler ve vektörel kısımdan oluşan quaternion tanımlanması kolaydır. Birim genlikli quaternion rotasyonları göstermekte kullanılırlar. Kompozit rotasyonu hesaplamak için Denklem (5.2) tanımlanmış çarpım işlemi yapılmalıdır. Manipülatör bağlantılarını $\overrightarrow{D}$olarak tanımlanabilecek vektör olduğunu düşündüğümüzde $q$eklemin dönüşünü tanımlayan birim koterniyon ise, dönüş sonunda $\vec{D}$'nin yeni konumunu ifade eden $\vec{P}$ Denklem (5.3) ile hesaplanabilir.

$$q_1{}^*q_2 = (q_{1s}q_{2s} - \overrightarrow{q_{1v}} \cdot \overrightarrow{q_{2v}}) + (q_{1s}\overrightarrow{q_{2v}} + q_{2s}\overrightarrow{q_{1v}} + \overrightarrow{q_{1v}} \times \overrightarrow{q_{2v}}) \quad (5.2)$$

$$\vec{P} = q\vec{D}q^* = (q_s{}^2 - \overrightarrow{q_v} \cdot \vec{D})\vec{D} + 2q_s(\overrightarrow{q_v} \times \vec{D}) + 2\overrightarrow{q_v}(\overrightarrow{q_v} \cdot \vec{D}) \quad (5.3)$$



Şekil 5.5. Ticari platformlarla karşılaştırma-örnek1



Şekil 5.6. Ticari platformlarla karşılaştırma-örnek2

Hazırladığımız yazılımda ABB IRB 6650S 125/3.5m manipülatörün modeli kinematik hesaplamaların doğruluğunu kontrol etmek amacıyla kullanılmıştır. Şekil 5.5 ve 5.6'da hesaplamaların firmanın kendi yazılımı olan Robot Studio ile aynı sonuçlar verdiği görülebilir. Şekil 5.5'te teknik çizimi gösterilen manipülatörün $\overrightarrow{D_i}$ eklem uzunlukları ve $\overrightarrow{N_i}$ dönüş ekseni pivot vektörü belirlenerek Denklem (5.4) oluşturulmuştur. DH tablosu yerine Denklem (5.4) gösteriminin kullanılmasının daha anlaşılır olduğu tecrübelerimizle belirlenmiştir.

$$
\begin{aligned}
D_0 &= [0000 \quad 0000 \quad 0000] \qquad N_0 = [0 \quad 0 \quad 1] \\
D_1 &= [6000 \quad 0000 \quad 6300] \qquad N_1 = [0 \quad 0 \quad 1] \\
D_2 &= [0000 \quad 0000 \quad 1280] \qquad N_2 = [0 \quad 1 \quad 0] \\
D_3 &= [1592 \quad 0000 \quad 2000] \qquad N_3 = [0 \quad 1 \quad 0] \\
D_4 &= [0000 \quad 0000 \quad 0000] \qquad N_4 = [1 \quad 0 \quad 0] \\
D_5 &= [0000 \quad 0000 \quad 0000] \qquad N_5 = [0 \quad 1 \quad 0] \\
D_6 &= [200{,}0 \quad 0000 \quad 0000] \qquad N_6 = [1 \quad 0 \quad 0] \\
D_7 &= [0000 \quad 0000 \quad 0000] \qquad N_7 = [0 \quad 1 \quad 0]
\end{aligned}
\tag{5.4}
$$

$$q_{(0)} = (\theta_{(0)}, N_{(0)}) \ , \ \ q_{(i)} = q_{(i-1)} * (\theta_{(i)}, N_{(i)}) \tag{5.5}$$

$$P_{(0)} = q_{(0)} D_{(0)} q^*_{(0)} \ , \ P_{(i)} = q_{(i)} D_{(i)} q^*_{(i)} + P_{(i-1)} \tag{5.6}$$

Eklemlerin komposit dönüşümü yani taban düzlemini ilgili linkteki koordinat düzlemine bağlayan rotasyon Denklem (5.5) ile hesaplanır. Her bir linkin uç noktası da Denklem (5.6) bulmak artık çok kolaydır. 6 serbestlik dereceli bu manipülatörün tool koordinat sistemini kataloğunda verilen duruş ile aynı duruma taşımak için $q_7$kullanılmıştır. Küresel bilek yapısından dolayı ters kinematik çözümde çok kolaydır. $\overrightarrow{D_6}$ Kullanılarak verilen uç nokta ve dönüş için $\overrightarrow{P_3}$ hesaplandıktan sonra ilk üç eklemin açıları bulunur. Bu açılar kullanılarak elde edilen q_3 ile verilen notasyon işlenerek bilek grubu açıları bulunur. Homogen koordinat dönüşümünü tanımlayan 16 terimli matrisler yerine yalnız 4 terimli quaternion kullanılması ile bu hesaplamalar hızlı ve kolayca yapılır.

5.3. IRT Yazılım Platformunun Özellikleri

Robotik eğitimi amacıyla tasarlanacak yazılımlardan en yüksek verimi almak için önerdiğimiz temel kriterleri şöyle sıralayabiliriz:

- Kullanımı kolay olmalı: Eğitimli uzmanların yanında öğrenciler hatta operatörlerde kullanabilmeli. Bunun için en az düzeyde ön bilgi gerektirmeli. Unutulmamalıdır ki eğitim yalnız kayıtlı sınıf öğrencileri için değil aynı zamanda işletmelerde yeni başlayan personel için de gereklidir.
- Erişim kolay olmalı: Ticari yazılımların desteğine mümkün olduğunca ihtiyaç duyulmamalı. Programın mobilitesi yüksek olmalı. Bunun sağlanabilmesi için ilave kütüphane kullanımından sakınılmalı. Açık kaynak kodların sunulması kullanıcılar için büyük avantaj sağlayacaktır. Ticari kapalı kutu yazılımların,

donanımların kısıtlarına bu sayede takılmaz. İstenen değişikliği eğitimciler/öğrenciler rahatlıkla yapabilmeli.

- Gerçekliği arttırılmış olmalı: Kullanıcıların ilgisini çekmek için sembolik çizimler yerine katı 3D-modeller kullanılmalı. Görsel incelemeye elverişli etkileşimli manipasyonlar yapılabilinmeli.
- Fiziksel donanımlarla iletişim kurulabilmeli: Bu özellik sağlanırken marka/ model bağımsız olmalı: İletişim evrensel standartlar üzerinden yapılması tercih edilmeli. Özel haberleşme arayüz kanalları, yazılım geliştirme kütüphanelerinden kaçınılmalı. Mevcut uygulamalara, tasarımlara yenilikler katacak şekilde ufuk açıcı olmalı.

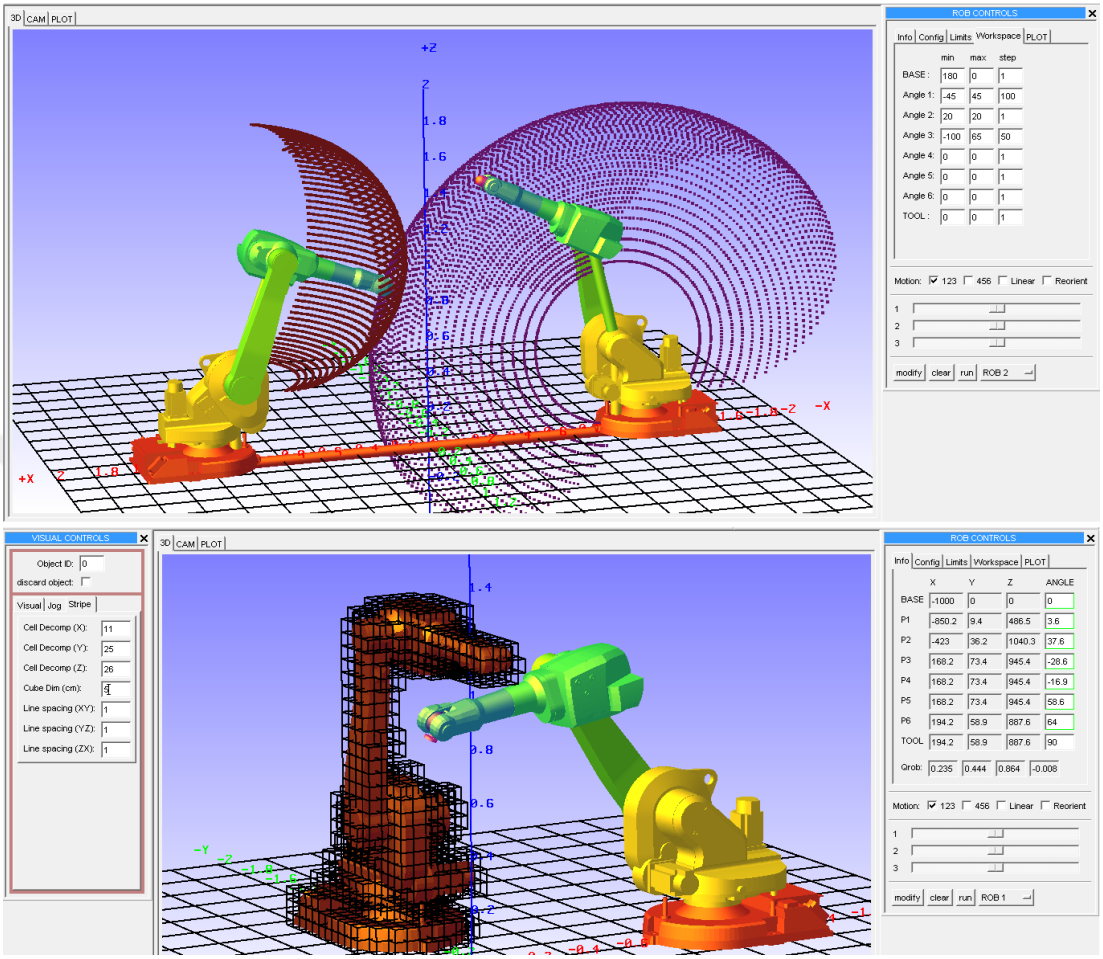
Bu bölümde hazırladığımız programın, gerek akademik gerekse ticari mevcut programlarda bulunmayan özelliklerini ön plana çıkarmayı hedefledik. Eklediğimiz özellikler ile yukarıda sıraladığımız temel kriterlere mümkün olduğunca bağlı kalmaya çalıştık. Ancak dış fiziksel donanımlara erişim konusunda kaçınılmaz olarak kütüphane kullanmak zorunda kaldık.

Bu noktada da tercih ettiğimiz, açık kaynaklı, işletim sistemi bağımsız kütüphaneler oldu. Önceki bölümde matematiksel temellerden bahsettiğimiz için bu bölümde bu konuya yer vermedik. Bu platform çalışmasında ön plana çıkarılan robotik nokta direnç ölçümünü gerçekleştirmekle beraber, eğitim amaçlı olarak öğrencilerin anlayışlarını zenginleştirecek ilave özellikler ve menüleri sonraki bölümlerde tek tek detaylı olarak açıklanmıştır.

Özellikle eklemli (articulated) robot kollarının çalışma uzayını zihinde canlandırmakta zorluk yaşanmaktadır. Oysa çalışma uzayı görselleştirildiğinde erişim testleri çarpışma bölgesi analizleri daha rahat yapılabilir. Yine bu ekran aracılığı ile erişim ve çarpışma bölgesi değerlendirilerek robot optimum konuma yerleştirilebilir. Şekil 5.7'de verilen çalışma bölgesini oluşturmak için kullanıcılar Şekil 5.8'deki robot kontrol panelini kullanırlar. Bu kontrol panelinde yer alan workspace tabı içinde her bir eklem için ayrı ayrı çalışma aralığı ve tarama adımı girilerek erişim bölgesi gösterilebilir.

Ana ekrana ilgili toolbarlar ile 3ds formatında modeller eklemek mümkündür. Eklenen modeller üzerinde ister Şekil5.3'te gösterildiği gibi tarama çizgileri, isterse Şekil 5.7'deki gibi modeli kapsayan hücreler görselleştirilebilir. Şekil5.7'deki Robot kontrol

paneli üzerinde farklı geometrik ölçülere sahip manipülatör tasarımı [51]'de olduğu gibi yapılabilir.



Şekil 5.7. IRT çalışma uzayı

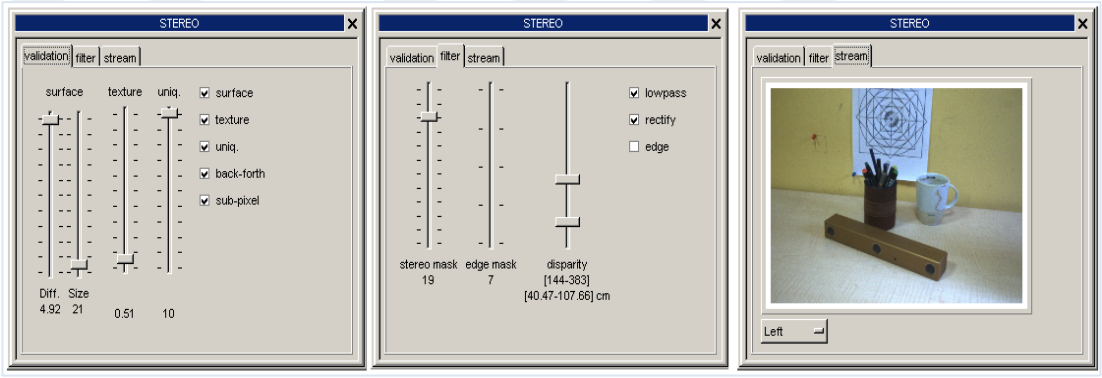


Şekil 5.8. IRT Platformu kontrol paneli

Geliştirilen yazılımın yalnızca eğitimi kolaylaştırdığını söylemek yeterli değildir. Aynı zamanda pratik uygulama geliştirmek amacıyla da kullanılabilmektedir. Şekil5.3'te

dikkat edilirse manipülatör önüne yerleştirilmiş model üzerinde tarama çizgileri bulunmaktadır. Bu çizgiler üzerinde manipülatör hareket ettirilerek nokta öğretme işlemi yapılabilir. Bu yaklaşım robotik milling uygulamalarının temelidir. Proje ve tez çalışmalarında öğrenciler programa ilave modüller ekleyerek Bu tarama çizgilerinin otomatik olarak robot programına aktarılmasını sağlayabilmişlerdir. Şekil5.10'da gösterilen manipülatör ve milling tool ile basit model imalatlarını yapabilmişlerdir.

Bir başka çalışmada programa steryo kamera modülü eklenerek tersine mühendislik uygulamalarının başlangıcı olan nokta bulutu oluşturma işi gerçekleştirilmiştir. Şekil5.9'da gösterilen steryo kontrol widgeti ile parametrelerin etkileri canlı olarak gözlenerek uygun değerlerin tespiti kolaylaştırılmıştır.

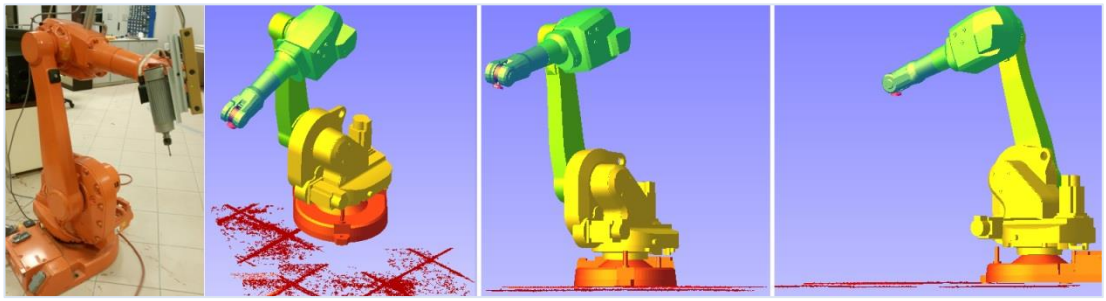


Şekil 5.9. IRT Sterio kontrol widgeti

Bu uygulamada kamera koordinat düzleminde elde edilen noktaların referans koordinat düzlemine aktarılması gerekmektedir. Kameranın farklı açılardan tespit ettiği konumlar ancak ortak referans düzleminde birleştirilebilir. Bu işlemin yapılabilmesi için kamera duruşu ile manipülatör uç noktası arasındaki ilişkinin bilinmesi gerekir. Bir başka ifade ile kameranın ilave bir tool olarak kontrolöre tanıtılması gerekir. Duruşu tanıtacak öteleme ve rotasyon bilgisi ise hand-eye kalibrasyonu olarak bilinen sürecin sonunda, $AX = XB$ formundaki denklem sisteminin çözülmesi ile gerçekleştirilebilir.

Lisans öğrencilerinin proje dersinde geliştirdikleri modüller ile kamera erişimi sağlandıktan sonra Şekil5.10'da gösterilen manipülatör ile yazılımın haberleşmesi sağlanmıştır. Libnodave kütüphanesi ile PLC aracılığı ile yazılım robot kontrolörü arasında haberleşme kurulmuştur. Şekil5.10'da farklı duruşlardan elde edilen bilgilerin birleştirilmesi ile elde edilen ortam görüntüsü sunulmuştur. Yatay profilden

gösterilen resimlerde nokta bulutunun ince bir çizgi şeklinde olması kalibrasyon sürecinin hassaslığının göstergesidir.



Şekil 5.10. IRT- Nokta bulutu gösterimi, robot-kamera transformasyonu

Örneklerini yukarıda anlattığımız uygulamalar sonucunda katılımcıların teorik bilgilerin kullanım alanlarını görmüşlerdir. Kod geliştirmeye katılımları lisans öğrencileri için kolay olurken, işletme operatörlerinin bu aşamada katkısı beklenemez. Ancak onlarda program aracılığı ile sürecin nasıl işlediğine dair somut gözlemler yapabilirler.

5.4. IRT Yazılım Platformunun Kontrol Paneli Menü Öğeleri

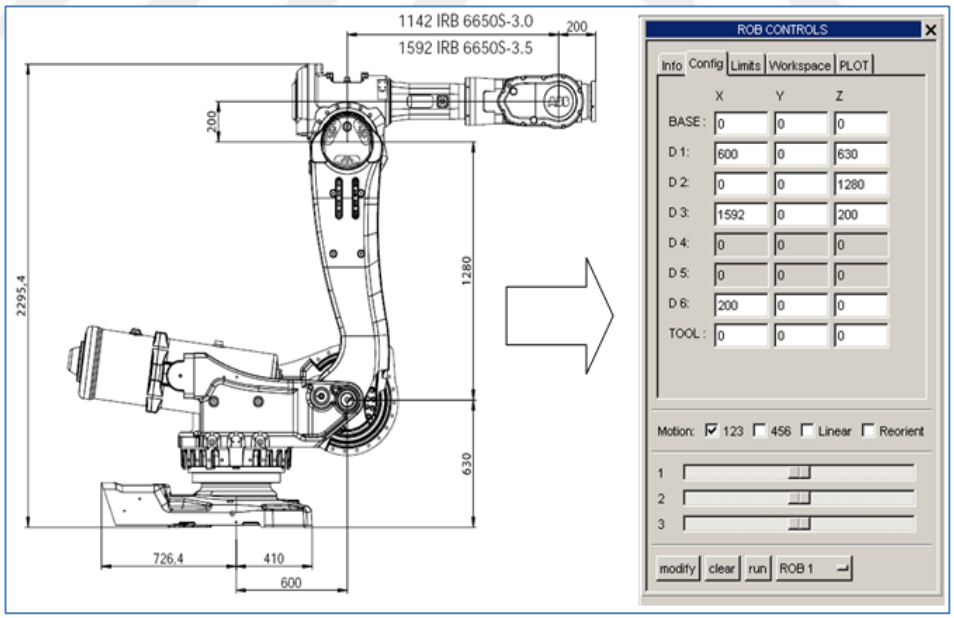
Info Sekmesi: Geliştirilen sistem sayesinde tıpkı gerçek bir robotun teachpendat'ı (kumanda paneli) üzerindeki hareket komutları ve şekli simüle edilmiştir. Pek çok endüstriyel robot kumandasında olduğu gibi bu programda da panel üzerindeki yün tuşlarının hareket ettirilme oranına bağlı olarak ilgili aks yada robot TCP (Tool Center Point) hızı oransal olarak artmaktadır. Robotun, temel hareket tipleri olan Lineer, Joint ve Reorient şeklinde hareket ettirilmesi sağlanmıştır. Kullanıcı, bu sekme yardımı ile robotu istenilen hareket tipinde hareket ettirebilmektedir. Bu hareketler esnasında akslara 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 ile kullanıcıyı uyarmaktadır. Bu ayarı şekli Şekil5.11'de verilmiştir.



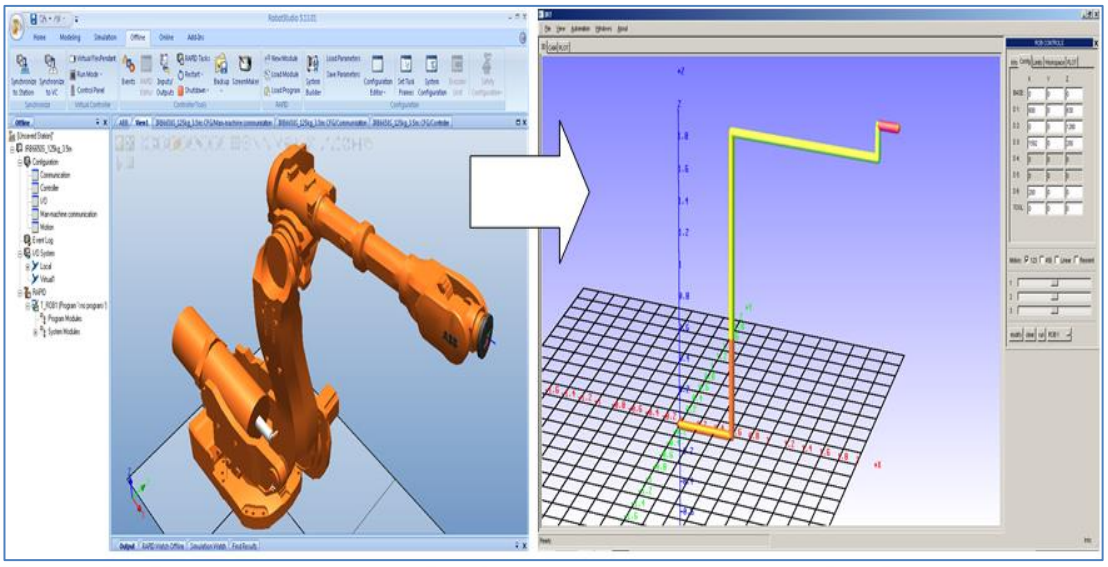
Şekil 5.11. IRT menü sekmeleri (info)

Config Sekmesi: Konfigürasyon sekmesinde, herhangi bir endüstriyel seri robot için bir model oluşturulabilir ve oluşturulan model sistemde test edilebilir. Bu sekme yardımı ile herhangi bir robot markasının (kuka, comau, abb, fanuc, otc, vs..) herhangi bir robotu modellenmesi mümkündür. Modellenecek olan robota ait aks dataları kartezyen koordinat sisteminde x,y ve z deki uzunlukları Config sekmesinde gösterilmiş olan D1, D2,…D6 kutularına girilir. ABB IRB 6650S 125/3.5m robotu için Şekil 5.12'de konfigürasyon giriş ekranı gösterilmiştir.



Şekil 5.12. IRT menü sekmeleri (config)

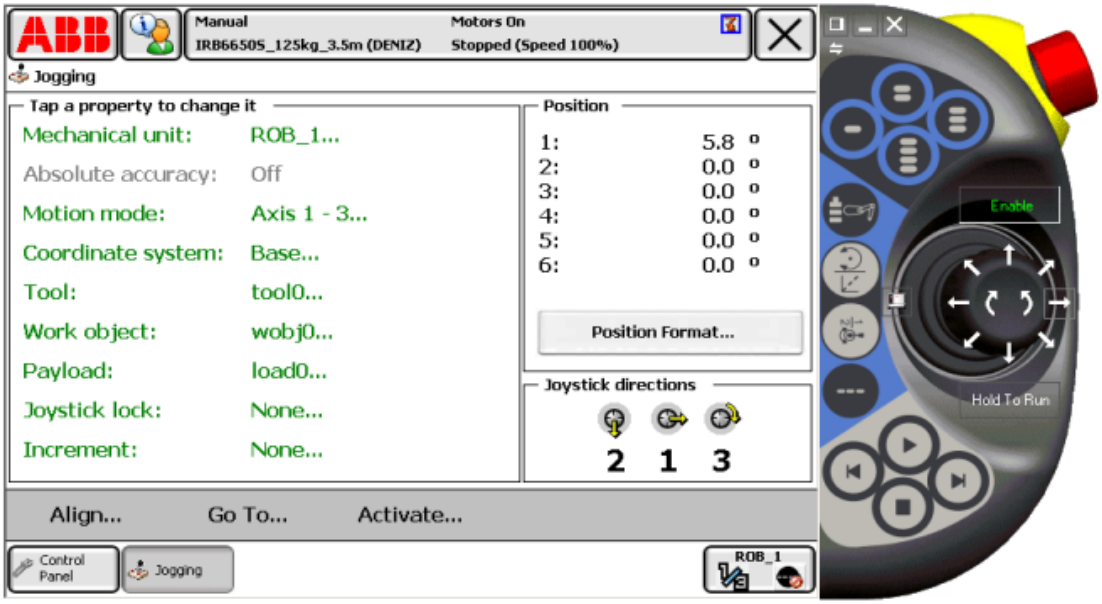
Belirtilen robot modeli, ABB firmasının offline programlama için geliştirmiş olduğu robot simülasyon programı olan "Robot Studio "'da ve IRT simülasyon programında Şekil 5.13'te verilmiştir.



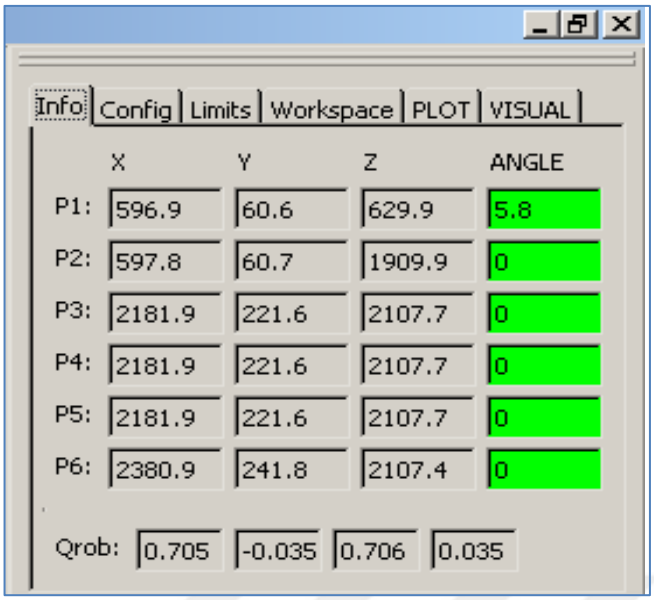
Şekil 5.13. ABB Robot Studio Programı ve IRT programında gösterim

Robot Studio programında oluşturulan IRB 6650S robotu Şekil 5.14'te gösterildiği 1.eksenin 5 derece döndürülmesi ile elde edilecek olan robotun yeni TCP değeri yine aynı program yardımı ile Şekil 5.16'da verilmiştir.

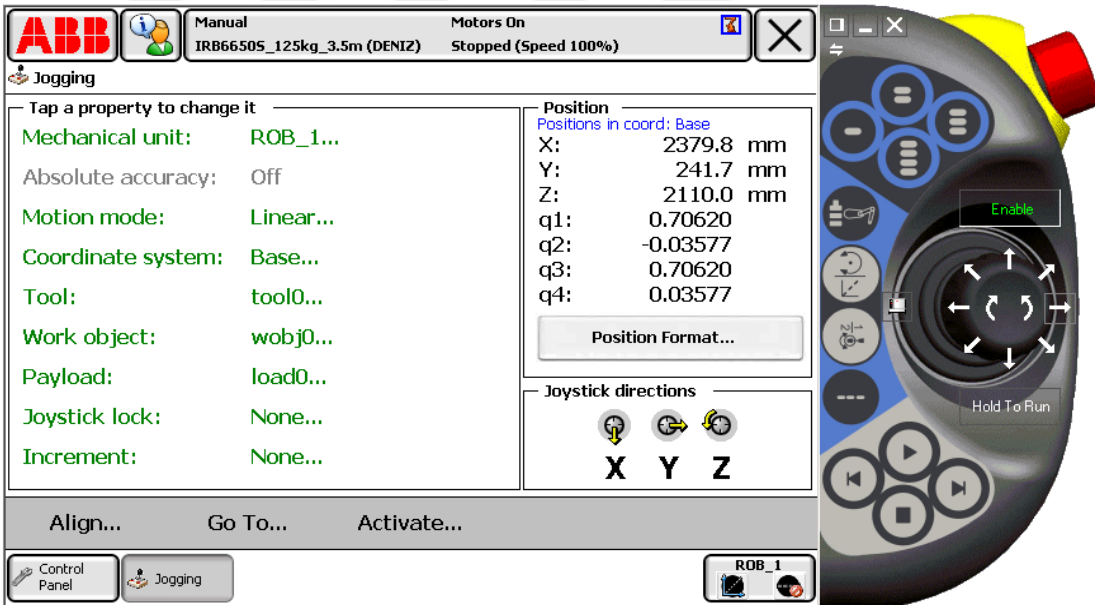
IRT programında benzer işlemin uygulanması ile elde edilen sonucun ABB Robot Studio programı ile aynı olduğu Şekil 5.15'te ortaya konulmuştur.



Şekil 5.14. Robotun 5.8 derece döndürülmesi

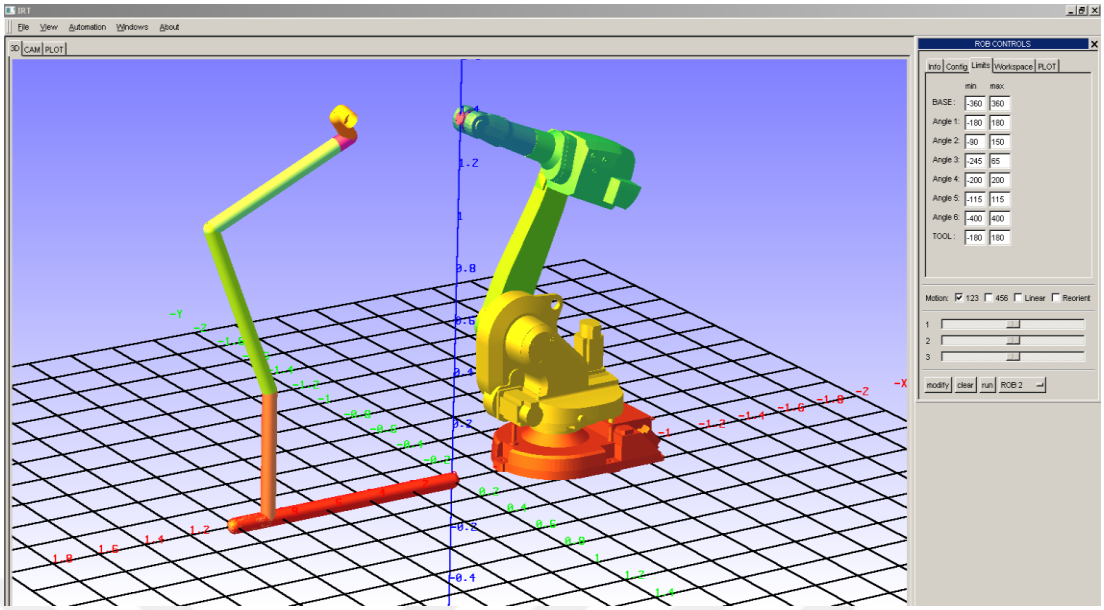


Şekil 5.15. IRT ‘de elde edilen TCP ve oryantasyon değerleri



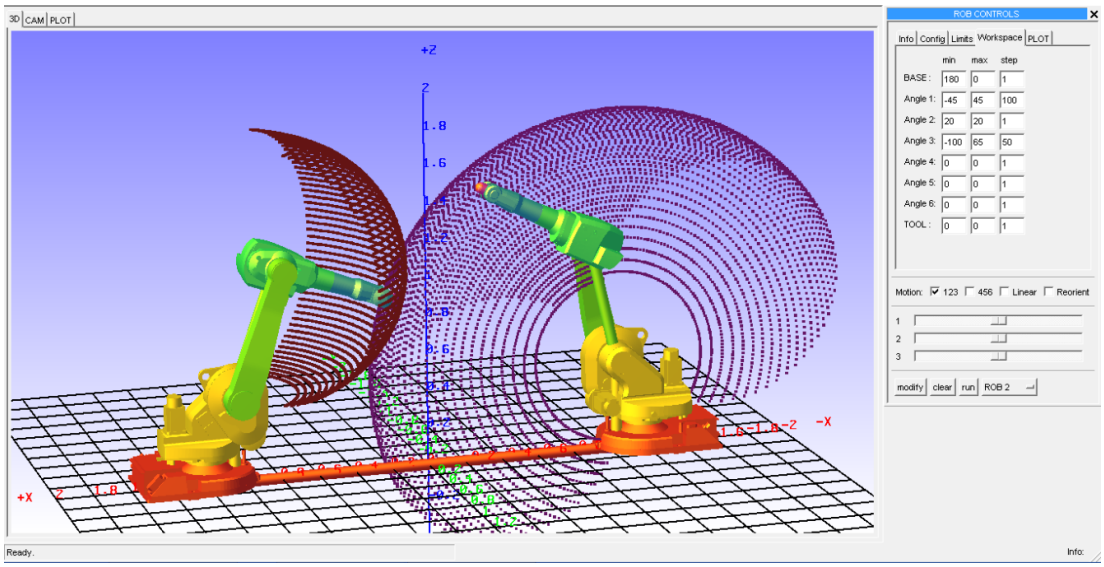
Şekil 5.16. Döndürülmesi sonucunda elde edilen TCP ve oryantasyon değerleri

Limit 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 5.17’de gösterilmiştir.



Şekil 5.17. IRT programında eksen sınırlama

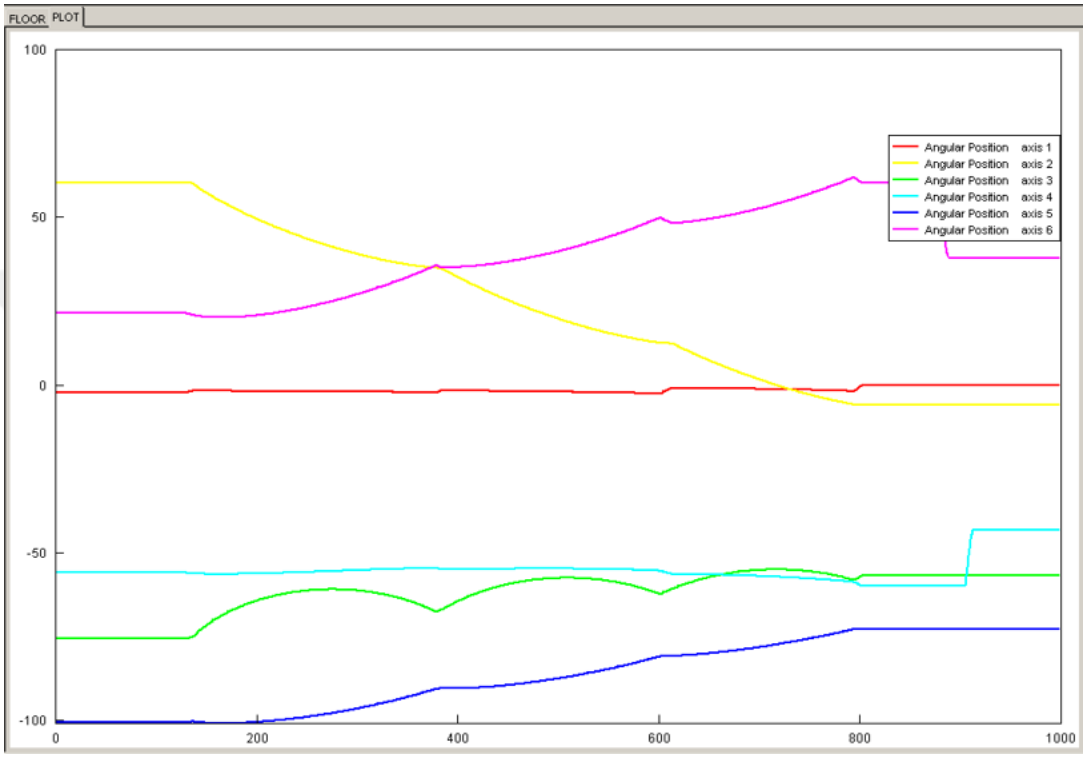
Workspace Sekmesi: Endüstride, robotik bir imalat prosesi için kullanılacak robotun çalışma uzayında nasıl bir yörüngeye sahip olduğu ortaya konulması gerekir. Bu gereksinim robota daha fazla iş yaptırma yaklaşımından ortaya çıkmıştır. IRT programında konfigürasyonu oluşturulmuş bir robotun her bir ekseni için çalışma uzayındaki sınırların ortaya konulması mümkündür. Şekil 5.18'de ABB IRB 1600 7/1.45 robot modeli için çalışma uzayındaki çalışma sınırları verilmiştir.



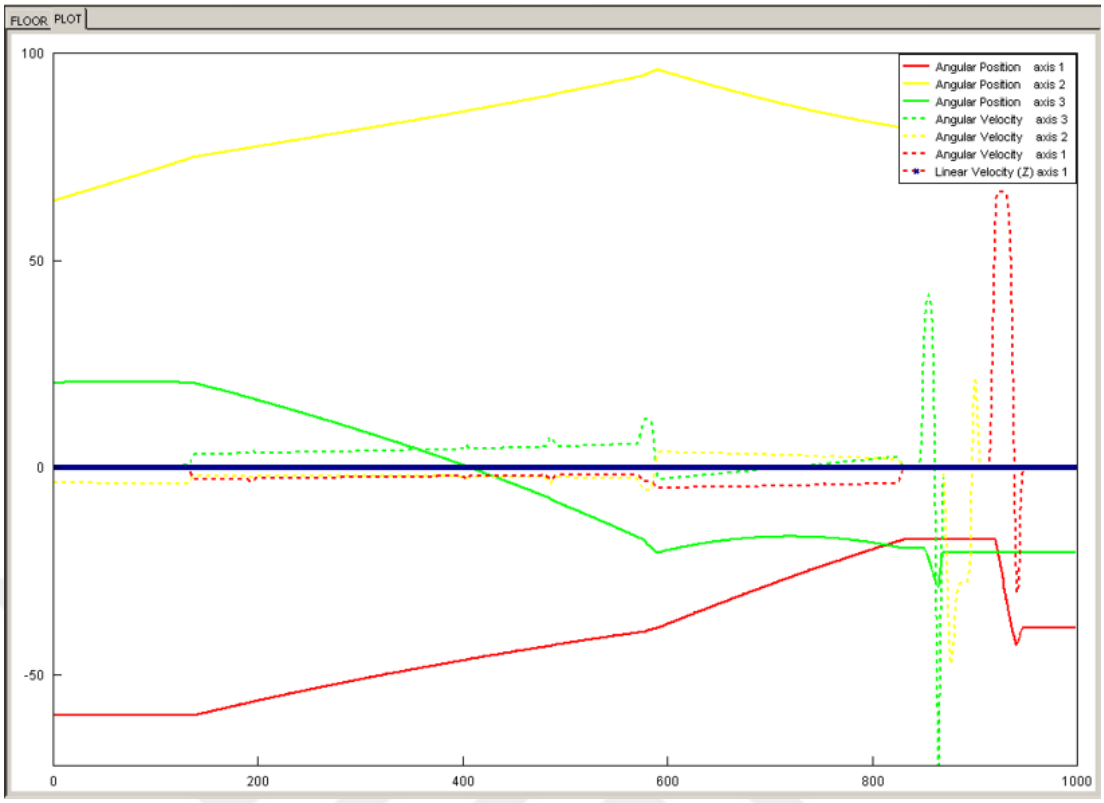
Şekil 5.18. IRT workspace sekmesi

Plot Sekmesi: Bu sekme yardımı ile robotun her eksenine ait açısal ve lineer pozisyon, hız ve ivme değerlerinin trendleri çizdirilmesi sağlanmıştır. Bu fonksiyon sayesinde

robotun herhangi bir yörüngede hareketi esnasında davranışların ortaya konulması mümkün kılınmıştır. Gerek robotun ters kinematiği açısından gerekse de düz kinematiği açısından eksen hareketleri rahatlıkla izlenebilmektedir. Şekil 5.19 ve 5.20'de robota öğretilmiş bir yörüngede 1, 2 ve3. eksenlerin yörünge boyunca açısal pozisyonlarının gösterilmiştir.

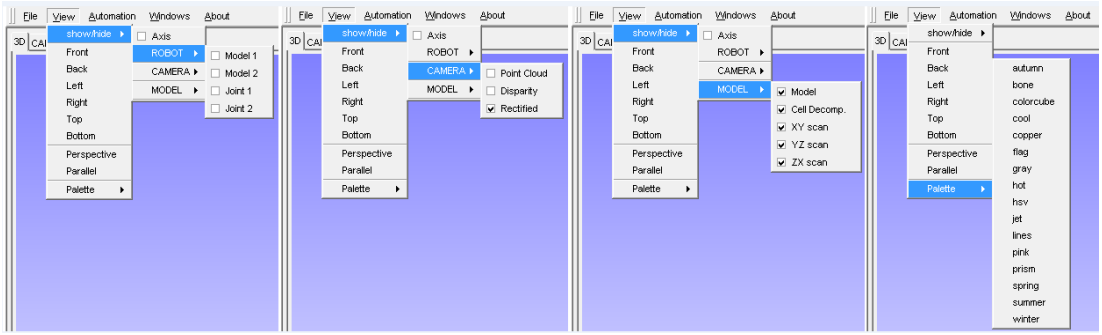


Şekil 5.19. IRT Robot eksen trendleri



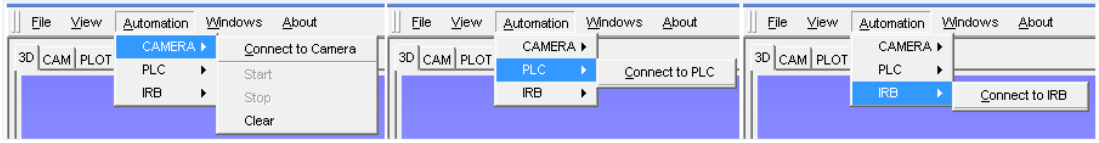
Şekil 5.20. IRT – Hareke halinde robot eksen trendleri

View Menusü: Bu menü yardımı ile ekran ayarlarını yapmak mümkündür. İlgili özellikler Şekil 5.21'de gösterilmiştir.



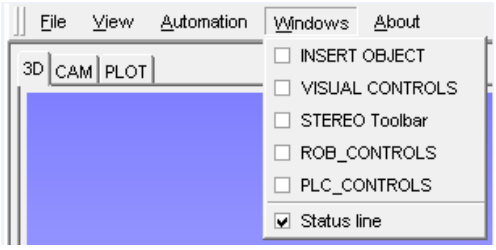
Şekil 5.21. IRT Platformu View menüsü

Automation Menusü: Bu menü yardımı ile Kamera, PLC ve Robot sistemlerine bağlanmayı sağlamaktadır. İlgili özellikler Şekil 5.22'de gösterilmiştir.



Şekil 5.22. IRT Platformu Automation menüsü

Automation Menusü: Bu menü yardımı ile Kamera, PLC ve Robot sistemlerine ayar işlemleri ve ekrana nesne ekleme imkânı sağlamaktadır. İlgili özellikler Şekil 5.23'de gösterilmiştir.

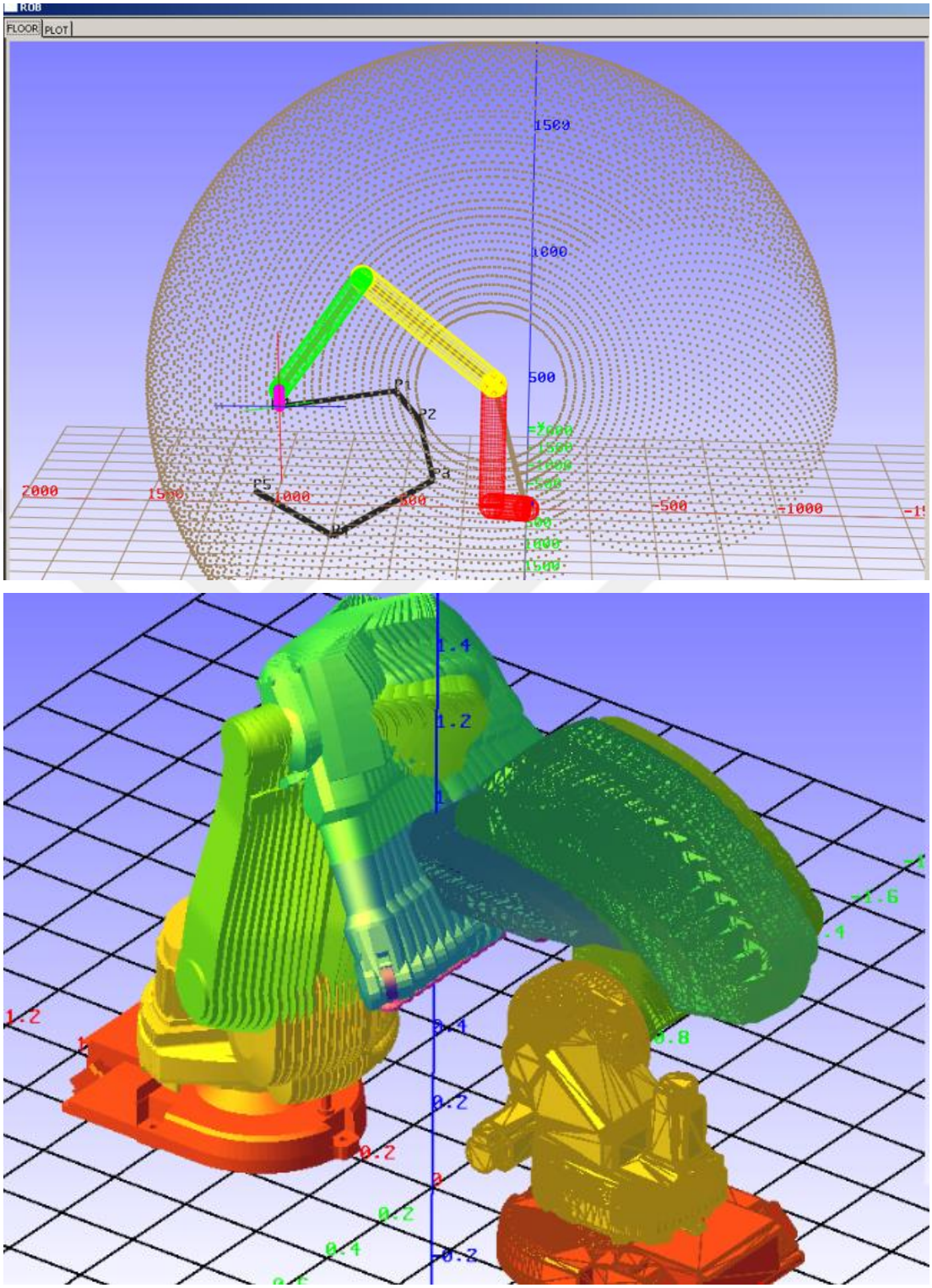


Şekil 5.23. IRT Platformu Windows menüsü

IRT Offline (Çevirim Dışı) Programlama Modülü: Endüstriyel robotların saha koşullarında bir proses ile ilgili noktaların tek öğretilmesi yöntemi oldukça zaman alan bir iştir. Son yıllarda robot imalatçıları çıkarmış oldukları offline programlama yazılımları sayesinde sahada robotlara nokta öğretme işlemi azaltılmıştır ve saha tarafında harcanan zamanın ciddi anlamda indirgenmesi sağlanmıştır. Endüstriyel robotlarda Offline programlama, bir proses ile ilgili işlem noktalarının robot açısından doğru öğretilme metodudur.

Bu öğretme metodunda, robotun ilgili noktalara erişimi esnasında takip ettiği yörünge ve yörünge boyunca robotun oryantasyonuna dikkat edilmelidir. Günümüz mevcut endüstriyel robotların offline 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 öğretilebilmekte ve bu noktalar için robotun eksen hareketleri, hızı ve oryantasyonu gözlemlenebilmektedir. IRT programındaki offline programlama için geliştirilen modül şekil 5.24'te gösterilmiştir.



Şekil 5.24. IRT Offline programlama modülü

5.5. Kamera, Kamera kalibrasyonu ve Koordinat Sistemi Dönüşümü

Robotik süreçlerin pek çoğunda eski yöntemlerdeki nokta öğretme yöntemi ile programlama terk edilmiştir. Bunu yapabilmek için öncelikle nokta öğretici uzman yerine konum bilgisini sunacak sensörlerin çalışma bölgesi içinde yerleştirilmesi gerekir. Tekil noktasal ölçümler yerine en yoğun bilgi görüntü sistemlerinden elde edilebilir. Görüntü sistemlerinin yaygınlaşması ile uygulama çeşitliği artan robotlar eğiticisiz al-bırak, muayene başta olmak üzere [64]'te örnekleri sunulan süreçlerdeki yerlerini arttırmaktadırlar. [65]'te vurgulandığı üzere görüntü algılayıcı düzeneklerle donatılmış robotlar yalnız konum bilgisini hazır olarak okumakla kalmayacak gelecekteki pek çok uygulamada görüntü işleyerek yapay zeka uygulamalarında da etkin görevler üstlenebilirler.

Tek bir bakış açısından bakıldığında ilgilenilen hacim içinde tüm istenen noktalar, sensörler tarafından kapsanamayabilir. Sensörün konumu ve rotasyonu değiştirilerek önceden erişilemeyen/kapsanamayan bölgelerde ölçüm yapılabilir. Farklı konumların referans alınması ile elde edilen konum bilgilerinin ortak bir referans düzlemine aktarılması gerekir. Ortak koordinat sistemine bu elde edilen verilerin aktarılması işlemi registrasyon olarak bilinir. İşlemin yapılabilmesi için ölçüm sensörlerinin farklı duruşlarının, birbirlerine göre durumları belirlenmelidir. Farklı duruşlarda elde edilen ortak bölgelerin verilerinden yola çıkılarak farklı ölçüm duruşlarının rotasyonları ve ötelemeleri bulunmalıdır. Registrasyon işlemi, resim işlemede farklı açılarla çekilmiş resimlerin birleştirilerek daha büyük geniş açılı panoramik resim elde edilmesinde, üç boyutlu sensör verilerinden tüm hacme ait yapının elde edilmesinde önemli bir aşamadır.

Endüstriyel sahada, sensörlerden alınan kinematik bilgilerin robot manipülatör referans düzlemine aktarılması robotik istasyonların yaygınlaştırılması ve verimli hale getirilmesi açısından pek çok uygulama için gerekli bir işlemdir. Sensör ve robot uç işleyici arasındaki pozisyonel ilişkinin bulunmasına hand-eye kalibrasyonu denir. Bu işlem için genellikle (5.7)'de ifade edilen eşitliğin çözülmesi gerekir. Söz konusu robotik olduğunda bu denklemdeki $A_{4x4}, B_{4x4}, X_{4x4}$homojen koordinat dönüşüm matrisleridir. i.ve j.duruşlarda, A_{ij}manipulatör duruşunu tanımlayan ilişki, B_{ij}ise sensörün düzleminde algılanan sabit noktanın değişimini tanımlayan ilişkidir.

Uygun iki veri kümesi arasında rotasyon ve transformasyonun bulunması hand-eye kalibrasyon için başlangıç noktasıdır. Mutlak oryantasyonun bulunması olarak tanımlanan bu işlem kamera kalibrasyonunda extrinsic kamera parametrelerinin tespiti için, hand-eye kalibrasyonda B_{ij}matrisini oluşturmak için kullanılır. [66]'de orthonormal matrisle, [67]'de koterniyon gösterimi ile sunulan kapalı form çözümler mevcuttur. Bu yayınlarda registrasyon için gerekli olan ölçek, öteleme ve rotasyonun bulunması detaylı olarak anlatılmıştır. Rotasyonun tespitine ihtiyaç duyulmadan ölçeğin belirlenmesi, ölçek ihtiyacı yoksa ve nokta seti eşdüzlemsellik (coplanarity) gibi bazı özellikleri sağlıyorsa yapılabilecek sadeleştirilmeden detaylı bir şekilde bahsedilmiştir. [68] çalışmasında yukarıda bahsedilen yöntem de dahil olmak üzere 3 boyutlu rigid transformasyonu estimate eden algoritmaların karşılaştırılması yapılmıştır.

Hand-eye kalibrasyonu ilk olarak [69]'da konu edilmiş ve en az 3 farklı duruşta elde edilen verilerle bu denklemin hesaplanabileceği gösterilmiştir. [70] önceki yönteme önemli sadeleştirmeler getirerek işlem karmaşıklığını azaltmıştır. Denklem (5.7) rotasyon matrisinin çözümünün ötelemeden bağımsız yapılabileceği görülmektedir. Seperable çözümler buradan yola çıkarak öncelikle rotasyon matrisini, sonra öteleme ifadesini çözmeyi önermişlerdir. İlk verimli çözüm yöntemlerinden olan [70]'te rotasyonun bulunması için açı eksen gösteriminden faydalanmıştır. [71]'de koterniyon cebri ile elde edilen doğrusal denklem takımı SVD (singular value decomposition) ile çözülerek kalibrasyon gerçekleştirilmiştir. [72]'de Lie algebra ile rotasyon matrisinin özellikleri kullanılarak sadeleştirilmiş kapalı form çözüm sunulmuştur. [73] farklı bir rotasyon ayrıklaştırması önererek problemi koterniyon gösterimi ile çözümlemiştir. [73] gürültü duyarlılığını azaltan yöntemlerini kronecker çarpımı ile ayrıklaştırma gerçekleştirdikleri yeni bir doğrusal denklem sistemi üzerinde sunmuşlardır.

Farklı rotasyon gösterimleri ile önerilmiş seperable çözümlerin yanında simultaneous çözümler de literatürde yaygındır. [74] ve [75] aynı anda rotasyon ve öteleme çözümü veren yöntemleri önererek, rotasyon hesaplamasındaki hatanın öteleme çözümündeki etkisini azaltmışlardır. Çok kısa özeti sunulan yukarıdaki temel yöntemlerin detayları [76]'da sunulmuştur.

X homojen dönüşüm matrisinin çözümünde separable, simultaneous ve iteratif çözüm yaklaşımları araştırmacılar tarafından sunulmuş temel önerilerdir. Rotasyon ve öteleme bilgileri ayrılarak, önce rotasyon ifadesinin sonrada öteleme bilgisinin elde edilmesi seperable çözüm ile mümkündür. Bu yaklaşım basit ve hızlı çözüm sunar. Ancak öteleme ifadesi çözülürken ilk aşamada elde edilen rotasyon bilgisinin kullanılması gerekir. Bu durumda rotasyon çözümündeki accumalated hata, pozisyon bilgisine taşınır. İki çözümün ağırlıklandırılması temelinde önerilen iteratif çözüm yöntemlerinde daha hassas çözümler üretilebileceği gösterilmiştir. Ancak bu durumda başlangıç kriterleri çözüm işleminin karmaşıklığını arttırmaktadır. İteratif çözüm yöntemlerinde seçilen giriş verileri ve başlangıç tercihleri sebebiyle optimum çözüme yakınsama garantisi olmadığı genel bilgi olarak [77] çalışmalarının girişinde sunulmuştur.

[78] ve benzeri çalışmalarda kalibrasyon yapılmadan, manipülatör kinematiğinden bağımsız olarak görsel sensör verilerinin kullanılabileceği gösterilmiştir. Hand-eye kalibrasyonu ile sensör düzlemi ve manipülatör taban düzlemi arasında ilişki bulunurken robotun ve sensörün öncelikle kalibre edilmesi gereklidir. [79]'de stereo kamera kullanılarak aynı anda robot, hand-eye ve kamera kalibrasyonun da başarı ile gerçekleştirilebileceği gösterilmiştir. 1990'larda kapalı formda çözülmüş hand-eye kalibrasyonu hesaplamasında günümüzde akademisyenler daha ziyade sürecin hassaslığını arttırmak üzere çalışmaktadırlar. Doğruluğu yükseltmek için [80]'de olduğu gibi kalibrasyon levhalarıyla beraber veya onların yerine çizgi lazerler, yapılandırılmış ışık kullanımları önerilmektedir.

Kalibrasyon levhası bakış açısı içinde olması gerekliliğinden dolayı manipülatör çok farklı duruşlarda konumlandırılamamaktadır. [80]'de sunulduğu yöntem ise kameranın robot ucunu göremediği durumlar için de kullanışlıdır. Bunun yanında daha yüksek hassaslıklar için veri setini özel duruşlarda elde etmek üzere kamera bakış açısının seçimi [81]'de, ölçümler arasından en uyumlu kümenin seçimi [82] tarafından önerilmiştir. Bu tercihler ile gürültülü veri seti bir derece iyileştirilse de manipülatör kaynaklı olabilecek gürültüler de sonuçta etkilidir. Optimizasyonda rotasyon ve öteleme gürültüleri arasında nasıl bir uyum sağlanabileceğine dair öneriler de [83]'de sunulmuştur. Gürültü sebebi ile bozulan doğruluk değerlerini düzeltme çalışmalarına [84] örnek gösterilebilir. Çalışmalarında kapalı form çözümlerinde gürültü ve ölçüm

hatalarının kalibrasyon doğruluğunu çok etkilediğini söyleyerek son-doğrultma adını verdikleri adımı kalibrasyon işlemine eklemişlerdir. Önerileri şöyledir. Gürültü sebebi ile hesaplanan Xdönüşüm matrisinin hatalı değerler üreteceği açıktır. Hatalarla hesaplanan koordinat değerleri ile gerçek değerler karşılaştırılarak doğrultma matrisi hesaplanabilir. Bu hesaplanan matris ile Xçarpılarak doğruluğu daha iyi hale getirilmiş Xelde edilerek kalibrasyon iyileştirilebilir.

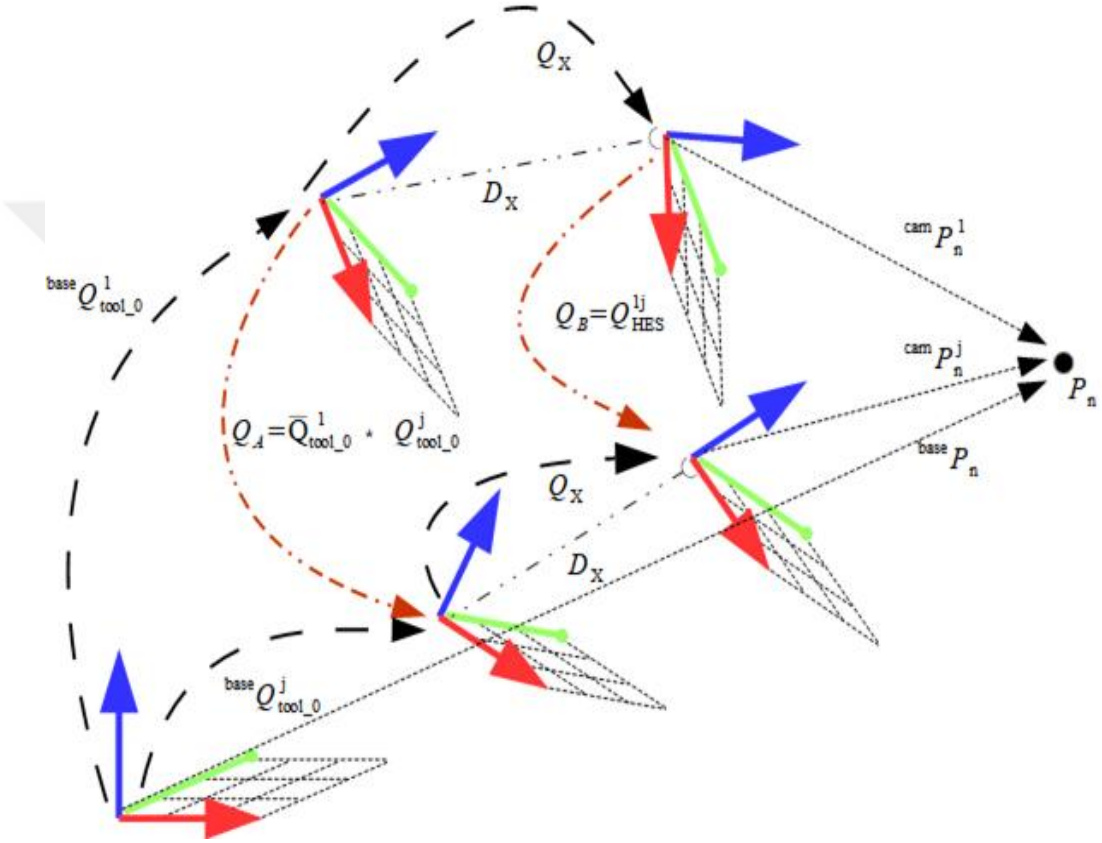
Bu yazıda sunulan yöntemin özünde, B_{ij}matrisini bulmak için veya kamera extrinsic parametrelerini bulmak için kullanılan mutlak oryantasyon kestirim fonksiyonunu değiştirmeden Denklem (5.7)'yi bulmak için de kullanma fikri vardır. Kalibrasyona referans olan örnek noktalarının düzlem üzerinde olmasının sağladığı avantaj ile bu noktalar üçe indirilerek işlem basitliği kazanan çözüm önerisi çok kolay uygulanabilir ve hızlı sonuç verir niteliktedir. Buradan da yola çıkarak RANSAC (random sample consensus) 'a benzer şekilde, 3 olan minimum örnek sayısı ile tüm örnek uzayından çok fazla sayıda olası çözüm üretmek önerilen yaklaşımdır. Son aşamada bu örnekler arasından istenen kritere en uygun olanın seçimi gerçekleştirilmektedir. Tercih edilen kriter reprojection hatalarının en küçük tutulmasıdır. Önerilen yöntem bu kriter için literatürdekilere göre en iyi çözümdür. Bu kriter ile belki doğruya en yakın rotasyon ve öteleme bulunamamaktadır fakat endüstride pek çok uygulama için istenen tutarlılık sağlanacaktır. Analiz sonuçları ile bu görüş desteklenmektedir. Yapılan karşılaştırmalarda önerilen yöntemin hemen hemen bütün kriterler için literatürde yer alan diğer yöntemlere karşı en iyi sonuç verdiği görülmektedir. Yazının kalan kısmının organizasyonu şöyledir. Bölüm 2'de hand-eye kalibrasyonu için geliştirilmiş yöntemler formüllerle biraz daha detaylandırılacaktır. Bölüm 3'de önerilen yöntemin tanıtımı yapılacak ve son bölümde ise sentetik veriler ile ve gerçek veriler ile yapılan analizlerin karşılaştırmalı sonuçları değerlendirilecektir.

5.6. Robotik Kamera Uygulamaları İçin Hand-Eye Kalibrasyonu

Sensör düzleminde elde edilen verilerin kullanımı için kalibrasyon zorunlu bir uygulama değildir. Literatürde [78]'de olduğu gibi kalibrasyon ihtiyacına gerek duyulmadan, robot kinematiğinden bağımsız görsel sensör uygulamalarına ait çalışmalar mevcuttur. Güvenilirliğin çok önemli olduğu endüstriyel uygulamalarda ise

sensör düzlemi ile manipülatör flange düzlemi arasındaki ilişki Denklem (5.7) çözülerek tespit edilmektedir.

$$
\begin{aligned}
&AX = XB \\
&\begin{bmatrix} R_A & t_A \\ 0 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} R_X & t_X \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_X & t_X \\ 0 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} R_B & t_B \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\
&\begin{bmatrix} R_A R_X & R_A t_X + t_A \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_X R_B & R_X t_B + t_X \\ 0 & 1 \end{bmatrix}
\end{aligned}
\tag{5.7}
$$



Şekil 5.25. Tabandan göreli nokta ile dönüşümler

Hand-eye kalibrasyonunda Denklem (5.7)'de homojen dönüşüm matrisi ile gösterilmiş bağıntıda sensör duruşunu tanımlayan uygun X değerinin bulunması gerekir. İlk düşünülen çözüm $X = min_X(\sum_{i=1}^{n}\|A_iX - XB_i\|)$ optimizasyonu ile işlemin kolaylıkla tamamlanabileceğidir. Eş zamanlı (simultaneous) çözüm yöntemleri bir fonksiyon içinde çoğunlukla iteratif olarak bu denklem üzerinde çözüm ararlar. Denklem (5.7) deki rotasyon ve ötelemenin

$$
\begin{aligned}
&R_A R_X = R_X R_B \\
&R_A t_X + t_A = R_X t_B + t_X
\end{aligned}
\tag{5.8}
$$

şeklinde ayrıklaştırılarak, öncelikle rotasyonun ötelemeden bağımsız olarak çözülmesi de diğer bir yaklaşımdır. [70]'te çalışmada Denklem (5.8) ile $R_A = R_X R_B R_X^T$ şeklinde yeniden düzenleyerek Rotasyon matrislerini unit eigen vektörler ile göstererek $\vec{n}_A, \vec{n}_B$ vektörlerinin farklarının ve toplamlarının orthagonal olmasından yola çıkarak

$$\begin{aligned} 0 &= (\vec{n}_A - \vec{n}_B) \cdot \vec{n}_X \\ 0 &= (\vec{n}_A - \vec{n}_B) \cdot (\vec{n}_A + \vec{n}_B) \end{aligned} \tag{5.9}$$

denklemlerini kurmuş ve

$$(\vec{n}_A + \vec{n}_B) \times n = (\vec{n}_A - \vec{n}_B), \vec{n} = \vec{n}_X \tan(\theta_X) \tag{5.10}$$

ile çözümünü tamamlamıştır. [84]'de benzer şekilde Denklem (5.9) ve Denklem (5.10)'u değerlendirerek R_X için Denklem (5.11)'deki koterniyon gösterimini kullanarak kapalı form çözüm geliştirmişlerdir.

$$\begin{aligned} Q &= q_0 + q_1\hat{\imath} + q_2\hat{\jmath} + q_3\hat{k} \\ &= S + \vec{V} \end{aligned} \tag{5.11}$$

$$Q_A * Q_X - Q_X * Q_B = (Q_A - \bar{Q_B}) * Q_X = 0 \tag{5.12}$$

$$\begin{pmatrix} S_A - S_B & -(\vec{V}_A - \vec{V}_B)^T \\ -(\vec{V}_A - \vec{V}_B) & [(\vec{V}_A + \vec{V}_B)]_X + (S_A - S_B) I_3 \end{pmatrix} Q_X = 0 \tag{5.13}$$

Denklem (5.12) [74]'un matris gösterimi yerine quaternion ifadesini kullanarak rotasyon çözümüne temel aldığı ifadedir. [85]'te benzer şekilde koterniyon çarpımlarını açarak elde ettikleri Denklem (5.13) denklemini SVD ile çözerek Q_X ifadesini bulmuşlardır.

$$(R_A - I) t_X = R_X t_B - t_A \tag{5.14}$$

Denklem (5.14) ise neredeyse tüm saparable yöntemlerinin öteleme değerini bulmak için kullandığı doğrusal denklem takımıdır.

Robot uç konumunu ve bu nokta referans alınarak elde edilecek kinematik bilgilerin çalışma bölgesi içinde seçilmiş referans koordinat sistemine aktarılması için ilk yapılması gereken seçilmiş robota ait düz kinematik bağıntıların elde edilmesidir. Önerilen yöntemin tanıtımına geçmeden önce testlerini üzerinde gerçekleştirdiğimiz 6

eksenli eklemli robot manipülatörün düz kinematik bağıntılarını sunmanın faydalı olacağı düşünülmektedir.

$$\begin{aligned} Q &= \quad RtoQ(N,\theta) \\ &= \cos(\tfrac{\theta}{2}) + \sin(\tfrac{\theta}{2}) \cdot \tfrac{\vec{N}}{\|\vec{N}\|} \end{aligned} \tag{5.15}$$

$$\begin{aligned} \tilde{P} &= rot(Q,P) \\ &= Q * P * \bar{Q} \end{aligned} \tag{5.16}$$

$D_i$koordinat düzlemi merkezleri arasındaki öteleme (eklem uzunlukları), N_i rotasyon doğrultusunu işaret eden pivot eksenler, θ_i dönüş açısını göstermektedir D_0, N_0 Robot tabanı ile referans koordinat sistemini ilişkilendirmek için kullanılmıştır. Benzer şekilde D_7, N_7 tool koordinat düzlemi için tanımlanmıştır. Hesaplamalar boyunca taban ve referans koordinat sistemi $\theta_0 = 0$alınarak eşlenik tutulmuştur. Rotasyon hesaplamalarında Denklem (5.11)'de hatırlatması yapılan koterniyon gösterimi tercih edilmiştir.

$$\begin{aligned} Q_{(0)} &= \quad RtoQ(N_{(0)}, \theta_{(0)}) \\ Q_{(i)} &= Q_{(i-1)} * RtoQ(N_{(i)}, \theta_{(i)}) \end{aligned} \tag{5.17}$$

$$\begin{aligned} P_{(0)} &= \quad rot(Q_{(0)}, D_{(0)}) \\ P_{(i)} &= P_{(i-1)} + rot(Q_{(i)}, D_{(i)}) \end{aligned} \tag{5.18}$$

Açı eksen gösteriminden Denklem (5.15) ile koterniyonlar elde edildikten sonra birleşik dönüş Denklem (5.17) ile hesaplanmıştır. P noktasının Q ile döndürülmesi sonucu alacağı $\tilde{P}$ yeni konum $\bar{Q}$ konjügati göstermek üzere Denklem (5.16) ile hesaplanır. Denklem (5.17) ve Denklem (5.18) fonksiyonlarının çalıştırılması ile kinematik zincirin ilgilenilen herhangi bir halkası için pozisyon ve oryantasyon bilgisine ulaşılır.

Konum ölçüm düzeneklerinin neredeyse tamamı ölçümleri, sensörlerinin merkezi olan sabit bir referans noktasını esas alınarak sunarlar. Bu ölçüm düzeneklerini manipülatör gibi hareketli bir yapının üzerine bağlayıp verilerin referans düzleme aktarılması pek çok endüstriyel uygulamada önemli bir gerekliliktir. Şekil 5.25'te tool_0 düzlemine bağlanmış ölçüm düzeneği koordinat düzlemi gösterilmiştir. Burada amaç, noktanın taban düzlemine göre konumunun tespit edilmesidir. Ölçüm düzeneği kamera referans

düzlemine göre ${}^{\text{cam}}P_{\text{n}}^{\text{j}}$ değerlerini sunmaktadır. Alt indis n ölçülen nokta numarasını, üst sağ indis j, ölçümün yapıldığı duruşa; üst sol indis cam ölçümün referans düzlemine, işaret etmektedir.

$$ {}^{base}P_n = {}^{base}P_{\text{tool_0}}^{\text{j}} + rot({}^{base}Q_{\text{tool_0}}^{\text{j}}, D_X) + rot({}^{base}Q_{\text{cam}}^{\text{j}}, {}^{cam}P_n^j) \tag{5.19} $$

ile j.duruşta gerçekleştirilen${}^{\text{cam}}P_{\text{n}}^{\text{j}}$ ölçüm sonucu kullanılarak, ${}^{\text{base}}P_{\text{n}}$ değeri hesaplanır. Hesaplamanın gerçekleştirilmesi için robot konfigürasyon bilgilerine ilave olarak D_X, ${}^{base}Q_{\text{cam}}^{\text{j}}$'in bilinmesi gerekir. Ölçüm düzeneğinin j.duruştaki camdüzleminin $base$düzlemine göre rotasyonunu gösteren ${}^{base}Q_{\text{cam}}^{\text{j}}$ifadesi Denklem (5.20) ile hesaplanır.

$$ {}^{base}Q_{\text{cam}}^{\text{j}} = {}^{base}Q_{\text{tool_0}}^{\text{j}} * Q_X \tag{5.20} $$

Şekil 5.25'te gösterilen ve (18)'de tanımlanan $D_{\text{X}} = {}^{\text{tool_0}}P_{\text{cam_org}}^{\text{j}}$ kamera koordinat sistemi merkezinin robot flanşından (tool_0) olan konumunu, ise $Q_{\text{X}} = {}^{\text{tool_0}}Q_{\text{cam}}^{\text{j}}$ kamera düzleminin tool_0 koordinat düzlemine göre oryantasyonu göstermektedir. D_X, Q_X değerlerinin bulunması hand-eye kalibrasyonu ile gerçekleştirilir. Kamera düzleminin taban referans düzlemine göre rotasyonu olan ${}^{base}Q_{\text{cam}}^{\text{j}}$, Şekil 5.25'e bakıldığında görüleceği üzere aynı zamanda Denklem (5.20) ile de bulunabilir. Burada $Q_{\text{HES}}^{\text{ij}} i.$ duruştan $j.$ duruşa geçmek için uygulanması gereken rotasyondur.$Q_A = \overline{\text{Q}}_{\text{tool_0}}^{\text{i}} * Q_{\text{tool_0}}^{\text{j}}$ve $Q_B = Q_{\text{HES}}^{\text{ij}}$ ile tanımlandığında

$$ \begin{aligned} &{}^{base}Q_{cam}^{j} = {}^{base}Q_{cam}^{i} * Q_{HES}^{ij} \\ &{}^{base}Q_{tool_0}^{j} * Q_X = {}^{base}Q_{cam}^{i} * Q_B \\ &{}^{\text{base}}\overline{\text{Q}}_{\text{tool_0}}^{\text{i}} * {}^{\text{base}}Q_{\text{tool_0}}^{\text{j}} * Q_{\text{X}} = Q_{\text{X}} * Q_{\text{B}} \\ &Q_{\text{A}} * Q_{\text{X}} = Q_{\text{X}} * Q_{\text{B}} \end{aligned} \tag{5.21} $$

ifadesine ulaşılır. Bu ifade $AX = XB$olarak bilinen, genellikle matris formunda değerlendirilen literatürde çokça konu edilmiş Denklem (5.7) denklemindeki rotasyonel kısımdır.

5.7. Kamera Optimizasyon Tercihleri ve Metlikler

$$\begin{aligned}\delta_{R_{3x3}} &= [R_A R_X - R_X R_B] \\ \delta_{t_{3x1}} &= [(R_A t_X + t_A) - (R_X t_B + t_X)] \\ E &= AX - XB = \left\| \begin{matrix} \delta_R & \delta_t \\ 0 & 1 \end{matrix} \right\|\end{aligned} \tag{5.22}$$

Neredeyse literatürdeki tüm yöntemler Denklem (5.22)'deki hata terimini azaltmak üzere kurgulanmıştır. E_{mxn} iki veri kümesi arasındaki farkı ifade etmek üzere, genel gösterim olarak, $\|\bullet\|$ frobenius norm (L_2 olarak da sunulan euclidean norm) $\|E\| = \sqrt{\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} | e_{ij}^2 |}$ile tanımlanan ölçüt yalnız mesafe değil, aynı zamanda her türlü numerik karşılaştırma için sıklıkla kullanılmaktadır. Farklı birimlerde sayısal değerlerin gruplanabildiği E'nin tüm elemanlarının aynı ağırlıkta değerlendirilmesi hatalı yorumlara sebep olabilir.

Bir duruşu tanımlamak için referans koordinat düzlemine karşı konumun ve oryantasyonun bilinmesi gerekir. İki veya daha fazla duruşu göreceli olarak değerlendirmek için ise bu duruşların birbirlerine ne kadar yakın olduğu ölçülmelidir. P_r, P_s duruşları arasındaki konumsal değerlendirme genellikle,

$$d(t_{r:}, t_{s:}) = (\sum_{k=1}^{dim} |t_{\mathrm{rk}} - t_{\mathrm{sk}}|^p)^{1/p} \tag{5.23}$$

ile tanımlanabilen mesafe ölçümü ile gerçekleştirilir. L_p norm olarak bilinen bu fonksiyon ile $p = 1,2,\ldots\infty$ seçerek large outliers'lara vereceğimiz değer ve işlem karmaşıklığı kontrol edilebilir. Söz konusu oryantasyon olduğunda metrik belirlemek güçleşmektedir. Oryantasyon için rotasyon matrisi ve birim koterniyon özelikle robotik uygulamalarda tercih edilen gösterim biçimleridir. [86] 'de rotasyon metrikleri ile ilgili karşılaştırma; çözünürlük, doğrusallık ve işlem kompleksliği değerlendirilerek yazarlar tarafından sunulmuştur.

$$\begin{aligned}d_{geod.}(R_r, R_s) &= \| \log(R_r^{-1} R_s) \| \\ d_{hyper.}(R_r, R_s) &= \| \log(R_r) - \log(R_s) \| \\ d_{frob.}(R_r, R_s) &= \| R_r - R_s \|\end{aligned} \tag{5.24}$$

ifadeleri rotasyon matrisine dayalı ölçütlerdir. $\theta = \cos^{-1}(|\ q_r \cdot q_s\ |)$ olarak tanımlandığında;

$$\begin{aligned} d_1(q_r, q_s) &= 1 - |\ q_r \cdot q_s\ | \\ d_2(q_r, q_s) &= min\{\|\ q_r - q_s\ \|, \|\ q_r + q_s\ \|\} \\ &= \sqrt{2(1 - |\ q_r \cdot q_s\ |)} \\ d_{geod.}(q_r, q_s) &= 2\theta \end{aligned} \tag{5.25}$$

$d_1 \in [0,1], d_2 \in [0\sqrt{(2)}], d_{geod} \in [0, \pi]$aralığında tanımlı koterniyon gösteriminden türetilmiş ölçütlerdir. d_{geod} bağıntısı rotasyon matrisi ile verilen geodesic metrik ile aynı olduğu [86]'de gösterilmiştir.

$$J = \delta_R + \lambda\delta_T \tag{5.26}$$

İteratif yöntemlerde Denklem (5.26)'de gösterildiği gibi rotasyon ve öteleme hataları arasında bir uyum aranmaktadır.

Pratikte A, B matrislerindeki gürültü nedeni ile arama uzayında çok sayıda yerel minimum bulunur. A_{ij} Matrisi robotun farklı duruşları arasındaki ilişkiyi tanımlayan matristir. Modern endüstriyel robotlarda bu matrise referans olan ölçümler oldukça hassas yapılabilmektedir. Ölçüm hassaslığından ziyade bu matrisi sistematik hata kaynağı kabul edilecek katı gövde esnekliği olumsuz olarak etkilemektedir. B_{ij} Matrisi ise sensörün referans noktaya göre iki farklı duruşu arasındaki ilişkiyi tanımlar. Robot kinematiğine göre yapılan ölçümlerden çok daha fazla gürültü içerir, hatalı algılama kaynaklı çok ekstra yanlış değerler içerebilir. Bu aşırı hatalı B_{ij} matrislerinin outliers kabul edilerek ayıklanması han-eye kalibrasyon performansını iyileştirecektir. B_{ij}'yi belirlerken çok sayıda örnek nokta elde edilmesinin avantajı değerlendirilebilir. Filtreleme yapılabilir.

Örneklerin normal dağılım göstermesi durumunda en düşük hata ile hesaplamalar yapılabilir. Ancak A_{ij} için bu durum geçerli değildir. 6 eklemli tipik bir endüstriyel robot düşünülürse bir eklem açısının hatalı okunması tüm matrisi kullanışsız hale getireceği anlaşılabilir. Gürültü sebebi ile Denklem (5.25), Denklem (5.25) metrikleri yanıltıcı olabilir. Gerçek R_X, t_X değerine en yakın sonuç, metriklerde ön sıralarda yer almayabilir, tersi durumda söz konusudur. Burada karar verilmesi gereken hangi tür

uygulama için kalibrasyon yapıldığıdır. Sensör ölçüm sonuçlarında noktaların pek çok uygulamada olduğu gibi birbirlerine göre durumları önemli ise yukarıda verilen metrikler yerine projeksiyondan faydalanmak daha doğru olacaktır.

$$\overline{{}^{\text{base}}\text{P}_\text{n}} = \frac{1}{\text{N}}\left(\sum_{\text{i}=1}^{\text{N}} {}^{\text{base}}\text{P}_\text{n}^\text{i}\right) \tag{5.27}$$

$$\text{d}_{\text{org}}(\text{R},\text{t}) = \frac{1}{\text{N}}\left(\sum_{\text{i}=1}^{\text{N}} \left\| \overline{{}^{\text{base}}\text{P}_\text{n}} - {}^{\text{base}}\text{P}_\text{n}^\text{i} \right\|\right) \tag{5.28}$$

$$\text{d}_{\text{back}}(\text{R},\text{t}) = \frac{2}{\text{N}(\text{N}-1)}\left(\sum_{\text{i}=1}^{\text{N}-1}\sum_{\text{j}=\text{i}}^{\text{N}} \left\| {}^{\text{base}}\text{P}_\text{n}^\text{i} - {}^{\text{base}}\text{P}_\text{n}^\text{j} \right\|\right) \tag{5.29}$$

Kalibrasyon ile bulunan R_X, t_X değeri ile robot tabanına göre hesaplanan ${}^{base}P_n$ noktalarının merkezi $\overline{{}^{base}P_n}$ tespit edilerek, Denklem (5.27) ile hesaplanan, bu merkezden her bir noktanın uzaklığı bir metrik kabul edilebilir. Bir duruşta yapılan ölçüm kinematik bağıntılarla diğer duruş için hesaplanabilir ve Denklem (5.29) ile bu durumdaki hata ölçülebilir.

5.8. Konum ve Rotasyon Tespitini İçin Yeni Yöntem Önerisi

Önerdiğimiz yönteme Denklem (5.7)'in $Q_A = Q_X * Q_B * \bar{Q}_X$ şeklinde ifade edilebilmesi temel alınmıştır. Q_A, Q_B koterniyonlarının skaler kısımları eşit ve vektörlerinin normu da aynı olduğunda $\vec{V}_A = Q_X * \vec{V}_B * \bar{Q}_X$ tanımı, bilinen koterniyon dönüşünü ifade eder. Buradan yola çıkarak $\vec{V}_B$ vektörünü döndürüp $\vec{V}_A$ konumuna getirecek rotasyonun bulunması için [67]'de sunulan yöntemi kullanarak Q_X çözülebilir.

Bu çalışmada, tüm duruşlar arasından seçilen üçerli duruş grupları için çok sayıda $Q_X$çözüm seti elde edilmesini ve her bir Q_X değeri için de D_X'in bulunmasını önerilmektedir. (Q_X, D_X)çözümleri arasından Denklem (2.28) veya Denklem (5.29) kriterlerini minimum yapan değerin ise final çözüm kabul edilmesi önerilir.

Tüm algılanan gürültülü verilerle kalibrasyon işlemine devam etmek işlem yükünü matrislerin boyutunu arttırarak zorlayacağı için ve hatanın sonraki süreçlere yayılımı kontrol edilemeyeceği için ilk olarak bu noktaların rafine edilmesi önerilmektedir. Kamera aracılığı ile elde edilen ölçüm noktalarından düzlem denklemi elde edilmesi ile süreç başlar. Ölçümlerin bulunduğu konumdan denklemi elde edilmiş düzlemin en

yakın noktasına projeksiyonu çıkarılan noktalar için gerçek değerden sapmanın azaltılabileceği açıktır.

Sunduğumuz yöntemde, düzlem üzerinde olduğunu bildiğimiz noktalardan öncelikle düzlem denklemi elde edilmiştir. Daha sonra bu düzlem üzerinde 3 nokta seçilmiştir. Seçilen 3 noktanın bir tanesi bütün noktaların ortalaması alınarak düzlem merkezinde belirlenmiştir. Diğer ikisi ise kalibrasyon levhasının uzun ve kısa kenarı doğrultusunda seçilmiştir. Rotasyonu bulmak için yalnız 3 noktanın kullanılması ile [67]'deki en basit çıkartımı kullanım imkanı sağlanmıştır. Referans olarak üç noktanın seçilmesi ile coplanarity garantilenmiştir. Öteleme etkisini yok saymak için $r_{l,i}, r_{r,i}$ sol ve sağ kümedeki i.noktayı, $\bar{r}_l, \bar{r}_r$, bu kümelerin merkezini göstermek üzere [66]'deki aşağıdaki hesaplamalar sunulmuştur.

$$\begin{aligned}\vec{r}_{l,i} &= \frac{r_{l,i}-\bar{r}_l}{\|r_{l,i}-\bar{r}_l\|} \\ \vec{r}_{r,i} &= \frac{r_{r,i}-\bar{r}_r}{\|r_{r,i}-\bar{r}_r\|}\end{aligned} \tag{5.30}$$

noktalarını kullanarak aradaki dönüş bulunabilir. 3 noktadan oluşan sol ve sağ kümelerinin tanımladığı düzlemlerin normal vektörleri, $\vec{n}_l = \vec{r}_{l,2} \times \vec{r}_{l,1}, \vec{n}_r = \vec{r}_{r,2} \times \vec{r}_{r,1}$ ile hesaplandıktan sonra, normaller arasındaki açı,

$$\begin{aligned}\theta_a &= acos(\vec{n}_l \cdot \vec{n}_l) \\ &= asin(\| \vec{n}_l \times \vec{n}_l \|)\end{aligned} \tag{5.31}$$

ile hesaplanabilir. Her iki düzlemin kesişim hattı $\vec{n}_a = \vec{n}_l \times \vec{n}_l$ ile tespit edildikten sonra düzlemler $Q_a = RtoQ(\vec{n}_a, \theta_a)$ dönüşü ile üst üste çakıştırılabilir. $\vec{\tilde{r}}_{l,i} = rot(Q_a, \vec{r}_{l,i})$ vektörleri ve $\vec{r}_{r,i}$ artık aynı düzlem üzerindedir. Sırada düzlem üzerindeki dönüşün bulunması kalmıştır.

$$\begin{aligned}C &= \sum_{i=1}^{3}(\vec{r}_{r,i} \cdot \vec{\tilde{r}}_{l,i}) \\ S &= \left(\sum_{i=1}^{3}(\vec{r}_{r,i} \times \vec{\tilde{r}}_{l,i})\right) \cdot \overrightarrow{n_r}\end{aligned} \tag{5.32}$$

tanımları yapıldıktan sonra,

$$\begin{aligned}\theta_p &= acos(\pm C/\sqrt{S^2 + C^2}) \\ &= asin(\pm S/\sqrt{S^2 + C^2})\end{aligned} \tag{5.33}$$

ile düzlem üzerindeki dönüşün açısı bulunur. Bu durumda dönüş $Q_p = RtoQ(\vec{n}_r, \theta_p)$ ile tanımlanır. $r_{l,i}, r_{r,i}$Arasındaki dönüş ilişkisi $r_{r,i} = rot(Q_{rl}, r_{l,i})$'yi sağlayacak

$$Q_{rl} = Q_p * Q_a \tag{5.34}$$

ile bulunur. Gerekiyorsa öteleme değeri de

$$t = \bar{r}_r - rot(Q_{rl}, \bar{r}_l) \tag{5.35}$$

ile bulunabilir. Bu çıkartım ve detayları [67]'deki bulunabilir.

Kamera Sistemlerinde AX=XB Denklem Çözümü:

$$\begin{aligned} Q_A &= Q_X * Q_B * \bar{Q_X} \\ &= Q_X * S_B * \bar{Q_X} + Q_X * \overrightarrow{V_B} * \bar{Q_X} \\ &= S_B + Q_X * \overrightarrow{V_B} * \bar{Q}_{\mathrm{X}} \end{aligned} \tag{5.36}$$

Denklem (5.36)'dan yola çıkarak $S_{\mathrm{A}} = S_{\mathrm{B}}, \overrightarrow{V_{\mathrm{A}}} = Q_{\mathrm{X}} * \overrightarrow{V_{\mathrm{B}}} * \bar{Q}_{\mathrm{X}}$ olması gerektiği açıktır. $Q_X = absROT(V_B, V_A)$ şeklinde fonksiyon ile gösterebileceğimiz mutlak oryantasyon kestirimi ile hesaplanan Q_X(5.20)'de verilen ${}^{base}Q^{\mathrm{j}}_{\mathrm{cam}}$ ve (5.19) deki $rot({}^{base}Q^{\mathrm{j}}_{\mathrm{cam}}, {}^{cam}P_n^j)$ bulunur. ${}^{base}Q^{\mathrm{j}}_{\mathrm{tool_0}}$ tanımındaki koterniyon gösterimi $A^j_{3\mathrm{x}3}$ rotasyon matrisine çevrilebilir.

Bu durumda,

$A^j * D_X = rot({}^{base}Q^{\mathrm{j}}_{\mathrm{tool_0}}, D_X)$ olacaktır. D_X'i bulmak için Denklem (5.19),

$$\begin{aligned} B_j &= {}^{base}P_n - {}^{base}P^{\mathrm{j}}_{\mathrm{tool_0}} - rot({}^{base}Q^{\mathrm{j}}_{\mathrm{cam}}, {}^{cam}P_n^j) \\ &= rot({}^{base}Q^{\mathrm{j}}_{\mathrm{tool_0}}, D_X) \\ &= A^j * D_X \end{aligned} \tag{5.37}$$

olarak düzenlenebilir. Ancak ${}^{base}P_n$ bilinmediği için $A^{ij} = A^i - A^j, B_{ij} = B_i - B_j$ tanımları yapılırsa,

$$B_{ij} = A^{ij} \cdot D_X \tag{5.38}$$

denkleminden kolayca $D_X$hesaplanabilir. Sunulan yönteme ait akış Ek-D'de algoritma.1'in içinde verilmiştir. Hand-Eye kalibrasyonu algoritması.

Çalışmada referans levha olarak 8x13'lük dama tahtası kullanılmıştır. Gerçek sensör testlerinde robotu konumlandırdığımız 30 farklı duruşa ait açı değerlerini kullanarak, bilinen grand-truth Q_X, D_X, için yapay sensör verisi elde edilmiştir.

Manipülatör açı değerlerine $\sigma_{rob} = 0, \dots, 0{,}4^0$aralığında 0 ortalama değerli normal dağılımlı $\theta_{noise} = N(0, \sigma_{rob})$ eklenmiştir.

Steryo kamera verilerine ise uniform dağılımlı $\overrightarrow{P_U} = \{U[-1,1]\hat{x}, U[-1,1]\hat{y}, U[-1,1]\hat{z}\}$ vektörünün normu $\sigma_{cam} = 0, \dots, 20mm$ ile sınırlandırılarak $\vec{P}_{noise} = N(0, \sigma_{cam}) \frac{\vec{P}_U}{\|\vec{P}_U\|}$ eklenmiştir.

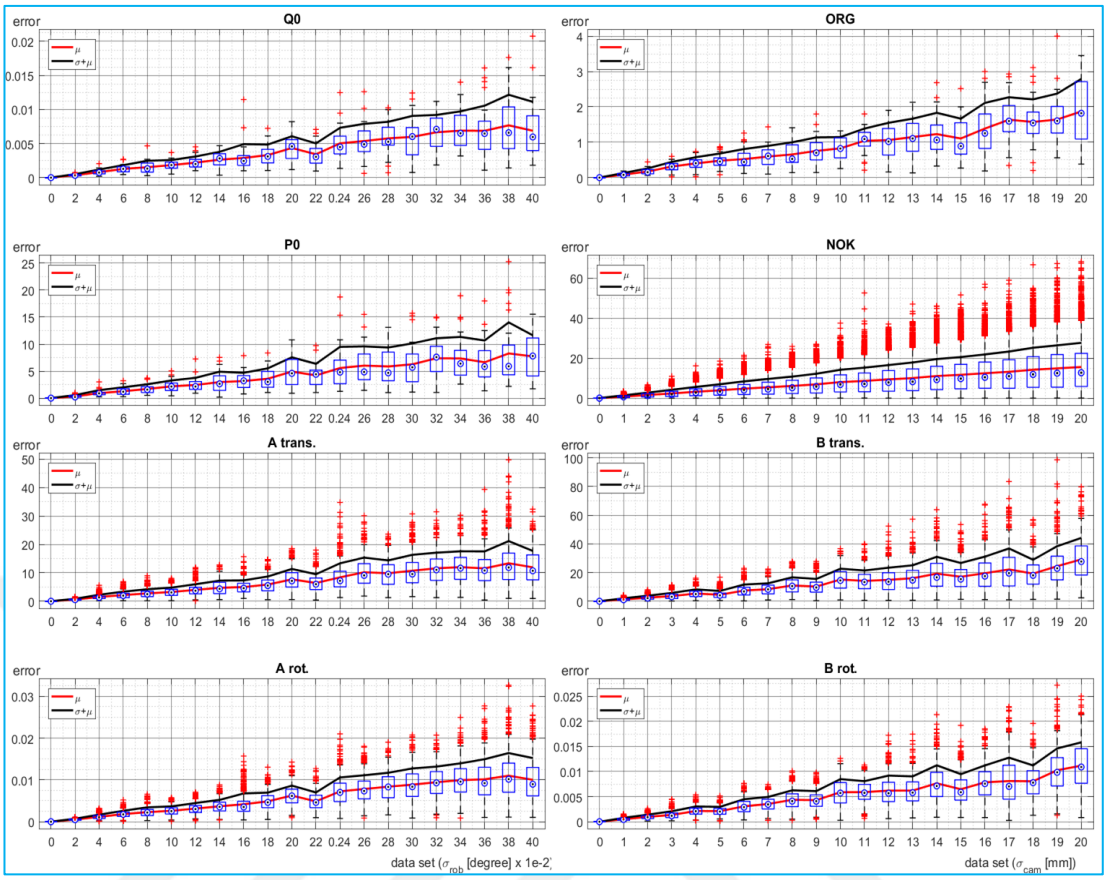
Yazıda takip eden bölümlerdeki grafiklerde karşılaştırılan algoritmalar için kullanılan etkiler şöyledir. $TRUTH$ gerçek, bozulmasız Q_X, D_X ile elde edilen sonuçları yansıtmaktadır.

Ek-D'de yer alan algortima.1'de 6. adımda sunulan seçim işleminde optimizasyon kriteri olan $\delta_{R_{3x3}}$ için, MC_R, $\delta_{t_{3x1}}$için MC_T, (5.28)'deki $d_{back}(R,t)$ için MC_B(5.28)'deki $d_{org}(R,t)$ için MC_O, aynı formüldeki $\overline{{}^{base}P_n}$ yerine gerçek, bozulmasız ${}^{base}P_n$ için MC_Y ile tanımlanmış önerilen yöntemin varyasyonlarıdır.

MC ise herhangi bir seçim yapılmadan, [67]'deki çok sayıda nokta için önerilen, genelleştirilmiş $Q_X = absROT(V_B, V_A)$ çözümüne dayanan alagoritmadır.

ABB IRB 1400 serisi endüstriyel robot, PtGrey Bumblebee XB3 stereo kamera ile pratik testler yapılmıştır. Hand-eye kalibrasyonunun zorluklarından biri başarımı gösterecek gerçek verinin olmamasıdır. Bu sebeple optimizasyon yalnız algılanan ve hesaplanan büyüklükler arasında yapılabilir. Sentetik verilerin kullanılması ise önerilen algoritmaların performansını değerlendirirken gereklidir.

Böylelikle farklı gürültü seviyelerinde, farklı örnek sayılarında performans test edilebilir. Şekil.5.26'da bu çalışmada kullandığımız sentetik verilerin karakteristiği sunulmuştur.



Şekil 5.26. Farklı indekslere gürültü jenerasyonu

Hand-eye kalibrasyonunda amaç sensörün gerçeğe en yakın rotasyon ve öteleme değerleri olan Q_X, D_X'i tespit etmektir. Ancak ölçüm, algılama hataları eklenince pratik uygulamalarda olumsuz durumlarla karşılaşılabilmektedir. Gerek algılayıcıda tespit edilen konum bilgisi, gerekse kinematik hesaplamalarda okunan açı değerlerindeki gürültü beklendiği gibi ortalama değeri sıfır olan normal dağılım göstermeyebilir. Rastlantısal hata kaynaklarına ilave olarak sistematik hatalar da söz konusu olduğunda Q_X, D_X'in hatasız hesaplanmış gerçek değerleri kullanılsa bile, hesaplanan konum değerleri hatalı olabilir. Şekil 5.26'da sol tarafta verilen grafikler manipülatör açılarındaki gürültünün etkisini, sağdaki grafiklerde ise kamera tarafından pozisyonları ölçülen noktalardaki gürültü etkisini yansıtmaktadır. $Q0, P0$ başlıklığı altında sunulan verileri herhangi bir şekilde filtreleme imkanı yoktur. Filtre uygulayabilmek için aynı duruş için istatistiksel olarak anlamlı sayıda tekrar tekrar ölçüm yapılması gerekir. Bu durumda da yüzlerce kayıt alınması zorunlu olacaktır. Modern endüstriyel robotlarda burada gösterilenle kıyaslanamayacak derecede açı okuma hatası düşüktür. Ancak bazı duruşlarda ve farklı toolinglere sahip

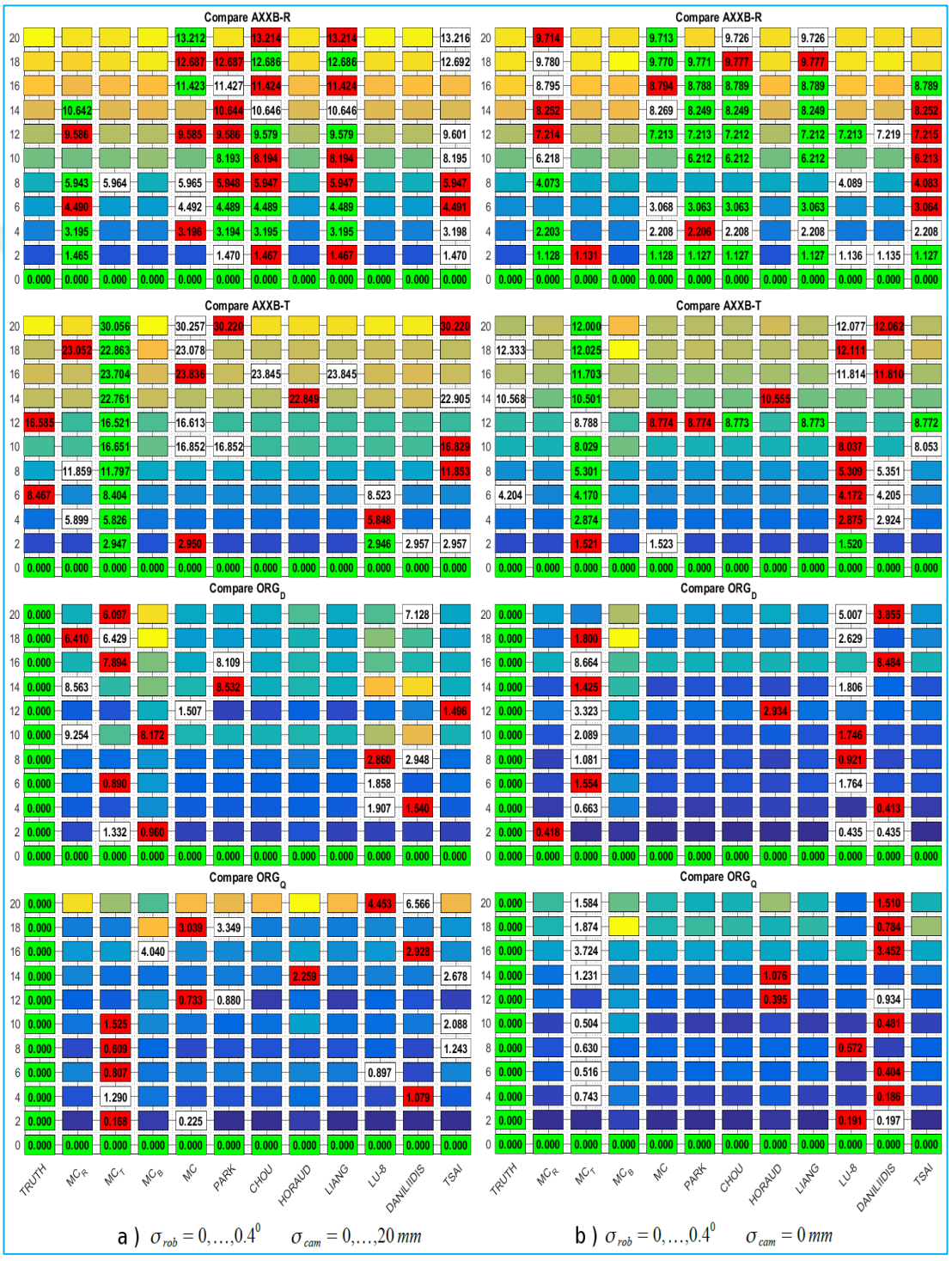
manipülatörlerde katı gövdenin esnemesinden kaynaklı olarak hesaplanan konum ile gerçek konum arasında farklar olacaktır. Sağ tarafta, ORGbaşlığı altında referans levhada bulunan toplam 104 değerlendirme noktasının ortalama değeri sunulmuştur. Her ne kadar çok sayıda nokta olsa da istatistiksel olarak yeterli olmadığı için değerler sıfır ortalama değerinden farklı çıkmıştır. Oysa eklenen sentetik gürültüler sıfır ortalama değerli normal dağılım fonksiyonundan üretilmiştir. Bu çalışmada her bir duruş için yalnız bir kayıt tutulmuş toplam 30 farklı duruştan veri toplanmıştır. Tüm grafiklere dikkatli bakılırsa çok fazla sayıda, standart sapma aralığı dışında yüksek aykırılıkta verilerin olduğu görülecektir. Özellikle manipülatör üzerindeki gürültüler tüm literatürde sunulan algoritmalar ve bu yazıda önerilen algoritma için sorun teşkil etmektedir. Algoritma performanslarını test etmek için kurguladığımız bu veriler yanıltıcı olabilir. Pratik uygulamalarda baskın olan kamera gürültüsüdür. $\sigma_{rob} = 0^0, \sigma_{cam} = 0{,}0 - 20{,}00$ mm değerleri için elde ettiğimiz sonuçları bu açıdan ayrıca değerlendirmek gerekir.

Şekil 5.27'de Denklem (5.23) ile hesaplanan euclidean mesafe performans indeksi olarak kullanılmıştır. Dikey eksen farklı gürültü seviyelerini göstermektedir. Sol taraftaki grafikler için 20 ile gösterilen satır $\sigma_{rob} = 0{,}4^0, \sigma_{cam} = 20$ mm, sağdakiler için ise $\sigma_{rob} = 0{,}4^0, \sigma_{cam} = 0$ mm ağırlığında gürültülü verileri göstermektedir. Her bir koşulda yalnız en iyi üç değer için rakamsal sonuçlar yazılmıştır. Rotasyona ait sunumlarda yazılan rakamlar 1000 ile çarpılarak gösterilmektedir.

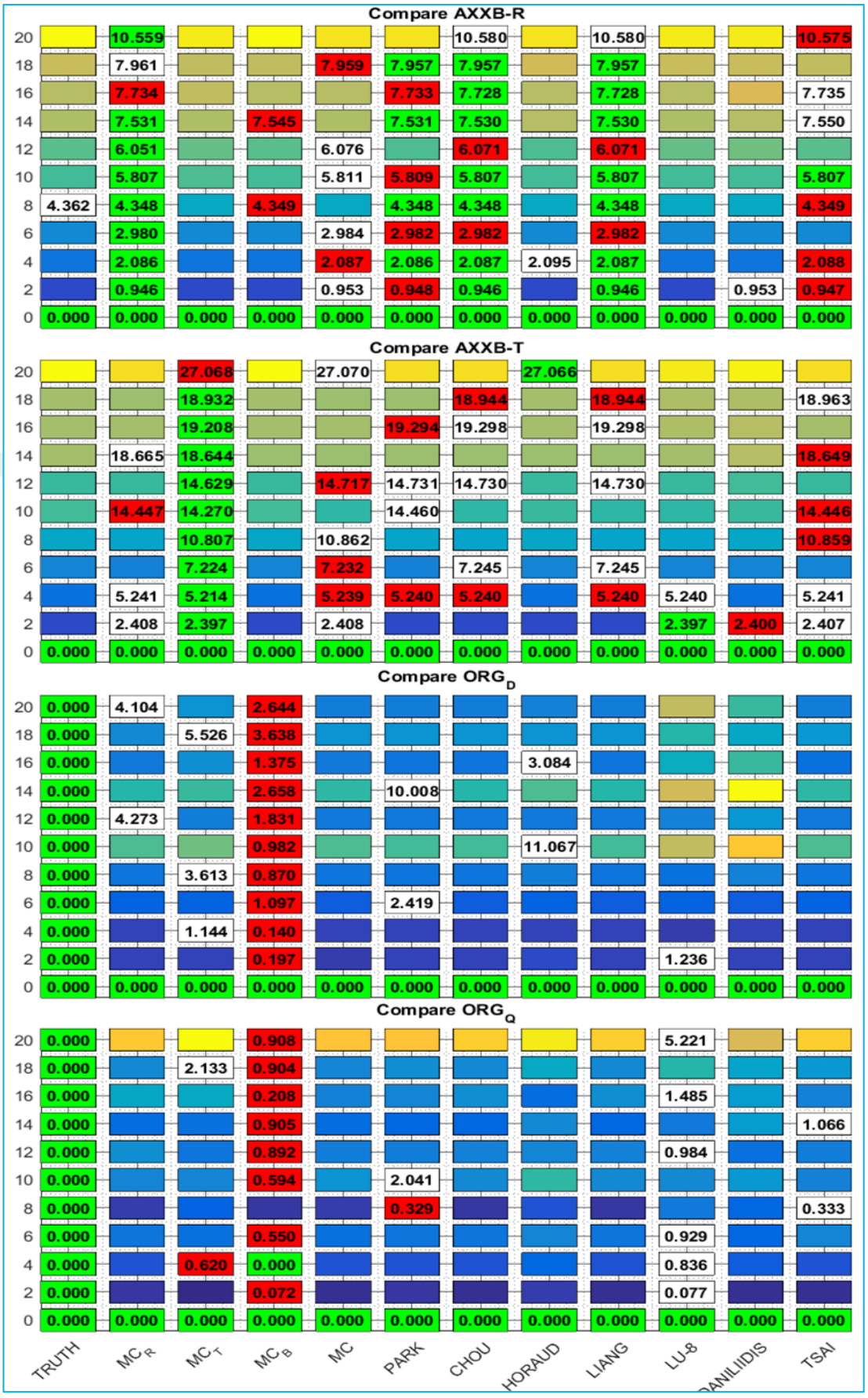
Seperable hand-eye kalibrasyon yöntemlerinin öncelikle rotasyon için optimizasyon yapmasından dolayı Denklem (5.22) $\delta_{R_{3x3}}$ için iyi sonuç verdikleri görülmektedir. [74] ve [75] 'de sunulan simultaneous yöntemlerin ise beklendiği gibi $\delta_{t_{3x1}}$başarısının iyi olduğu "Compare AXXB-T" başlığı altındaki grafiklerden anlaşılabilir. $\delta_{R_{3x3}}, \delta_{t_{3x1}}$için optimizasyon yapılmasına karşın sentetik verilere referans olan gerçek, hatasız Q_X, D_X ile hesaplanan değerler arasındaki fark "Compare ORGq" , "Compare ORGd" başlıkları altında sunulmuştur.

Şekil 5.28'de pratik uygulamalarda daha yaygın karşılaşılan sentetik veriler ile yapılan testler sunulmuştur. MC_Rve MC_T varyasyonlarının grafiklere dahil edilmesinin nedeni istendiğinde literatürdeki optimizasyon kriterleri için de sunulan yöntemin kullanılabileceğini göstermektir. Gerçek, bozulmasız değerlerin kullanıldığı

çözümlerin $\delta_{R_{3x3}}, \delta_{t_{3x1}}$ hataları için diğer yöntemler karşısında geride kalması bu metriklerin sorgulanmasına yol açar. Şekil 5.27'de ve Şekil 5.28'de performans değerlendirilmesi yapılacaksa Q_X, D_X ile çözümlerin karşılaştırılması gerekir. "Compare ORGq" , "Compare ORGd" başlıkları altındaki grafiklerin de gösterdiği gibi (5.29) ile seçim yapan MC_B en başarılı algoritmadır.



Şekil 5.27. Kalibrasyon algoritmalarının standart metriklerle karşılaştırılması



Şekil 5.28. Metaverse veriler için standart metriklerle karşılaştırma-1

Denklem (5.7) çözümünde istenenX_{4x4}homojen transformasyon matrisini oluşturan Q_X, D_X,dönüş ve öteleme değerlerinin bulunmasıdır. Hand-eye kalibrasyonu bu denklemin çözümü ile elde edilse de, pratik olarak beklenti çözümde bulunan değerleri kullanarak farklı robot duruşlarında yapılan ölçümleri referans koordinat uzayına aktarmaktır. Bunun için farklı duruşlardaki ölçümlerin aynı gözlem noktası için yapıldığında sapma olmadan aynı değerleri vermesi gerekir.

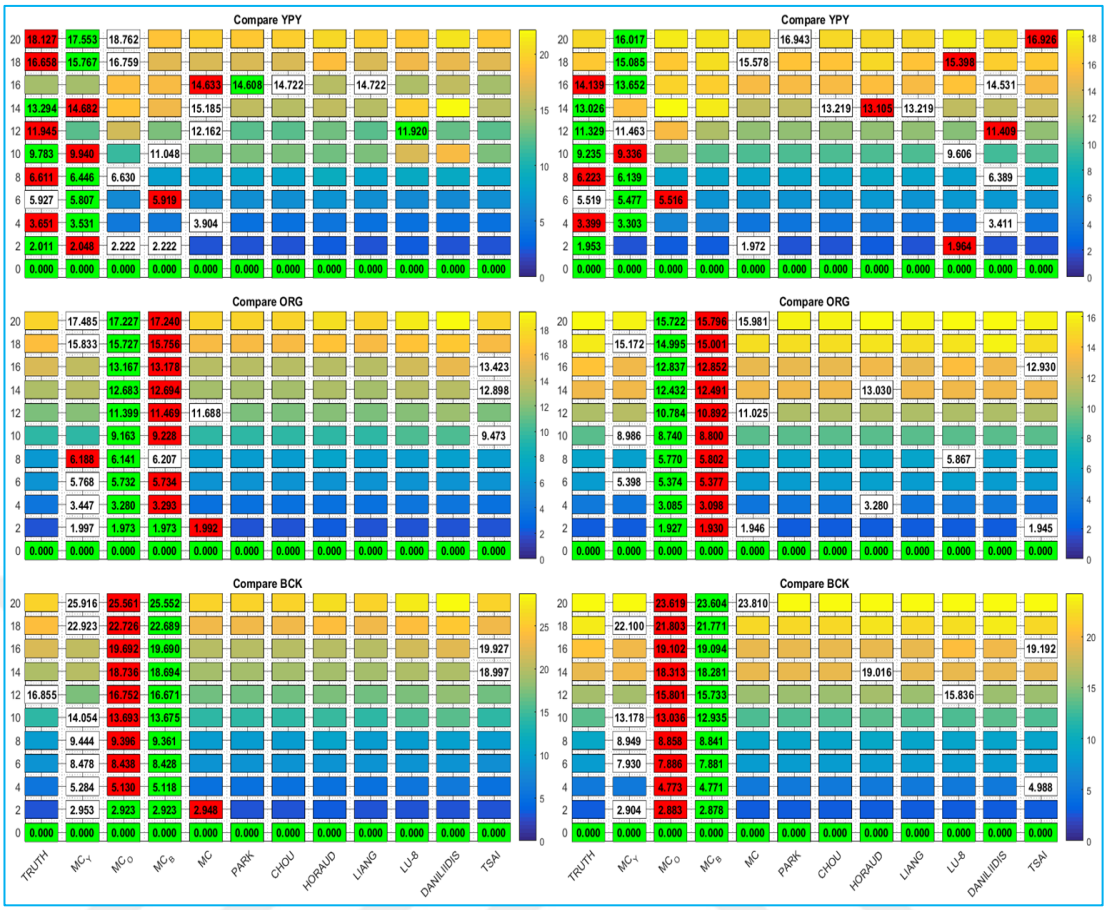
Gürültülü ölçüm değerleri ile çalışıldığında gerçek, hatasız Q_X, D_X,değerleri dahi bu sonucu sağlamayabileceği Şekil 5.29'da görülebilmektedir. $CompareYPY$başlığındaki grafikler; gerçek, bozulmasız ${}^{base}P_n$ ile hesaplamalar arasındaki farkı göstermektedir.

TRUTHE tiketi, hatasız Q_X, D_X,değerlerinin kinematik bağıntılarda kullanılması ile elde edilmiştir. Bu durumda metrikler ve amaca uyumluluğu sorgulanmalıdır. Kalibrasyonda pratik amaç ölçüm değerlerinin aynı nokta için projeksiyonlarının aynı olmasını sağlamaktır.

Bu sebeple kullanılması gereken metrik Denklem (5.28) veya Denklem (5.29) ile hesaplanan mesafenin azaltılması olmalıdır.

Algoritma performansını değerlendirmek için sentetik kurgunun elde olması ile $\mathrm{CompareYPY, TRUTH, MC_Y}$ hesaplamaları yapılabilse de gerçekte bu hesaplamalara referans olan verilere sahip olunamaz.

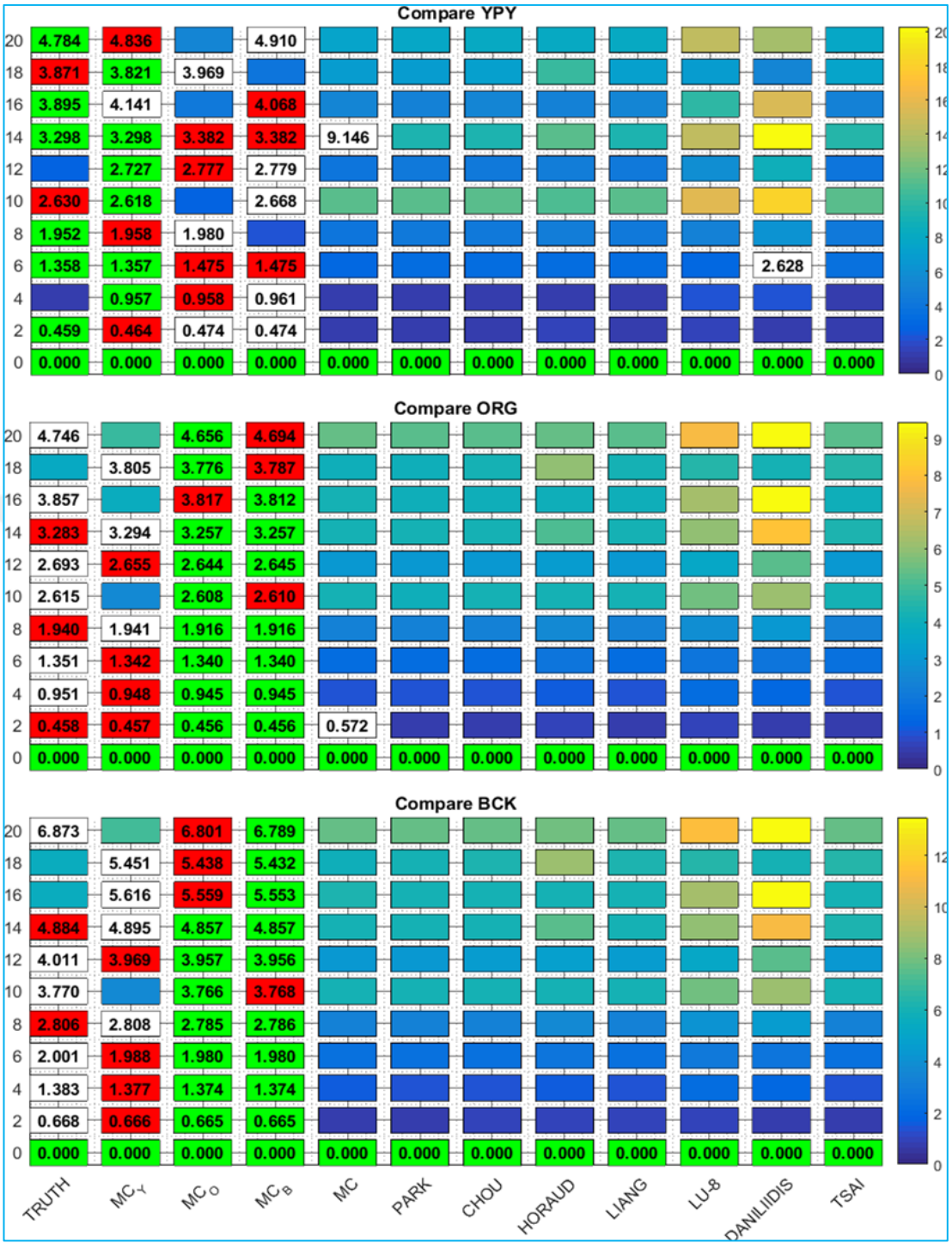
Referans levhasının konumu başlangıçta bilinmemektedir. Dolayısı ile pratikte projeksiyonu en az hatalı yapabilmek gerçek, bozulmasız ${}^{base}P_n$ için Denklem (5.28) veya Denklem (5.29)'ün kullanılması kaçınılmazdır. Denklem (5.22-5.25) arası metrikler matematiksel olarak anlam taşısa bile pratik amaçla uyumlu olmayabilirler.



Şekil 5.29. Projektif geometriye dayalı optimizasyon.

Şekil 5.29'da ve Şekil 5.30'da projeksiyona dayalı optimizasyon sonuçları sunulmuştur. Şekil.5.27'de ve Şekil 5.28'de diğer literatürdeki yöntemlerin amaç fonksiyonuna dayalı optimizasyon ile yapılan karşılaştırmalarda önerdiğimiz yöntem diğerlerine oranla daha sonuç vermişti.

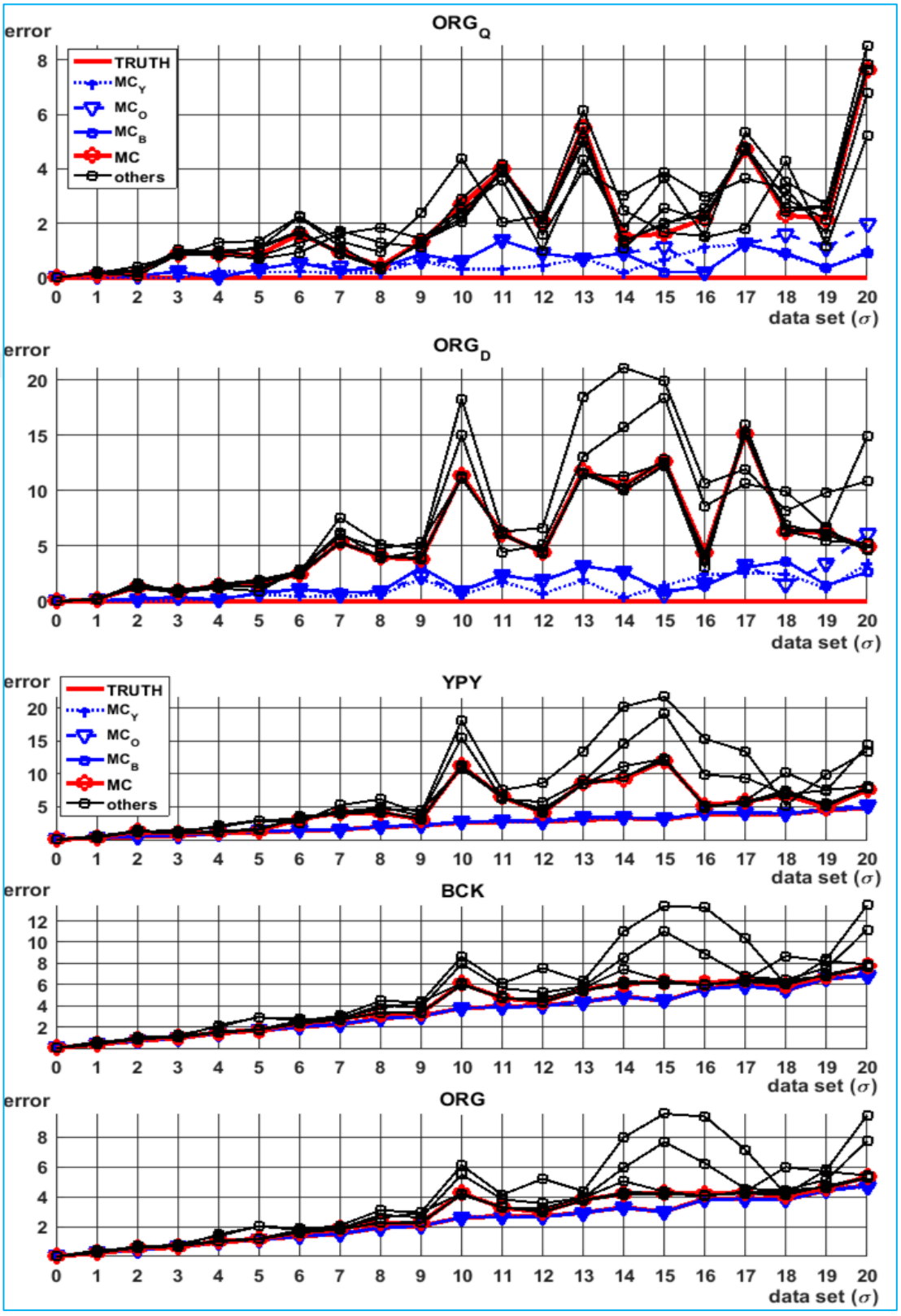
Ancak bazı veri setlerinde diğer yöntemlerin de en iyi olduğu gözlemlenmekteydi. Şekil 5.30'da pratikte olması daha muhtemel gürültü dağılımı ile yapılan ve test sonuçları değerlendirilmiştir. Bu testlerde önerdiğimiz yöntemin açık üstünlüğü görülmektedir.



Şekil 5.30. Metaverse veriler için yansıtmalı metriklerle karşılaştırma -2

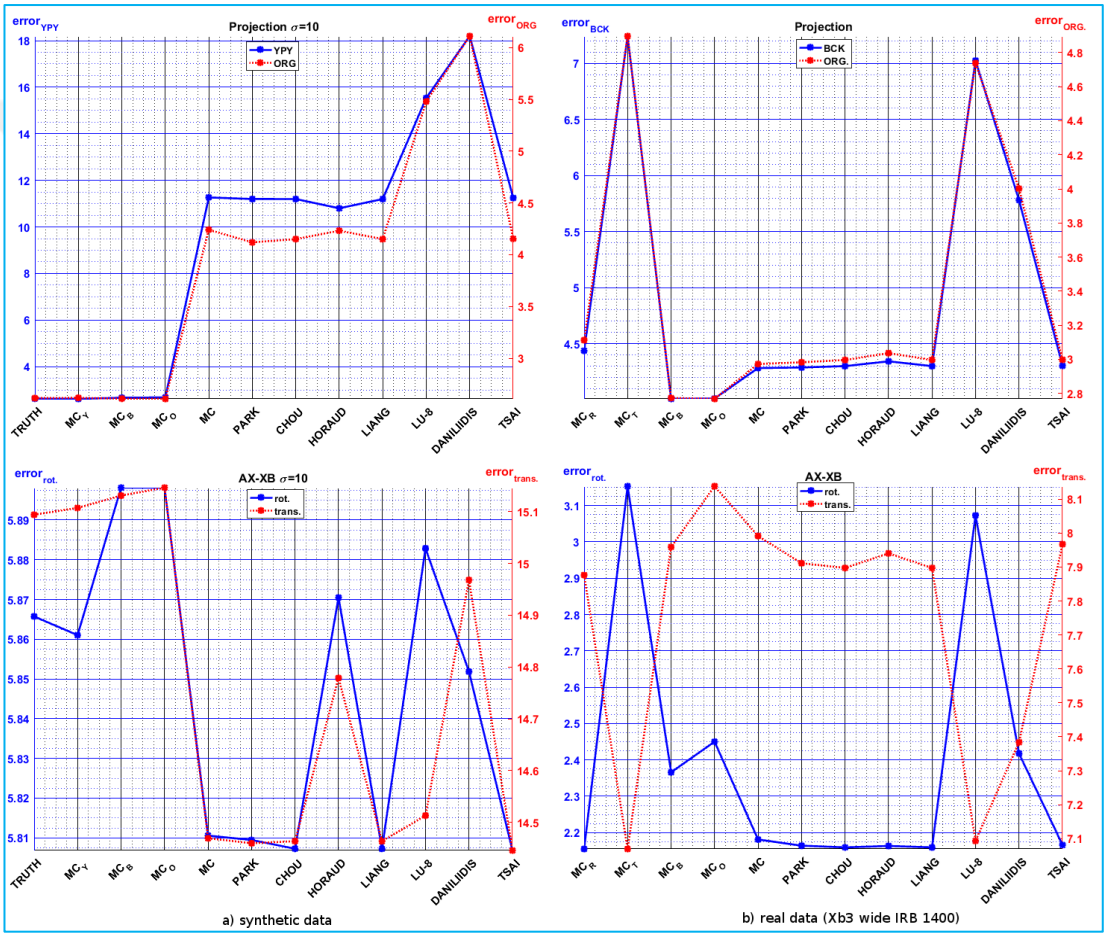
Şekil 5.31'de yalnız kamera gürültüsünün olduğu durumda farklı gürültü seviyeleri için performanslar sunulmuştur. Grafikte dikkat edilecek nokta önerilen algoritmanın gürültü bağışıklığının yüksek olduğudur. Karşılaştırmaya konu literatürdeki diğer algoritmalar, aykırı ölçümlerin yüksek olabileceği veri setlerine çok duyarlı iken

yazıda önerilen yöntemin sonuçları kararlı ve aykırı nokta bağışıklığı yüksektir. Sonuçları gürültü dağılımının standart sapmasına uyumlu değişimler sergilemektedir.



Şekil 5.31. Farklı gürültü seviyeleri ile kıyaslama-örnek1

Şekil 5.32'de aynı $\sigma_{rob} = 0^0, \sigma_{cam} = 10mm$ için karşılaştırma sonuçları gösterilmiştir. Sağ taraftaki grafikler ABB IRB 1400 manipulatöre bağlanmış Bumblebee XB3 stereo kameranın 24 cm baseline'a sahip konfigürasyonu ile elde edilmiştir. Bu grafik önceki düşünceleri doğrulamaktadır. Pratik uygulamalarda kamera gürültüsü baskındır. Sonuçlar, sentetik veri seti ile neredeyse tamamen uyumludur. Bu grafik değerlendirildiğinde Denklem (5.28), Denklem (5.29) yaklaşık aynı sonucu verdiği görülmektedir. Denklem (5.28) işlem karmaşıklığının düşük olmasından dolayı daha kullanışlıdır.



Şekil 5.32. Farklı gürültü seviyeleri ile kıyaslama-örnek2

Sonuç olarak; $\tilde{P}_{3x1} = R_{3x3} \cdot P_{3x1} = Q * P * \bar{Q}$ denklemi ile P_{3x1} noktasının R_{3x3} dönüş matrisi veya Qkoterniyonu ile döndürüldüğünde ulaşacağı $\tilde{P}_{3x1}$ noktasını veren çok bilinen bir ifadedir. Bilinen $\tilde{P}_{3x1}$ve P_{3x1}için doğrusal denklem sistemi olarak veya geometrik çıkarımla [67]'da olduğu gibi rahatlıkla R_{3x3}veya Qgösterimlerinden biri için çözüm yapılabilir. $R_A = R_X R_B$ olarak düzenlendiğinde belki dikkati

çekmeyecektir ancak Denklem (5.21) $Q_A = Q_X * Q_B * \bar{Q}_X$ şeklinde düzenlendiğinde sağ tarafın Denklem (5.16) koterniyon rotasyonu şeklinde değerlendirilebileceği çok açıktır. Yazıda bu düşünceden yola çıkarak hand-eye kalibrasyonunu mutlak oryantasyon problemi olarak ele alınabileceği gösterilmiştir. Sunulan bu çalışmanın çıktıları sentetik veri setleri ve gerçek ölçüm sonuçları işlenerek diğer yöntemlerle karşılaştırılmıştır.

Sunulan yöntemde çözümü sağlayacak minimum örnek takımı kullanılması önerilmektedir. Örnek havuzundan seçilecek bu takımlarla oluşturulan çözümler kümesi içinden istenen kriterler için en uygun olanın seçilmesi ile final çözümün elde edilmesi önerilmektedir. Bu yaklaşım sayesinde aykırı noktaların çözüm üzerindeki etkinliğinin düşürüldüğü, güvenilirlik ve gürültü bağışıklığının arttığı grafiklerle gösterilmiştir.

Matematiksel geçerliliği olsa da rotasyon ve öteleme hatalarının ayrı değerlendirilmesi istenen amaca hizmet etmeyebilir. Hand-eye kalibrasyonda istenen farklı duruşlar yapılan ölçümlerin referans koordinatlara kayıt edilmesi sırasında iki farklı duruşun çakışan kısımlarının arasında fark olmamasıdır. Bu isteği sağlayacak amaç fonksiyonu, aynı ölçüm noktalarının projeksiyonları arasındaki mesafeyi azaltarak sağlanabilir. Bu kriter ile değerlendirildiğinde yazıda önerilen yöntemin sonuçlarının diğer karşılaştırılan yöntemlere karşı bariz üstün olduğu grafiklerle gösterilmiştir.

5.9. Stereo-Kamera Tabanlı Çevirimiçi Robotik NDT Uygulaması

Robotik iş istasyonların yaygınlaşmasına karşın kullanım alanları, iş çeşitliği beklendiği şekilde artmamıştır. Endüstriyel robot uygulamaları 50 yıl önce nasıl kurgulandı ise büyük oranda aynı şekilde devam ettirilmektedir. Otomotiv endüstrisinde nokta kaynak uygulaması robotlaşma oranının en yüksek olduğu alandır. Bu proseste robotlar uçlarına takılan kaynak tabancasını daha önceden öğretilmiş noktalar boyunca konumlandırarak kaynak görevlerini tamamlarlar. Bu klasik süreçte teknolojik gelişmelerle sağlanan en büyük iyileştirme saha içinde yapılan nokta öğretme işinin ofis ortamına taşınmasıdır. Diğer yandan spesifik uygulamalar için nokta öğretme sürecini kolaylaştırıp hızlandıracak alternatif uygulamalar mevcuttur. Örneğin robot programlama bilgisi olmadan, el ile hafif dokunuşlarla robotu kontrol etme, [87] çalışmasında gerçekleştirilmiş, genel robot programlamasına ait bilgiler

sunulmuştur. Pozisyon öğretme ve işlem parçalarını sabitleme zorunluluğunu kaldırabilmek için robotların çevre ile etkileşimini arttırma ihtiyacı kaçınılmazdır. Robotik uygulamalar gün geçtikçe dinamik, önceden düzenlenmemiş çevreler içinde gerçekleştirilmektedir. Robotların çevreyle etkileşimini arttırmak amacıyla kamera sistemleri ile donatılması yaygınlaşmaktadır. Robot çevresine ait pozisyon bilgilerini bu kamera aracılığı ile çözümlemektedir. Pozisyon çıkartımı için nadiren monocular kamera kullanılmaktadır. Stereo ve time of flight (TOF) kameralar daha hassas ve güvenilir veriler sunmaktadırlar. [88] makalesinde literatürdeki kamera destekli robotik uygulamalara ait inceleme sunulmuştur.

Zengin sensörler ile donatılan robotlar aktif olarak imalat içinde bulunmakla beraber yüklenecekleri özelleştirilmiş yüksek seviyeli ekipmanlarla denetim sürecinde de görev almaktadırlar. [89]'da özelikle NDT için robot kullanımından bahsedilmiştir. Operatörler tarafından kolaylıkla erişilemeyen bölgelerde denetim yapabilen farklı robot yapıları ve NDT teknikleri bu çalışmada tanıtılmıştır. NDT'nin temel alanlarından biri kaynak kontrolüdür. Robotik kaynak uygulamalarında kaynak kalitesinin kontrolü hemen işlemin ardından yapılması faydalıdır. İşlem gören parçaların üzerine yeni plakalar yerleştirilmesi durumunda sonraki aşamalarda kalite kontrolü için istenen pozisyona ulaşılamayabilinir. Erken problem tespiti ile ayrıca hat üzerindeki tamamlama istasyonlarında uygun olmayan kaynaklar düzeltilebilir. Kaynak kontrolü işlem sırasında, süreç ile eş zamanlı olarak da gerçekleştirilebilir.

Araştırmacılar gaz altı kaynağının robotik NDT ile kontrolü üzerine yoğunlaşmışlardır., [90,91 ve 92] gaz altı kaynağı sırasında görüntü işleme ile sürecin robotik denetlenmesine olanak sağlayan yöntemlerin tanıtıldığı çalışmalardan bazılarıdır. [90],'da olduğu gibi robotik gaz altı kaynağı uygulaması için geliştirilmiş eş zamanlı kontrol denemeleri araştırmacıların ilgi odağı olmayı sürdürmektedir. Bu çalışmada geliştirdikleri algoritmaya kaynak açıklığı bilgisini kamera ile algılayarak aktarmışlar ve diğer kaynak parametrelerini denetleyerek işlem kalitesini arttırıldığı bahsedilmektedir. Gaz altı kaynak istasyonlarında işlem sırasında oluşan ışık dalgalanmaları ve duman kamera görüşünü bozabileceği gibi çalışma koşulları nedeni ile kameralar kısa zamanda arızalanabilir. Eş zamanlı olması önerilen süreç yazarlarının da dile getirdiği gibi ancak kısmi olarak kaynak istasyonlarında değerlendirilebilir. Tekil olarak değerlendirildiğinde gaz altı kaynağı kadar kritik

uygulama olmasa da özellikle otomotiv endüstrisinde yaygın olan spot kaynağının kontrolü bu yayında hedeflenmiştir. Spot merkezinin algılanması bu süreçte kritik önemdedir. Literatürdeki eye-center lokalizasyon yöntemleri ile benzeşim göstermektedir. Ancak morfolojik yöntemler spot merkezi algılamada çok uygun değildir. Yine yüzey deformasyonunun yüksek olabileceği kaynak çevresi, dairesel geometrinin tespiti üzerine kurulmuş yöntemler için sorun teşkil etmektedir. Kullanılacak algoritmaların hızlı, hassas ve robust olması temel tercih olmakla beraber dar bir çerçeve içinde arama yapılacağı için algoritma hızı ön planda tutulmayabilir. Algoritmanın robust olması yani yüksek deformasyonlu kaynak noktalarında da çalışması olmazsa olmaz önemdedir. Her ne kadar mevcut çalışmalar eye-center lokalizasyonu için yaygın olsa da kontrollü veritabanları üzerinde yapılan çalışmalar gerçek dünya koşullarında aynı başarıyı göstermeyebilirler [93-94]'de vurgulandığı gibi net geometriye sahip makine parçaları üzerindeki dairesel bölgelerin tespitinde dahi mevcut yöntemler çelişkili sonuçlar verebilir. Görüntülerdeki gürültü, kenar bozulmaları kaynaklı etkiler yüzünden algoritmalar ilgili bölgeleri ayırt edemeyebilir, hatalı noktalar için uygundur tespiti yapabilir veya dairesel bölgeleri yanlış merkezleyebilir.

Endüstriyel robot kontrolörleri görüntü işleme uygulamaları gibi yüksek seviyeli programlama yapmaya elverişli değillerdir. Bu sebeple harici kontrolörlerle robot kontrolörünün etkileşimi için neredeyse tüm ticari robot imalatçıları software development kit (SDK)'lar sunmaktadır. ABB IRC5 kontrolörü ile robot SDK kullanılarak yapılan PC denetimi [95] çalışmasında analiz edilmiştir. Kontrolörlerin haberleşmesi için ethernet arayüzlü bağlantılar yaygınlaşmaktadır. Güvenlik öncelikli sebeplerden dolayı 3rd-party kontrolörlerin tam yetkilendirilerek manipulatörü hareket ettirmesi kısıtlanmıştır. Bunun yerine dış kontrolörler, belirli veri tiplerine erişmek sureti ile süreci yönlendirebilir. Her bir markanın sunduğu SDK'lar ile marka model bağımlı süreç metodu geliştirme sunulan bu çalışmada tercih edilmemiştir. Eski teknolojilerle de uyumun korunabilmesi için PC üzerinde çalıştırılan görüntü işleme ve konum belirleme programı, hesaplama sonuçları PLC aracılığı ile robot kontrolörüne aktarılmaktadır. Robot eklem açıları (joint target), oryantasyon ve konum bilgileri (rob target) ile beraber lojik interlocklar için 64 byte'lık veri transferi yeterli olmaktadır. Haberleşmenin PLC üzerinden geçirilmesi ile kurulan inline kalite kontrol

istasyonunun hat otomasyonuna entegrasyonu daha kolay ve az maliyetle karşılanmıştır. Ayrıca ilave robot yerleştirmek gibi bir ihtiyaç sonucu istasyon genişletilecek olursa ek yatırımlara gerek kalmayacaktır.

Endüstriyel robotların tekrar edebilirliği yüksek olmasına rağmen hassaslığı düşüktür. Bunun sebebi genellikle esnek yapıları, link boylarının hassas işlenememesi, eklem açıları gibi konfigürasyon değerlerindeki sıfırlama hatalarıdır. [96]'da bu sorunu çözmek amacıyla 3D ölçüm cihazlarından elde edilen verilerle kalibrasyon iyileştirilmeye çalışılmıştır. Benzer şekilde [97] makalelerinde klasik tool center point (TCP) öğretme yöntemi ve denkleminden bahsedildikten sonra 3D lazer tarayıcı görüntüleri yardımı ile referans nokta olarak kullanılan kürenin konum bilgilerinin tespit edilmesi ile TCP kalibrasyonunun iyileştirilmesinden bahsedilmektedir.

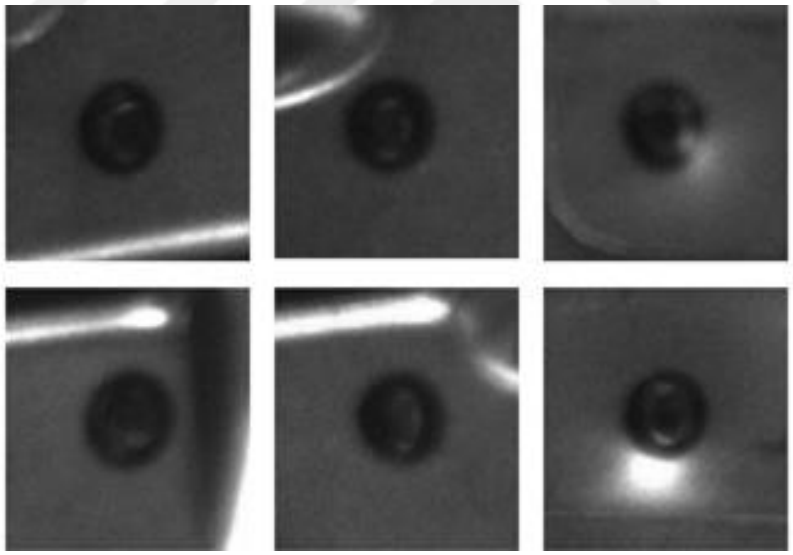
Sunulan bu çalışmada stereo kamera görüntülerinden pozisyon bilgisi elde edilmiştir. Bu bilginin robot referans düzlemine aktarılabilmesi için hand-eye kalibrasyonu olarak bilinen kameranın robot flanşına göre duruşu hesaplanmalıdır. Önerilen yöntemde [67]'de çözümü gösterilen iki düzlem arasındaki mutlak oryantasyonun tespitinden faydalanılmıştır. Hand-eye kalibrasyonu için çözülmesi gereken $AX = XB$şeklindeki denklem $\vec{V}_A = Q_X * \vec{V}_B * \bar{Q}_X$ ifadesine dönüştürülerek [67]'nin adımlarıyla çözülmüştür. Söz konusu robotik olduğunda bu denklemdeki $A_{4x4}, B_{4x4}, X_{4x4}$ homojen koordinat dönüşüm matrisleridir. i.ve j.duruşlarda, A_{ij}manipulatör duruşunu tanımlayan ilişki, B_{ij}ise sensörün düzleminde algılanan sabit noktanın değişimini tanımlayan ilişkidir. $\vec{V}_A, \vec{V}_B$ vektörleri A, Bdönüşüm matrisinin koterniyon gösterimine aktarımı ile elde edilen koterniyonların vektörel kısımlarıdır. Sunduğumuz yeni yaklaşımda, amaç fonksiyonu olarak $e = \sum(AX - XB)^2$ hatasının indirgenmesi yerine sabit ölçüm noktasının farklı robot duruşlarından elde edilen konumlarının sapmasının azaltılması seçilmiştir.

Bu çalışma sonucunda spot kaynağının robot aracılığı ile tahribatsız testi için robotik istasyon kurulmuştur. Böylece hat dışı, operatör bağımlı kalite kontrol sürecinin hat içinde yapılması ile süreç verimliliğinin arttırılması sağlanmıştır. Sunulan bu yazıda kurulum için gerekli adımlar, kritik aşamalar tanıtılmıştır. Yazının takip eden bölümünde görüntü analizleri ile kaynak noktası pozisyonunun elde edilmesi tanıtılacaktır. Spot merkezinin algılanması sürecinde kenar, gradyent ve simetri

yöntemlerinin birleştirilmesi ile güvenilir aynı zamanda hassas ölçümler yapılabilmiştir. Üçüncü bölümde kinematik hesaplamalar üzerinde durulmuştur. Robot modeli, hand-eye kalibrasyonu bilgileri sunulmuştur. Hand-eye kalibrasyonu yöntemimiz koterniyon cebri tabanlıdır ve mevcut çözümlere göre daha hassas ve güvenilir sonuçlar vermektedir. Son bölümde ise pratik uygulamaya ait süreç ve sonuçlar verilmiştir.

5.9.1. Punta kaynak noktalarının merkez tespiti

Nokta kaynağı uygulamalarında tipik görüntüler Şekil 5.33'te gösterilmiştir. Kaynak sonucunda metal yüzeyde genel hatları ile çember biçiminde iz kalmaktadır. Seçilmiş kaynak parametresine, birleştirilecek metallerin geometrisine, kaplamasına bağlı olarak yüzey parlaklığı farklılıklar göstermektedir. Birleştirilecek yüzeylerin uyumu ve daha önemlisi kaynak tabancasının uygulama açısı nedeni ile görüntü daire formundan uzaklaşmaktadır.



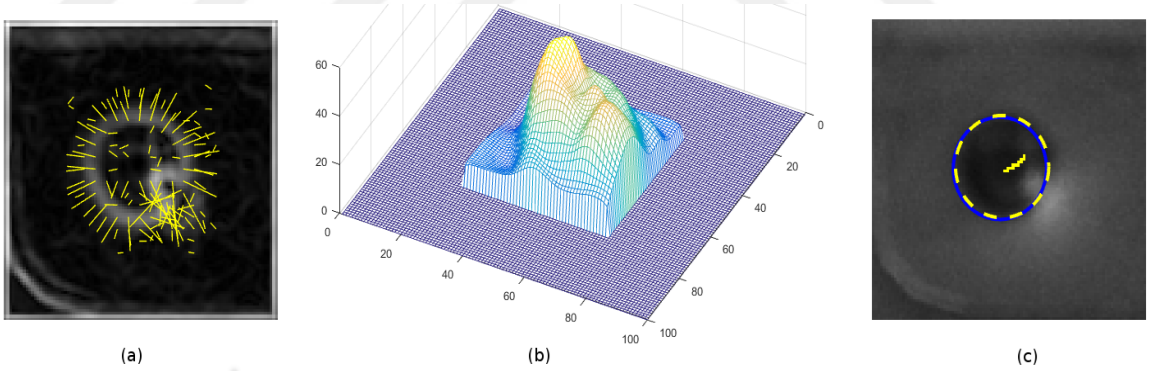
Şekil 5.33. Klasik punta kaynak görüntü kalıpları

Pek çok uygulamada çember merkezinin tespiti gereklidir. Kenar, gradyent ve simetri tabanlı yöntemler kullanılmaktadır. Hough dönüşümü çember merkezi tespiti için en sık kullanılan yöntemdir. Bu yöntemin sunduğumuz çalışma açısından en önemli sıkıntısı daire formu dışındaki görüntülerde başarılı olmamasıdır. Uygun parametre seçimi yapılmadığında hatalı sonuç çıkarımında bulunması nedeni ile güvenilir bulunmadığı için bu yayında iki farklı yöntem ile daha merkez tespiti yapılması ve sonuçların ortalaması alınarak kullanılması kararlaştırılmıştır.

Aşağıda kısaca tanıtılan gradyent ve simetri tabanlı yöntemlerin geniş tanıtımı ve farklı karşılaştırmaları [98]'de sunulmuştur.

5.9.2. Gradient tabanlı arama

Bu yöntemde önce $G = (g_x, g_y)$ gradyentleri elde edilir. Şekil 5.34 (a)'da örnek spot kaynağı resmi üzerinde gradyent vektörleri gösterilmiştir. Asimetrik deformasyondan dolayı tüm vektörler merkeze doğru yönelmemiştir. Yöntemdeki temel düşünce $c(i,j)$'nin merkez olması için, bu noktadan arama uzayındaki tüm noktalara doğru çizilecek vektör ile bu noktalardaki gradyent vektörünün noktasal çarpımlarının toplamlarının en yüksek olması gerekliliğidir. Şekil 5.34 (b)'de tüm arama bölgesi için üretilmiş uygunluk fonksiyonu görülmektedir. En yüksek değerin olduğu nokta çember merkezi olarak belirlenir. Tüm uzayda bütün noktaların ayrı ayrı değerlendirilmesi işlemsel olarak pahalı bir süreçtir. Uygunluk fonksiyonunun $c$merkezine göre türevi alınarak iteratif çözüm ile sonucun oluşturulması Şekil 5.34 (c)'de sunulmuştur. Bu durumda resimdeki izden de görüleceği gibi az sayıda denemeyle merkezleme tamamlanır.



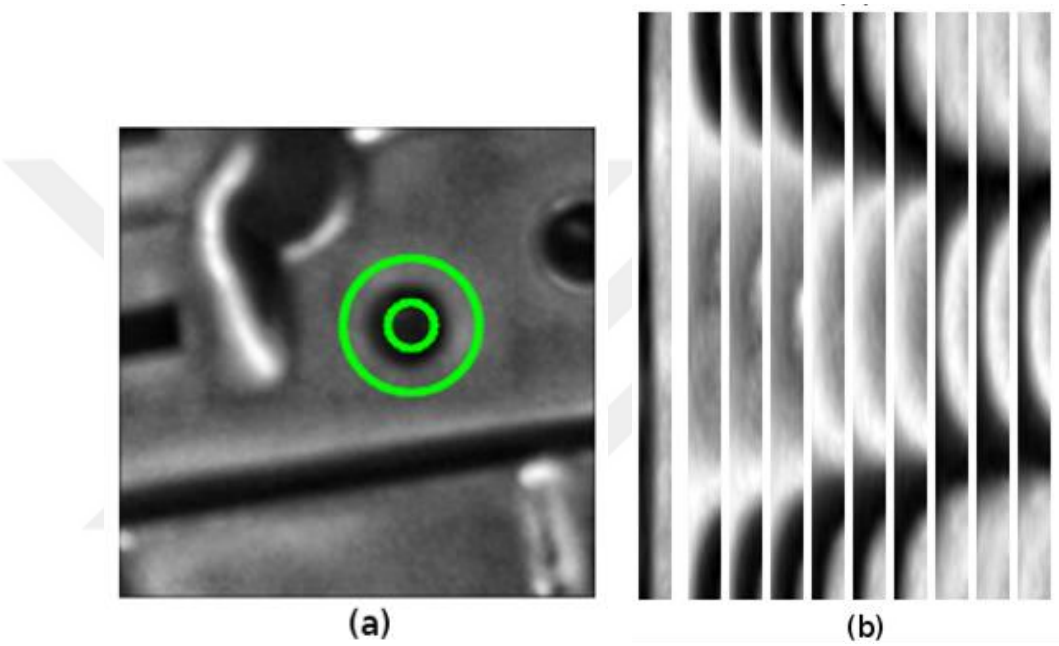
Şekil 5.34. Gradient tabanlı arama

Gradyent tabanlı yöntem kaynak noktası tespiti için çok uygundur. Asimetrik bozukluklar, ışık dalgalanmaları çember geometrisini belirgin oranda bozana kadar doğru merkezleme yapılabilmektedir.

5.9.3. Symmetry tabanlı arama

Bu yöntemde gradyent işlemine gerek yoktur. Ancak işlemsel olarak yük getirecek polar koordinat dönüşümü yapılmak zorunluluğu vardır. Şekil 5.35 (a)'da gösterilen

kaynak noktasının farklı noktalardaki merkezler için elde edilmiş polar dönüşümü Şekil 5.35 (b)'de sunulmuştur. Bir konumun çember merkezi olabilmesi için polar görüntüde açı taramasına denk gelen dikey doğrultuda aynı parlaklıkla devam ediyor olmalıdır. Bu durumda uygunluk fonksiyonu olarak dikeyde, dairesel yol boyunca, elde edilen pixel intensity varyansının yatayda, yarıçap boyunca, kümülatif toplamı alınabilir. En düşük değere sahip polar resmin elde edildiği kartezyen nokta çember merkezidir. Şekil 5.35 (b)'de en soldaki resim buna örnektir.

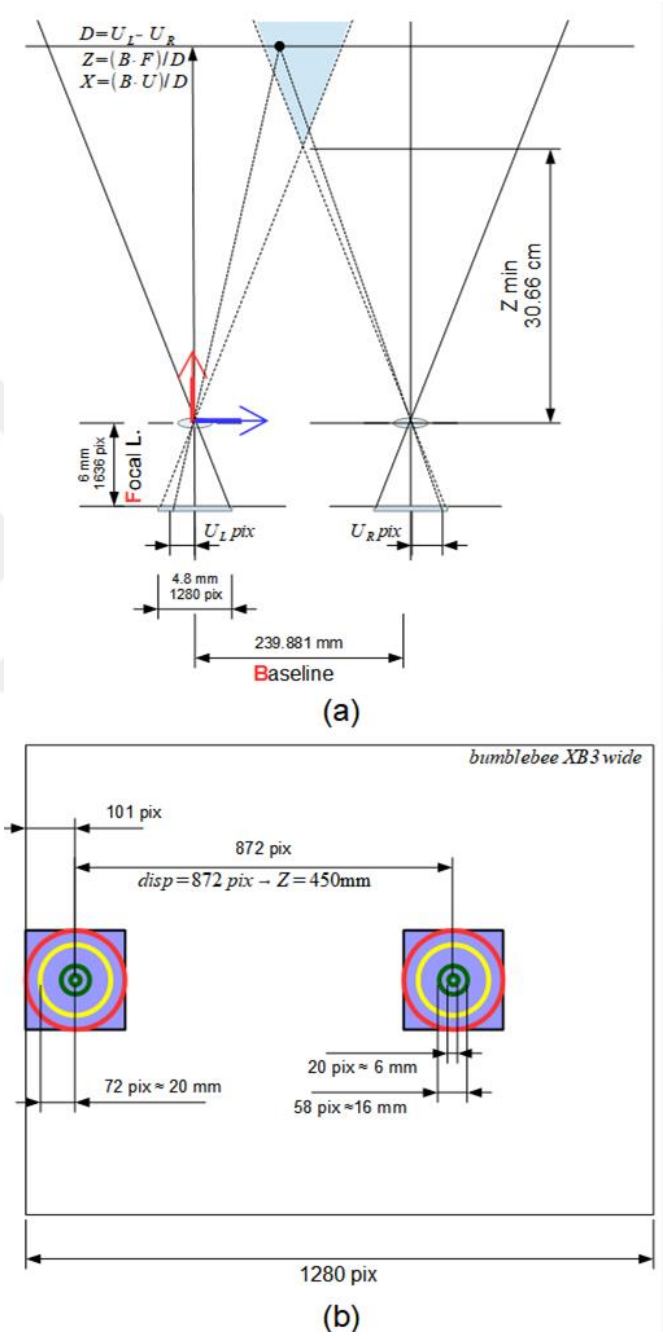


Şekil 5.35. Symmetry tabanlı arama

5.9.4. Güvenilirlik ve sağlamlığı artırma

Bu çalışmada laboratuvar aşamasında Ptgrey Bumlebee XB3, robotik istasyon kurulumunda ise XB2 model stereo kamera kullanılmıştır. 1280 x 960 çözünürlüğe sahip XB3'e ait parametreler Şekil 5.36 (a)'da verilmiştir. Maksimum disparity 1280 olabileceği düşünülürse en yakın çözümleme mesafesi 30 cm olarak hesaplanabilir. Bu büyük çözünürlükteki görüntü üzerinde kaynak noktasını aramak hem işlem yükü açısından hem de lokalizasyon doğruluğu açısından uygun değildir. Algılama robustluğunu da arttırmak için ana görüntülerden bir alt çerçeve oluşturulmuştur. Bu amaçla NDT işlemi için olası en büyük ve en küçük kaynak noktasının yarıçapları, kaynağın olması gereken noktadan itibaren izin verilen en büyük sapması belirlenmelidir. Bu değerler dışındaki nokta kaynakları ultrasonik ölçüm yapmadan

hatalı kabul edilebileceği bildirilmiştir. En düşük kaynak yarıçapı 3mm, en büyük yarıçap 8mm, izin verilen maksimum kayıklık 20mm ve kamera merkezinden kaynağa olan uzaklık 450mm alındığında Şekil 5.36 (b)'de ilustrasyonu gösterilen 202 pixellik frameler sağ ve sol görüntüden çıkartılmıştır.



Şekil 5.36. Stereo kamera uygulaması

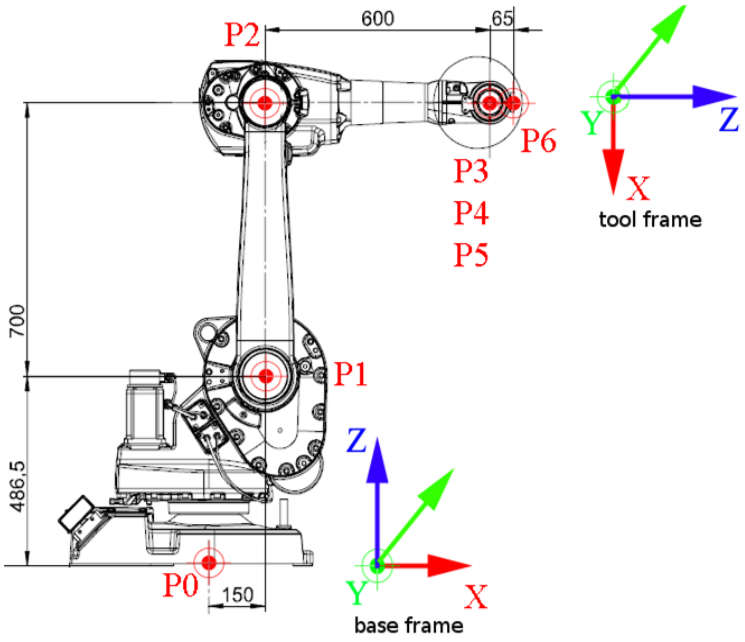
[98] ön işlem olarak 5x5lik gaussian filtrelemeyi kendi çalışmaları için kullanmışlardı. Pek çok kaynak görüntüsü için yaptığımız testlerde sırası ile normalizasyon, gaussian

filtreleme ve kontrast limited adaptive histogram equalization uyguladığımızda en hassas algılama yapılabildiğini tecrübe ettik. Gradyent ve simetri yöntemlerinin başarımı merkez arama bölgesinin seçimi ile yakından ilgilidir. Kaynak noktasının merkezi mutlaka izin verilen maksimum kayıklık olan Şekil 5.36 (b)'de 72 pix olarak gösterilen dairenin içinde olması gerektiği söylenmişti.

Bu daire içinde 20 piksel olarak belirlenmiş en küçük yarıçap miktarı açıklığınca düzenli yerleştirilmiş noktalar aday merkez konumlarıdır Tohum diyebileceğimiz bu noktalar çemberin içinde mi diye hızlıca test edilmesi gereklidir. bHough, gradyent ve simetri yöntemleri ile hassas merkezleme yapıldıktan sonra bazı kaynak noktaları için birden fazla merkez nokta belirlenebilir. Bu durumda eğer bulunan merkez değerlerinin sol ve sağ resimlerde eşleniği yoksa bu noktalar elenir. Yine de birden fazla merkez kaldı ise bu durumda origine en yakın noktalar final merkez olarak kabul edilir.

5.9.5. Hand-eye kalibrasyonu ve sistem kinematiği

Bu çalışma Şekil 5.37'de ölçüleri verilmiş olan manipulatör üzerinde test edilmiştir. Denavit-Hartenberg (DH) parametreleri ve homojen dönüşüm matrisleri yerine önerilen hand-eye kalibrasyonu yönteminde kullanılan koterniyon cebri kinematik modellerde tercih edilmiştir.



Şekil 5.37. ABB IRB1600 7/1.45 endüstriyel robot

$$
\begin{aligned}
D_0 &= [\ \ 0{,}0 \quad 0{,}0 \quad\ \ 0{,}0] \quad N_0 = [0 \quad 0 \quad 1]\\
D_1 &= [150{,}0 \quad 0{,}0 \quad 486{,}5] \quad N_1 = [0 \quad 0 \quad 1]\\
D_2 &= [\ \ 0{,}0 \quad 0{,}0 \quad 700{,}0] \quad N_2 = [0 \quad 1 \quad 0]\\
D_3 &= [600{,}0 \quad 0{,}0 \quad\ \ 0{,}0] \quad N_3 = [0 \quad 1 \quad 0]\\
D_4 &= [\ \ 0{,}0 \quad 0{,}0 \quad\ \ 0{,}0] \quad N_4 = [1 \quad 0 \quad 0]\\
D_5 &= [\ \ 0{,}0 \quad 0{,}0 \quad\ \ 0{,}0] \quad N_5 = [0 \quad 1 \quad 0]\\
D_6 &= [\ 65{,}0 \quad 0{,}0 \quad\ \ 0{,}0] \quad N_6 = [1 \quad 0 \quad 0]\\
D_7 &= [\ \ 0{,}0 \quad 0{,}0 \quad\ \ 0{,}0] \quad N_7 = [0 \quad 1 \quad 0]
\end{aligned}
\tag{5.39}
$$

$D_i$koordinat düzlemi merkezleri arasındaki öteleme (eklem uzunlukları), $N_i$rotasyon doğrultusunu işaret eden pivot eksenler, $\theta_i$dönüş açısını göstermek üzere (5.39)'de verilen ölçüler kinematik hesaplamalarda kullanılmıştır. D_0, N_0 robot tabanı ile world koordinat sistemini ilişkilendirmek için kullanılmıştır. Benzer şekilde D_7, N_7 tool koordinat düzlemi için tanımlanmıştır. Hesaplamalar boyunca taban ve world koordinat sistemi $\theta_0 = 0$alınarak eşlenik tutulmuştur. Hesaplamalarımızın doğruluğu seçilmiş ticari manipulatör kontrolörü ve yazılımları ile onaylanmıştır. Bu kontrollerin yapılabilmesi için katalog bilgilerinde de gösterildiği gibi şekil 5.37'de resmedilmiş "tool frame" dönüşümü için pivot eksen $y$doğrultusu seçilerek$\theta_7 = \pi/2$ alınmıştır. Açı eksen gösteriminden Denklem (5.40) ile koterniyonlar elde edildikten sonra kompozit dönüş Denklem (5.41) ile hesaplanmıştır.

$$
\begin{aligned}
Q &= \quad RtoQ(N, \theta)\\
&= \quad \cos(\tfrac{\theta}{2}) + \sin(\tfrac{\theta}{2}) \cdot \tfrac{\vec{N}}{\|\vec{N}\|}
\end{aligned}
\tag{5.40}
$$

$$
\begin{aligned}
Q_{(0)} &= \quad RtoQ(N_{(0)}, \theta_{(0)})\\
Q_{(i)} &= Q_{(i-1)} * RtoQ(N_{(i)}, \theta_{(i)})
\end{aligned}
\tag{5.41}
$$

Pnoktasının Qile döndürülmesi sonucu alacağı $\tilde{P}$yeni konum $\bar{Q}$konjügati göstermek üzere (5.42) ile hesaplanır. (5.43) ile kinematik zincirin ilgilenilen herhangi bir halkası için pozisyon ve oryantasyon bilgisine ulaşılır. $Q_{\text{base}} = Q_0, P_{\text{base}} = P_0$başlangıç bilgilerinden itibaren figure5'de gösterilen diğer ara konumlar ve nihayetindeki $Q_{\text{tool_0}} = Q_7, P_{\text{tool_0}} = P_7$uç değerlere kadar olan hesaplamalar tamamlanır.

$$
\begin{aligned}
\tilde{P} &= rot(Q, P)\\
&= Q * P * \bar{Q}
\end{aligned}
\tag{5.42}
$$

$$P_{(0)} = \quad rot(Q_{(0)}, D_{(0)})$$
$$P_{(i)} = P_{(i-1)} + rot(Q_{(i)}, D_{(i)}) \tag{5.43}$$

Robot üzerindeki bir konum sensöründen alınan bilginin sabit referans düzlemine taşınması için sensörün robota bağlantı geometrisinin bilinmesi gerekir. Bir başka ifade ile sensörün ölçüm merkezini yeni bir tool, TCP olarak tanıtmak gerekir. Toolun tanıtılması için ise tool0 olarak isimlendirilen robot flanşına göre, şekil 5.38'de gösterilen D_X, Q_Xrotasyonu ve ötelemesinin bilinmesi gereklidir.

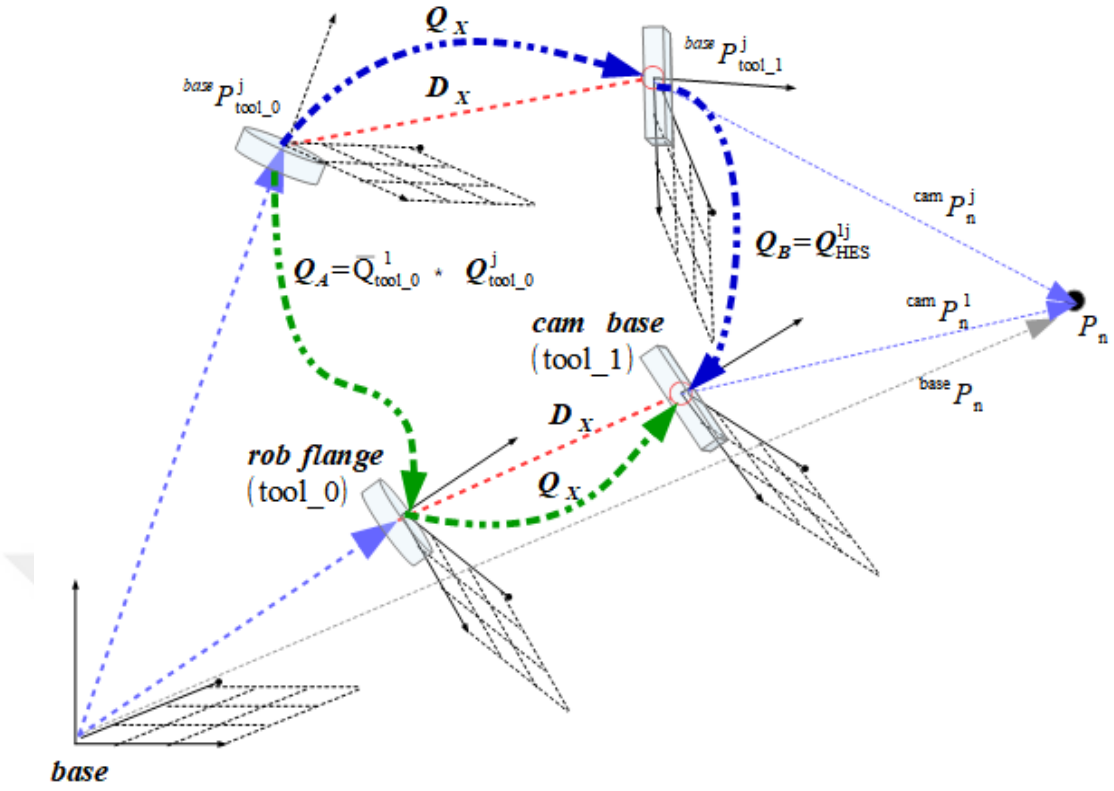
$$D_X = {}^{tool_0}P^{j}_{cam_org}$$
$$Q_X = {}^{tool_0}Q^{j}_{cam} \tag{5.44}$$

Ölçüm düzeneğinin j.duruştaki camdüzleminin $base$düzlemine göre rotasyonunu gösteren ${}^{base}Q^{j}_{cam}$ifadesi (5.45) ile hesaplanır.

$${}^{base}Q^{j}_{cam} = {}^{base}Q^{j}_{tool_0} * Q_X \tag{5.45}$$

Ölçüm düzeneği cam referans düzlemine göre ${}^{cam}P^{j}_{n}$değerlerini sunmaktadır. Alt indis $n$ölçülen nokta numarasına, üst sağ indis j, ölçümün yapıldığı duruşa; üst sol indis camölçümün referans düzlemine, işaret etmektedir. D_X, Q_X.bilindiğinde j.duruşta gerçekleştirilen${}^{cam}P^{j}_{n}$ölçüm sonucu Denklem (5.46) ile taban koordinatlarında ifade edilebilir.

$${}^{base}P_n = {}^{base}P^{j}_{tool_0} + rot({}^{base}Q^{j}_{tool_0}, D_X) + rot({}^{base}Q^{j}_{cam}, {}^{cam}P^{j}_{n}) \tag{5.46}$$



Şekil 5.38. Base-kamera frame arası ilişki

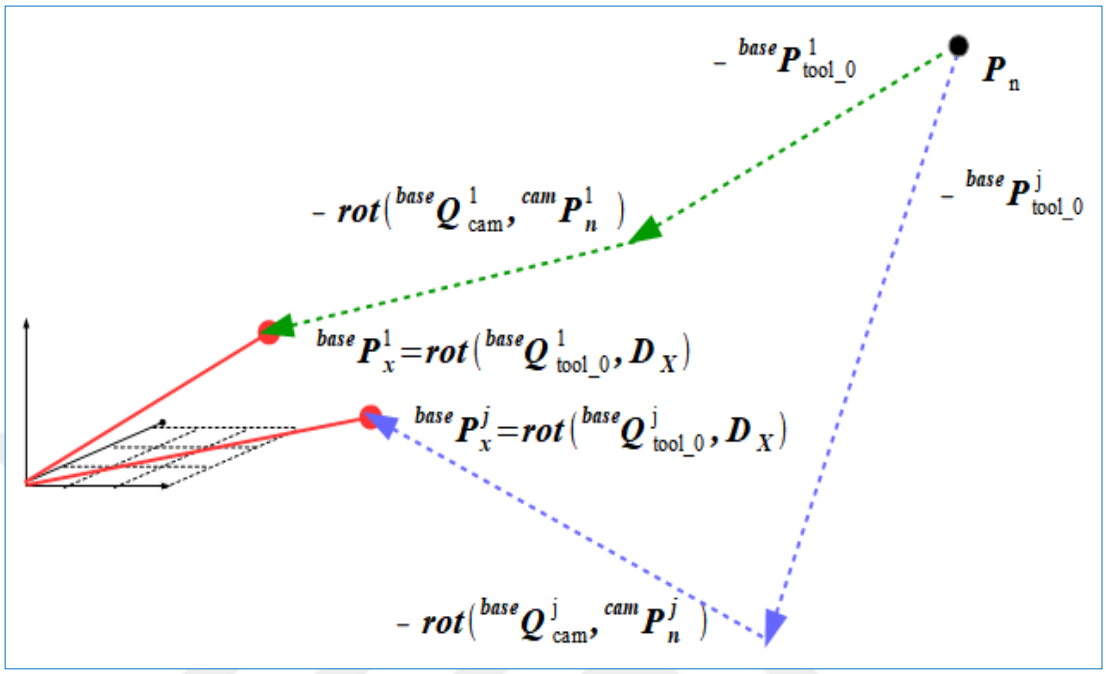
D_X, Q_Xdeğerlerinin bulunması hand-eye kalibrasyonu olarak bilinir. Şekil 5.38'e bakıldığında görüleceği üzere, $Q_A = \bar{Q}^{i}_{tool_0} * Q^{j}_{tool_0}$ ve Q_B i.duruştan j.duruşa geçmek için uygulanması gereken rotasyon olmak üzere

$$Q_A * Q_X = Q_X * Q_B \tag{5.47}$$

ifadesi yazılabilir. Bu ifade $AX = XB$olarak bilinen, genellikle matriks formunda değerlendirilen literatürde çokça konu edilmiş denklemdir. $S, \vec{V}$Koterniyonun skaler ve vektörel kısımlarını göstermek üzere, $S_A = S_B$ve $|\overrightarrow{V_A}| = |\overrightarrow{V_B}|$koşulu sağlandığında, Denklem (5.42) gösterilen standart koterniyon dönüşüm ifadesi ile aynı formdaki aşağıdaki bağıntıya ulaşılır.

$$\begin{aligned} S_A + \overrightarrow{V_A} &= Q_A \\ &= Q_X * Q_B * \bar{Q_X} \\ &= Q_X * S_B * \bar{Q_X} + Q_X * \overrightarrow{V_B} * \bar{Q_X} \\ &= S_B + Q_X * \overrightarrow{V_B} * \bar{Q_X} \end{aligned} \tag{5.48}$$

Yukarıdaki düzenleme yapıldığında artık problem 2 düzlem arasındaki mutlak dönüşün bulunmasına indirgenmiştir. [67]'deki çözüm adımları ile $Q_X$bulunur.



Şekil 5.39. Base-kamera çalışma uzayı ilişkisi

Denklem (5.46) Şekil 5.39'da gösterildiği üzere aşağıdaki gibi yeniden düzenlendiğinde;

$$\begin{aligned} {}^{base}P_x^j &= {}^{base}P_n - {}^{base}P^{j}_{tool_0} - rot({}^{base}Q^{j}_{cam}, {}^{cam}P_n^j) \\ &= rot({}^{base}Q^{j}_{tool_0}, D_X) \end{aligned} \tag{5.49}$$

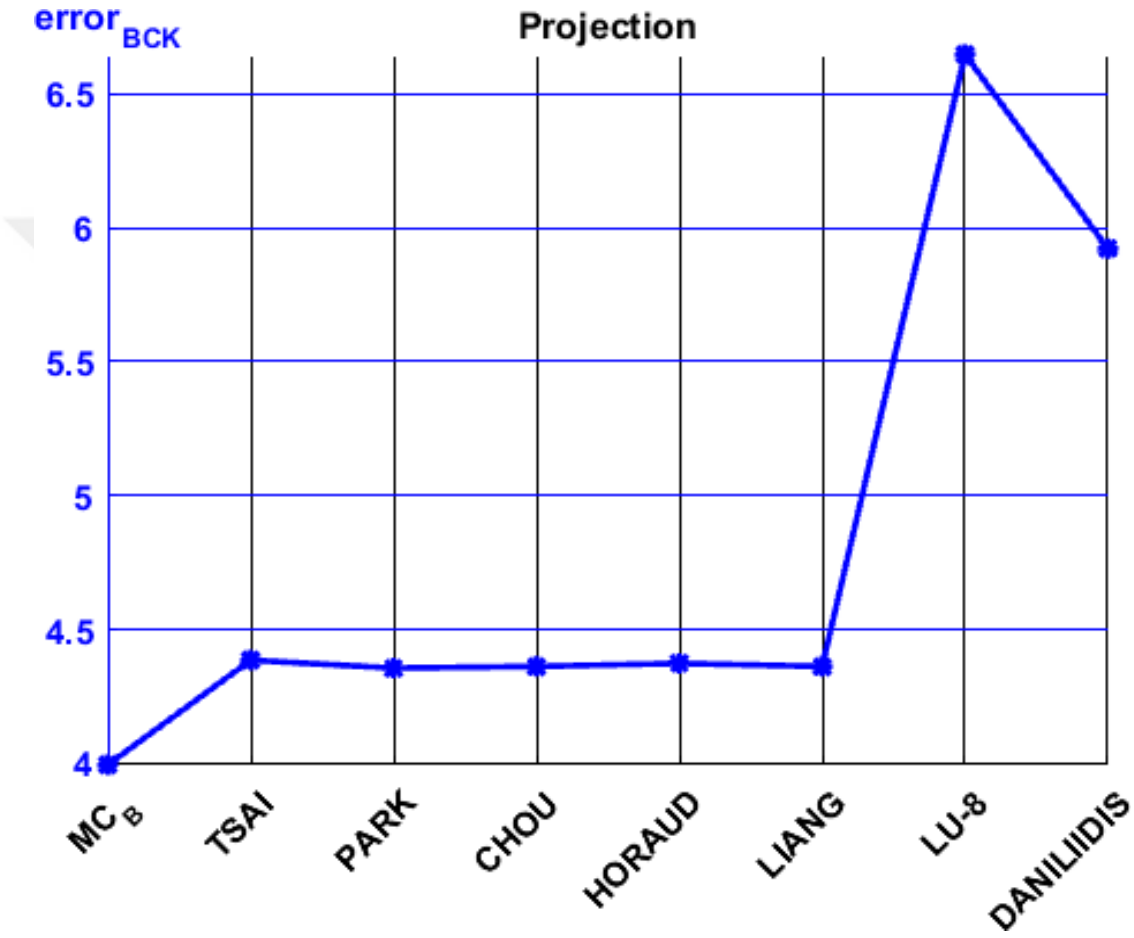
elde edilen denklemde ${}^{base}Q^{j}_{tool_0}$tanımındaki koterniyon gösterimi A^j_{3x3}rotasyon matrisine çevrilebilir. Bu durumda $A^{ij} = A^i - A^j$ve ${}^{base}P_x^{ij} = {}^{base}P_x^i - {}^{base}P_x^j$kısaltmaları yapıldığında;

$${}^{base}P_x^{ij} = A^{ij} D_X \tag{5.50}$$

elde edilir. Bu son denklem ile $Q_X$kullanılarak hesaplanan${}^{base}P_x^{ij}$ ve bilinen A^{ij}'den yola çıkarak kolaylıkla $D_X$hesaplanır.

Literatürde sunulmuş temel hand-eye kalibrasyonu yöntemlerinin detayları [76]'de sunulmuştur.

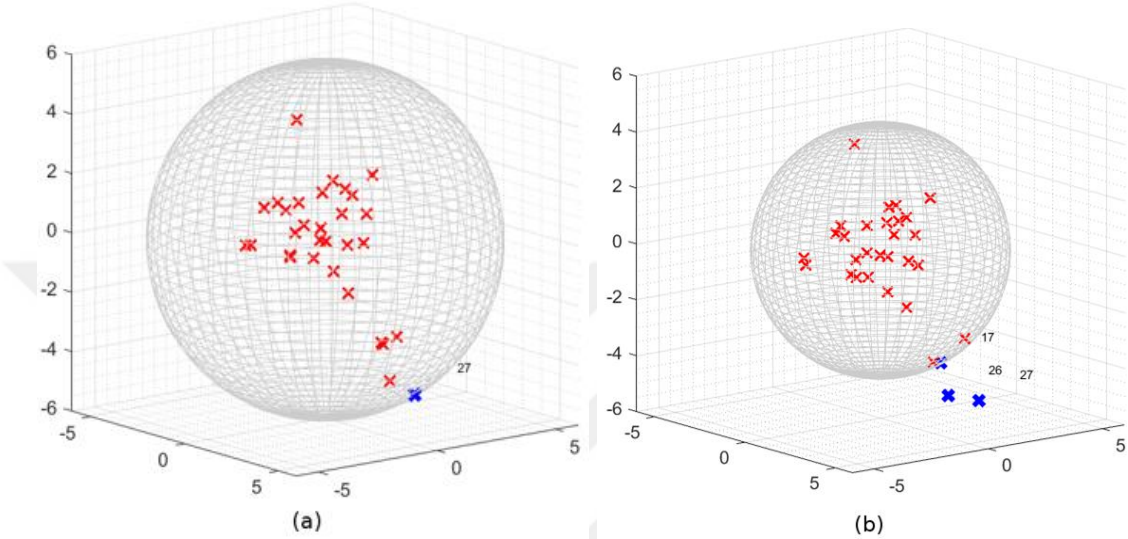
Kalibrasyon sürecinde 8x13 hücreli dama tahtası kullanılmıştır. Toplam 31 farklı duruş için 104 nokta değerlendirilmiştir. Her bir noktanın standart sapması elde edilerek grafikler oluşturulmuştur. Şekil 5.40'da stereo kamera ile alınan gerçek görüntüler ile elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Diğer algoritmalar $e = AX - XB$ olarak tanımlanmış hatayı azaltmayı hedeflemektedir. Direk projeksiyon hatasını düşürmeyi önceledığı için önerilen yöntem en hassas sonucu vermektedir.



Şekil 5.40. Algoritmaların karşılaştırılması

Tez'de sunulan yöntemin diğerlerinden ayıran diğer bir fark her bir duruş için D_X, Q_X değerlerini hesaplamasıdır. Hesaplamadan sonra D_X, Q_X grupları arasından back projection hatası en düşük olan nihai sonuç olarak sunulmaktadır. RANSAC yaklaşımı ile hemen hemen aynıdır. Ölçüm sayısı sınırlı olduğu için az sayıda rastgele değerler yerine tüm noktalar işlenmektedir. Bu sayede değerlendirme aşamasında belirlenen outlier noktalar projeksiyon hesabından dışlanabilir.

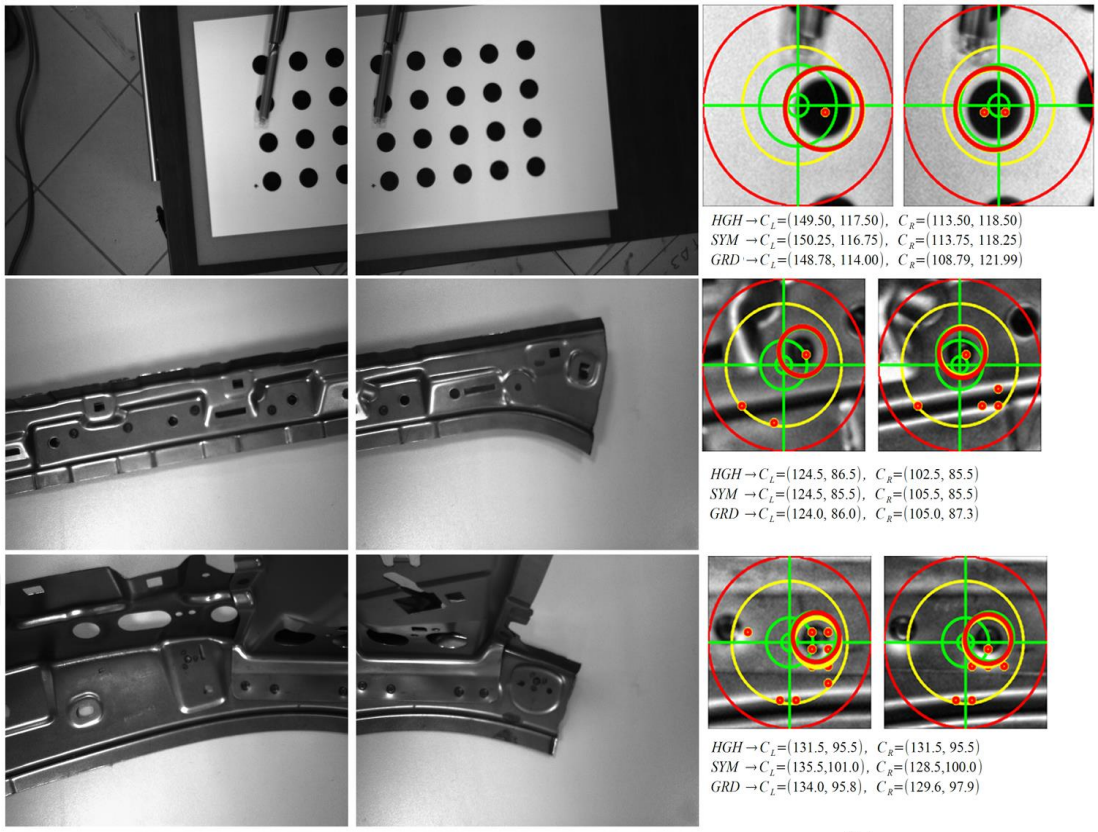
Şekil 5.41’de tüm duruşların dahil edilmesi ile elde edilen gerçek kalibrasyon görüntüleri ile hesaplanan projeksiyon hataları gösterilmiştir. Şekil 5.40'da yaklaşık 4 olan ortalama hata aslında ±6 mm aralığında değişmektedir. En yüksek hata değerlerini içeren 4 resim işlemden kaldırıldığında ise dağılım ±3 mm aralığına gerilerken, ortalama hata 1.5mm olarak ölçülmüştür.



Şekil 5.41. Hata projeksiyonu

Tüm istasyonun değerlendirilmesi yapılmadan önce nokta direnç kaynağının merkezinin bulunması için ve hand-eye kalibrasyonu için önerilen yöntem aynı anda kontrol edilmiştir. Şekil 5.42 (a)'da alınan stereo görüntüler ve şekil 5.42 (b)'de ise işlem gören çerçeveler ve algılanan merkez noktaları gösterilmektedir.

Robotun flanşına ultrasonik sondayı temsil etmek üzere takılan çubuk ile bu merkez noktalarına gidildiğinde pratik testlerimizde 1 mm'nin altında yakınsama ile ulaşıldığı gözlemlenmiştir. Projede kullanılan ultrasonik sonda için bu yeterli bir hassaslıktır.



Şekil 5.42. Punta merkez lokazizasyonu

5.10. Test İstasyonu, Endüstriyel Uygulaması ve Ölçüm Sonuçları

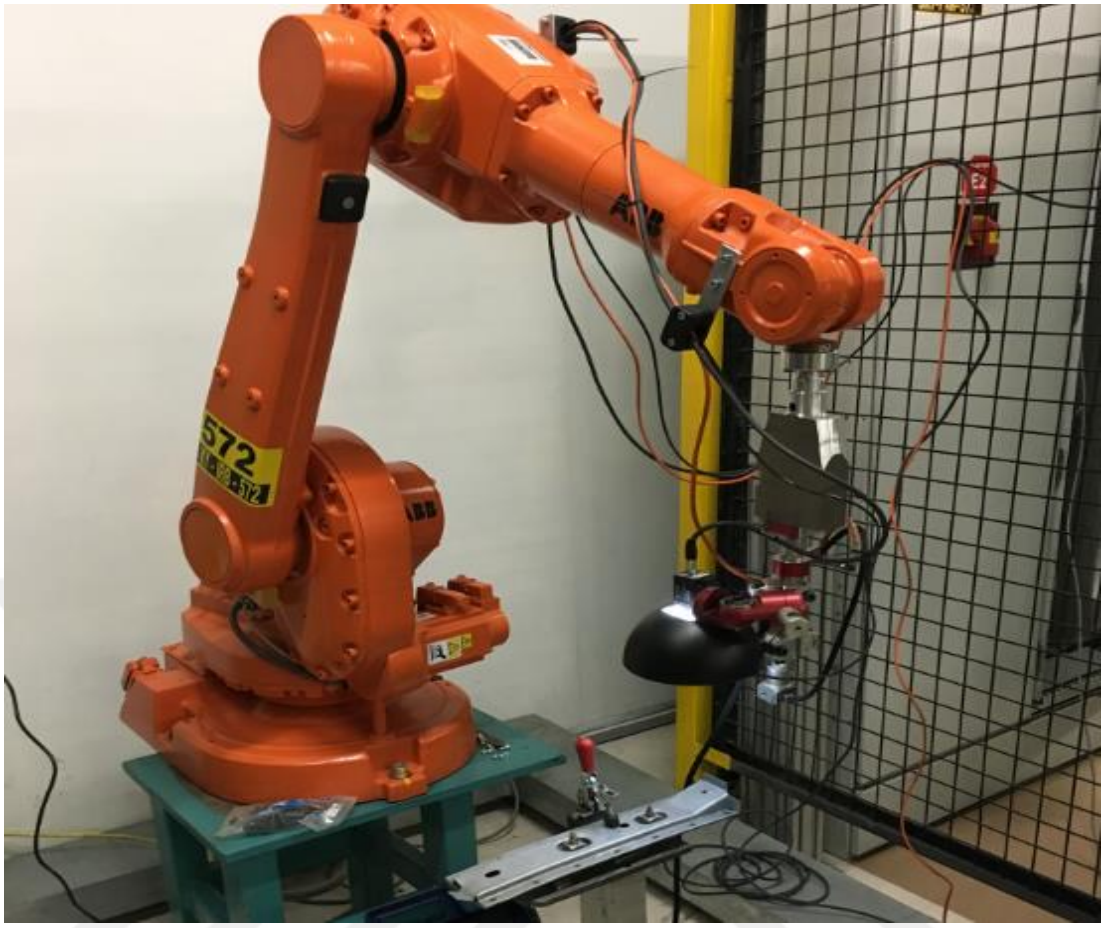
Tez çalışması kapsamında geliştirilen yazılım platformundan elde edilen sonuçlar doğrultusunda Ford Otosan Gölcük Fabrikası, Gövde Atölyesinde öncelikle bir test istasyonu kurulması kararlaştırılmıştır. Test istasyonunda, robot-plc-kamera-ölçüm ekipmanının mekaniksel kurulumu, ardından elektriksek bağlantıları ve haberleşeme (profibus/profinet) sistemleri kurulmuştur. Kurulan test istasyonu Şekil 5.43 ve Şekil 5.44'te gösterilmiştir.



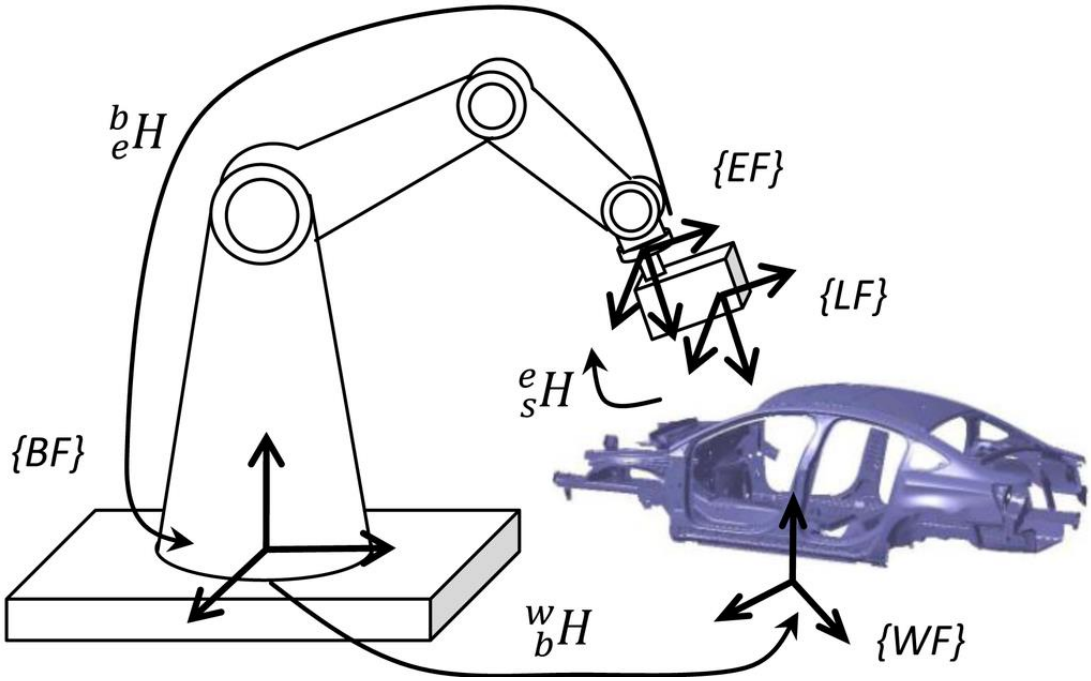
Şekil 5.43. Nokta direnç kaynağı robotik tahribatsız muayene test istasyonu

Test istasyonunda başta robot, kamera, ölçüm probu ve ölçüm parçası arasındaki koordinat dönüşümleri ve ilişkileri kurulmuştur. Bu ilişki temel prensip olarak Şekil 5.45'te gösterilmiştir.

Sistem kurulumu ve koordinat dönüşümleri tamamlandıktan sonra araç parçası üzerindeki punta noktasının konum ve rotasyon tespiti ve ölçüm probunu punta noktasının üzerine konumlandırma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Ölçüm probunun doğru konumlandırma problemini (0,2mm hassasiyet toleransı) çözmek için ortalama 4 ay civarında bir saha çalışması yapılmıştır.

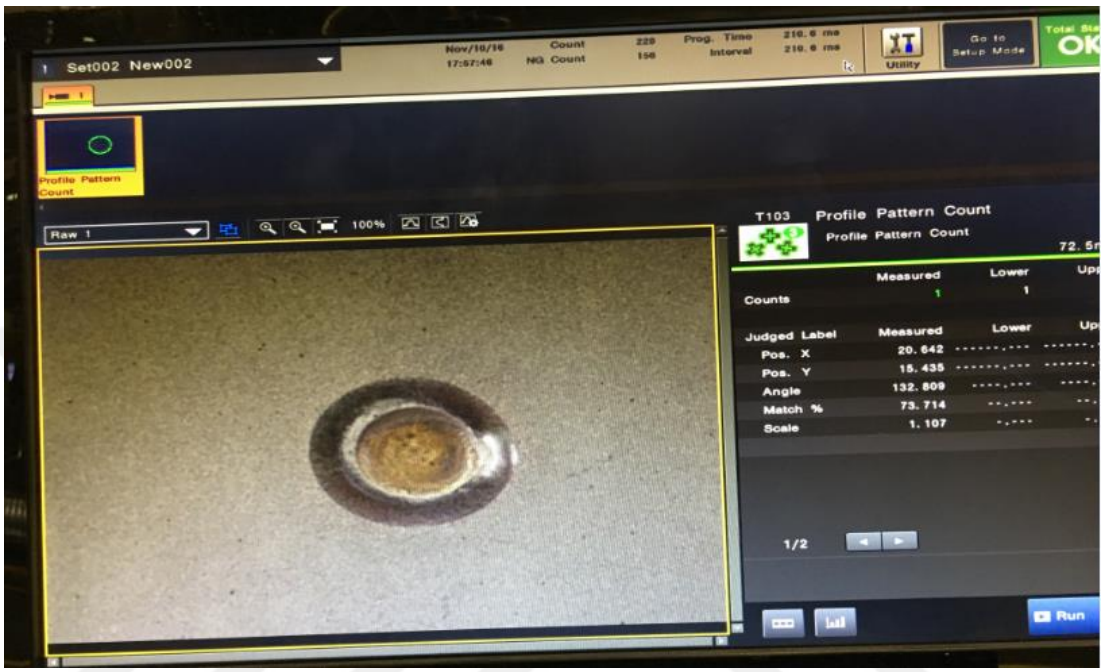


Şekil 5.44. Nokta direnç kaynağı robotik tahribatsız muayene test robotu



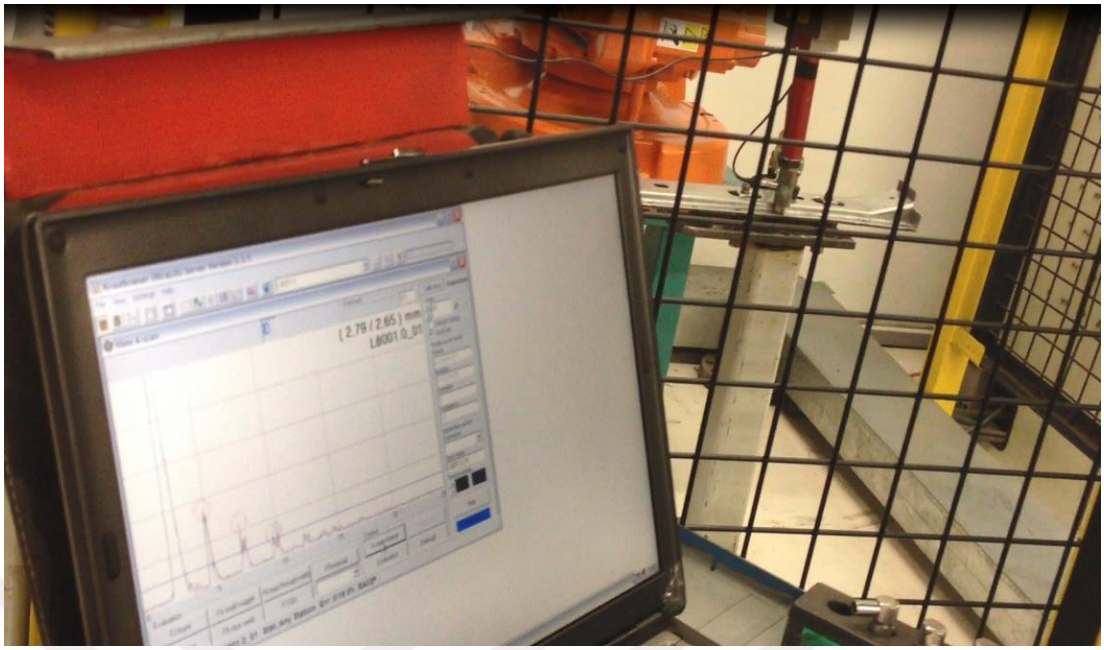
Şekil 5.45. Robot, kamera ve ölçüm noktası arasındaki koordinat dönüşümü

Saha çalışmaları sırasında Şekil 5.46'te verilen kamera ekranı sayesinde metal parça üzerinde yer alan nokta direnç kaynak noktasının konumu tespit edilir. Tespit işlemi aynı zamanda kamera sistemine tanıtılan referans punta noktasının şekli ile karşılaştırma yapmaktadır.



Şekil 5.46. Kamera ile nokta direnç kaynak noktasının tespiti

Ölçüm ve karşılaştırma sonucuna göre değerler kontrol sistemine gönderilir. Gelen değerlere göre çalışma uzayındaki bu noktaya göre robotun yönlendirmesi sağlanır. Robotun ucundaki ölçüm probu Şekil 5.47'da gösterildiği punta noktasına konumlanır ve ultrasonik ölçüm başlar.



Şekil 5.47. Robot ile nokta direnç kaynak noktasının ultrasonik ölçümü

Test çalışmaları için metal kupon parçalar hazırlanmış ve her kupon parçaya nokta direnç kaynak ile farklı özellikle 6 adet punta atılmıştır. Bu metal kuponlar test istasyonunda robot yardımı ile ultrasonik ölçümü gerçekleştirilmiş ve daha sonra önce operatörün değerlendirmesine sunulmuş ardından da kupon parçalara (14 adet) yırtma testi (teardown) yapılmıştır.

Robotik ultrasonik ölçüm sırasında kameradan alınan veriler ve ultrasonik ölçüm parametreleri tablo 5.2'de verilmiştir.

Tablo 5.2. Robotik nokta direnç kaynağı tahribatsız muayene ölçüm değerleri

No	**Punta ID**	**Robotik Kamera Ölçümü**				**Robotik Ultrasonik Ölçümü**				
		X (mm)	Y (mm)	Angle (derece)	Match (%)	Thickness (mm)	Sound velocity	Gain [dB]	Probe delay [µs]	Range [mm]
1	**4,1**	27,40	11,40	96,40	60,30	-	5920	68,00	20,494	14,20
2	**4,2**	20,30	17,80	-150,20	88,50	1,42	5920	68,00	20,494	14,20
3	**4,3**	10,70	21,60	-103,20	94,30	1,13	5920	68,00	20,494	14,20
4	**4,4**	19,10	19,40	-120,20	89,10	1,41	5920	68,00	20,494	14,20

Tablo 5.2. (Devam) Robotik nokta direnç kaynağı tahribatsız muayene ölçüm değerleri

5	**4,5**	22,30	11,20	-99,60	95,70	1,14	5920	68,00	20,494	14,20
6	**4,6**	17,50	15,20	-30,40	99,40	1,00	5920	68,00	20,494	14,20
7	**5,1**	18,30	12,60	-72,40	44,00	-	5920	66,50	20,494	14,20
8	**5,2**	13,40	9,70	-50,30	99,90	1,12	5920	66,50	20,494	14,20
9	**5,3**	23,40	12,70	100,40	75,60	1,43	5920	66,50	20,494	14,20
10	**5,4**	12,80	17,50	34,50	88,00	1,16	5920	66,50	20,494	14,20
11	**5,5**	24,60	13,60	135,70	79,00	1,43	5920	66,50	20,494	14,20
12	**5,6**	24,70	14,00	-90,90	99,90	1,15	5920	66,50	20,494	14,20
13	**6,1**	22,90	16,30	-27,40	87,30	1,12	5920	72,50	20,494	14,20
14	**6,2**	19,70	19,40	-77,20	96,40	1,32	5920	67,50	20,494	14,20
15	**6,3**	14,70	16,80	-120,30	72,30	0,71	5920	67,50	20,494	14,20
16	**6,4**	12,40	15,70	-29,50	87,20	1,15	5920	70,00	20,494	14,20
17	**6,5**	17,90	10,40	-62,70	90,10	1,02	5920	70,00	20,494	14,20
18	**6,6**	25,40	13,80	136,60	85,60	1,42	5920	70,00	20,494	14,20
19	**7,1**	17,90	16,30	-117,40	91,40	1,08	5920	70,00	20,494	14,20
20	**7,2**	12,50	11,50	-99,50	90,20	1,36	5920	64,50	20,494	14,20
21	**7,3**	21,40	9,70	110,90	77,10	0,71	5920	64,50	20,494	14,20
22	**7,4**	konum tespiti yapamadı				1,36	5920	64,50	20,494	14,20
23	**7,5**	22,40	10,40	162,00	79,70	1,42	5920	64,50	20,494	14,20
24	**7,6**	18,40	13,50	-7,50	96,60	1,10	5920	71,50	20,494	14,20
25	**8,1**	17,20	14,70	-55,30	82,20	1,43	5920	71,50	20,494	14,20
26	**8,2**	24,90	17,50	-53,20	59,10	0,71	5920	71,50	20,494	14,20
27	**8,3**	19,40	13,40	-117,20	85,40	1,15	5920	73,00	20,494	14,20

Tablo 5.2. (Devam) Robotik nokta direnç kaynağı tahribatsız muayene ölçüm değerleri

28	**8,4**	konum tespiti yapamadı				-	5920	73,00	20,494	14,20
29	**8,5**	13,50	14,60	-97,50	86,40	1,39	5920	70,00	20,494	14,20
30	**8,6**	20,40	19,30	-94,60	99,90	1,13	5920	72,00	20,494	14,20
31	**9,1**	9,40	19,30	-11,90	55,70	-	5920	72,00	20,494	14,20
32	**9,2**	16,90	17,10	-98,30	97,40	1,31	5920	72,00	20,494	14,20
33	**9,3**	21,70	18,30	127,10	89,70	1,43	5920	72,00	20,494	14,20
34	**9,4**	20,60	16,40	60,40	84,40	1,15	5920	75,50	20,494	14,20
35	**9,5**	18,10	17,50	170,60	99,90	1,18	5920	72,00	20,494	14,20
36	**9,6**	20,30	10,40	97,40	89,00	1,42	5920	75,50	20,494	14,20
37	**10,1**	19,10	18,70	-170,10	99,40	1,12	5920	72,00	20,494	14,20
38	**10,2**	12,30	11,40	-5,20	76,20	1,44	5920	72,00	20,494	14,20
39	**10,3**	21,60	11,60	-88,30	77,50	1,43	5920	72,00	20,494	14,20
40	**10,4**	16,70	15,80	-98,00	96,40	1,33	5920	66,50	20,494	14,20
41	**10,5**	konum tespiti yapamadı				-	5920	66,50	20,494	14,20
42	**10,6**	16,10	12,40	80,40	93,60	1,14	5920	73,00	20,494	14,20
43	**11,1**	20,30	19,10	-110,10	97,20	1,27	5920	64,00	20,494	14,20
44	**11,2**	15,40	16,30	-70,70	95,50	1,38	5920	63,00	20,494	14,20
45	**11,3**	25,70	14,30	-80,60	83,40	1,10	5920	65,00	20,494	14,20
46	**11,4**	11,10	11,80	110,80	88,50	1,42	5920	65,00	20,494	14,20
47	**11,5**	21,80	13,70	38,40	97,80	1,19	5920	59,00	20,494	14,20
48	**11,6**	20,20	15,60	-50,30	89,10	1,43	5920	59,00	20,494	14,20
49	**12,1**	18,10	16,40	-8,30	97,40	1,16	5920	60,50	20,494	14,20
50	**12,2**	18,90	15,30	-11,00	98,20	1,11	5920	71,00	20,494	14,20

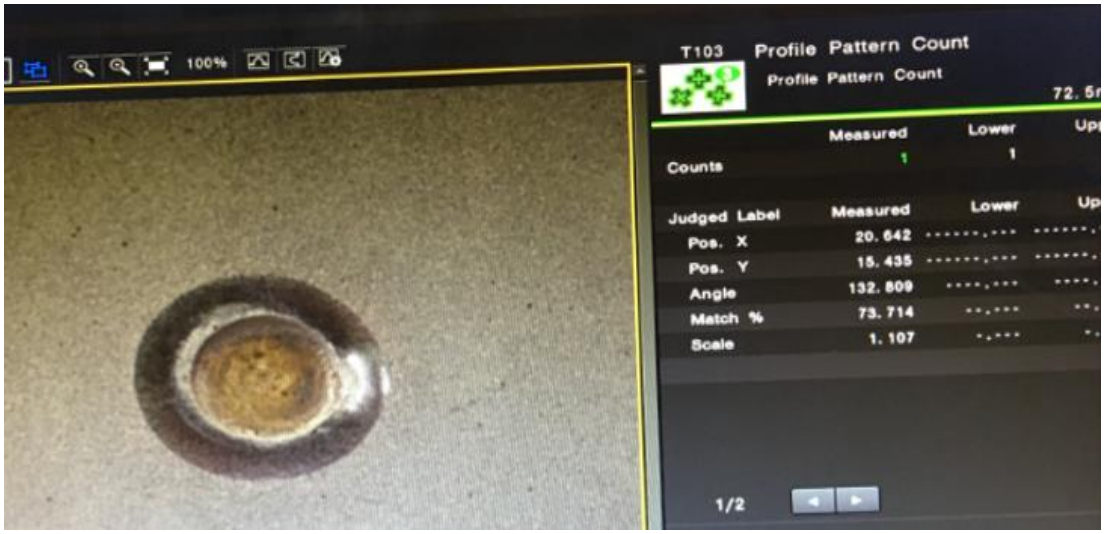
Tablo 5.2. (Devam) Robotik nokta direnç kaynağı tahribatsız muayene ölçüm değerleri

51	**12,3**	14,30	16,80	-47,80	72,00	-	5920	71,00	20,494	14,20
52	**12,4**	20,20	13,10	130,00	90,00	1,42	5920	71,00	20,494	14,20
53	**12,5**	15,70	12,40	-98,90	98,20	1,20	5920	66,00	20,494	14,20
54	**12,6**	14,40	13,60	120,00	84,20	1,42	5920	66,00	20,494	14,20
55	**13,1**	21,30	14,20	-110,40	84,00	0,71	5920	66,00	20,494	14,20
56	**13,2**	26,10	12,90	-103,80	81,10	1,43	5920	66,00	20,494	14,20
57	**13,3**	15,80	13,50	-50,30	98,00	1,33	5920	70,00	20,494	14,20
58	**13,4**	23,40	13,60	50,90	99,90	2,49	5920	79,50	20,494	14,20
59	**13,5**	20,40	15,40	-98,10	93,40	1,13	5920	72,50	20,494	14,20
60	**13,6**	konum tespiti yapamadı				-	5920	72,50	20,494	14,20
61	**14,1**	17,90	18,70	-35,40	98,20	1,36	5920	67,50	20,494	14,20
62	**14,2**	16,20	12,30	-101,90	72,20	1,41	5920	67,50	20,494	14,20
63	**14,3**	14,70	14,30	-60,20	98,10	1,34	5920	68,50	20,494	14,20
64	**14,4**	17,20	16,50	-118,40	92,00	1,01	5920	74,00	20,494	14,20
65	**14,5**	14,10	17,80	-50,90	81,00	-	5920	74,00	20,494	14,20
66	**14,6**	19,20	16,10	85,00	89,00	1,43	5920	74,00	20,494	14,20
67	**15,1**	14,80	13,10	-70,70	99,90	1,48	5920	74,50	20,494	14,20
68	**15,2**	16,70	12,10	110,70	97,70	1,34	5920	64,50	20,494	14,20
69	**15,3**	15,60	13,60	-70,20	97,20	1,41	5920	64,50	20,494	14,20
70	**15,4**	17,20	15,20	150,10	82,00	0,72	5920	64,50	20,494	14,20
71	**15,5**	18,70	13,60	-110,40	92,10	1,28	5920	71,50	20,494	14,20
72	**15,6**	14,70	14,20	80,30	90,20	1,42	5920	67,00	20,494	14,20
73	**16,1**	19,70	14,80	-77,20	97,70	1,31	5920	69,50	20,494	14,20

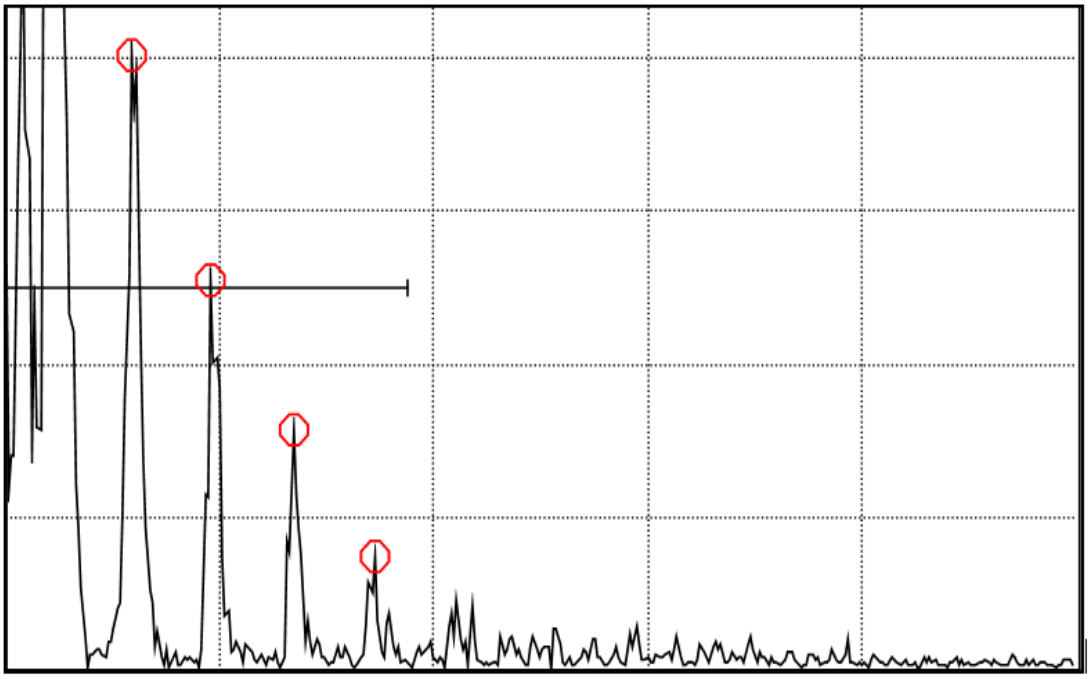
Tablo 5.2. (Devam) Robotik nokta direnç kaynağı tahribatsız muayene ölçüm değerleri

74	**16,2**	19,20	17,20	-98,50	99,90	1,05	5920	78,50	20,494	14,20
75	**16,3**	22,40	17,20	-70,90	98,50	1,38	5920	67,50	20,494	14,20
76	**16,4**	konum tespiti yapamadı				-	5920	67,50	20,494	14,20
77	**16,5**	22,60	15,70	-23,40	86,30	1,42	5920	67,50	20,494	14,20
78	**16,6**	15,50	13,40	130,70	76,00	1,42	5920	67,50	20,494	14,20
79	**17,1**	16,10	13,40	-75,20	24,00	-	5920	67,50	20,494	14,20
80	**17,2**	21,40	16,20	150,40	98,70	1,28	5920	77,50	20,494	14,20
81	**17,3**	22,70	15,10	85,40	99,90	-	5920	71,00	20,494	14,20
82	**17,4**	19,50	15,70	115,20	99,90	1,37	5920	71,00	20,494	14,20
83	**17,5**	16,10	16,20	-147,10	84,00	0,70	5920	71,00	20,494	14,20
84	**17,6**	19,60	16,20	-152,40	90,60	1,43	5920	71,00	20,494	14,20

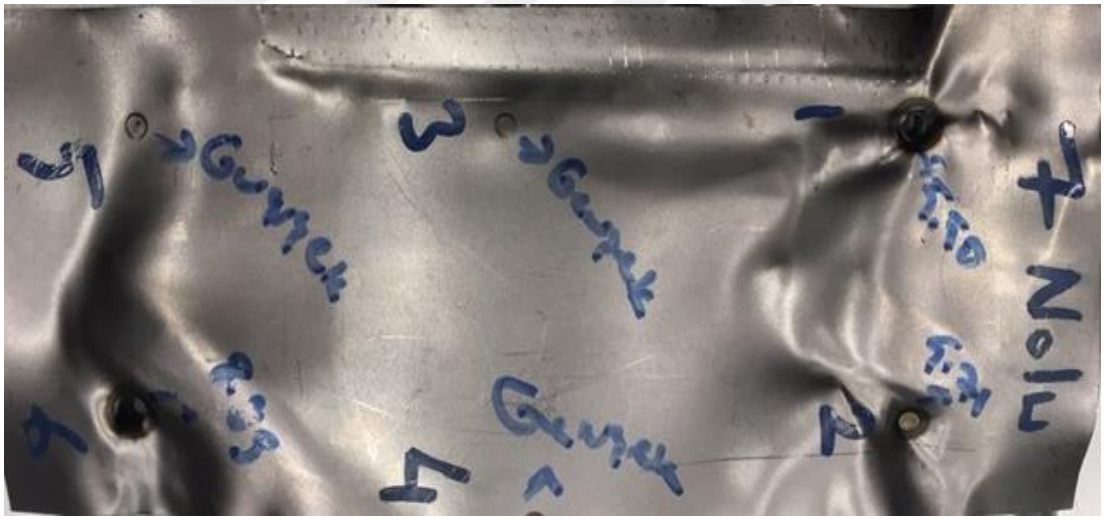
Yapılan ölçümler ile ilgili ekran görüntüleri Şekil 5.48, Şekil 5.49 ve Şekil 5.50'de gösterilmiştir.



Şekil 5.48. Kamera ile nokta direnç kaynak noktasının konum tespiti



Şekil 5.49. Robotik nokta direnç kaynak noktasının UT testi



Şekil 5.50. Nokta direnç kaynak noktasının yırtma (teardown) testi

Elde edilen ölçüm sonuçları; robotun nokta direnç kaynak noktasını bulmak için kullandığı kamera verisi, kamera verisine göre konumlayarak yaptığı ultrasonik ölçümü, operatörün punta test kuponlarına bakarak yaptığı değerlendirme ve yırtma testi sonuçları Tablo 5.3'te karşılaştırılmıştır.

Tablo 5.3. Robotik ultrasonik muayene test ölçüm sonuçlarını karşılaştırma

No	Punta ID	Değerlendirme			
		Robotik Kamera sonucu (Match -%)	Ultrasonik Ölçüm Sonucu	Operatörün Değerlendirmesi	Yırtma Testi Sonucu
1	4,1	60,30	Kenar	Kenar	RED
2	4,2	88,50	Yapışık	Yapışık	RED
3	4,3	94,30	OK	Deforme	OK
4	4,4	89,10	Gevşek	Yapışık	RED
5	4,5	95,70	OK	Deforme	OK
6	4,6	99,40	OK	Deforme	OK
7	5,1	44,00	Kenar	Kenar	RED
8	5,2	99,90	OK	Deforme	OK
9	5,3	75,60	Gevşek	Yapışık	RED
10	5,4	88,00	OK	OK	OK
11	5,5	79,00	Yapışık	Yapışık	RED
12	5,6	99,90	OK	OK	OK
13	6,1	87,30	OK	Deforme	OK
14	6,2	96,40	OK	OK	RED
15	6,3	72,30	Gevşek	Gevşek	RED
16	6,4	87,20	OK	OK	OK
17	6,5	90,10	OK	Deforme	OK
18	6,6	85,60	Yapışık	Yapışık	RED
19	7,1	91,40	OK	Deforme	OK
20	7,2	90,20	Yapışık	Yapışık	RED

Tablo 5.3. (Devam) Robotik ultrasonik muayene test ölçüm sonuçlarını karşılaştırma

21	**7,3**	77,10	Gevşek	Gevşek	RED
22	**7,4**	NA	Yapışık	Yapışık	RED
23	**7,5**	79,70	Yapışık	Yapışık	RED
24	**7,6**	96,60	OK	Deforme	OK
25	**8,1**	82,20	Yapışık	Yapışık	RED
26	**8,2**	59,10	**Yapışık**	**Gevşek**	RED
27	**8,3**	**85,40**	**RED**	**OK**	**OK**
28	**8,4**	NA	Kenar	Kenar	RED
29	**8,5**	86,40	Yapışık	Yapışık	RED
30	**8,6**	99,90	OK	Deforme	OK
31	**9,1**	55,70	Kenar	Kenar	RED
32	**9,2**	97,40	OK	OK	OK
33	**9,3**	**89,70**	Yapışık	Yapışık	RED
34	**9,4**	84,40	OK	OK	OK
35	**9,5**	99,90	OK	OK	OK
36	**9,6**	**89,00**	Yapışık	Yapışık	RED
37	**10,1**	99,40	OK	OK	OK
38	**10,2**	76,20	Yapışık	Yapışık	RED
39	**10,3**	77,50	Yapışık	Yapışık	RED
40	**10,4**	96,40	OK	OK	OK
41	**10,5**	NA	Kenar	Kenar	RED
42	**10,6**	93,60	OK	OK	OK
43	**11,1**	97,20	OK	OK	OK

Tablo 5.3. (Devam) Robotik ultrasonik muayene test ölçüm sonuçlarını karşılaştırma

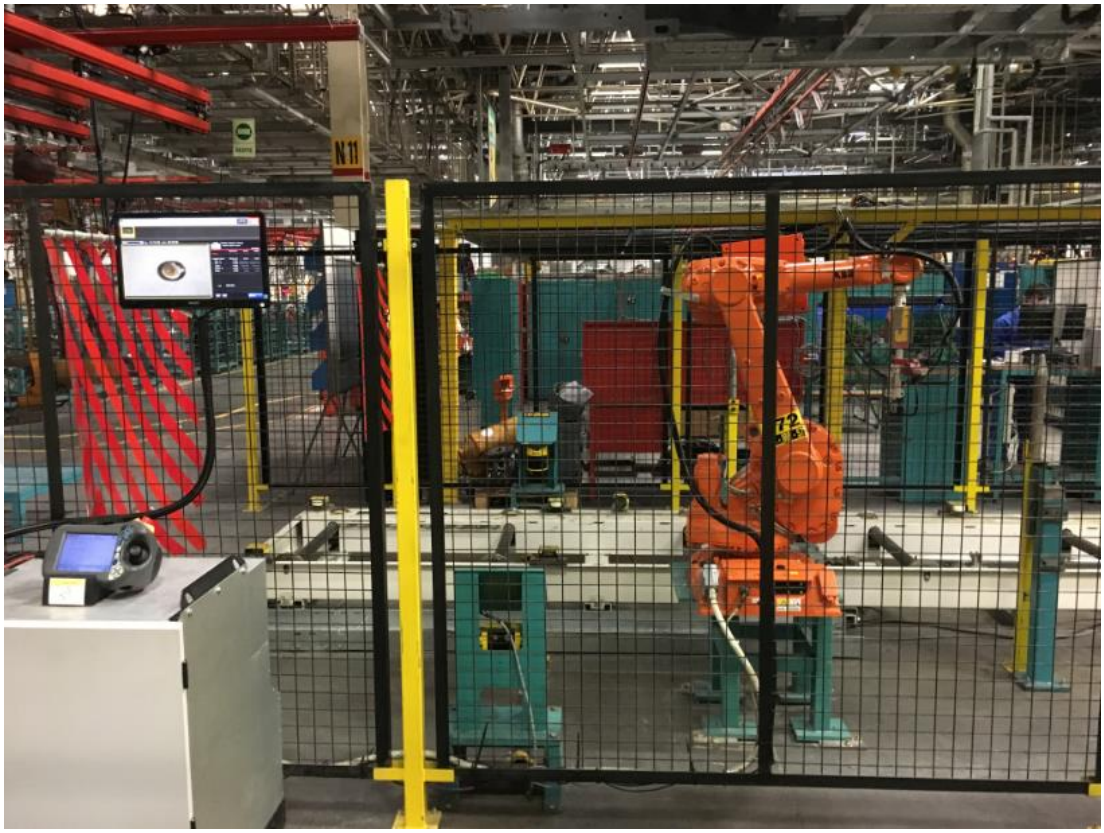
44	**11,2**	95,50	OK	Deforme	OK
45	**11,3**	83,40	**RED**	**Deforme**	**OK**
46	**11,4**	88,50	Yapışık	Yapışık	RED
47	**11,5**	97,80	OK	OK	OK
48	**11,6**	**89,10**	Yapışık	Yapışık	RED
49	**12,1**	97,40	OK	OK	OK
50	**12,2**	98,20	OK	Deforme	OK
51	**12,3**	72,00	Kenar	Kenar	RED
52	**12,4**	**90,00**	Yapışık	Yapışık	RED
53	**12,5**	98,20	OK	OK	OK
54	**12,6**	84,20	Yapışık	Yapışık	RED
55	**13,1**	84,00	Gevşek	Gevşek	RED
56	**13,2**	81,10	Yapışık	Yapışık	RED
57	**13,3**	98,00	OK	OK	OK
58	**13,4**	**99,90**	Yanık	Yanık	RED
59	**13,5**	93,40	OK	Deforme	OK
60	**13,6**	NA	Kenar	Kenar	RED
61	**14,1**	98,20	OK	Deforme	OK
62	**14,2**	72,20	Yapışık	Yapışık	RED
63	**14,3**	98,10	OK	OK	OK
64	**14,4**	92,00	OK	Deforme	OK
65	**14,5**	81,00	Kenar	Kenar	RED
66	**14,6**	**89,00**	**Gevşek**	**Yapışık**	RED

Tablo 5.3. (Devam) Robotik ultrasonik muayene test ölçüm sonuçlarını karşılaştırma

67	**15,1**	**99,90**	Yanık	Yanık	RED
68	**15,2**	97,70	OK	OK	OK
69	**15,3**	97,20	OK	Deforme	OK
70	**15,4**	82,00	**Gevşek**	**Yanık**	RED
71	**15,5**	**92,10**	Yapışık	Yapışık	RED
72	**15,6**	**90,20**	Yapışık	Yapışık	RED
73	**16,1**	97,70	OK	OK	OK
74	**16,2**	**99,90**	Yanık	Yanık	RED
75	**16,3**	98,50	OK	Deforme	OK
76	**16,4**	NA	Kenar	Kenar	RED
77	**16,5**	86,30	Yapışık	Yapışık	RED
78	**16,6**	76,00	Yapışık	Yapışık	RED
79	**17,1**	24,00	Kenar	Kenar	RED
80	**17,2**	**98,70**	Yanık	Yanık	RED
81	**17,3**	**99,90**	Yanık	Yanık	RED
82	**17,4**	99,90	OK	Deforme	OK
83	**17,5**	84,00	Gevşek	Gevşek	RED
84	**17,6**	**90,60**	Yapışık	Yapışık	RED

Yapılan bu ölçümler sonrasında elde edilen sonuçlar dikkate alınarak otomotiv imalat sisteminde nokta direnç kaynak prosesinin muayene işleminin robot ile gerçekleştirilebileceği ortaya konulmuştur. Aynı zamanda bu çalışma sayesinde nokta direnç prosesindeki birincil tahribatsız muayene adımı olan görsel kontrol işleminde robota takılacak bir kamera yardımı sayesinde yapılabileceği ispatlanmıştır. Tez

çalışmasının bir çıktısı olarak Şekil 5.51'ta Ford Otosan Gölcük Fabrikasında Gövde Atölyesinde gerçek üretim şatlarında çalışan bir robotik istasyon kurulmuştur.



Şekil 5.51. Robot ile nokta direnç kaynak noktasının ultrasonik ölçümü

Bu robotik istasyonda, günlük 280 araç için online olarak bir tahribatsız muayene (ultrasonik ve görsel kontrol) prosesi gerçekleştirilmektedir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, otomotiv endüstrisinde nokta direnç kaynak işleminin kalite kontrolünde kullanılan ve tahribatsız yöntemlerden en yaygın olan ultrasonik kontrol prosesinin robot yardımı ile gerçekleştirilmesi için gerekli olan platform tasarlanmıştır. Tasarlanan platformda başta robot, kamera ve plc gibi sistem bileşenleri için ilişkisel koordinat dönüşümleri, kinematik bağıntıları ve kontrol algoritmaları ortaya konulmuştur. Özellikle robotun eli (end effector) üzerindeki kamera (Hand-Eye) sistemi için robotun çalışma uzayında yönlendirilmesi gereken ilgili hedef noktanın konum ve oryantasyonu en doğru şekilde bulmak adına yapılması gereken kamera kalibrasyonu için yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Geliştirilen bu yöntem sayesinde otomotiv endüstrisinin tamamından manuel olarak operatörler tarafından gerçekleştirilen ultrasonik kontrol tahribatsız muayenesinin tamamen otomatik olarak endüstriyel robot ile yapılması sağlanmıştır. Benzer şekilde diğer bir tahribatsız kontrol yöntemi olan görsel muayene işleminde yine robot üzerinde yer alan kamera yardımı ile yapılabileceği ispatlanmıştır. Ayrıca robot eğitimi ve uygulamaları alanında temel ihtiyaç haline gelen offline robot platformları konusunda geliştirilen yeni bir yazılım ortaya konulmuştur. Endüstriyel ortamdaki saha koşullarını yaratmak ve de fiziksel olarak bir robotu laboratuvar ortamında bulundurmak her zaman mümkün olmamakla beraber bir robot bulundurma imkânının sağlandığı durumlarda bile robotik tekniği ile ilgili anlatılan konular bulundurulan robot marka ve modeli ile sınırlı kalmaktadır. Bu tez çalışması sayesinde, mühendislik eğitiminde endüstriyel robotlar ile ilgili konular islenirken robot marka ve modelinden bağımsız bir şekilde ve her marka ve modelinin ölçülerini sağlayacak basta programlama, kinematik, çalışma uzayı ve robotun dinamik parametreleri olan hız-ivme konuları için C++ programlama dilinde ve Fox ToolKit kütüphanesi kullanılarak bir robotik eğitim platformu ortaya konulmuştur. Bu çalışmada geliştirilen kamera ve kinematik modelleri, gerçek imalat şartlarındaki sistemin yüksek kararlığı dikkate alındığında bu modelin kalite kontrol konusundaki diğer uygulamalarda ve robotik otomasyon süreçlerinde de değerlendirilebileceği görülmektedir.

KAYNAKLAR

[1] Cesar M., Thomas W., Enhancement of the weldability in spot welding, *AWS Detroit Section Sheet Welding Conference IV*, Shouthfield, Detroit, 8-14 April 1990.

[2] Joe B., Ramon S., Improvements In Ultrasonic Inspection Of Resistance Spot Welds, *The 2. International Conference on Technical Inspection and NDT (TINDT2008)*, Tehran, Iran, 21-22 October 2008.

[3] Pandey A. K., Khan M. I., Moeed K. M., Investigation Of The Effect Of Current On Tensile Strength And Nugget Diameter Of Spot Welds Made On AISI-1008 Steel Sheets, *International Journal of Technical Research and Applications*, 2013, **1**, 01-08.

[4] Hongyan Z., Jacek S., *Resistance Welding: Fundamentals and Applications*, Second Edition, CRC Press, NewYork, 2011.

[5] Hongyan Z., Jacek S., *Resistance Welding Data Book*, Fourt Edition, Mallory Co.Inc., India, 1951.

[6] Khan M. I., Pandey A. K., State Of Art In Modern Resıstance Spot Welding, *International Journal of Technical Research and Applications*, 2013, **1**, 19-25.

[7] Resistance Welding Basics, Welding Sequence Definitions Machine Set-Up Rules For Making Good Welds, http://www.entroncontrols.com/images/downloads/700081C.pdf, (Ziyaret Tarihi: 26 Nisan 2017).

[8] Lutz D., *Resistance Welding - Basic Level*, TALAT Lecture 4500, EAA - European Aluminium Association, Germany, 1994.

[9] Manoj R., Vishal A., Optimization Of Spot Welding Process Parameters For Maximum Tensile Strength, *International Journal Of Mech. Eng. & Rob. Res*, 2014, **3**, 505-517.

[10] Wojciech M., Alex K., Nicholas B., David W., Use Of Modified Electrode Caps For Surface Quality Welds Inresistance Spot Welding, *Journal Of Manufacturing Processes*, 2016, **22**, 60–73.

[11] Gugel M. D., Electrode Wear Mechanisms During The Resistance Spot Welding Of Hot-Dipped Galvanized Steel, Doktora Tezi, MTU, Nature Science Institute , Michigan, 1995.

[12] Akyol M., Otomotiv Sanayisinde Kullanılan Direnç Nokta Kaynak Uygulamaları ve Karşılaşılan Sorunlar, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2001, 104136.

[13] Gourd L. M., *Kaynak Teknolojisinin Esasları*, Birsen Yayınevi, İstanbul, 1996.

[14] Al-Jader M. A., Cullen J. D., Athi N., And Al-Shamma A. I., Spot Welding Theoretical And Practical Investigations Of The Expulsion Occurrence In Joining Metal For The Automotive Industry, *Second International Conference On Developments In Esystems Engineering*, Abu Dhabi, UAE, 14-16 December 2009.

[15] Athi N., Wylie S. R., Cullen J. D., Al-Shamma A.I., Sun T., Ultrasonic Non-Destructive Evaluation For Spot Welding In The Automotive Industry, *IEEE Sensors Conferance*, Christchurch, New Zealand, 25-28 October 2009.

[16] Macwan A., Chen D. L., Ultrasonic Spot Welding Of Rare-Earth Containing Zek100 Magnesium Alloy To 5754 Aluminum Alloy, *Materials Science & Engineering*, 2016, **666**, 139–148.

[17] Óscar M., María P., José I. S., José M. G., Assessment of resistance spot welding quality based on ultrasonictesting and tree-based techniques, *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, **214**, 2478–2487.

[18] Umang P., Pandya D. H., Experimental Investigation of Ultrasonic Welding on Non-metallic Material, *Procedia Technology*, 2016, **23**, 551-557.

[19] Dawei Z., Wang T., Sheng S., Lin Z., Real time monitoring weld quality of small scale resistance spot welding for titanium alloy, *Measurement*, 2013, **46**, 1957–1963.

[20] Subramanian D., Dongarkar G. K., Das M., Fernandez V., Grzadzinsky G., Real time monitoring and quality control of resistance spot welds usingvoltag e, current and force data, *IEEE, Electro/Information Technology Conference*, Milwaukee-USA, 26-27 August 2004.

[21] Runnemalm A., Appelgren A., Ahlberg J., Lundevall A., and Albinsson O., Automated NDT cell for quality checking of spot welds, Technical Report, *VINNOVA*, 642621, Sweden, 2013.

[22] Runnemalm A., Appelgren A., Evaluation of non-destructive testing methods for automatic quality checking of spotwelds, Project report, *SpotLight*, report No.13., Sweden, 2012.

[23] Milne J. M., Reynolds W. N., Application of thermal pulses and infrared pulses and infrared thermal images for observing sub-surface structures in metals and composites, *in SPIE Proc*, 1986, **1**, 293-302.

[24] Meola C., Giovanni M., Antonino S., Giuseppe G.,, The use of infrared thermography for nondestructive evaluation of joints, *Infrared Physics & Amp Technology*, 2004, **46**, 93-99.

[25] Wanchuck W., Charles W. C., Zhili F., Hsin W. Wei Z., Hanbing X., Application of infrared imaging for quality inspection in resistance spot welds, *The International Society for Optical Engineering*, DOI: 10.1117/12.818368

[26] Sangyun L., Junyoung N., Woonggi H., Jaeseong K., Boyoung L., A study on integrity assessment of the resistance spot weld by Infrared Thermography, *Procedia Engineering*, 2011, **10**, 1748-1753.

[27] Vavilov V. P., *Thermal/Infrared Testing. Nondestructive testing: Handbook*, Vol.5, Spektrum, Moscow, 2009.

[28] Mats J., Matas J., Chum O., Urban M., Pajdla T., Robust Wide Baseline Stereo from Maximally Stable Extremal Regions, *The 13th British Machine Vision Conference*, Cardiff-England, 2-5 September 2002.

[29] Runnemalm A., Broberg P., Appelgren A., Possibilities and Limitations of Automated Non-Destructive Testing of Welds, *5th International Swedish Production Symposium*, Linköping, Sweden, 6-8 November 2012.

[30] Shih-Fu L., Li-Xue W., Yoke-Rung W., Dong-NengLi, Input electrical impedance as quality monitoring signature for characterizing resistance spot welding, *NDT&E International*, 2010, **4**, 200-205.

[31] T.C.Başbakanlık Yatırım Destek ve Tanıtım Ajansı (TYDTA), *Otomotiv Sektörü*, http://www.invest.gov.tr/tr-TR/sectors/Pages/Automotive.aspx, (Ziyaret Tarihi: 26 Ocak 2017).

[32] Deniz C., Otomotiv Endüstrisinde Konvansiyonel Robotik Hatlarda Görüntü İşlem Tabanlı Kontrol, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2011, 412083.

[33] Çetinkaya. Ö., Bir kolun hareketlerini takip eden dört dönel mafsallı robot kolu tasarımı ve deneysel araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, 2009, 245435.

[34] Industrial Robotic In Europe, *Industrial Robot Evolution*, http://www.reineu2016.eu/system/reineu2016/files/Siciliano_Industrial_robotics_in_Europe.pdf?1464768420 , (Ziyaret Tarihi: 26 Nisan 2017).

[35] IFR- Uluslararası robot federasyonu, endüstriyel robotlar, http://www.ifr.org/industrial-robots/products/, (Ziyaret Tarihi: 20 Mart 2017).

[36] Spong, M., Hutchinson, S., and Vidyasagar, M., *Robot Modelling And Control*, John Wiley&Sons, USA, 2006.

[37] Litzenberger G., World Robotics, *IFR Statistic Department*, No: 978-3-8163-0693-1, 2016

[38] Doruk E., Pakdil M., Çam G., Durgun İ., Otomotiv Sektöründe Direnç Nokta Kaynağı Tofaş Uygulamaları, *Kaynak Kongresi Ix. Ulusal Kongre ve Sergisi*, Ankara, 20-21 Kasım 2015.

[39] Gugel M. D., Electrode Wear Mechanisms During The Resistance Spot Welding Of Hot-Dipped Galvanized Steel, Doktora Tezi, MTU, Michigan, 1995.

[40] Ünlükal E., Otomotiv Sanayinde Kullanılan Direnç Nokta Kaynak Kalitesinin Artırılması, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2007, 223646.

[41] Hodges J., Smith T., *Letter on Quaternion, Vol1*., Maccmialn & Co., Cambirge, 1853.

[42] Cubero S., *Industrial Robotics: Theory, Modelling and Control*, Pro Literatur Verlag, Germany, 2006.

[43] Richard P., *Robot Manipulators: Mathematics, Programming, and Control: The Computer Control of Robot Manipulators*, Mit Press, Cambridge, 1981.

[44] Mccarthy J. M., *Introduction to Theoretical Kinematics*, Mit Press, Cambridge, 1990.

[45] Denavit J., Hartenberg R.S., A Kinematic Notation For Lower-Pair Mechanisms Based On Matrices, *Journal of Applied Mechanics*, 1955, **23**, 215-221.

[46] Hartenberg R. S., Denavit J.. *Kinematic Synthesis of Linkages*, Mcgraw-Hill, New York, 1964.

[47] David R., *On Quaternions; Or On A New System Of Imaginaries in Algebra*, Dublin Philosophical Magazine, Dublin, 2000.

[48] Rozenfeld B. A., *The History of Non-Euclidean Geometry: Evolution of The Concept of A Geometric Space*, Springer, Moscow, 1988.

[49] Hamilton W.R., *Elements of Quaternion*, Chealse Publising, New York, 1969.

[50] ABB Robotics, *Product Manual and Procedures*, Document ID: 3HAC-023637-001, 2004.

[51] Flanders M., Kavanagh R. C., Build-A-Robot: Using Virtual Reality to Visualize the Denavit–Hartenberg Parameters, *Computer Applications in Engineering Education*, DOI:10.1002/cae.21656.

[52] Berenguel M., Rodríguez F., Moreno J. C., Guzmán J. L. and González R., Tools and methodologies for teaching robotics in computer science & engineering studies, *Computer Applications in Engineering Education*, DOI:10.1002/cae.21698.

[53] Gil A., Reinoso O., Marin J. M., Paya L. and Ruiz J., Development and deployment of a new robotics toolbox for education, *Computer Applications in Engineering Education*, DOI:10.1002/cae.21615.

[54] López-Nicolás G., Romeo A. and Guerrero J. J., Active learning in robotics based on simulation tools, *Computer Applications in Engineering Education*, DOI:10.1002/cae.20576.

[55] Pan Z., Polden J., Larkin N., Duin S. V., Norrish J., Recent progress on programming methods for industrial robots, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 2012, **28**, 87–94.

[56] Hodges J., Smith T., *Letter on Quaternion, Vol2*, Cambridge: Macmillan & Co., Cambirge, 1853.

[57] Cubero S., *Industrial Robotics: Theory, Modelling and Control*, PlV pro literatur Verlag Robert Mayer-Scholz, 2007.

[58] Richard P., *Robot Manipulators: Mathematics, Programming, and Control: The Computer Control of Robot Manipulators*, Mit Press, Cambridge, 1981.

[59] Fateh M. M., Fuzzy Task-Space Control Of A Weldıng Robot, *International Journal of Robotics and Automation*, 2010, 206-3437.

[60] Huang C. Q., Shi S. J., Wang X. G., Chung W. K., Parallel Force/Position Controls For Robot Manipulators With Uncertain Kinematics, *International Journal Of Robotics and Automation*, 2005, 206-2721.

[61] Joo H. K., Dustyn P. R., John M., Salam R., Kinematic and Kinetic Evaluation of a Throwing Model Using Motion Primitives, *International Journal of Robotics And Automation*, 2015, 206-4280,.

[62] McCarthy J. M., *Introduction to Theoretical Kinematics*, MIT Press, Cambridge, 1990.

[63] Denavit J., Hartenberg R.S., A Kinematic Notation For Lower-Pair Mechanisms Based On Matrices, *Trans Asme J. Appl. Mech*, 1955, **23**, 215-221.

[64] Bogue R., Imaging technology opens up new robotic applications, *Industrial Robot: An International Journal*, 2011, **38**, 343-348.

[65] Connolly C., Artificial intelligence and robotic hand-eye coordination, *Industrial Robot: An International Journal*, 2008, **35**, 496-503.

[66] Berthold K. P. H., Hugh M. H., Shahriar N., Closed-form solution of obsolote orientation using orthonormal matrices, *Journal of the Optical Society of America*, 1988, **5**, 1127-1135.

[67] Berthold K. P. H., Closed-form solution of obsolote orientation using unit quaternions, *Journal of the Optical Society of America*, 1987, **4**, 629-642.

[68] Lorusso A., Eggert D.W., Fisher R.B., A Comparison of Four Algorithms for Estimating 3-D Rigid Transformations, *Proceeding BMVC '95 Proceedings of the 1995 British Machine Vision*, DOI:10.5244/C.9.24

[69] Shiu Y. C., Ahmad S., Calibration of Wrist-Mounted Robotic Sensors by Solving Homogenous Transform Equations of the Form AX=XB, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1989, **5**, 16-29.

[70] Roger Y. T., Reimar K. L., A New Technique for Fully Autonomous and Efficient 3D Robotics Hand/Eye Calibration, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1989, **5**, 345-358.

[71] Jack C. K. C., M. Kamel, Finding the Position and Orientation of a Sensor on a Robot Manipulator Using Quaternions, *The International Journal of Robotics Research*, 1991, **10**, 240-254.

[72] Frank C. P., Bryan J. M., Robot Sensor Calibration: Solving AX=XB on the Euclidean Group, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1994, **10**, 717-721.

[73] Rong-hua L., Jian-fei M., Hand-Eye Calibration with a New Linear Decomposition Algorithm, *Journal of Zhejiang University Science*, 2008, **9**, 1363-1368.

[74] Ting C. L., Jack C. K. C., Eight-space Quaternion Approach for Robotic Hand-Eye Calibration, *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, Canada, 23-25 October 1995.

[75] Konstantinos D., Hand-Eye Calibration Using Dual Quaternions, *The International Journal of Robotics Research*, 1999, **18**, 286-298.

[76] Mili S., Roger D. E., Tsai H., An Overview of Robot-Sensor Calibration Methods for Evaluation of Perception Systems, *2012 Performance Metrics for Intelligent Systems Workshop*, Washington, 20-22 March 2012.

[77] Condurache D., Burlacu A., Orthagonal dual tensor method for solving the AX=XB sensor calibration problem, *Mechanism and Machine Theory*, 2016, **104**, 382-404.

[78] Umer K., Ibrar J., Naeem I, Jian D., Uncalibrated eye-in-hand visual servoing: an LMI approach, *Industrial Robot: An International Journal*, 2011, **38**, 130-138.

[79] Haixia W., Xiao L., Zhanyi H., Yuxia L., A vision-based fully-automatic calibration method for hand-eye serial robot, *Industrial Robot: An International Journal*, 2015, **42**, 64-73.

[80] Jwu-Sheng H., Yung-Jung C., Automatic Calibration of Hand-Eye-Workspace and Camera Using Hand-Mounted Line Laser, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2013, **18**, 1778-1786.

[81] Yuichi M., Akio M., Hand-Eye Calibration Applied to Viewpoint Selection for Robotic Vision, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008, **55**, 3731-3741.

[82] Jochen S., Heinrich N., Data Selection for Hand-eye Calibration: A Vector Quantization Approach, *International Journal of Robotic Research*, 2008, **27**, 1027-1053.

[83] Marek F., Registration of Six Degrees of Freedom Data with Proper Handling of Positional and Rotational Noise, *Journal of Research of the National Institute of Standarts and Technology*, 2013, **118**, 280-291.

[84] Hui P., Lina W., Shiyin Q., A closed-form solution to eye-to-hand calibration towards visual grasping, *Industrial Robot: An International Journal*, 2014, **41**, 567 – 574.

[85] Abed M., Joao P. B., Hand-eye and radial distortion calibration for rigid endoscopes, *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, 2013, **9**, 441-454.

[86] Du Q. H., Metrics for 3D Rotations: Comparison and Analysis, *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 2009, **35**, 155-164.

[87] Daniele M., Massimo C., Cristina C., Manual guidance for industrial robot programming, *Industrial Robot: An International Journal*, 2015, **42**, 457-465.

[88] Alenya G., Foix S., Torras C., ToF cameras for active vision in robotics, *Sensors and Actuators A:Physical*, 2014, **218**, 10-22.

[89] Robert B., The Role of Robotics in non-destructive testing, *Industrial Robot: An International Journal*, 2010, **37**, 421-426.

[90] Lin T., Chen H. B., Li W. H., Chen S. B., Intelligent methodology for sensing, modeling, and control of weld penetration in robotic welding system, *Industrial Robot: An International Journal*, 2009, **36**, 585-593.

[91] Yanling X., Huanwei Y., Jiyong Z., Tao L., Shanben C., Real-time image capturing and processing of seam and pool during robotic welding process, *Industrial Robot: An International Journal*, 2012, **39**, 513-523.

[92] Markus H., Martin L., Matthias R., Horst B., Hartwig F., Gerardus C., Weld seam tracking and panorama image generation for on-line quality assurance, *Int. J. Adv. Manuf. Technol*., 2013, **65**, 1371-1382.

[93] Wenhao Z., Melvyn L. S., Lyndon N. S., Abdul R. F., Eye centre localisation: an unsupervised modular approach, *Sensor Review*, 2016, **36**, 277-286.

[94] Jianhua S., Zhi-Yong L., Hong Q., Chuankai L., Pose-estimation and reorientation of pistons for robotic bin-picking, *Industrial Robot: An International Journal*, 2016, **43**, 22-32.

[95] Mohsen M. D., Saeid N., Teleoperation of ABB industrial robots, *Industrial Robot: An International Journal*, 2014, **41**, 286-295.

[96] Temesguen M., Raul O., Eric M., Computationally efficient and robust kinematic calibration methodologies and their application to industrial robots, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2016, **37**, 33-48.

[97] Shibin Y., Yin G., Yongjie R., Jigui Z., Shourui Y., Shenghua Y., A novel TCF calibration method for robotic visual measurement system, *Optik*, 2014, **125**, 6920-6925.

[98] Fabian T., Erhart B., Accurate, fast and robust centre localisation for images pf semiconductor components, Image Processing: Machine Vision Applications, *Proceedings of SPIE, SPIE-IS&T.*, DOI: 10.1117/12.872386.

EKLER

Ek-A

ABB IRB600 6/1.45 Robot Speği

Specification

Robot versions IRB	Handling capacity	Reach
IRB 1600-6/1.2	6 kg	1.2 m
IRB 1600-6/1.45	6 kg	1.45 m
IRB 1600-8/1.2	8.5 kg	1.2 m
IRB 1600 -8/1.45	8.5 kg	1.45 m
Number of axes	6	
Protection	IP 54 (standard, Clean Room)	
	IP 67 FoundryPlus	
Mounting	floor, wall, inverted, tilted	



Integrated signal supply	23 signals + 10 power (optional)
Integrated air supply	max. 8 bar on upper arm (optional)
IRCS Controller variants	Single cabinet, Dual cabinet, Panel mounted

Performance

Position repeatability	0.05 mm	
Speed axis	8 kg	6 kg
1	180°/s	150°/s
2	180°/s	160°/s
3	200°/s	170°/s
4	400°/s	320°/s
5	400°/s	400°/s
6	460°/s	460°/s

Range of movement	1.2 m reach	1.45 m reach
Axis 1*	+180° to -180°	+180° to -180°
Axis 2	+136° to -63°	+150° to -90°
Axis 3	+55° to -235°	+65° to -245°
Axis 4	+200° to -200° Default +190 revolutions to -190 revolutions Max**	+200° to -200° Default +190° revolutions to -190 revolutions Max**
Axis 5	+115° to -115°	+115° to -115°
Axis 6	+400° to -400° Default +288 revolutions to -288 revolutions Max**	+400° to -400° Default +288 revolutions to -288 revolutions Max**

* +/- 60° wall mounted IRB 1600-8
+/- 20° wall mounted IRB 1600-6
+/- 45° tilted robot, up to 30°

** The default working range for axis 4 and axis 6 can be extended by changing parameter values in the software

Electrical connections

Supply voltage	200 – 600 V, 50/60 Hz
Power consumption	ISO-Cube at max speed 0.58 kW
Rated power supply transformer	4 kVA/7.8 KVA with external axis

Physical

Dimensions	
Total height	1.45 m = 1294,5; 1.2 m = 1069,5
Robot base	484 x 648
Weight	
IRB 1600-X/1.2 m	250 kg
IRB 1600-X/1.45 m	250 kg

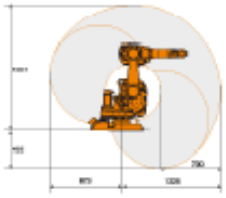
Environment

Temperature	+5 to +45°
Relative humidity	max. 95 %
Noise level	max. 70 dB (A)
Options	Foundry Plus
	Clean Room, class 5 (certified by IPA)

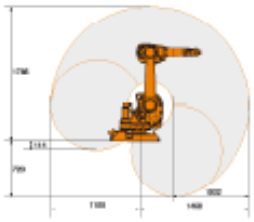
Data and dimensions may be changed without notice

Working range

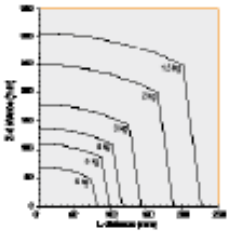
IRB 1600/1.2 m



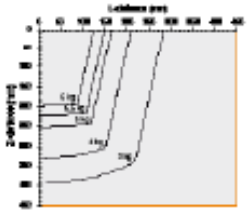
IRB 1600/1.45 m



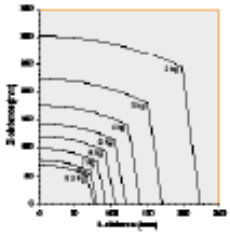
IRB 1600-6/xx Armload 15 kg



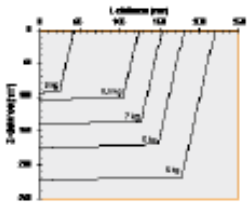
IRB 1600-6/xx with Vertical Wrist



IRB 1600-8,5/xx Armload 15 kg

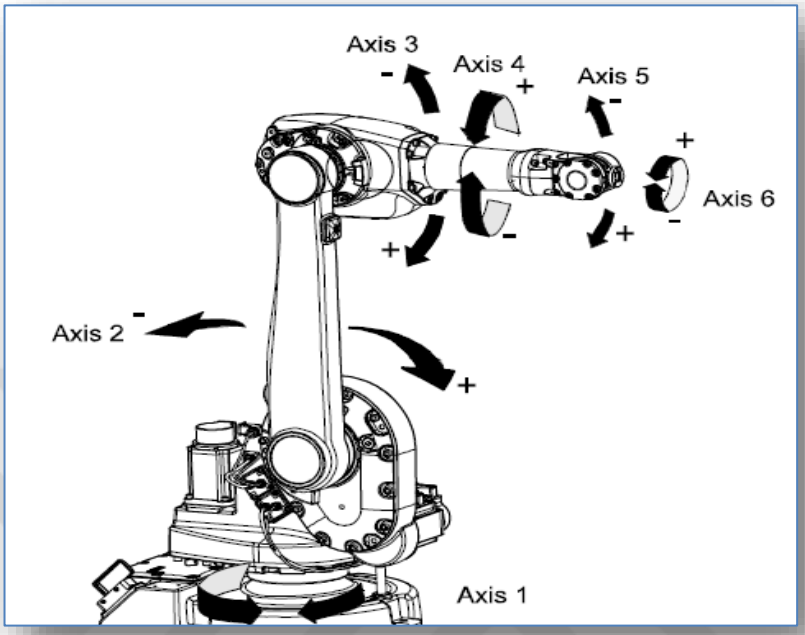


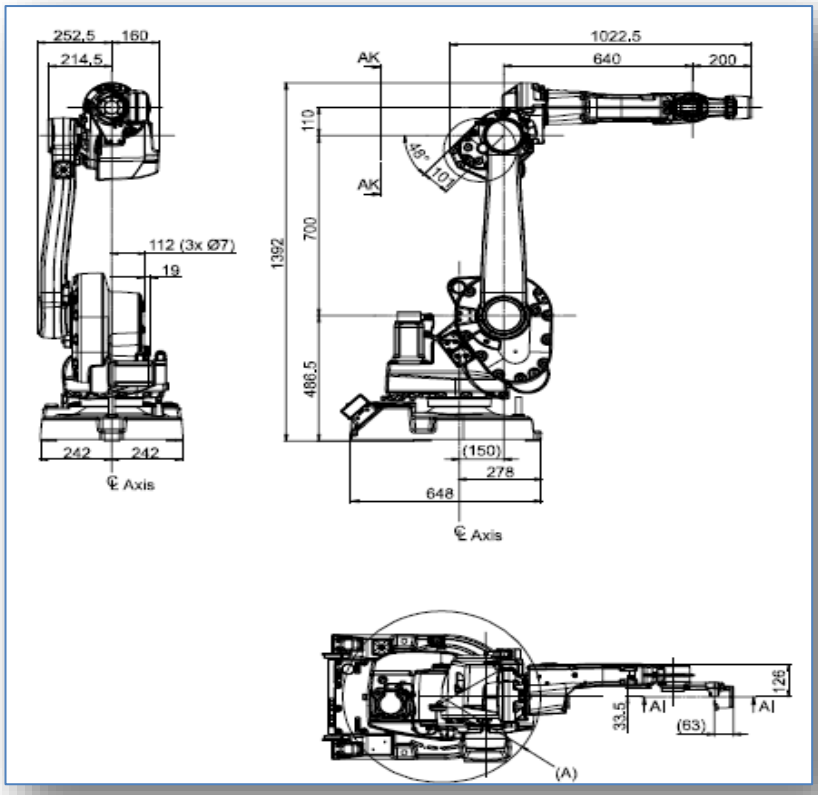
IRB 1600-8,5/xx with Vertical Wrist



Ek-B

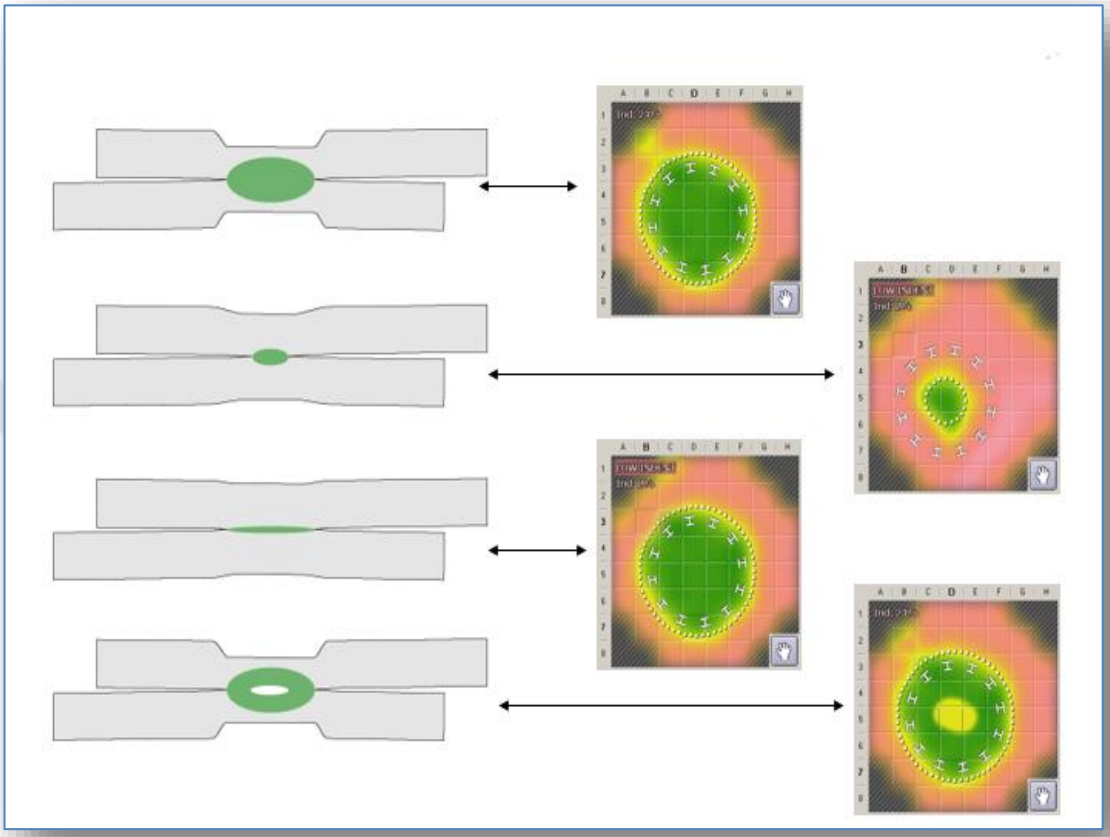
ABB IRB600 6/1.45 Robot Eksen Yapısı ve Ölçüleri

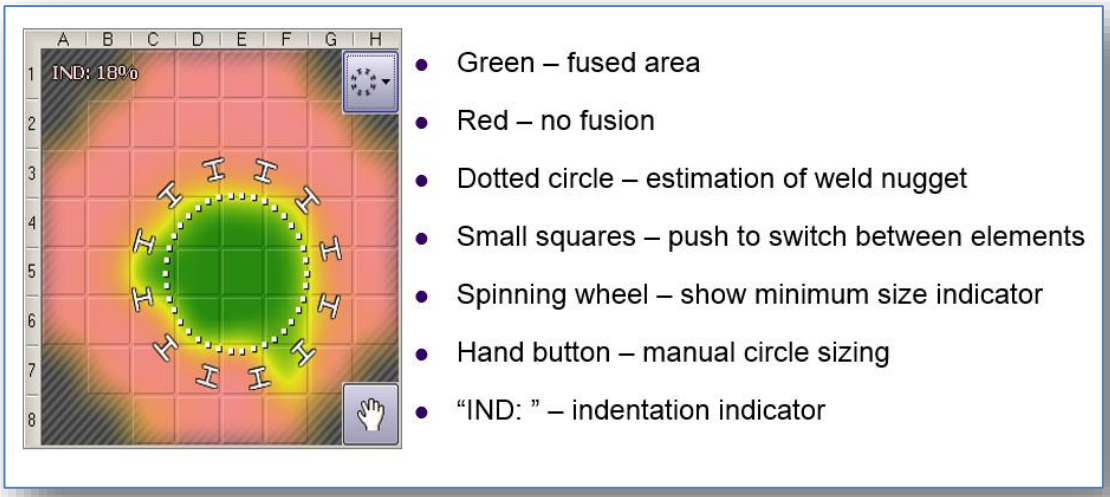




Ek-C

Nokta Direnç Kaynak Noktalarının Ultrasonik Görüntüsü





Ek-D

Algoritma.1

$$\langle \mathbf{1}. \text{ | compact sensed points} \rangle$$

$$P^i = {}^{\text{cam}} \quad \{P_0, P_1, P_2\}_n^i$$

$$\langle \mathbf{2}. \text{ | acquire relation between postures} \rangle$$

$$i \to 0, \dots, n, j \to 0, \dots, n\{$$
$$Q_A^{i,j} = ({}^{base}\bar{Q}^{\text{i}}_{\text{tool_0}}) * ({}^{base}Q^{\text{j}}_{\text{tool_0}})$$
$$Q_B^{i,j} = absROT(P^i, P^j)$$
$$\}$$

$$\langle \mathbf{3}. \text{ | estimate} \boldsymbol{Q_X} \rangle$$

$$i \to 0, \dots, (n-2), j \to i+1, \dots, (n-1), k \to j+1, \dots, n\{$$
$$V_A = \{\vec{V}_A^{j,i}, \vec{V}_A^{k,i}, \vec{V}_A^{k,j}\}$$
$$V_B = \{\vec{V}_A^{i,j}, \vec{V}_A^{i,k}, \vec{V}_A^{j,k}\}$$
$$Q_X = absROT(V_B, V_A)$$
$$\}$$

$$\langle \mathbf{4}. \text{ | calculate} {}^{\boldsymbol{base}}\boldsymbol{Q}^{\boldsymbol{i}}_{\text{cam}}, \widehat{\boldsymbol{P^i}} \rangle$$

$$i \to 0, \dots, n\{$$
$${}^{base}Q^i_{\text{cam}} = ({}^{base}Q^i_{\text{tool_0}}) * (Q_X) \to {}^{base}R^i_{\text{cam}}$$
$$\widehat{P^i} = {}^{base}P^i_{\text{tool_0}} + rot({}^{base}Q^{\text{i}}_{\text{cam}}, P^i)$$
$$\}$$

$$\langle \mathbf{5}. \text{ | estimate} \boldsymbol{D_X} \rangle$$

$$i \to 0, \dots, (n-2), j \to i+1, \dots, (n-1), k \to j+1, \dots, n\{$$
$$A = \begin{Bmatrix} R^j - R^i \\ R^k - R^i \\ R^k - R^j \end{Bmatrix}, B = \begin{Bmatrix} \hat{P}^i - \hat{P}^j \\ \hat{P}^i - \hat{P}^k \\ \hat{P}^j - \hat{P}^k \end{Bmatrix}$$
$$D_X = A^{-1} \cdot B$$
$$\}$$

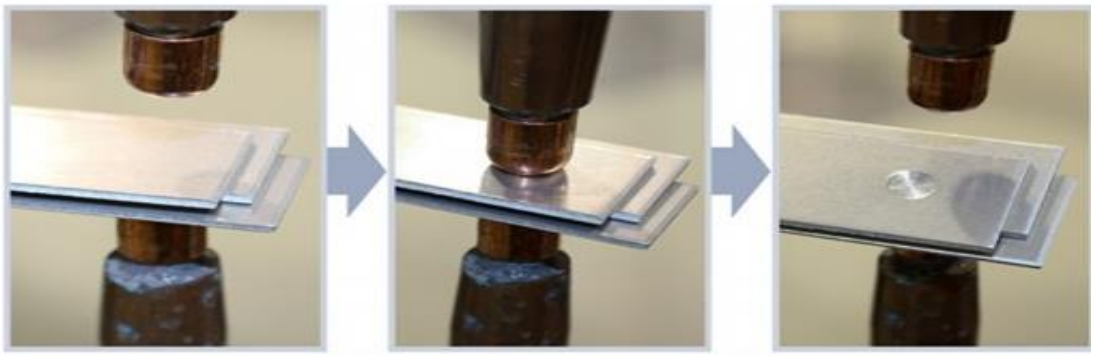
$$\langle \mathbf{6}. \text{ | select}(\boldsymbol{Q_X}, \boldsymbol{D_X}) \rangle$$

Ek-E

Nokta direnç kaynak uygulaması, tahribatsız muayene işlemindeki süreçler ve kullanılan yöntemler.



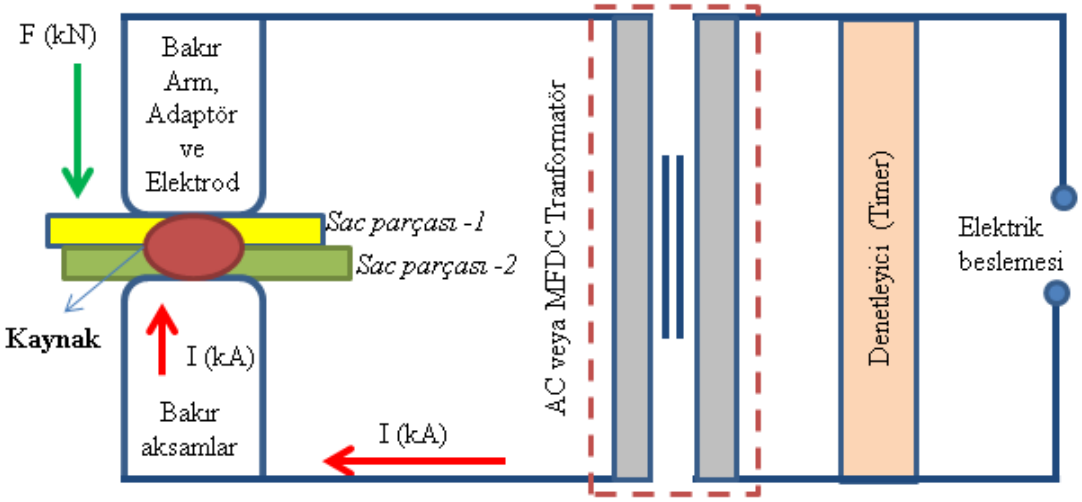
Üretim hatlarında nokta direnç kaynağı işlemi



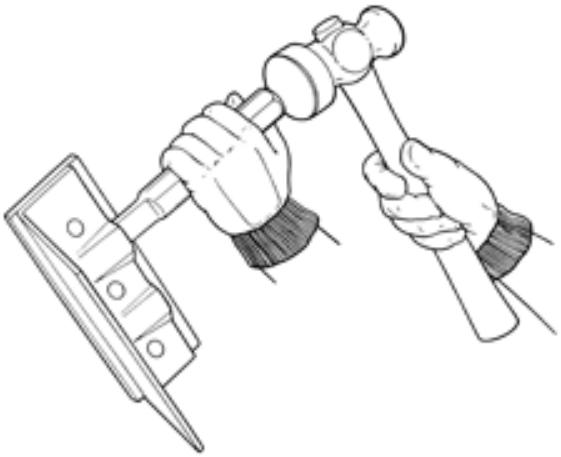
Nokta direnç kaynağı işlemindeki aşamalar



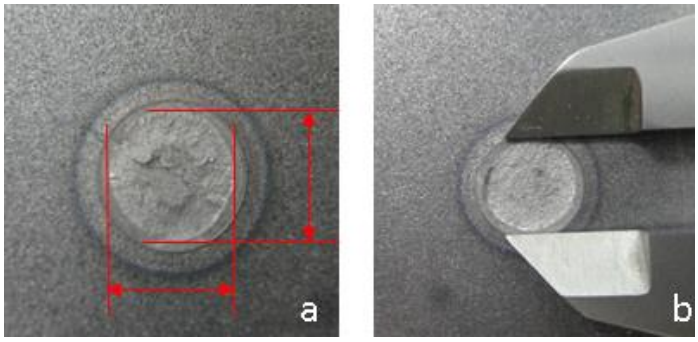
Nokta direnç kaynağı işleminde kullanılan kaynak makinası



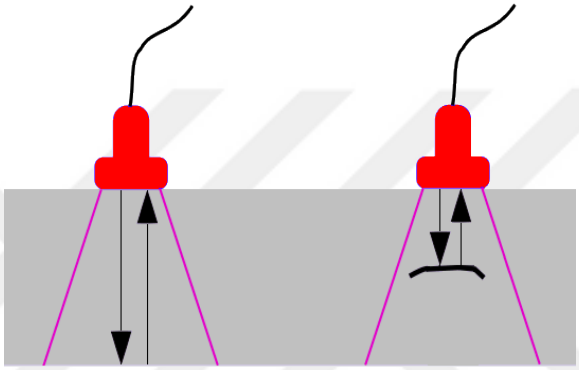
Nokta direnç kaynağı prensip devre şeması



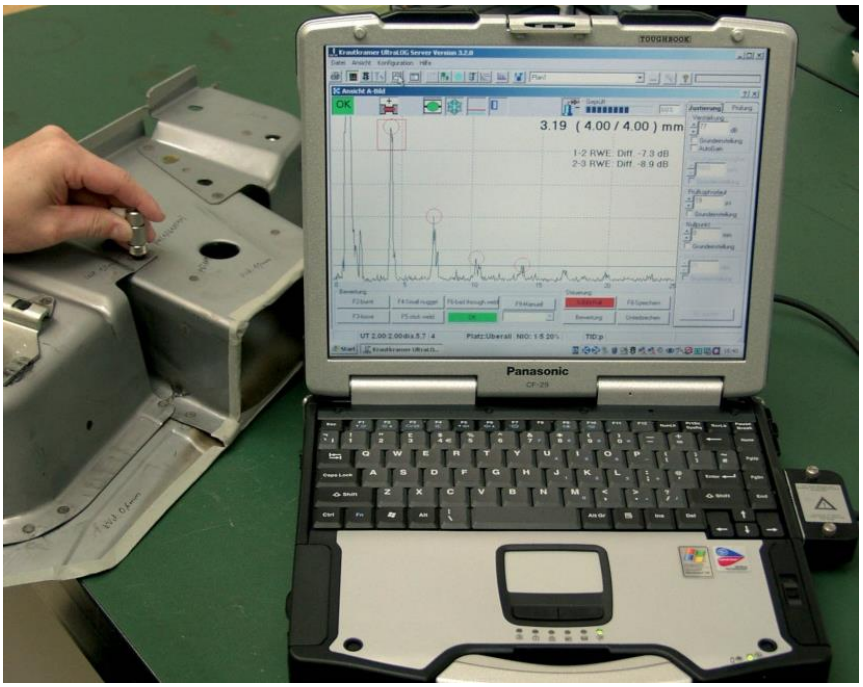
Nokta direnç kaynağı tahribatlı muayenesi



Nokta direnç kaynağı tahribatlı muayene sonrası düğme çapı ölçümü



Ultrasonik kontrol temel ölçüm prensibi



Ultrasonik kontrolle kullanılan örnek bir ölçüm cihazı

KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER

Deniz C., Çakır M., A Novel Designed Interactive Training Platform for Industrial Robot Offline Programming and Robotics Education, *International Journal of Robotics and Automation*, (Basımda).

Deniz C., Çakır M., Robot Collision Avoidance Control And Management Method For Industrial Robots In Automotive Industry, *5th International Conference on Advanced Technology & Sciences, ICAT'17*, İstanbul, 09-12 May 2017.

Deniz C., Çakır M., Kamera Destekli Gerçek Zamanlı Robotik Al-Bırak Uygulamalar İçin Yeni Bir Matematiksel Kinematik Güvenlik Modeli', *Elektrik - Elektronik Ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu-ELECO'12*, Bursa, 29 Kasım - 01 Aralık 2012.

Deniz C., Çakır M., Endüstriyel Robotik Uygulamalar İçin Kamera Tabanlı Ve PLC Denetimli Bir Görsel Servo Kontrol Sistemi, *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı - TOK'11*, İzmir, 14-16 Eylül 2011.

Deniz C., Karaçor M., Otomotiv Endüstrisinde Yaygın Olarak Kullanılan Hareketli Konveyör Sistemlerinin Kontrolünde yeni bir yaklaşım, *Endüstri & Otomasyon Dergisi*, 2009, **9**, 82-85.

Deniz C., Aras F., Şen A., RF Tabanlı Aydınlatma Kontrol Sistemi ile Enerji Tasarruf Uygulaması, *Endüstri & Otomasyon Dergisi*, 2009, **6**, 51-53.

Deniz C., Aras F., Teknik Etiğimde Web Tabanlı Bir Eğitim Uygulaması, *Ulusal Mühendislik ve Eğitim Sempozyumu, UMES07*, Kocaeli, 20-22 Haziran 2007.

Deniz C., Aras F., Şen A., Altınay M., "Gün Işığı Temelli Aydınlatma Kontrol Sistemi Ve Endüstriyel Uygulaması", *II. Enerji Verimliligi ve Kalitesi Sempozyumu*, Kocaeli, 17-18 Mayıs 2007.

ÖZGEÇMİŞ

2007 yılında, Kocaeli Üniversitesi, Elektrik Eğitimi Bölümünü, bölüm birincisi ve fakülte üçüncüsü derecesi ile tamamladı. Aynı yıl Ford Otosan, Gövde Üretim Alan Müdürlüğünde Elektrik Bakım Mühendisi olarak işe başladı. 2009 yılında, İngiltere'de sırasıyla Londra, Brighton ve Liverpool şehirlerinde dil eğitimi aldı ve tekrar Ford Otosan'daki görevine geri döndü. 2011 yılında, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği ana bilim dalında yüksek lisans derecesi ile mezun oldu. 2013 yılında Ford Otosan'da Gövde Üretim Alan Müdürlüğünde Otomasyon ve Proje Ekip Liderliği görevine atandı. 2014 Yılında Ford Otosan'da Gövde Üretim Alan Müdürlüğünde Bakım, Otomasyon ve Proje Ekip Liderliği görevine atandı. 2016 Yılında Ford Otosan'da Gölcük ve Yeniköy fabrikaları için Otomasyon ve Yeni Projeler Teknik Liderliği görevine atandı ve halen bu pozisyonda görev yapmaya devam etmektedir. Güncel olarak üretim sistemlerinde yer alan otomasyon seviyesinin arttırılması, yeni robotik uygulamalarının geliştirilmesi, IoT ve Endüstri 4.0 konularında fabrikalar genelinde çalışmalar yürütmektedir.