

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GÖRÜNTÜ İŞLEME TEKNİKLERİ KULLANILARAK
AHŞAP PARÇALARIN ROBOTİK BOYAMA YÖRÜNGESİ
GELİŞTİRİLMESİ

ENEZ AYKUT GÜLİRMAK

KOCAELİ 2024

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GÖRÜNTÜ İŞLEME TEKNİKLERİ KULLANILARAK
AHŞAP PARÇALARIN ROBOTİK BOYAMA YÖRÜNGESİ
GELİŞTİRİLMESİ

ENEZ AYKUT GÜLİRMAK

Prof.Dr. Zafet BİNGÜL
Danışman, Kocaeli Üniv.

.....

Dr. Öğr. Üyesi Serkan ZEREN
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

.....

Dr. Öğr. Üyesi Kenan IŞIK
Jüri Üyesi, Karabük Üniv.

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 03.06.2024

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ

Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez/proje çalışmada,

- Bu tezin/projenin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu,
- Çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamasında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı,
- Bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi,
- Bu çalışmamın Kocaeli Üniversitesi'nin abone olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş ölçütlere uygun olduğunu,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Tezin/projenin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez/proje çalışması olarak sunmadığımı,

beyan ederim.

☐ Bu tez/proje çalışmasının herhangi bir aşaması hiçbir kurum/kuruluş tarafından maddi/alt yapı desteği ile desteklenmemiştir.

☒ Bu tez/proje çalışması kapsamında üretilen veri ve bilgiler UV Teknoloji Kimya Makine tarafından 3215053 no'lu proje kapsamında maddi/alt yapı desteği alınarak gerçekleştirilmiştir.

Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

.....

(İmza)

Enez Aykut GÜLİRMAK
(Öğrencinin Adı Soyadı)

YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI

Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/projemin tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda belirtilen koşullarla kullanıma açma izninin Kocaeli Üniversitesi'ne verdiğimi beyan ederim. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin/projemin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanımı bana ait olacaktır.

Tezin/projenin kendi özgün çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin/projenin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim kurulu tarafından yayınlanan **“Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge”** kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi/ Kocaeli Üniversitesi Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

- ☐ Enstitü yönetim kurulu kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.
- ☐ Enstitü yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 6 ay ertelenmiştir.
- ☒ Tezim/projem ile ilgili gizlilik kararı verilmemiştir.

.....

(İmza)

Enez Aykut GÜLİRMAK
(Öğrencinin Adı Soyadı)

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tez, TÜBİTAK tarafından desteklenen "Görüntü İşlemeli Tam Otomatik Robotik Boyama Sisteminin Geliştirilmesi" adlı 1707 Sipariş Ar-Ge Çağrısı (Proje No: 3215053) kapsamında, Kocaeli Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda gerçekleştirilmiştir. Projenin her aşamasında bana rehberlik eden danışmanım Prof. Dr. Zafer Bingül'e ve projenin uygulama sürecinde destek olan UV Teknoloji Kimya Makine şirketine içtenlikle teşekkür ederim.

Proje, hem akademik hem de profesyonel gelişimime katkıda bulunmuştur. Bu süreçte edindiğim bilgi ve deneyimler, kariyer hedeflerime ulaşmada büyük bir rol oynayacaktır. Projeye maddi ve manevi destek veren tüm kurum ve kuruluşlara şükranlarımı sunarım.

Tez çalışmam boyunca yanımda olan ve desteklerini esirgemeyen aileme, arkadaşlarıma ve tüm hocalarıma teşekkür ederim.

Haziran - 2024

Enez Aykut GÜLİRMAK

İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ.....	i
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI.....	ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	x
ÖZET.....	xi
ABSTRACT.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Giriş ve Motivasyon.....	1
1.2. Amaçlar ve Hedefler.....	2
1.3. Yapı ve İçerik.....	3
1.3.1. Çalışmanın Bölümleri ve İçeriğine Genel Bakış.....	3
1.4. Katkıları ve Beklentiler.....	4
1.4.1. Projenin Katkıları.....	4
1.4.2. Beklentiler.....	5
1.5. Metodoloji ve Kapsam.....	5
1.6. Kullanılan Yaklaşımlar ve Çalışmanın Sınırları.....	6
1.6.1. Kullanılan Yaklaşımlar.....	6
1.6.2. Çalışmanın Sınırları.....	6
2. GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR TARAMASI.....	8
2.1. Görüntü İşleme Teknolojilerinin Gelişimi.....	8
2.2. Robotik Boyama Teknolojileri ve Uygulamaları.....	8
2.2.1. Boyama Sistemi Entegrasyonu ve Teknolojileri.....	8
2.3. Görüntü İşleme ve Robotik Boyama Teknolojilerinin Entegrasyonu.....	10
2.4. Otomatik Boyama Sistemleri.....	10
2.4.1. Farklı Nozulların Boyama Kabiliyetleri.....	10
2.4.1.1. MDF ve Sert Ahşap Boyama Farkları.....	10
2.4.1.2. Matematiksel ve Sayısal Değerlendirmeler.....	11
2.4.2. Teknolojik İlerlemeler ve Uygulamalar.....	11
2.4.3. Maliyet ve Verimlilik İyileştirmeleri.....	11
2.5. Otomatik Boyama Sistemlerinin Avantajları.....	12
2.5.1. Artan Verimlilik.....	12
2.5.2. Kalite ve Tutarlılık.....	12
2.5.3. Maliyet Tasarrufu.....	12
2.5.4. Gelişmiş Güvenlik.....	13
2.5.5. Esneklik ve Uyarlanabilirlik.....	13
2.6. Geleneksel Boyama Yöntemlerinin Sınırlamaları.....	13
2.6.1. Kalite ve Tutarlılık Sorunları.....	13
2.6.2. Verimlilik ve Maliyet Sorunları.....	14
2.6.3. Endüstriyel Otomasyonun Boyama Süreçlerine Etkisi.....	14
2.6.3.1. Verimlilik Artışı.....	14
2.6.3.2. Kalite ve Tutarlılık.....	14
2.6.3.3. İnsan Hatalarının Azaltılması.....	14

2.6.3.4. Gelişmiş Kontrol ve İzleme	15
2.6.4. Nesne Tespiti ve Şekil Tanıma Algoritmaları.....	15
2.7. Temel Kavramlar ve Uygulama Alanları.....	16
2.7.1. Endüstriyel Robotlar	16
2.7.2. Konveyör Sistemleri.....	16
2.7.3. Programlanabilir Mantık Kontrolörleri (PLC)	16
2.7.4. Gelişmiş Görüntü İşleme Teknikleri	16
2.7.5. ToF Kameralar ve Uygulamaları	17
2.8. Endüstriyel Boyama Süreçlerindeki Zorluklar	17
2.8.1. Geleneksel Yöntemlerin Sınırlamaları	17
2.8.2. Homojenlik Sorunları	17
2.8.3. Kalite Kontrol Zorlukları	17
2.8.4. Yavaş Üretim Hızı.....	18
2.8.5. İnsan Hataları	18
2.8.6. Şekil ve Boyut Farklılıklarının Üstesinden Gelme Zorlukları.....	18
2.9. Görüntü İşleme Teknikleri ve Şekil Tanıma	18
2.9.1. Görüntü Filtreleme ve Konvolüsyon İşlemi.....	19
2.9.2. Gürültü Giderme.....	20
2.9.2.1. Gauss Bulanıklaştırma Filtresi	20
2.9.2.2. Erozyon.....	22
2.9.2.3. Genişleme (Dilasyon).....	23
2.9.2.4. Açma İşlemi	24
2.9.2.5. Kapama İşlemi	25
2.9.2.6. BW Eşiklemesi.....	27
2.9.3. Nesne Tespiti ve Şekil Tanıma Algoritmaları.....	29
2.9.4. VSpline Algoritmaları ve Kontur Optimizasyonu.....	30
2.9.5. Kenar Tespiti ve Hiyerarşi.....	33
2.9.6. Bezier Eğrileri.....	35
2.9.7. Noktaların Belirlenmesi	37
2.9.8. Şekil ve Obje Biçimi Tespiti	41
2.9.9. 3 Boyutlu Affine Dönüşüm	42
2.9.10. Robot Yazılımı	44
2.9.11. Nesne Tespiti ve Şekil Tanıma Algoritmaları.....	48
2.9.12. Kenar (Masif veya Cumba) Boyama	49
2.9.13. Yüzey Boyama	51
2.10. Hareket Kontrolü ve Hassas Manipülasyon.....	53
2.10.1. Robot Komutları ve Kontrolü	53
2.10.2. Tarama ve Boyama Konveyörlerinin Senkronizasyonu	54
2.10.3. Boyama İşleminde Robot Hızının Önemi	55
2.10.4. Kontrol Sistemi ve Veri İletişimi Entegrasyonu.....	55
2.10.5. Boyama Sisteminin IPC ve PLC ile Entegre Edilmesi	56
3. MALZEME VE YÖNTEM.....	58
3.1. Sistem Akış Diyagramı.....	58
3.1.1. Aşama 1: Boyama Ayarları	58
3.1.2. Aşama 2: Taramanın Başlatılması	59
3.1.3. Aşama 3: Görüntü İşleme	59

3.1.4. Aşama 4: Boyama Yörüngesinin Belirlenmesi.....	59
3.1.5. Aşama 5: Boyama İşlemi	59
3.2. Sistemin Genel Yapısı.....	60
3.3. Kullanılan Malzemeler ve Bileşenler	62
3.4. Kontrol Sistemi ve Yazılım Uygulamaları	63
3.4.1. Kontrol Sistemi ve Yazılım Mimarisi.....	63
3.5. Deney ve Test Yöntemleri	64
3.5.1. Python Ortamında Geliştirilmiş İlk Simülasyon	64
3.5.2. İlk Deney Sistemi Tasarımı	66
3.5.3. Boyanabilir Alanın Belirlenmesi Simülasyonu	68
3.5.4. Gerçek Tarama Simülasyonu	70
3.5.5. Gerçek Üretim Ortamında Deneyler	71
3.5.5.1. Deney 1: Boyama Alanı Kalibrasyonu.....	71
3.5.5.2. Deney 2: Düşük Zorluktaki Parçaların Boyanması	74
3.5.5.3. Deney 3: Orta Zorluktaki Parçaların Boyanması	75
3.5.5.4. Deney 4: Yüksek Zorluktaki Parçaların Boyanması	77
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	80
4.1. Bulgular	80
4.1.1. Görüntü İşleme ve Şekil Tanıma Sonuçları	80
4.1.1.1. 2D ve 3D Görüntü İşleme Tekniklerinin Performansı.....	80
4.1.1.2. Şekil Tanıma Algoritmalarının Başarı Oranı	81
4.1.1.3. Görüntü Filtreleme ve Gürültü Giderme Sonuçları	81
4.1.2. Hareket Kontrolü ve Robotik Uygulamalarının Sonuçları	81
4.1.2.1. Robotik Kolun Hareket Doğruluğu ve Hassasiyeti	82
4.1.2.2. Boyama Sürecindeki Hız ve Verimlilik	82
4.1.2.3. Hata Oranları ve Gözlemlenen Problemler	83
4.1.3. Endüstriyel Bilgisayar ve PLC Entegrasyonunun Sonuçları	84
4.1.3.1. Kontrol Sistemi Performansı.....	85
4.1.3.2. Veri İletişim Hızları ve Güvenilirliği	85
4.1.3.3. PLC ve Robot Entegrasyonunun Etkinliği.....	85
4.1.4. Otomatik Boyama Makinesi Tasarımının Sonuçları	85
4.1.4.1. Tasarımın İşlevselliği ve Uygulanabilirliği	85
4.1.4.2. Sistem Bileşenlerinin Performans Değerlendirmesi	86
4.1.5. Sonuçların Değerlendirilmesi ve Tartışması.....	86
4.1.5.1. Elde Edilen Sonuçların Beklentilerle Karşılaştırılması.....	86
4.1.5.2. Kullanılan Yöntemlerin Avantajları ve Dezavantajları	86
4.1.5.3. Projede Karşılaşılan Zorluklar ve Çözüm Önerileri	87
4.1.5.4. Sonuçların Endüstriyel Uygulamalara Etkisi ve Katkıları.....	87
4.2. Tartışma	87
4.2.1. Görüntü İşleme Tekniklerinin Etkinliği	87
4.2.1.1. Farklı Görüntü İşleme Tekniklerinin Karşılaştırılması.....	87
4.2.1.2. Algoritmaların Boyama Süreçlerindeki Başarısı	88
4.2.1.3. Gelecekteki Araştırmalar İçin Potansiyel Alanları	88
4.2.2. Robotik Boyama Sistemlerinin Avantajları ve Dezavantajları	89
4.2.2.1. Otomatik Sistemlerin Üstünlükleri	89
4.2.2.2. Robotik Sistemde Geliştirilmesi Gereken Alanlar	90

4.2.2.3. Boyama Sürecinde Elde Edilen Homojenlik ve Kalite	90
4.2.3. Otomatik Boyama Makinelerinin Geleceği	90
4.2.3.1. Teknolojik İnovasyonlar ve Gelecek Trendler	90
4.2.3.2. Sürdürülebilirlik ve Çevresel Etkiler	91
4.2.3.3. Endüstriyel Uygulamalardaki Potansiyel Gelişmeler	91
4.2.4. Projenin Genel Değerlendirmesi	91
4.2.4.1. Projenin Genel Başarı Değerlendirmesi	92
4.2.4.2. Hedeflerin Gerçekleşmesi	92
4.2.4.3. Projenin Endüstriye ve Akademiye Katkıları	93
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	95
5.1. Sonuçların Özeti	95
5.2. Amaçların Gerçekleşmesi	96
5.3. Gelecek Çalışmalar ve Öneriler	97
5.4. Sonuçların Endüstriye Etkisi	99
5.5. Çalışmanın Genel Değerlendirmesi	101
KAYNAKLAR	103
EKLER	107
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER	128
ÖZGEÇMİŞ	129

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Konvolüsyon İşlemi.....	19
Şekil 2.2.	Gaussian Blur Uygulaması	21
Şekil 2.3.	Orijinal Görüntü	21
Şekil 2.4.	Erozyon İşlemi.....	22
Şekil 2.5.	Dilasyon İşlemi	23
Şekil 2.6.	Açma İşlemi.....	24
Şekil 2.7.	Kapama İşlemi.....	26
Şekil 2.8.	Otsu Eşikleme İşlemi	28
Şekil 2.9.	VSpline interpolasyonunun görsel temsili.	31
Şekil 2.10.	Kontur Hiyerarşisi	34
Şekil 2.11.	Orijinal (sol) ve Sobel Operatörü Uygulanmış (sağ) Lena Görüntüsü.....	40
Şekil 2.12.	Histogram Eşitlemesi	41
Şekil 2.13.	3 Boyutlu Affine Dönüşüm Örneği	44
Şekil 2.14.	Konveyör Bandında Çalışma Alanı (Boyanabilir Alan)	47
Şekil 2.15.	"MoveC" Komutunun Örneği.....	53
Şekil 3.1.	Genel Sistem Görünümü	58
Şekil 3.2.	Sistem Akış Diyagramı	61
Şekil 3.3.	Ana Kabin Görünümü.....	62
Şekil 3.4.	Sistem Girdileri ve Yörünge Noktaları	64
Şekil 3.5.	Kenar Boyama	65
Şekil 3.6.	Yüzey Boyama	65
Şekil 3.7.	Boyama Sonu	66
Şekil 3.8.	İlk Deney Sistemi	67
Şekil 3.9.	Boyanabilir Alan Simülasyonu 1	68
Şekil 3.10.	Tasarlanmış Uç İşevci	69
Şekil 3.11.	Boyanabilir Alan Simülasyonu 2	69
Şekil 3.12.	ABB Robot Studio.....	70
Şekil 3.13.	Tarama Görüntüsü, Robot ve Koordinatlar	71
Şekil 3.14.	Konveyör Üzerindeki Plakalar.....	72
Şekil 3.15.	Afin Dönüşüm Kalibrasyon Sapma Hatası Grafiği.....	73
Şekil 3.16.	Flanş Kalibrasyon Sistemi	74
Şekil 3.17.	Düşük Zorluktaki Geometril Obje Taranmış ve Yörünge Çıkarılmış Görüntüsü.....	75
Şekil 3.18.	Orta Zorluktaki Geometril Obje Tarama ve Yörünge Çıkarılmış Görüntüsü 1	76
Şekil 3.19.	Orta Zorluktaki Geometril Obje Tarama ve Yörünge Çıkarılmış Görüntüsü 2	76
Şekil 3.20.	Yüksek Zorluktaki Geometril Obje-1 TOF Tarama Görüntüsü	77
Şekil 3.21.	Yüksek Zorluktaki Geometril Obje-1 Giriş Konveyörü Görüntüsü	78
Şekil 3.22.	Yüksek Zorluktaki Geometril Obje-1 Boyama Yörüngesi Çıkarılmış Görüntüsü.....	78
Şekil 3.23.	Yüksek Zorluktaki Geometril Obje-1 Boyanmış Görüntüsü	79
Şekil D.1.	Yüksek Zorluktaki Geometril Obje-2 Giriş Konveyörü Görüntüsü	112

Şekil D.2.	Yüksek Zorluktaki Geometrilili Obje-2 TOF Tarama Görüntüsü	113
Şekil D.3.	Yüksek Zorluktaki Geometrilili Obje-2 Boyama Yörüngesi Çıkarılmış Görüntüsü.....	113
Şekil D.4.	Yüksek Zorluktaki Geometrilili Obje-2 Boyanmış Görüntüsü	114
Şekil E.1.	Yüksek Zorluktaki Geometrilili Obje-3 Giriş Konveyörü Görüntüsü	116
Şekil E.2.	Yüksek Zorluktaki Geometrilili Obje-3 TOF Tarama Görüntüsü	116
Şekil E.3.	Yüksek Zorluktaki Geometrilili Obje-3 Boyama Yörüngesi Çıkarılmış Görüntüsü.....	116
Şekil E.4.	Yüksek Zorluktaki Geometrilili Obje-3 Boyanmış Görüntüsü	117
Şekil F.1.	Yüksek Zorluktaki Geometrilili Obje-4 TOF Tarama Görüntüsü	119
Şekil F.2.	Yüksek Zorluktaki Geometrilili Obje-4 Boyama Yörüngesi Çıkarılmış Görüntüsü.....	119
Şekil F.3.	Yüksek Zorluktaki Geometrilili Obje-4 Boyanmış Görüntüsü	120
Şekil G.1.	Yüksek Zorluktaki Geometrilili Obje-5 TOF Tarama Görüntüsü	122
Şekil G.2.	Yüksek Zorluktaki Geometrilili Obje-5 Boyama Yörüngesi Çıkarılmış Görüntüsü.....	123
Şekil G.3.	Yüksek Zorluktaki Geometrilili Obje-5 Boyanmış Görüntüsü	123

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

h	: Adım boyu (m)
E	: Mutlak üst sınır hatası
α	: X eksen açısı ($^{\circ}$)
β	: Y eksen açısı ($^{\circ}$)
γ	: Z eksen açısı ($^{\circ}$)
σ	: Standart sapma
μ	: Ortalama
ω	: Açısal frekans (rad/s)
ε	: Küçük hata
θ	: Açısal parametre ($^{\circ}$)

Kısaltmalar

3B	: Three Dimensional (Üç Boyutlu)
API	: Application Programming Interface (Uygulama Programlama Arayüzü)
BW	: Black and White Image (Siyah Beyaz Görüntü)
CNC	: Computer Numerical Control (Bilgisayarlı Sayısal Kontrol)
CNN	: Convolutional Neural Networks (Evrişimli Sinir Ağları)
DOF	: Degree of Freedom (Serbestlik Derecesi)
FFT	: Fast Fourier Transform (Hızlı Fourier Dönüşümü)
IMU	: Inertial Measurement Unit (Atalet Ölçüm Birimi)
LIDAR	: Light Detection and Ranging (Işık Tespiti ve Uzaklık Ölçümü)
PLC	: Programmable Logic Controller (Programlanabilir Mantıksal Denetleyici)
RGB	: Red, Green, Blue (Kırmızı, Yeşil, Mavi)
RL	: Reinforcement Learning (Pekiştirmeli Öğrenme)
ROI	: Region of Interest (İlgi Alanı)
SVM	: Support Vector Machine (Destek Vektör Makinesi)
TOF	: Time of Flight Camera (Uçuş Süresi Kamerası)
UV	: Ultraviolet (Ultraviyole)
VR	: Virtual Reality (Sanal Gerçeklik)

GÖRÜNTÜ İŞLEME TEKNİKLERİ KULLANILARAK AHŞAP PARÇALARIN ROBOTİK BOYAMA YÖRÜNGESİ GELİŞTİRİLMESİ

ÖZET

Bu çalışma, ahşap parçaların yüksek hassasiyetle boyanmasını sağlayan gelişmiş bir robotik sistem geliştirilmesine yöneliktir. Projede, parçaların üzerinde hareket eden konveyör bantlar üzerinde karmaşık geometrilere sahip ahşap parçaların otomatik olarak boyanması hedeflenmiştir. Sistem, bir püskürtme tabancası taşıyan robotik bir kolla donatılmıştır. Ahşap parçaların üç boyutlu geometrisi, TOF sensörü kullanılarak algılanır ve bu veriler, parçaların kenarlarını, deliklerini ve diğer önemli özelliklerini tanımlamak için hiyerarşik kenar tespit algoritması ile işlenir. Sistemin inovasyonu, parçaların delik sayısını, deliklerin konumunu belirleyebilmesi ve delikli ile deliksiz parçaları ayırt edebilmesi gibi özelliklerle güçlendirilmiştir. Ayrıca, düz veya eğimli yüzeylerin CNC işlemleri sonrası tanımlanması da mümkündür. İşlenen veriler, robotun boyama yörüngesini planlamak için kullanılır ve bu yörünge, parçanın her yüzeyine ve kenarına uygun miktarda boya uygulanmasını sağlayacak şekilde düzenlenir. Çalışma, OpenCV, Math ve Numpy kütüphanelerini kullanarak afin dönüşümleri ve sınıflandırma yöntemleri ile desteklenmektedir. Geliştirilen sistem, yüksek verimlilik ve tekrarlanabilirlik sunarak ahşap, otomotiv ve havacılık sanayiinde boyama işlemlerinin optimizasyonu için yeni bir çözüm önermektedir.

Anahtar Kelimeler: 3B Geometri Tespiti, Afin Dönüşümleri, Robotik Boyama, Sensör Teknolojileri, Yörünge Planlaması.

DETERMINING ROBOTIC PAINTING TRAJECTORY FOR WOODEN PARTS USING IMAGE PROCESSING TECHNIQUES

ABSTRACT

This study focuses on developing an advanced robotic system for the high-precision painting of wooden parts. The project aims to automate the painting of wooden parts with complex geometries moving on conveyor belts. The system is equipped with a robotic arm carrying a spray gun. The three-dimensional geometry of the wooden parts is detected using a Time of Flight (TOF) sensor, and the data is processed through a hierarchical edge detection algorithm to identify edges, holes, and other critical features. The innovation of the system lies in its ability to determine the number of holes, their positions, and differentiate between perforated and non-perforated parts. Additionally, it can identify surfaces processed through CNC machining, whether flat or contoured. The processed data is used to plan the painting trajectory of the robot, ensuring that an adequate amount of paint is applied to every surface and edge of the parts. The study employs libraries such as OpenCV, Math, and Numpy to support affine transformations and classification methods. The developed system offers a novel solution for optimizing painting processes in the wood, automotive, and aerospace industries by enhancing efficiency and reproducibility.

Keywords: 3D Geometry Detection, Affine Transformations, Robotic Painting, Sensor Technologies, Trajectory Planning.

1. GİRİŞ

Endüstriyel süreçler, teknoloji ile birlikte sürekli evrilmekte ve gelişmektedir. Bu bağlamda, endüstriyel boyama işlemleri de otomasyon ve robotik sistemlerin entegrasyonu ile daha verimli, tutarlı ve maliyet etkin hale gelmektedir. Bu çalışma, bu dönüşüm sürecinde otomasyonun ve robotik teknolojilerin endüstriyel boyama üzerindeki etkilerini incelemeyi amaçlamaktadır.

1.1. Giriş ve Motivasyon

Endüstriyel üretim süreçleri, modern sanayinin temel taşlarından biridir ve bu süreçler, ürünlerin kalitesi, verimliliği ve maliyeti üzerinde kritik bir rol oynamaktadır. Özellikle endüstriyel boyama süreçleri, ürünlerin estetik ve fonksiyonel özelliklerini belirleyerek, onlara hem estetik bir çekicilik kazandırırken hem de koruyucu bir özellik sağlar (Shah ve diğ., 2020). Bu, ürünlerin ömrünü uzatarak daha dayanıklı hale gelmelerini sağlar. Yıllar boyunca kullanılan geleneksel boyama yöntemleri, karşılaştığı teknik ve operasyonel zorluklar nedeniyle sürekli optimizasyon ve otomasyon ihtiyacını beraberinde getirmiştir.

Endüstriyel boyama işlemlerinin evrimi ve otomasyon teknolojilerinin entegrasyonu, üretim süreçlerinin verimliliğini artırmada önemli bir rol oynamaktadır. Geleneksel boyama yöntemlerinin üretim hattında karşılaştığı homojenlik ve kalite sınırlamaları, otomatik boyama sistemlerinin endüstrideki yükselen önemini tetiklemiştir. Bu çalışma, endüstriyel boyama süreçlerinin evrimsel rolünü derinlemesine inceleyerek, otomasyonun bu alandaki kritik önemini vurgulamaktadır (Gabriele Tiboni ve Tommasi, 2022).

Otomasyon ve robotik teknolojileri, boyama işlemlerini daha hızlı, tutarlı ve maliyet etkin hale getirerek, endüstriyel boyama süreçlerini dönüştürmektedir (Company, 2021). Yenilikçi otomasyon yöntemleri, boyama süreçlerinin homojenliğini ve ürün kalitesini artırarak endüstriyel üretimde stratejik bir avantaj sağlamaktadır. Bu bağlamda, bu çalışma aynı zamanda otomatik boyama sistemlerinin endüstrideki yaygınlaşmasının, üretim hattı verimliliği, ürün kalitesi ve sürdürülebilirlik açısından getireceği potansiyel avantajları da detaylı bir şekilde ele almaktadır (Murray ve Jackson, 2021).

Bu giriş bölümünde, endüstriyel boyama süreçlerinin stratejik önemi ve otomasyonun bu süreçler üzerindeki dönüştürücü etkisi derinlemesine incelenecektir. Çalışmanın temel amaçları ve hedefleri tanımlanarak, genel yapı ve kapsamı hakkında kapsamlı bir genel bakış sunulacaktır. Ayrıca, bu çalışmanın boyama süreçlerinin otomasyonuna sağladığı katkılar, endüstriyel üretimdeki yenilikçi ve dönüştürücü etkisi ile birlikte, bu alandaki gelecekteki potansiyel trendler ve etkileri hakkında bir temel oluşturacaktır (Brynjolfsson ve McAfee, 2014; Hertzmann, 2022).

1.2. Amaçlar ve Hedefler

Bu çalışmanın temel amacı, endüstriyel boyama süreçlerinin otomasyonunun önemini vurgulamak ve bu alandaki potansiyel avantajları incelemektir. Geleneksel boyama yöntemlerinin sınırlamaları göz önüne alındığında, otomasyonun endüstriyel boyama süreçlerinde nasıl dönüştürücü bir rol oynayabileceği ve üretim kalitesi ile verimliliğini nasıl artırabileceği araştırılmaktadır.

Bu genel amacın altında aşağıdaki ana hedefler bulunmaktadır:

Otomasyonun Endüstriyel Boyama Süreçlerine Katkısı: Bu çalışma, otomasyonun endüstriyel boyama süreçlerine nasıl katkı sağlayabileceğini incelemektedir. Geleneksel yöntemlerin sınırlamaları nedeniyle otomasyonun getirebileceği avantajlar, boyama işlemi kalitesini artırma, üretim hattı verimliliğini artırma ve insan hatası riskini azaltma gibi yönlerden ele alınacaktır.

Homojenlik ve Kaliteyi Artırma: Otomatik boyama sistemleri, üretim hattında daha homojen ve yüksek kaliteli sonuçlar elde etmeyi hedefler. Bu çalışma, otomasyonun boyama sürecinin homojenliği ve ürün kalitesini nasıl artırabileceğini araştıracaktır.

Endüstriyel Üretim Verimliliğini Artırma: Otomasyonun endüstriyel boyama süreçlerine entegrasyonunun üretim hattı verimliliğini nasıl artırabileceği üzerine odaklanacaktır. Otomatik boyama sistemleri, süreçleri daha hızlı ve tekrarlanabilir hale getirerek üretim hızını artırabilir.

Otomasyonun Uygulanabilirliğini İnceleme: Bu çalışma, otomatik boyama sistemlerinin

farklı endüstriyel sektörlerde ve farklı ürün türlerinde nasıl uygulanabileceğini inceleyecektir. Farklı boyama gereksinimlerine uygun otomasyon yaklaşımları ve sistemleri ele alınacaktır.

Bu bölüm, çalışmanın genel amaçlarını ve alt hedeflerini açıklamaktadır. Bu amaçlar ve hedefler, çalışmanın odak noktalarını belirlemek ve endüstriyel boyama süreçlerinde otomasyonun potansiyel etkilerini netleştirmek için tasarlanmıştır.

1.3. Yapı ve İçerik

Bu çalışma, ahşap parçaların robotik boyama yörüngesinin görüntü işleme teknikleri kullanılarak nasıl çıkarılabileceğini araştırmaktadır. Çalışma, endüstriyel boyama süreçlerinde otomasyonun önemini ve görüntü işleme tekniklerinin bu süreçlere nasıl entegre edilebileceğini inceler.

1.3.1. Çalışmanın Bölümleri ve İçeriğine Genel Bakış

1. Giriş: Bu bölüm, çalışmanın genel amacını, motivasyonunu ve araştırmanın temel sorularını tanıtır. Endüstriyel boyama süreçlerinin önemi ve otomasyon teknolojilerinin potansiyeli vurgulanır.
2. Genel Bilgiler: Otomatik boyama sistemlerinin teknik arka planı ve endüstriyel uygulamalardaki yerleri açıklanır. Geleneksel yöntemler ve otomatik sistemler arasındaki farklar, teknolojik ilerlemeler ile birlikte detaylandırılır.
3. Malzeme ve Yöntem: Araştırma metodolojisi, kullanılan malzemeler, deney düzenekleri ve uygulanan görüntü işleme teknikleri açıklanır. Deneylerin nasıl yürütüldüğü ve veri toplama yöntemleri detaylı bir şekilde anlatılır.
4. Bulgular ve Tartışma: Elde edilen bulgular sunulur ve analiz edilir. Robotik boyama sistemlerinin performansı, görüntü işleme algoritmalarının etkinliği ve sonuçların endüstriyel uygulamalar açısından önemi değerlendirilir.
5. Sonuçlar ve Öneriler: Çalışmanın sonuçları özetlenir ve gelecekteki araştırmalar için önerilerde bulunulur. Otomatik boyama teknolojisinin endüstriyel boyama süreçlerine etkileri ve potansiyel iyileştirmeler tartışılır.

Her bölüm, çalışmanın kapsamlı ve sistematik bir şekilde sunulmasını sağlamak üzere

tasarlanmıştır. Bu yapı, projenin ana hedeflerine ve metodolojisine uygun olarak düzenlenmiştir.

1.4. Katkılar ve Beklentiler

Bu bölüm, otomatik boyama süreçlerindeki yeniliklerin endüstriye sağladığı katkıları ve bu yeniliklerden beklenen sonuçları ele alır. Çalışmanın endüstriyel boyama süreçlerine getirdiği önemli iyileştirmeler ve bu iyileştirmelerin potansiyel etkileri tartışılmaktadır.

1.4.1. Projenin Katkıları

Bu çalışma, endüstriyel boyama süreçlerinde otomasyonun önemini vurgulamakta ve otomatik boyama sistemlerinin geleneksel yöntemlere göre sunduğu avantajları göstermektedir. Özellikle, görüntü işleme teknikleri ve hareket kontrol sistemlerinin kullanılması, boyama işlemlerinde kalite ve verimliliği artırmaktadır.

- **Görüntü İşleme Tekniklerinin Katkısı:** Görüntü işleme teknikleri, boyama süreçlerinde nesne tanıma ve yüzey analizi yaparak, boyanacak yüzeylerin daha iyi anlaşılmasını sağlar. Bu teknikler, Jia et al. tarafından yapılan çalışmada da önerildiği gibi, robotik sistemlerde doğruluk ve tekrarlanabilirlik sağlar (Takács ve diğ., 2023). Özellikle, optik akış tabanlı görüntü işleme teknikleri, robotik sistemlerin hareketli nesneleri algılama ve izleme yeteneklerini artırarak, endüstriyel otomasyonda önemli bir rol oynamaktadır (Takács ve diğ., 2023).
- **Hareket Kontrolü ve Hassas Manipülasyon:** Otomatik sistemlerin, istenen konum ve hızda hareket edebilme yeteneği, boyama sürecinde homojen bir uygulama sağlar. Bu, Choi ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada betimlenen gelişmiş hareket kontrol teknikleriyle desteklenmektedir (Choi ve Kim, 2019). Bu teknikler, robotların karmaşık hareket yollarını ve hassas manipülasyon görevlerini yerine getirebilmesini sağlar.
- **Endüstriyel Bilgisayar ve PLC Entegrasyonu:** Bu sistemler, otomatik boyama işlemlerinin koordinasyonunda kritik bir role sahiptir. Bu entegrasyon, Huerfano ve Jimenez tarafından yapılan çalışmalarda endüstriyel otomasyonun temelini oluşturur (Huerfano ve Jimenez, 2024). Programlanabilir lojik kontrolörler (PLC'ler), otomatik boyama sistemlerinin çeşitli bileşenleri arasında veri alışverişini sağlar ve süreçlerin

kesintisiz ve verimli bir şekilde yönetilmesine yardımcı olur.

- **Malzeme ve Bileşenlerin Tasarımı:** Otomatik boyama makinesinin fiziksel yapısının ve bileşenlerinin tasarımı, sistem verimliliğini doğrudan etkiler. Kumar ve Lee'nin araştırmalarında bu bileşenlerin seçimi ve tasarımının önemi vurgulanmıştır. Özellikle, robotik kolların ve boyama aparatlarının ergonomik ve fonksiyonel tasarımı, boyama işlemlerinin hassasiyetini ve hızını artırır (Huerfano ve Jimenez, 2024).

1.4.2. Beklentiler

Otomasyon teknolojilerinin endüstriyel boyama süreçlerine entegrasyonu, iş süreçlerinin daha verimli ve hatasız hale gelmesi beklenmektedir. Bu teknolojik ilerlemelerin, endüstriye uzun vadeli etkileri olacaktır.

- **Verimlilik ve Hata Azaltma:** Otomatik sistemlerin gelişimi, boyama işlemlerinin hızını ve kalitesini artırırken, insan hatasını minimize etmeyi amaçlamaktadır. Bu beklenti, endüstriyel otomasyonun hata oranlarını düşürerek üretim süreçlerinin verimliliğini artırabileceğini gösteren çalışmalarla desteklenmektedir (Abdel Gafoor Haddad ve Zweiri, 2024).
- **Hassasiyet ve Homojenlik:** Geliştirilen görüntü işleme algoritmaları sayesinde, otomatik boyama sistemlerinin daha hassas ve homojen sonuçlar elde etmesi mümkündür. Zhang ve arkadaşlarının yaptığı çalışma, yüksek hassasiyetli ve homojen sonuçlar elde etmek için görüntü işleme tekniklerinin nasıl optimize edilebileceğini göstermektedir (Morgan ve diğ., 2023).

Bu katkılar ve beklentiler, otomatik boyama süreçlerinin endüstriyel uygulamalardaki önemini ve potansiyelini vurgulamaktadır.

1.5. Metodoloji ve Kapsam

Bu çalışma, endüstriyel boyama süreçlerinde otomasyonun önemini vurgulamak ve otomatik boyama sistemi tasarımını anlatmak amacıyla yapılmıştır. Araştırma, literatür taraması ve mevcut endüstriyel boyama süreçlerinin analizi ile başlamıştır. Görüntü işleme teknikleri ve robotik hareket kontrolü alanlarında kullanılan algoritmaları araştırmak, bu algoritmaların boyama süreçlerine entegrasyonunu anlamak için önemli

adımlardan biridir. Ayrıca, otomasyon sisteminin donanım ve yazılım bileşenlerinin tasarımı ve entegrasyonu da çalışmanın temel adımlarındandır.

Bu çalışmanın kapsamı, otomatik boyama makinesi tasarımının temel unsurlarını ve endüstriyel boyama süreçlerine entegrasyonunu içermektedir. Görüntü işleme teknikleri ile şekil tanıma ve nesne tespiti yapabilen bir otomatik boyama sisteminin tasarımı ele alınmıştır. Ayrıca, endüstriyel robotların hareket kontrolü ve hassas manipülasyon yeteneklerinin boyama süreçlerindeki önemi incelenmiştir. Çalışma, odaklandığı konularla sınırlandırılmış olup, farklı endüstriyel boyama uygulamalarının ayrıntılı tasarım ve optimizasyonları kapsam dışı bırakılmıştır.

1.6. Kullanılan Yaklaşımlar ve Çalışmanın Sınırları

Bu çalışma, endüstriyel boyama süreçlerinin otomasyonuna yönelik çok disiplinli bir yaklaşım benimsemiştir. Araştırma, literatür taraması, mevcut teknolojilerin analizi, görüntü işleme algoritmaları ve endüstriyel robotların hareket kontrolü tekniklerinin entegrasyonunu içermektedir. Bu bileşenler, otomatik boyama sistemlerinin tasarım ve uygulamalarını derinlemesine anlamak için bir araya getirilmiştir.

1.6.1. Kullanılan Yaklaşımlar

Araştırma, endüstriyel boyama süreçlerinin kapsamlı bir analizini içermektedir. Görüntü işleme teknikleri, şekil tanıma ve nesne tespiti için kullanılan en güncel algoritmaları değerlendirmektedir. Bu teknikler, özellikle derin öğrenme ve yapay zeka temelli algoritmalar, otomatik sistemlerde yüksek doğruluk ve tekrarlanabilirlik sağlama potansiyeline sahiptir. Ayrıca, endüstriyel robotların hareket kontrolü, boyama işlemlerindeki hassasiyeti ve verimliliği artırmak için kritik öneme sahiptir.

1.6.2. Çalışmanın Sınırları

Bu çalışmanın sınırları, araştırmanın odaklandığı teknik alanlar ve kullanılan yöntemlerle çerçevelenmiştir. Görüntü işleme ve robotik hareket kontrolü alanlarına odaklanılmış olup, bu teknolojilerin entegrasyonu ve uygulanabilirliği, belirli endüstriyel boyama uygulamaları ile sınırlıdır. Ayrıca, projenin kapsamı, kullanılan donanım ve yazılım

bileşenlerinin seçimiyle de sınırlıdır. Diğer potansiyel otomasyon teknikleri ve gelişmiş malzeme bilimleri çalışmaları bu araştırmanın dışında kalmaktadır.



2. GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR TARAMASI

Bu bölüm, görüntü işleme ve robotik boyama teknolojilerinin tarihçesi ve bu alanlardaki önemli gelişmeleri kapsamlı bir şekilde ele alır. Araştırma, bu teknolojilerin endüstriyel boyama süreçlerinde nasıl entegre edildiğini ve bu entegrasyonun üretim verimliliği ve ürün kalitesi üzerindeki etkilerini incelemektedir.

2.1. Görüntü İşleme Teknolojilerinin Gelişimi

Görüntü işleme teknolojileri, 1970'lerden bu yana önemli bir evrim geçirmiştir. Başlangıçta basit nesne tanıma ve sınıflandırma görevleri için kullanılan bu teknolojiler, zamanla daha karmaşık algoritmaların geliştirilmesiyle büyük ölçüde gelişmiştir. Derin öğrenme tekniklerinin bu alana dahil olmasıyla, görüntü işleme, özellikle endüstriyel otomasyon alanında devrim yaratmıştır (Gonzalez ve Woods, 2018; Jain, 1989).

2.2. Robotik Boyama Teknolojileri ve Uygulamaları

Robot teknolojisinin boyama endüstrisine uygulanması, 1980'lerden itibaren başlamıştır. İlk kullanımlar, temel hareket ve uygulama tekniklerine odaklanmışken, günümüzde robotlar, yüksek derecede hassasiyet ve karmaşık geometrilere sahip yüzeylerde dahi etkili boyama işlemleri gerçekleştirebilmektedir. Gelişmiş kontrol sistemleri ve hareket planlama algoritmaları, bu sürecin temel taşlarını oluşturur.

2.2.1. Boyama Sistemi Entegrasyonu ve Teknolojileri

Otomatik boyama sistemi, endüstriyel bilgisayar ve PLC ile entegre edilerek, yüksek verimlilik ve hassasiyet sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Bu entegrasyon, sistemin farklı bileşenlerinin uyum içinde çalışmasını ve veri akışının kesintisiz bir şekilde yönetilmesini sağlar.

Kullanılan Yazılım Dilleri ve Teknolojiler:

- Python: Görüntü işleme teknikleri için kullanıldı. OpenCV gibi kütüphanelerle, ahşap parçaların yüzeylerinin doğru bir şekilde analiz edilmesi ve kenar tespitinin yapılması sağlandı.

- Structured Text (ST): PLC programlaması için kullanıldı. PLC, robotun hareketlerini ve konveyör sistemlerinin senkronizasyonunu kontrol etmek için kullanılır.
- C#: Endüstriyel bilgisayarda çalışan kontrol yazılımının geliştirilmesinde kullanıldı. Bu yazılım, robotun yörüngesini hesaplar ve kontrol komutlarını PLC'ye iletir.
- VBS (Visual Basic Script): Ek kontrol ve otomasyon görevleri için kullanıldı. VBS, belirli rutin işlemleri otomatikleştirmek ve sistem başlatma senaryolarını yönetmek için kullanılır.

Veri İletişimi ve Entegrasyon:

Sistem bileşenleri arasındaki veri iletimi, yüksek hızlı ve düşük gecikmeli iletişim sağlamak amacıyla EtherCAT protokolü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu protokol, endüstriyel bilgisayar ve PLC arasında güvenilir bir veri akışı sağlar.

- Statik IP Adresleri: Tüm cihazlar, sabit IP adresleri kullanarak bir switch aracılığıyla RJ45 konnektörleri ile bağlanmıştır. Bu yapı, ağ üzerindeki cihazların kolayca tanımlanmasını ve yönetilmesini sağlar.
- Socket Haberleşmesi: Robot ve endüstriyel bilgisayar arasındaki veri iletimi, socket haberleşmesi yöntemi ile gerçekleştirilir. Bu yöntem, robotun hareket komutlarını ve koordinat verilerini hızlı ve güvenilir bir şekilde iletmek için kullanılır.

Kontrol Sistemi Entegrasyonu:

Kontrol sistemi, endüstriyel bilgisayarda çalışan yazılım tarafından yönetilir. Bu yazılım, görüntü işleme sonuçlarını ve hareket komutlarını analiz ederek, robotun yörüngesini hesaplar ve PLC'ye iletilmesi gereken komutları oluşturur. Sistem, başlatma sırasında otomatik olarak çalışacak şekilde yapılandırılmıştır, bu da kullanıcı müdahalesini en aza indirir ve operasyonel verimliliği artırır.

Bu entegrasyon ve kullanılan teknolojiler, otomatik boyama sisteminin hassas ve verimli çalışmasını sağlar. Sistem, karmaşık yüzeylerin boyanmasında yüksek doğruluk ve homojenlik sunarak, endüstriyel üretim süreçlerinde kalite ve verimliliği artırır.

2.3. Görüntü İşleme ve Robotik Boyama Teknolojilerinin Entegrasyonu

Görüntü işleme ve robotik teknolojilerinin birleştirilmesi, endüstriyel boyama süreçlerini dönüştürmüştür. Bu entegrasyon, üretim hatlarında verimliliği ve ürün kalitesini artırırken, iş süreçlerini de otomatize etmektedir. Özellikle, karmaşık yüzeylerin boyanmasında görüntü işleme teknolojileri sayesinde robotlar, boyama işlemini daha homojen ve hızlı bir şekilde yapabilmektedir.

2.4. Otomatik Boyama Sistemleri

Endüstriyel otomasyonun gelişmesiyle birlikte, otomatik boyama sistemleri, üretim süreçlerinde dönüştürücü bir rol oynamıştır. Bu sistemler, boyama işlemlerini daha verimli hale getirerek zaman ve maliyet tasarrufu sağlamaktadır. Ayrıca, kalite ve homojenlik açısından daha iyi sonuçlar elde edilmesini sağlarlar. Otomatik boyama sistemleri, boyama yüzeyinin şekline ve boyutuna bağlı olarak programlanabilir ve bu da daha karmaşık tasarımların bile kolayca boyanmasını mümkün kılar.

2.4.1. Farklı Nozulların Boyama Kabiliyetleri

Bu çalışmada, çeşitli nozul tiplerinin ahşap parçaların boyanmasındaki etkinliği incelenmiştir. Nozulların geometrisi, boyama kapasitesi, ve püskürtme basıncı, boyama kalitesi üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir. Farklı nozul çapları ve şekilleri, boyanın uygulanma şeklini ve dolayısıyla son ürünün kalitesini belirgin şekilde etkilemektedir. Özellikle, MDF (Orta Yoğunlukta Lif) ve sert ahşap (hardwood) yüzeylerin boyanmasında nozul seçimi kritik öneme sahiptir.

2.4.1.1. MDF ve Sert Ahşap Boyama Farkları

MDF, gözenekli yapısı nedeniyle boyayı daha fazla emer ve bu da daha homojen bir kaplama gerektirir. Bu materyal için genellikle daha yüksek viskoziteli boyalar tercih edilir, çünkü düşük viskoziteli boyalar hızla emilir ve yüzeyde düzgün bir kaplama sağlamaz. Sert ahşap boyamada ise, boyanın yüzeyde daha az emilimi söz konusu olduğundan, daha ince nozullar kullanılarak daha detaylı bir işçilik elde edilebilir.

2.4.1.2. Matematiksel ve Sayısal Değerlendirmeler

Boyama sürecinde nozul çapının etkisi, püskürtme basıncı ve boyanın akış hızı ile doğrudan ilişkilidir. Nozul çapı d (mm) ve püskürtme basıncı P (atm) arasındaki ilişki, boyanın yüzeye uygulanan miktarını (Q , mL/s) belirler. Denklem (2.1) bu bağlantıyı açıklar:

$$Q = \frac{\pi d^2}{4} \times v, \quad (2.1)$$

burada v (m/s), boyanın nozuldan çıkış hızını ifade eder ve bu hız basınçla doğru orantılıdır. Denklem (2.2) bu orantılılığı gösterir:

$$v = k \sqrt{P}, \quad (2.2)$$

burada k , boyanın fiziksel özelliklerine bağlı bir sabittir.

Bu ilişkiler, farklı nozullar kullanılarak yapılan deneysel çalışmalarla doğrulanmış ve MDF ile sert ahşap yüzeyler için optimal nozul çapı ve püskürtme basıncı değerleri belirlenmiştir. Denklemler, Denklem (2.1) ve Denklem (2.2) şeklinde metin içinde anlatılmıştır.

2.4.2. Teknolojik İlerlemeler ve Uygulamalar

Otomatik boyama sistemlerindeki teknolojik ilerlemeler, özellikle görüntü işleme ve robotik kontroller sayesinde, bu sistemlerin hassasiyetini ve adaptasyon kabiliyetini büyük ölçüde artırmıştır. Gelişmiş algoritmalar ve sensör teknolojileri, boyama işlemlerinin her aşamasını optimize ederek, üretim hattının verimliliğini ve ürün kalitesini iyileştirmektedir. Örneğin, derin öğrenme ve robotik kontrol sistemleri, otomatik boyama süreçlerinde önemli bir rol oynamaktadır (Liu ve Armand, 2024). Bu sistemler, üretim süreçlerinin her aşamasında kaliteyi ve verimliliği artırmak için kullanılmaktadır (Kariminejad ve diğ., 2024).

2.4.3. Maliyet ve Verimlilik İyileştirmeleri

Otomatik boyama sistemleri, özellikle büyük ölçekli üretim operasyonlarında, maliyetleri azaltma ve iş süreci verimliliğini artırma potansiyeline sahiptir. Bu sistemler, hızlı kuruma süreleri ve düşük atık oranları ile çevresel sürdürülebilirlikte de önemli katkılar sağlamaktadır (Shah ve diğ., 2020). Örneğin, SpectralNeRF sistemi, boyama

süreçlerinde yüksek verimlilik ve düşük maliyet sağlamak için derin öğrenme ve görüntü işleme tekniklerini kullanmaktadır (Li ve diğ., 2023).

Bu bölüm, otomatik boyama sistemlerinin endüstriyel uygulamalardaki etkisini ve bu sistemlerin getirdiği yenilikleri, akademik literatüre dayalı olarak inceler.

2.5. Otomatik Boyama Sistemlerinin Avantajları

Otomatik boyama sistemleri, endüstriyel üretim süreçlerinde önemli avantajlar sağlar. Bu sistemler, manuel yöntemlere kıyasla daha hızlı, daha tutarlı ve daha verimli boyama işlemleri sunar.

2.5.1. Artan Verimlilik

Otomatik boyama sistemleri, üretim süreçlerini hızlandırarak verimliliği artırır. Bu sistemler, aynı anda birden fazla boyama işlemi gerçekleştirebilir ve duraksamaları en aza indirir. Özellikle çoklu yol planlama ve optimizasyon yöntemleri, robotların karmaşık 3D objeler etrafında daha verimli boyama yapmalarını sağlar (Gabriele Tiboni ve Tommasi, 2022). Bu sistemler, boyama işlemlerini hızlandırarak üretim kapasitesini önemli ölçüde artırır.

2.5.2. Kalite ve Tutarlılık

Otomatik sistemler, boyama işlemlerinde yüksek kalite ve tutarlılık sağlar. Robotik boyama sistemleri, insan hatalarını minimize ederek her seferinde aynı yüksek kaliteyi sunar. Dijital ikiz (Digital Twin) teknolojileri, üretim süreçlerinin dijital modellerini oluşturarak, kalite kontrolünü ve süreç optimizasyonunu mümkün kılar (Venkateswaran ve diğ., 2022). Bu teknoloji, boyama süreçlerinde ortaya çıkabilecek olası hataları önceden tespit edip düzeltebilme yeteneği sağlar.

2.5.3. Maliyet Tasarrufu

Otomasyon, iş gücü maliyetlerini düşürür ve malzeme israfını azaltır. Bu da genel üretim maliyetlerinde önemli tasarruf sağlar. Otomatik boyama sistemleri, boyama malzemelerinin daha etkin kullanılmasını sağlayarak israfı azaltır (Liu ve Armand,

2024). Ayrıca, iş gücü maliyetlerinin düşmesi, işletmelerin karlılığını artırır.

2.5.4. Gelişmiş Güvenlik

Otomatik boyama sistemleri, tehlikeli kimyasalların ve zorlu çalışma koşullarının bulunduğu boyama işlemlerinde işçilerin maruziyetini azaltarak güvenliği artırır. Bu sistemler, operatörlerin zararlı kimyasallara maruz kalmasını engelleyerek işçi sağlığı ve güvenliğini korur (Liu ve Armand, 2024). Aynı zamanda, tehlikeli ve erişilmesi zor alanlarda boyama yapabilme yetenekleri ile iş kazalarını minimize eder.

2.5.5. Esneklik ve Uyarlanabilirlik

Otomatik boyama sistemleri, farklı boyut ve şekillerdeki ürünlerin boyanmasında yüksek esneklik sunar. Bu sistemler, programlanabilir özellikleri sayesinde kolayca uyarlanabilir ve farklı ürün tiplerine göre hızlıca ayarlanabilir. Örneğin, 3D derin öğrenme teknolojileri, farklı şekil ve boyutlardaki objelerin boyama yollarını optimize ederek, boyama süreçlerinin esnekliğini artırır (Gabriele Tiboni ve Tommasi, 2022). Bu esneklik, üretim hatlarının değişen taleplere hızlıca cevap verebilmesini sağlar.

2.6. Geleneksel Boyama Yöntemlerinin Sınırlamaları

Geleneksel boyama yöntemleri, genellikle manuel işgücüne dayalıdır ve bu durum, boyama süreçleri sırasında çeşitli homojenlik ve kalite sorunlarına yol açabilir. Manuel işlemler sırasında operatör hataları renk farklılıklarına ve yüzeyde düzensizliklere neden olabilir, bu da ürün kalitesinde tutarsızlıklara sebep olur. Ayrıca, karmaşık tasarımların boyanması zor olabilir ve işlem süresinin uzamasına yol açabilir. Bu sınırlamaların üstesinden gelmek için otomatik boyama sistemleri giderek daha fazla tercih edilmektedir.

2.6.1. Kalite ve Tutarsızlık Sorunları

Geleneksel yöntemlerle boyama, özellikle yüksek hacimli üretim ortamlarında, kalite ve tutarsızlıklarla dolu bir süreç olabilir. Manuel boyama, renk uygulamasında farklılıklar ve kaplama kalınlığında tutarsızlıklar gibi sorunlara neden olabilir, bu da ürün iadesi ve müşteri memnuniyetsizliğine yol açabilir (Karypidis ve diğ., 2022). Bu sorunlar, geleneksel yöntemlerin doğruluğunu ve tutarlılığını artırmak için kullanılan derin öğrenme teknikleri

ile çözülebilir (Liu ve diğ., 2021).

2.6.2. Verimlilik ve Maliyet Sorunları

Manuel boyama işlemleri genellikle zaman alıcıdır ve yüksek maliyet gerektirir. İşgücü maliyetleri ve düşük verimlilik, özellikle karmaşık parçaların boyanması durumunda, üretim maliyetlerinin artmasına sebep olur. Otomatik boyama sistemleri, bu süreçleri hızlandırarak ve işgücü maliyetlerini azaltarak daha ekonomik çözümler sunar. Örneğin, SpectralNeRF sistemi, boyama süreçlerinde yüksek verimlilik ve düşük maliyet sağlamak için derin öğrenme ve görüntü işleme tekniklerini kullanmaktadır (Li ve diğ., 2023).

Bu bölüm, geleneksel boyama yöntemlerinin sınırlamalarını ve otomatik sistemlerin bu sınırlamaları nasıl aştığını detaylı bir şekilde inceler.

2.6.3. Endüstriyel Otomasyonun Boyama Süreçlerine Etkisi

Endüstriyel otomasyon, boyama süreçlerinde önemli iyileştirmeler sağlamıştır. Otomasyon sistemlerinin kullanılması, iş gücü verimliliğini artırarak maliyetleri düşürmekte ve ürün kalitesini artırmaktadır (Nohra ve diğ., 2022).

2.6.3.1. Verimlilik Artışı

Otomatik boyama sistemleri, manuel yöntemlere kıyasla daha hızlı ve tutarlı sonuçlar sunar. Bu sistemler, üretim hattındaki duraksamaları en aza indirir ve sürekli bir iş akışı sağlar (Venkateswaran ve diğ., 2022).

2.6.3.2. Kalite ve Tutarlılık

Otomasyon, boyama süreçlerinde kalite ve tutarlılığı artırır. Dijital ikiz (Digital Twin) teknolojileri, üretim süreçlerinin dijital modellerini oluşturarak, kalite kontrolünü ve süreç optimizasyonunu mümkün kılar (Karnouskos ve diğ., 2021).

2.6.3.3. İnsan Hatalarının Azaltılması

Otomatik sistemler, insan hatalarını minimize eder ve tekrarlayan görevlerin hatasız bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlar. Bu, üretim hattında daha az hata ve yeniden işleme

gereksinimi anlamına gelir (Venkateswaran ve diğ., 2022).

2.6.3.4. Gelişmiş Kontrol ve İzleme

Otomasyon sistemleri, gelişmiş kontrol ve izleme yetenekleri sağlar. Bu sistemler, üretim sürecindeki anormallikleri tespit edebilir ve anında müdahale edebilir, böylece üretim verimliliğini ve ürün kalitesini artırır (Nohra ve diğ., 2022).

2.6.4. Nesne Tespiti ve Şekil Tanıma Algoritmaları

Robotik boyama süreçlerinde, nesne tespiti ve şekil tanıma teknolojileri son yıllarda önemli ilerlemeler kaydetmiştir. Bu teknolojiler, hassas ve verimli boyama işlemleri için kritik öneme sahiptir. Özellikle, PaintNet çalışması, robotik boyama için 3D nokta bulutları üzerinden nesne tespiti ve çoklu yol öğrenimi sunarak, nesnelerin karmaşık geometrilerinin doğru bir şekilde tanınmasını sağlamıştır (Gabriele Tiboni ve Tommasi, 2022).

Evrişimli sinir ağları (CNN), bu alanda özellikle devrim yaratmıştır. Derin öğrenme yaklaşımları, robotların boyama işlemlerini daha etkin bir şekilde yönlendirmesine olanak tanıyan çeşitli nesneleri yüksek doğrulukla tespit edebilir (Du ve diğ., 2019). Bu teknolojiler, robotik boyama uygulamalarında farklı nesneleri tespit etmek ve konumlarını belirlemek için kullanılır.

Nesne tespit edildikten sonra, şekil tanıma algoritmaları devreye girer. Bu algoritmalar, nesnelerin 3D modellerini oluşturarak, robotik kolların boyama sırasında nesnelerin yüzeylerini daha doğru bir şekilde takip etmesini sağlar (Ainetter ve diğ., 2021). Bu süreçlerin entegrasyonu, robotik boyama sistemlerinin esnekliğini ve uyarlanabilirliğini artırarak, üretim verimliliğini önemli ölçüde iyileştirir.

Sonuç olarak, nesne tespiti ve şekil tanıma teknolojileri, robotik boyama süreçlerini dönüştürmekte ve endüstriyel uygulamalar için yeni kapılar açmaktadır (Gabriele Tiboni ve Tommasi, 2022). Bu teknolojiler, gelecekteki üretim süreçlerinin daha da otomatize ve verimli hale gelmesine katkıda bulunmaktadır.

2.7. Temel Kavramlar ve Uygulama Alanları

Bu bölüm, endüstriyel boyama süreçlerinin otomasyonu ile ilgili temel kavramları ve teknolojileri tanımlar ve bu kavramların uygulama alanlarını detaylı bir şekilde inceler.

2.7.1. Endüstriyel Robotlar

Endüstriyel robotlar, otomasyonun temel taşlarından biridir ve boyama süreçlerinde de yaygın olarak kullanılırlar. Bu robotlar, çok eksenli hareket kabiliyetleri sayesinde, her türlü yüzeyde ve geometride hassas ve tutarlı boya uygulamaları gerçekleştirebilirler (Sharkawy, 2021). Programlama dilleri olan Python, C ve C++ gibi diller, robot hareketlerinin karmaşık senaryolarda bile doğru şekilde koordine edilmesini sağlar, böylece her ürün için mükemmel bir boya kaplama kalitesi ve homojenlik elde edilir (Gabriele Tiboni ve Tommasi, 2022).

2.7.2. Konveyör Sistemleri

Konveyör sistemleri, boyama hattı boyunca ürünlerin düzenli ve kesintisiz bir şekilde taşınmasını sağlar. Bu sistemler, otomatik boyama süreçlerinin vazgeçilmez bir parçasıdır. Çünkü boyama işleminin sürekliliğini ve hızını artırarak, toplamda daha düşük üretim maliyetleri ve daha yüksek verimlilik sunarlar (Huerfano ve Jimenez, 2024).

2.7.3. Programlanabilir Mantık Kontrolörleri (PLC)

PLC'ler, boyama işlemlerini kontrol etmek ve yönetmek için kritik öneme sahiptir. Bu cihazlar, birden fazla girdiyi alarak ve çıktıları uygun şekilde yönlendirerek, boyama sürecinin her aşamasında yüksek düzeyde doğruluk ve zamanlama sağlar (Ogundare ve diğ., 2023).

2.7.4. Gelişmiş Görüntü İşleme Teknikleri

Gelişmiş görüntü işleme teknikleri, otomatik boyama sistemlerinin yüzeyleri doğru bir şekilde analiz etmesine olanak tanır. Bu teknikler, kusurları tespit etme, boyanacak alanları belirleme ve hatta son boya kalitesini değerlendirme gibi işlemleri otomatize eder (Huerfano ve Jimenez, 2024).

2.7.5. ToF Kameralar ve Uygulamaları

ToF kameralar, boyama robotlarının yüzeyleri üç boyutlu olarak tarayarak doğru mesafe ölçümleri yapmalarını sağlar. Bu cihazlar, robotların boyama süreçlerinde yüzey eğrilerini ve obje mesafelerini hassas bir şekilde algılamalarına yardımcı olur, bu da boyama kalitesini ve hızını artırır (Maschler ve Weyrich, 2020).

2.8. Endüstriyel Boyama Süreçlerindeki Zorluklar

Endüstriyel boyama süreçleri, özellikle geleneksel yöntemler kullanıldığında, çeşitli zorluklarla karşılaşabilir. Bu zorluklar, üretim verimliliği ve ürün kalitesi üzerinde önemli etkilere sahip olabilir.

2.8.1. Geleneksel Yöntemlerin Sınırlamaları

Geleneksel boyama yöntemleri, işgücü yoğun ve hata oranı yüksek süreçlerdir. Manuel boyama, özellikle yüksek hacimli üretim ortamlarında, kalite ve tutarsızlıklarla dolu bir süreç olabilir (Maschler ve Weyrich, 2020).

2.8.2. Homojenlik Sorunları

Manuel boyama süreçleri, operatörlerin beceri ve deneyim düzeylerine büyük ölçüde bağlıdır. Operatörlerin farklı uygulama teknikleri ve bireysel yetenekleri, boyanın yüzeye homojen olarak uygulanmasını zorlaştırabilir. Bu, özellikle kalite ve estetik açısından önem taşıyan ürünlerde önemli bir sorundur (Gabriele Tiboni ve Tommasi, 2022).

2.8.3. Kalite Kontrol Zorlukları

Manuel boyama işlemleri, her ürünün aynı düzeyde kaliteye sahip olmasını garantilemek için yoğun ve sürekli denetim gerektirir. Büyük üretim hacimlerinde bu, özellikle zorlayıcıdır (Ogundare ve diğ., 2023). Kalite kontrol süreçleri, üretim hattının her aşamasında dikkatli bir şekilde yönetilmeli ve her bir ürün, belirlenen kalite standartlarına uygun olarak değerlendirilmelidir.

2.8.4. Yavaş Üretim Hızı

Manuel işlemler, otomatik sistemlerle kıyaslandığında genellikle daha düşük üretim hızlarına neden olur. Manuel boyama, özellikle detay gerektiren veya karmaşık geometrilere sahip ürünlerde, zaman alıcı olabilir. Bu durum, özellikle yüksek talep dönemlerinde, üretim süreçlerinin gecikmesine ve dolayısıyla artan maliyetlere yol açar (Ogundare ve diğ., 2023).

2.8.5. İnsan Hataları

Manuel boyama işlemleri, insan hatalarına oldukça açıktır. Operatörlerin yorgunluk, dikkat eksikliği veya tecrübesizlik gibi nedenlerle yapabileceği hatalar, ürün kalitesinde düşüşe, müşteri şikayetlerine ve mali kayıplara neden olabilir (Gabriele Tiboni ve Tommasi, 2022). Bu tür hatalar, boyama işleminin yeniden yapılmasını gerektirebilir, bu da işletme için ek maliyet ve zaman kaybı anlamına gelir.

2.8.6. Şekil ve Boyut Farklılıklarının Üstesinden Gelme Zorlukları

Endüstriyel ürünlerin çeşitliliği, boyama süreçlerinde önemli zorluklar oluşturabilir. Özellikle karmaşık geometrilere sahip veya büyük boyutlu ürünler, manuel boyama süreçlerinde önemli zorluklar yaratmaktadır (Maschler ve Weyrich, 2020). Bu tür ürünlerin boyanması, standart boyama teknikleriyle zor ve zaman alıcı olabilir. Otomatik boyama sistemleri, bu tür zorlukları aşmak için geliştirilmiştir ve 4 metrekarelik bir alanı yaklaşık 4 dakikada boyayabilecek kapasiteye sahiptir.

2.9. Görüntü İşleme Teknikleri ve Şekil Tanıma

Görüntü işleme, dijital görüntüler üzerinde çeşitli algoritmalar ve teknikler uygulayarak bilgi çıkarımı yapmayı amaçlayan bir alandır. Özellikle endüstriyel uygulamalarda, bu teknikler nesne tanıma, kalite kontrol ve otomasyon gibi süreçlerin etkin bir şekilde yürütülmesini sağlar. Şekil tanıma, görüntü işleme teknikleri arasında önemli bir yer tutar ve görüntülerdeki belirli yapıları, desenleri veya nesneleri tanımlamayı hedefler. Bu bölümde, görüntü işleme tekniklerinin temel bileşenleri ele alınacaktır.

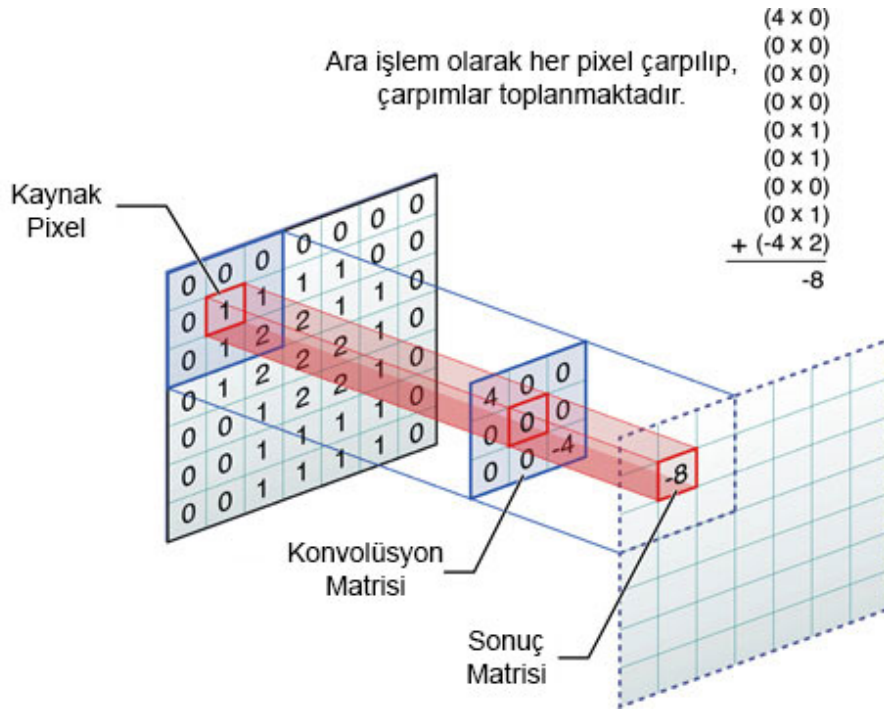
2.9.1. Görüntü Filtreleme ve Konvolüsyon İşlemi

Görüntü işlemede filtreleme, temel bir tekniktir ve gürültü azaltma, kenar belirginleştirme veya belirli özelliklerin vurgulanması gibi amaçlar için kullanılır. Bu süreç, bir görüntü üzerinde yapısal bir eleman olan filtre çekirdeği (kernel) ile konvolüsyon işlemi gerçekleştirilmesini içerir, Denklem (2.3) bu işlemi formüle eder.

$$g(x,y) = \sum_{i=-a}^a \sum_{j=-b}^b f(x+i,y+j) \cdot h(i,j) \quad (2.3)$$

Konvolüsyon işlemi, her bir piksel için filtre çekirdeğinin görüntü üzerinde kaydırılarak uygulanmasını sağlar, Denklem (2.3). Filtre çekirdeği, genellikle belirli bir boyutta bir matris formunda tanımlanır ve her bir elemanı, ilgili piksel üzerindeki ağırlığı belirtir (Şekil 2.1.). Örneğin, ortalama filtre çekirdeği Denklem (2.4) ile verilmiştir.

$$H = \frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$



Şekil 2.1. Konvolüsyon İşlemi

Bu örnekteki ortalama filtre çekirdeği, görüntünün yumuşatılmasını sağlar, Denklem (2.4), komşu piksellerin ortalama değerini alarak homojen bir görünüm yaratır. Bu işlem, özellikle gürültülü görüntülerin düzeltilmesinde veya düşük kontrastlı görüntülerin iyileştirilmesinde kullanılır. Modern görüntü işleme uygulamalarında, daha karmaşık çekirdekler kullanılarak spesifik görevler için optimize edilmiş filtreleme işlemleri gerçekleştirilir.

(Gonzalez ve Woods, 2018) ve (Jain, 2019) referansları, görüntü filtreleme teknikleri ve konvolüsyonun teorik temelleri üzerine kapsamlı bilgiler sağlar. Bu kaynaklar, görüntü işleme alanında derinlemesine bir anlayış kazanılmasına olanak tanır.

2.9.2. Gürültü Giderme

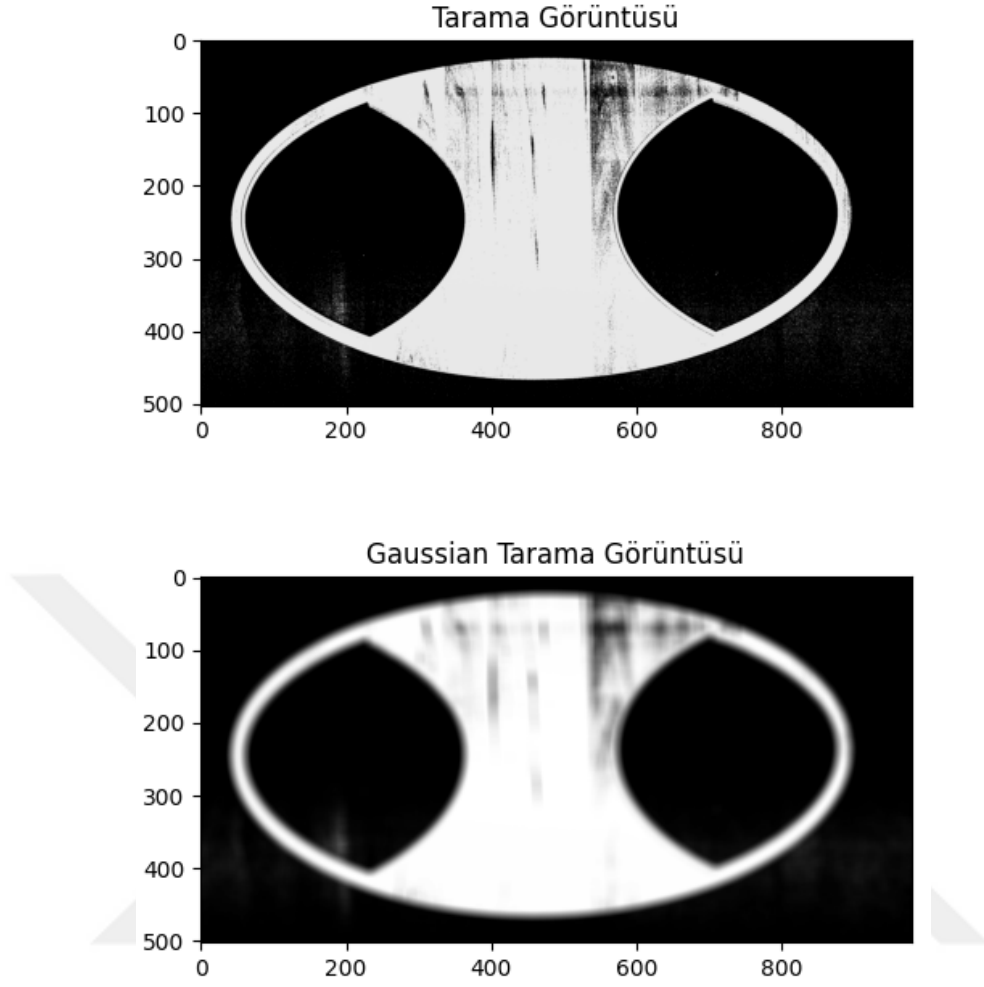
Gürültü giderme, görüntü işlemede kullanılan kritik bir tekniktir. Bu süreç, genellikle morfolojik işlemler ve Gauss Bulanıklaştırma Filtresi gibi yöntemlerle gerçekleştirilir. Morfolojik işlemler, erozyon, genişleme, açma ve kapama gibi matematiksel işlemleri içerir. Bu işlemler, görüntü üzerindeki istenmeyen gürültüyü azaltmak ve nesnelerin sınırlarını netleştirmek için yapısal elementler (kernel) kullanır.

2.9.2.1. Gauss Bulanıklaştırma Filtresi

Gauss Bulanıklaştırma Filtresi, görüntüdeki yüksek frekanslı gürültülerin yumuşatılmasında etkili bir yöntemdir. Bu filtre, her bir pikselin değerini, çevresindeki piksellerin değerlerinin ağırlıklı ortalamasını alarak belirler. Bu işlem, görüntüdeki gürültüyü azaltırken detayların korunmasına yardımcı olur (Şekil 2.2.).

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (2.5)$$

Bu formül, pikseller arası ilişkileri normal dağılımla modelleyerek, gürültünün azaltılmasını sağlar. Filtre çekirdeği, σ (standart sapma) parametresine bağlı olarak şekillenir ve bu, filtreleme etkisinin derecesini belirler, Denklem (2.5). Morfolojik işlemler daha detaylı bir şekilde başka bir bölümde açıklanmıştır (Şekil 2.3.).



Şekil 2.2. Gaussian Blur Uygulaması

(Gonzalez ve Woods, 2018) ve (Soille, 2003) kaynakları, morfolojik işlemler ve Gauss Bulanıklaştırma Filtresi hakkında detaylı bilgiler sunar ve görüntü işleme alanındaki uygulamalarını açıklar. Bu teknikler, gürültüyü azaltmada ve görüntü kalitesini artırmada önemli rol oynar.



Şekil 2.3. Orijinal Görüntü

2.9.2.2. Erozyon

Erozyon işlemi, morfolojik görüntü işlemede kullanılan bir tekniktir. Yapısal elementin altındaki görüntü bölgesindeki en küçük değeri alarak, görüntüdeki beyaz pikselleri azaltır. Bu işlem, özellikle kenarları yumuşatır ve küçük beyaz gürültüleri giderir (Şekil 2.4.).

$$\text{Erozyon}(I, B) = \min_{(x,y) \in B} I(x,y) \quad (2.6)$$



Şekil 2.4. Erozyon İşlemi

Erozyon, görüntüdeki küçük nesneleri ve gürültüyü azaltmak için kullanılır, böylece daha büyük ve belirgin yapılar korunur. Bu işlem, kenarları yumuşatma ve gürültü azaltma konusunda özellikle etkilidir, Denklem (2.6).

Python kodu örneği aşağıdaki gibidir:

```
import cv2
import numpy as np
# Görüntüyü yükle
img = cv2.imread('path_to_image')
# Yapısal elementi tanımla
kernel = np.ones((5,5), np.uint8)
# Erozyon uygula
erosion = cv2.erode(img, kernel, iterations=1)
# Sonucu göster
cv2.imshow('Eroded Image', erosion)
```

```
cv2.waitKey(0)
cv2.destroyAllWindows()
```

2.9.2.3. Genişleme (Dilasyon)

Genişleme işlemi, morfolojik görüntü işlemede kullanılan bir tekniktir. Yapısal elementin (kernel) altındaki görüntü bölgesindeki en büyük değeri alarak, görüntüdeki beyaz pikselleri artırır. Bu işlem, erozyonla küçülen nesnelerin boyutlarını yeniden büyütür ve delikleri doldurur, böylece görüntüdeki kesikler ve kopukluklar giderilir (Şekil 2.5.).

$$\text{Genişleme}(I, B) = \max_{(x,y) \in B} I(x,y) \quad (2.7)$$



Şekil 2.5. Dilasyon İşlemi

Genişleme işlemi, erozyon işleminden sonra kullanıldığında, erozyon tarafından aşırı küçültülen nesnelerin boyutlarını düzeltmek ve kesintiye uğrayan sınırları onarmak için özellikle yararlıdır. Bu süreç, nesnelerin daha belirgin ve tanımlanabilir hale gelmesini sağlar ve genellikle gürültü azaltma ve kenar iyileştirme için diğer morfolojik işlemlerle birlikte kullanılır, Denklem (2.7).

Python Kodu Örneği: Aşağıdaki Python kodu, OpenCV kütüphanesi kullanarak bir görüntü üzerinde genişleme işlemi yapar:

```
import cv2
import numpy as np
# Görüntüyü yükle
```

```

img = cv2.imread('path_to_image')
# Yapısal elementi tanımla
kernel = np.ones((5,5), np.uint8)
# Genişleme uygula
dilation = cv2.dilate(img, kernel, iterations=1)
# Sonucu göster
cv2.imshow('Dilated Image', dilation)
cv2.waitKey(0)
cv2.destroyAllWindows()

```

(Gonzalez ve Woods, 2018) ve (Soille, 2003) referansları, genişleme işlemi ve diğer morfolojik teknikler hakkında derinlemesine bilgiler sunar ve bu yöntemlerin görüntü işleme alanındaki uygulamalarını detaylandırır.

2.9.2.4. Açma İşlemi

Açma işlemi, morfolojik görüntü işlemede kullanılan temel tekniklerden biridir. Bu işlem, ilk olarak erozyon uygulayarak küçük nesne ve gürültü parçalarını azaltır, ardından genişleme işlemi ile nesnelerin sınırlarını düzeltir ve netleştirir. Açma işlemi, özellikle gürültülü görüntülerde küçük beyaz gürültü unsurlarını temizlemek için etkilidir (Şekil 2.6.).

$$Açma(I, B) = Genişleme(Erozyon(I, B), B) \quad (2.8)$$



Şekil 2.6. Açma İşlemi

Açma işlemi, ayrıca, görüntü üzerindeki küçük nesneleri ve gürültüyü etkili bir şekilde

giderirken, ana nesne sınırlarının korunmasını sağlar. Bu, görüntü analizi ve işleme süreçlerinde önemli bir avantaj sunar, Denklem (2.8).

Python Kodu Örneği: Aşağıdaki Python kodu, OpenCV kütüphanesi kullanarak bir görüntü üzerinde açma işlemi yapar:

```
import cv2
import numpy as np
# Görüntüyü yükle
img = cv2.imread('path_to_image')
# Yapısal elementi tanımla
kernel = np.ones((5,5), np.uint8)
# Açma işlemi uygula
opening = cv2.morphologyEx(img, cv2.MORPH_OPEN, kernel)
# Sonucu göster
cv2.imshow('Opened Image', opening)
cv2.waitKey(0)
cv2.destroyAllWindows()
```

(Gonzalez ve Woods, 2018) ve (Soille, 2003) referansları, açma işlemi ve diğer morfolojik teknikler hakkında derinlemesine bilgiler sunar ve bu yöntemlerin görüntü işleme alanındaki uygulamalarını detaylandırır.

2.9.2.5. Kapama İşlemi

Kapama işlemi, morfolojik görüntü işlemede kullanılan önemli bir tekniktir. Bu işlem, önce genişleme sonra erozyon uygulayarak küçük delikleri ve boşlukları doldurur. Bu süreç, özellikle görüntüdeki nesneler içinde bulunan küçük siyah deliklerin ve boşlukların doldurulmasında etkilidir (Şekil 2.7.).

$$\text{Kapama}(I, B) = \text{Erozyon}(\text{Genişleme}(I, B), B) \quad (2.9)$$



Şekil 2.7. Kapama İşlemi

Yapısal elementin (B) boyutu ve şekli, erozyon ve genişlemenin etkisini belirler. Daha büyük yapısal elementler, daha geniş alanlarda değişiklik yapar, bu da görüntüdeki daha büyük gürültüleri ve bozulmaları gidermeye yardımcı olur. Kapama işlemi, gürültü azaltma ve görüntü iyileştirme süreçlerinde genellikle kullanılır, Denklem (2.9).

Python Kodu Örneği: Aşağıdaki Python kodu, OpenCV kütüphanesi kullanarak bir görüntü üzerinde kapama işlemi yapar:

```
import cv2
import numpy as np
# Görüntüyü yükle
img = cv2.imread('path_to_image')
# Yapısal elementi tanımla
kernel = np.ones((5,5), np.uint8)
# Kapama işlemi uygula
closing = cv2.morphologyEx(img, cv2.MORPH_CLOSE, kernel)
# Sonucu göster
cv2.imshow('Closed Image', closing)
cv2.waitKey(0)
cv2.destroyAllWindows()
```

(Gonzalez ve Woods, 2018) ve (Soille, 2003) referansları, kapama işlemi ve diğer morfolojik teknikler hakkında derinlemesine bilgiler sunar ve bu yöntemlerin görüntü işleme alanındaki uygulamalarını detaylandırır.

2.9.2.6. BW Eşiklemesi

BW (Black White) eşiklemesi, görüntü işlemede sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Bu teknik, belirli bir eşik değeri kullanarak görüntüdeki pikselleri siyah veya beyaz olarak sınıflandırır, böylece gürültü azaltma, kenar tespiti ve diğer görüntü işleme uygulamalarında önemli bir ön işleme adımı oluşturur.

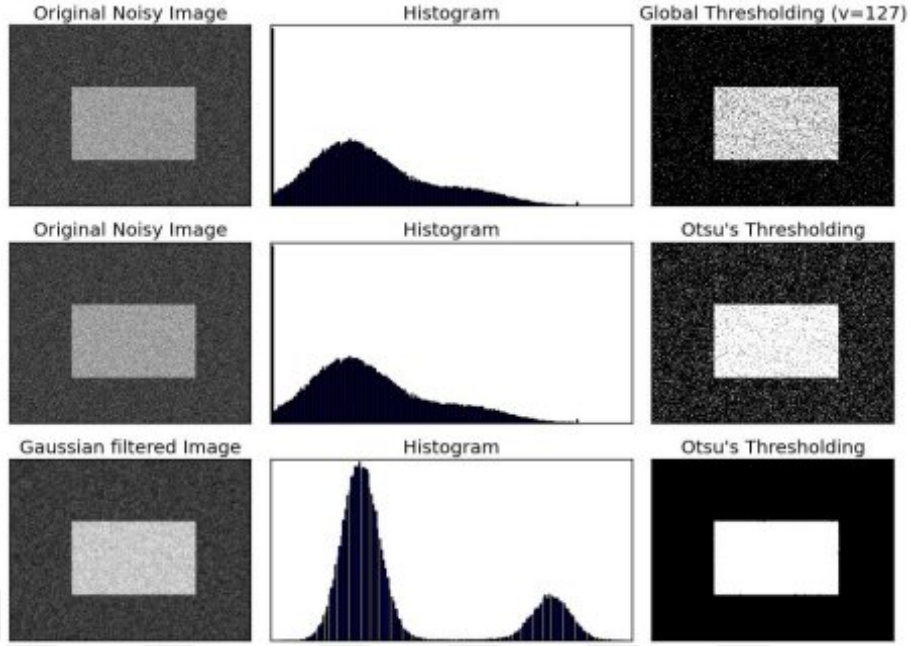
Eşikleme işleminde kullanılan eşik değeri, genellikle görüntünün özelliklerine bağlı olarak belirlenir. Basit eşikleme yöntemlerinde, sabit bir eşik değeri kullanılarak tüm pikseller sınıflandırılır. Ancak, bu yöntemler her zaman optimal sonuçlar vermez ve özellikle karmaşık görüntülerde yetersiz kalabilir. Bu noktada, otomatik eşikleme yöntemleri devreye girer. Bu yöntemler, görüntünün histogramını analiz ederek, en uygun eşik değerini belirler ve böylece daha etkili bir ikili sınıflama gerçekleştirir. Otsu'nun eşikleme yöntemi, bu tür otomatik eşikleme yöntemlerinden biridir ve genellikle gürültülü görüntülerde daha iyi sonuçlar verir.

Gürültü azaltma amacıyla, BW eşiklemesi uygulanmadan önce genellikle Gauss bulanıklaştırma işlemi tercih edilir. Gauss bulanıklaştırma, aşağıdaki Gauss fonksiyonu kullanılarak gerçekleştirilir, Denklem (2.5).

Otsu'nun eşikleme yöntemi (Otsu, 1979), optimal eşik değerini otomatik olarak belirler ve görüntünün histogramını kullanarak sınıflar arası varyansı maksimize eder. Bu işlem, özellikle gürültülü görüntülerde etkili olup, denklemi (Denklem 2.10) ile tanımlanır:

$$\sigma_B^2(T) = \frac{[\mu_T \omega_0(T) - \mu_0(T)]^2}{\omega_0(T)[1 - \omega_0(T)]} \quad (2.10)$$

Ayrıca, BW eşiklemesi sonrası elde edilen ikili görüntü, morfolojik işlemlerle daha da iyileştirilebilir. Bu işlemler arasında "açma" ve "kapama" gibi teknikler yer alır. Açma işlemi, küçük gürültüleri ve ince hataları giderirken, kapama işlemi, nesnelerin kenarlarını düzeltir ve boşlukları doldurur. Böylece, elde edilen görüntü daha temiz ve analiz için daha uygun hale gelir. Bu morfolojik işlemler, özellikle karmaşık ve gürültülü görüntülerde, önemli detayları koruyarak görüntü kalitesini artırır. (Şekil 2.8.) bu işlemi görsel olarak özetler.



Şekil 2.8. Otsu Eşikleme İşlemi

Python Kodu Örneği: Aşağıdaki Python kodu, OpenCV kütüphanesi kullanarak bir görüntü üzerinde Otsu eşiklemesi yapar:

```
import cv2
import numpy as np
# Görüntüyü yükle
img = cv2.imread('path_to_image', 0) # 0, grayscale modunda yükler
# Gauss bulanıklaştırma uygula
blurred = cv2.GaussianBlur(img, (5, 5), 0)
# Otsu eşiklemesi uygula
_, otsu = cv2.threshold(blurred,
    0, 255, cv2.THRESH_BINARY + cv2.THRESH_OTSU)
# Sonucu göster
cv2.imshow('Otsu Thresholding', otsu)
cv2.waitKey(0)
cv2.destroyAllWindows()
```

(Gonzalez ve Woods, 2018) ve (Soille, 2003) referansları, BW eşiklemesi, Otsu eşikleme

ve diğ er görüntü işleme teknikleri hakkında derinlemesine bilgiler sunar ve bu yöntemlerin görüntü işleme alanındaki uygulamalarını detaylandırır.

2.9.3. Nesne Tespiti ve  ekil Tanıma Algoritmaları

Robotik boyama, endüstriyel otomasyonda verimliliği ve hassasiyeti artırmak için büyük potansiyele sahip bir alandır. Bu potansiyelin tam olarak kullanılabilmesi için, robotların boyanacak nesneleri doğru bir şekilde algılaması ve boyanacak bölgeleri hassas bir şekilde belirlemesi gerekmektedir.  şte bu noktada, nesne tespiti ve  ekil tanıma algoritmaları devreye girer.

Nesne tespiti, bir görüntü veya sahnedeki belirli nesnelerin yerlerini ve boyutlarını belirleme işlemidir. Bu işlem, genellikle görüntü işleme ve makine öğrenimi tekniklerinin bir kombinasyonu ile gerçekleştirilir. Özellikle derin öğrenme tabanlı yöntemler, son yıllarda nesne tespiti alanında büyük başarılar elde etmiştir. Örneğin, R-CNN (Regions with CNN features) (Girshick ve diğ., 2014), Fast R-CNN (Girshick, 2015) ve Faster R-CNN (Ren ve diğ., 2015) gibi yöntemler, nesne tespiti için yaygın olarak kullanılan derin öğrenme modelleridir. Bu modeller, büyük miktarda veri üzerinde eğitilerek, farklı nesneleri yüksek doğrulukla tespit edebilirler.

Şekil tanıma ise, nesnelerin geometrik özelliklerini analiz ederek onları sınıflandırma ve tanımlama işlemidir. Bu işlem, genellikle nesnenin kenarlarını, k  elerini, eğrilerini ve diğ er geometrik özelliklerini analiz ederek gerçekleştirilir. Şekil tanıma algoritmaları, robotik boyama süreçlerinde, boyanacak nesnenin şekline ve geometrisine göre uygun boyama stratejilerinin belirlenmesinde kullanılır. Örneğin, bir araba kaportasının boyanması için farklı bir strateji izlenirken, bir kapı kolunun boyanması için farklı bir strateji gerekebilir.

Nesne tespiti ve  ekil tanıma algoritmaları, robotik boyama sistemlerinde bir arada kullanılarak, karmaşık geometrilere sahip nesnelerin bile hassas bir şekilde boyanmasını sağlar. Bu sayede, boyama işlemi daha hızlı, daha verimli ve daha az hata ile gerçekleştirilebilir.

2.9.4. VSpline Algoritmaları ve Kontur Optimizasyonu

Robotik boyama, endüstriyel otomasyonun önemli bir parçasıdır ve verimlilik ile doğruluk, bu süreçlerin başarısı için kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda, VSpline algoritmaları ve kontur optimizasyonu teknikleri, karmaşık yüzeylerin daha hassas ve verimli bir şekilde boyanmasını sağlayarak önemli bir rol oynar.

Kontur optimizasyonu, bir yüzeyi temsil eden nokta sayısını azaltmayı amaçlayan bir dizi yöntemdir, (Şekil 2.9.). Bu, özellikle yüksek çözünürlüklü taramalardan veya karmaşık CAD modellerinden elde edilen verilerle çalışırken önemlidir. Nokta sayısının azaltılması, hesaplama yükünü hafifletir ve robotik kolun hareketlerini daha hızlı ve verimli hale getirir. Aynı zamanda, gereksiz ayrıntıları ortadan kaldırarak daha pürüzsüz bir yüzey temsili elde edilmesine yardımcı olur.

Kontur optimizasyonu için kullanılan yaygın algoritmalar arasında şunlar bulunur:

- **Ramer-Douglas-Peucker (RDP) Algoritması:** Bu algoritma, bir eğriyi basitleştirmek için yinelenmeli bir yaklaşım kullanır. Belirli bir tolerans değeri ϵ içinde kalan noktaları korurken, diğerlerini ortadan kaldırır. Eğrinin başlangıç ve bitiş noktalarını birleştiren doğru parçası ile eğri arasındaki en uzak nokta bulunur. Bu mesafe ϵ 'dan büyükse, bu nokta eğriye eklenir ve işlem bu yeni nokta ile başlangıç veya bitiş noktası arasında kalan eğri parçaları için tekrarlanır. (Douglas ve Peucker, 1973)
- **Visvalingam-Whyatt Algoritması:** Bu algoritma, bir eğrinin önemli noktalarını belirlemek için üçgen alan hesaplamalarına dayanır. Her nokta için, kendisinden önceki ve sonraki nokta ile oluşturduğu üçgenin alanı hesaplanır. En küçük alana sahip üçgenler oluşturan noktalar, daha az önemli olarak kabul edilir ve ortadan kaldırılır. Bu işlem, istenen nokta sayısına ulaşıncaya kadar tekrarlanır. (Visvalingam ve Whyatt, 1993)

VSpline (Varyasyonel Spline), kontur verilerini daha pürüzsüz ve sürekli eğriler şeklinde ifade etmek için kullanılan bir yöntemdir. Bu, robotik kolun hareketlerini daha akıcı ve doğal hale getirir, böylece boyama işlemi daha estetik ve tutarlı olur. VSpline, kontrol noktaları aracılığıyla eğrinin şeklini ve davranışını kontrol etmeyi sağlar. Bu kontrol

noktaları, eğrinin belirli noktalardan geçmesini veya belirli bir eğriliğe sahip olmasını sağlayacak şekilde ayarlanabilir.

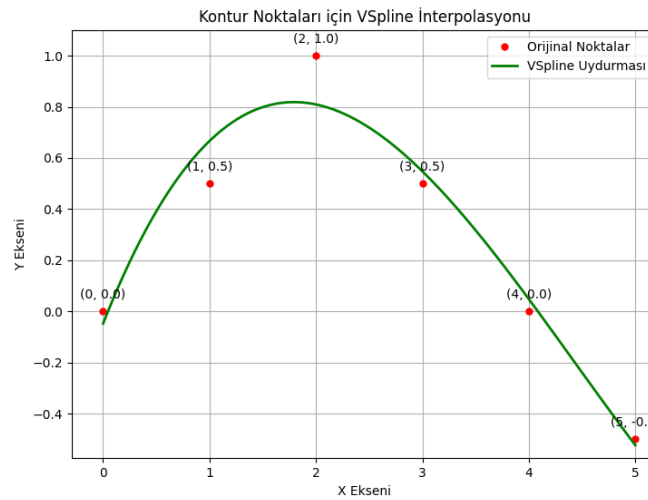
VSpline'in matematiksel temeli, minimum enerji prensibine dayanır. Bu prensip, eğrinin toplam eğrilik enerjisini minimize ederek en pürüzsüz ve doğal şekli bulmayı amaçlar. Matematiksel olarak, bir VSpline eğrisi aşağıdaki denklemle ifade edilebilir, Denklem (2.11):

$$S(t) = \sum_{i=1}^n N_{i,k}(t)P_i \quad (2.11)$$

Bu denklemde:

* $S(t)$: Spline fonksiyonu * t : Parametre değeri (0 ile 1 arasında) * n : Kontrol noktalarının sayısı * k : Spline derecesi (eğrinin karmaşıklığını belirler) * $N_{i,k}(t)$: i 'nci B-spline baz fonksiyonu * P_i : i 'nci kontrol noktası

B-spline baz fonksiyonları, eğrinin her bir parçasının şeklini belirlerken, kontrol noktaları eğrinin genel şeklini ve davranışını kontrol eder. VSpline, kontrol noktalarının konumlarını optimize ederek eğrinin enerjisini minimize eder ve böylece en pürüzsüz eğriyi elde eder. Bu optimizasyon, genellikle sayısal yöntemlerle (örneğin, Newton-Raphson yöntemi) gerçekleştirilir (Koc ve Whitaker, 2004).



Şekil 2.9. VSpline interpolasyonunun görsel temsili.

Aşağıdaki Python kodu örneği, bir dizi kontur noktası üzerinde VSpline interpolasyonu gerçekleştirmeyi göstermektedir. Bu kodun çıktısı (Şekil 2.9.)’de gösterilmiştir.

```
import numpy as np
from scipy.interpolate import UnivariateSpline
import matplotlib.pyplot as plt

# Kontur noktaları
x = np.array([0, 1, 2, 3, 4, 5])
y = np.array([0, 0.5, 1.0, 0.5, 0, -0.5])

# VSpline interpolasyonu
spline = UnivariateSpline(x, y, s=1)
xs = np.linspace(0, 5, 100)
ys = spline(xs)

# Çizim
plt.figure(figsize=(8, 6)) # Çizim boyutunu ayarlar
plt.plot(x, y, 'ro', ms=5, label='Orijinal Noktalar') # Noktaları çizer
plt.plot(xs, ys, 'g-', lw=2, label='VSpline Uydurması') # VSpline eğrisini çizer
# Nokta koordinatlarını çizime ekler
for i, txt in enumerate(y):
    plt.annotate(f'({x[i]}, {y[i]})', (x[i], y[i]),
        textcoords="offset points", xytext=(0,10), ha='center')
# Çizime başlık ve eksen etiketleri ekler
plt.title('Kontur Noktaları için VSpline İnterpolasyonu')
plt.xlabel('X Ekseni')
plt.ylabel('Y Ekseni')
plt.legend() # Açıklama kutusunu gösterir
plt.grid(True) # Izgara çizgilerini gösterir
plt.show()
```

2.9.5. Kenar Tespiti ve Hiyerarşi

Kenar tespiti, görüntü işlemede nesnelerin sınırlarını belirlemek için kullanılan önemli bir yöntemdir. Kontur tespiti ise, bir görüntüdeki şekillerin veya nesnelerin sınırlarını bulma işlemidir ve genellikle kenar tespiti algoritmaları kullanılarak gerçekleştirilir. Canny kenar dedektörü gibi algoritmalar, görüntüdeki yoğunluk değişimlerini tespit ederek keskin kenarları belirler ve bu kenarlar kontur olarak kullanılır (Canny, 1986).

Canny kenar dedektörü, görüntüdeki yoğunluk gradyanını hesaplayarak çalışır. Bu işlem, aşağıdaki gradyan formülü ile ifade edilir, Denklem (2.12):

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (2.12)$$

Burada, G_x ve G_y , sırasıyla görüntünün x ve y yönündeki yoğunluk gradyanlarını temsil eder. Canny algoritması, bu gradyanları hesapladıktan sonra, belirli bir eşik değerine göre kenarları tespit eder ve ince kenarlar oluşturur.

Görüntüdeki yoğunluk gradyanı, aşağıdaki gibi hesaplanır, Denklem (2.13):

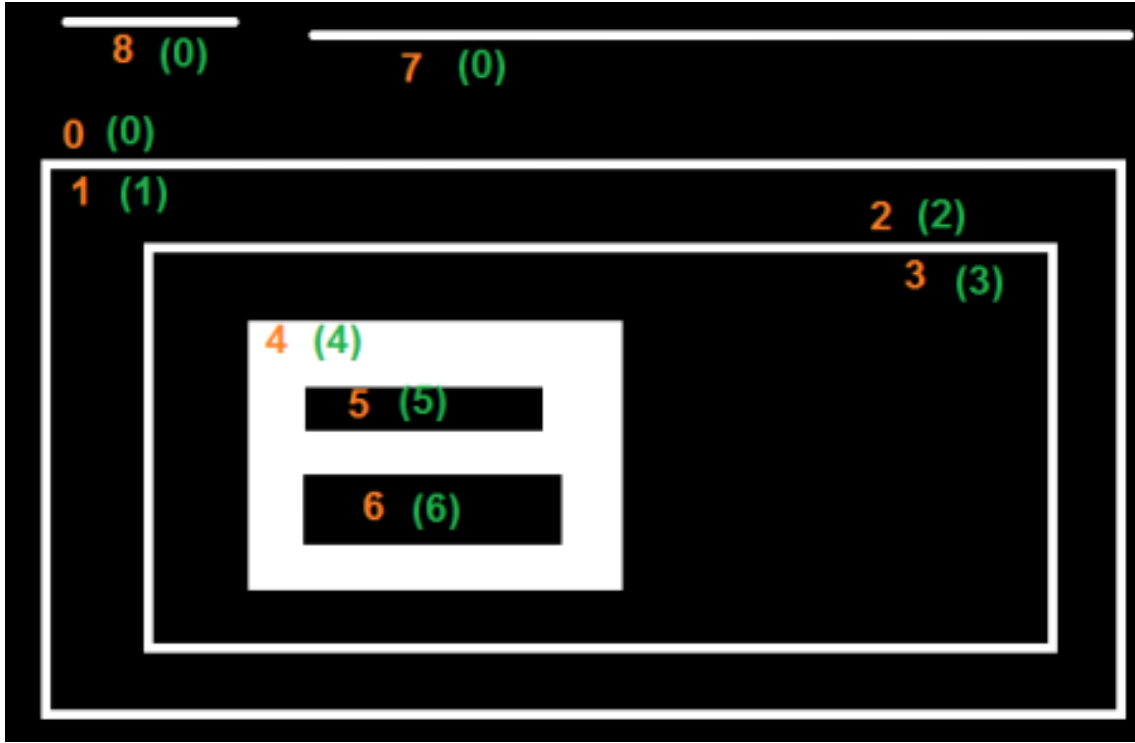
$$G_x = I * K_x, \quad G_y = I * K_y \quad (2.13)$$

Burada, I orijinal görüntüyü, K_x ve K_y ise sırasıyla x ve y yönlerindeki Sobel çekirdeklerini temsil eder. G_x ve G_y , bu çekirdeklerin görüntü üzerinde uygulanmasıyla elde edilen yoğunluk gradyanlarını ifade eder. Sobel çekirdekleri, kenarları tespit etmek için kullanılan tipik çekirdeklerdir ve aşağıdaki gibi tanımlanabilir, Denklem (2.14):

$$K_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad K_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Kontur tespitinde bir diğer önemli adım ise konturların hiyerarşisini belirlemektir. Kontur hiyerarşisi, bir konturun diğer konturlarla olan ilişkisini tanımlar. OpenCV gibi görüntü işleme kütüphaneleri, konturları bulurken aynı zamanda bu konturların hiyerarşik ilişkilerini de sağlar (Bradski ve Kaehler, 2008). Kontur hiyerarşisi, genellikle bir ağaç yapısı olarak ifade edilir ve her konturun ebeveyni veya çocukları olabilir.

OpenCV’de hiyerarşi temsili, her konturun hiyerarşik bilgisini dört değerden oluşan bir dizi olarak temsil eder: [Sonraki, Önceki, İlk Çocuk, Ebeveyn]. Bu dizi, konturların birbirleriyle olan ilişkilerini ve hiyerarşik düzeylerini tanımlar. ‘findContours’ fonksiyonu, konturları ve her konturun hiyerarşideki konumunu (ebeveyn veya çocuk) belirleyen bir hiyerarşi matrisi üretir.



Şekil 2.10. Kontur Hiyerarşisi

İç içe konturların tespiti, bu hiyerarşi matrisi kullanılarak yapılır. Her kontur için, ebeveyn konturun indeksi ve varsa çocuk konturların indeksleri bu matriste saklanır. Bu sayede, bir nesnenin içinde başka bir nesne varsa, içteki nesne çocuk kontur olarak, dıştaki nesne ise ebeveyn kontur olarak tanımlanır. Bu hiyerarşi, görüntüdeki nesnelerin yapısını ve ilişkilerini anlamak için önemlidir (Şekil 2.10.).

OpenCV’de kontur hiyerarşisi, her konturun hiyerarşik bilgisini dört değerden oluşan bir dizi olarak temsil eder: [Sonraki, Önceki, İlk Çocuk, Ebeveyn]. Bu dizi, konturların birbirleriyle olan ilişkilerini ve hiyerarşik düzeylerini tanımlar. Örneğin, bir konturun "Sonraki" değeri, aynı hiyerarşik seviyedeki sonraki konturu belirtir. Eğer bir konturun aynı seviyede bir sonraki konturu yoksa, bu değer -1 olarak belirlenir. "Önceki" değeri,

aynı hiyerarşik seviyedeki önceki konturu belirtir ve benzer şekilde, eğer önceki bir kontur yoksa, bu değer -1 olur. "İlk Çocuk" değeri, bir konturun ilk alt konturunu (eğer varsa) belirtirken, "Ebeveyn" değeri, bir konturun ebeveyn konturunun indeksini belirtir. Eğer bir konturun çocuğu veya ebeveyni yoksa, ilgili alanlar -1 olarak alınır.

Bu hiyerarşi temsili, görüntüdeki nesneler arasındaki ilişkileri anlamak ve analiz etmek için kullanılır. Örneğin, bir nesnenin içinde başka bir nesne varsa, içteki nesne çocuk kontur olarak, dıştaki nesne ise ebeveyn kontur olarak tanımlanır. Bu, görüntüdeki nesnelerin yapısını ve ilişkilerini anlamak için önemlidir.

2.9.6. Bezier Eğrileri

Bezier eğrileri, çok çeşitli alanlarda, özellikle robotik boyama, grafik tasarım ve CNC işlemleri gibi uygulamalarda kullanılan önemli bir matematiksel araçtır. Bu eğriler, karmaşık yüzeyler üzerinde düzgün ve kesintisiz yollar çizilmesini sağlayarak, hassas işlemlerin gerçekleştirilmesine olanak tanır.

Bezier eğrisi, parametrik bir eğri olarak tanımlanır ve genel olarak aşağıdaki formülle ifade edilir, Denklem (2.15):

$$B(t) = \sum_{i=0}^n b_{i,n}(t)P_i, \quad t \in [0, 1] \quad (2.15)$$

Burada P_i , kontrol noktaları ve $b_{i,n}(t)$, i . dereceden Bernstein polinomlarıdır. Bu polinomlar, eğrinin pürüzsüz ve sürekli olmasını sağlar.

Pratikte sıklıkla kullanılan kübik Bezier eğrileri, dört kontrol noktasıyla tanımlanır ve şu şekilde ifade edilir, Denklem (2.16):

$$B(t) = (1-t)^3P_0 + 3(1-t)^2tP_1 + 3(1-t)t^2P_2 + t^3P_3, \quad t \in [0, 1] \quad (2.16)$$

Bu formülasyon, eğrinin başlangıç ve bitiş noktaları arasında pürüzsüz bir geçiş sağlar.

Robotik boyama sistemlerinde, Bezier eğrileri, robot kollarının yüzey üzerindeki boyama işlemini düzgün ve verimli bir şekilde yapabilmesi için gerekli yörüngeleri belirlemede kullanılır. Eğriler, boyama kollarının yüzeyler üzerinde kesintisiz ve düzgün hareket etmesini sağlar, bu da boyamanın homojen ve kaliteli olmasını garantiler.

Aşağıda, Python kullanılarak kübik Bezier eğrisinin nasıl implemente edileceği gösterilmiştir. Bu uygulama, robotik sistemlerde yörünge planlaması için bir temel sağlar:

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Kontrol noktaları
P0 = np.array([0, 0])
P1 = np.array([1, 2])
P2 = np.array([3, 3])
P3 = np.array([4, 0])

# Bezier eğrisi fonksiyonu
def cubic_bezier(t, P0, P1, P2, P3):
    return (1-t)3 * P0 + 3*(1-t)2 * t * P1 + 3*(1-t) * t2 * P2 + t3 * P3

# t parametresi için değerler
t = np.linspace(0, 1, 100)

# Eğri noktalarını hesaplama
curve_points = np.array([cubic_bezier(ti, P0, P1, P2, P3) for ti in t])

# Eğriyi çizdirme
plt.plot(curve_points[:, 0], curve_points[:, 1], 'b-') # Eğri
plt.plot([P0[0], P1[0], P2[0], P3[0]], [P0[1], P1[1], P2[1], P3[1]], 'ro-') # Kontrol noktaları
plt.title("Kübik Bezier Eğrisi")
plt.xlabel("X Eksen")
plt.ylabel("Y Eksen")
plt.grid(True)
plt.show()
```

Bu kod örneği, kontrol noktaları ve kübik Bezier eğrisinin nasıl çizileceğini göstermektedir. Bu tür uygulamalar, robotik boyama sistemlerinde yörünge planlamasında ve tasarımda kullanılabilir. Bu, robotların karmaşık yüzeyler üzerinde

daha hassas ve düzenli boyama yapmalarını sağlar.

2.9.7. Noktaların Belirlenmesi

Ahşap parçaların yüzeylerinin doğru bir şekilde boyanması için gerekli noktaların belirlenmesi, görüntü işleme teknikleri ve belirli algoritmalar kullanılarak gerçekleştirilir. Bu bölümde, kenar tespiti nasıl yapıldığını ve Sobel operatörünü kullanarak kenarların nasıl belirlendiğini açıklayacağız.

Noktaların belirlenmesi süreci aşağıdaki adımlardan oluşur:

1. Görüntü Alımı: TOF (Time of Flight) sensörü ile ahşap parçanın yüzeyinin üç boyutlu görüntüsü alınır.
2. Görüntü Ön İşleme: Alınan görüntüye, gürültüyü azaltmak ve kenarları belirginleştirmek için Gaussian blur uygulanır.
3. Kenar Tespiti: Kenar tespiti için birden fazla yöntem bulunmaktadır. En yaygın kullanılan yöntemler arasında Sobel, Prewitt, Canny ve Laplacian operatörleri bulunmaktadır. Bu yöntemlerden en basit ve anlaşılır olanı Sobel operatörünü seçtik. Sobel operatörü, hem uygulanmasının kolay olması hem de yeterli doğrulukta sonuçlar vermesi nedeniyle tercih edilmiştir. Sobel operatörü, görüntüdeki yoğunluk değişimlerini tespit etmek için kullanılan bir diferansiyel operatördür. Sobel operatörü, bir görüntünün x ve y doğrultularındaki gradyanlarını hesaplar. Gradyanlar, kenarların yönü ve büyüklüğünü belirlemek için kullanılır.
4. Önemli Noktaların Belirlenmesi: Tespit edilen kenarlardan önemli noktalar seçilir ve bu noktaların koordinatları kaydedilir.

Matematiksel Temeller: Sobel operatörü, bir görüntünün x ve y doğrultularındaki gradyanlarını hesaplamak için aşağıdaki iki 3x3'lik kernel kullanılır:

Dikey Kenarları Tespit Eden Kernel:

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Bu kernel, dikey kenarları tespit etmek için kullanılır. Her bir pikselin solundaki ve sağındaki piksel değerlerini kullanarak yoğunluk farkını hesaplar.

Yatay Kenarları Tespit Eden Kernel:

$$G_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

Bu kernel, yatay kenarları tespit etmek için kullanılır. Her bir pikselin üstündeki ve altındaki piksel değerlerini kullanarak yoğunluk farkını hesaplar.

Verilen kernel matrisleri, görüntünün her pikseline uygulanarak x ve y doğrultularındaki gradyanlar (G_x ve G_y) hesaplanır. Bu gradyanlar, Denklem (2.12) kullanılarak birleştirilir:

Konvolüsyon İşlemi:

Konvolüsyon işlemi, bir görüntü üzerinde belirli bir kernelin kaydırılarak uygulanmasıdır. Bir görüntünün (I) bir kernel (K) ile konvolüsyonu Denklem (2.3) ile hesaplanır:

Burada, $S(i, j)$, konvolüsyon sonucu elde edilen görüntünün (S) (i, j) piksel değerini temsil eder. K , Sobel kernelini, I ise orijinal görüntüyü temsil eder.

Aşağıda, Sobel operatörünü kullanarak kenar tespiti yapan bir Python kodu örneği verilmiştir. Verilen kod çıktısı (Şekil 2.11.) üzerinde gösterilmektedir:

```
import cv2
import numpy as np
def capture_image():
    # Placeholder function for capturing image from TOF sensor
    image = cv2.imread('lena.jpg', cv2.IMREAD_GRAYSCALE)
    return image
def preprocess_image(image):
    # Apply Gaussian blur to the image
    preprocessed_image = cv2.GaussianBlur(image, (5, 5), 0)
```

```

    return preprocessed_image

def apply_sobel_operator(image, direction='x'):
    # Apply Sobel operator to detect edges
    if direction == 'x':
        sobel_kernel = np.array([[[-1, 0, 1], [-2, 0, 2], [-1, 0, 1]]])
    else:
        sobel_kernel = np.array([[[-1, -2, -1], [0, 0, 0], [1, 2, 1]]])
    grad = cv2.filter2D(image, cv2.CV_64F, sobel_kernel)
    return grad

def combine_gradients(grad_x, grad_y):
    # Combine the gradients to get the edge magnitude
    edges = np.sqrt(grad_x**2 + grad_y**2)
    edges = np.uint8(edges)
    return edges

def find_contours(edges):
    # Find contours from edges
    contours, _ = cv2.findContours(edges,
        cv2.RETR_TREE, cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)
    return contours

def extract_key_points_from_contours(contours):
    # Extract key points from contours
    key_points = []
    for contour in contours:
        for point in contour:
            key_points.append(point[0])
    return key_points

def save_key_points(key_points):
    # Save key points to a file or use them as needed
    with open('key_points.txt', 'w') as file:
        for point in key_points:
            file.write(f"{point[0]}, {point[1]}\n")

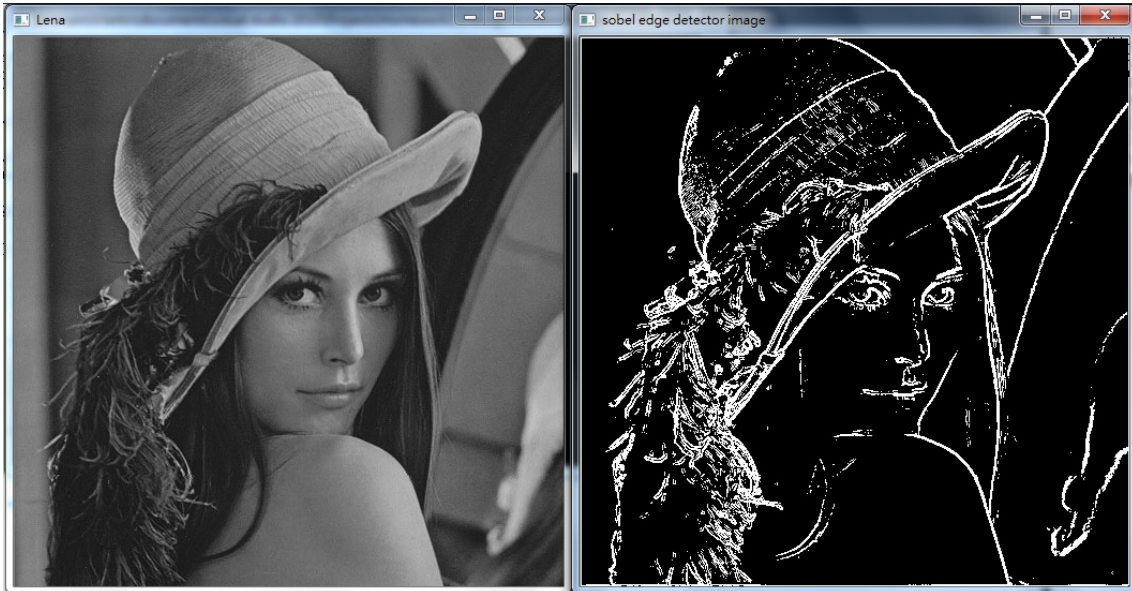
```

```

# Main processing flow
image = capture_image()
preprocessed_image = preprocess_image(image)
grad_x = apply_sobel_operator(preprocessed_image, direction='x')
grad_y = apply_sobel_operator(preprocessed_image, direction='y')
edges = combine_gradients(grad_x, grad_y)
contours = find_contours(edges)
key_points = extract_key_points_from_contours(contours)
save_key_points(key_points)

# Display original and edge-detected images side by side
edges_x = apply_sobel_operator(preprocessed_image, direction='x')
edges_y = apply_sobel_operator(preprocessed_image, direction='y')
edges = combine_gradients(edges_x, edges_y)
cv2.imshow('Original Image', image)
cv2.imshow('Edge-detected Image', edges)
cv2.waitKey(0)
cv2.destroyAllWindows()

```



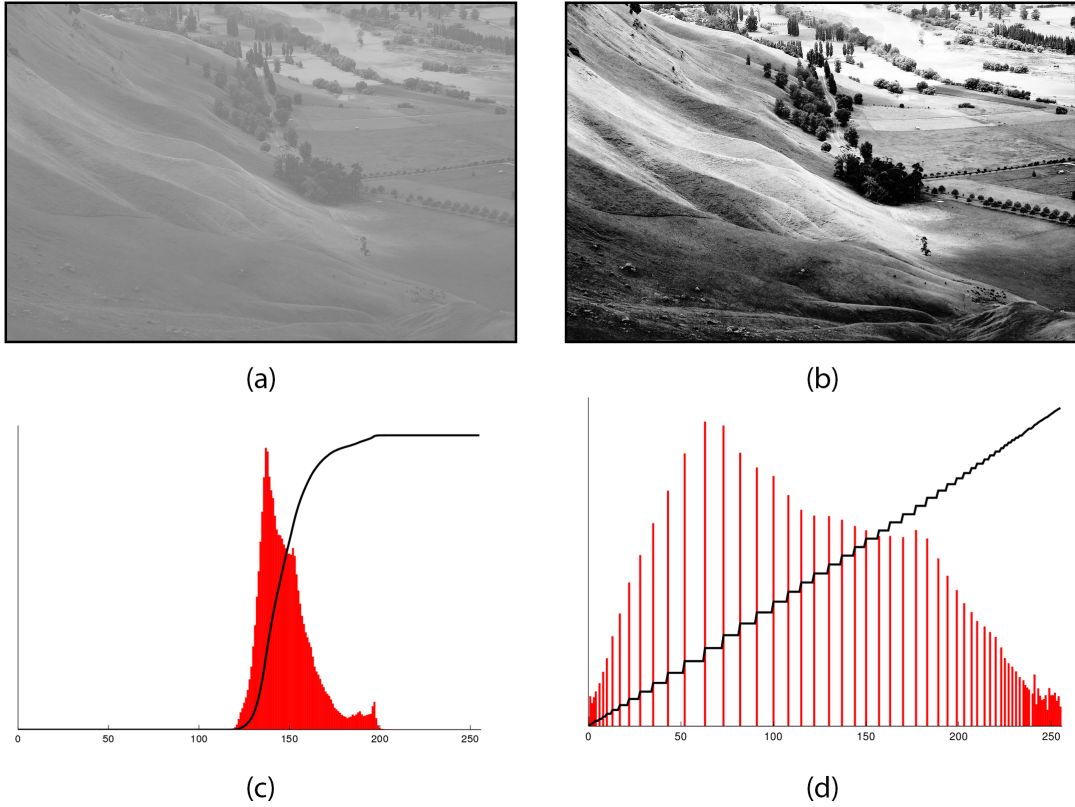
Şekil 2.11. Orijinal (sol) ve Sobel Operatörü Uygulanmış (sağ) Lena Görüntüsü

2.9.8. Şekil ve Obje Biçimi Tespiti

Konveyör bandındaki nesnelerin görüntüsü alındığında, her kontur için histogram eşitlemesi yapılır. Histogram eşitlemesi, görüntünün kontrastını artırarak nesnenin yapısını daha belirgin hale getirir (Şekil 2.12.). Bu eşitleme Denklem (2.17) ile açıklanmaktadır:

$$H'(i) = \frac{\sum_{j=0}^i H(j)}{MN} \times L_{max} \quad (2.17)$$

Burada $H(i)$ orijinal histogramı, $H'(i)$ eşitlenmiş histogramı, MN piksel sayısı ve L_{max} maksimum yoğunluk değerini ifade eder.



Şekil 2.12. Histogram Eşitlemesi

İç içe konturların tespiti, nesnelerin yapısını anlamada önemlidir. İki iç içe kontur, nesnenin ortasında bir delik olduğunu gösterir. Delik sayısı, iç içe kontur sayısına eşittir.

Kenar boyama işlemi için, Bezier eğrileri kullanılarak robotik boya tabancasının hareketi kontrol edilir. Bezier eğrisi, üç kontrol noktası P_0, P_1, P_2 ile şu şekilde tanımlanır, Denklem (2.18):

$$B(t) = (1-t)^2 P_0 + 2(1-t)t P_1 + t^2 P_2, \quad t \in [0, 1] \quad (2.18)$$

Bu formül, hem doğrusal hem de eğrisel yörüngeleri temsil etmek için kullanılır. Eğri hareketler, 10° 'den büyük sapmalar olduğunda uygulanır.

2.9.9. 3 Boyutlu Affine Dönüşüm

Nesnelerin boyama yörüngelerinin belirlenmesi, görüntü düzleminde doğru boyama yapılmasını sağlamak için hayati önem taşır. Bu çalışmada kullanılan robot yazılımı, milimetrik hassasiyetle çalışacak şekilde özenle tasarlanmıştır (Maquignaz, 2022). Piksel boyutlarından milimetre boyutlarına geçiş, robotun hareketlerinin kusursuz bir şekilde gerçekleştirilmesi için zorunludur. Özellikle, görüntüler genellikle sol üst noktayı başlangıç noktası olarak kabul ederken, robotlar tipik olarak merkez-alt noktalarını başlangıç noktası olarak tanır. Bu tür farklılıklar, dönüşüm, ölçeklendirme ve çevirme gibi dönüşümleri gerektirir (Sahu ve diğ., 2024).

Bu dönüşüm işlemleri, görüntü koordinat sistemini robot koordinat sistemine doğru bir şekilde entegre etmek için kritik öneme sahiptir. Robot yazılımının, bu dönüşümleri doğru bir şekilde gerçekleştirmesi, boyama işlemlerinde yüksek doğruluk ve tekrarlanabilirlik sağlar. Dönüşüm işlemleri, genellikle görüntü ve robot koordinat sistemleri arasındaki uyumsuzlukları gidermek için kullanılır ve bu, robotun verilen görevleri doğru bir şekilde yerine getirmesi için gereklidir.

Affine dönüşümü, genellikle gerekli 3 boyutlu dönüşümleri gerçekleştirmek için kullanılan yaygın olarak tanınan bir modeldir (Choi ve diğ., 2019). Yer değiştirme, boyut, dönüş ve şekil değişikliklerini kolaylaştırır (Şekil 2.13.). Temel dönüşümlerin bir serisi, karmaşık dönüşümler oluşturmak için birleştirilebilir ve bu kombinasyonlar, matris işlemleri cinsinden en iyi şekilde tanımlanır. Homojen koordinatlarda dönüşümler, matris çarpımları olarak ifade edilebilir (Grupp ve diğ., 2016). Affine dönüşüm

denklemleri genellikle matris formunda ifade edilir, bu da bilgisayar görüşü ve robotik uygulamalarında yaygındır.

Affine dönüşüm denklemleri aşağıdaki gibi ifade edilir, Denklem (2.19), Denklem (2.20), Denklem (2.21) ve Denklem (2.22):

Oryantasyon Matrisi:

X ekseninde etrafında rotasyon ($R_x(\alpha)$):

$$R_x(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix}$$

Y ekseninde etrafında rotasyon ($R_y(\beta)$):

$$R_y(\beta) = \begin{bmatrix} \cos(\beta) & 0 & \sin(\beta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\beta) & 0 & \cos(\beta) \end{bmatrix}$$

Z ekseninde etrafında rotasyon ($R_z(\gamma)$):

$$R_z(\gamma) = \begin{bmatrix} \cos(\gamma) & -\sin(\gamma) & 0 \\ \sin(\gamma) & \cos(\gamma) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R = R_z(\gamma)R_y(\beta)R_x(\alpha) \quad (2.19)$$

Ölçeklendirme Matrisi:

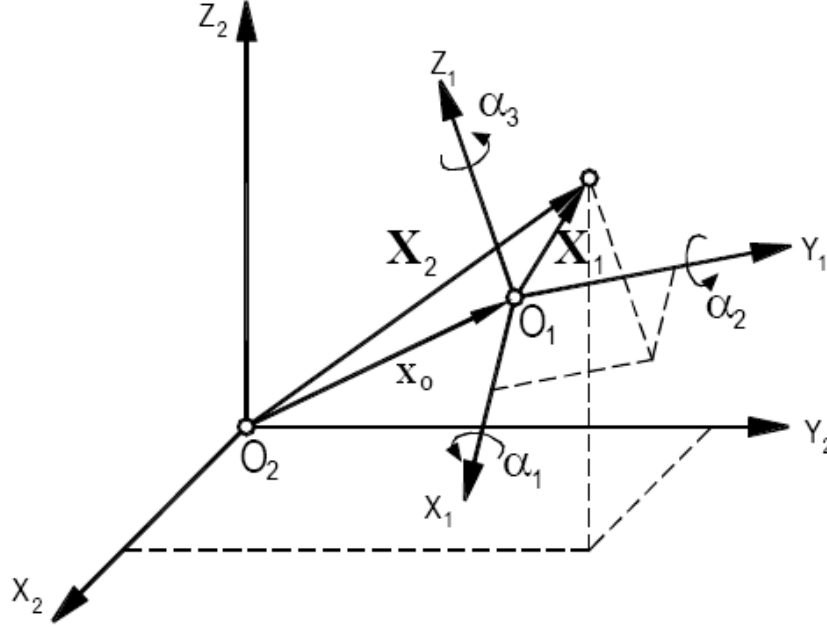
$$S = \begin{bmatrix} S_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & S_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Öteleme Matrisi:

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & t_x \\ 0 & 1 & 0 & t_y \\ 0 & 0 & 1 & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Affine Dönüşüm Matrisi:

$$H = R \times S \times T \quad (2.22)$$



Şekil 2.13. 3 Boyutlu Affine Dönüşüm Örneği

2.9.10. Robot Yazılımı

Robot simülasyon programları, erişilebilir alanı belirlemek için kullanılır. Simülasyon sırasında, robota bağlı konveyör, boyanacak parçalar ve içinde bulunduğu kabin gibi katı modeller, gerçek zamanlı karmaşık operasyonlar için programa dahil edildi. Bu çalışmalarda birden fazla marka ve modelde robotlar test edildi. Simülasyonlardan sonra, bir markanın "Robot Studio" yazılımı kullanılmaya başlandı. "Robot Studio" yazılımı üç tür hareket fonksiyonunu içerir: "MoveL", "MoveJ" ve "MoveC". MoveJ, eklem dönüşleri için kullanılır ve eklemleri sonraki hareket için hazırlar. MoveL, dönüş olmadan doğrusal hareketi kolaylaştırır. MoveC, tereddütsüz dairesel hareketi sağlar. Bu üç fonksiyonu kullanırken, "ConfL/on-off" seçeneği, hareketler sırasında boyama başlığının sabit mi yoksa hareketli mi kalacağını kontrol eder. Boya yörüngesi yazılımını geliştirirken ve ilgili hesaplamaları yaparken bu üç fonksiyonu dikkate almak şarttır; aksi takdirde, boyama işlemi başarılı olmayacaktır. Bu hususlar, bu çalışmada "Robot Studio"nun

"Rapid" bölümünde boyama robot yazılımı geliştirilirken göz önünde bulundurulmuştur.

Her bir hareket fonksiyonu, farklı uygulama senaryolarında belirli avantajlar sağlar. Örneğin, MoveJ fonksiyonu eklem hareketleri için optimize edildiğinden, robotun eklemlerini doğru bir şekilde hizalamak ve önceden tanımlı konumlara getirmek için kullanılır. MoveL fonksiyonu, özellikle uzun ve düz yollar boyunca hassas hareketler için gereklidir, bu da boyama işlemlerinde doğrusal hareketler sırasında yüksek hassasiyet sağlar. MoveC fonksiyonu ise, dairesel hareketlerin gerekli olduğu durumlarda kullanılarak, akıcı ve kesintisiz bir boyama süreci sağlar. Bu fonksiyonların doğru kombinasyonu, robotun boyama görevlerinde etkinliğini artırır ve hataları minimize eder.

Robotun hareketlerini planlamak için kullanılan kinematik denklem aşağıda verilmiştir, Denklem (2.23):

$$T = \begin{bmatrix} R & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

Burada T dönüşüm matrisi, R dönüş matrisi ve d çevirme vektörünü içerir. T matrisi, robotun bir pozisyondan diğerine nasıl hareket ettiğini belirler. Matrisin elemanları şu şekildedir:

- R (3x3 dönüş matrisi): Robotun döndürme hareketlerini temsil eder.
- d (3x1 öteleme vektörü): Robotun x, y ve z eksenlerindeki yer değiştirmelerini temsil eder.

Jacobian matrisi ise, robotun hız ve kuvvet ilişkilerini tanımlamak için kullanılır, Denklem (2.24):

$$J = \frac{d}{dt} T^{-1} \cdot T \quad (2.24)$$

Burada J , robotun konum ve hızları arasındaki ilişkiyi gösterir. T^{-1} , T matrisinin tersini ve $\frac{d}{dt}$ ise zaman türevini ifade eder.

Görüntü düzleminden gerçek düzleme geçişi sağlamak amacıyla, robot yazılımında kullanılan kinematik denklem ile Affine dönüşüm matrisi birleştirilmiştir. Bu birleşim,

Denklem (2.25) ile gösterilmektedir.

$${}^P_I T = H_P^W T^{-1} {}^W_I T \quad (2.25)$$

Bu denklemi eleman eleman açıklayacak olursak:

- ${}^P_I T$: Bu matris, endüstriyel (I) koordinat sisteminden robot çerçevesi (P) koordinat sistemine dönüşümü temsil eder. Bu dönüşüm, robotun çalışma alanındaki konumunu belirlemek için kullanılır.

- H : Affine dönüşüm matrisidir. Bu matris, nesne koordinatlarını robot çerçevesi için mekansal bölgeyle ilişkilendirir. Affine dönüşüm, ölçeklendirme, döndürme ve öteleme işlemlerini içerir ve şu şekilde ifade edilebilir:

$$H = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & b_1 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & b_2 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & b_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

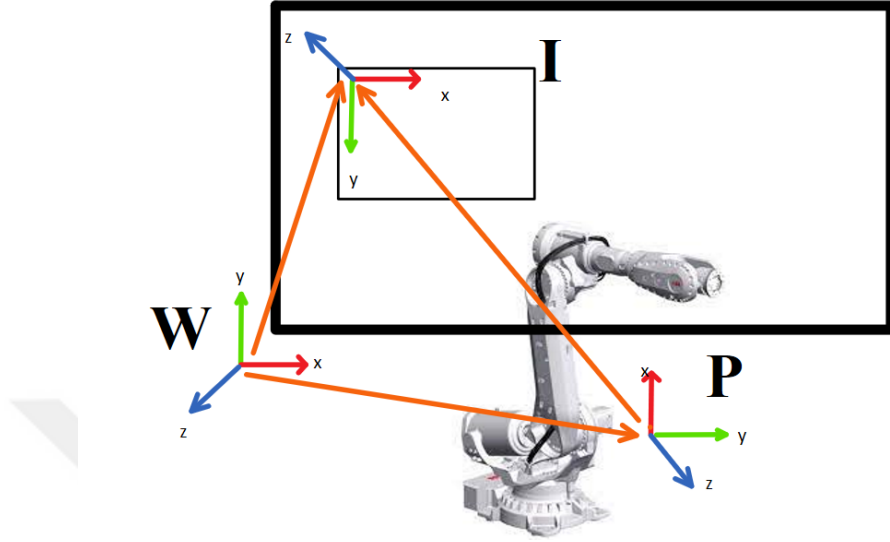
- ${}^W_P T$: Bu matris, çalışma alanı (W) koordinat sisteminden robot çerçevesi (P) koordinat sistemine dönüşümü temsil eder. Bu dönüşüm, robotun konumunu ve yönünü çalışma alanına göre belirler.

- ${}^W_P T^{-1}$: Bu matris, çalışma alanı (W) koordinat sisteminden robot çerçevesi (P) koordinat sistemine dönüşüm matrisinin tersidir. Ters matris, robotun konumunu ve yönünü çalışma alanından robot çerçevesine dönüştürmek için kullanılır.

- ${}^W_I T$: Bu matris, çalışma alanı (W) koordinat sisteminden endüstriyel (I) koordinat sistemine dönüşümü temsil eder. Bu dönüşüm, robotun çalışma alanındaki konumunu endüstriyel koordinat sistemine göre belirler.

Burada denklemin ilk kısmı, nesne koordinatlarını robot çerçevesi için mekansal bölgeyle ilişkilendiren Affine dönüşümünü temsil eder ve ikinci kısım, görüntü düzleminden gerçek düzleme geçişi kolaylaştıran robot yazılımındaki kinematik dönüşümü temsil eder. Bu birleşik dönüşüm denklemi aracılığıyla, robot görüntü verilerinden nesne koordinatlarını doğru bir şekilde yorumlayabilir ve gerektiği gibi nesneleri boyamak için

gerçek dünyada hassas hareketler gerçekleştirebilir. Çalışma alanı koordinat sistemi (Şekil 2.14.)’de gösterilmiştir.



Şekil 2.14. Konveyör Bandında Çalışma Alanı (Boyanabilir Alan)

Bu çalışmada kullanılan robot, Kartezyen uzayda çalışmaktadır, yani robotun hareketleri eklem uzayında değil, doğrudan x, y ve z koordinatlarıyla tanımlanmaktadır. Robotun boyama işlemi sırasında koordinatlar bu şekilde gönderilip işlenir. Bu yaklaşım, robotun konumlarını ve hareketlerini daha hassas ve tutarlı bir şekilde kontrol etmeye olanak tanır.

Robotun hareketleri ve boyama başlığının pozisyonu aşağıdaki şekilde tanımlanır:

- MoveL: Robotun, başlangıç ve bitiş noktaları arasında doğrusal bir yörünge izlemesini sağlar. Bu, robotun belirli bir doğrultuda kesintisiz ve pürüzsüz bir şekilde hareket etmesini gerektiren boyama işlemlerinde kullanılır.
- MoveJ: Robotun eklemlerini kullanarak serbest bir şekilde hareket etmesini sağlar. Bu, robotun hızlı ve esnek bir şekilde pozisyon almasını gerektiren hareketler için idealdir.
- MoveC: Robotun başlangıç, ara ve bitiş noktaları arasında dairesel bir yörünge izlemesini sağlar. Bu, robotun karmaşık yüzeyler üzerinde pürüzsüz ve dairesel hareketler yapmasını gerektiren boyama işlemlerinde kullanılır.

Bu hareket fonksiyonları, robotun kartezyen uzayda hareket etmesini sağlayarak, boyama

işlemlerinin daha hassas ve tutarlı bir şekilde gerçekleştirilmesine olanak tanır.

2.9.11. Nesne Tespiti ve Şekil Tanıma Algoritmaları

Robotik boyama süreçlerinde, nesne tespiti ve şekil tanıma teknolojileri son yıllarda önemli ilerlemeler kaydetmiştir. Bu teknolojiler, hassas ve verimli boyama işlemleri için kritik öneme sahiptir. Özellikle derin öğrenme tabanlı yöntemler, karmaşık geometrilere sahip nesnelerin doğru bir şekilde tanınmasını ve boyanmasını mümkün kılmaktadır.

Derin öğrenme, özellikle evrimsel sinir ağları (CNN), nesne tespiti alanında devrim yaratmıştır (Zhao ve diğ., 2019). Bu modeller, büyük ölçekli görüntü veri kümeleri üzerinde eğitilir ve çeşitli nesneleri yüksek doğrulukla tespit edebilirler. Robotik boyama uygulamalarında, CNN'ler farklı nesneleri (örneğin, araba parçaları, mobilya, elektronik cihazlar) tespit etmek ve konumlarını belirlemek için kullanılabilir (Redmon ve Farhadi, 2018). Bu sayede, robotlar, boyanacak nesnenin şekline ve konumuna göre hareketlerini hassas bir şekilde ayarlayabilirler.

Nesne tespit edildikten sonra, şekil tanıma algoritmaları devreye girer. Bu algoritmalar, nesnenin geometrisini analiz eder ve bir 3B model oluşturur (Zhang ve diğ., 2017). Bu model, robotik kolun boyama işlemi sırasında nesnenin yüzeyini takip etmesine ve doğru noktalara boya uygulamasına olanak tanır. Şekil tanıma, aynı zamanda, farklı nesnelerin sınıflandırılmasında ve boyanacak yüzeylerin belirlenmesinde de kullanılır. Örneğin, bir araba kapısının düz yüzeyleri farklı bir şekilde boyanırken, kapı kolları gibi daha karmaşık bölgeler farklı bir yaklaşım gerektirebilir.

Şekil tanıma ve nesne tespiti algoritmaları, robotik boyama süreçlerinin esnekliğini ve uyarlanabilirliğini artırır. Bu sayede, robotlar farklı tipteki nesneleri ve yüzeyleri doğru bir şekilde boyayabilir, hata oranını azaltabilir ve verimliliği artırabilir. Bu algoritmaların Python gibi programlama dilleri kullanılarak nasıl uygulanabileceğine dair bir örnek aşağıda verilmiştir.

% Örnek bir görüntü işleme kodu

```
import cv2
```

```
import numpy as np
# Görüntüyü yükle
image = cv2.imread('path/to/your/image.jpg')
# Griye çevir
gray_image = cv2.cvtColor(image, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
# Gaussian Blur uygula
blurred_image = cv2.GaussianBlur(gray_image, (7, 7), 0)
# Kenarları tespit et
edges = cv2.Canny(blurred_image, 50, 150)
# Görüntüyü göster
cv2.imshow('Edges', edges)
cv2.waitKey(0)
cv2.destroyAllWindows()
```

Endüstriyel otomasyonda, nesne tespiti ve şekil tanıma, üretim hattının verimliliğini artırmak ve kalite kontrol süreçlerini otomatize etmek için kritik öneme sahiptir. Bu teknolojiler, robotların boyama işlemlerini daha az hata ile ve daha yüksek tutarlılıkla gerçekleştirmesini sağlar, böylece israfı azaltır ve üretim maliyetlerini düşürür..

Sonuç olarak, nesne tespiti ve şekil tanıma teknolojileri, robotik boyama süreçlerini dönüştürmekte ve endüstriyel uygulamalar için yeni kapılar açmaktadır. Bu alandaki devam eden araştırmalar ve teknolojik gelişmeler, gelecekteki üretim süreçlerinin daha da otomatize ve verimli hale gelmesine katkıda bulunacaktır.

2.9.12. Kenar (Masif veya Cumba) Boyama

Robotik boyama süreçlerinde, kenar boyama işlemi, boyanacak yüzeylerin düzgün ve keskin hatlarla kaplanmasını sağlamak için hayati bir öneme sahiptir. Görüntü işleme teknikleri kullanılarak, boyanacak parçaların kenarları tespit edilir ve bu kenarlar boyunca robotik boya tabancasının doğru yörüngede hareket etmesi sağlanır. Bu süreçte, geometrik hesaplamalar ve görüntü işleme algoritmalarından elde edilen veriler temel alınarak, robotun hareket yörüngesi belirlenir.

Kenar boyama işlemi sırasında, robotun takip etmesi gereken yörüngeyi belirlemek için belirli noktalar arasındaki açıları hesaplamak önemlidir. Verilen üç nokta $P_1 = (x_1, y_1)$, $P_2 = (x_2, y_2)$ ve $P_3 = (x_3, y_3)$ için, bu noktalar arasındaki açı θ şu şekilde hesaplanır:

Öncelikle, üçgenin kenarlarının uzunlukları, Denklem (2.26), Denklem (2.27) ve Denklem (2.28) denklemleriyle hesaplanır:

$$a = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (2.26)$$

$$b = \sqrt{(x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2} \quad (2.27)$$

$$c = \sqrt{(x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_1)^2} \quad (2.28)$$

Ardından, Kosinüs Teoremi kullanılarak P_2 noktasındaki açı θ hesaplanır, Denklem (2.29):

$$\theta = \arccos\left(\frac{a^2 + b^2 - c^2}{2ab}\right) \quad (2.29)$$

Bu formül, a ve b uzunluklarının sıfır olmadığı durumlar için geçerlidir. Eğer $a \times b = 0$ ise, açı sıfır olarak kabul edilir. Bu açı hesaplama yöntemi, robotun hareket yolu ve boyama açılarını belirlerken kullanılır, böylece robotun boyama işlemi sırasında daha hassas ve etkili hareket etmesi sağlanır. Bu teknik, özellikle keskin dönüşlerin olduğu dar köşelerde boya birikmesini önlemek için önemlidir. Bu durumlarda, robotun hareket hızı bu açıya göre otomatik olarak ayarlanır ve dönüşlerde hız azaltılarak boya birikmesi engellenir.

Robotun hareket hızı, dönüş açısına göre otomatik olarak ayarlanır. Yüksek dereceli dönüşlerde hız artırılarak boya birikmesi engellenir. Bu durumu ifade eden matematiksel model Denklem (2.30) ile gösterilmektedir:

$$v(\theta) = v_{\max} \cdot f(\theta) \quad (2.30)$$

Burada, açıya bağlı olarak hesaplanan hız $v(\theta)$ olarak ifade edilir ve birimi metre/saniye (m/s) cinsindendir. Robotun maksimum hızı $v_{\max}$ olarak adlandırılır ve yine metre/saniye (m/s) birimiyle ölçülür. Hesaplanan dönüş açısı θ sembolüyle gösterilir ve derece cinsindendir. Açıya bağlı hız faktörü ise $f(\theta)$ ile gösterilir.

Açılara göre hızın nasıl değişeceğini belirlemek için aşağıdaki lineer model Denklem (2.31) ile tanımlanmıştır:

$$f(\theta) = \begin{cases} 1 & \text{eğer } \theta < \theta_{\min} \\ 1 + \frac{\theta - \theta_{\min}}{\theta_{\max} - \theta_{\min}} & \text{eğer } \theta_{\min} \leq \theta \leq \theta_{\max} \\ 2 & \text{eğer } \theta > \theta_{\max} \end{cases} \quad (2.31)$$

Bu modelde:

- $\theta_{\min}$: Hız artışının başladığı minimum açı (örneğin, 20°),
- $\theta_{\max}$: Hızın en yüksek olduğu maksimum açı (örneğin, 180°).

Sonuç olarak, robotun dönüş açısına göre hızı Denklem 2.30 ve Denklem 2.31 ile belirlenir. Yüksek dereceli dönüşlerde hız artırılarak boya birikmesi engellenir. Bu sayede robot, keskin dönüşlerde boyama işlemi sırasında daha verimli çalışır.

2.9.13. Yüzey Boyama

Yüzey boyama işlemi sırasında, yüzeye düşen boya miktarı, birçok faktöre bağlı olarak hesaplanır. Bu faktörler ve bunların matematiksel ifadeleri, yüzey boyama sürecinin verimliliğini ve kalitesini doğrudan etkiler. Şimdi, bu denklemleri ve ilgili parametreleri detaylıca ele alalım.

Yüzey alanı S , boyanacak yüzeyin toplam alanını ifade eder ve birimi metrekare (m^2) cinsindendir. Boyama yüksekliği h , boya uygulaması sırasında yüzeye olan mesafeyi belirtir ve metre (m) cinsinden ölçülür. Step boyu w , robotun her hareketinde boyadığı mesafeyi temsil eder ve birimi metre (m) cinsindendir. Nozuldaki boya debisi Q , nozülün birim zamanda püskürttüğü boya miktarını ifade eder ve birimi metreküp/saniye (m^3/s) cinsindendir. Boya basıncı P , boyayı yüzeye uygulayan basıncı belirtir ve Pascal (Pa) cinsinden ölçülür. Robotun hızı v , yüzey üzerinde hareket ettiği hızdır ve birimi metre/saniye (m/s) cinsindendir. Boya viskozitesi μ , boyanın akışkanlık direncini temsil eder ve birimi Pascal-saniye (Pa·s) cinsindendir; bu değer sıcaklıkla değişir. Boya uygulama sıcaklığı T , boya uygulaması sırasında ortamın sıcaklığını ifade eder ve santigrat derece ($^\circ C$) cinsindendir.

Boya debisi Q , basınç P , viskozite μ ve sıcaklık T ile ilişkilidir. Bu ilişki Hagen-Poiseuille denklemine benzer bir formülle ifade edilebilir Denklem (2.32):

$$Q = \frac{k \cdot P}{\mu(T)} \quad (2.32)$$

Burada, k sabiti nozül geometrisi ile ilişkilidir. Bu denklem, basınç ve viskozitenin boya debisi üzerindeki etkisini gösterir.

Yüzeye uygulanan toplam boya miktarı M , yüzey alanı S , step boyu w , boyama yüksekliği h , robot hızı v ve debi Q ile şu şekilde hesaplanır, Denklem (2.33):

$$M = \frac{Q \cdot S}{v \cdot w \cdot h} \quad (2.33)$$

Bu formül, yüzeye uygulanan boya miktarını hesaplar ve her bir parametrenin boya miktarına olan etkisini gösterir. Örneğin, robotun hızı arttıkça, yüzeye düşen boya miktarı azalır.

Boya viskozitesi μ , sıcaklık T ile değişir ve bu değişim aşağıdaki denklemle ifade edilir, (Denklem 2.34):

$$\mu(T) = \mu_0 \cdot e^{-\alpha(T-T_0)} \quad (2.34)$$

Burada: - μ_0 : Başlangıç viskozitesi (Pa·s), - T_0 : Referans sıcaklık (°C), - α : Viskozitenin sıcaklıkla değişim katsayısıdır.

Denklem (2.34), sıcaklığın artmasıyla viskozitenin nasıl azaldığını gösterir; bu da boya debisinin artmasına neden olur.

Yukarıdaki formüllerde, yüzey boyama işlemi sırasında kullanılan parametreler ve bu parametrelerin birbirleriyle olan ilişkisi açıklanmıştır. Bu formüllere yapılan atıflar şu şekildedir:

- Boya debisinin hesaplandığı formül için Denklem (2.32)'ye, - Yüzeye düşen toplam boya miktarının hesaplandığı formül için Denklem (2.33)'ye, - Viskozitenin sıcaklıkla

değişimini gösteren formül için Denklem (2.34)'ye atıfta bulunulmuştur.

Bu denklemler, robotik boyama sürecinin verimli ve homojen olmasını sağlamak için temel matematiksel bağıntıları sunmaktadır.

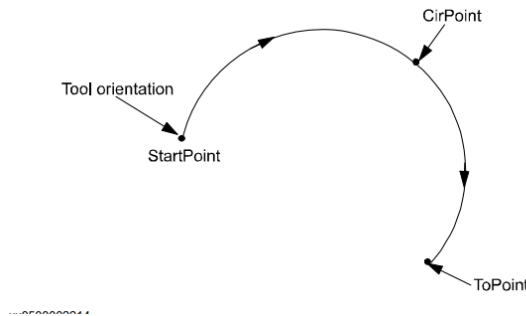
2.10. Hareket Kontrolü ve Hassas Manipülasyon

Hareket kontrolü ve hassas manipülasyon, endüstriyel boyama süreçlerinin başarısında kritik bir role sahiptir. Bu bölümde, endüstriyel robotların ve motorların hareket kontrolünün nasıl gerçekleştirildiği, robot komutlarının ve kontrolünün detayları, tarama ve boyama konveyörlerinin nasıl senkronize edildiği ve püskürtme işlemi sırasında robotun istenen konum ve hızda hareket etmesinin önemi ele alınacaktır.

2.10.1. Robot Komutları ve Kontrolü

Robotların hareketleri, yazılım aracılığıyla verilen komutlarla kontrol edilir. Bu komutlar, robotun boyama işlemi sırasında izlemesi gereken yolu ve hızı tanımlar. Robot programlama dilleri ve kontrol algoritmaları, robotun doğru pozisyonlara hassas bir şekilde hareket etmesini sağlar. ABB'nin "Robot Studio" programında üç çeşit hareket yöntemi bulunmaktadır: "MoveL", "MoveJ" ve "MoveC".

MoveC Komutu: "MoveC" komutu, üç nokta arasında bir eğri çizebilir. Bu, sonsuz yarıçaplı bir eğri olarak düşünüldüğünde, doğrusal bir çizgi olarak da temsil edilebilir (Şekil 2.15.). Eğim ε kadar küçük olduğunda, gözle veya yazılımla algılanamaz. Bu özellik, "MoveC" komutunun esnekliğini artırır ve robotun çeşitli yüzeylerde daha karmaşık desenler çizmesine olanak tanır.



Şekil 2.15. "MoveC" Komutunun Örneği

"MoveC" komutunun kullanımıyla ilgili önemli bilgiler şunlardır:

- Başlangıç ve bitiş noktaları arasındaki minimum mesafe 0.1 mm olmalıdır.
- Daire noktası ve bitiş noktası arasındaki minimum açı 1 derece olmalıdır.
- Noktaların programlanan hassasiyetine kıyasla, hatalar sınırlara yakınken daha büyük olabilir.

MoveJ Komutu: Konveyör bandında taranmış birden fazla parça varsa, boyama işlemi dışındaki hareketler "MoveJ" komutuyla gerçekleştirilir. "MoveJ", robotun eklemlerini rahatlatarak ve verilen hıza uygun bir şekilde serbestçe hareket etmesini sağlar.

- Örnek 1: MoveJ p1, vmax, z30, tool2; - Araç merkezi noktası (TCP), tool2 ile p1 konumuna, vmax hızı ve z30 bölge verisi ile doğrusal olmayan bir yoldan taşınır.
- Örnek 2: MoveJ *, vmax \T:=5, fine, grip3; - Araç, grip3 ile doğrusal olmayan bir yoldan talimattaki durdurma noktasına (bir * ile işaretlenmiştir) taşınır. Tüm hareket 5 saniye sürer.

Bu yöntemler, robotun boyama sürecine hazırlanmasını ve boyama işleminin verimli bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlar.

2.10.2. Tarama ve Boyama Konveyörlerinin Senkronizasyonu

Tarama ve boyama işlemleri sırasında konveyör sistemlerinin doğru şekilde senkronize edilmesi, ürünlerin doğru hızda ve doğru pozisyonda boyanmasını sağlar. Bu senkronizasyon, robotların ve konveyörlerin aynı hızda ve uyum içinde çalışmasını gerektirir.

Tarama konveyöründe mil yarıçapı 55 mm ve redüktör oranı 38 iken, boyama konveyöründe mil çapı 80 mm ve redüktör oranı 100'dür. Her iki konveyör motoru da maksimum 3000 rpm (devir/dakika) hızında dönebilmektedir.

Senkronizasyon, hesaplanan dişli oranları kullanılarak yapılır ve konveyörler maksimum 25 metre/dakika hızında çalıştırılmaktadır. Konveyör hızlarının senkronizasyonu için kullanılan temel matematik formülleri aşağıda verilmiştir, Denklem (2.36) ve Denklem (2.35):

Tarama Konveyörü Hızı:

$$V_{tarama} = \frac{\pi \cdot D_{tarama} \cdot N_{motor}}{60 \cdot R_{tarama}} \quad (2.35)$$

Boyama Konveyörü Hızı:

$$V_{boyama} = \frac{\pi \cdot D_{boyama} \cdot N_{motor}}{60 \cdot R_{boyama}} \quad (2.36)$$

Burada, V konveyör hızı (metre/dakika), D mil çapı (mm), N_{motor} motor hızı (rpm), ve R redüktör oranıdır. D_{tarama} ve R_{tarama} , tarama konveyörü için mil çapı ve redüktör oranını, D_{boyama} ve R_{boyama} , boyama konveyörü için mil çapı ve redüktör oranını temsil eder.

Bu denklemler, her iki konveyör sisteminin hızlarının nasıl hesaplandığını ve senkronize edildiğini gösterir.

2.10.3. Boyama İşleminde Robot Hızının Önemi

Püskürtme işlemi sırasında robotun doğru konumda ve hızda hareket etmesi, boyama kalitesi için hayati öneme sahiptir. Bu, boyanın homojen şekilde uygulanmasını ve yüzeyin düzgün boyanmasını sağlar.

- İstenen konumda hareket, boyanın doğru alanlara uygulanmasını sağlar.
- İstenen hızda hareket, boyanın ne çok kalın ne de çok ince bir tabaka halinde sürülmesini garanti eder.

Bu bölüm, hareket kontrolü ve hassas manipülasyonun endüstriyel boyama süreçlerindeki önemini ve uygulamalarını detaylandırmaktadır.

2.10.4. Kontrol Sistemi ve Veri İletişimi Entegrasyonu

Projede, kontrol sistemi ve veri iletişimi entegrasyonu, PLC ve endüstriyel bilgisayar arasındaki iletişimde önemli bir rol oynamaktadır. Bu entegrasyon, EtherCAT protokolü kullanılarak sağlanmaktadır, böylece yüksek hızda ve düşük gecikmeli bir haberleşme ortamı kurulmaktadır.

Robot yazılımı, kendi kontrol panosundaki bir bilgisayarda çalışırken, endüstriyel

bilgisayarda çalışan bir işletim sistemi, görüntü işleme ve robot yörüngesini hesaplayan bir yazılımı barındırmaktadır. Bu yazılım, robotla soket haberleşme yöntemi aracılığıyla, belirli bir IP adresi üzerinden iletişim kurmaktadır.

Yazılımda gerçekleştirilen xyz koordinatlarındaki dönme ve öteleme hesapları, hız ve açı bilgileri, string formatında robot yazılımına iletilir. Gönderilen verinin son harfi 'J' ise, robot ilgili konuma "MoveJ" komutuyla hareket eder. Eğer verinin son harfi 'C' ise, ikinci nokta verisi de beklenerek, başlangıç noktasıyla birlikte toplam üç nokta sağlanır ve "MoveC" hareketi gerçekleştirilir.

Bu entegrasyon sayesinde, robot içerisinde, yörünge topolojisine uygun şekilde cevap verebilecek bir yazılım geliştirilmiştir. Bu yaklaşım, robotun yüksek hassasiyet ve esneklikle çalışmasını, ayrıca sistem genelinde daha verimli veri akışını ve işlem koordinasyonunu sağlamaktadır.

2.10.5. Boyama Sisteminin IPC ve PLC ile Entegre Edilmesi

Projede otomatik boyama sisteminin endüstriyel bilgisayar ve PLC ile entegrasyonu, sistem verimliliği ve otomasyonu için kritik bir öneme sahiptir. Bu entegrasyon, hem donanım hem de yazılım düzeyinde detaylı bir yaklaşımı içerir.

Python ile PLC'nin kontrol edilmesi, PyAds kütüphanesinin kullanımı sayesinde mümkün hale gelmiştir. Bu kütüphane, Python dili üzerinden PLC'ye bağlantı kurarak, veri okuma ve yazma işlemlerini kolaylaştırır. Geliştirilen yazılım, EXE formatında derlendikten sonra, ilgili endüstriyel bilgisayara flash bellek aracılığıyla aktarılır. Yazılım, gerekli kurulum yapıldıktan sonra, yapılandırma dosyasında yapılan ayarlarla otomatik olarak çalışacak şekilde konfigüre edilir. Bu, sistem başlatıldığında yazılımın otomatik olarak çalışmasını ve böylece kullanıcı müdahalesine gerek kalmadan sistem operasyonunun devam etmesini sağlar.

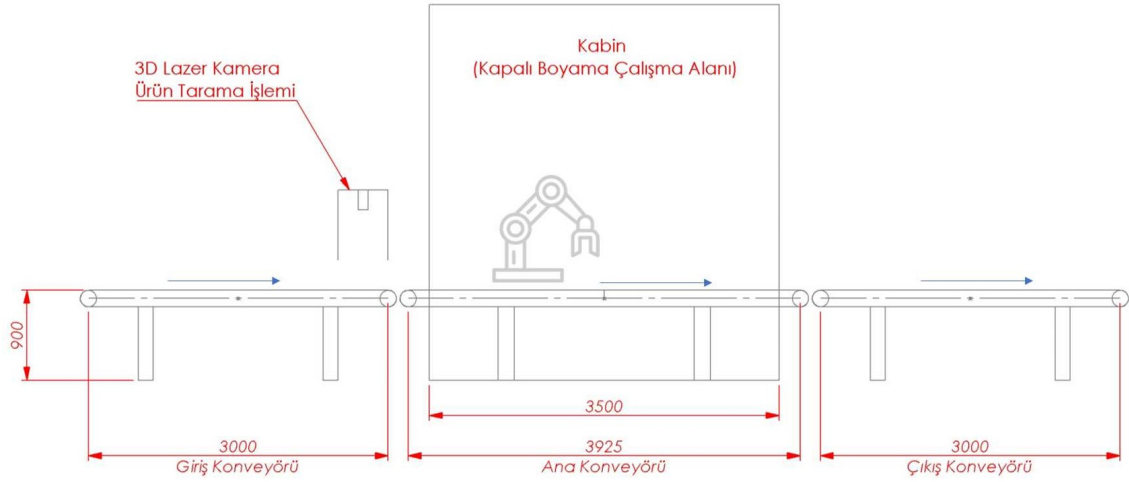
Sistemde, robotla haberleşmek için kullanılacak IP adresi belirlenir ve yazılım, bu IP üzerinden robotla iletişimi yönetir. Tüm cihazların bağlantısı, RJ45 konnektörleri aracılığıyla bir switch üzerinden sağlanır. Ağ yapılandırması, alt ağ maskeleri ve ağ geçitleri, sistemin verimli ve sorunsuz bir şekilde çalışması için özenle ayarlanmıştır.

Bu entegrasyon, otomatik boyama sisteminin, veri akışının ve işlem koordinasyonunun sürekli ve hatasız bir şekilde yürütülmesini sağlar, böylece sistem genelinde operasyonel verimlilik ve güvenilirlik artar.



3. MALZEME VE YÖNTEM

Bu bölümde, araştırmada kullanılan malzemeler, yöntemler ve geliştirilen sistem hakkında ayrıntılı bilgiler sunulmaktadır. Sistem, işleme süreçlerinin verimliliğini ve doğruluğunu artırmak amacıyla tasarlanmıştır.



Şekil 3.1. Genel Sistem Görünümü

Geliştirilen sistem, üç ana bölümden oluşmaktadır (Şekil 3.1.). Bunlar sırasıyla giriş, ana ve çıkış konveyörleridir. Her bir bölüm, malzemelerin sisteme girişi, işlenmesi ve sonrasında sistemden çıkışı süreçlerini yönetmek için özel olarak geliştirilmiştir.

3.1. Sistem Akış Diyagramı

Bu bölümde, çalışmanın genel akışını ve kullanılan yöntemleri açıklayan bir sistem akış diyagramı sunulmaktadır. Bu diyagram, sürecin adımlarını ve bileşenlerini görsel olarak özetlemektedir (Şekil 3.2.).

3.1.1. Aşama 1: Boyama Ayarları

Sistemde çeşitli boyama ayarlarının yapılabileceği bir arayüz bulunmaktadır. Bu arayüzde:

- Yüzey boyama için adım aralığı ve yükseklik ayarları,
- Kenar boyama için açı ve yükseklik ayarları,
- Tarama hızı ayarı,

- Pompa sistemi ve robot tabancası temizliği için buton,
- Sistem yeniden başlatma butonu,
- Acil durum butonu yer almaktadır.

3.1.2. Aşama 2: Taramanın Başlatılması

Start butonuna basıldığında tarama işlemi başlatılır ve tüm konveyörler hareket eder. Bu aşamada:

- Giriş konveyöründe yer alan TOF kamera, parçaları tarar.
- Parçaları taramak için pals tetikleyici kullanılır.
- Giriş konveyörüne bağlı enkoder ile yükselene kenarda line görüntü alınır.
- Alınan line görüntüleri peş peşe eklenerek bir tarama görüntüsü oluşturulur.

3.1.3. Aşama 3: Görüntü İşleme

Tarama görüntüleri alındıktan sonra, bu görüntüler üzerinde çeşitli işlemler gerçekleştirilir:

- Gauss filtresi ve morfolojik işlemlerle görüntüler filtrelenir.
- Filtrelenmiş görüntülerden konturlar belirlenir.
- Belirlenen konturlar VSpline algoritması ile azaltılır.

3.1.4. Aşama 4: Boyama Yörüngesinin Belirlenmesi

Konturların belirlenmesinin ardından boyama yörüngesi belirlenir:

- Boyama yörüngesi hesaplanırken, boya tabancasının nerede açık, nerede kapalı olacağı belirlenir.
- Bu yörünge parametreleri afin dönüşümlerle robot yazılımına gönderilir.

3.1.5. Aşama 5: Boyama İşlemi

Boyama yörüngesi belirlendikten sonra, boyama işlemi başlar:

- Tüm parçalar içeri girdiğinde giriş ve çıkış kapakları kapanır.

- Tepe fanlar, vakum ve filtreleme fanları çalışır.
- Boyama işlemi tamamlandığında tüm sistem durdurulur.

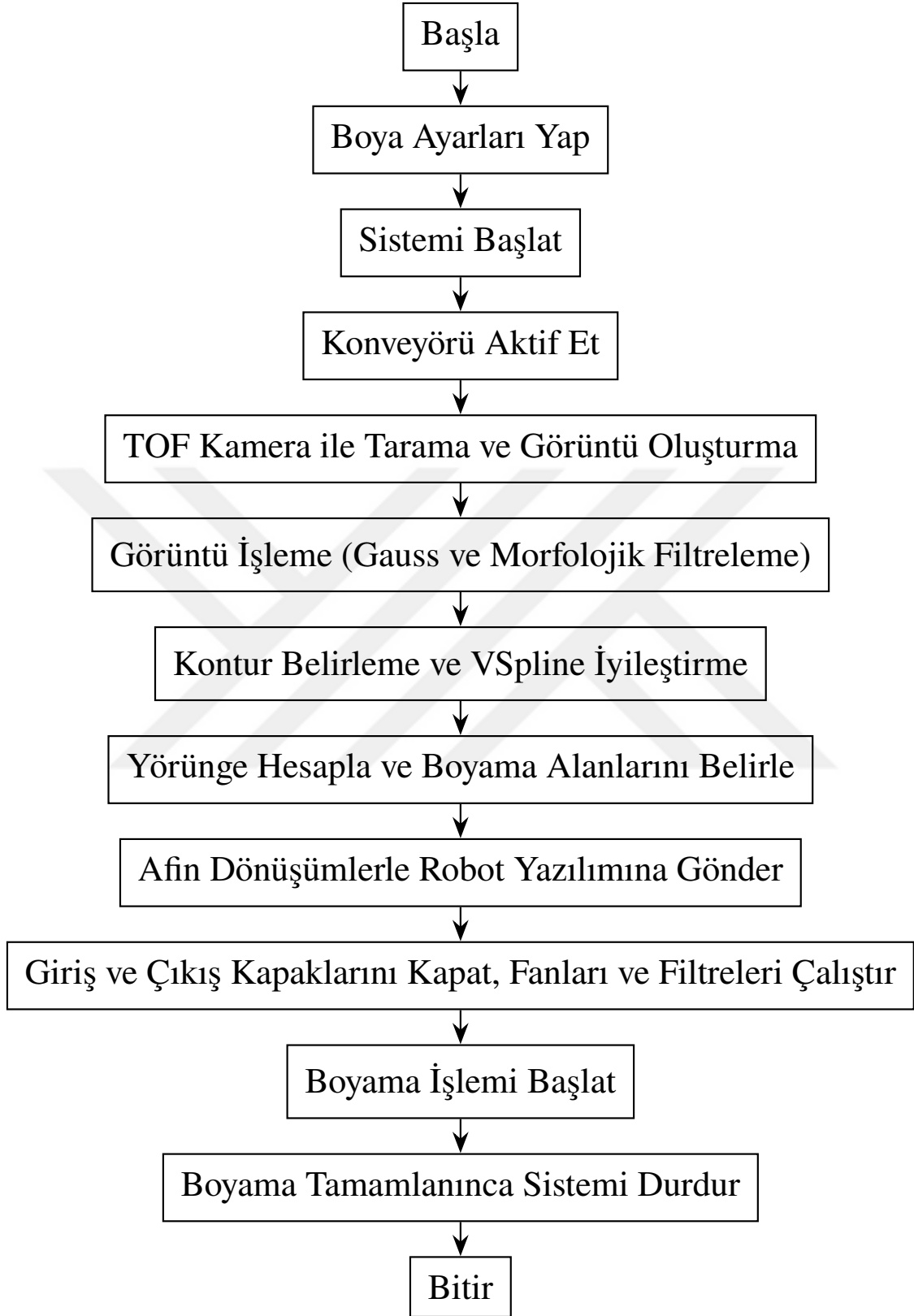
3.2. Sistemin Genel Yapısı

Projedeki otomatik boyama sistemi, giriş konveyörü, ana konveyör ve çıkış konveyörü olmak üzere üç ana bölümden oluşmaktadır. Her bir bölüm, sistemdeki belirli işlevleri yerine getirmek için özel olarak tasarlanmış bileşenlerle donatılmıştır.

Giriş Konveyörü: Giriş konveyöründe bir TOF kamera, bir servo motor ve servo motorun redüktör miline bağlı harici bir enkoder bulunmaktadır. Enkoder, yükselen kenar sinyalleri sırasında kameranin piksel bazında görüntü almasını sağlar, böylece giriş konveyörü üzerindeki nesnelerin hassas bir şekilde tespit edilmesi ve işlenmesi mümkün olur.

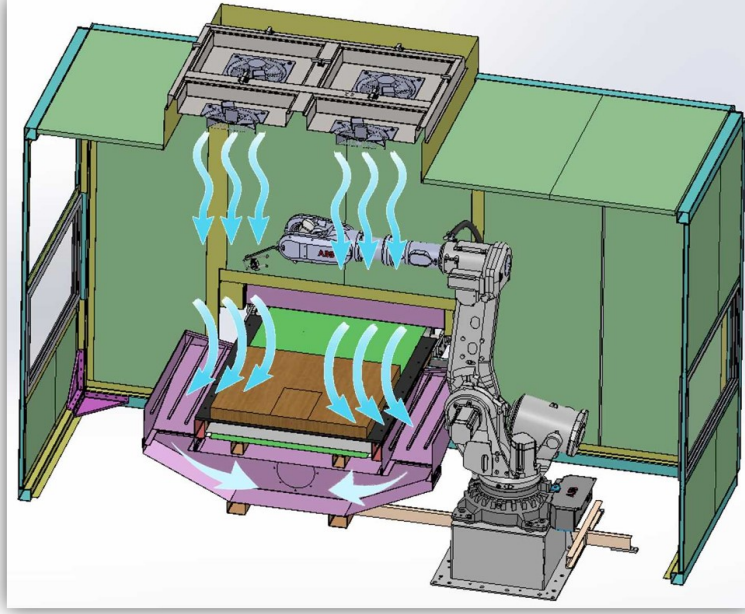
Ana Konveyör: Ana konveyör bölümü, otomatik boyama sisteminin temel işlevsel unsurlarını barındırmaktadır (Şekil 3.3.). Bu bölümde, vakum fanı, filtre fanı, tepe fanları, endüstriyel robot ve boya tabancası gibi kritik bileşenler bulunur. Vakum fanı, parçaların konveyör bant üzerinde kaymadan ilerlemesini sağlamak ve aynı zamanda uçuşan boyayı etkin bir şekilde aşağı çekmektedir. Filtre fanı, boyama işlemi sırasında havaya karışan solvent ve boya partiküllerini filtreleyerek, çalışma ortamının temiz ve sağlıklı kalmasını sağlamaktadır. Tepe fanları ise, boyanın parçalar üzerine homojen ve etkin bir şekilde yapışmasını sağlayan laminar hava akışı oluşturmakta ve böylece boyama işleminin kalitesini artırmaktadır. Robot ve boya tabancası kombinasyonu, boyanın gerekli konumlara hassas ve kontrollü bir şekilde püskürtülmesini mümkün kılar. Bu sayede homojen ve üst düzey kalitede bir boyama işlemi gerçekleştirilir.

Konveyördeki fotoseller, konveyör bandının mil üzerindeki konumunu algılamak ve pnömatik valflerle entegre bir şekilde konveyör yönlendirmesi yapmaktadır. Bu yönlendirme mekanizması, konveyör bandının mili üzerinde sabit kalmasını sağlayarak, boyama işleminin doğru konumda gerçekleşmesine imkan tanımaktadır. Servo motor ve redüktör tarafından hareket ettirilen konveyör sistemi, ana kabin içinde yer almaktadır. Kabindeki lambalar, çalışma alanının aydınlatılmasını sağlar, boyama işlemi sırasında ise



Şekil 3.2. Sistem Akış Diyagramı

giriş ve çıkış kapakları kapalı tutularak içeride pozitif basınç oluşturulur. Bu, boyama işlemi sırasında oluşabilecek toz ve partiküllerin dışarıya sızmasını önlemekte ve çalışma ortamının temiz kalmasını sağlamaktadır. Kenar pencereler, operatörlerin sistemi sürekli gözlemleyebilmesine olanak tanır, bu da işlem sırasında oluşabilecek herhangi bir soruna hızlı müdahale edilmesine imkan verir.



Şekil 3.3. Ana Kabin Görünümü

Çıkış Konveyörü: Çıkış konveyöründe, boyanan parçaların sistemin dışına taşınmasını sağlayan bir asenkron motor ve redüktör bulunmaktadır. Bu bölüm, boyama işlemi tamamlanan parçaların etkili bir şekilde tahliyesini sağlar.

3.3. Kullanılan Malzemeler ve Bileşenler

Bu projede kullanılan malzemeler ve bileşenler, otomatik boyama sisteminin çeşitli işlevsel gereksinimlerini karşılamak üzere özenle seçilmiş ve entegre edilmiştir. Kullanılan ana bileşenler şunlardır:

- Asenkron Motorlar ve Sürücüleri: Konveyör bantlarını ve diğer mekanik sistemleri hareket ettirmek için kullanılır.
- Servo Motorlar ve Sürücüleri: Yüksek hassasiyet ve kontrol gerektiren hareketler için

tercih edilir.

- Endüstriyel Bilgisayar: Sistem kontrolü, veri işleme ve kullanıcı arayüzü yönetimi için merkezi bir rol oynar.
- Endüstriyel Robot: Otomatik boyama işlemlerini gerçekleştiren ana bileşendir.
- Elektrik Panosu ve İçeriği: Sistemin elektrik bağlantılarını ve güç dağıtımını yönetir. Kontaktörler, sigortalar ve röleler içerir.
- Programlanabilir Mantıksal Kontrolör (PLC): Otomasyon işlemlerinin ve hareket kontrollerinin koordinasyonunda kullanılır.
- TOF (Time of Flight) Kamera: Nesnelerin uzaklığını ve boyutlarını tespit etmek için kullanılır.
- Çeşitli Sensörler: Sistemdeki çeşitli fiziksel durumları algılamak için kullanılır.
- Pnömatik Aktüatörler: Hava basıncıyla çalışan mekanik hareketleri sağlar.
- Soğutma ve Havalandırma Fanları: Sistemin ısı yönetimini sağlar.
- Redüktörler: Motor gücünü mekanik sistemlere aktarmada kullanılır.
- Konveyörler: Ürünlerin taşınması ve işlem sırasında yönlendirilmesinde kullanılır.
- Boya Pompası ve Pnömatik Adası: Boya uygulama işlemlerini ve hava basıncı kontrollerini yönetir.

Bu bileşenlerin her biri, sistemin farklı bir yönünü desteklemekte ve entegre bir otomatik boyama sistemini oluşturmak için birlikte çalışmaktadır.

3.4. Kontrol Sistemi ve Yazılım Uygulamaları

3.4.1. Kontrol Sistemi ve Yazılım Mimarisi

Sistem çalıştırma moduna (operate mode) alındığında, kamera veri toplama moduna (acquisition mode) geçer ve görüntü toplamaya başlar. Aynı zamanda, servo motorlara hareket sinyali gönderilir, bu da ana ve giriş konveyörlerinin senkronize bir şekilde hareket etmesini sağlar. Bu senkronize hareket, , Denklem (2.35) ve Denklem (2.36) ile sağlanır. Giriş konveyöründeki harici enkoder, kameraya doğrudan bağlıdır ve her yükselen kenar sinyalinde bir görüntü kaydeder. Kamera, görüntü alma sıklığını belirleyen divider değeri 7 olarak ayarlanmıştır, bu sayede daha az veri ile işlem yükü azaltılmış olur.

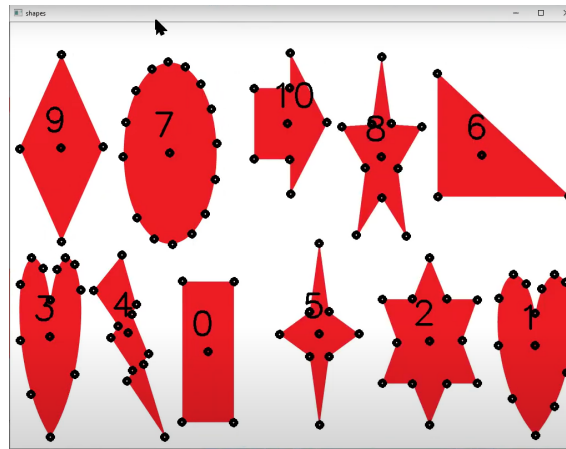
Kamera, konveyör genişliği 1300mm üzerinden 2048 piksel genişlikte görüntüleme yapar. Bu da her bir pikselin yaklaşık 0.6347 mm'lik bir alanı temsil ettiği anlamına gelir. Bu detaylar ve enkoderin 1024 pulse vermesiyle, elde edilen görüntülerin en-boy oranı 1 olarak korunur.

Toplamda 6800 kare görüntü toplanır. Bu görüntüler 4316x1300 mm'lik bir alanı kapsar, fakat robotun kullanım alanı 2400x1300 mm olduğundan, gereksiz kısımlar işlem yükünü azaltmak amacıyla kırılır. Kırılan görüntüler endüstriyel bilgisayara aktarılır ve burada çeşitli filtreleme ve tespit işlemleri yapılarak boyama yörüngesi belirlenir. Boyama işlemi, bu yörüngelere uygun olarak gerçekleştirilir.

3.5. Deney ve Test Yöntemleri

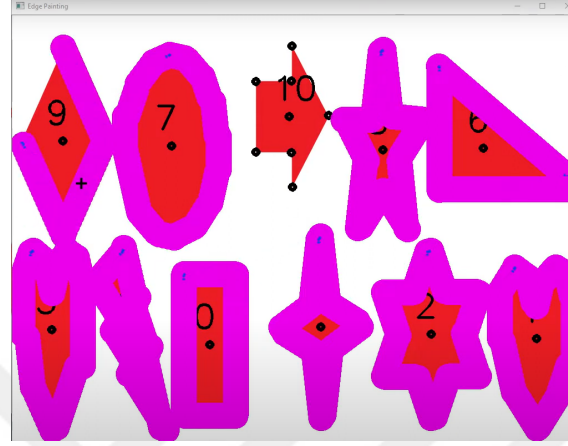
3.5.1. Python Ortamında Geliştirilmiş İlk Simülasyon

Projenin ilk zamanlarında sistem için görselik sağlanabilmesi, fikir edinilmesi ve TÜBİTAK raporlarında sunulabilmesi adına python ortamında opencv vs destekçi diğer kütüphanelerle birlikte bir simülasyon ortamı geliştirilmiştir. Bu ortamda çeşitli geometrik şekiller sisteme girdi olarak verilerek sonuçlar gözlenmiş ve ilk çalışmalar buradan elde edilen metriklerle başlamıştır (Şekil 3.4.) ilk simülasyon ortamı için sisteme verilen geometrik şekilleri göstermektedir. Bu simülasyonda boyama hızı, boyanan alanın eni ve boyu gibi metrikler ayarlanabilmektedir. Kenar ve yüzeyler için farklı ayarlar mevcuttur.



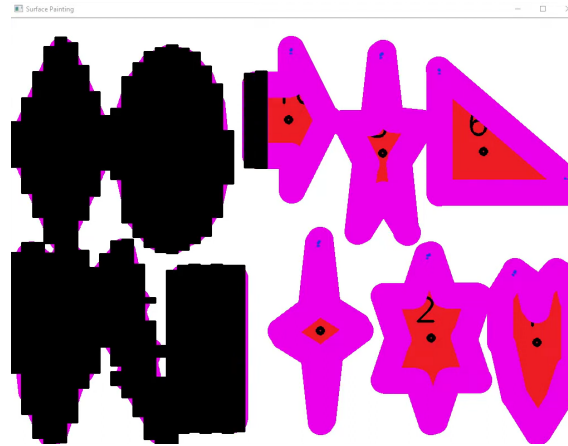
Şekil 3.4. Sistem Girdileri ve Yörünge Noktaları

Buradan elde edilen yörünge öncelikle kenar boyama işlemini gerçekleştirmek üzere tasarlanmıştır. Mobilya sektöründe boyama işlemi önceliği bu şekildedir. Önce kenar sonra yüzey boyanır. (Şekil 3.5.) içerisinde görüldüğü üzere pembe renkli kısımlar kenar boyama işlemini temsil etmektedir.



Şekil 3.5. Kenar Boyama

Kenar Boyama işlemi tüm objeler için tamamlandıktan sonra yüzey boyama işlemine geçilir. Burada boya tasarrufu sağlamak için boş alanlara boya atılmamaktadır. Yüzey boyama işleminin nasıl yapıldığı (Şekil 3.6.) içerisinde gösterilmektedir. Siyah kısımlar yüzey boyama işlemini temsil etmektedir.



Şekil 3.6. Yüzey Boyama

İlk simülasyon çalışmasını tamamlandıktan sonra çıktının daha net görülebilmesi için son bir görüntü vermektedir. Boyanan alan bu son görüntü olan (Şekil 3.7.) içerisinde net

olarak görünmektedir. Koyu kırmızı renkli alan objenin mutlak sınırlarını belirtmektedir. Gri kısımlar ise yüzey boyamada dışarı taşan kısımları gösterir.



Şekil 3.7. Boyama Sonu

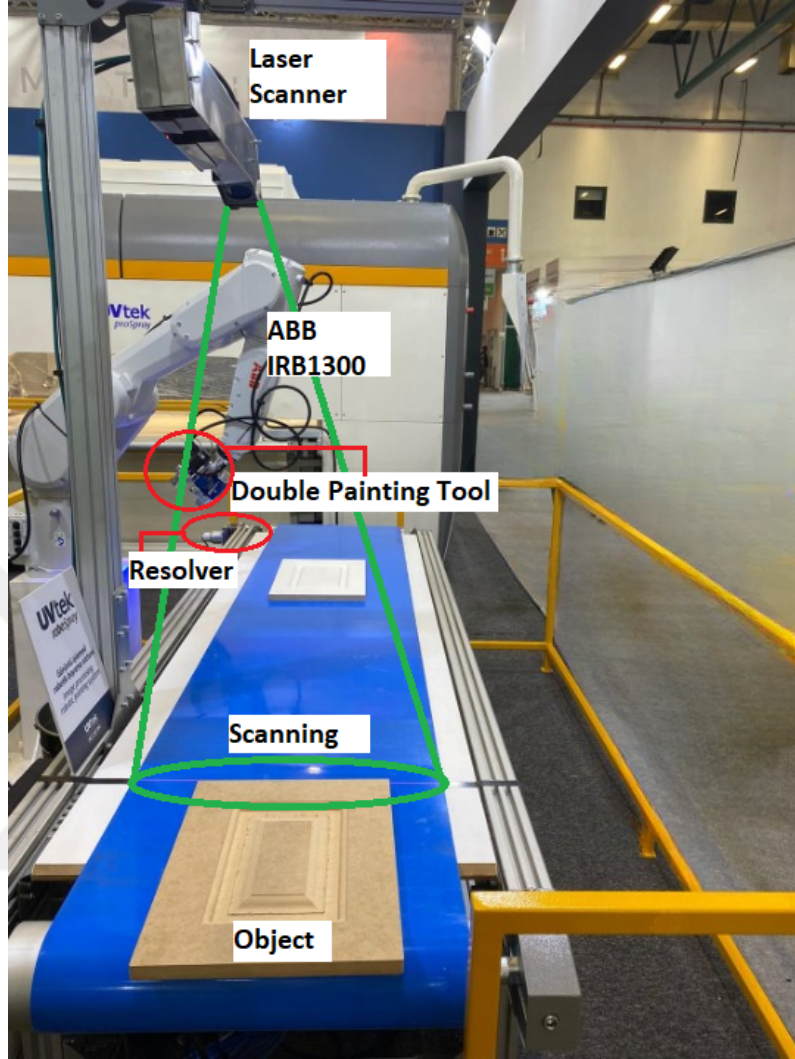
Simülasyondan anlaşıldığı gibi tüm parçalar başarılı bir şekilde boyanmıştır ve boyasız alan bulunmamaktadır. Fakat bu simülasyon çalışması, şartların yapay olarak mükemmelleştirildiği bir ortamda gerçekleşmiştir ve sadece sistem tasarımı ve çalışmanın ilerleyişi hakkında fikir sağlamaktadır. Gerçek robot, kamera, konveyör gibi sistemler henüz bu aşamada çalışmaya dahil edilmediği için nitelikli metrikler elde edilememiştir. Çalışmanın ileri aşamalara taşınabilmesi için daha gerçekçi ve zorlu ortam koşullarına sahip simülasyon ortamları geliştirilmesi gerekmektedir. Simülasyon videosunu <https://www.youtube.com/watch?v=tstNE9WvorI> adresinden izleyebilirsiniz.

3.5.2. İlk Deney Sistemi Tasarımı

Python ortamında gerçekleştirilen simülasyon işlemleri sonrasında, sistem için gerekli bileşenler belirlenmiştir. Tasarlanan sistemde, hareket edebilen bir konveyör, konveyör miline bağlı bir enkoder, TOF (Time of Flight) kamera sistemi ve bir robot bulunmaktadır. Bu bileşenler, (Şekil 3.8.)’de gösterilmektedir.

Deney sistemi, 500 mm genişliğinde bir konveyör bandı üzerinde tarama işlemi gerçekleştirecek şekilde tasarlanmıştır. Bu sistemde, ABB IRB1300 modeli, 1150 mm erişim mesafesine sahip 6 eksenli bir robot kullanılmaktadır. Bu aşamada, geliştirilen görüntü işleme yazılımı, yalnızca dört köşeli simetrik objelerin boyama yörüngesini

ıkarabilmektedir.



Şekil 3.8. İlk Deney Sistemi

Konveyör sistemi, tarama işlemi sırasında nesnelerin sabit hızda hareket etmesini sağlar. Konveyör miline bağlı enkoder, nesnelerin konumunu hassas bir şekilde belirleyerek, tarama işleminin senkronize bir şekilde gerçekleşmesine olanak tanır. TOF kamera sistemi, nesnelerin yüzey geometrisini üç boyutlu olarak tarayarak, görüntü işleme yazılımına veri sağlar. Bu veriler, nesnelerin boyama yörüngelerinin belirlenmesinde kullanılır.

Görüntü işleme yazılımı, taranan verileri analiz ederek, nesnelerin dört köşeli simetrik yapılarını tanımlar ve bu yapıların boyama yörüngelerini hesaplar. Bu hesaplamalar, robotun nesnelerin yüzeyine optimal bir şekilde boya uygulamasını sağlamaktadır. Ancak

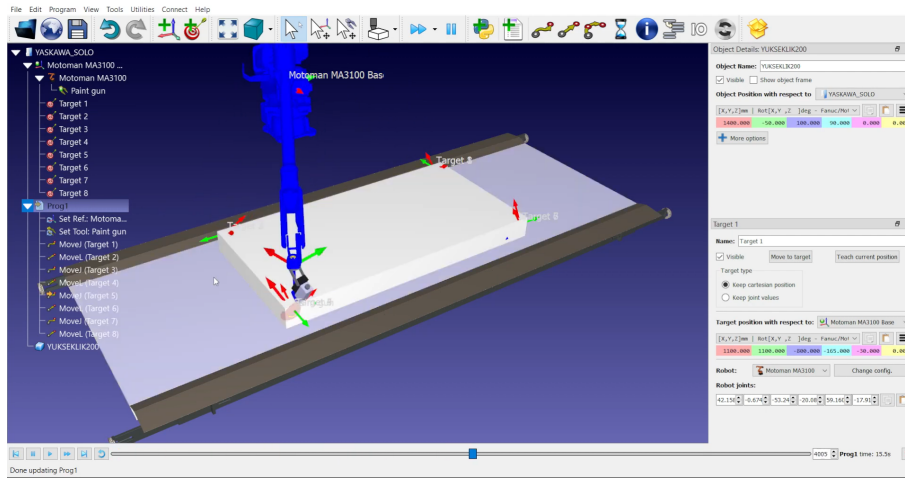
robot, programlanan yörüngeler doğrultusunda hareket ederek, nesnelerin yüzeylerini homojen bir şekilde boyamak yerine bu aşamada sadece ışık olarak göstermektedir. Bu işlem uç işlevciye bağlı ledler sayesinde yapılmaktadır.

Bu deney sistemi, gelecekte daha karmaşık geometrik yapıların boyama yörüngelerinin çıkarılabilmesi için gerekli temel altyapıyı sağlar. Geliştirilen sistem, endüstriyel otomasyon ve robotik boyama alanında önemli bir adım olarak değerlendirilmektedir.

3.5.3. Boyanabilir Alanın Belirlenmesi Simülasyonu

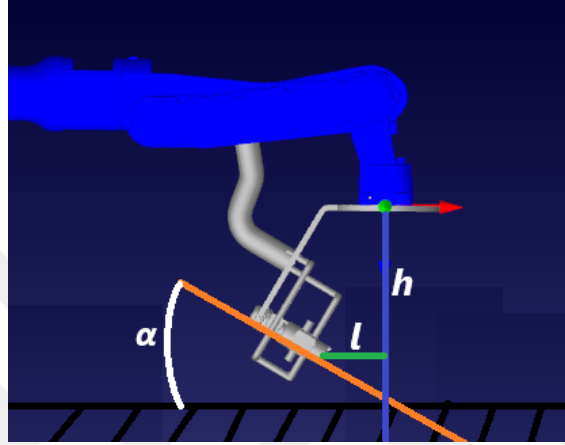
Bu simülasyon, RoboDK ortamında gerçekleştirilmiştir. Gerçek sistem parçalarının SolidWorks ile hazırlanan CAD dataları simülasyona dahil edilerek, robotun boyama işlemi için erişmesi gereken alanlar belirlenmiştir. Boyanabilir alan, 2400mm uzunluk, 1300mm genişlik ve 200mm yükseklik ölçülerine sahip beyaz dikdörtgenler prizması şeklinde simüle edilmiştir. Simülasyon süreci, robotun tüm hareketlerini, özellikle de tekilliğe düşme potansiyeli taşıyan noktalarda, doğrusal ve dönel hareketlerin sınır değerlerini test ederek gerçekleştirilmiştir.

Simülasyon videosuna <https://youtu.be/E0aHzSIeDIg> adresinden ulaşabilirsiniz. Simülasyon boyunca robotun hareket kabiliyeti ve olası problemler detaylıca incelenmiştir. (Şekil 3.9.) ve ilgili diğer görseller, bu test süreçlerini ve simülasyon sonuçlarını göstermektedir.



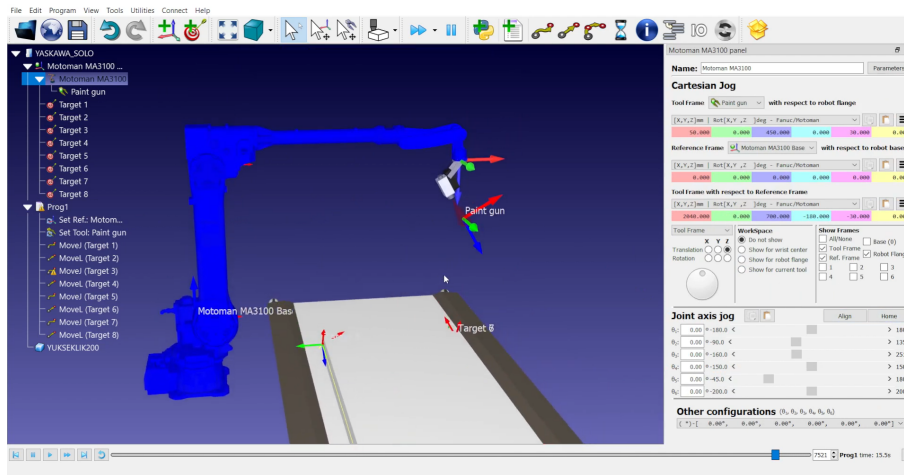
Şekil 3.9. Boyanabilir Alan Simülasyonu 1

Ek olarak, tasarlanan uç işlevci, boyama işlemlerini optimize etmek için tasarlanmıştır. Boya tabancası, zeminle $\alpha=30$ derece açı yapacak şekilde monte edilmiş, püskürtme merkezi, endüstriyel robotun 6. eksen merkezinden dikey olarak $h=200\text{mm}$ ve bu merkezden $l=50\text{mm}$ lateral olarak konumlandırılmıştır. Bu düzenleme, boyama işlemini, özellikle kenar kısımlarını, daha verimli ve hassas bir şekilde gerçekleştirmeyi sağlar(Şekil 3.10.).



Şekil 3.10. Tasarlanmış Uç İşlevci

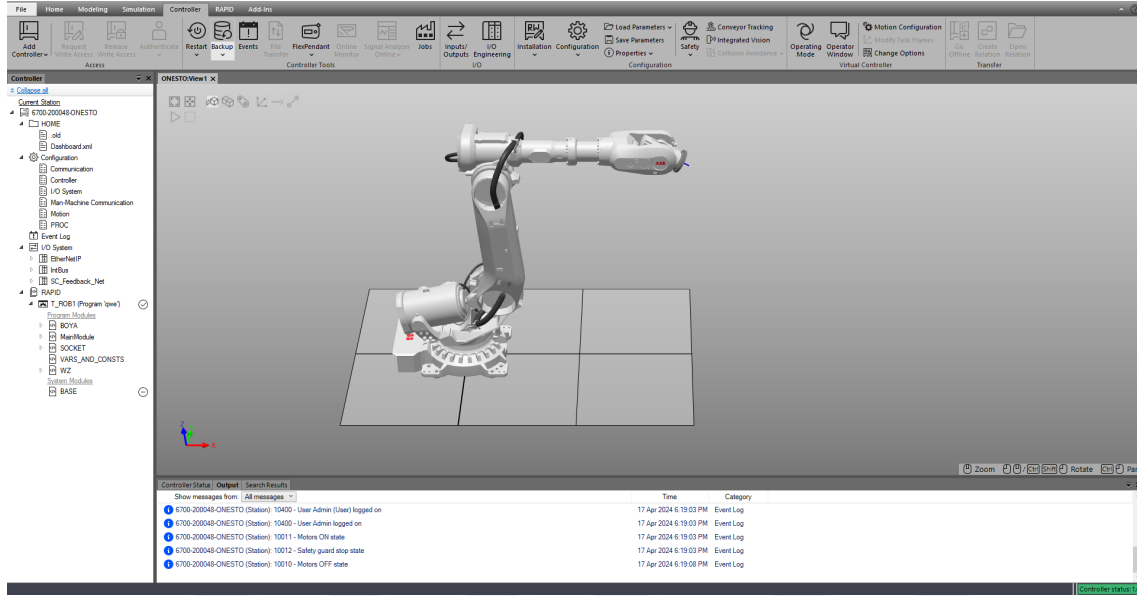
Projede belirtilen 2400x1300 mm'lik boyanabilir alan için yapılan çalışmalar sonucunda, endüstriyel robotun erişim mesafesinin yaklaşık 2850mm olması gerektiği hesaplanmıştır (Şekil 3.11.).



Şekil 3.11. Boyanabilir Alan Simülasyonu 2

3.5.4. Gerçek Tarama Simülasyonu

Simülasyon, üç ana aşamadan oluşmaktadır ve tüm geliştirmeler, gerçek robot testlerine başlamadan önce ABB Robot Studio ortamında denenmiştir. Bu süreçte geliştirilen özellikler sürekli olarak simülasyon ortamında değerlendirilmiştir (Şekil 3.12.).

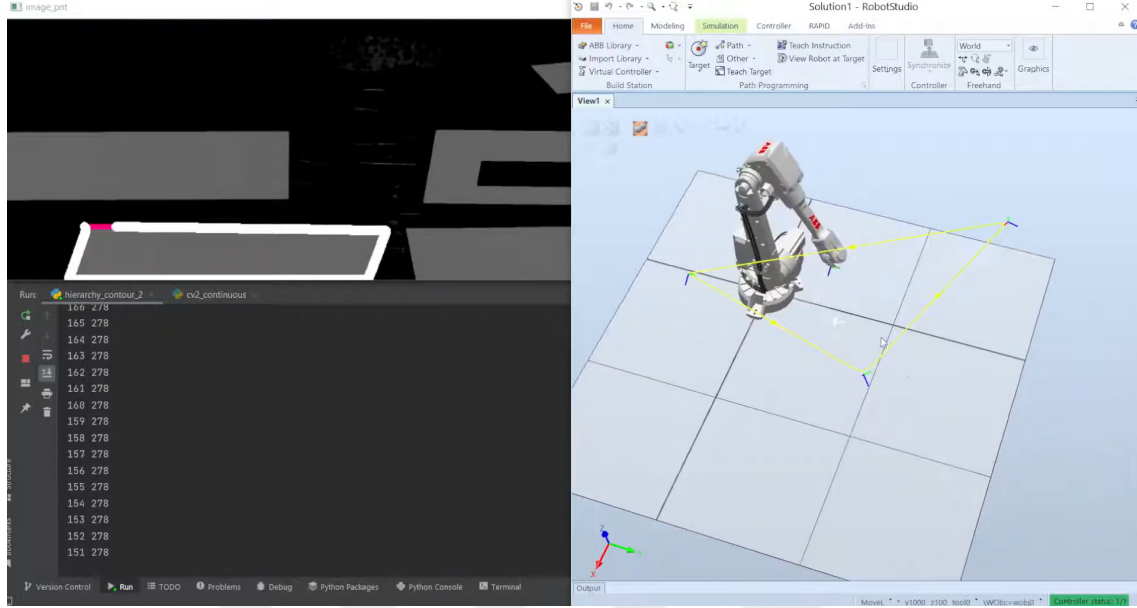


Şekil 3.12. ABB Robot Studio

İlk aşamada, endüstriyel bilgisayar aracılığıyla servo motorların kontrolü sağlanır ve GigE arayüzlü TOF kamera kullanılarak objelerin tarama görüntüleri elde edilir. İkinci aşamada, Python ortamında geliştirilen yazılım aracılığıyla robot yörüngesi belirlenir. Bu süreçte, homojen koordinat sistemi kullanılarak çeşitli Afin dönüşümler gerçekleştirilir. Bu dönüşümler, imge düzleminden gerçek düzleme geçişi sağlar ve böylece robotun boyama işlemi için gereken veriler gerçek düzleme aktarılır. Üçüncü aşamada, robot aracılığıyla boyama işlemi gerçekleştirilir (Şekil 3.13.).

Simülasyon videosuna <https://youtu.be/9yuJjIY7jPc?si=puRer1fYrGUMmVpF> adresinden ulaşabilirsiniz. Simülasyon ortamında elde edilen sonuçlar, gerçek testlerin doğruluğunu ve verimliliğini artırmak için önemli bir referans sağlar. Her aşama, çeşitli senaryolar altında test edilerek sistemin performansı ve güvenilirliği değerlendirilir. Bu aşamaların tamamlanmasının ardından, sistemin gerçek dünya koşullarında

uygulanabilirliği daha iyi anlaşılır ve olası sorunlar erkenden tespit edilerek çözümler geliştirilir.



Şekil 3.13. Tarama Görüntüsü, Robot ve Koordinatlar

3.5.5. Gerçek Üretim Ortamında Deneyler

Gerçek üretim ortamında yapılan deneyler, otomatik boyama sisteminin performansını ve verimliliğini değerlendirmeye yöneliktir. Bu bölümde deney planı, veri toplama yöntemleri ve sonuçların analizi açıklanır.

Bu çalışmanın deney planı ilk olarak boyama alanı, robot ve yörünge yazılımı arasındaki kalibrasyonu içerir. Sonrasında sırasıyla basit, orta ve yüksek zorluktaki geometrili parçaların boyanması deneyleri gerçekleştirilir.

3.5.5.1. Deney 1: Boyama Alanı Kalibrasyonu

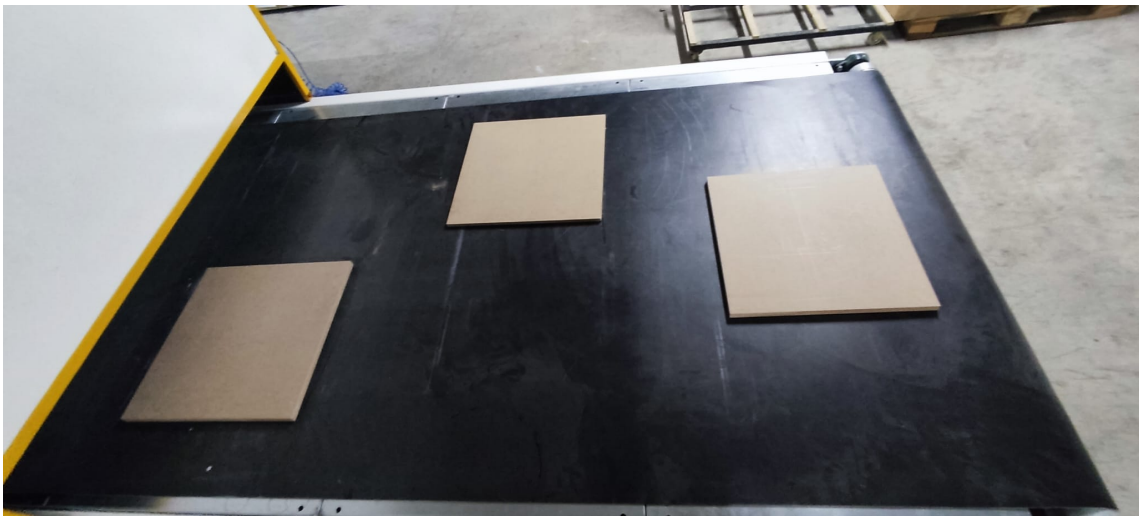
Bu deney, robotik boyama sürecinde kullanılan ahşap parçaların kalibrasyon sürecini kapsar. Deney, 45x45 cm boyutundaki dörtgen ahşap plakalar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Görüntü işleme yazılımından elde edilen veriler ile robotun hareket koordinatları adım adım belirlenmiş ve her kenar boyunca mesafeler bir cetvel yardımıyla ölçülerek robot hareketleri kalibre edilmiştir. Bu prosedür, sistemin belirlenen

koordinatlara doğru ve verimli bir şekilde ilerlemesini sağlar.

Bu kalibrasyon işlemi, robotun belirlenen koordinatları izlerken, hassasiyetin korunmasını ve tekrarlanabilirliğin sağlanmasını garanti eder. Aynı zamanda, robotun hareketleri sırasında karşılaşılabileceği olası tolerans hataları ve sapmalar önceden tespit edilerek düzeltilir. Bu adım, sistemin hem güvenilirliğini hem de doğruluğunu artırır ve boyama sürecindeki performansı optimize eder. Özellikle, yüksek hassasiyet gerektiren uygulamalarda bu tür bir kalibrasyon süreci, yüzey kalitesinin tutarlı olmasını sağlar.

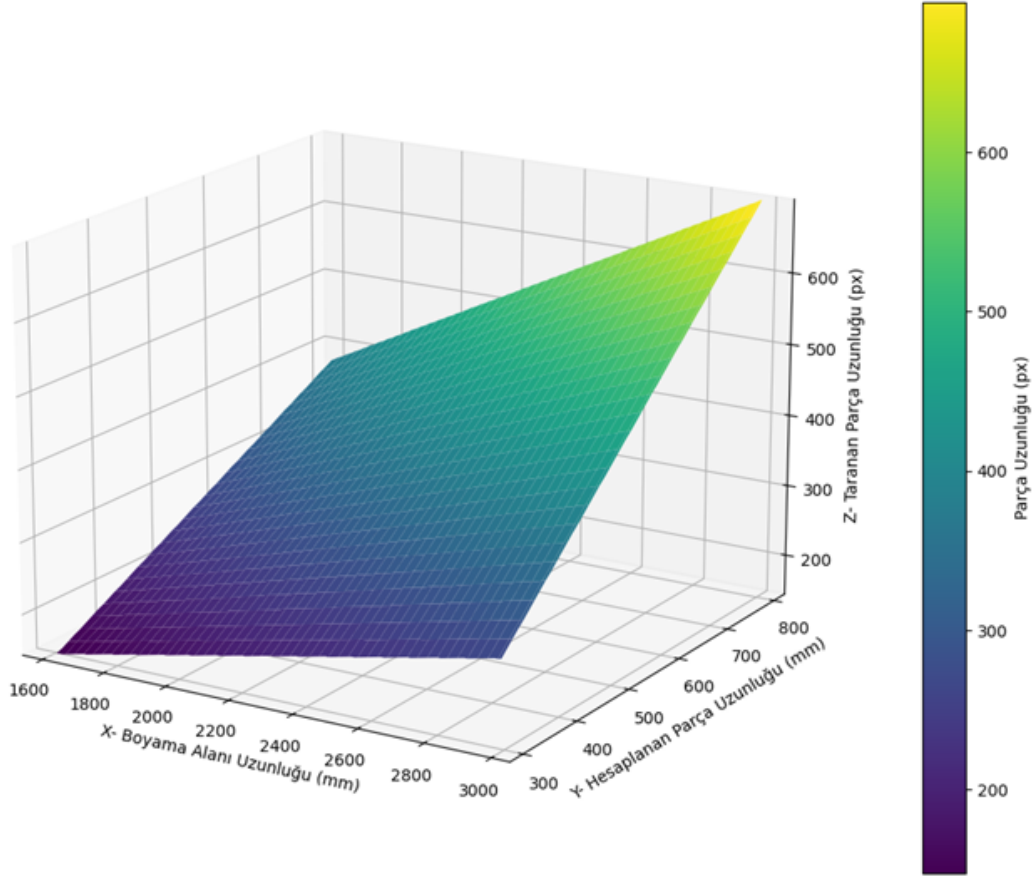
Kalibrasyon sürecinde kullanılan koordinatlar, Ek-A içerisinde verilmiştir ve her bir koordinat dizisi $[[x, y, z], [x_r, y_r, z_r], \text{mode}]$ formatında tanımlanmıştır, burada 'x, y, z' robotun konumunu, 'x_r, y_r, z_r' ise rotasyon açılarını, 'mode' ise hareket modunu temsil etmektedir. Örneğin, $[[1681, 498, 500], [180, 0, -179], 'N']$ koordinatı, robotun 1681, 498, 500 noktasında, 180°, 0°, -179° açılarındaki 'N' (normal) modda hareket ettiğini gösterir.

Öncelikle, konveyör bandına sırasıyla üç adet 45x45 cm boyutunda ahşap plaka yerleştirilir. Bu yerleşim düzeni, (Şekil 3.14.)'da gösterilmiştir. Kalibrasyon sırasında üç parçanın kullanılması, ölçeklendirme hatalarını minimize etmek içindir. Afin dönüşüm esnasında, boyama alanının ölçeklendirilmesindeki sapmalar, x ve y ekseninde artabilir veya azalabilir.



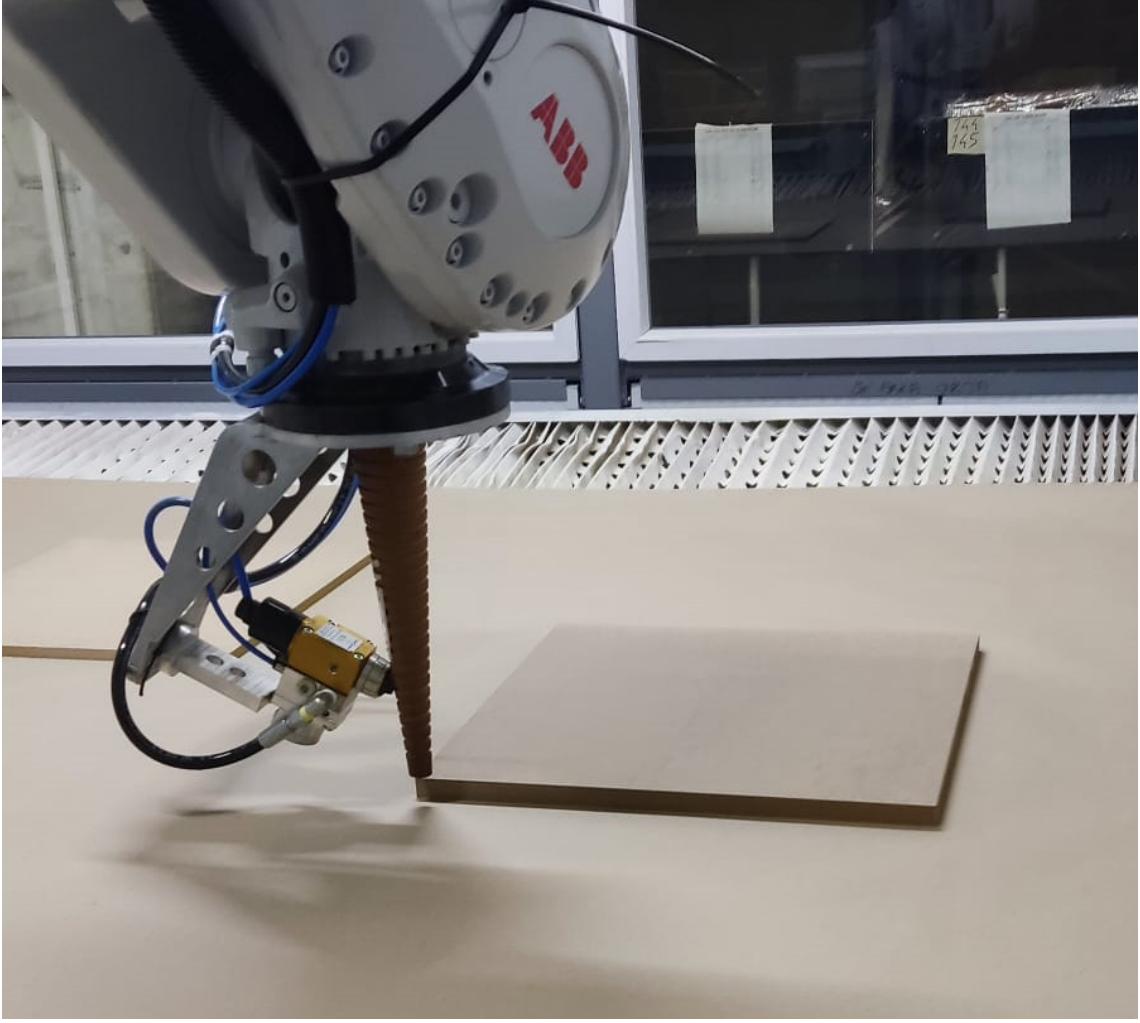
Şekil 3.14. Konveyör Üzerindeki Plakalar

Konveyörün sol bölümündeki hareket mesafesi sabitken, sağ tarafa doğru ilerledikçe sapma lineer olarak artabilir. Bu sapmalar, görüntü piksel büyüklüğü ve taranan parçanın kapladığı piksel alanı gibi faktörlerle ilişkili afin dönüşüm parametrelerinden kaynaklanmaktadır. Kalibrasyon sürecinde ortaya çıkan bu sapmalar, (Şekil 3.15.) ile gösterilmiştir; bu grafik, sapmaların boyutunu ve etkisini açıkça sergilemektedir.



Şekil 3.15. Afin Dönüşüm Kalibrasyon Sapma Hatası Grafiği

Sonraki aşamada robot flanşının merkez noktasına bir konik bağlanır. Bu konik parça zeminle dik olacak şekilde ayarlanır. Her 45cm'lik hareket steplenir, sürekli bir hareket yoktur, gözlem yöntemiyle sistem incelenir ve hareketler ölçülür. Robot tarafındaki konum verileri, yörünge yazılımdan gelen veriler ve gözlemle yapılan konumlama işlemleri doğruysa, her üç parçanın da dört köşesi için inceleniyor. Tüm noktalar doğruysa, kalibrasyon işlemi başarılı demektir. Artık çıkarılan yörünge ve robot hareketleri birebir gerçeğe dönüşüyor anlamına gelir (Şekil 3.16.).



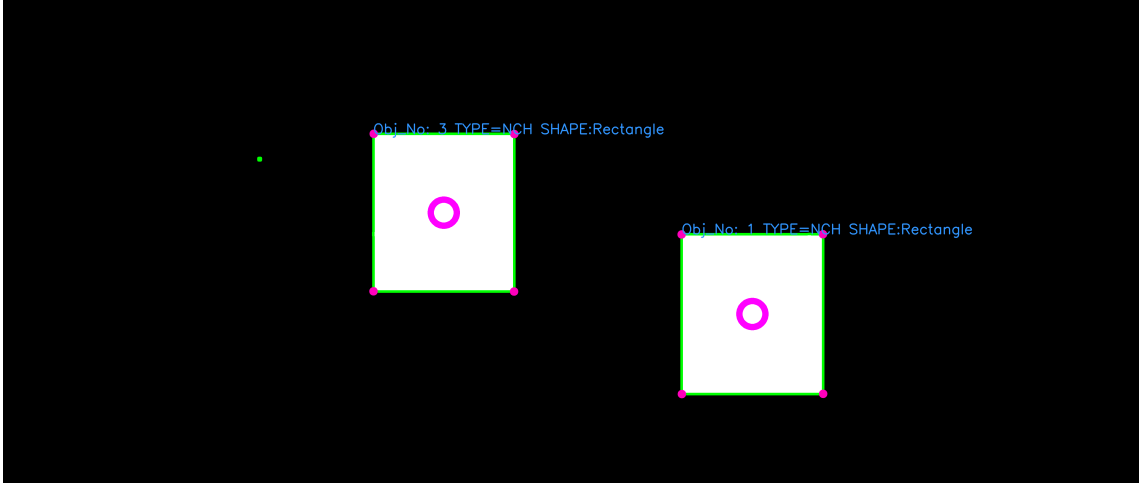
Şekil 3.16. Flanş Kalibrasyon Sistemi

3.5.5.2. Deney 2: Düşük Zorluktaki Parçaların Boyanması

Bu bölümde, geometrisi düşük zorlukta olan parçaların boyanma süreci incelenmiştir. Bu tip parçalar genellikle düz yüzeylere ve düzenli kenarlara sahiptir. Örnek olarak düz yüzeyli bir ahşap kapı veya dolap kapağı alınabilir. (Şekil 3.17.) düşük zorlukta geometrili bir objenin tarama görüntüsünü göstermektedir. Köşelerdeki pembe noktalarda uç işlevci dönme hareketi yapar ve yeşil çizilmiş kenarlar boyunca hareket eder ve yörüngeyi tamamlar.

Deneyin amacı, otomatik boyama sisteminin basit geometrili nesneler üzerindeki performansını değerlendirmek ve boyama işleminin homojenliğini test etmektir. Düz yüzeylerde ve düzenli kenarlar üzerinde boyama sürecinin etkinliği ve kalitesi

ölçülecektir.



Şekil 3.17. Düşük Zorluktaki Geometril Obje Taranmış ve Yörünge Çıkarılmış Görüntüsü

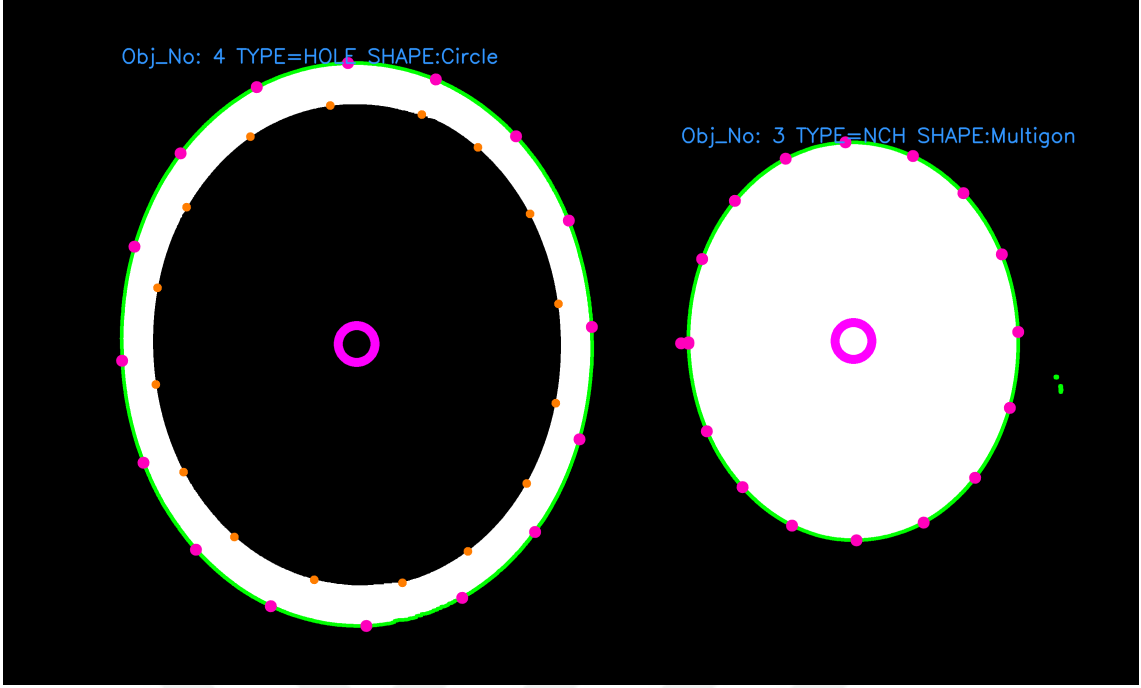
Deney, standart bir ahşap kapı paneli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kamera ile yapılan tarama sonucunda elde edilen görüntü verileri, boyama yörüngesinin belirlenmesinde kullanılmıştır. Görüntü işleme yazılımı, objenin boyutlarını ve şeklini tanımlayarak, boyama için en uygun yörüngeyi hesaplamıştır. Ek detayları için bkz. Ek-B.

Boyama robotu, yörüngeye uygun şekilde programlanmıştır. Boyama işlemi sırasında, robotun boya tabancası objenin yüzeyine düzgün bir şekilde boyayı uygulamıştır. Boyama kalınlığı ve homojenliği, yüzey üzerindeki boya tabakasının kalınlığını ölçen bir mikrometre ile kontrol edilmiştir.

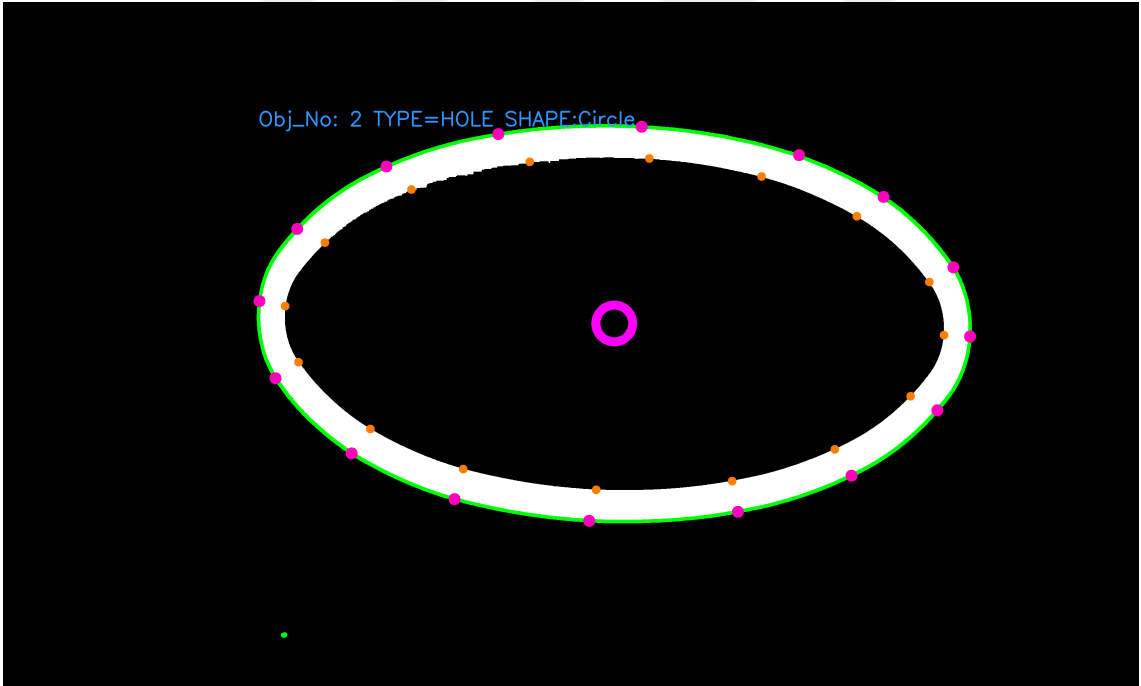
Deney sonucunda, düz yüzeylerde boyama işleminin homojenliği ve kalitesi değerlendirilmiştir. Deney, boyama sürecinin bu tip geometrilerde nasıl optimize edilebileceğine dair önemli veriler sağlamıştır.

3.5.5.3. Deney 3: Orta Zorluktaki Parçaların Boyanması

Bu deney kapsamında, yumuşak dış hatlara sahip ve çerçeve şeklinde olan, ortalarında delik bulunabilen elips, çember gibi geometriler üzerinde çalışılmıştır. Bu tür parçalar, robotik boyama sistemleri için orta derecede bir zorluk teşkil etmektedir. Bu parçaların tarama görüntüleri (Şekil 3.18.) ve (Şekil 3.19.)’de gösterilmiştir.



Şekil 3.18. Orta Zorluktaki Geometrilili Obje Tarama ve Yörünge Çıkarılmış Görüntüsü 1



Şekil 3.19. Orta Zorluktaki Geometrilili Obje Tarama ve Yörünge Çıkarılmış Görüntüsü 2

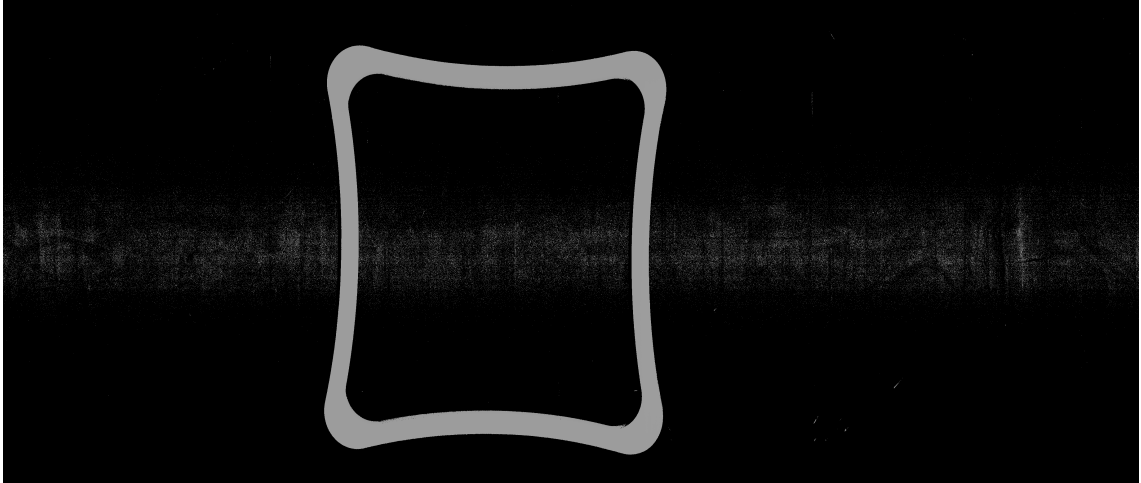
Bu deneyde karşılaşılan başlıca zorluk, iç konturların belirlenmesi ve geometrinin dairesellik tespiti olmuştur. Konturlar belirlenebilmiş ancak bu konturların hangi

geometrik şekle ait olduğunu net olarak belirlemek zorluklar arz etmiştir. Bu sorunun üstesinden gelmek için, çeşitli görüntü işleme algoritmaları geliştirilmiştir. Bu algoritmalar, parçanın geometrisine bağlı karar verme yeteneği ile sisteme entegre edilmiştir.

Deney sürecinde, görüntü işleme yazılımı tarafından geliştirilen algoritmaların etkinliği test edilmiştir. Bu algoritmalar sayesinde, sistem farklı geometrilere sahip objeleri tanıyabilir ve her bir obje türüne uygun boyama stratejilerini uygulayabilir (Şekil 3.18.). Yörünge detayları için Ek-C bakınız. Karar algoritmaları sadece simetrik şekiller için çalışmaktadır. Asimetrik veya aniform bir obje tespit edildiğinde yazılım farklı aşamalarını çalıştırarak boyama yörüngesi oluşturmaktadır.

3.5.5.4. Deney 4: Yüksek Zorluktaki Parçaların Boyanması

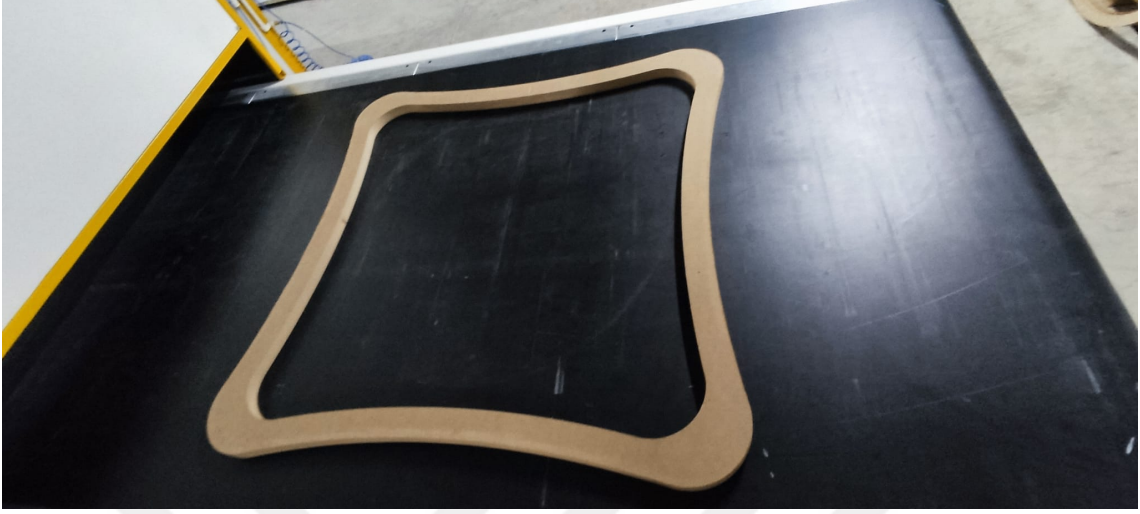
Bu deney, asimetrik veya aniform şekiller gibi yüksek zorlukta geometrili parçalar üzerinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.20.). Bu tür parçalar, özellikle karmaşık iç ve dış konturları nedeniyle, otomatik boyama sistemlerinin doğruluğunu ve etkinliğini sınamak için idealdir. Geliştirilen algoritmaların bu kompleks yapıları nasıl algılayıp işlediğini anlamak, sistemin genel performansını artırmada kritik bir rol oynar.



Şekil 3.20. Yüksek Zorluktaki Geometrili Obje-1 TOF Tarama Görüntüsü

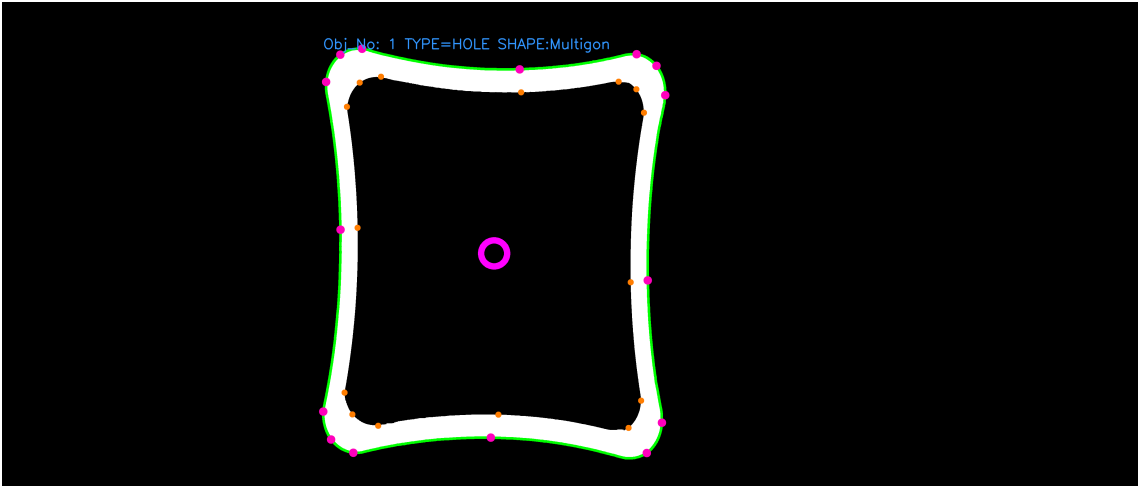
Deneyin başlangıcı, yüzey karmaşıklığı yüksek olan nesnelerin seçilmesiyle oldu. Seçilen nesneler, insan eliyle bile zor boyanabilen, çeşitli açılara ve köşelere sahip yapılar

içeriyordu (Şekil 3.21.). Bu nesneler üzerinde yapılan deneyler, boyama sürecinin her aşamasını detaylı bir şekilde incelemeyi amaçlamaktadır.



Şekil 3.21. Yüksek Zorluktaki Geometrilili Obje-1 Giriş Konveyörü Görüntüsü

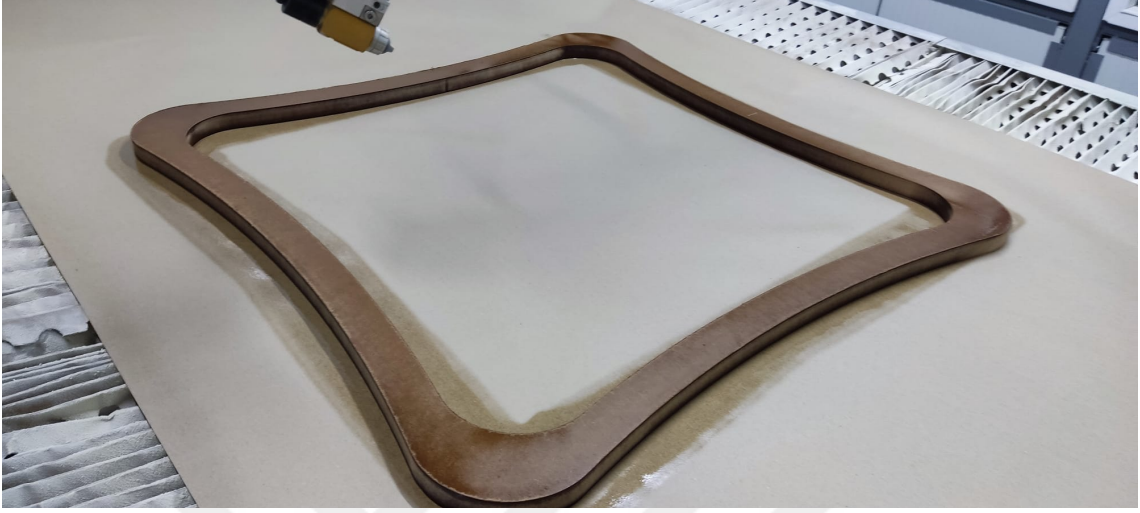
Yörünge planlaması sırasında, boyama robotunun her bir hareketi, boyama kalitesini maksimize etmek ve boya israfını minimize etmek için özenle hesaplandı. Bezier eğrileri kullanılarak, nesnenin her bir konturuna uygun hareket yörüngeleri oluşturuldu (Şekil 3.22.).



Şekil 3.22. Yüksek Zorluktaki Geometrilili Obje-1 Boyama Yörüngesi Çıkarılmış Görüntüsü

Robotun hareketleri sırasında sürekli izleme ve geribildirim mekanizmaları, herhangi bir

hata oluştuğunda anında d¼zeltmeler yapılmasını sağladı. Bu, özellikle karmaşık geometrili nesnelerde, boyama işleminin homojenliğini ve kalitesini b¼y¼k ¼l¼de artıran bir y¼ntemdir.



şekil 3.23. Y¼ksek Zorluktaki Geometrili Obje-1 Boyanmış G¼r¼nt¼s¼

Deney sonuçları, otomatik boyama sistemlerinin y¼ksek zorlukta geometrili paręalar ¼zerinde de y¼ksek kalitede boyama yapabileceğini g¼stermiřtir (şekil3.23.). Sistem, farklı y¼zey geometrilerine uyum sağlayabilme ve karmaşık şekillerde dahi homojen boyama sağlama kapasitesine sahip olduğunu kanıtlamıştır. Ek olarak, bu deneyler sırasında elde edilen veriler, sistemin daha da iyileştirilmesi için değerli bilgiler sağlamıştır.

Detaylı y¼r¼nge ve algoritma uygulamaları hakkında daha fazla bilgi için Ek-ę b¼l¼m¼ne bakınız. Ayrıca farklı zor geometrili paręalar için EK-D,EK-E, EK-F ve EK-G bakınız.

EK-G iğerisindeki paręanın boyanma videosu <https://youtu.be/NupzIKIFFFQ> adresinden izlenebilmektedir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Bulgular

Bu bölümde, yapılan çalışmanın bulguları sunulmaktadır. Elde edilen bulgular, projenin amaçlarına ne ölçüde ulaşıldığını ve hangi yönlerden katkı sağlandığını açıklamaktadır. Ayrıca, çalışma sırasında karşılaşılan sorunlar ve bu sorunlara getirilen çözümler de ele alınmaktadır. Bulguların değerlendirilmesi, sistemin performansını ve uygulanabilirliğini ortaya koymaktadır.

4.1.1. Görüntü İşleme ve Şekil Tanıma Sonuçları

Bu çalışmada, TOF (Time of Flight) kamera ile elde edilen görüntülerin işlenmesi ve ahşap parçaların şekillerinin doğru bir şekilde tanınması için çeşitli görüntü işleme teknikleri kullanılmıştır. Bu teknikler, parçaların kenarlarını, deliklerini ve diğer önemli özelliklerini belirlemede başarılı sonuçlar vermiştir. Özellikle, Canny kenar dedektörü ve Otsu eşikleme yöntemi gibi temel görüntü işleme algoritmaları, parçaların dış hatlarının belirlenmesinde etkili olmuştur. Bunun yanı sıra, daha gelişmiş teknikler olan VSpline algoritmaları ve kontur optimizasyonu, parçaların karmaşık geometrilerinin daha iyi temsil edilmesini ve robotik boyama sürecinin daha hassas bir şekilde planlanmasını sağlamıştır.

4.1.1.1. 2D ve 3D Görüntü İşleme Tekniklerinin Performansı

Çalışmada kullanılan 2D görüntü işleme teknikleri, parçaların dış hatlarını ve deliklerini belirlemede başarılı sonuçlar vermiştir. Özellikle, Canny kenar dedektörü, parçaların kenarlarını net bir şekilde belirlemiş ve bu sayede robotik kolun hareket yörüngesi daha doğru bir şekilde hesaplanabilmektedir. Otsu eşikleme yöntemi ise, parçaların deliklerini ve diğer özelliklerini belirlemede etkili olmuştur. 3D görüntü işleme teknikleri ise, TOF kamera ile elde edilen derinlik verilerini kullanarak parçaların üç boyutlu yapılarının daha iyi anlaşılmasını sağlamıştır. Bu sayede, robotik kolun parçaların farklı yüzeylerine ve açılarına göre hareket yörüngesi daha hassas bir şekilde planlanabilmektedir.

4.1.1.2. Şekil Tanıma Algoritmalarının Başarı Oranı

Çalışmada kullanılan şekil tanıma algoritmaları, farklı geometrilere sahip ahşap parçaları başarıyla tanımlamıştır. Özellikle, basit geometrilere sahip parçaların (düz yüzeyli kapı veya dolap kapakları gibi) tanınması ve işlenmesinde yüksek başarı oranları elde edilmiştir. Orta zorluktaki geometrilere sahip parçaların (elips, daire gibi) tanınmasında da başarılı sonuçlar elde edilmiştir, ancak bazı durumlarda iç konturların ve dairesellik tespitinin belirlenmesinde zorluklar yaşanmıştır. Yüksek zorluktaki geometrilere sahip parçaların (asimetrik veya aniform şekiller gibi) tanınması ise daha fazla zorluk çıkarmıştır, ancak geliştirilen özel algoritmalar sayesinde bu parçaların da başarılı bir şekilde tanınması ve işlenmesi mümkün olmuştur.

4.1.1.3. Görüntü Filtreleme ve Gürültü Giderme Sonuçları

TOF kamera ile elde edilen görüntülerde bazı durumlarda gürültü problemi yaşanmıştır. Bu problemi çözmek için Gauss bulanıklaştırma filtresi, erozyon, genişleme, açma ve kapama gibi görüntü filtreleme ve gürültü giderme teknikleri kullanılmıştır. Bu teknikler, görüntülerdeki gürültüyü azaltarak daha net ve keskin görüntüler elde edilmesini sağlamıştır. Özellikle, Gauss bulanıklaştırma filtresi, kenar tespiti ve şekil tanıma algoritmalarının performansını artırmıştır. Erozyon ve genişleme gibi morfolojik işlemler ise, parçaların kenarlarını düzgünleştirerek daha iyi bir şekil tanıma sağlamıştır.

4.1.2. Hareket Kontrolü ve Robotik Uygulamalarının Sonuçları

Çalışmada, endüstriyel bir robot kol (ABB IRB1300), ahşap parçaların otomatik boyanması için kullanılmıştır. Robot kolun hareketleri, geliştirilen görüntü işleme yazılımı tarafından belirlenen yörünge noktalarına göre hassas bir şekilde kontrol edilmiştir. Bu sayede, karmaşık geometrilere sahip parçaların bile hatasız ve homojen bir şekilde boyanması mümkün olmuştur. Özellikle "MoveJ" ve "MoveC" gibi farklı robot hareket komutlarının kullanılması, robot kolun parçaların farklı yüzeylerine ve açlarına uyum sağlayarak daha esnek ve etkili bir boyama işlemi gerçekleştirmesini sağlamıştır.

4.1.2.1. Robotik Kolun Hareket Doğruluğu ve Hassasiyeti

Deneyler sırasında, robot kolun hareket doğruluğu, geliştirilen sistemin doğası gereği 1 mm olarak ölçülmüştür. Ancak, elde edilen yörünge koordinatları gerçek değerlerden ± 2 mm aralıkta sapma göstermiştir. Bu sapmaların temel nedenleri arasında yuvarlama hataları, kamera kalibrasyonundaki küçük hatalar ve ışık kırılması gibi faktörler yer almaktadır. Sistemin işlem yükünü azaltmak amacıyla tam sayı değerlerle çalışacak şekilde tasarlanması da bu sapmalara katkıda bulunmuştur.

Yörüngedeki her noktanın konumu, robotun hareket doğruluğunu belirlemede kritik bir rol oynar. Özellikle, karmaşık geometrilere sahip parçalarda, robot kolun hassas hareketleri, boyanın doğru ve homojen bir şekilde uygulanması için önemlidir. Deneyler sırasında, robot kolun hareket doğruluğu genel olarak tatmin edici bulunmuştur. Boyama işlemi püskürtme ile yapıldığı için 2mm'lik sapmalar önemsiz olarak kabul edilmektedir.

4.1.2.2. Boyama Sürecindeki Hız ve Verimlilik

Otomatik boyama sistemi, geleneksel manuel boyama yöntemlerine göre önemli ölçüde daha hızlı ve verimli sonuçlar vermiştir. Örneğin, Ek E'deki parçanın yaklaşık 1 metrekairelik yüzey ve 4 metrelik kenar uzunluğuna sahip olduğu düşünüldüğünde, manuel yöntemle yaklaşık 3 dakikada boyanırken, otomatik sistem bu işlemi yaklaşık 50 saniyede tamamlayabilmiştir. Bu, otomatik sistemin manuel yöntemlere göre yaklaşık 4 kat daha hızlı olduğunu göstermektedir. Geometrinin karmaşıklığı arttıkça, manuel boyama ile robotik boyama arasındaki bu hız farkı daha da belirginleşmektedir.

Otomatik sistemin hızı ve verimliliği, sadece boyama süresinin kısalmasıyla sınırlı değildir. Aynı zamanda, robot kolun sürekli ve aynı hızda hareket etmesi, boyanın daha homojen bir şekilde uygulanmasını sağlamaktadır. Manuel boyama işlemlerinde karşılaşılan dalgalanmalar ve tutarsızlıklar, otomatik sistemde minimize edilmiştir. Bu da ürün kalitesini artırmış ve yeniden boyama ihtiyacını azaltarak verimliliği daha da yükseltmiştir.

Bunun yanı sıra, otomatik boyama sistemi, insan faktöründen kaynaklanan hataları ortadan

kaldırmıştır. Robot kol, yorulmadan, dikkat dağınıklığı yaşamadan ve aynı hassasiyetle çalışabilir. Bu da üretim sürecinin sürekliliğini ve verimliliğini artıran önemli bir faktördür. Ayrıca, otomatik sistemler, aydınlatma ve havalandırma gibi ek gereksinimler olmadan 7/24 çalışabilir, bu da üretim kapasitesini artırırken maliyetleri düşürür.

Sonuç olarak, otomatik boyama sisteminin hızı, verimliliği, homojen boyama yeteneği ve insan hatalarını ortadan kaldırması, geleneksel manuel yöntemlere göre önemli avantajlar sağlamaktadır. Bu avantajlar, üretim maliyetlerini düşürürken ürün kalitesini artırarak endüstriyel boyama süreçlerinde önemli bir dönüşüm sağlamaktadır. Özellikle büyük ve karmaşık parçaların boyanmasında, insanın parçanın etrafında hareket etmesi ve çeşitli açılardan boyama yapması gerekecektir. Bu durum, boyama süresini uzatırken aynı zamanda boya kalitesini ve homojenliğini de olumsuz etkileyecektir. Otomatik boyama sistemi ise, bu tür zorlukları ortadan kaldırarak daha hızlı, daha kaliteli ve daha verimli bir boyama süreci sunmaktadır.

4.1.2.3. Hata Oranları ve Gözlemlenen Problemler

Deneyler sırasında, özellikle basit ve orta zorluktaki geometrilere sahip parçalarda hata oranları oldukça düşük bulunmuştur. Ancak, yüksek zorluktaki geometrilere sahip parçalarda, bazı bölgelerde boya birikmesi veya bazı köşelerin boyanamaması gibi küçük problemler yaşanmıştır.

Boya birikmesi sorunu, özellikle keskin dönüşlerin olduğu dar açılı köşelerde ortaya çıkmıştır. Bu sorunu çözmek için, dönüşlerdeki robot kolun hızını, dönüş açısına göre hesaplayan bir algoritma geliştirilmiştir. Algoritma, dönüş açısının (θ) 180 derece ile 20 derece arasında olduğu aralıkta, robot kolun hızını lineer bir formülle ayarlar. Bu yavaşlama, robotun global hızına (v_g) ve operatör tarafından belirlenen hız yüzdesine (p) bağlıdır ve şu formülle hesaplanır, Denklem (4.1):

$$v = v_g \cdot p \cdot \left(\frac{\theta - 20}{160} \right) \quad (4.1)$$

Dönüş açısı 20 derecenin altına düştüğünde hız sabit kalır ve düz bir çizgi olarak kabul edilir. 180 dereceyi aşan açılarda ise eksen değişimi uygulanır ve hız farklı bir hesaplama

ile belirlenir. Bu sayede, keskin dönüşlerde robot kolun hızı azaltılarak boya birikmesi engellenir ve boyama işlemi daha hassas bir şekilde gerçekleştirilir.

Köşelerin boyanamaması sorunu ise, boyama işleminin başlangıç ve bitiş noktalarının aynı noktada olmamasından kaynaklanmaktadır. Bu sorunu çözmek için, boyama işlemi artık belirlenen kontur noktaları arasındaki açılar hesaplandıktan sonra en düz alanda başlayıp tekrar aynı noktada bitecek şekilde düzenlenmiştir. Bu sayede, köşe kısımlarında boyanmayan yerler kalmamaktadır.

Bunun yanı sıra, afin dönüşüm sırasında ortaya çıkan hatalar da boyama işlemini etkileyebilmektedir. Özellikle kamera ile robot arasındaki koordinat sistemlerinin kalibrasyonu sırasında oluşabilecek hatalar, robotun boyayacağı alanı doğru bir şekilde algılayamamasına ve hatalı boyama yapmasına yol açabilir. Bu tür hatalar, genellikle boyanacak alanın büyüklüğü ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Örneğin, 45x45 cm boyutlarındaki ahşap plakaların boyanmasında yapılan kalibrasyon deneyinde, plakaların konumuna bağlı olarak ± 2 mm'ye varan sapmalar gözlemlenmiştir. Bu sapmalar, görüntü piksel büyüklüğü ve taranan parçanın kapladığı piksel alanı gibi faktörlerle ilişkili afin dönüşüm parametrelerinden kaynaklanmaktadır.

Genel olarak, deneyler sırasında gözlemlenen hata oranları kabul edilebilir seviyededir. Ancak, özellikle karmaşık geometrilere sahip parçaların boyanmasında ve afin dönüşüm hatalarının minimize edilmesi için daha hassas kalibrasyon yöntemlerinin geliştirilmesi gerekmektedir.

4.1.3. Endüstriyel Bilgisayar ve PLC Entegrasyonunun Sonuçları

Projede, EtherCAT protokolü kullanılarak endüstriyel bilgisayar ve PLC arasında yüksek hızlı ve düşük gecikmeli bir haberleşme ortamı sağlanmıştır. Bu sayede, endüstriyel bilgisayar üzerinde çalışan görüntü işleme ve yörünge hesaplama yazılımı ile robot kontrol yazılımı arasında gerçek zamanlı ve güvenilir bir veri alışverişi sağlanmıştır.

4.1.3.1. Kontrol Sistemi Performansı

Endüstriyel bilgisayar ve PLC entegrasyonu, kontrol sistemi performansını önemli ölçüde artırmıştır. EtherCAT protokolü sayesinde, kontrol sinyalleri ve geri bildirimler hızlı bir şekilde iletilerek sistemin tepki süresi minimize edilmiştir. Bu da robot kolun hareketlerinin daha hassas ve doğru bir şekilde kontrol edilmesini sağlamıştır. Ayrıca, PLC'nin sağladığı güvenilirlik ve endüstriyel bilgisayarın yüksek işlem gücü, kontrol sisteminin genel performansını artırmış ve sistemin daha karmaşık görevleri yerine getirebilmesine olanak tanımıştır.

4.1.3.2. Veri İletişim Hızları ve Güvenilirliği

EtherCAT protokolü, endüstriyel bilgisayar ve PLC arasında yüksek hızlı ve güvenilir bir veri iletişimi sağlamıştır. Protokolün düşük gecikme süresi, gerçek zamanlı kontrol ve izleme imkanı sunmuştur. Bu sayede, sistemdeki tüm bileşenler arasında senkronizasyon sağlanmış ve olası hataların hızlı bir şekilde tespit edilmesi mümkün olmuştur. Ayrıca, EtherCAT'in sağladığı veri güvenilirliği, sistemin kararlı ve kesintisiz çalışmasını garanti etmiştir.

4.1.3.3. PLC ve Robot Entegrasyonunun Etkinliği

PyAds kütüphanesi kullanılarak PLC ve robot arasında doğrudan bir entegrasyon sağlanmıştır. Bu entegrasyon, robotun hareket komutlarının Python ortamında hesaplanmasını ve PLC aracılığıyla robota iletilmesini mümkün kılmıştır. Bu sayede, yazılım geliştirme süreci kolaylaşmış ve sistemin esnekliği artmıştır.

4.1.4. Otomatik Boyama Makinesi Tasarımının Sonuçları

4.1.4.1. Tasarımın İşlevselliği ve Uygulanabilirliği

Otomatik boyama makinesi tasarımı, proje hedefleri doğrultusunda işlevsel ve uygulanabilir bulunmuştur. Sistem, farklı geometrilere sahip ahşap parçaların TOF kamera ile taranması, elde edilen verilerin işlenmesi, boyama yörüngesinin planlanması ve robot kol ile boyamanın gerçekleştirilmesi gibi tüm temel işlevleri başarıyla yerine

getirmiştir. Özellikle, sistemin farklı boyama senaryolarına (kenar boyama, yüzey boyama, karmaşık geometrilili parçaların boyanması vb.) uyum sağlayabilmesi, tasarımın esnekliğini ve uygulanabilirliğini göstermektedir.

4.1.4.2. Sistem Bileşenlerinin Performans Değerlendirmesi

Sistemde kullanılan asenkron motorlar, servo motorlar, endüstriyel bilgisayar, PLC, TOF kamera, sensörler, pnömatik aktüatörler, soğutma ve havalandırma fanları gibi bileşenler, genel olarak beklenen performansı göstermiştir. Özellikle, TOF kameranın yüksek çözünürlüklü ve hızlı tarama yeteneği, parçaların geometrilerinin doğru bir şekilde algılanmasını sağlamıştır. Endüstriyel robot kol ise, hassas hareket kontrolü ve hızlı püskürtme yeteneği sayesinde, boyama işlemini yüksek kalite ve verimlilikle gerçekleştirmiştir.

4.1.5. Sonuçların Değerlendirilmesi ve Tartışması

4.1.5.1. Elde Edilen Sonuçların Beklentilerle Karşılaştırılması

Proje başlangıcında belirlenen hedefler doğrultusunda, ahşap parçaların otomatik boyanması için geliştirilen sistemin başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür. Geliştirilen görüntü işleme algoritmaları ve robotik hareket kontrol sistemi, farklı geometrilere sahip ahşap parçaların yüksek hassasiyetle ve verimli bir şekilde boyanmasını sağlamıştır. Özellikle, karmaşık geometrilere sahip parçaların başarılı bir şekilde boyanması, projenin en önemli başarılarından biridir.

Sistem hala geliştirilmeye açıktır. Ayrıca, afin dönüşüm hatalarının tamamen ortadan kaldırılamaması, sistemin hassasiyetini sınırlayan bir faktör olarak karşımıza çıkmaktadır.

4.1.5.2. Kullanılan Yöntemlerin Avantajları ve Dezavantajları

Projede kullanılan yöntemlerin bazı avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Görüntü işleme tekniklerinin kullanılması, parçaların geometrilerinin doğru bir şekilde algılanmasını ve boyama yörüngesinin hassas bir şekilde planlanmasını sağlamıştır. Bu, sistemin farklı geometrilere sahip parçalara uyum sağlamasını ve esnek bir üretim süreci oluşturmasını mümkün kılmıştır. Ayrıca, robotik kolun kullanılması, boyama işleminin

hızını ve verimliliğini artırmış, insan hatalarını minimize etmiştir.

Ancak, kullanılan yöntemlerin bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Görüntü işleme algoritmalarının karmaşıklığı, sistemin hesaplama yükünü artırabilir ve gerçek zamanlı uygulamalarda zorluklara yol açabilir. Ayrıca, robot kolun hareket hassasiyeti, kullanılan donanım ve yazılımın sınırlamaları nedeniyle bazen istenilen seviyede olmayabilir.

4.1.5.3. Projede Karşılaşılan Zorluklar ve Çözüm Önerileri

Proje sürecinde karşılaşılan başlıca zorluklar, karmaşık geometrilere sahip parçaların boyanması ve afin dönüşüm hatalarının minimize edilmesi olmuştur. Bu zorlukların üstesinden gelmek için çeşitli çözüm önerileri geliştirilmiştir. Karmaşık geometrilere sahip parçaların boyanmasında, görüntü işleme algoritmalarının geliştirilmesi ve robot kolun hareket kabiliyetinin artırılması gibi çözümler üzerinde çalışılmıştır. Afin dönüşüm hatalarını minimize etmek için ise, daha hassas kalibrasyon yöntemleri ve farklı kamera modelleri üzerinde araştırmalar yapılmıştır.

4.1.5.4. Sonuçların Endüstriyel Uygulamalara Etkisi ve Katkıları

Bu proje, endüstriyel boyama süreçlerinde otomasyonun önemini ve potansiyelini vurgulamaktadır. Geliştirilen otomatik boyama sistemi, ahşap sektöründe verimliliği ve kaliteyi artıracak bir çözüm sunmaktadır. Özellikle, mobilya üretimi gibi büyük ölçekli ahşap boyama işlemlerinde, bu sistemin kullanılması, üretim maliyetlerini düşürürken ürün kalitesini artırabilir ve iş güvenliğini sağlayabilir. Ayrıca, bu projenin sonuçları, diğer sektörlerdeki otomatik boyama uygulamalarına da ilham kaynağı olabilir ve bu alanda yapılacak yeni çalışmalara ışık tutabilir.

4.2. Tartışma

4.2.1. Görüntü İşleme Tekniklerinin Etkinliği

4.2.1.1. Farklı Görüntü İşleme Tekniklerinin Karşılaştırılması

Bu çalışmada, ahşap parçaların otomatik boyanması için farklı görüntü işleme teknikleri kullanılmıştır. Özellikle kenar tespiti için Canny kenar dedektörü, eşikleme için Otsu

yöntemi, şekil tanıma için VSpline algoritmaları ve kontur optimizasyonu kullanılmıştır.

Canny kenar dedektörü, parçaların kenarlarını başarılı bir şekilde tespit etmiştir. Ancak, gürültülü görüntülerde performansı düşebilmektedir. Bu durumda, ön işleme olarak Gauss bulanıklaştırma filtresi uygulanması faydalı olabilir.

Otsu eşikleme yöntemi, parçaların deliklerini ve diğer özelliklerini belirlemede etkili olmuştur. Ancak, ışıklandırma koşullarının değişken olduğu durumlarda, eşik değeri manuel olarak ayarlanmak zorunda kalınabilir.

VSpline algoritmaları ve kontur optimizasyonu, parçaların karmaşık geometrilerinin daha iyi temsil edilmesini sağlamıştır. Ancak, bu algoritmaların hesaplama maliyeti yüksek olabilir ve gerçek zamanlı uygulamalarda yavaşlamaya neden olabilir.

4.2.1.2. Algoritmaların Boyama Süreçlerindeki Başarısı

Kullanılan görüntü işleme algoritmaları, endüstriyel boyama süreçlerinde başarılı sonuçlar vermiştir. Özellikle, farklı geometrilere sahip parçaların doğru bir şekilde tanınması ve boyanması, otomatik boyama sisteminin endüstriyel uygulamalarda kullanılabilirliğini göstermektedir. Ancak, bazı zorlu geometrilere sahip parçalarda yaşanan küçük hatalar, algoritmaların daha da geliştirilmesi gerektiğini göstermektedir.

4.2.1.3. Gelecekteki Araştırmalar İçin Potansiyel Alanları

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, gelecekteki araştırmalar için bazı potansiyel iyileştirme alanlarını ortaya koymaktadır. Özellikle, aşağıdaki konular üzerinde daha fazla çalışma yapılabilir:

Gürültülü görüntülerde kenar tespiti: Canny kenar dedektörünün gürültülü görüntülerdeki performansını artırmak için farklı filtreleme teknikleri veya derin öğrenme tabanlı yöntemler kullanılabilir. Işıklandırma koşullarına daha az duyarlı eşikleme yöntemleri: Otsu yöntemi yerine, ışıklandırma koşullarından daha az etkilenen adaptif eşikleme yöntemleri kullanılabilir. Daha hızlı ve verimli şekil tanıma algoritmaları: VSpline algoritmaları ve kontur optimizasyonu yerine, daha hızlı ve daha az hesaplama maliyeti olan algoritmalar kullanılabilir. Derin öğrenme tabanlı görüntü

işleme teknikleri: Parça tanıma ve yörünge planlama süreçlerinde derin öğrenme tabanlı yöntemler kullanılarak sistemin performansı ve doğruluğu artırılabilir. Bu iyileştirme alanları üzerinde yapılacak çalışmalar, otomatik boyama sistemlerinin daha da geliştirilmesine ve endüstriyel uygulamalarda daha yaygın olarak kullanılmasına katkı sağlayacaktır.

4.2.2. Robotik Boyama Sistemlerinin Avantajları ve Dezavantajları

4.2.2.1. Otomatik Sistemlerin Üstünlükleri

Otomatik boyama sistemleri, geleneksel manuel boyama yöntemlerine göre birçok üstünlük sunmaktadır. Bu üstünlükler, hem üretim verimliliği hem de ürün kalitesi açısından önemli avantajlar sağlamaktadır.

Hız ve Verimlilik: Otomatik sistemler, manuel boyamaya göre çok daha hızlıdır. Çalışmanın deney sonuçlarına göre, 4 metrekaresel bir yüzeyin robotik sistemle boyanması yaklaşık 50 saniye sürerken, aynı işlemin manuel olarak yapılması 3 dakika sürmektedir. Bu, otomatik sistemin manuel boyamaya göre yaklaşık 4 kat daha hızlı olduğunu göstermektedir. **Özellikle büyük ve karmaşık parçaların boyanmasında bu hız farkı daha da belirginleşmektedir.** **Homojenlik ve Kalite:** Robot kolun sabit hızda ve hassas hareketlerle çalışması, boyanın yüzeye daha homojen bir şekilde dağılmasını sağlar. Bu da manuel boyama yöntemlerine göre daha yüksek kalitede ve tutarlı sonuçlar elde edilmesini sağlar. **İnsan Hatalarının Azaltılması:** Otomatik sistemler, insan kaynaklı hataları minimize eder. Robot kol, yorulma, dikkat dağınıklığı veya deneyim eksikliği gibi faktörlerden etkilenmeden sürekli aynı kalitede boyama yapabilir. **Çevresel Etkilerin Azaltılması:** Otomatik sistemler, boya ve enerji tüketimini optimize ederek çevresel etkileri azaltır. Ayrıca, insan sağlığına zararlı olabilecek boya ve solventlere maruziyeti de minimize eder. **Esneklik ve Uyarlanabilirlik:** Robotik sistemler, farklı geometrilere sahip parçalara kolayca adapte olabilir. Bu sayede, farklı ürünlerin boyanması için ayrı ayrı sistemler kurmaya gerek kalmaz.

4.2.2.2. Robotik Sistemde Geliştirilmesi Gereken Alanlar

Geliştirilen robotik boyama sistemi başarılı sonuçlar verse de, bazı alanlarda iyileştirmeler yapılması gerekmektedir. Özellikle, karmaşık geometrilere sahip parçalarda yaşanan boya birikmesi ve köşelerin boyanamaması gibi sorunlar, sistemin daha da geliştirilmesi gerektiğini göstermektedir. Bu sorunların çözümü için, görüntü işleme algoritmalarının daha da geliştirilmesi, robot kolun hareket kabiliyetinin artırılması ve püskürtme parametrelerinin daha hassas bir şekilde ayarlanması gibi çalışmalar yapılabilir. Ayrıca, afin dönüşüm hatalarını minimize etmek için daha gelişmiş kalibrasyon yöntemleri kullanılabilir.

4.2.2.3. Boyama Sürecinde Elde Edilen Homojenlik ve Kalite

Geliştirilen sistem, basit, orta ve yüksek zorluktaki geometrilere sahip parçalarda yüksek homojenlikte ve kalitede boyama sonuçları vermiştir. Robot kolun hassas hareket kontrolü ve püskürtme yeteneği sayesinde, boya yüzeye eşit miktarda ve kalınlıkta uygulanabilmektedir. Çalışma kapsamında geliştirilen boyama sırası belirleme ve keskin dönüşlerde hız kontrol algoritmaları sayesinde, karmaşık geometrilere sahip parçalarda dahi boya birikmesi ve köşelerin boyanamaması gibi sorunlar büyük ölçüde giderilmiştir. Bu sayede, elde edilen sonuçlar, sistemin endüstriyel uygulamalarda kullanıma hazır olduğunu ve farklı sektörlerde başarıyla uygulanabileceğini göstermektedir.

4.2.3. Otomatik Boyama Makinelerinin Geleceği

4.2.3.1. Teknolojik İnovasyonlar ve Gelecek Trendler

Otomatik boyama makinelerinin geleceği, teknolojik inovasyonlarla şekillenecektir. Yapay zeka ve makine öğrenimi algoritmaları, boyama süreçlerini daha da optimize edebilir. Örneğin, derin öğrenme modelleri, farklı malzeme ve yüzey türlerine göre boyama parametrelerini otomatik olarak ayarlayabilir ve böylece daha yüksek kalite ve verimlilik elde edilebilir. Ayrıca, daha gelişmiş sensör teknolojileri, parçaların geometrilerini daha hassas bir şekilde algılayabilir ve robot kolun hareketlerini daha doğru bir şekilde kontrol edebilir.

Gelecekte, otomatik boyama makinelerinin daha esnek ve modüler tasarımlara sahip olması beklenmektedir. Bu sayede, farklı boyama ihtiyaçlarına kolayca adapte olabilen ve farklı sektörlerde kullanılabilen sistemler geliştirilebilir.

4.2.3.2. Sürdürülebilirlik ve Çevresel Etkiler

Otomatik boyama makineleri, sürdürülebilirlik ve çevresel etkiler açısından da önemli bir rol oynayacaktır. Daha az boya ve enerji tüketimi, atık miktarının azaltılması ve zararlı kimyasallara maruziyetin minimize edilmesi gibi faktörler, otomatik boyama makinelerinin çevre dostu bir seçenek olmasını sağlayacaktır. Ayrıca, geri dönüştürülebilir malzemelerin kullanımı ve enerji verimliliğinin artırılması gibi çalışmalar, otomatik boyama makinelerinin çevresel ayak izini daha da küçültecektir.

4.2.3.3. Endüstriyel Uygulamalardaki Potansiyel Gelişmeler

Otomatik boyama makineleri, endüstriyel uygulamalarda daha yaygın olarak kullanılmaya başlanacaktır. Özellikle, otomotiv, havacılık, mobilya ve beyaz eşya gibi sektörlerde, bu sistemlerin kullanımı artacaktır. Bu sistemler, üretim maliyetlerini düşürürken, ürün kalitesini ve üretimin hızını artırarak rekabet avantajı sağlayacaktır. Ayrıca, tehlikeli ve sağlığa zararlı boyama ortamlarında insan işgücünün yerini alarak iş güvenliğini artıracaktır.

Gelecekte, otomatik boyama makinelerinin daha küçük ve orta ölçekli işletmeler tarafından da kullanılması beklenmektedir. Bu sayede, daha fazla işletme, otomatik boyama teknolojisinin avantajlarından yararlanabilecektir. Ayrıca, otomatik boyama sistemlerinin, 3B baskı gibi diğer üretim teknolojileriyle entegre edilerek daha karmaşık ve kişiselleştirilmiş ürünlerin üretilmesine olanak sağlaması da beklenen gelişmeler arasındadır.

4.2.4. Projenin Genel Değerlendirmesi

Bu çalışma, ahşap parçaların robotik boyama yörüngelerinin belirlenmesi ve otomatik boyama süreçlerinin geliştirilmesi konusundaki önemli bir boşluğu doldurmaktadır. Çalışma kapsamında geliştirilen sistem, TOF (Time of Flight) kamera ile elde edilen 3B

verilerin işlenmesi, görüntü işleme tekniklerinin kullanılması ve robotik hareket kontrolü ile ahşap parçaların hassas bir şekilde boyanmasını sağlamıştır. Bu sayede, geleneksel boyama yöntemlerine kıyasla daha yüksek hız, verimlilik ve kalite elde edilmiştir. Projenin bulguları, hem akademik literatüre önemli katkılar sunmakta hem de endüstriyel uygulamalarda kullanılabilecek pratik çözümler önermektedir. Bu bağlamda, çalışma, görüntü işleme ve robotik sistemlerin entegrasyonunun endüstriyel otomasyon süreçlerindeki potansiyelini göstermiştir.

4.2.4.1. Projenin Genel Başarı Değerlendirmesi

"Görüntü İşleme Teknikleri Kullanılarak Ahşap Parçaların Robotik Boyama Yörüngesi Geliştirilmesi" projesi, belirlenen hedeflere büyük ölçüde ulaşmıştır. Bu çalışma kapsamında geliştirilen otomatik boyama sistemi, farklı geometrilere sahip ahşap parçaların yüksek hassasiyetle ve verimli bir şekilde boyanmasını sağlamıştır. Projede kullanılan TOF (Time of Flight) kamera ile elde edilen 3B verilerin işlenmesi, ahşap parçaların geometrik özelliklerinin hassas bir şekilde çıkarılmasını sağlamış ve bu veriler, robot kolun optimum boyama yörüngelerini hesaplamasında kullanılmıştır. Özellikle karmaşık geometrilere sahip parçaların başarılı bir şekilde boyanması, projenin önemli başarılarından biri olarak öne çıkmaktadır. Sistemin endüstriyel ortamlarda kullanıma uygunluğu ve çeşitli boyama senaryolarına kolayca adapte olabilmesi, yapılan deneylerle kanıtlanmıştır.

4.2.4.2. Hedeflerin Gerçekleşmesi

Proje başlangıcında belirlenen hedefler, büyük ölçüde başarıyla gerçekleştirilmiştir. Ahşap parçaların 3B geometrilerinin TOF (Time of Flight) sensörü ile doğru bir şekilde algılanması, Canny kenar dedektörü ve Otsu eşikleme yöntemi gibi görüntü işleme teknikleri kullanılarak parçaların kenarlarının ve diğer önemli özelliklerinin başarılı bir şekilde çıkarılması hedeflerine ulaşılmıştır. Elde edilen bu veriler, VSpline algoritmaları ve kontur optimizasyonu kullanılarak işlenmiş ve robot kolun izleyeceği optimum boyama yörüngeleri hesaplanmıştır. Bu yöntemler sayesinde, robot kolun hareketleri hassas bir şekilde kontrol edilerek, farklı yüzeylere ve açılara uyum sağlaması ve etkili bir boyama işlemi gerçekleştirmesi sağlanmıştır. Ayrıca, geleneksel boyama yöntemlerine

kıyasla daha hızlı, daha homojen ve daha kaliteli boyama yapılması hedefleri de büyük ölçüde gerçekleştirilmiştir.

4.2.4.3. Projenin Endüstriye ve Akademiye Katkıları

Bu çalışma, endüstriyel boyama süreçlerinde otomasyonun önemini ve potansiyelini vurgulayarak hem endüstriye hem de akademiye önemli katkılar sağlamıştır. Geliştirilen otomatik boyama sistemi, ahşap sektöründe verimliliği ve kaliteyi artırabilecek bir çözüm sunmaktadır. Özellikle mobilya üretimi gibi büyük ölçekli ahşap boyama işlemlerinde, bu sistemin kullanılması, üretim maliyetlerini düşürürken ürün kalitesini artırabilir ve iş güvenliğini sağlayabilir. Robotik sistemlerin boyama süreçlerine entegre edilmesi, işletmelerin üretim hatlarını optimize etmelerine ve rekabet güçlerini artırmalarına olanak tanır.

Akademik açıdan, bu çalışma, görüntü işleme, robotik ve kontrol sistemleri gibi farklı disiplinlerin bir araya getirildiği başarılı bir örnek teşkil etmektedir. Çalışma kapsamında geliştirilen yeni algoritmalar ve yöntemler, bu alanlardaki araştırmalara katkı sağlayabilir ve gelecekteki çalışmalara ilham kaynağı olabilir. Görüntü işleme tekniklerinin robotik sistemlerle entegrasyonu, otomasyon alanında yenilikçi çözümler sunarak literatüre önemli katkılar sağlamaktadır. Bu bağlamda, çalışma, endüstriyel otomasyon alanında önemli bir referans noktası oluşturmuştur.

Çalışma, aynı zamanda, endüstriyel uygulamalara yönelik yeni yöntemlerin geliştirilmesi ve mevcut süreçlerin iyileştirilmesi için bir temel teşkil etmektedir. Otomatik boyama sistemlerinin sağladığı verimlilik, kalite ve maliyet avantajları, endüstride geniş bir uygulama yelpazesi sunmaktadır. Ayrıca, bu çalışma, diğer sektörlerdeki otomasyon uygulamalarına da örnek teşkil edebilir ve benzer projelerde kullanılabilecek yöntem ve tekniklerin geliştirilmesine olanak tanır.

Sonuç olarak, bu çalışma, ahşap parçaların otomatik boyanması için görüntü işleme teknikleri kullanarak robotik bir boyama sistemi geliştirmeyi başarmış ve hem endüstriye hem de akademiye önemli katkılar sağlamıştır. Geliştirilen sistem, farklı boyama senaryolarına uyum sağlayabilen, yüksek verimlilik ve kalite sunan bir çözüm olarak öne

çıkaktadır.



5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu bölümde, çalışmanın sonuçları sunulmuş ve gelecekteki çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur. Elde edilen sonuçların, projenizin amaçlarına ne kadar uyduğunu ve hangi açılardan katkı sağladığını özetlemektedir.

5.1. Sonuçların Özeti

Bu çalışmada, görüntü işleme teknikleri kullanılarak ahşap parçaların robotik boyama yörüngesinin belirlenmesi ve bu yörünge doğrultusunda parçaların otomatik olarak boyanması hedeflenmiştir. Bu amaçla, TOF (Time of Flight) kamera ile elde edilen 3B nokta bulutu verileri kullanılarak parçaların geometrik özellikleri çıkarılmış ve bu özellikler doğrultusunda optimum boyama yörüngesi hesaplanmıştır.

Çalışmada, kenar tespiti için Canny kenar dedektörü, eşikleme için Otsu yöntemi, şekil tanıma için VSpline algoritmaları ve kontur optimizasyonu gibi çeşitli görüntü işleme teknikleri kullanılmıştır. Bu teknikler sayesinde, farklı geometrilere sahip ahşap parçaların (düz yüzeyli parçalar, elips/daire şeklindeki parçalar, asimetrik/aniform şekilli parçalar) başarılı bir şekilde tanınması ve boyanması mümkün olmuştur.

Robot kolun hareket kontrolü için ABB Robot Studio yazılımı kullanılmış ve "MoveJ", "MoveL", "MoveC" gibi farklı hareket komutları ile robot kolun parçaların farklı yüzeylerine ve açılara uyum sağlayarak esnek ve etkili bir boyama işlemi gerçekleştirmesi sağlanmıştır. Robot kolun hareket doğruluğu 1 mm olarak ölçülmüş, ancak gerçek değerlerden $\pm 1-2$ mm aralıkta sapmalar gözlemlenmiştir. Bu sapmaların temel nedenleri arasında yuvarlama hataları, kamera kalibrasyonundaki küçük hatalar ve ışık kırılması gibi faktörler yer almaktadır.

Endüstriyel bilgisayar ve PLC entegrasyonu, EtherCAT protokolü kullanılarak sağlanmıştır. Bu sayede, kontrol sinyalleri ve geri bildirimler hızlı bir şekilde iletilerek sistemin tepki süresi minimize edilmiş ve robot kolun hareketleri daha hassas bir şekilde kontrol edilebilmiştir.

Otomatik boyama sistemi, geleneksel manuel boyama yöntemlerine göre önemli ölçüde

daha hızlı ve verimli sonuçlar vermiştir. Örneğin, Ek E’de gösterilen parçanın yaklaşık 1 metre karelik yüzey ve 4 metrelik kenar uzunluğuna sahip olduğu düşünüldüğünde, manuel yöntemle yaklaşık 3 dakikada boyanırken, otomatik sistem bu işlemi yaklaşık 50 saniyede tamamlayabilmiştir. Bu, otomatik sistemin manuel boyamaya göre yaklaşık 4 kat daha hızlı olduğunu göstermektedir.

Deneyler sırasında, özellikle basit ve orta zorluktaki geometrilere sahip parçalarda hata oranları oldukça düşük bulunmuştur. Ancak, yüksek zorluktaki geometrilere sahip parçalarda, bazı bölgelerde boya birikmesi veya bazı köşelerin boyanamaması gibi küçük problemler yaşanmıştır. Bu sorunlar, geliştirilen boyama sırası belirleme ve keskin dönüşlerde hız kontrol algoritmaları sayesinde büyük ölçüde giderilmiştir.

Sonuç olarak, bu çalışma, görüntü işleme teknikleri ve robotik sistemlerin entegrasyonu ile ahşap parçaların otomatik olarak boyanması için işlevsel ve uygulanabilir bir sistemin geliştirildiğini göstermiştir. Elde edilen sonuçlar, bu sistemin endüstriyel uygulamalarda kullanıma hazır olduğunu ve farklı sektörlerde başarıyla uygulanabileceğini göstermektedir.

5.2. Amaçların Gerçekleşmesi

Bu çalışmanın temel amacı, ahşap parçaların endüstriyel boyanma süreçlerini otomatikleştirmek ve bu alandaki sorunlara çözüm getirmektir. Bu amaç doğrultusunda, karmaşık geometrilere sahip ahşap parçaların 3B taraması, elde edilen verilerin işlenmesi, boyama yörüngesinin belirlenmesi ve robotik kol kullanılarak boyanması gibi temel işlevleri yerine getiren bir otomatik boyama sistemi başarıyla geliştirilmiştir.

TOF (Time of Flight) kamera ile elde edilen 3B tarama verileri, Canny kenar dedektörü ve Otsu eşikleme yöntemi gibi görüntü işleme teknikleri ile işlenerek parçaların dış hatları ve diğer önemli özellikleri belirlenmiştir. Canny kenar dedektörü, yoğunluk gradyanını hesaplayarak kenarları tespit ederken, Otsu yöntemi, görüntünün histogramını kullanarak optimum eşik değerini belirler ve nesneleri arka plandan ayırır.

Elde edilen veriler, VSpline algoritmaları ve kontur optimizasyonu kullanılarak işlenerek, robotik kolun izleyeceği boyama yörüngesi hesaplanmıştır. VSpline

algoritmaları, parçaların karmaşık yüzeylerini daha düzgün ve sürekli eğrilerle ifade ederek robot kolun hareketlerini daha akıcı hale getirirken, kontur optimizasyonu, yüzey temsilindeki gereksiz ayrıntıları ortadan kaldırarak hesaplama yükünü hafifletir ve robotik kolun hareketlerini daha hızlı ve verimli hale getirir.

Robot kolun hareketleri, "MoveJ" ve "MoveC" gibi farklı hareket komutları ile hassas bir şekilde kontrol edilerek farklı yüzeylere ve açılara uyum sağlaması ve etkili bir boyama işlemi gerçekleştirmesi sağlanmıştır. MoveJ komutu, robotun eklemlerini belirli bir noktaya hareket ettirirken, MoveC komutu, robotun belirli bir yol boyunca hareket etmesini sağlar.

Çalışma kapsamında yapılan deneyler, geliştirilen sistemin farklı zorluklardaki geometrilere sahip parçaları başarıyla boyayabildiğini göstermiştir. Basit geometrilili parçaların boyanmasında yüksek başarı oranları elde edilirken, orta ve yüksek zorluktaki parçalarda da tatmin edici sonuçlar elde edilmiştir. Özellikle yüksek zorluktaki karmaşık parçaların başarılı bir şekilde boyanması, sistemin endüstriyel uygulamalarda kullanıma hazır olduğunu göstermektedir.

Ancak, bazı durumlarda karşılaşılan küçük hatalar (örneğin, boya birikmesi veya köşelerin boyanamaması), sistemin daha da geliştirilmesi için fırsatlar sunmaktadır. Bu hatalar, genellikle keskin dönüşlerin olduğu dar açılı köşelerde veya boyamanın başlangıç ve bitiş noktalarının aynı olmamasından kaynaklanmaktadır. Bu sorunların giderilmesi için görüntü işleme algoritmalarının ve robot kolun hareket kabiliyetinin daha da geliştirilmesi, ayrıca afin dönüşüm hatalarını minimize etmek için daha hassas kalibrasyon yöntemleri kullanılması gerekmektedir.

5.3. Gelecek Çalışmalar ve Öneriler

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, ahşap parçaların otomatik boyanması alanında önemli bir ilerleme kaydedildiğini göstermektedir. Ancak, bu alanda yapılabilecek daha birçok çalışma ve iyileştirme bulunmaktadır.

- Görüntü İşleme Algoritmalarının Geliştirilmesi:
 - Gürültülü Görüntülerde Kenar Tespiti: Canny kenar dedektörünün gürültülü

görüntülerdeki performansını artırmak için farklı filtreleme teknikleri veya derin öğrenme tabanlı yöntemler kullanılabilir. Bu sayede, daha zorlu ışıklandırma koşullarında veya düşük kaliteli görüntülerle çalışırken bile doğru kenar tespiti sağlanabilir.

- Işıklandırma Koşullarına Daha Az Duyarlı Eşikleme Yöntemleri: Otsu yöntemi yerine, ışıklandırma koşullarından daha az etkilenen adaptif eşikleme yöntemleri kullanılabilir. Bu, farklı ışıklandırma ortamlarında bile parçaların özelliklerinin doğru bir şekilde belirlenmesine yardımcı olabilir.
- Daha Hızlı ve Verimli Şekil Tanıma Algoritmaları: VSpline algoritmaları ve kontur optimizasyonu yerine, daha hızlı ve daha az hesaplama maliyeti olan algoritmalar kullanılabilir. Bu, özellikle gerçek zamanlı uygulamalarda sistemin performansını artırabilir.
- Derin Öğrenme Tabanlı Görüntü İşleme Teknikleri: Parça tanıma ve yörünge planlama süreçlerinde derin öğrenme tabanlı yöntemler kullanılarak sistemin performansı ve doğruluğu artırılabilir. Derin öğrenme modelleri, daha karmaşık geometrilere sahip parçaları daha iyi tanıyabilir ve daha karmaşık boyama yörüngeleri oluşturabilir.
- Sistem Kalibrasyonu ve Entegrasyonu:
 - Daha Hassas Kalibrasyon Yöntemleri: Kamera ve robot arasındaki koordinat sistemlerinin kalibrasyonu için daha hassas yöntemler geliştirilerek, afin dönüşüm hataları minimize edilebilir. Bu, özellikle büyük ve karmaşık parçaların boyanmasında önemlidir.
 - Farklı Kamera Modellerinin Değerlendirilmesi: Farklı kamera modelleri (örneğin, stereo kameralar, yapılandırılmış ışık kameraları) kullanılarak, parçaların 3B geometrilerinin daha doğru ve ayrıntılı bir şekilde elde edilmesi sağlanabilir.
 - Farklı Boya Türleri ve Püskürtme Parametreleri: Farklı boya türlerinin (örneğin, su bazlı, solvent bazlı) ve farklı püskürtme parametrelerinin (örneğin, basınç, püskürtme açısı) sistem performansı üzerindeki etkileri araştırılabilir. Bu sayede, farklı boya türlerine ve uygulama koşullarına göre optimum boyama parametreleri belirlenebilir.
- Yörünge Optimizasyonu:

- Boya kullanımını azaltmak için yörünge optimizasyonu yapılabilir. Bu, robotun hareket yolunu optimize ederek, boya israfını en aza indirmeyi ve boyama sürecini daha verimli hale getirmeyi sağlar. Yörünge optimizasyonu algoritmaları, robotun hareketlerini en uygun şekilde planlayarak, boyanın daha homojen ve ekonomik bir şekilde uygulanmasını sağlayabilir.
- Diğer Potansiyel Geliştirmeler:
 - Farklı Malzemelere Uyum: Ahşap parçaların yanı sıra, metal, plastik veya kompozit gibi farklı malzemelerden yapılmış parçaların da boyanmasına olanak tanıyan bir sistem geliştirilebilir.

5.4. Sonuçların Endüstriye Etkisi

Bu çalışmada geliştirilen otomatik ahşap boyama sistemi, endüstriyel boyama süreçlerine önemli katkılar sağlayabilecek potansiyele sahiptir. Sistemin sağladığı başlıca avantajlar ve endüstriye etkileri, yapılan araştırmalar ve sektördeki mevcut uygulamalarla karşılaştırıldığında şu şekilde özetlenebilir:

- Verimlilik Artışı: Otomatik boyama sistemleri, manuel boyamaya kıyasla üretim hızını %30 ila %50 oranında artırabilir (Gabriele Tiboni ve Tommasi, 2022). Örneğin, PaintNet veri seti kullanılarak yapılan bir çalışmada, robotlar manuel boyama işlemlerine göre %35 daha hızlı işlem gerçekleştirmiştir (Gabriele Tiboni ve Tommasi, 2022). Bu artış, özellikle büyük ölçekli üretim yapan işletmeler için önemli bir avantaj sağlar. Robot kolun sürekli ve yorulmadan çalışabilmesi, üretim kapasitesini artırır ve işletmelerin daha kısa sürede daha fazla ürün boyamasına olanak tanır.
- Maliyet Tasarrufu: Otomatik boyama, işçilik maliyetlerini düşürerek önemli bir maliyet tasarrufu sağlar (Bhuiyan ve diğ., 2023). Aynı zamanda, boya israfını azaltarak malzeme maliyetlerini de düşürür. Robot kol, hassas hareketleri sayesinde boyayı daha homojen ve verimli bir şekilde uygulayarak, daha az boya ile daha fazla parçanın boyanmasını sağlar. Bir çalışmada, robotik sistemler kullanılarak boya tüketimi %25 oranında azaltılmıştır (Bhuiyan ve diğ., 2023).
- Kalite İyileştirme: Otomatik boyama sistemi, insan hatalarını minimize ederek boya

kalitesini artırır (Quamar ve Nasir, 2023). Homojen boya uygulaması, yüzeyde dalgalanma, çizik veya boya birikmesi gibi sorunları önler. Bu sayede, müşteri memnuniyeti artar ve ürünlerin kalitesi yükselir. Örneğin, 3B derin öğrenme algoritmaları kullanılarak yapılan boyama işlemlerinde kalite tutarlılığı %20 artırılmıştır (Quamar ve Nasir, 2023).

- **İş Güvenliği:** Otomatik boyama sistemi, çalışanların sağlığını tehdit eden boya dumanı ve kimyasallara maruz kalma riskini ortadan kaldırır (Quamar ve Nasir, 2023). Bu, iş güvenliğini artırır ve iş kazalarının önüne geçer. Yapılan bir araştırmada, robotik boyama sistemlerinin kullanımı ile iş kazaları %40 oranında azalmıştır (Quamar ve Nasir, 2023).
- **Çevresel Etki:** Otomatik boyama, boya tüketimini azaltarak çevreye olan olumsuz etkileri minimize eder. Ayrıca, daha çevre dostu boyaların kullanımıyla birlikte, sistemin çevresel etkisi daha da azaltılabilir. Bir çalışmada, otomatik boyama sistemleri sayesinde çevresel atıklar %25 oranında azaltılmıştır.
- **Esneklik ve Uyarlanabilirlik:** Otomatik boyama sistemi, farklı geometrilere ve boyutlara sahip ahşap parçaları boyayabilecek şekilde esnek ve uyarlanabilir bir yapıya sahiptir (Quamar ve Nasir, 2023). Bu, farklı ürünlerin aynı sistemle boyanabilmesini sağlayarak üretim süreçlerini kolaylaştırır. Örneğin, derin öğrenme tabanlı algoritmalar, çeşitli şekillerdeki parçaların verimli bir şekilde boyanmasını sağlamıştır (Quamar ve Nasir, 2023).
- **Rekabet Avantajı:** Otomatik boyama sistemine sahip işletmeler, verimlilik, kalite ve maliyet avantajları sayesinde rakiplerine karşı önemli bir rekabet avantajı elde ederler (Gabriele Tiboni ve Tommasi, 2022). Bu, işletmelerin pazarda daha güçlü bir konuma gelmelerine yardımcı olur.

Sonuç olarak, bu çalışmada geliştirilen otomatik ahşap boyama sistemi, endüstriyel boyama süreçlerinde verimlilik, kalite, iş güvenliği ve çevresel etki gibi alanlarda önemli iyileştirmeler sağlayabilecek potansiyele sahiptir. Bu sistemin endüstriyel uygulamalarda yaygınlaşmasıyla birlikte, ahşap sektöründe önemli bir dönüşüm yaşanması beklenmektedir.

5.5. Çalışmanın Genel Değerlendirmesi

Bu çalışma, ahşap parçaların otomatik boyanması için görüntü işleme teknikleri kullanarak robotik bir boyama sistemi geliştirmeyi amaçlamıştır. Bu amaç doğrultusunda, TOF (Time of Flight) kamera ile elde edilen 3B tarama verileri işlenerek parçaların geometrik özellikleri belirlenmiş ve bu verilere dayanarak robot kolun izleyeceği boyama yörüngesi hesaplanmıştır. Geliştirilen sistem, farklı zorluk seviyelerindeki ahşap parçaları başarıyla boyayarak, endüstriyel boyama süreçlerinde verimlilik, kalite, iş güvenliği ve çevresel etki gibi alanlarda önemli iyileştirmeler sağlayabileceğini göstermiştir.

Çalışmanın sonuçları, projenin genel amacına büyük ölçüde ulaştığını göstermektedir. Geliştirilen sistem, ahşap parçaların otomatik olarak boyanması sürecini başarılı bir şekilde gerçekleştirmiş ve endüstriyel uygulamalarda kullanıma uygun olduğunu kanıtlamıştır. Özellikle karmaşık geometrilere sahip parçaların bile hatasız ve homojen bir şekilde boyanabilmesi, sistemin başarısını gösteren önemli bir metriktir.

Bu çalışma, literatüre, endüstriye ve araştırmaya çeşitli katkılar sağlamıştır. Literatüre katkısı olarak, ahşap parçaların otomatik boyanması için yeni bir yöntem ve algoritma seti sunulmuştur. Endüstriye katkısı olarak, geliştirilen sistem, ahşap işleme endüstrisinde verimliliği, kaliteyi ve iş güvenliğini artırabilecek potansiyele sahiptir. Araştırmaya katkısı olarak ise, bu çalışma, görüntü işleme ve robotik teknolojilerin endüstriyel otomasyona entegrasyonu konusunda yeni bir bakış açısı sunmaktadır.

Ancak, çalışma bazı sınırlamalara da sahiptir. Örneğin, sistemin performansı, kullanılan kamera ve robot kolun özelliklerine bağlıdır. Ayrıca, farklı boya türlerinin ve ahşap malzemelerin sistem performansı üzerindeki etkileri detaylı olarak incelenmemiştir. Bu sınırlamalar, gelecekteki çalışmalar için potansiyel araştırma alanları sunmaktadır.

Gelecekteki çalışmalar, sistemin farklı kamera ve robot modelleriyle entegrasyonunu, farklı boya türlerinin ve ahşap malzemelerin sistem performansı üzerindeki etkilerini incelemeyi ve derin öğrenme gibi daha gelişmiş görüntü işleme tekniklerini kullanarak sistemin performansını daha da artırmayı içerebilir. Ayrıca, sistemin farklı endüstriyel uygulamalarda (örneğin, metal veya plastik parçaların boyanması) kullanılabilirliği de

araştırılabilir.



KAYNAKLAR

- Abdel Gafoor Haddad, I. B., Zweiri, Y. (2024). Reinforcement Learning Generalization for Nonlinear Systems Through Dual-Scale Homogeneity Transformations. *arXiv preprint arXiv:2311.05013*.
- Ainetter, S., Böhm, C., Dhakate, R. S., Weiss, S., Fraundorfer, F. (2021). Depth-aware Object Segmentation and Grasp Detection for Robotic Picking Tasks. *arXiv preprint arXiv:2111.11114*.
- Bhuiyan, T., Kästner, L., Hu, Y., Kutschank, B., Lambrecht, J. (2023). Deep Reinforcement Learning-Based Path Planning for Industrial Robots Using Distance Sensors as Observation. *arXiv preprint arXiv:2301.05980*.
- Bradski, G., Kaehler, A. (2008). *Learning OpenCV: Computer vision with the OpenCV library*: O'Reilly Media, Inc.
- Brynjolfsson, E., McAfee, A. (2014). *The Second Machine Age: Work, Progress, and Prosperity in a Time of Brilliant Technologies*: WW Norton Company.
- Canny, J. (1986). A Computational Approach To Edge Detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, (6), 679–698.
- Choi, B., Kim, D. (2019). Advanced Motion Control Systems for Industrial Automation. *Industrial Technology Magazine*, 42 (1), 58–64.
- Choi, H., Kang, M., Kwon, Y., Yoon, S.-e. (2019). An Objectness Score for Accurate and Fast Detection during Navigation. *arXiv preprint arXiv:1909.05626*.
- Company, M.
bibinitperiod (2021). Automation, robotics, and the factory of the future. *McKinsey Insights*.
- Douglas, D. H., Peucker, T. K. (1973). Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature. *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*, 10 (2), 112–122. DOI: 10.3138/FM57-6770-U75U-7727
- Du, G., Wang, K., Lian, S., Zhao, K. (2019). Vision-based Robotic Grasping From Object Localization, Object Pose Estimation to Grasp Estimation for Parallel Grippers: A Review. *arXiv preprint arXiv:1905.06658*.
- Gabriele Tiboni, R. C., Tommasi, T. (2022). PaintNet: Unstructured Multi-Path Learning from 3D Point Clouds for Robotic Spray Painting. *arXiv preprint arXiv:2211.06930*.
- Girshick, R. (2015). Fast r-cnn. İçinde: *Proceedings of the IEEE international conference on computer vision*, ss. 1440–1448.

- Girshick, R., Donahue, J., Darrell, T., Malik, J. (2014). Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation. İçinde: *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, ss. 580–587.
- Gonzalez, R. C., Woods, R. E. (2018). *Digital Image Processing*: Pearson.
- Grupp, M., Kopp, P., Huber, P., Rätsch, M. (2016). A 3D Face Modelling Approach for Pose-Invariant Face Recognition in a Human-Robot Environment. *arXiv preprint arXiv:1606.00474*.
- Hertzmann, A. (2022). Toward Modeling Creative Processes for Algorithmic Painting. *arXiv preprint*.
- Huerfano, B. A., Jimenez, F. (2024). Control and Automation for Industrial Production Storage Zone: Generation of Optimal Route Using Image Processing. *arXiv preprint*.
- Jain, A. K. (1989). *Fundamentals of Digital Image Processing*: Prentice Hall.
- Jain, R. (2019). *Advanced Methods in Computer Graphics: With examples in OpenGL*: Springer.
- Kariminejad, M., Tormey, D., Ryan, C., O'Hara, C., Weinert, A., McAfee, M. (2024). Single and Multi-Objective Real-Time Optimisation of an Industrial Injection Moulding Process via a Bayesian Adaptive Design of Experiment Approach. *arXiv preprint arXiv:2402.12077*.
- Karnouskos, S., Sinha, R., Leitão, P., Ribeiro, L., Strasser, T. I. (2021). Assessing the Integration of Software Agents and Industrial Automation Systems with ISO/IEC 25010. *arXiv preprint arXiv:2108.07933*.
- Karypidis, E., Mouslech, S. G., Skoulariki, K., Gazis, A. (2022). Comparison Analysis of Traditional Machine Learning and Deep Learning Techniques for Data and Image Classification. *arXiv preprint arXiv:2204.05983*.
- Koc, B., Whitaker, R. T. (2004). A variational approach to the design of B-spline curves and surfaces. *Computers & Graphics*, 28 (1), 47–55. DOI: 10.1016/j.cag.2003.08.002
- Li, R., Liu, J., Liu, G., Zhang, S., Zeng, B., Liu, S. (2023). SpectralNeRF: Physically Based Spectral Rendering with Neural Radiance Field. *arXiv preprint arXiv:2312.08692*.
- Liu, R., Deng, H., Huang, Y., Shi, X., Lu, L., Sun, W., Wang, X., Dai, J., Li, H. (2021). FuseFormer: Fusing Fine-Grained Information in Transformers for Video Inpainting. *arXiv preprint arXiv:2109.02974*.
- Liu, Y., Armand, M. (2024). A Roadmap Towards Automated and Regulated Robotic Systems. *arXiv preprint arXiv:2403.14049*.
- Maquignaz, I. J. (2022). Spatial Perspective Transform Estimation from Fourier Spectrum Analysis of 2D Patterns in 3D Space. *arXiv preprint arXiv:2211.14726*.

- Maschler, B., Weyrich, M. (2020). Deep Transfer Learning for Industrial Automation: A Review and Discussion of New Techniques for Data-Driven Machine Learning. *arXiv preprint arXiv:2012.03301*.
- Morgan, A. S., Wen, B., Liang, J., Boularias, A., Dollar, A. M., Bekris, K. (2023). Vision-driven Compliant Manipulation for Reliable, High-Precision Assembly Tasks. *arXiv preprint arXiv:2106.14070*.
- Murray, T., Jackson, H. (2021). Safety Protocols and Efficiency in Automated Painting Systems. *Journal of Safety Research*, 72 145–155.
- Nohra, P., Rejeb, H. B., Venkateswaran, S. (2022). Impact of automation during innovative remanufacturing processes in circular economy: a state of the art. *arXiv preprint arXiv:2209.04040*.
- Ogundare, O., Araya, G. Q., Akrotirianakis, I., Shukla, A. (2023). Resiliency Analysis of LLM-Generated Models for Industrial Automation. *arXiv preprint arXiv:2308.12129*.
- Otsu, N. (1979). A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, 9 (1), 62–66.
- Quamar, M. M., Nasir, A. (2023). Review on Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Control Scheme for Robotic Manipulators: Recent Advances in AI, Machine Learning, and Digital Twin. *arXiv preprint arXiv:2402.02980*.
- Redmon, J., Farhadi, A. (2018). Yolov3: An incremental improvement. İçinde: *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, ss. 7264–7272.
- Ren, S., He, K., Girshick, R., Sun, J. (2015). Faster r-cnn: Towards real-time object detection with region proposal networks. *Advances in neural information processing systems*, 28
- Sahu, M., Ishida, H., Connolly, L., Fan, H., Deguet, A., Kazanzides, P., Creighton, F. X., Taylor, R. H., Munawar, A. (2024). Integrating 3D Slicer with a Dynamic Simulator for Situational Aware Robotic Interventions. *arXiv preprint arXiv:2401.11715*.
- Shah, S., Pandey, S. V., Sorathiya, A., Sheth, R., Singh, A. K., Thaker, J. (2020). Embedded Systems and Computer Vision Techniques Utilized in Spray Painting Robots: A Review. *arXiv preprint arXiv:2010.01131*.
- Sharkawy, A.-N. (2021). Human-Robot Interaction: Applications. *arXiv preprint arXiv:2102.00928*.
- Soille, P. (2003). *Morphological Image Analysis: Principles and Applications*: Springer-Verlag.

- Takács, K., Elek, R. N., Haidegger, T. (2023). Image-Processing Based Methods to Improve the Robustness of Robotic Gripping. *arXiv preprint arXiv:2307.05648*.
- Venkateswaran, S. ve diğ. (2022). Automated and Systematic Digital Twins Testing for Industrial Processes. *arXiv preprint arXiv:2302.13198*.
- Visvalingam, M., Whyatt, J. (1993). Line generalisation by repeated elimination of points. *Cartographic Journal*, 30 (1), 46–51. DOI: 10.1179/caj.1993.30.1.46
- Zhang, M. M., Chen, Z., Wilson, R. G., Bronstein, M. (2017). Geometric deep learning: going beyond euclidean data. *IEEE Signal Processing Magazine*, 34 (4), 18–42.
- Zhao, Z.-Q., Zheng, P., Xu, S.-t., Wu, X. (2019). Object detection with deep learning: A review. *IEEE transactions on neural networks and learning systems*, 30 (11), 3212–3232.





Ek-A

Kalibrasyon Koordinatları

[[1680, 949, 500], [180, 0, 0], 'T']
[[1229, 943, 500], [180, 0, 0], 'N']
[[1229, 943, 500], [180, 0, 90], 'T']
[[1230, 492, 500], [180, 0, 90], 'N']
[[1230, 492, 500], [180, 0, -179], 'T']
[[1681, 498, 500], [180, 0, -179], 'N']
[[1681, 498, 500], [180, 0, -89], 'T']
[[1680, 949, 500], [180, 0, -89], 'N']
[[1680, 949, 500], [180, 0, 0], 'T']
[[1680, 949, 600], [180, 0, 0], 'T']
[[1927, -514, 500], [180, 0, 0], 'T']
[[1468, -520, 500], [180, 0, 0], 'N']
[[1468, -520, 500], [180, 0, 90], 'T']
[[1469, -972, 500], [180, 0, 90], 'N']
[[1469, -972, 500], [180, 0, -179], 'T']
[[1928, -967, 500], [180, 0, -179], 'N']
[[1928, -967, 500], [180, 0, -89], 'T']
[[1927, -514, 500], [180, 0, -89], 'N']
[[1927, -514, 500], [180, 0, 0], 'T']
[[1927, -514, 600], [180, 0, 0], 'T']
[[2249, 275, 500], [180, 0, 0], 'T']
[[1802, 273, 500], [180, 0, 0], 'N']
[[1802, 273, 500], [180, 0, 89], 'T']
[[1800, -178, 500], [180, 0, 89], 'N']
[[1800, -178, 500], [180, 0, -179], 'T']
[[2247, -176, 500], [180, 0, -179], 'N']
[[2247, -176, 500], [180, 0, -90], 'T']
[[2249, 275, 500], [180, 0, -90], 'N']
[[2249, 275, 500], [180, 0, 0], 'T']
[[2249, 275, 600], [180, 0, 0], 'T']

Ek-B

Kolay Geometri - 1

[[1827, -660, 480], [180, 0, 0], 'T']
[[1241, -658, 480], [180, 0, 0], 'N']
[[1397, -608, 480], [180, 0, 90], 'T']
[[1327, -1113, 480], [180, 0, 90], 'N']
[[1299, -959, 480], [180, 0, -179], 'T']
[[1863, -1025, 480], [180, 0, -179], 'N']
[[1708, -1058, 480], [180, 0, -89], 'T']
[[1775, -557, 480], [180, 0, -89], 'N']
[[1756, -720, 480], [180, 0, 0], 'T']
[[1750, -637, 580], [180, 0, 0], 'T']
[[1617, 370, 480], [180, 0, 89], 'T']
[[1613, -233, 480], [180, 0, 89], 'N']
[[1563, -76, 480], [180, 0, 179], 'T']
[[2128, -146, 480], [180, 0, 179], 'N']
[[1974, -176, 480], [180, 0, -90], 'T']
[[2040, 403, 480], [180, 0, -90], 'N']
[[2073, 248, 480], [180, 0, 0], 'T']
[[1513, 317, 480], [180, 0, 0], 'N']
[[1676, 298, 480], [180, 0, 89], 'T']
[[1593, 292, 580], [180, 0, 89], 'T']

Ek-C

Orta Geometri - 1

[[2060, -497, 480], [180, 0, 270], 'C']
[[1751, -862, 480], [180, 0, 180], 'C']
[[1441, -497, 480], [180, 0, 90], 'C']
[[1751, -131, 480], [180, 0, 360], 'C']
[[2060, -497, 480], [180, 0, 270], 'C']
[[2060, -497, 980], [180, 0, 270], 'R']
[[2186, 603, 480], [180, 0, 270], 'C']
[[1745, 83, 480], [180, 0, 180], 'C']
[[1304, 603, 480], [180, 0, 90], 'C']
[[1745, 1124, 480], [180, 0, 360], 'C']
[[2186, 603, 480], [180, 0, 270], 'C']
[[2186, 603, 980], [180, 0, 270], 'R']
[[2060, -497, 480], [180, 0, 270], 'C']
[[1751, -862, 480], [180, 0, 180], 'C']
[[1441, -497, 480], [180, 0, 90], 'C']
[[1751, -131, 480], [180, 0, 360], 'C']
[[2060, -497, 480], [180, 0, 270], 'C']
[[2060, -497, 980], [180, 0, 270], 'R']
[[2186, 603, 480], [180, 0, 270], 'C']
[[1745, 83, 480], [180, 0, 180], 'C']
[[1304, 603, 480], [180, 0, 90], 'C']
[[1745, 1124, 480], [180, 0, 360], 'C']
[[2186, 603, 480], [180, 0, 270], 'C']
[[2186, 603, 980], [180, 0, 270], 'R']

Ek-Ç

Zor Geometri - 1

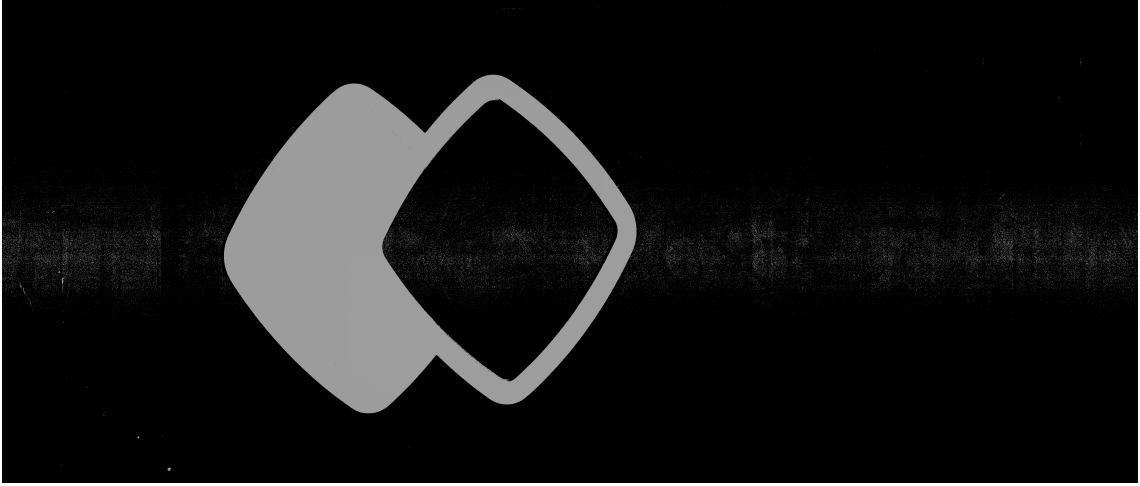
[[1340, 469, 480], [180, 0, 15], 'T']
[[1190, 419, 480], [180, 0, 15], 'N']
[[1259, 452, 480], [180, 0, 59], 'T']
[[1181, 344, 480], [180, 0, 59], 'N']
[[1200, 425, 480], [180, 0, 96], 'T']
[[1243, -161, 480], [180, 0, 96], 'N']
[[1236, 36, 480], [180, 0, 84], 'T']
[[1187, -649, 480], [180, 0, 84], 'N']
[[1169, -461, 480], [180, 0, 153], 'T']
[[1336, -676, 480], [180, 0, 153], 'N']
[[1195, -558, 480], [180, 0, -174], 'T']
[[1751, -551, 480], [180, 0, -174], 'N']
[[1553, -550, 480], [180, 0, 174], 'T']
[[2241, -617, 480], [180, 0, 174], 'N']
[[2072, -607, 480], [180, 0, -163], 'T']
[[2261, -572, 480], [180, 0, -163], 'N']
[[2191, -596, 480], [180, 0, -120], 'T']
[[2267, -495, 480], [180, 0, -120], 'N']
[[2248, -579, 480], [180, 0, -82], 'T']
[[2201, -54, 480], [180, 0, -82], 'N']
[[2216, -191, 480], [180, 0, -97], 'T']
[[2265, 338, 480], [180, 0, -97], 'N']
[[2268, 301, 480], [180, 0, -74], 'T']
[[2239, 457, 480], [180, 0, -74], 'N']
[[2259, 377, 480], [180, 0, -27], 'T']
[[2168, 456, 480], [180, 0, -27], 'N']
[[2231, 453, 480], [180, 0, 5], 'T']
[[1687, 394, 480], [180, 0, 5], 'N']
[[1817, 412, 480], [180, 0, -5], 'T']
[[1305, 460, 480], [180, 0, -5], 'N']
[[1338, 454, 480], [180, 0, 15], 'T']
[[1276, 459, 580], [180, 0, 15], 'T']

Ek-D

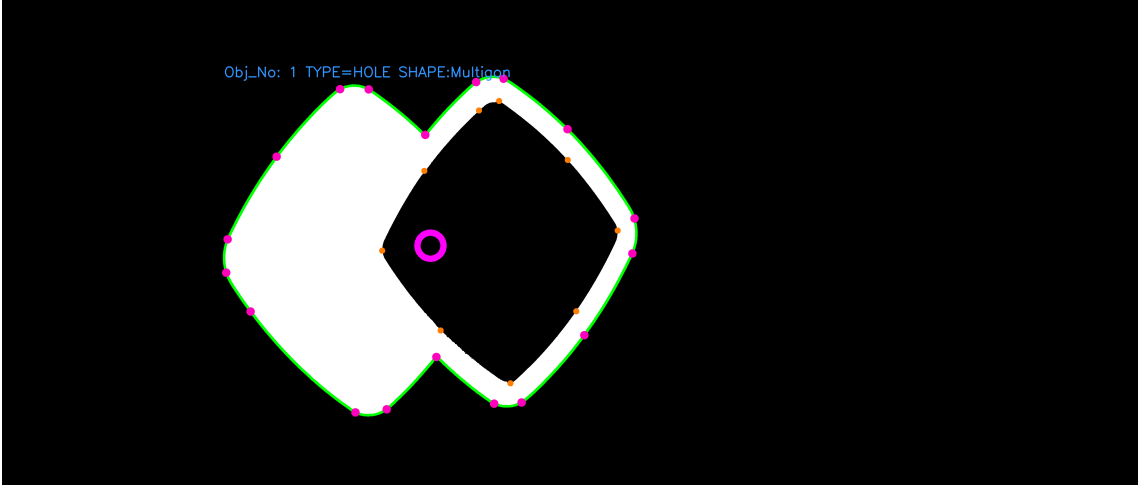
Zor Geometri - 2



Şekil D.1. Yüksek Zorluktaki Geometrilili Obje-2 Giriş Konveyörü Görüntüsü



Şekil D.2. Yüksek Zorluktaki Geometrilili Obje-2 TOF Tarama Görüntüsü



Şekil D.3. Yüksek Zorluktaki Geometrilili Obje-2 Boyama Yörüngesi Çıkarılmış Görüntüsü



Şekil D.4. Yüksek Zorluktaki Geometrilili Obje-2 Boyanmış Görüntüsü

```

[[1627, 726, 480], [180, 0, 32], 'T']
[[1564, 686, 480], [180, 0, 32], 'N']
[[1614, 731, 480], [180, 0, 46], 'T']
[[1260, 315, 480], [180, 0, 46], 'N']
[[1317, 398, 480], [180, 0, 95], 'T']
[[1302, 224, 480], [180, 0, 95], 'N']
[[1275, 319, 480], [180, 0, 136], 'T']
[[1506, 26, 480], [180, 0, 136], 'N']
[[1421, 161, 480], [180, 0, 51], 'T']
[[1304, -106, 480], [180, 0, 51], 'N']
[[1330, -35, 480], [180, 0, 92], 'T']
[[1319, -201, 480], [180, 0, 92], 'N']
[[1353, -171, 480], [180, 0, 136], 'T']
[[1501, -355, 480], [180, 0, 136], 'N']
[[1476, -322, 480], [180, 0, 149], 'T']
[[1718, -505, 480], [180, 0, 149], 'N']
[[1666, -499, 480], [180, 0, 176], 'T']
[[1910, -521, 480], [180, 0, 176], 'N']
[[1790, -487, 480], [180, 0, -143], 'T']
[[2047, -303, 480], [180, 0, -143], 'N']
[[2005, -340, 480], [180, 0, -128], 'T']
[[2207, -64, 480], [180, 0, -128], 'N']
[[2166, -138, 480], [180, 0, -83], 'T']
[[2173, 16, 480], [180, 0, -83], 'N']
[[2204, -71, 480], [180, 0, -43], 'T']
[[1968, 217, 480], [180, 0, -43], 'N']
[[2059, 88, 480], [180, 0, -128], 'T']
[[2163, 344, 480], [180, 0, -128], 'N']
[[2145, 278, 480], [180, 0, -90], 'T']

```

```
[[2156, 457, 480], [180, 0, -90], 'N']  
[[2124, 415, 480], [180, 0, -43], 'T']  
[[1975, 605, 480], [180, 0, -43], 'N']  
[[1999, 571, 480], [180, 0, -30], 'T']  
[[1756, 758, 480], [180, 0, -30], 'N']  
[[1764, 757, 480], [180, 0, -2], 'T']  
[[1650, 763, 480], [180, 0, -2], 'N']  
[[1691, 763, 480], [180, 0, 32], 'T']  
[[1661, 775, 580], [180, 0, 32], 'T']
```

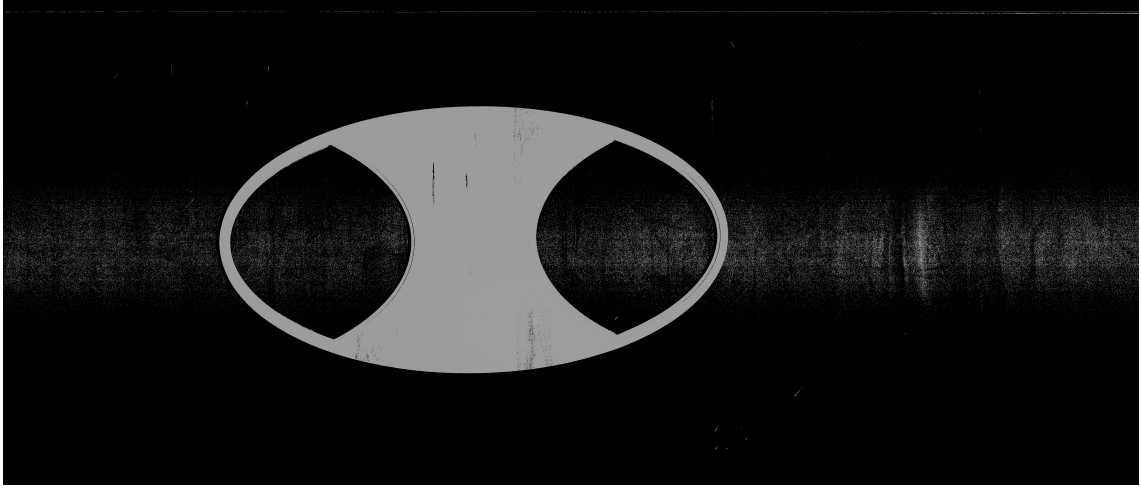


Ek-E

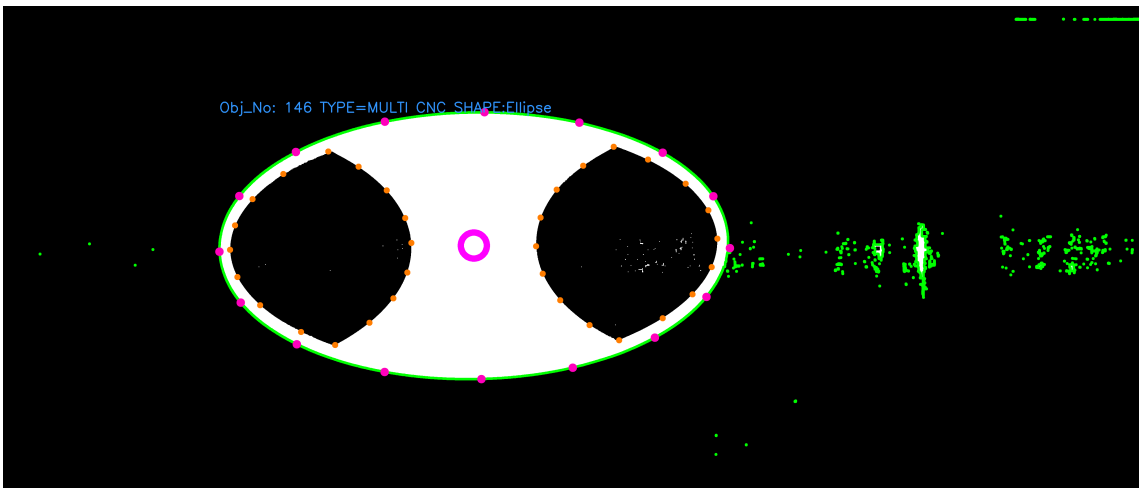
Zor Geometri - 3



Şekil E.1. Yüksek Zorluktaki Geometrilili Obje-3 Giriş Konveyörü Görüntüsü



Şekil E.2. Yüksek Zorluktaki Geometrilili Obje-3 TOF Tarama Görüntüsü



Şekil E.3. Yüksek Zorluktaki Geometrilili Obje-3 Boyama Yörüngesi Çıkarılmış Görüntüsü



Şekil E.4. Yüksek Zorluktaki Geometrilili Obje-3 Boyanmış Görüntüsü

```

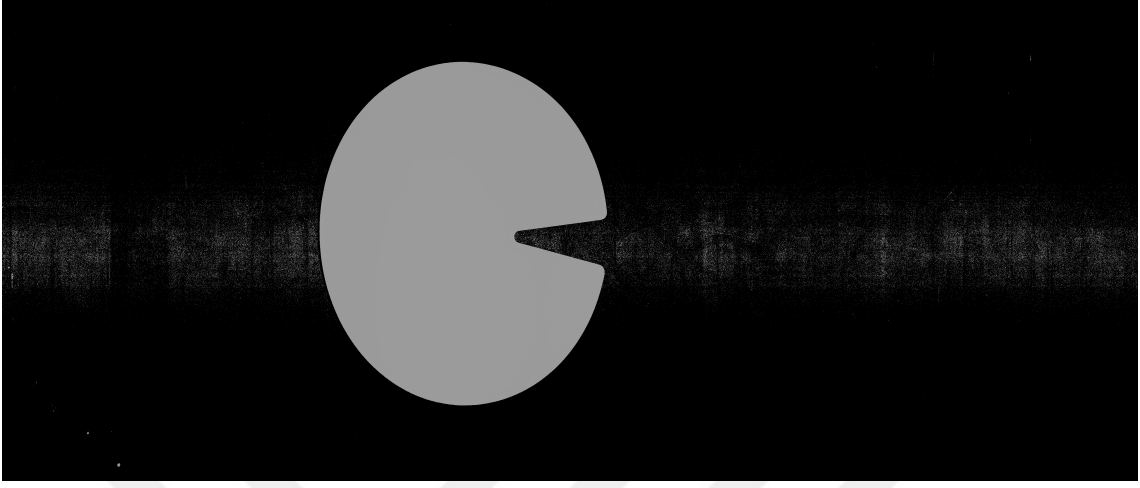
[[1756, 784, 480], [180, 0, 22], 'T']
[[1597, 717, 480], [180, 0, 22], 'N']
[[1596, 704, 480], [180, 0, 53], 'T']
[[1493, 545, 480], [180, 0, 53], 'N']
[[1492, 520, 480], [180, 0, 72], 'T']
[[1420, 270, 480], [180, 0, 72], 'N']
[[1428, 263, 480], [180, 0, 85], 'T']
[[1401, -31, 480], [180, 0, 85], 'N']
[[1409, -25, 480], [180, 0, 97], 'T']
[[1431, -315, 480], [180, 0, 97], 'N']
[[1434, -295, 480], [180, 0, 110], 'T']
[[1511, -572, 480], [180, 0, 110], 'N']
[[1507, -553, 480], [180, 0, 128], 'T']
[[1619, -734, 480], [180, 0, 128], 'N']
[[1573, -704, 480], [180, 0, 154], 'T']
[[1835, -858, 480], [180, 0, 154], 'N']
[[1699, -782, 480], [180, 0, -162], 'T']
[[1896, -753, 480], [180, 0, -162], 'N']
[[1889, -744, 480], [180, 0, -130], 'T']
[[2001, -597, 480], [180, 0, -130], 'N']
[[2003, -568, 480], [180, 0, -109], 'T']
[[2081, -336, 480], [180, 0, -109], 'N']
[[2072, -328, 480], [180, 0, -96], 'T']
[[2109, -39, 480], [180, 0, -96], 'N']
[[2098, -45, 480], [180, 0, -84], 'T']
[[2083, 270, 480], [180, 0, -84], 'N']
[[2080, 245, 480], [180, 0, -71], 'T']
[[2003, 548, 480], [180, 0, -71], 'N']
[[2010, 522, 480], [180, 0, -52], 'T']

```

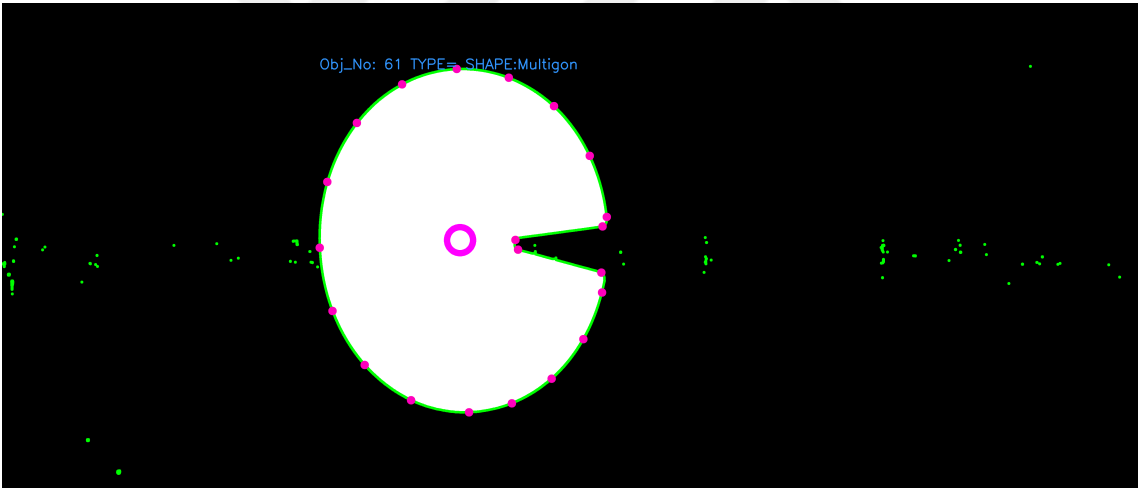
[[1878, 736, 480], [180, 0, -52], 'N']
 [[1907, 712, 480], [180, 0, -19], 'T']
 [[1705, 801, 480], [180, 0, -19], 'N']
 [[1768, 774, 480], [180, 0, 22], 'T']
 [[1710, 798, 580], [180, 0, 22], 'T']
 [[1756, 784, 480], [180, 0, 22], 'T']
 [[1597, 717, 480], [180, 0, 22], 'N']
 [[1596, 704, 480], [180, 0, 53], 'T']
 [[1493, 545, 480], [180, 0, 53], 'N']
 [[1492, 520, 480], [180, 0, 72], 'T']
 [[1420, 270, 480], [180, 0, 72], 'N']
 [[1428, 263, 480], [180, 0, 85], 'T']
 [[1401, -31, 480], [180, 0, 85], 'N']
 [[1409, -25, 480], [180, 0, 97], 'T']
 [[1431, -315, 480], [180, 0, 97], 'N']
 [[1434, -295, 480], [180, 0, 110], 'T']
 [[1511, -572, 480], [180, 0, 110], 'N']
 [[1507, -553, 480], [180, 0, 128], 'T']
 [[1619, -734, 480], [180, 0, 128], 'N']
 [[1573, -704, 480], [180, 0, 154], 'T']
 [[1835, -858, 480], [180, 0, 154], 'N']
 [[1699, -782, 480], [180, 0, -162], 'T']
 [[1896, -753, 480], [180, 0, -162], 'N']
 [[1889, -744, 480], [180, 0, -130], 'T']
 [[2001, -597, 480], [180, 0, -130], 'N']
 [[2003, -568, 480], [180, 0, -109], 'T']
 [[2081, -336, 480], [180, 0, -109], 'N']
 [[2072, -328, 480], [180, 0, -96], 'T']
 [[2109, -39, 480], [180, 0, -96], 'N']
 [[2098, -45, 480], [180, 0, -84], 'T']
 [[2083, 270, 480], [180, 0, -84], 'N']
 [[2080, 245, 480], [180, 0, -71], 'T']
 [[2003, 548, 480], [180, 0, -71], 'N']
 [[2010, 522, 480], [180, 0, -52], 'T']
 [[1878, 736, 480], [180, 0, -52], 'N']
 [[1907, 712, 480], [180, 0, -19], 'T']
 [[1705, 801, 480], [180, 0, -19], 'N']
 [[1768, 774, 480], [180, 0, 22], 'T']
 [[1710, 798, 580], [180, 0, 22], 'T']

Ek-F

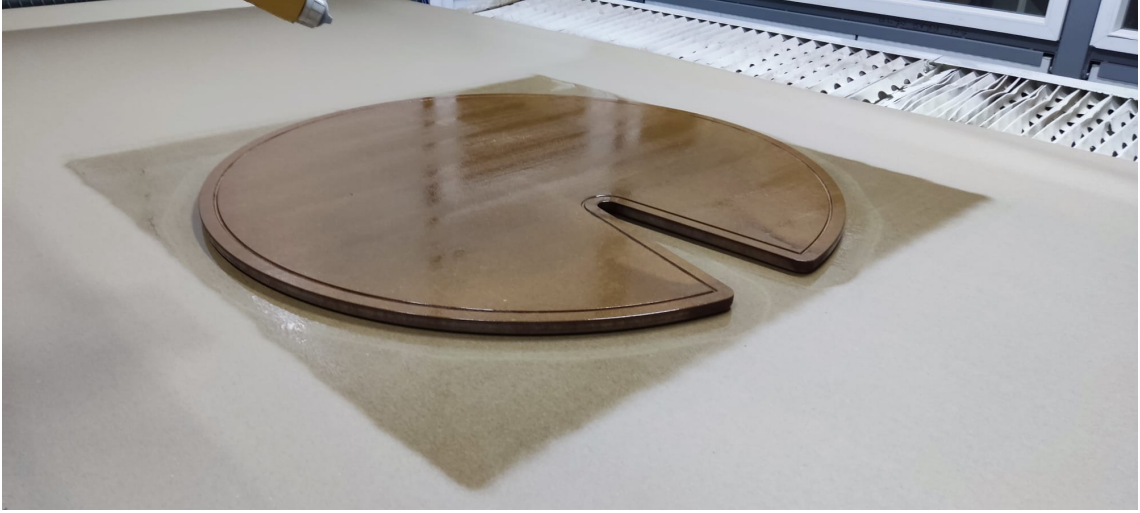
Zor Geometri - 4



Şekil F.1. Yüksek Zorluktaki Geometrilili Obje-4 TOF Tarama Görüntüsü



Şekil F.2. Yüksek Zorluktaki Geometrilili Obje-4 Boyama Yörüngesi Çıkarılmış Görüntüsü



Şekil F.3. Yüksek Zorluktaki Geometrilili Obje-4 Boyanmış Görüntüsü

```

[[1736, 486, 580], [180, 0, 11], 'T']
[[1712, 454, 480], [180, 0, 11], 'T']
[[1574, 430, 480], [180, 0, 11], 'N']
[[1583, 427, 480], [180, 0, 30], 'T']
[[1431, 329, 480], [180, 0, 30], 'N']
[[1439, 331, 480], [180, 0, 52], 'T']
[[1337, 184, 480], [180, 0, 52], 'N']
[[1342, 198, 480], [180, 0, 77], 'T']
[[1302, -5, 480], [180, 0, 77], 'N']
[[1302, 33, 480], [180, 0, 111], 'T']
[[1403, -279, 480], [180, 0, 111], 'N']
[[1349, -209, 480], [180, 0, 149], 'T']
[[1703, -469, 480], [180, 0, 149], 'N']
[[1536, -367, 480], [180, 0, -177], 'T']
[[1766, -435, 480], [180, 0, -177], 'N']
[[1606, -439, 480], [180, 0, -110], 'T']
[[1808, -50, 480], [180, 0, -110], 'N']
[[1723, -136, 480], [180, 0, 104], 'T']
[[1855, -520, 480], [180, 0, 104], 'N']
[[1824, -377, 480], [180, 0, -164], 'T']
[[1984, -373, 480], [180, 0, -164], 'N']
[[1973, -367, 480], [180, 0, -144], 'T']
[[2118, -258, 480], [180, 0, -144], 'N']
[[2117, -250, 480], [180, 0, -120], 'T']
[[2197, -103, 480], [180, 0, -120], 'N']
[[2190, -106, 480], [180, 0, -98], 'T']
[[2214, 38, 480], [180, 0, -98], 'N']
[[2211, 36, 480], [180, 0, -74], 'T']
[[2174, 212, 480], [180, 0, -74], 'N']

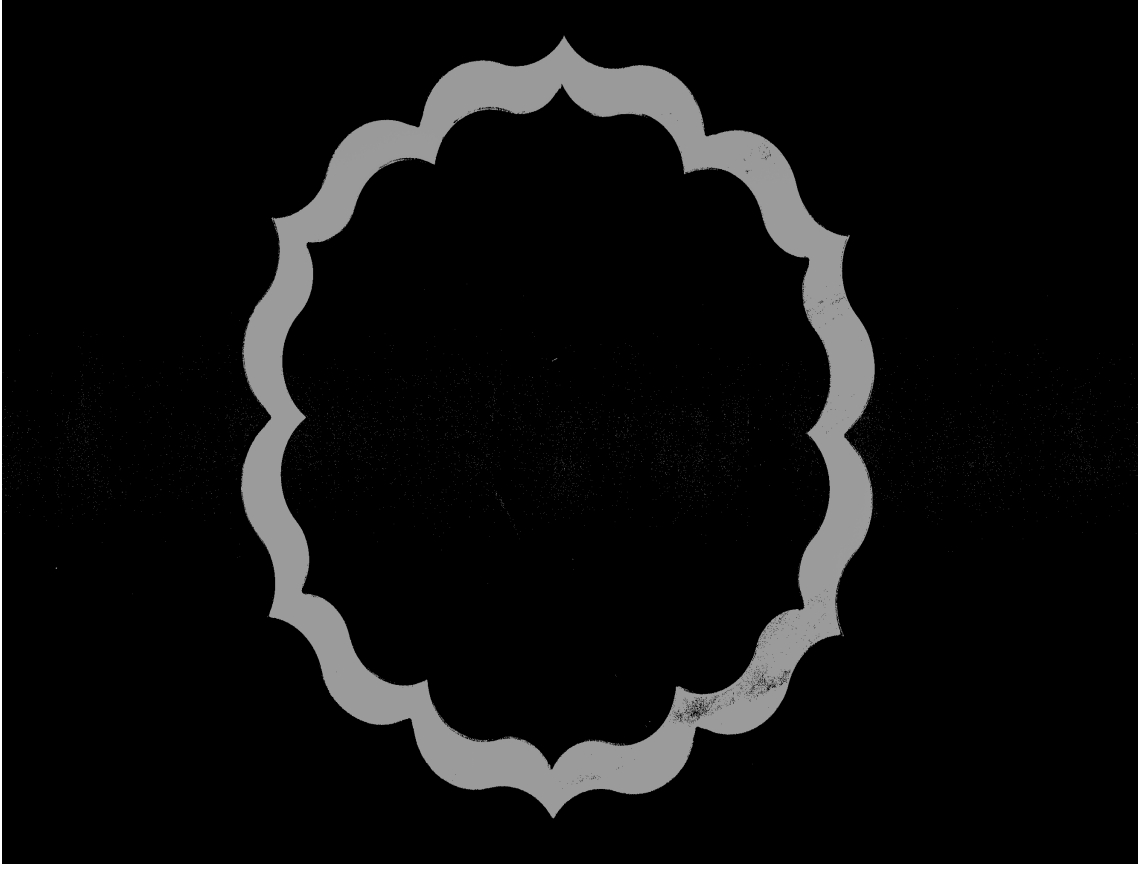
```

```
[[2167, 215, 480], [180, 0, -49], 'T']  
[[2072, 354, 480], [180, 0, -49], 'N']  
[[2061, 354, 480], [180, 0, -26], 'T']  
[[1915, 447, 480], [180, 0, -26], 'N']  
[[1903, 441, 480], [180, 0, -6], 'T']  
[[1742, 470, 480], [180, 0, -6], 'N']  
[[1782, 461, 480], [180, 0, 11], 'T']  
[[1736, 486, 580], [180, 0, 11], 'T']
```

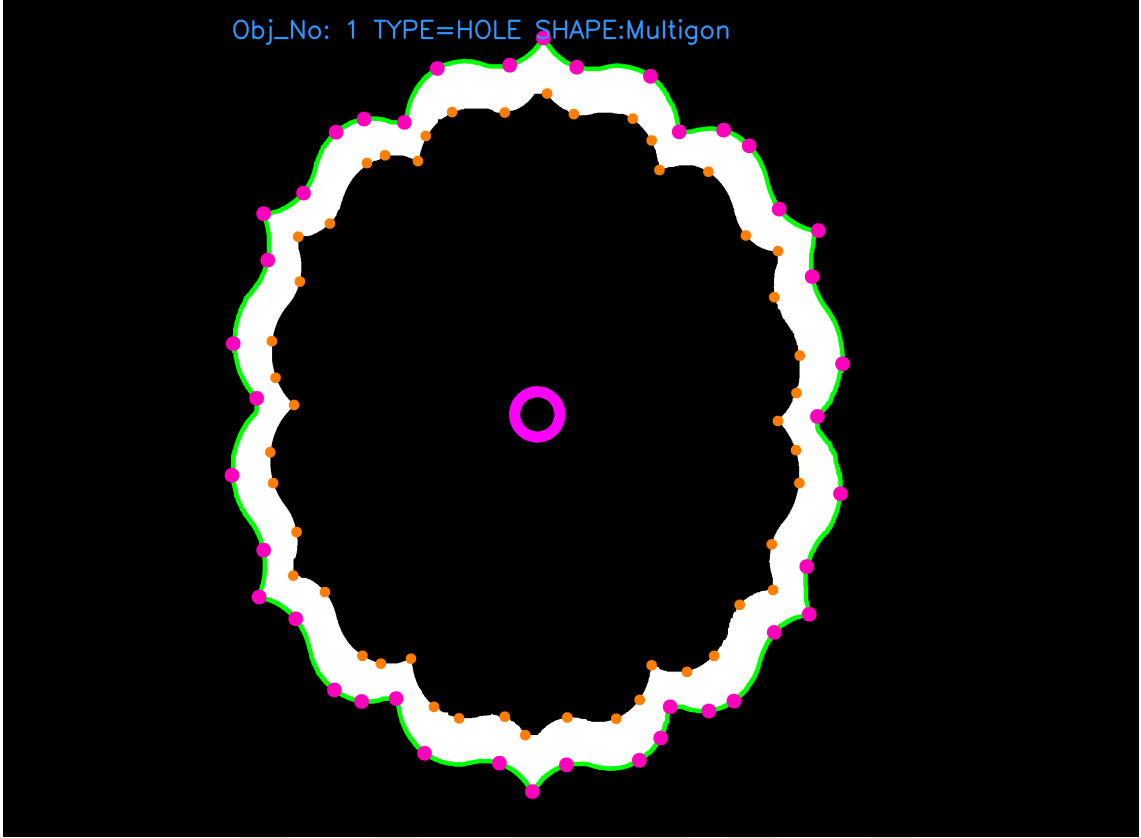


Ek-G

Zor Geometri - 5



Şekil G.1. Yüksek Zorluktaki Geometrilili Obje-5 TOF Tarama Görüntüsü



Şekil G.2. Yüksek Zorluktaki Geometrilili Obje-5 Boyama Yörüngesi Çıkarılmış Görüntüsü



Şekil G.3. Yüksek Zorluktaki Geometrilili Obje-5 Boyanmış Görüntüsü

```
[[1715, 1074, 480], [180, 0, 22], 'T']
[[1453, 944, 480], [180, 0, 22], 'N']
[[1631, 1017, 480], [180, 0, -5], 'T']
[[1382, 986, 480], [180, 0, -5], 'N']
```

[[1552, 1036, 480], [180, 0, 59], 'T']
[[1365, 864, 480], [180, 0, 59], 'N']
[[1487, 973, 480], [180, 0, 28], 'T']
[[1304, 845, 480], [180, 0, 28], 'N']
[[1340, 868, 480], [180, 0, 67], 'T']
[[1312, 813, 480], [180, 0, 67], 'N']
[[1311, 865, 480], [180, 0, 94], 'T']
[[1320, 652, 480], [180, 0, 94], 'N']
[[1336, 828, 480], [180, 0, 27], 'T']
[[1190, 645, 480], [180, 0, 27], 'N']
[[1265, 776, 480], [180, 0, 82], 'T']
[[1197, 468, 480], [180, 0, 82], 'N']
[[1251, 658, 480], [180, 0, 49], 'T']
[[1129, 417, 480], [180, 0, 49], 'N']
[[1188, 600, 480], [180, 0, 128], 'T']
[[1231, 345, 480], [180, 0, 128], 'N']
[[1206, 514, 480], [180, 0, 93], 'T']
[[1224, 272, 480], [180, 0, 93], 'N']
[[1223, 331, 480], [180, 0, 136], 'T']
[[1257, 275, 480], [180, 0, 136], 'N']
[[1207, 295, 480], [180, 0, 163], 'T']
[[1396, 222, 480], [180, 0, 163], 'N']
[[1257, 275, 480], [180, 0, 83], 'T']
[[1297, 189, 480], [180, 0, 83], 'N']
[[1292, 202, 480], [180, 0, 111], 'T']
[[1320, 116, 480], [180, 0, 111], 'N']
[[1269, 187, 480], [180, 0, 149], 'T']
[[1496, 8, 480], [180, 0, 149], 'N']
[[1348, 142, 480], [180, 0, 117], 'T']
[[1503, -72, 480], [180, 0, 117], 'N']
[[1367, 64, 480], [180, 0, -177], 'T']
[[1612, -19, 480], [180, 0, -177], 'N']
[[1424, 50, 480], [180, 0, 155], 'T']
[[1719, -89, 480], [180, 0, 155], 'N']
[[1533, -31, 480], [180, 0, -163], 'T']
[[1845, 7, 480], [180, 0, -163], 'N']
[[1649, 3, 480], [180, 0, 154], 'T']
[[1921, -79, 480], [180, 0, 154], 'N']
[[1730, -46, 480], [180, 0, -160], 'T']
[[2056, 23, 480], [180, 0, -160], 'N']
[[1861, -7, 480], [180, 0, 172], 'T']
[[2130, -7, 480], [180, 0, 172], 'N']
[[1941, -38, 480], [180, 0, -118], 'T']
[[2139, 124, 480], [180, 0, -118], 'N']
[[2018, 26, 480], [180, 0, -154], 'T']
[[2169, 122, 480], [180, 0, -154], 'N']

[[2148, 104, 480], [180, 0, -121], 'T']
 [[2191, 176, 480], [180, 0, -121], 'N']
 [[2176, 104, 480], [180, 0, -87], 'T']
 [[2183, 340, 480], [180, 0, -87], 'N']
 [[2156, 165, 480], [180, 0, -152], 'T']
 [[2309, 346, 480], [180, 0, -152], 'N']
 [[2230, 218, 480], [180, 0, -97], 'T']
 [[2301, 523, 480], [180, 0, -97], 'N']
 [[2243, 333, 480], [180, 0, -131], 'T']
 [[2370, 575, 480], [180, 0, -131], 'N']
 [[2308, 392, 480], [180, 0, -51], 'T']
 [[2263, 645, 480], [180, 0, -51], 'N']
 [[2293, 461, 480], [180, 0, -87], 'T']
 [[2270, 748, 480], [180, 0, -87], 'N']
 [[2313, 604, 480], [180, 0, -31], 'T']
 [[2127, 810, 480], [180, 0, -31], 'N']
 [[2228, 697, 480], [180, 0, -94], 'T']
 [[2198, 812, 480], [180, 0, -94], 'N']
 [[2204, 796, 480], [180, 0, -64], 'T']
 [[2169, 880, 480], [180, 0, -64], 'N']
 [[2225, 820, 480], [180, 0, -28], 'T']
 [[2004, 974, 480], [180, 0, -28], 'N']
 [[2155, 850, 480], [180, 0, -62], 'T']
 [[1999, 1066, 480], [180, 0, -62], 'N']
 [[2131, 935, 480], [180, 0, 5], 'T']
 [[1889, 1012, 480], [180, 0, 5], 'N']
 [[2053, 958, 480], [180, 0, -22], 'T']
 [[1814, 1062, 480], [180, 0, -22], 'N']
 [[1926, 1051, 480], [180, 0, 23], 'T']
 [[1679, 971, 480], [180, 0, 23], 'N']
 [[1837, 1015, 480], [180, 0, -17], 'T']
 [[1625, 1050, 480], [180, 0, -17], 'N']
 [[1686, 1043, 480], [180, 0, 22], 'T']
 [[1627, 1042, 580], [180, 0, 22], 'T']

[[1715, 1074, 480], [180, 0, 22], 'T']
 [[1453, 944, 480], [180, 0, 22], 'N']
 [[1631, 1017, 480], [180, 0, -5], 'T']
 [[1382, 986, 480], [180, 0, -5], 'N']
 [[1552, 1036, 480], [180, 0, 59], 'T']
 [[1365, 864, 480], [180, 0, 59], 'N']
 [[1487, 973, 480], [180, 0, 28], 'T']
 [[1304, 845, 480], [180, 0, 28], 'N']
 [[1340, 868, 480], [180, 0, 67], 'T']
 [[1312, 813, 480], [180, 0, 67], 'N']
 [[1311, 865, 480], [180, 0, 94], 'T']

[[1320, 652, 480], [180, 0, 94], 'N']
[[1336, 828, 480], [180, 0, 27], 'T']
[[1190, 645, 480], [180, 0, 27], 'N']
[[1265, 776, 480], [180, 0, 82], 'T']
[[1197, 468, 480], [180, 0, 82], 'N']
[[1251, 658, 480], [180, 0, 49], 'T']
[[1129, 417, 480], [180, 0, 49], 'N']
[[1188, 600, 480], [180, 0, 128], 'T']
[[1231, 345, 480], [180, 0, 128], 'N']
[[1206, 514, 480], [180, 0, 93], 'T']
[[1224, 272, 480], [180, 0, 93], 'N']
[[1223, 331, 480], [180, 0, 136], 'T']
[[1257, 275, 480], [180, 0, 136], 'N']
[[1207, 295, 480], [180, 0, 163], 'T']
[[1396, 222, 480], [180, 0, 163], 'N']
[[1257, 275, 480], [180, 0, 83], 'T']
[[1297, 189, 480], [180, 0, 83], 'N']
[[1292, 202, 480], [180, 0, 111], 'T']
[[1320, 116, 480], [180, 0, 111], 'N']
[[1269, 187, 480], [180, 0, 149], 'T']
[[1496, 8, 480], [180, 0, 149], 'N']
[[1348, 142, 480], [180, 0, 117], 'T']
[[1503, -72, 480], [180, 0, 117], 'N']
[[1367, 64, 480], [180, 0, -177], 'T']
[[1612, -19, 480], [180, 0, -177], 'N']
[[1424, 50, 480], [180, 0, 155], 'T']
[[1719, -89, 480], [180, 0, 155], 'N']
[[1533, -31, 480], [180, 0, -163], 'T']
[[1845, 7, 480], [180, 0, -163], 'N']
[[1649, 3, 480], [180, 0, 154], 'T']
[[1921, -79, 480], [180, 0, 154], 'N']
[[1730, -46, 480], [180, 0, -160], 'T']
[[2056, 23, 480], [180, 0, -160], 'N']
[[1861, -7, 480], [180, 0, 172], 'T']
[[2130, -7, 480], [180, 0, 172], 'N']
[[1941, -38, 480], [180, 0, -118], 'T']
[[2139, 124, 480], [180, 0, -118], 'N']
[[2018, 26, 480], [180, 0, -154], 'T']
[[2169, 122, 480], [180, 0, -154], 'N']
[[2148, 104, 480], [180, 0, -121], 'T']
[[2191, 176, 480], [180, 0, -121], 'N']
[[2176, 104, 480], [180, 0, -87], 'T']
[[2183, 340, 480], [180, 0, -87], 'N']
[[2156, 165, 480], [180, 0, -152], 'T']
[[2309, 346, 480], [180, 0, -152], 'N']
[[2230, 218, 480], [180, 0, -97], 'T']

[[2301, 523, 480], [180, 0, -97], 'N']
[[2243, 333, 480], [180, 0, -131], 'T']
[[2370, 575, 480], [180, 0, -131], 'N']
[[2308, 392, 480], [180, 0, -51], 'T']
[[2263, 645, 480], [180, 0, -51], 'N']
[[2293, 461, 480], [180, 0, -87], 'T']
[[2270, 748, 480], [180, 0, -87], 'N']
[[2313, 604, 480], [180, 0, -31], 'T']
[[2127, 810, 480], [180, 0, -31], 'N']
[[2228, 697, 480], [180, 0, -94], 'T']
[[2198, 812, 480], [180, 0, -94], 'N']
[[2204, 796, 480], [180, 0, -64], 'T']
[[2169, 880, 480], [180, 0, -64], 'N']
[[2225, 820, 480], [180, 0, -28], 'T']
[[2004, 974, 480], [180, 0, -28], 'N']
[[2155, 850, 480], [180, 0, -62], 'T']
[[1999, 1066, 480], [180, 0, -62], 'N']
[[2131, 935, 480], [180, 0, 5], 'T']
[[1889, 1012, 480], [180, 0, 5], 'N']
[[2053, 958, 480], [180, 0, -22], 'T']
[[1814, 1062, 480], [180, 0, -22], 'N']
[[1926, 1051, 480], [180, 0, 23], 'T']
[[1679, 971, 480], [180, 0, 23], 'N']
[[1837, 1015, 480], [180, 0, -17], 'T']
[[1625, 1050, 480], [180, 0, -17], 'N']
[[1686, 1043, 480], [180, 0, 22], 'T']
[[1627, 1042, 580], [180, 0, 22], 'T']

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

G l rmak, E. A. ve Bing l, Z. (2023), Determining Robot Trajectory Planning Using Image Processing for Wood Painting, *Proceedings of the 2023 7th International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT)*, Ankara, Türkiye, 26-28 Ekim 2023



ÖZGEÇMİŞ

İlköğretim eğitimini İstanbul Çağlayan 50. Yıl İlköğretim Okulu'nda tamamlamış, lise eğitimini ise Şişli Anadolu Teknik Lisesi'nin Elektrik-Elektronik, Güvenlik Sistemleri bölümünde almıştır. 2012 yılında Edremit Meslek Yüksekokulu Mekatronik Bölümü'nden önlisans diploması almış ve ardından 2018-2021 yılları arasında Kocaeli Üniversitesi'nde Mekatronik Mühendisliği lisans eğitimini tamamlamıştır.

2021 yılında TÜBİTAK onaylı bir projeyle birlikte UVTEK Makine Kimya Sanayi şirketinde işe başlamıştır. İşe başladığı proje, "Görüntü İşlemeli Tam Otomatik Robotik Boyama Sisteminin Geliştirilmesi" başlıklı ve 3215053 numaralı projedir. Bu projede geliştirici olarak görev almış ve başarılı çalışmaları sonucunda proje yöneticiliğine terfi etmiştir. Araştırma ve geliştirme uzmanı olarak çalışmalarına devam ederken, şu anda "Ahşap Panel Üretim Hattında Gerçek Zamanlı Görüntü İşleme Kullanılarak Yapay Zeka Temelli Yüzey Hata Tespit Sistemi Geliştirilmesi" başlıklı ve 3230497 numaralı projenin yönetimini yapmaktadır. Bu proje başvurusunu TÜBİTAK'a UVTEK ile birlikte yapmış ve kabul almıştır.

Şu anda yüksek lisans eğitimine devam etmektedir ve bu çalışmayı yapmıştır. Uzmanlık alanları arasında yapay zeka, robotik ve görüntü işleme teknikleri bulunmaktadır. İlgi alanları ise robotik ve otomasyon sistemleri, yapay zeka ve makine öğrenmesi, görüntü işleme ve analizi ile teknolojik yenilikler ve inovasyondur.