BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENDÜSTRİYEL UYGULAMALARDA GÖRÜNTÜ İŞLEME TABANLI OTOMATİK HATA TESPİT YÖNTEMLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Burak GÜZELCE

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

ŞUBAT 2021

BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENDÜSTRİYEL UYGULAMALARDA GÖRÜNTÜ İŞLEME TABANLI OTOMATİK HATA TESPİT YÖNTEMLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Burak GÜZELCE
(161082323)
ORCID: 0000-0002-9353-1016

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Gökay BAYRAK
ORCID: 0000-0002-5136-0829

ŞUBAT 2021

BTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 161082323 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Burak GÜZELCE, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "ENDÜSTRİYEL UYGULAMALARDA GÖRÜNTÜ İŞLEME TABANLI OTOMATİK HATA TESPİT YÖNTEMLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmustur.

Tez Danışmanı : **Dr. Öğr. Üyesi Gökay BAYRAK** .....
Bursa Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Dr. Öğr. Üyesi Fatmatülzehra USLU** .....
Bursa Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Ahmet KÜÇÜKER .....
Sakarya Üniversitesi

Teslim Tarihi : 18 Mart 2021
Savunma Tarihi : 19 Şubat 2021

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

İNTİHAL BEYANI

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

Öğrencinin Adı Soyadı: Burak GÜZELCE

İmzası:

Kıymetli eşime,

ÖNSÖZ

Yaptığım bu çalışmamda gerek sektörel gerek akademik yardımlarıyla bana rehberlik eden değerli hocam Gökay BAYRAK'a tüm samimiyetimle saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım. Bugüne kadarki birçok başarımda payı bulunan kıymetli eşim Yasemin GÜZELCE'ye sonsuz sevgilerimi ve saygılarımı sunarım. Geleceğin parlayan akademisyeni Alper YILMAZ hocama verdiği desteklerden dolayı çok teşekkür ederim. Ayrıca bu çalışmayı yapmamda en çok paya sahip olan bilim insanları ve akademisyenlere teşekkür ederim.

Şubat 2021

Burak Güzelce
(Ar-Ge Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **v**
İÇİNDEKİLER ..... **vi**
KISALTMALAR ..... **viii**
SEMBOLLER ..... **x**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xiii**
ÖZET ..... **xvi**
SUMMARY ..... **xviii**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Tezin Amacı 2
1.2 Tezin Özgün Değeri 3
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI **4**
3. ENDÜSTRİYEL GÖRÜNTÜ İŞLEME UYGULAMALARI İÇİN GEREKLİ DONANIMLAR VE SEÇİM KRİTERLERİ **16**
3.1 Kamera 16
3.1.1 Sensör 18
3.1.1.1 Yükten bağlaşımlı cihaz (CCD-Charge coupled device) 18
3.1.1.2 Tamamlayıcı metal oksit yarı iletken (CMOS-Complementary metal oxide semiconductor) 19
3.1.1.3 Kullanılan sensör 20
3.1.2 Uygulanan görüş alanı (FOV-Field of view) 21
3.1.3 Çalışma mesafesi (WD - Working distance) 23
3.1.4 Birincil büyütme (PMAG - Primary magnification) 24
3.1.5 Alan derinliği (DOF-Depth of field) 24
3.1.6 Çözünürlük 26
3.1.6.1 Kontrast 28
3.1.6.2 Bozulma (Distorsiyon) 30
3.1.6.3 Perspektif hataları 30
3.1.7 Modülasyon transfer fonksiyonu (MTF) eğrileri 31
3.2 Lens 33
3.3 Aydınlatma 35
3.3.1 Yönlü aydınlatma 36
3.3.2 Yaygın (Difüzör) aydınlatma 36
3.3.3 Halka aydınlatma 37
3.3.4 Polarize aydınlatma 37
3.3.5 Yaygın (Difüzör) eksenel aydınlatma 38
3.4 Dijital Kamera Haberleşme Arayüzleri 39
3.4.1 FireWire (IEEE 1394/IIDC DCAM standardı) 39
3.4.2 Camera link® 40
3.4.3 GigE (Gigabit ethernet) 40

3.4.4 Evrensel seri veri yolu (USB-Universal serial bus) 41
4. OTOMATİK HATA TESPİTİ İÇİN GÖRÜNTÜ İŞLEME YÖNTEMLERİ 42
4.1 Görüntünün RGB (Red, Green, Blue)'den HSL (Hue, Saturation, Luminance)'e Dönüşümü 42
4.2 Desen Eşleştirme 44
4.2.1 Piramit eşleştirme 44
4.2.2 Düşük tutarsızlık örneklemesi (Görüntü anlama) 47
4.3 Yüzey Deformasyonu 47
4.4 QR (Quick Response) Kod 50
4.4.1 QR kodun özellikleri 52
4.4.2 QR kodun avantajları 53
4.4.3 QR kod matematiksel modeli 53
4.5 Optik Karakter Tanıma (OCR-Optical Character Recognition) 59
4.6 Kenar Algılama, Deliklerin Algılanması ve Çapların Ölçülmesi 60
4.6.1 Deliklerin geometrik eşleştirme algoritması ile algılanması 60
4.6.2 Basit kenar algılama yöntemi 61
4.6.3 Hough dönüşümü ile çap ölçümü 64
5. ENDÜSTRİYEL UYGULAMALAR İÇİN GELİŞTİRİLEN OTOMATİK HATA TESPİT SİSTEMİ 68
5.1 Donanım Bölümü 68
5.2 Yazılım Bölümü 71
5.3 Otomatik Kalite Kontrol Sistemi Test Sonuçları 73
5.3.1 Logo tanımlama 74
5.3.2 Yüzey deformasyonu tespiti 77
5.3.3 QR (Quick response) tespiti 78
5.3.4 Çap öçümü 79
5.3.5 Optik karakter tanıma (OCR-Optical character recognition) işlemi 81
5.3.6 Kenar testipi ve en-boy ölçümü 82
5.4 Geliştirilen Uygulama Arayüzü 83
6. YAPAY SİNİR AĞI (YSA) TABANLI EŞİK DEĞER BELİRLEME YÖNTEMİ 85
6.1 Parametrelerin Yapay Sinir Ağı ile Belirlenmesi 85
6.1.1 Levenberg–Marquardt (LM) 85
6.1.2 Bayesian düzenlemesi (Bayesian regularization-BR) 86
6.1.3 Ölçekli eşlenik gradyen (Scaled conjugate gradient-SCG) 87
6.2 YSA ile Düşük Tutarsızlık Örneklemenin Optimize Edilmesi 88
7. SONUÇ VE ÖNERİLER 95
KAYNAKLAR 98
EKLER 103
ÖZGEÇMİŞ 117

KISALTMALAR

1D : Bir boyutlu
2D : İki boyutlu
ADC : Analog to Digital Converter
AFOV : Angular Field of View
AI : Artificial Intelligence
ANN : Artificial Neural Network
ASD : Altı serbestlik derecesi
BR : Bayesian Regularization
CCD : Charge Coupled Device
CMOS : Complementary Metal Oxide Semiconductor
CNN : Convolutional Neural Network
DAC : Digital to Analog Converter
DOF : Depth of Field
FOV : Field of View
FP : Finder Patterns
GMMs : Gaussian Mixture Models
HFOV : Horizontal Field of View
HS : Yüksek hızlı
HSL : Hue, Saturation, Luminance
IR : Infrared
LED : Light Emitting Diode
LM : Levenberg–Marquardt
LVDP : Low Voltage Differential Pair
MHA : Mikro Hava Aracı
MOS : Metal Oxide Semiconductor
MSE : Mean Square Error
MTF : Modülasyon transfer fonksiyonu
NI : National Instruments
OCR : Optical Character Recognition
QR : Quick Response

PMAG **:** Primary Magnification

PTP **:** Precision Time Protocol

RANSAC **:** Random Sample Consensus

RGB **:** Red, Green, Blue

SCG **:** Scaled Conjugate Gradient

STM **:** Yapısal konu modeli

STV **:** Uzay-zamansal hacimler

USB **:** Universal Serial Bus

YSA **:** Yapay sinir ağları

SEMBOLLER

C	**:** Geometrik merkez
C(i,j)	**:** Dokunun kapasitansı
D	**:** Lens çapı
e	**:** Ağ hatalarının bir vektörü
f	**:** Merceğin odak uzaklığıdır
f/#	**:** Diyafram açıklığı veya arlığı
G	**:** Kümülatif olasılık dağılımı
g	**:** Gradyen yön vektörü
H	**:** Referans kümülatif olasılık dağılımı
h	**:** Sensör boyutu
h′	**:** Görüş alanı
He	**:** Hessian matrisi
I	**:** Birim matris
$\mathbf{I_{max}}$	**:** Maksimum yoğunluk
$\mathbf{I_{min}}$	**:** Minimum yoğunluk
$\mathbf{L_{AVG}}$	**:** Beyaz çizgi modüllerinin ortalama uzunluğu
$\mathbf{L_{STD}}$	**:** Standart sapma
o	**:** Görüntü uzay çözünürlüğü
P	**:** Arama yönü vektörü
r	**:** Toplam piksel sayısı
S	**:** Sendrom
s	**:** Kenar algılama puanı
z′	**:** Görüntü mesafesi
z	**:** Nesne mesafesi
W	**:** Genişlik
WD	**:** Lensten çalışma mesafesi
α	**:** Galois alanındaki ilkel öğe
α,β	**:** Amaç fonksiyon parametreleri
α_k	**:** Belirlenen adım boyutu
ρ	**:** Orijinden çizgiye dik mesafe

$\rho_x(x_j)$: Olasılık yoğunluk fonksiyonu

Ω : Hata değerlendirici polinomu

Λ : Hata bulucu polinomu

θ : Orijinden çizgiye normalin açısı

ς : Nesne uzay çözünürlüğü

ϑ : Nesne alan çözünürlüğü

ϕ : Piksel boyutu

δ : Sensör çözünürlüğü

ν : Sensör boyutu

κ : Aktif piksel sayısı

ψ : Gerçek uzaklık

ζ : Öngörülen uzaklık

μ : Kombinasyon katsayısı

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1: Seçilen sensör değerleri **21**
Çizelge 3.2: Haberleşme arayüzlerinin karşılaştırması **39**
Çizelge 4.1: Renk gösterimi ve ton değeri **43**
Çizelge 4.2: Kodlanabilir karakter dizisi **52**
Çizelge 4.3: QR kod ile geleneksel barkod arasındaki farklılıklar **53**
Çizelge 5.1: Donanım özellikleri **69**
Çizelge 5.2: Kullanılan sensöre ait datasheet değerleri **70**
Çizelge 6.1: Levenberg–Marquardt algoritması MSE ve R değerleri **89**
Çizelge 6.2: Ölçekli eşlenik gradyen algoritması MSE ve R değerleri **91**
Çizelge 6.3: Bayesian düzenlemesi algoritması MSE ve R değerleri **92**
Çizelge 6.4: Levenberg–Marquardt, ölçekli eşlenik gradyen ve Bayesian düzenlemesi algoritmaları performans değerleri **94**
Çizelge B.1: Düzenli aralıklı kombinasyonel 512 elemanlı veri kümesi **106**

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1: Görüntü kalitesi için gerekli temel parametreler [49] **17**
Şekil 3.2: Görüntü sensörü çeşitleri blok şemaları (a) CCD blok şeması (b) CMOS blok şeması **19**
Şekil 3.3: Sony IMX214 sensörünün iç yapısı **20**
Şekil 3.4: Bir merceğin açısal görüş alanının odak uzaklığı **22**
Şekil 3.5: Belirli bir AFOV için HFOV **23**
Şekil 3.6: Yüksek ve düşük f / # (diyafram açıklıklı veya aralıklı) lensler için DOF'un geometrik gösterimi **25**
Şekil 3.7: İki karenin çözümlenmesi **27**
Şekil 3.8: Siyahlar ve beyazlar arasındaki yoğunluk farkı olarak tanımlanan kontrast şeması **28**
Şekil 3.9: Birbirine yakın yerleştirilmiş ve bir mercekten görüntülenmiş iki nokta [50] **29**
Şekil 3.10: Pozitif ve negatif bozulma örneği **30**
Şekil 3.11: Geleneksel ve telesentrik lenslerin görüş alanı karşılaştırılması **31**
Şekil 3.12: 0.13xPMAG değerindeki bir görüntüleme lensi için örnek bir MTF eğrisi **32**
Şekil 3.13: 1/3" boyutundaki sensörün farklı odak uzunluklarına sahip lensleri ve bunların görüş alanları [50] **34**
Şekil 3.14: Yönlü aydınlatma ile elde edilen görüntü [50] **36**
Şekil 3.15: Yaygın aydınlatma ile elde edilen görüntü [50] **37**
Şekil 3.16: Halka aydınlatma ile elde edilen görüntü [50] **37**
Şekil 3.17: Polarize aydınlatma ile elde edilen görüntü [50] **38**
Şekil 3.18: Yaygın eksenel aydınlatma ile elde edilen görüntü [50] **38**
Şekil 4.1: HSL renk uzayı [49] **42**
Şekil 4.2: 5 seviyeli bir görüntü piramidinin görsel temsili [54] **45**
Şekil 4.3: Korelasyon prosedürü **45**
Şekil 4.4: Düşük tutarsızlık örneklemesi [49] **47**
Şekil 4.5: Histogram eşleştirme **48**
Şekil 4.6: Gri tonlamalı bir görüntü kullanan histogram eşleştirmesi [57] **50**
Şekil 4.7: Geleneksel QR kod şekli **51**
Şekil 4.8: QR kod okuma prosedürü **54**
Şekil 4.9: Bulucu desen **54**
Şekil 4.10: 1: 1: 3: 1: 1 ile eşleşen bulucu desen **55**
Şekil 4.11: Her iki eksende de 1: 1: 3: 1: 1 ile eşleşen bulucu desenler **55**
Şekil 4.12: Bulucu desenin bağlantı bileşenleri **56**
Şekil 4.13: Bir QR kod içindeki zamanlama desenleri **57**
Şekil 4.14: OCR algılama aşamaları **59**
Şekil 4.15: Şablon görüntüsündeki kenarlara karşılık gelen eğriler **61**
Şekil 4.16: Kenar algılama 1D arama bölgesi [49] **61**

Şekil 4.17: Bir kenarın karakterize modeli **62**
Şekil 4.18: Basit kenar yöntemi karakteristiği **63**
Şekil 4.19: Bir nesnede tespit edilen düz kenar örneği [49] **63**
Şekil 4.20: Bir nesnede tespit edilen en iyi düz kenar örneği [49] **64**
Şekil 4.21: Eşmerkezli bir çizginin temelleri **64**
Şekil 4.22: Hough uzayında üç görüntü noktasının oluşturduğu sinüzoidal eğrileri. **65**
Şekil 4.23: NI Vision kenar algılama Hough dönüşümü [49] **66**
Şekil 4.24: Hough histogramının iki boyutlu bir görüntüsü **66**
Şekil 5.1: Geliştirilen sistemin donanım seçimine ait akış diyagramı **68**
Şekil 5.2: Kalite kontrol sistemindeki donanım bileşenleri ve oluşturulan düzenek. **69**
Şekil 5.3: Geliştirilen sistemin yazılım genel prensip şeması **72**
Şekil 5.4: Hata tespit sisteminin akış şeması **73**
Şekil 5.5: Kamerdan alınan işlenmiş metal parçasının görüntüsü (a) hatasız görüntü (b) hatalı görüntü **74**
Şekil 5.6: Logo tanımada yapılan işlemler **74**
Şekil 5.7: Orijinal görüntü içerisindeki logo görüntüsünün bulunması **75**
Şekil 5.8: Logo tanımlama işlemi için kullanılan NI LabVIEW programında yer alan önemli bir bölümü **75**
Şekil 5.9: Yüzey deformasyonu tespitinde yapılan işlemler **77**
Şekil 5.10: Algılanan görüntü içerisinde yüzey deformasyonu tespiti **77**
Şekil 5.11: Düzey deformasyonu tespiti için kullanılan NI LabVIEW programında yer alan önemli bir bölümü **78**
Şekil 5.12: QR kodu okumada yapılan işlemler **78**
Şekil 5.13: Algılanan görüntü içinde QR kod okuma **79**
Şekil 5.14: QR kod okuma için kullanılan NI LabVIEW programında yer alan önemli bir bölümü **79**
Şekil 5.15: Çap ölçümünde yapılan işlemler **80**
Şekil 5.16: Algılanan görüntü içinde deliklerin tespiti ve çaplarının ölçümü **80**
Şekil 5.17: Deliklerin tespiti ve çaplarının ölçümü için kullanılan NI LabVIEW programında yer alan önemli bir bölümü **80**
Şekil 5.18: OCR'da yapılan işlemler **81**
Şekil 5.19: Algılanan görüntü içinde karakterlerin okunması **81**
Şekil 5.20: OCR işlemi için kullanılan NI LabVIEW programında yer alan önemli bir bölümü **82**
Şekil 5.21: Kenar tespitinde yapılan işlemler **82**
Şekil 5.22: Algılanan görüntü içinde parçanın eninin ve boyunun ölçülmesi (a) eninin ölçülmesi (b) boyunun ölçülmesi **83**
Şekil 5.23: Kenar tespiti için kullanılan NI LabVIEW programında yer alan önemli bir bölümü **83**
Şekil 5.24: Kalite kontrol sürecini geçen bir parçanın program arayüzü **84**
Şekil 5.25: Kalite kontrol sürecini geçemeyen bir parçanın program arayüzü **84**
Şekil 6.1: Yapay sinir ağı blok şeması **88**
Şekil 6.2: Tek katmanlı 20 nöronlu yapay sinir ağı gösterimi **89**
Şekil 6.3: Levenberg–Marquardt algoritması MSE grafiği **90**
Şekil 6.4: Levenberg–Marquardt algoritması R değeri grafikleri **90**
Şekil 6.5: Ölçekli eşlenik gradyen algoritması MSE grafiği **91**
Şekil 6.6: Ölçekli eşlenik gradyen algoritması R değeri grafikleri **92**
Şekil 6.7: Bayesian düzenlemesi algoritması MSE grafiği **93**
Şekil 6.8: Bayesian düzenlemesi algoritması R değeri grafikleri **93**
Şekil A.1: Sensör datasheet sayfa 1 ..... **104**

Şekil A.2: Sensör datasheet sayfa 2 ..... **105**

ENDÜSTRİYEL UYGULAMALARDA GÖRÜNTÜ İŞLEME TABANLI OTOMATİK HATA TESPİT YÖNTEMLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

ÖZET

Günümüzde maliyet, hız ve verimliliği en iyi noktaya getirmek adına insan faktörün aradan çıkarılarak bilgisayar tabanlı üretim süreçleri kullanılmaktadır. Gerçek zamanlı ve kameralı kontrol sistemleri sayesinde, yapılmak istenilen kalite kontrol süreçleri daha doğru ve güvenilir bir şekilde yapılabilmektedir. Bu çalışmada, görsel kalite kontrol sürecini daha hızlı ve verimli hale getirmek için iki aşamalı bir otomatik hata tespit sistemi geliştirilmiştir. Tezin ilk bölümünde, kameraya bağlı sensör, lens ve aydınlatma seçimleri yapılarak görüntünün daha doğru şekilde algılanması süreci ele alınmıştır. Sensör kamera için en önemli etken olduğundan, çalışma mesafesine bağlı olarak yakalanabilecek minimum hata boyutu göz önüne alınarak sensör seçimi yapılmıştır. Lens seçimi sensöre, çalışma mesafesi ve uygulanan görüş alanı değerince çeşitli parametreler hesaplanarak yapılmıştır. Aydınlatma seçimi ise, nesne yüzeyi ve çalışma mesafesine bağlı olarak yapılmıştır. Seçimlerden sonra, hata tespit sistemi için en ideal haberleşme arayüzü belirlenmiş ve test düzeneğinin mekanik aksamları hazırlanmıştır.

Tezin ikinci bölümünde ise hataların otomatik tespiti için kullanılacak kalite kontrol süreci ve uygun görüntü işleme yöntemleri incelenmiştir. Uygun yöntemlerin belirlenmesinden önce, algılanan nesnenin RGB (Red, Green, Blue)'den HSL (Hue, Saturation, Luminance)'e dönüştürme işlemi yapılmıştır. Çalışmada, endüstriyel olarak kullanılabilecek otomatik bir hata kontrol sisteminin geliştirilmesi ve uygun görüntü işleme tekniklerinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Kalite kontrol süreci, test edilen örnek parçadaki bir desen eşleştirme tekniği olan logo tanımlama üzerine kurulmuştur. LabVIEW ve ilgili görüntü işleme araçları kullanılarak bu yöntemler gerçek zamanlı bir otomatik hata tespit yazılımı olarak gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen yazılım ile endüstriyel uygulamalarda sıkça karşılaşılan çap kontrolü, var/yok kontrolü, optik karakter tanıma, barkod okuma, desen kontrolü ve kenar kontrolü gibi farklı hatalar otomatik olarak tespit edilebilmektedir. Daha sonra sistem için uygunluğu test edilen desen eşleştirme tekniklerinden, piramit eşleştirme ve düşük tutarsızlık örnekleme algoritmaları aynı doğruluk değerleri altında zaman açısından karşılaştırılmıştır. Bu işlemden sonra, üretim sürecinde oluşan çizik gibi fiziksel kusurların tespiti ve miktarı histogram eşleştirme normalizasyonu ile yapılmıştır. Yüzey deformasyon tespitinden sonra, model 2 tipi seçilen QR (Quick Response) kodu okunmuştur. Daha sonra, görüntü üzerinde yer alan deliklerin algılanması geometrik eşleştirme ve çaplarının ölçümü kenar tabanlı algoritma kullanılarak yapılmıştır. Deliklerin algılanması ve çap ölçümünden sonra, Optik Karakter Tanıma (OCR - Optical Character Recognition) yapılmıştır. Optik karakter tanıma işlemi için bir eğitim kümesi oluşturulup, eğitim kümesine verilerine dayalı olarak oto lineer modda tanıma işlemi yapılmıştır. Son olarak kenar tespit işlemi, basit kenar tespit yöntemi ve

Hough dönüşümü kullanılarak yapılmıştır. İşlenmiş bir metal parçası üzerinde elde edilen veriler test sonuçlarında verilmiştir.

Gerçekleştirilen testlerde, kullanılan yöntemlerde eşik değer belirleme probleminin hatanın tespitinde problemlere yol açtığı görülmüştür. Bu nedenle, testlerden elde edilen verilerin yapay sinir ağı (YSA) kullanılarak, eşik değerlerin adaptif olarak belirlenebileceği "YSA Tabanlı Eşik Değer Belirleme Yöntemi" önerilmiştir. Zaman açısından daha iyi sonuç veren algoritmanın en etkili parametreleri, akıllı bir yöntem olan YSA kullanılarak optimize edilmiştir. Eşik değerlerin belirlenmesinde Levenberg–Marquardt (LM), ölçekli eşlenik gradyen (scaled conjugate gradient-SCG) ve Bayesian düzenlemesi (Bayesian regularization-BR) algoritmaları karşılaştırılmış ve en optimum değeri sağlayan algoritma seçilmiştir. Düşük tutarsızlık örnekleme en etkin parametreleri Matlab kullanılarak YSA ile eğitilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, önerilen yöntemin gerçek zamanlı uygulamalar için kararlı sonuçlar verdiği görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Endüstriyel görüntü işleme, otomatik hata tespiti, görsel kalite kontrol, yapay sinir ağı.

DEVELOPMENT OF AUTOMATIC FAULT DETECTION METHODS BASED ON IMAGE PROCESSING IN INDUSTRIAL APPLICATIONS

SUMMARY

Nowadays, computer-based production processes are used by removing the human factor for bring the cost, speed and efficiency to the best point. With real-time and camera control systems, quality control processes required can be done more accurately and reliably. In this study, a two-stage automatic error detection system has been developed to make the visual quality control process faster and efficient. In the first part of the thesis, the process of perceiving the image more accurately by making the camera-dependent sensor, lens and lighting selections is discussed. Wherefore the sensor is the most important factor for the camera, the sensor has been selected considering the minimum error size that can be caught depending on the working distance. Lens selection was made by calculating various parameters according to the sensor, working distance and applied field of view. Lighting selection was made depending on the object surface and working distance. After the selections, the most ideal communication interface for the fault detection system was determined and the mechanical parts of the test setup were prepared.

In the second part of the thesis, the quality control process and appropriate image processing methods to be used for automatic detection of errors are examined. Before determining the appropriate methods, the detected object was transformed from RGB (Red, Green, Blue) to HSL (Hue, Saturation, Luminance). In the study, it is aimed to develop an automatic error control system that can be used industrially and to determine appropriate image processing techniques. The quality control process is based on logo identification, a pattern matching technique on the sample piece tested. Using LabVIEW and related image processing tools, these methods were implemented as a real-time automatic error detection software. With the developed software, different errors such as diameter control, pass-fail control, optical character recognition, barcode reading, pattern control and edge control, which are frequently encountered in industrial applications, can be detected automatically. Then, pyramid matching and low inconsistency sampling algorithms, among the pattern matching techniques tested for the system, were compared in terms of time under the same accuracy values. After this process, the detection and amount of physical defects such as scratches in the production process were made by histogram matching normalization. After detecting the surface deformation, the QR (Quick Response) code of the model 2 type was read. Then, detection of holes on the image, geometric matching and measurement of their diameters were made using an edge-based algorithm. Optical Character Recognition (OCR) was performed after detecting the holes and measuring the diameter. A training set was created for the optical character recognition process, and the recognition process was performed in auto linear mode based on the training set data. Finally, edge detection was done using the simple edge

detection method and Hough transform. The data obtained on a machined piece of metal are given in the test results.

In the tests carried out, it was observed that the problem of determining the threshold value in the methods used caused problems in the detection of the error. For this reason, "ANN-Based Threshold Value Determination Method" has been proposed, in which the threshold values can be determined adaptively by using the data obtained from the tests using an artificial neural network (ANN). The most effective parameters of the algorithm, which gives better results in terms of time, have been optimized by using an intelligent method, ANN. Levenberg-Marquardt (LM), scaled conjugate gradient (SCG) and Bayesian regularization (BR) algorithms were compared in determining the threshold values and the algorithm providing the optimum value was selected. The most efficient parameters of low inconsistency sampling were trained with ANN using Matlab. According to the results, it is seen that the proposed method gives stable results for real time applications.

Keywords: Industrial image processing, automatic error detection, visual quality control, artificial neural network.

1. GİRİŞ

Her geçen gün endüstriyelleşen dünyada, otomatik üretim yapan işletmeler; maliyet, hız ve verimliliği en iyi noktaya getirmek adına insan faktörün aradan çıkarmak için bilgisayar tabanlı üretim süreçlerini işletmelerine eklemektedir. İnsan gücü ile üretim yapmaya devam eden işletmeler, rakiplerinin insan yerine makine gücünü kullanması ile birçoğu iflas etmiş veya üretim süreçlerini değiştirmişlerdir. Rekabetçi üretim ve makineleşme beraberinde üretilen ürünlerin kontrolünü ve test zorunluluğunu getirmiştir.

Birçok test sistemi; sensörlerden aldığı verileri, belirlenen koşullar altındaki değerler ile karşılaştırması sonucu oluşan farka göre çalışmaktadır. Önceleri mekanik ve elektriksel tabanlı olan bu sistemler, zamanla elektronik ve yazılım tabanlı sistemlere evrilmiştir. Günümüzde, test sistemlerinin en önemli tekniklerinden biri olan görüntü işleme tekniği giderek popülerleşmekte ve önemi artmaktadır. Eski kalite kontrol ve test sistemlerinde, birden çok sensör veya sistem ile yapılan işlem günümüzde bir kamera ve yazılım sayesinde çok verimli şekilde yapılmaktadır. Bazı uygulamalarda kamerasız çözümler imkansız hale gelmiştir.

Yapay görme sistemlerinde işlenen veri bir matristen ibarettir. Bu veri, ortamdaki ışığın nesnelerin üzerine çapması ve etrafa fotonlar yayılmasıyla elde edilir. Bu yayılan fotonlar kamera önündeki lens tarafından toplanır ve görüntü sensörü üzerine düşer. Bir matris şeklindeki sensör algılayıcıları, yöneldiği açıdaki gelen fotonları matrise değerler formunda yerleştirir. Bu değerler sensör içerisinde her bir piksel için farklı bir elektrik enerjisine tekabül eder. Böylece görüntü dijital hale getirilmiş olur. Bu matris halindeki görüntünün her bir elemanı yani pikseller üç temel rengin hangi tonlardan oluştuğu bilgisini içerir. Dijital görüntü; X-Ray görüntüsü, ultrason görüntüsü ve termal görüntü gibi çok farklı formlarda elde edilebilir. Farklı tekniklerle elde edilen veri, dijital bir görüntü haline getirilir.

1.1 Tezin Amacı

Bu çalışmada, görsel kalite kontrol sürecini daha hızlı ve verimli hale getirmek için iki bölümden oluşan bir otomatik hata tespit sistemi geliştirilmiştir.

Tezin ilk bölümünde, görüntünün daha doğru şekilde algılanması süreci ele alınmıştır. Bunun için öncellikle kamera, kameraya bağlı lens ve aydınlatma seçimi yapılmıştır. Kamera seçiminde en önemli etken görüntü sensörüdür. Sensör seçimi, çalışma mesafesine bağlı olarak yakalanabilecek minimum hata boyutu göz önüne alınarak yapılmıştır. Sensör seçimi yapıldıktan sonra sensör, çalışma mesafesi ve uygulanan görüş alanı değerince çeşitli parametreler hesaplanarak uygun lens seçimi yapılmıştır. Daha sonra, analiz edilecek nesne yüzeyi ve çalışma mesafesine bağlı olarak aydınlatma seçimi yapılmıştır. Kamera, lens ve aydınlatma seçimleri yapıldıktan sonra bu sistem için en ideal haberleşme arayüzü belirlenmiştir. Son olarak, hata tespit sistemi için test düzeneğinin mekanik aksamları hazırlanmıştır.

İkinci bölümde, gerçekleştirilen otomatik kalite kontrol süreci anlatılmıştır. Kontrol süreci için kullanılan işlenmiş bir metal parçasının görüntüsü algılandıktan sonra RGB (Red, Green, Blue)'den HSL (Hue, Saturation, Luminance)'e dönüştürme işlemi yapılmıştır. Bu işlemden sonra logo tanımlama üzerine kurulu olan kalite kontrol süreci gerçekleştirilmiştir. Logo tanımlama bir desen eşleştirme tekniğidir. Desen eşleştrime tekniği, bir görüntü içindeki şablon görüntünün bulunmasıdır. Desen eşleştirme tekniği takip sistemleri, kalite kontrol sistemleri, sayma işlemleri, sınıflandırma ve varlık yokluk kontrolü gibi bir çok görüntü işleme alanında kullanılmaktadır. Böylelikle, endüstriyel uygulamalarda insana bağlı ortaya çıkan hatalar minimize edilmiş ve daha kararlı hale getirilmiştir.

Logo tanımlama işleminden sonra, üretim sürecinde oluşan çizik hatasının tespiti ve miktarı bulunmuştur. Yüzeyde yer alan hataların tespit işlemi histogram eşleştirme normalizasyonu ile yapılmıştır. Yüzey defomasyon tespitinden sonra, hızlı yanıt anlamına gelen QR (Quick Response) kodu okunmuştur. Barkotlara biraz benzemektedirler fakat sadece yukarıdan aşağıya olan tek yönde değil, yukarıdan aşağıya ve sağdan sola olmak üzere iki yöndede okunmaktadır. İki yöndede okunabilmesi QR kodun daha fazla veri depolayabilmesine olanak tanır. QR kod barkoda göre daha fazla bilgi depolayabilme, daha az hata, daha güvenli, daha kolay okunma ve yazdırma avantajlarına sahiptir. Bu çalışmada, QR kod tipi olarak model 2

tipinin okunması yapılmıştır. QR kodunun okunmasından sonra, görüntü üzerinde yer alan deliklerin algılanması ve çaplarının ölçümü yapılmıştır. Deliklerin tespitinde geometrik eşleştirme ve çapların ölçümünde kenar tabanlı algoritma kullanılmıştır. Deliklerin algılanması ve çap ölçümünden sonra, Optik Karakter Tanıma (OCR - Optical Character Recognition) yapılmıştır. Optik karakter tanıma işlemi için öncellikle bir eğitim kümesi oluşturulmuştur. Daha sonra, eğitim kümesi verilerine dayalı olarak oto lineer modda tanıma işlemi yapılmıştır. Son olarak kenar tespit işlemi yapılmıştır. Burada, kalibre edilmiş yatay ve dikey ebat ölçümleri yapılmıştır. Kenar tespit işlemi için basit kenar tespit yöntemi ve Hough dönüşümü kullanılmıştır. İşlenmiş bir metal paraçası üzerinde üretim süreçlerinin kalite kontrol süreçleri yapılmış ve test sonuçlarında da gerçekleştirilen altı adet kalite kontrolü gösterilmiştir.

1.2 Tezin Özgün Değeri

Çalışmada, tek bir kamera sistemi ile birden fazla görsel kalite kontrol süreci ele alınmıştır. Bu sürecin tek bir kamera ile kontrol edilmesi endüstriyel sistemlerdeki maliyeti düşürmüş ve hızı artırmıştır. Basit bir sistem ile birçok karmaşık işlemin kolay bir şekilde yapılabileceği gösterilmiştir. Ayrıca, hata tespitindeki eşik değer belirleme problemi ele alınmıştır.

Desen eşleştirme tekniklerinden piramit eşleştirme ve düşük tutarsızlık örnekleme algoritmaları aynı doğruluk değerleri altında zaman açısından karşılaştırılmıştır. Zaman açısından daha iyi sonuç veren algoritmanın en etkili parametreleri, akıllı bir yöntem olan yapay sinir ağı (YSA) kullanılarak optimize edilmiştir. YSA kullanılarak, eşik değerlerin adaptif olarak belirlenebileceği "Yapay Sinir Ağı Tabanlı Eşik Değer Belirleme Yöntemi" önerilmiştir.

Eşik değerlerin belirlenmesinde Levenberg–Marquardt (LM), ölçekli eşlenik gradyen (scaled conjugate gradient-SCG) ve Bayesian düzenlemesi (Bayesian regularization-BR) algoritmaları karşılaştırılmış ve en optimum değeri sağlayan algoritma seçilmiştir. Düşük tutarsızlık örnekleme için "minimum kontrast", "orta düzey açısal doğruluk" ve "başlangıç adım boyutu" parametreleri seçilmiştir. YSA'ya sokulması için bu üç parametre, düzenli aralıklarla bir kombinasyon şeklinde 500'den fazla elemanlı veri kümesi oluşturulmuştur. Bu üç parametre, Matlab kullanılarak tek katmanlı 20 nöronlu yapay sinir ağı ile eğitilmiştir. Elde edilen sonuçlar, kullanılan yöntem ile karşılaştırılmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Yaptığımız çalışmada, bir nesne üzerinde yer alan logonun tanımlanması, Optik Karakter Tanıma (OCR - Optical Character Recognition) işleminin yapılması, QR (Quick Response) kodunun okunması, çap ölçümü, kenarın algılanması ve çizik gibi kusurların tespit işlemleri yapılmıştır. Bu işlemlerle ilgili yapılan birçok çalışma aşağıda tarih sırasına göre belirtilmiştir:

İki aşamalı bir algoritma sunularak dairelerin tanınması ilgili [1]'de bir çalışma yapılmıştır. İlk aşamada, dairelerin merkezlerinin tespiti için bir çemberin her akorunun merkezinden geçtiği özelliği kullanan iki boyutlu (2D) Hough dönüşümü kullanılmıştır. İkinci aşamada ise bu dairelerin varlığını yarıçap histogramı ile doğrulanmıştır. Önerilen yöntemin gürültüye karşı standart gradyen tabanlı yöntemlerden daha dayanıklı olduğu benzetim verileriyle deney sonuçlarında gösterilmiştir.

Yapay görme ile boyutsal kontrolde yer alan kenar algılama sürecini iyileştirmeyi amaçlayan bir algoritma [2]'de yapılan çalışmada önerilmektedir. Bu algoritma, B-spline interpolasyon yöntemi ve optimize edilmiş bir türev filtresine birleşmesine dayanmaktadır. Algoritmanın işlevselliği deney sonuçlarıyla gösterilmiştir.

Ayırma hattında her bir elmanın dört tarafının da aynı anda incelendiği bir donanım ile referans görüntüye dayalı elmada yer alan kusurların tespiti [3]'teki çalışmada yapılmıştır. Deneysel sonuçlarda, fraktal özelliklerinin normal meyve yüzeylerinden içbükey yüzeyleri sınıflandırmada etkili olduğu gösterilmiştir.

İşlenmiş çelikte ürün hasarının ve üretim maliyetinin azaltılması için destek vektör makinesi (SVM-Support Vector Machine) kullanılan gerçek zamanlı bir hata tespit yaklaşımı [4]'te yapılan çalışmada sunulmaktadır. Yaklaşım ile çelikteki kusurlar incelenmiş ve veri gürültüsü oluştuğunda karar sınırlarını otomatik olarak öğrenen bir SVM öğrenme algoritması geliştirilmiştir. Algoritmanın, gerçek zamanlı uygulamada hatayı tespit ettiği deneysel sonuçlarla gösterilmiştir.

Mobil bilgi ortamındaki kullanımda QR kodunun uygulamaları [5]'teki çalışmada yapılmış ve tek tip olmayan arka plandan QR kodunu çıkartılması için bir algoritma önerilmiştir. Görüntüdeki eşit olmayan ışık parazitini ortadan kaldırılması için önerilen algoritmada ilk olarak ışık dengeleme yapılmaktadır. Daha sonra önerilen algoritmada, barkodları tam olarak çıkarılmasını sağlamak adına QR kodunun özellikleri kullanmaktadır.

Kaynak işlemi sırasında eriyik havuzundaki yarıçap ve konum gibi parametrelerinin tahmin edilmesi ve bu işlem sırasında meydana gelecek kusurların erken tespit edilmesi ile ilgili bir çalışmada [6]; püskürtmelere, yansımalara ve gürültüye dirençli eriyik havuzu parametre tahmini için bir yaklaşım sunulmuştur. Eriyik havuzu görüntüleri alındıktan sonra önerdikleri yeni bir yöntemle kontur noktalarının tahmini yapılmıştır. Daha sonra, daire modelinin tespit edilen kontur noktalarına uyumu ve püskürtmeler nedeniyle ortaya çıkan aykırı değerlerin sınıflandırılması yapılmaktadır. Önerilen yaklaşımın düşük hacimde ve algılama doğruluğunda geleneksel sağlam yerleştirme yöntemlerinden daha iyi performans gösterdiği benzetim sonuçlarıyla gösterilmiştir.

Döküm ekstrüzyon üretim sürecindeki kusurları gerçek zamanlı olarak izleyebilen ve Mie ışık saçılımı olarak adlandırılan koşutlanmış bir ışık kaynağının kırılmasının kullanıldığı bir sistem [7]'deki çalışmada önerilmiştir. Kusurların zıt koyu bölgelerini tespit etmek için bir damla analizi gerçekleştirilen görme analiz sistemi kullanılmaktadır. Kusur tespit sistemi; kusurların sayısını, türünü, boyutunu ve konumunu tespit edebilmektedir. Deney sonuçlarında, test için oluşturulan donanımda önerilen sistemin yüksek doğrulukta sonuç verdiği gösterilmiştir.

Yatak yüzeylerinin hızlı ve doğru bir şekilde tespit etmeye uygun makine görüsüne dayalı bir otomatik algılama sistemi [8]'deki çalışmada önerilmiştir. İlk olarak, yataktaki tespit edilen bölgeleri bulmak için en küçük kareler uydurma ve halka taraması kullanılmaktadır. İkinci olarak, hata tespitini kolaylaştırmak için kutup-kartezyen koordinat dönüştürme tekniği kullanılarak halka şeklindeki görüntüler dikdörtgen görüntülere dönüştürülmektedir. Daha sonra, kusur olmayan bölgeleri hariç tutmak ve kusurların olup olmadığına karar vermek için boyut filtreleme uygulanmış ve kusurları sınıflandırmak için döngüsellik yapılmıştır. LabVIEW programında yapılan benzetim sonuçlarında, kusurların %92 doğrulukla tespit edilebileceği gösterilmiştir.

Otomatikleştirilmiş montaj ekipmanında görsel olarak işaretlenen hataları tespit etmek için [9]'daki yapılan çalışmada birkaç geleneksel web kamerasıyla LabVIEW uygulamasında görüntü işleme yapılmıştır. Testler üç parçalı bir konveyör aparatında gerçekleştirilmiştir.

Kenar algılama ile ilgili yapılan çalışmada [10]; sebzelerin, meyvelerin ve tahılların kalite denetimi için Gradyen ve Laplacian tabanlı en yaygın olarak kullanılan kenar algılama tekniklerinin karşılaştırmalı analizi sunulmuştur. Canny kenar algılama algoritmasının neredeyse tüm senaryolarda LoG, Robert, Prewitt ve Sobel algoritmalarından daha iyi performans sağladığı yapılan benzetim sonuçlarıyla gösterilmiştir.

QR kod okuma ile ilgili [11]'deki çalışmada bir yöntem önerilmiştir. Bu yöntem ile, çok sayıda düşük çözünürlüklü görüntüden yüksek çözünürlüklü bir görüntü oluşturan süper çözünürlük tekniği kullanılarak düşük çözünürlüklü QR kodun tanınması yapılmıştır. Süper çözünürlük sürecinde önerilen yöntem, QR kodlarının yalnızca ikili modelden oluştuğu özelliği kullanmaktadır. Deneysel sonuçlar, önerilen yöntemle %98'lik bir tanıma oranının elde edilebileceği gösterilmiştir.

[12]'de yapılan çalışmada, bir metal bilyenin yüzeyindeki kusurları incelemek için geliştirilmiş bir sistem yapılmıştır. Bu sistemdeki otomatik kontrol mekanizması ile bir metal bilyenin tüm yüzeyi kontrol edilebilmektedir. Metal bilyedeki kusurlar ise, yakalanan her görüntünün karşılık gelen referans görüntüyle basitçe karşılaştırılmasıyla tespit edilmektedir. Deney için oluşturulan sistemde saniyede iki metal bilyenin incelendiği söylenmektedir.

Görüntü ikilileştirme, görüntü eğim düzeltmesi, görüntü yönlendirme, görüntü geometri düzeltmesi, görüntü normalleştirme dahil olmak üzere görüntü işlemeye dayalı QR kodu tanıma algoritması [13]'te yapılan çalışmada tartışılmıştır. Döndürme sürecinde QR kodu sembolü çıkartılmıştır. Geometrik düzeltmede Hough dönüşümü kullanmak yerine bilinen noktaların koordinatlarını kullanarak QR kodunun dördüncü tepe noktasını çıkartılmıştır. Görüntü normalleştirmede ise ortalama araçların neden olduğu hatayı azaltmak için görüntü ölçeklendirme ilkesi kullanılmıştır.

Havaalanları ve fabrikalar gibi ticari kuruluşlarda kullanılabilecek QR kodu etiketi kullanan bir insan izleme robotu [14]'teki yapılan çalışmada önerilmektedir. Bu insan izleme robotu üç adımdan oluşmaktadır. İlk adımda, QR kod tanıma kullanan kişinin

tanımlaması yapılmaktadır. İkinci adımda, izlenen kişi robottan uzaklaştığında QR kodunun konumunu belirleyebilmesi için şekle dayalı model eşleştirmeyi kullanan konum tespiti yapılmıştır. Son adımda ise insan takibi için uygun bir mesafenin korunmasını sağlamak adına kızılötesi (IR - Infrared) kamera ile robot kontrolü yapılmıştır. Yapılan testlerde, Robotun belirli bir mesafeyi korurken takibi sağlayabildiği gösterilmiştir.

Bir kağıtta yazılı olan metin içeriğinin makine tarafından okunmasının sağlanmasını ele alan çalışmada [15]; karakterler korelasyon yöntemini kullanan OCR tekniğiyle yapılmıştır. Fakat kullanılan teknik ile sadece 52 karakterin tanımlanması yapılmış ve İngilizce dil için iyi çalışırken, Telugu gibi karmaşık dillerde iyi performans sağlamamaktadır.

Deformasyonlar, çizikler, çatlaklar ve paslar dahil olmak üzere yatak kapaklarındaki çeşitli görünüm kusurlarının incelendiği bir yapay görüntü işleme sistemi [16]'daki yapılan çalışmada önerilmiştir. Aynı zamanda, kusurların görünümünü iyileştirmek ve kontrollü ortamlar elde etmek için bir aydınlatma ve görüntü toplama sistemi tasarlanmıştır. Önerilen yöntem yağ veya kirden kaynaklanan yanlış kusurlar ve yatak kapağının başka malzemenden yapılması durumu dışında yüksek verimlilik ve doğruluk sağladığı gösterilmiştir.

[17]'de yapılan çalışmada düz olmayan şeffaf yüzeylerdeki kusurları ortaya çıkarabilen, tespit edebilen ve karakterize edebilen bir görüntü işleme sistemi sunulmaktadır. Bu tür yüzeylerde şeffaf ve opak kusurlardan kaçınarak yüzeyin istenen özelliklerini vurgulayabilmek adına aydınlatma sistemi geliştirilmiştir. Aydınlatma sisteminin kusurların ortaya çıkarılması ve tespiti üzerindeki etkinliği ticari far lens modelleri kullanılarak ve robotik bir platformda bir dizi test yapılarak gösterilmiştir.

Gradyen Hough dönüşümü ve tek boyutlu Hough dönüşümüne dayalı yeni bir eş merkezli daire algılama yaklaşımı [18]'de yapılan çalışmada önerilmektedir. Gradyen Hough dönüşümü ile daire merkezi algılama sürecinde görüntü çözünürlüğü oranı azaltılarak algılama süresi azaltılmıştır. Tek boyutlu Hough dönüşümü ile yarıçap algılama sürecinde algılama verimliliğini artırılması için benzer yarıçaplar birleştirilmiştir. Deneysel sonuçlarla yeni önerilen algoritmanın kesişen, süreksiz veya belirli girişimlere sahip eş merkezli daireleri algılayabildiği gösterilmiştir.

Dairesel nesne tanıma konusu ele alınan [19]'da yapılan çalışmada; ev güvenlik robotları için makine görüsüne dayalı bir yöntem önerilmiştir. Önerilen bu sistem ile alınan görüntü işlenmekte ve renkli bir top algılanmaktadır. Önerilen yöntem nesnenin bölgesini bulmak için renk özelliği uygulanan nesne bölümleme modülü ve nesnenin bölgesi belirlendikten sonra bölgede bir daire içinde aynı olan yeterli sayıda yarıçapın olup olmadığı kontrol edilerek hızlı bir rasgele daire algılama yöntemi kullanılan daire algılama modülü olmak üzere iki modülden oluşmaktadır. Önerilen yöntem, bir top bulmak için bir ev güvenlik robotu üzerinde test edilmiştir.

Mikro Hava Aracının (MHA) otonom kalkış, havada asılı kalması ve inişi için yerleşik bir monoküler görüş sistemi [20]'de yapılan çalışmada sunulmaktadır. Bir MHA'nın otonom uçuşu için metrik ölçekli görüntü bilgisi kritik olduğundan, altı serbestlik derecesi (ASD) görüntü tahmini için yeni bir çözüm sunulmaktadır.

Hem ekonomik hem de sıhhi nedenlerle kümes hayvancılığı endüstrisinin temel sorunlarından biri olan kusurlu yumurtalarının nitelikli olarak sınıflandırılması süreci [21]'de yapılan çalışmada ele alınmıştır. Kirli, çatlaklı ve kan lekesi gibi kusurlu yumurtaların görüntü işleme teknikleri ile temiz yumurtalardan ayrıştırma işlemi yapılmıştır. Bu ayrıştırma işlemi ile yumurta tazeliği ve kan lekesinin tespitindeki kalite değerlendirilmesinde kullanılabileceği söylenmiştir.

Geleneksel normalleştirilmiş çapraz korelasyon katsayısını iyileştirmek için önemli noktalar tekniğini kullanan kısmi bilgi korelasyon katsayısı yöntemi [22]'de yapılan çalışmada önerilmektedir. Kullanan kısmi bilgi korelasyon katsayısı tekniği inceleme görüntüsündeki yalnızca önemli gri değerleri kullanmakta olup, her piksel noktası için bir korelasyon katsayısı hesaplaması gerektirmemektedir. Geleneksel normalleştirilmiş çapraz korelasyon katsayısı, çevresel değişikliklere veya denetim ekipmanına karşı oldukça hassas olduğu için yanlış alarmlar oluşur. Kullanan kısmi bilgi korelasyon katsayısı tekniğinin hata tespitinde yanlış alarmları etkili bir şekilde azaltabileceğini deney sonuçlarıyla gösterilmiştir.

Kumaşta hata tespiti ve sınıflandırılması ile ilgili [23]'te yapılan çalışmada; görüntü işleme tabanlı olarak hata tespiti ve sınıflandırma işleminin otomatik olarak gerçekleştirilmesi ele alınmıştır. Hata tespiti için hata tespit algoritması ve hata sınıflandırması için hata sınıflandırma yaklaşımı önerilmiştir. Algoritma dalgacık dönüşümü, çift eşikleme ile ikileme ve morfolojik işlemlerine dayanırken, yaklaşım

seviye birlikte oluşum matrisine dayanmaktadır. Kumaşlarda yaygın olarak ortaya çıkan çözgü hatası, atkı hatası, kirli iplik deliği ve iplik akışının tespiti yapılmış ve sınıflandırılmıştır. Kumaşın kusurlu ve hatasız bölgeleri % 93,4 doğrulukla tespit edildiği ve kusurların % 96,3 doğruluk oranı ile sınıflandırıldığı söylemişlerdir.

Demiryolu denetiminde önemli bir yer alan kısmen aşınmış ve tamamen eksik bağlantı elemanlarının otomatik olarak tespit etmek amacıyla olasılıksal bir yapı modeli olan yapısal konu modelini (STM) [24]'te yapılan çalışmada önerilmiştir. Kısmen aşınmış elemanlar; sağlam bağlantı yüksek seviye, kısmen aşınmış orta seviye ve ciddi şekilde aşınmış düşük seviye olmak üzere üç seviyede sıralanmıştır.

Hızlı montaj yapan bir makinadaki o-ringlerin test aparatı olarak kullanıldığı bir hata tespiti ve sınıflandırılması [25]'teki çalışmada yapılmıştır. Hata tespitinin yapılmasında Blob analizi ile Gauss Karışım Modelleri (Gaussian Mixture Models - GMMs), optik akış, ve ortalama çalışan olmak üzere üç farklı yöntem kullanılmıştır. Bu yöntemler, uzay-zamansal hacimlere (STV) dayalı olarak önceden geliştirilmiş bir arıza tespit yöntemi ile karşılaştırılırmıştır. Bu yöntemlerin daha az eğitim ve işlem süresi gerektirdiği, hataları STV yöntemine göre daha hızlı tespit edebildiği gösterilmiştir. Ayrıca, en düşük işlem süresine ve en hızlı yanıt süresine sahip olma açısından bu üç yöntem arasından en iyisi deneysel sonuçlarla gösterilmiştir.

[26]'da yapılan çalışmada inşaat altyapısının güvenliğini, hizmet verebilirliğini sağlamak amacıyla beton ve asfalttaki farklı kusurlarının tespitinde görüntü işlemeye dayalı bir sentez çalışması sunulmaktadır. Çeşitli metodolojiler tanımlanmış ve kategorize edilmiştir. Ayrıca binaların, köprülerin, yolların, boruların ve tünellerin farklı kusur modellerini tespit etmek ve ölçmek için mevcut performanslara ilişkin ilgili testler ve değerlendirmeler üzerine literatür sunulmuştur.

Üç boyutlu nokta bulutu verilerinde çemberleri bulmak ve ölçmek için mevcut bir iki boyutlu daire dedektörü kullanarak yeni bir üç boyutlu daire algılama algoritması [27]'de yapılan çalışmada önerilmektedir. Ayrıca, bir nesne yüzeyinin üç boyutlu nokta bulutu verilerini toplamak için lazer vizyon tabanlı bir tarama sistemi de tasarlanmıştır. Normal vektöre dayalı olarak, toplanan üç boyutlu nokta bulutu verilerinden bir iki boyutlu normal yüzey görüntüsü yeniden oluşturulmuştur. Daha sonra, normal yüzey görüntüsü üzerindeki dairelerin merkez koordinatlarını ve yarıçapını belirlemek için iki boyutlu daire dedektörü uygulanmıştır. Son olarak,

normal yüzey görüntüsü üzerinde çemberlerin belirlenen iki boyutlu merkez koordinatlarının üç boyutlu nokta bulutu veri koordinatlarına dönüştürülerek nesne yüzeyindeki çemberlerin üç boyutlu merkez koordinatları yerleştirilmiştir. Deneysel sonuçlar ve taranan nesnedeki dairesel deliklerin gerçek parametreleri arasındaki karşılaştırma, önerilen algoritmanın daire merkezlerinin üç boyutlu koordinatlarını bulduğunu ve üç boyutlu nokta bulutu verilerinde mevcut bir iki boyutlu daire dedektörünü kullanarak dairelerin yarıçapını ölçtüğünü gösterilmiştir.

Tahribatsız muayene ve kaynak sonrası kalite denetimi için otomatikleştirilmiş bir görüntü işleme yöntemi [28]'de yapılan çalışmada sunulmuştur. Bu yöntem ile kaynak bağlantı profilinin ve özellik noktalarının otomatik olarak çıkarılması, kaynak boncuk boyutunun ölçülmesi ve kaynakta yer alan hatalarının tespiti yapılmıştır. Aynı zamanda lazer sistem ile kaynak yüzeyinin üç boyutlu profili çıkartılmıştır. Kaynak özellik noktalarının otomatik olarak çıkarılması için RANSAC (Random Sample Consensus) algoritmasını geliştirmişlerdir. Bu algoritmanın geleneksel en küçük kareler yöntemine kıyasla büyük değerlere karşı daha duyarlığı olduğu iddia edilmektedir.

Yük trenlerinde yer alan buji blok anahtar eksikliğinden meydana gelen arızanın otomatik olarak tespiti için nesne tespitine dayalı bir algılama yöntemi [29]'da yapılan çalışmada önermişlerdir. Algılama yöntemi, gradyenlerin seyrek histogramlarına ve SVM'ye dayanmaktadır.

Genel ve özel depolama olmak üzere iki depolama seviyesine sahip ve belge kimlik doğrulaması için kullanılabilen yeni bir QR kodu algılama yöntemi [30]'da yapılan çalışmada sunulmaktadır. Genel düzey standart QR kodu depolama düzeyiyle aynı iken, özel seviye siyah modüllerin belirli dokulu desenlerle değiştirilmesiyle oluşturulmaktadır. Böylelikle ilk seviye ile QR kodunun güçlü özelliklerini korunurken, ikinci seviye ile QR kodunun kopyalarından ayırt etmek için kullanılabilir. Ayrıca özel seviyede, yazdır ve tara sürecinde bozulmuş sürümler ve karakterizasyon modelleri arasındaki korelasyon değerlerinin maksimize edilmesine dayalı bir örüntü tanıma yöntemi kullanılmaktadır. Deney sonuçları, depolama kapasitesinin % 28'e kadar iyileştirildiğini gösterilmiştir.

SVM sınıflandırıcılarıyla birleştirilmiş yönelimli gradyen özelliklerinin histogramına dayalı bir QR kodu tanıma algoritması [31]'de yapılan çalışmada sunulmaktadır.

Oluşturulan her desenin gradyen özelliklerini çıkarılması histograma dayalı QR kodu tanıma algoritması kullanarak yapılmaktadır. Elde edilen özellikler iki doğrusal SVM sınıflandırıcısına aktarılarak ilgisiz alanlar kaldırılır. QR kodları bir model yakınlığı kısıtlamasına göre uygun şekilde lokalize edildikten sonra, görüntü ikili arıtma ve morfolojik işlem uygulanarak yakalanan kod geliştirilir. Son olarak, desenler doğru bir iki boyutlu barkod kod çözücü kullanılarak çözülmektedir.

Yüksek yoğunluklu QR kodlarının modül tanımasını ve sınıflandırmasını [32]'de yapılan çalışmada ele alınmıştır. Modül tanıma sonuçlarını iyileştirmek için her modülün merkezlilik yaklaşımını kullanmayı önermektedirler. Bu yaklaşım merkezi piksellerin önemini artırır ve her modülün kenar piksellerinin önemini azaltır. Önerilen yaklaşımın deneysel sonuçlarda QR kodlarının modül tanımasında ve sınıflandırmasında iyi sonuç sağladığı gösterilmiştir.

[33]'te yapılan çalışmada, yarıçaplarına gerek duyulmayan eş merkezli dairelerin merkezinin gerçek izdüşümünü doğru bir şekilde bulmak için geliştirilmiş bir yöntem sunulmaktadır. Bu yöntemde, elips uydurmadan sonra dört kesişim noktasını ve iki çapraz oran denkleminin (toplamda üç 2. derece polinom denklemi) çözülmesi gerektirmektedir. Benzetim sonuçlarında dönüş açısının, iç yarıçapın, dış yarıçapın ve daire konumun doğruluğa olan etkisi gösterilmiştir.

Portakal yüzeyinde yer alan böcek yaralanması, pamukçuk lekesi, bakır yanığı gibi kusurların tespiti için yerel bölümleme algoritması [34]'te yapılan çalışmada önerilmiştir. Önerilen algoritmanın, portakal yüzeyinde ki kusurunun % 97'sini doğru bir şekilde tespit edebildiği yapılan deney sonuçları ile gösterilmiştir.

Çelik üretim hattından elde edilen kalın çelik levha görüntüleri üzerinde bir kusur inceleme sistemi [35]'te yapılan çalışmada önerilmektedir. Bu sistem de, yüzey gürültüsüyle eşit olmayan kusurları ve renk değişikliklerini ayırt edilmesinde çift aydınlatma yapısı kullanılmaktadır. Ek olarak kusur şekillerinin tespit edilmesi için Gabor filtresi kullanılan bir çapraz desen algılama algoritması uygulanmıştır. Deney sonuçların da, önerilen algoritmanın iyi algılama performansı sağladığı gösterilmektedir.

Geliştirilmiş bir QR kodu tanıma yaklaşımı önerilen [36]'da yapılan çalışmada; gerçek zamanlı sistemlerde verimli bir şekilde çalıştırılabilmesi sağlanmıştır. Yakalanan görüntü arama alanını azaltmak ve ilgilenilen bölgeleri çıkarmak için bölümlere

ayrıştırılmıştır. Daha sonra yatay ve dikey taramalar yapılıp, ana bileşen analizi ile yanlış pozitifler kaldırılmıştır. Deneysel sonuçlar ile ana bileşen analizi yönteminin işlem süresini önemli ölçüde azalttığı ve QR kodu tanıma doğruluğunun %96 olduğu gösterilmiştir.

QR kod tespiti için iki aşamalı bileşen tabanlı bir algılama yaklaşımı [37]'de yapılan çalışmada önerilmiştir. İlk aşamada, desen bilgisinin tespiti için yeni bir kenar tespit yöntemi kullanılmıştır. İkinci aşamada ise, tespit edilen desen bilgilerinin QR kodlarının köşelerine karşılık gelip gelmediğine karar verilebilmesi için desen bilgilerinin arasındaki geometrik kısıtlamalara dayalı basit bir algoritma kullanılmıştır. Deneysel sonuçlarla önerilen yöntemin QR kod algılama oranını iyileştirebileceği gösterilmektedir.

Biyolojik görme modellemesine dayalı yapılan bir çalışmada [38]; üç aşamalı olarak uygulanan bir kumaş hatası algılama algoritması önerilmiştir. İlk aşamasında belirginlik haritası çıkarmak için sözlük öğrenimi kullanılmıştır. İkinci aşamada, Laplace düzenlenmesi ile kusurlu bölgenin ayrıştırılması yapılmıştır. Son aşamada ise kusurlu bölgeleri bulmak için seyrek matris tarafından oluşturulan belirginlik haritasının bölümlere ayırılması için geliştirilmiş bir uyarlanabilir eşik bölümleme yöntemi kullanılmıştır. Önerilen yöntemin karmaşık dokulara sahip desenli kumaşlar içinde iyi bir performansa sahip olduğu simülasyon sonuçlarıyla gösterilmiştir.

Küçük parçaların boyut ölçümü, makine görüsüne dayalı olarak gerçek zamanlı olarak tespiti yapılmıştır [39]. Ayrıca görüntü işleme, görüntü kaydı ve birleştirme, kenar algılama, piksel altı konum analizi, görüntü özelliği tanıma ve küçük parça boyutunun tespitinde yer alan görüntüye dayalı kümeleme ve ölçek ölçümü incelenmiştir. Öncelikle, görüntü kaydını tamamlamak için özellik tabanlı algoritma ve görüntü kenar algılama algoritması kullanılmıştır. Görüntünün gri tonlamalı dağılımını ve görüntünün kontrastını iyileştirmek için histogram eşitleme yapılırken, görüntüde ki parazitinin azaltması için medyan parazit filtreleme algoritması kullanılmıştır. Eksik kenar piksellerini düzeltmek ve ölçüm hatasını azaltmak için en küçük kare yöntemi kullanılmıştır. Doğru bir görüntü kaydı dönüştürme matrisi elde edilmiş ve ağırlıklı ortalama füzyon algoritması ile görüntü füzyonunun tamamlanması yapılmıştır. Deneysel sonuçlar ile görüntü birleştirme algoritmasının etkili olduğu gösterilmiştir.

[40]'da yapılan çalışmada, makine görüsüne dayalı şaft parçaları için bir geometrik parça ölçüm sistemi sunulmuştur. İlk olarak, toplanan görüntüler gri tonlama işleme ve dalgacık gürültü arındırma ile önceden işlenmektedir. Ardından parça görüntüsünün kenar hattını çıkarmak için Canny algılama operatörüne dayalı olarak geliştirilmiş bir tek piksel kenar algılama yöntemi önerilmiştir. Son olarak, geometrik algoritmas uygulanarak ölçülen veriler elde edilmekte ve analiz edilmektedir. Deneysel sonuçlar ile sistemin tekrarlana bilirlik hatasının 0.01 mm'den az olduğu gösterilmiştir.

Otomobil yüzeyinde yer alan çizikler ve çukur gibi yüzey kusurlarının tespitinde kullanılacak bir otomatik denetim sistemi ve tasarımı [41]'de yapılan çalışmada sunulmaktadır. Öncellikle daha doğru bir tespit için dengesiz aydınlatma problemi ele alınmıştır. Dört adet LED (Light Emitting Diode) ışık kaynağı ile kapalı bir ortamda ve temassız olarak çalışan görüntü alma cihazı oluşturularak bu problemin çözümü sağlanmıştır. Ayrıca, otomobilin beş tarafının görüntülerini eşzamanlı olarak toplayabilmek için beş düzlem dizili CCD (Charge Coupled Device) kamerası kullanılmıştır. Otomatik denetim sisteminde ise, çok ölçekli bir Hessian matris füzyon yöntemi ile araç gövde görüntüsünden kusurlu bölgelerin çıkartılması sağlanmıştır. Bu kusurlu bölgelerin görüntüsünden bir destek vektör makinesi algoritmasına göre kusurların çukurlar ve çizikler olarak sınıflandırılması yapılmıştır. Otomatik denetim sisteminin, çukur kusurlarında %95,6 ve çizik kusurlarında %97,1 doğruluk elde ettiği deneysel sonuçlarla gösterilmiştir.

Kusurlu ürünü doğruluk kaybı olmadan tanımlamak ve sınıflandırmak için derin öğrenme tabanlı üç aşamalı bir görüntü inceleme yöntemi sunulan çalışmanın ilk aşamadasında, görüntü üzerindeki gürültünün azaltılmasında Gauss filtresi kullanılmıştır [42]. İkinci aşamada, ilgisiz arka planı ortadan kaldırması Hough dönüşümüne dayalı olarak yapılmıştır. Son aşamada ise özellik çıkarma ve karar verme temel olarak ters çevrilmiş bir artık bloğun tanıtıldığı bir derin sinir ağı aracılığıyla birleştirilmektedir. Veri kümesi için kusurlu ve hatasız şişe görüntüleri kullanılmıştır.

Makine görüsüne dayalı cep telefonu ekranı için yeni bir kusur ayıklama ve sınıflandırma şeması [43]'te yapılan çalışmada önerilmiştir. İlk olarak, tespit sürecindeki bazı beklenmedik durumları kontrol edebilmek için bir ön inceleme algoritması gerçekleştirilmiş olup, çeşitli cep telefonu ekranlarının olduğu problemi dikkate alınmış ve algılama yönteminin evrenselliğini sağlayabilmek için bir ilgi

bölgesi edinme algoritması önerilmiştir. Hata ayıklama sürecinde, algoritmanın verimliliğini artırmak için kaba kesinlikte bir strateji kullanılımaktadır. Ek olarak, birçok küçük nokta kusurlu alanlardan oluşan hafif kirli lekeler gibi bazı küme kusurlarını tespit etmek için bir kusur kümeleme algoritması tasarlanmıştır. Son olarak, çıkarılan kusurlar çok katmanlı bir algılayıcı ve kalan kusurlar derin öğrenme algoritması ile yeniden sınıflandırılmaktadır. Deneysel sonuçlar, önerilen tespit şeması ile cep telefonu ekranındaki çizikleri, uçuşan cisimleri, açık lekeleri ve koyu lekeleri tespit etmede tatmin edici performans elde edildiğini göstermektedir.

İş parçasının dairesel özelliklerini doğru şekilde tespit etmek için bir makine görüsüne dayalı bir yöntem [44]'te yapılan çalışmada önerilmiştir. Bu yöntemde, iş parçası üzerindeki tekli veya çoklu dairelerin tespit edilebilmesi için rastgele Hough dönüşümü algoritması kullanılmaktadır. Deney sonuçlarında, maksimum algılama hatasının 0,6 piksel ve ortalama sürenin 3,15 saniye olduğu gösterilmiştir.

[45]'de yapılan çalışmada, küresel bir nesnenin tanınması ve lokalizasyonu için bir binoküler stereo görüş sistemi geliştirilmiştir. Sistem, nesnenin görüntülerini almak için iki kamera kullanmakta ve görüntüleri aynı anda iki kameradan işlemektedir. Daha sonra nesneyi tanımak ve iki görüntü üzerinden gerçek zamanlı koordinatlar elde etmek için nokta Hough dönüşümü uygulanmaktadır. Önerilen sistemin küresel bir nesneyi başarıyla algılayıp konumlandırabildiği deneysel sonuçlarla gösterilmiştir.

Parmak izi verilerine göre kan grubu tanımlama problemini, hipertansiyon, tip 2 diyabet ve yaşlanmayla ortaya çıkan hastalıkların analiziyle ilgili [46]'daki çalışmada araştırma yapılmıştır. Parmak izlerinin doğru şekilde sınıflandırılması için dört aşamalı bir derin sinir ağı algoritması geliştirilmiştir. İlk aşamada parmak izi görüntüleri segmentasyon, normalizasyon, yönelim tahmini, Ridge frekans tahmini, Gabor filtre gibi çeşitli ön işleme algoritmaları ile geliştirilmiştir. İkinci aşamada örnek görüntüden parmak izi özellikleri, benzerlik vektörü oluşturularak çıkarılmıştır. Üçüncü aşamada kan grubu, parmak izlerinin çıkarılmış özelliği kullanılarak katı frekans sayımı ve mesafe formülü yardımıyla evrişimsel sinir ağı (CNN-Convolutional Neural Network) teknolojisi kullanılarak belirlenmiştir. Son aşamada ise parmak izi görüntüleri ve kan grubu ile hipertansiyon, tip 2 diyabet ve yaşlanmayla ortaya çıkan hastalıkların analizi yapılmıştır.

[47]’de yapılan çalışmada, el yazısıyla yazılmış belgelerin OCR teknolojisini kullanarak tanımlamasıyla ilgili 2000-2019 yılları arasındaki araştırma makaleleri sentezlenmiş ve analiz edilmiştir. Seçilen 176 makalenin OCR ile ilgili son teknoloji sonuçları ve araştırma boşlukları incelenmiştir.

NI (National Instruments) myRIO veri toplama kartına dayalı bir araç hedefi saptama ve bilgi çıkarma şeması [48]’de yapılan çalışmada tasarlanmıştır. LabVIEW programlama ortamında, araç hedef tespitini gerçekleştirmek için kenar algılama yöntemi, araç logosu tanımayı gerçekleştirmek için desen eşleştirme yöntemi ve araç plakasını tanımak için OCR algoritması kullanılmaktadır.

Literatürde daha önce yapılan çalışmaların çoğu tek bir kalite kontrol sistemi üzerine durmuştur. Bu çalışmada ise daha önceki çalışmalardan farklı olarak, altı adet kalite kontrol sürecinin tek bir sistemden denetimin yapılması sağlanmıştır. Böylece, endüstriyel sistemlerdeki kalite kontrol sürecinin daha hızlı ve verimli bir şekilde yapılabilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca, kullanılan yöntemlerin eşik değer belirleme probleminin hatanın tespitinde problemlere yol açtığı görülmüş ve bu sebeple, akıllı bir yöntem olan “Yapay Sinir Ağı Tabanlı Eşik Değer Belirleme Yöntemi” önerilmiştir.

Bu çalışma şu şekilde organize edilmiştir. Donanım ve görüntü işleme tanımlamaları detaylı olarak Bölüm 3 ve Bölüm 4’te detaylı olarak açıklanmıştır. Bölüm 5 ve Bölüm 6’da uygulama sonuçları ile ilgili veriler verilmiştir. Son olarak sonuç ve öneriler Bölüm 7’de verilmiştir.

3. ENDÜSTRİYEL GÖRÜNTÜ İŞLEME UYGULAMALARI İÇİN GEREKLİ DONANIMLAR VE SEÇİM KRİTERLERİ

Endüstriyel uygulamalardaki görüntü işleme tekniklerinin geliştirilmesi, öncelikle kullanılacak görüntü işleme araçlarının doğru şekilde seçilmesine ve uygun donanımların tasarımına bağlıdır. Yapılan çalışmada işlenmiş metal parçası yüzeyinde yer alan logonun tanımlanması, Optik Karakter Tanıma (OCR - Optical Character Recognition) işleminin yapılması, QR (Quick Response) kodunun okunması, deliklerin algılanması ve çapların ölçülmesi, kenarın algılanması ve çizik gibi kusurların tespiti işlemleri yapılmıştır. Bu tip kontrollerin daha doğru bir şekilde tespitinin sağlanması için kamera, lens ve aydınlatma bileşenlerinin uygun şekilde seçilmesi gerekmektedir. Bu bölümde, otomatik görüntü işleme sisteminin donanım özelliklerinin belirlenmesi ile ilgili bilgiler detaylı olarak açıklanmıştır.

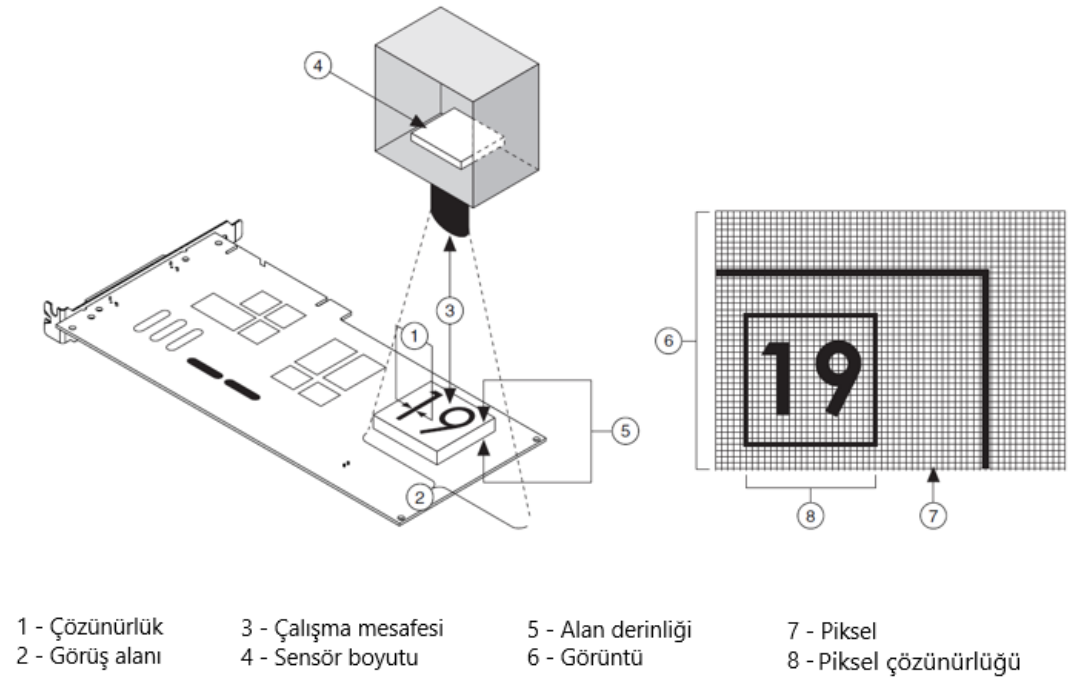
3.1 Kamera

Bir görüntüleme sistemi oluştururken uygulama, çözünürlük, aydınlatma, alan derinliği, görüş alanı, işlem hızı gibi unsurlar dikkate alınmalıdır. Fakat çoğu zaman ya performans beklentilerini karşılamayan ya da gereğinden fazla belirlenmiş bileşenleri kullanan sistemler oluşturulur. Yetersiz tanımlanmış bir sistemin çalışana kadar yeniden tasarlanması gerekir ve gereğinden fazla belirlenmiş bir sistem gerekenden daha pahalı bileşenler içereceğinden uzun vadede yüksek maliyet gerektirir. Bu hatalardan kaçınmak için teknik özelliklere dikkat edilmelidir. Bir görsel denetim sisteminin amacı bir görüntüden gerekli bilgileri çıkararak uygulama için gerekli görüntü kalitesini belirlemesini sağlayabilmektir. Bir uygulama için gerekli görüntü kalitesine sahip bir sistem, farklı bir uygulama için yeterli olmayabilir.

Bileşenlerin görüntü kalitesi; çözünürlük, çalışma mesafesi, alan derinliği, piksel, görüş alanı, sensör boyutu, görüntü, piksel çözünürlüğü faktörlerine bakılarak karar verilir.

Bir sistemin görüntüleme yeteneği, bileşenlerin görüntüleme yeteneğinin bir sonucudur. Herhangi bir görüntüleme sistemi görüntüleri analiz edebilmek için

aydınlatma, lens, kamera ve bir bilgisayara ihtiyaç duyar. Ayrıca görüntüleme sistemi için uygun bileşenlerin kullanılması gerekir. Çünkü elektronik bileşenler, kablolar gibi etkenler tüm sistemin görüntü kalitesini etkiler. Örneğin, düşük çözünürlüklü bir monitör için yüksek çözünürlüklü bir kamera belirlemenin bir faydası yoktur. Bu yüzden, görüntüleme sistemi için uygun ve birbirini tamamlayacak bileşenler seçilmelidir. Ayrıca sistemin bazı bölümlerinde kalitenin aşırı belirtilmesinden kaçınarak, bileşenlerin gereğinden daha maliyetli olmaması sağlanmalıdır. Görüntü kalitesinin belirlenebilmesi için Şekil 3.1'de gösterilen çözünürlük, çalışma mesafesi, alan derinliği, piksel, görüş alanı, sensör boyutu, görüntü, piksel çözünürlüğü faktörlerinin belirlenmesi gerekmektedir [49]. Bir görüntüleme sisteminin temel parametreleri arasında nesnenin çözünürlüğü, görüş alanı ve kullanıcının görüntülemek istediği alan derinliği bulunur. Nesneden merceğe kadar olan çalışma mesafesi de sensör boyutu kadar önemlidir. Birincil büyütme (PMAG-Primary Magnification), görüş alanının sensör boyutuna bölünmesidir.



Şekil 3.1: Görüntü kalitesi için gerekli temel parametreler [49]

Görüntüleme optiğine ek olarak görüntüleme elektroniği, bir görüntüleme sisteminin performansında önemli bir rol oynar. Kamera, yakalama kartı, yazılım ve kablolar dahil tüm bileşenlerin doğru entegrasyonu optimum sistem performansı sağlar. Ayrıca, kamera sensörünü ve onunla ilişkili temel kavramları ve terminolojiyi anlamak

önemlidir. Görüntü kalitesi için gerekli olan parametrelerin en başında sensör gelmektedir.

3.1.1 Sensör

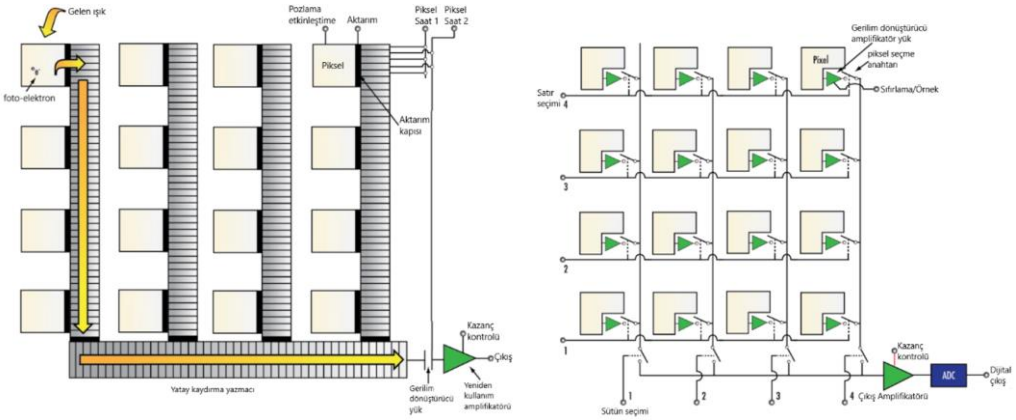
Bir kameranın en önemli paremetresi olan sensör; piksel adı verilen milyonlarca ayrı fotodedektör sahası içeren katı hal elektronik cihazlardır. Bu nedenle aynı sensöre sahip iki kamera, arayüz elektroniklerinin tasarımı nedeniyle çok farklı performans ve özelliklere sahip olabilir. Geçmişte kameralar, görüntü sensörleri olarak Vidicons ve Plumbicons gibi fototüpleri kullanmaktaydı. Fakat şuan kullanılmasalar da sensör boyutu ve formatıyla ilişkili isimlendirme üzerindeki işaretleri bugüne kadar kalmıştır. Bugün, neredeyse makine görüsündeki tüm sensörler yükten bağlaşımlı cihaz (CCD-Charge Coupled Device) ve Tamamlayıcı Metal Oksit Yarı İletken (CMOS-Complementary Metal Oxide Semiconductor) görüntüleyiciler olarak iki kategoriden oluşmaktadır [50].

3.1.1.1 Yükten bağlaşımlı cihaz (CCD-Charge coupled device)

CCD, 1969'da ABD-New Jersey'de ki Bell Labs'daki bilim adamları tarafından icat edilmiştir. Bu teknoloji dijital astrofotografi, makine ile görerek inceleme gibi görüntüleri yakalamak için yaygın olarak yıllar boyunca kullanılmıştır. Şekil 3.2a'da gösterilen CCD sensörü, bir dizi ışığa duyarlı alan içeren bir silikon çiptir [50]. Yüke bağlı cihaz terimi şarj paketlerinin fotositlerden okumaya, bir kaydırma yazmacına, çip üzerinde hareket ettirildiği yöntemi ifade eder. Saat darbeleri bir kapasitör tarafından bir voltaja dönüştürülmeden önce, şarj paketlerini çip üzerinde hareket ettirmek için potansiyel kuyuları yani şarj kapasiteleri oluşturur. CCD sensörünün kendisi analog bir cihazdır. Fakat çıktı, çip üzerinde veya kapalı olarak dijital kameralardaki analogdan dijitale dönüştürücüsü (ADC-Analog to Digital Converter) ile anında dijital sinyale dönüştürülür. Analog kameralarda her bölgeden gelen voltaj, görüntünün yeniden yapılandırılması için sinyal zincirinin bir noktasında eklenen senkronizasyon darbeleri ile belirli bir sırayla okunur.

Şarj paketleri, aktarılabilecekleri hız ile sınırlıdır. Bu nedenle yük aktarımı, hızın ana CCD dezavantajı olup, aynı zamanda CCD'nin yüksek hassasiyetine ve pikselden piksele tutarsızlılığına yol açar. Her bir şarj paketi aynı voltaj dönüşümünü gördüğünden, CCD ışığa duyarlı bölgerinde oldukça tekdüzedir. Yük aktarımı ayrıca kamaşma durumuna da yol açar. Burada bir ışığa duyarlı bölgeden gelen yük, sonlu

bir kuyu derinliği veya şarj kapasitesi nedeniyle komşu bölgelere taşar ve sensörün kullanışlı dinamik aralığına bir üst sınır getirir. Bu durum, CCD kameralardan gelen görüntülerde parlak noktalardan bulaşma olarak ortaya çıkar.



(a) **(b)**

Şekil 3.2: Görüntü sensörü çeşitleri blok şemaları **(a)** CCD blok şeması (**b)** CMOS blok şeması

CCD'deki düşük şarj kapasitesini telafi etmek için mikro mercekler doldurma faktörünü veya etkili ışığa duyarlı alanı arttırmak için çip üzerindeki şarj bağlı vardiya yazmaçları (shift-register) kullanılır. Bu piksellerin verimliliğini arttırır, ancak bir dezavantaj olan gelen ışık ışınları için açısal hassasiyeti arttırır ve verimli toplama için sensöre normale yakın bir oranda ışınların vurmalarını gerektirir.

3.1.1.2 Tamamlayıcı metal oksit yarı iletken (CMOS-Complementary metal oxide semiconductor)

Tamamlayıcı metal oksit yarı iletken (CMOS-Complementary Metal Oxide Semiconductor), 1963 yılında Frank Wanlass tarafından icat edildi. Fakat, 1967'ye kadar bunun için bir patent almadı ve 1990'lara kadar görüntüleme uygulamalarında yaygın olarak kullanılmadı. Bir CMOS sensöründe, ışığa duyarlı pikselden gelen yük piksel alanında bir gerilime dönüştürülür ve sinyal, satır ve sütun tarafından çoklu çip üzerinde dijitalden analoğa dönüştürücülerle (DAC-Digital to Analog Converter) çoklanır. Her bölgesi, esasen bir fotodiyot ve üç transistör olan CMOS tasarımına özgü bir dijital cihazdır. Ayrıca, Şekil 3.2b'de gösterildiği her bölge pikseli sıfırlama veya etkinleştirme, amplifikasyon ve yük dönüştürme, seçme veya çoklama işlevlerini yerine getirir [50]. Bu CMOS sensörlerinin yüksek hızına, ancak aynı zamanda düşük

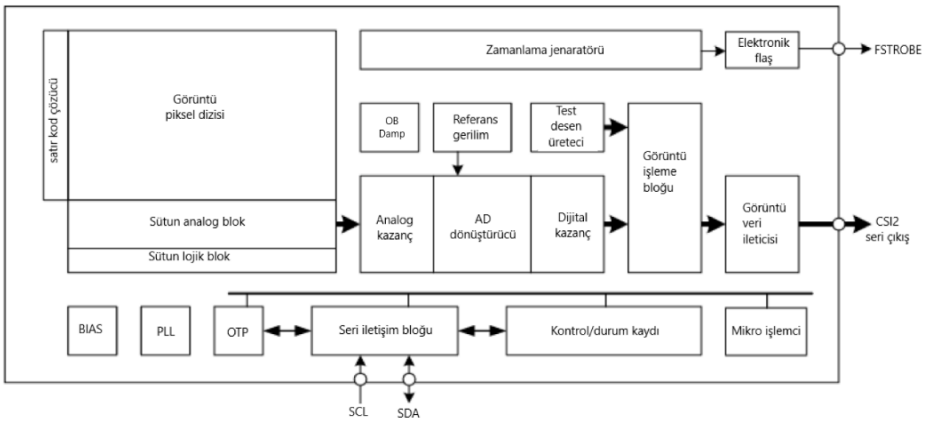
hassasiyete ve çoklu şarjdan gerilime dönüştürme devrelerindeki fabrikasyon tutarsızlıklarından dolayı yüksek sabit model gürültüsüne yol açar.

Bir CMOS sensörünün çoğullama konfigürasyonu genellikle bir elektronik sarmal kapı ile birleştirilir. Piksel sahasında ek transistörlerle, tüm piksellerin eşzamanlı olarak pozlandığı ve ardından sırayla okunan global bir örtücü gerçekleştirilebilir. Bir CMOS sensörünün bir diğer avantajı, daha az şarj akışı veya akım nedeniyle eşdeğer bir CCD sensörüne kıyasla düşük güç tüketimi ve dağıtımıdır. Ayrıca, CMOS sensörün yüksek ışık seviyelerini parlamadan yönetme yeteneği, kaynak dikişlerini veya hafif filamentleri bile görüntüleyebilen özel yüksek dinamik aralıklı kameralarda kullanılmasına izin verir. CMOS kameralar dijital CCD kameralar ile karşılaştırıldığında CCD kameralar ekstra ADC devresi gerektirdiğinden, CMOS kameralar daha küçük boyuttadırlar.

Bir CMOS sensörünün çok katmanlı metal oksit yarı iletken (MOS-Metal Oxide Semiconductor) üretim süreci, çip üzerinde mikro mercek kullanımına izin vermez, böylece bir CCD eşdeğeri ile karşılaştırıldığında sensörün etkili toplama verimini veya doldurma faktörünü azaltır. Piksel-piksel tutarsızlığı ile birleşen bu düşük verimlilik, CCD sensörlerinden daha düşük bir sinyal-gürültü oranına ve daha düşük genel görüntü kalitesine katkıda bulunur.

3.1.1.3 Kullanılan sensör

Bir kamera sensörünün aktif alanının boyutu, tipik olarak yatay boyutta belirtilir. Bu parametre, istenen bir görüş alanını elde etmek için gereken uygun lens büyütmesinin belirlenmesinde önemlidir. Bu bağlamda sensör olarak Sony IMX214 seçilmiştir. Seçilen Sony IMX214 sensörün iç yapısı Şekil 3.3'te gösterilmiştir [50].



Şekil 3.3: Sony IMX214 sensörünün iç yapısı

Seçilen Sony IMX214 sensör kare piksel dizisine sahip diyagonal 5.867 mm (Tip 1/3) 13 Mega piksel CMOS aktif piksel tipi yığılmış görüntü sensörüdür. Sütun paralel A/D dönüştürücü devreleri ile yüksek hızlı görüntü yakalama ve arka taraf aydınlatmalı görüntüleme piksel yapısı aracılığıyla yüksek hassasiyet ve düşük gürültülü görüntü (geleneksel CMOS görüntü sensörüyle karşılaştırıldığında) elde etmek için Exmor-RS™ teknolojisini kullanmaktadır. R, G ve B pigmentli birincil renkli mozaik filtresi kaldırılmıştır. Uzamsal olarak değişen pozlama teknolojisinin tanıtılmasıyla, yüksek dinamik aralıklı fotoğraflar ve filmler elde edilebilir. Elektronik bir obtüratörü (örtücü mekanizması) değişken entegrasyon süresiyle donatır. Üç güç kaynağı gerilimiyle çalışır: giriş/çıkış arabirimi için analog 2.7 V, dijital 1.0 V ve 1.8 V ve düşük güç tüketimi sağlar. Seçilen sensör ile ilgili veriler Çizelge 3.1'de gösterilmiştir.

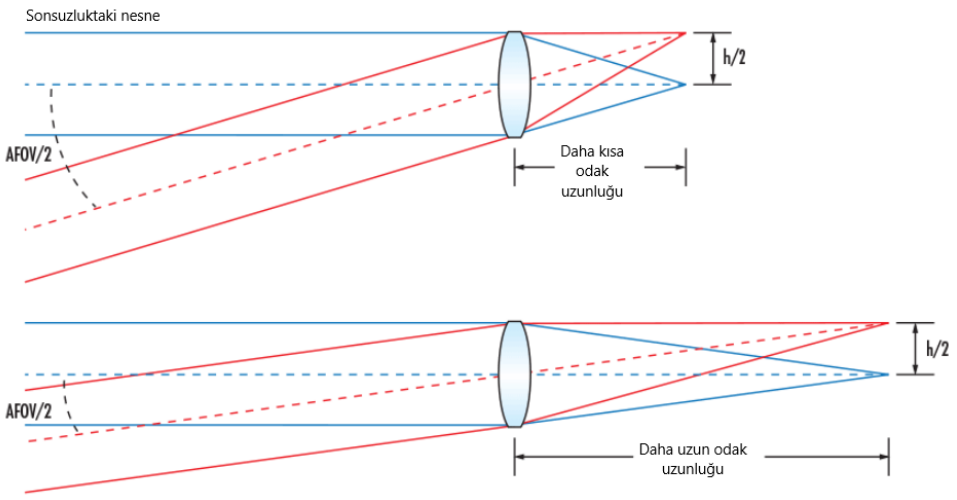
Çizelge 3.1: Seçilen sensör değerleri

Görüntü sensörü	CMOS
Görüntü boyutu	Köşegen 5.867 mm (Tip 1 / 3)
Toplam piksel sayısı	4224 (Y) × 3200 (D) yaklaşık 13,51 M piksel
Etkili piksel sayısı	4224 (Y) × 3136 (D) yaklaşık 13,25 M piksel
Aktif piksel sayısı	4208 (H) × 3120 (V) yaklaşık 13,13 M piksel
Çip boyutu	6.100 mm (Y) × 4.524 mm (D)
Birim hücre boyutu	1.12 µm (H) × 1.12 µm (V)
Yüzey malzemesi	Silikon

3.1.2 Uygulanan görüş alanı (FOV-Field of view)

Geleneksel veya entoantrik lens olarak da bilinen sabit odak uzunluklu lens, sabit Açısal Görüş Alanı (AFOV- Angular Field of View) olan bir lenstir. Lensi farklı çalışma mesafelerine odaklayarak, görüş açısı sabit tutulsa da farklı boyutlarda Görüş Alanları (FOV) elde edilebilir. AFOV, genellikle lensin birlikte kullanılacağı sensörün yatay boyutu (genişliği) ile ilişkili tam açı (derece cinsinden) olarak belirtilir.

Bir merceğin odak uzaklığı, merceğin açısal görüş alanını tanımlar. Belirli bir sensör boyutu için odak uzaklığı ne kadar kısaysa lensin açısal alanı o kadar geniş olur. Ayrıca merceğin odak uzaklığı ne kadar kısa olursa, aynı FOV'u elde etmek için daha uzun odak uzunluklu bir merceğe kıyasla gereken mesafe o kadar kısa olur. Basit, ince bir dışbükey mercek için odak uzunluğu, Şekil 3.4'te gösterildiği gibi merceğin arkasından merceğin sonsuz derecede önüne yerleştirilmiş bir nesneden oluşan görüntünün düzlemine olan mesafedir. Bu tanımdan, bir merceğin açısal görüş alanının odak uzaklığı ile ilişkili olduğu gösterilebilir [50].



Şekil 3.4: Bir merceğin açısal görüş alanının odak uzaklığı

Bir merceğin açısal görüş alanının odak uzaklığı aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$AFOV[^\circ] = 2\tan^{-1}\left(\frac{h}{2f}\right) \tag{3.1}$$

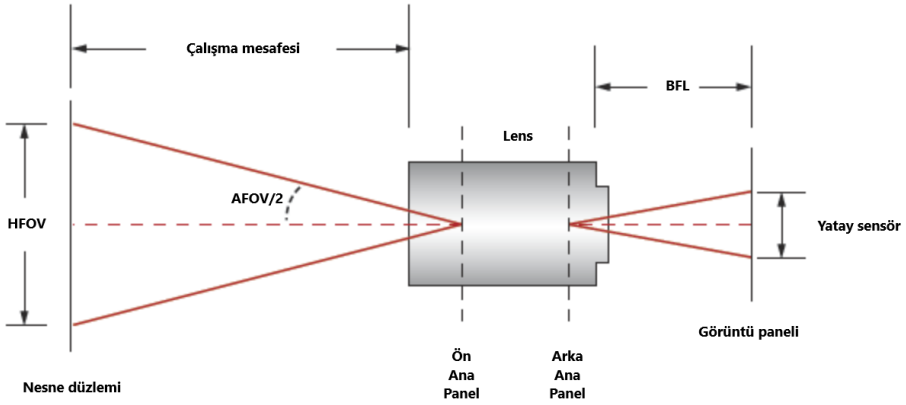
Burada f milimetre cinsinden odak uzaklığıdır ve h sensörün milimetre cinsinden yatay boyutudur.

Birçok uygulamada, bir nesneye olan gerekli mesafe ve istenen görüş alanı (tipik olarak ilave tampon alanı olan nesnenin boyutu) bilinen miktarlardır. Bu bilgi, Denklem 3.2 ve Denklem 3.3'de gösterilen formüller aracılığıyla gerekli açısal görüş alanını doğrudan belirlemek için kullanılabilir [50].

$$AFOV[^\circ] = 2\tan^{-1}\left(\frac{HFOV[mm]}{2WD[mm]}\right) \tag{3.2}$$

$$HFOV[mm] = 2WD[mm] \times \tan(AFOV[^\circ]/2) \tag{3.3}$$

Burada WD, lensten çalışma mesafesidir ve $AFOV$, açısal görüş alanıdır. Şekil 3.5'te gösterildiği gibi yüksekliği çalışma mesafesine eşit ve tabanı yatay görüş alanına eşit olan bir üçgenin tepe açısını bulmaya eşdeğerdir [50]. HFOV (Horizontal Field of View), yatay görüş alanıdır. Uygulamada, bu üçgenin tepe noktası nadiren çalışma mesafesinin ölçüldüğü lensin mekanik ön kısmında bulunur ve giriş gözbebeği konumu bilinmediği sürece yalnızca bir yaklaşım olarak kullanılmalıdır.



Şekil 3.5: Belirli bir AFOV için HFOV

İncelenen nesnenin görüntülenebilir alanı yani nesnenin kameranın sensörünü yatayda dolduran kısmıdır.

3.1.3 Çalışma mesafesi (WD - Working distance)

Çalışma mesafesi, görüntüleme merceğinin önü ile görüntülenen nesne arasındaki fiziksel mesafedir. Lens odak uzaklığı ve sensör boyutu, sabit bir açısal görüş alanı oluşturur ve çalışma mesafesi fiziksel bir görüş alanı oluşturur. Sabit odak uzaklığına sahip görüntüleme lensleri, üzerinde çalışmak üzere belirlendikleri çeşitli çalışma mesafelerine sahiptir. Çoğu zaman görüntüleme lensleri minimum çalışma mesafesine (veya bazen minimum nesne mesafesi denir) sahip olur ve bu mesafeye veya daha uzun herhangi bir mesafeye odaklanabilir. Işık toplama ve çözünürlük pahasına sabit odak uzunluklu lenslerde minimum çalışma mesafesini azaltmak için ara halkalar eklenebilir. Çoğu lens gizli odak uzaklıklarına sahip olduğundan ve görüş alanı genellikle sabit bir gereklilik olduğundan, çalışma mesafesinde esnekliğe sahip olmak faydalı olabilir.

Sensör daha önce seçilmiş olup, odak uzunluğu Denklem 3.4'te gösterildiği gibi Denklem 3.1 ve Denklem 3.3 den doğrudan FOV ve WD'den belirlenebilir [50]:

$$f = h \times \frac{WD}{HFOV} \tag{3.4}$$

Burada, h yatay sensör boyutudur (yatay piksel sayısı ile çarpılan piksel boyutu) ve f merceğin odak uzaklığıdır.

Her ikisi de milimetre cinsinden; FOV ve WD aynı birim sisteminde ölçülmelidir. Daha önce belirtildiği gibi, yukarıdaki örnekler sadece birinci dereceden tahminler

olduğundan ve distorsiyonu da hesaba katılmadığından, sistemin çalışma mesafesindeki bir miktar esneklik hesaba katılmalıdır.

3.1.4 Birincil büyütme (PMAG - Primary magnification)

Nesne üzerinde görülebilen mutlak minimum çözümlenebilir noktayı belirlemek için, görüş alanının sensör boyutuna oranının hesaplanması gerekir. Bu aynı zamanda sistemin birincil büyütmesi (PMAG) olarak da bilinir [50].

$$PMAG = \frac{h\,[mm]}{Görüş\ alanı\,[mm]} \tag{3.5}$$

PMAG sistemi ile ilişkili oran, bize nesnenin çözünürlüğünü söyleyen görüntüleme alanı çözünürlüğünün ölçeklenmesine izin verir [50].

$$\varsigma[\mu m] = \frac{1000\,\mu m / mm}{2 \times \vartheta\,[lp / mm]} \tag{3.6}$$

$$\vartheta\,[\mu m] = \frac{\phi[\mu m]}{PMAG} \tag{3.7}$$

Burada ϑ nesne alan çözünürlüğü, ς nesne uzay çözünürlüğü ve ϕ piksel boyutudur.

Denklem 3.7 kullanarak nesne üzerindeki sınırlayıcı çözünürlüğe hızlı bir şekilde geçilebilirken, lens seçimini basitleştirmek için görüntüleme alanı çözünürlüğünü ve PMAG'ı belirlemek çok yararlıdır. Ayrıca, dahil olan birçok ek faktör olduğunu ve bu sınırlamanın denklemler kullanılarak kolayca hesaplanabilecek olandan çok daha düşük olduğu unutulmamalıdır.

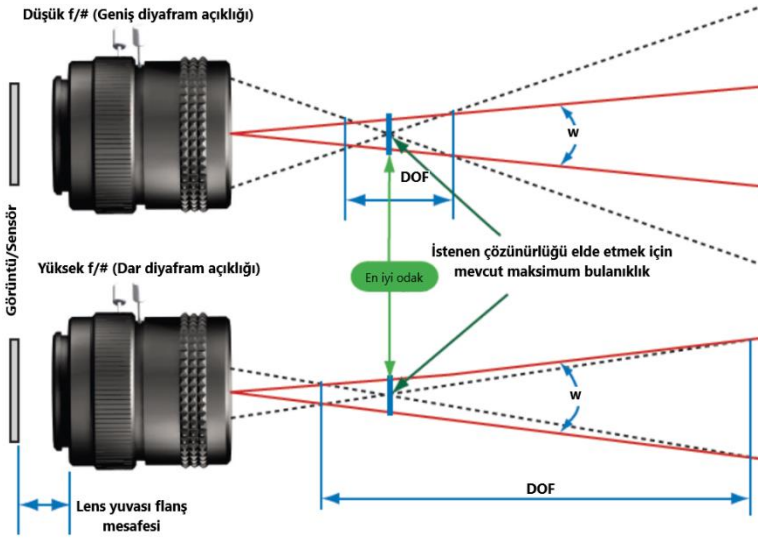
3.1.5 Alan derinliği (DOF-Depth of field)

Bir merceğin alan derinliği (DOF), nesne en iyi odaktan daha yakın ve uzak konumlandırılmışsa, yeniden odaklanmaksızın istenen miktarda görüntü kalitesini (belirli bir kontrastta uzamsal frekans) sürdürme yeteneğidir. DOF, karmaşık geometrilere veya farklı yükseklikteki özelliklere sahip nesneler için de geçerlidir. Bir nesne, bir merceğin ayarlanmış odak mesafesinden daha yakın veya daha uzağa yerleştirildiğinde, nesne bulanıklaşır ve hem çözünürlük hem de kontrast düşer. Bu nedenle, DOF yalnızca ilişkili bir çözünürlük ve kontrastla tanımlandığında

anlamlıdır. Bir görüntüleme sisteminin DOF'unu doğrudan ölçmek ve kıyaslamak için bir dizi hedef kullanılabilir.

DOF, çözünürlük gerektirir. "Seçtiğim lensin alan derinliği iyi mi?" Yaygın bir soru olmasına rağmen, belirli bir nesne ayrıntı boyutu veya görüntü alanı frekansı kullanmadan ölçmek zordur. Ayrıntı ne kadar küçükse, çözülmesi gereken uzamsal frekans o kadar yüksek olur ve lensin üretebileceği DOF, o kadar küçük olur. Bir DOF eğrisi, bir merceğin belirli bir detayın boyutunda (lens performans eğrileri) belirli bir derinlikte gerçekte nasıl performans gösterdiğini görmek için kullanılabilir. Bu grafikler sadece f / # ayarıyla ilgili teorik sınırlamaları değil, aynı zamanda lens tasarımının sapma etkilerini de hesaba katar.

Bir merceğin f / # (diyafram açıklığı veya aralığı) değerinin değiştirilmesi, Şekil 3.6'da gösterildiği gibi DOF'u değiştirecektir [50]. Şekil 3.6'da gösterilen her konfigürasyon için iki ışın demeti vardır. Noktalı siyah çizgilerle gösterilen demet, bilginin nesneden mercek sistemine doğru hareket ederken nasıl yayıldığını gösterir. Bir nesne en iyi odak konumundan (noktalı çizgilerin kesiştiği yer) uzaklaştıkça, nesne ayrıntıları koninin daha geniş bir alanına taşınır. Koninin yayılması ne kadar geniş olursa, mercekten o kadar uzaktaki bilgiler etrafındaki tüm diğer bilgilere doğru bulanıklaşır. Merceğin f / # değeri koninin ne kadar hızlı genişlediğini ve dolayısıyla, belirli bir mesafede gerçekte ne kadar bilgi veya detayın bulanıklaşacağını kontrol eder.



Şekil 3.6: Yüksek ve düşük f / # (diyafram açıklıklı veya aralıklı) lensler için DOF'un geometrik gösterimi

Şekil 3.6'da ayrıca sistemin çözünürlüğünün açısal bir temsili olan kırmızı bir koni vardır. İki koninin çizgilerinin kesiştiği yer, alan derinliğinin toplam aralığını tanımlar. $f/\#$ ne kadar düşükse, siyah noktalı çizgiler o kadar hızlı genişler ve alan derinliği o kadar düşük olur.

Detaylar küçüldükçe, Şekil 3.7'de ki demetler birbirine yaklaşarak etkiyi hızlandırır. Sonunda, lensin sınırlayıcı çözünürlüğü $f/\#$ ile ters orantılı olduğundan, $f/\#$ değerini çok fazla artırmak lensin kırınım sınırına ulaşılması nedeniyle daha küçük ayrıntıların bulanıklaşmasına neden olur. Bu sınırlama $f/\#$ değerinin artırılması her zaman alan derinliğini artırırken, çözülebilir özellik boyutunun (en iyi odakta bile) büyüdüğü anlamına gelir. Kısa dalga boylarının kullanılması, bu alanda ihmal edilmeye izin verir ve birçok yönden bu kayıp çözünürlüğün bir kısmı kurtarılabilir.

Genel olarak, lensler kısa çalışma mesafelerine odaklandığında, büyük koni açıları konilerin en iyi odaklamanın her iki tarafında çok hızlı bir şekilde uzaklaşmasına neden olarak sınırlı alan derinliğine yol açar. Daha uzun çalışma mesafelerinde odakta olan nesneler için, demetlerin geçiş hızı azalır ve DOF artar.

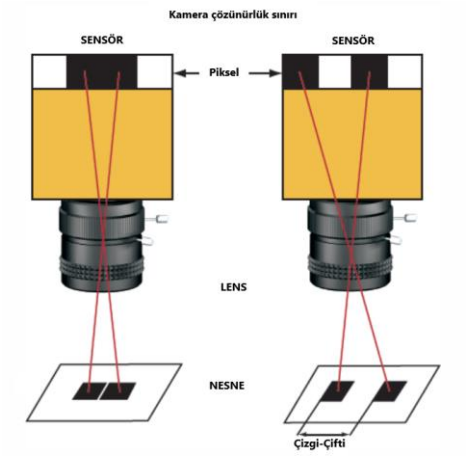
3.1.6 Çözünürlük

Çözünürlük, bir görüntüleme sisteminin nesne ayrıntılarını yeniden üretme yeteneğinin bir ölçüsüdür ve kullanılan aydınlatma türü, sensörün piksel boyutu veya optiğin yetenekleri gibi faktörlerden etkilenebilir. Nesne ayrıntısı ne kadar küçükse, gerekli çözünürlük o kadar yüksek olur.

Bir sensör üzerindeki yatay veya dikey piksellerin sayısının gözlemlenmesi istenen nesnenin boyutuna bölünmesi, her pikselin nesne üzerinde ne kadar alan kapladığını gösterecek ve çözünürlüğü tahmin etmek için kullanılabilecektir. Ancak bu, piksel üzerindeki bilgilerin diğer herhangi bir pikseldeki bilgilerden ayırt edilebilir olup olmadığını tam olarak belirlemez.

Başlangıç noktası olarak, sistem çözünürlüğünü gerçekte neyin sınırlandırabileceğini anlamak önemlidir. Örnek olarak, Şekil 3.8'de beyaz zemin üzerine bir çift kare gösterilebilir [50]. Kareler kamera sensöründe komşu pikseller üzerine görüntüleniyorsa, iki ayrı kare (Şekil 3.7'nin sol tarafında yer alan) yerine görüntüde (Şekil 3.7'nin sağ tarafında yer alan) daha büyük bir dikdörtgen olarak görünecektir. Kareleri ayırt edebilmek için aralarında en az bir piksel olmak üzere belirli miktarda boşluk gerekir. Bu minimum mesafe, sistemin sınırlayıcı çözünürlüğüdür. Mutlak

sınırlama, sensör üzerindeki piksellerin boyutu ve sensör üzerindeki piksel sayısı ile tanımlanır.



Şekil 3.7: İki karenin çözümlenmesi

Değişen siyah ve beyaz kareler arasındaki ilişki genellikle bir çizgi çifti olarak tanımlanır. Tipik olarak çözünürlük, milimetre başına satır çiftleri (lp/mm) olarak ölçülen frekansla tanımlanır. Bir lensin çözünürlüğü maalesef mutlak bir sayı değildir. Belirli bir çözünürlükte, iki kareyi ayrı öğeler olarak görme yeteneği gri ölçek seviyesine bağlı olacaktır. Kareler arasındaki gri ölçekte ayrım ve aralarındaki boşluk (Şekil 3.7'nin sağ tarafında yer alan) ne kadar büyükse, kareleri çözme yeteneği o kadar güçlüdür. Bu gri tonlama ayrımı, kontrast olarak bilinir (belirli bir frekansta). Uzamsal frekans lp/mm olarak verilmiştir. Bu nedenle, lensleri karşılaştırırken ve belirli sensörler ve uygulamalar için en iyi seçimi belirlemek için çözünürlüğü lp/mm cinsinden hesaplamak son derece yararlıdır.

Sensör, sistem çözünürlüğü hesaplamasının başladığı yerdir. Sensörle başlayarak, sensöre veya diğer uygulama gereksinimlerine uymak için hangi lens performansının gerekli olduğunu belirlemek daha kolaydır. Bir sensör tarafından çözülebilen en yüksek frekans Nyquist frekansı, etkili bir şekilde iki piksel veya bir çizgi çiftidir. Denklem 3.8, çok kullanılan bazı sensörlerde bulunan piksel boyutlarıyla ilişkili Nyquist sınırını göstermektedir. Sistem için görüntü alanı çözünürlüğü olarak ta adlandırılan sensörün çözünürlüğü, piksel boyutunu μm cinsinden 2 ile çarparak (bir çift oluşturmak için) ve mm'ye dönüştürmek için bunu 1000'e bölerek hesaplanabilir [50]:

$$\delta[lp/mm] = [1000\,\mu m/mm] / 2\times\phi\,[\mu m] \tag{3.8}$$

$$\nu = \frac{\phi[\mu m] \times \kappa[1mm]}{1000\,\mu m / mm} \tag{3.9}$$

Burada, δ sensör çözünürlüğü ve φ piksel boyutudur. Ayrıca ν sensör boyutu ve κ aktif piksel sayısını vermektedir.

Çözünürlük (o) ise PMAG ve sensör çözünürlüğünün çarpımından elde edilir. Denklem 3.10'da elde edilen çözünürlük lp/mm olup, çözünürlüğün µm değerinin hesaplanması Denklem 3.11'de verilmiştir.

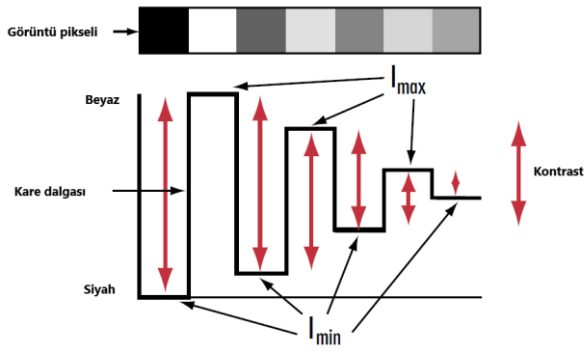
$$o[lp/mm] = PMAG \times \delta[lp/mm] \tag{3.10}$$

$$o[\mu m] = \frac{1}{(2 \times o[lp/mm])} \times \frac{1000\,\mu m}{1mm} \tag{3.11}$$

İncelenen nesnenin minimum özellik boyutu en az 0,1 mm boyutunda hataları gösterebilme yeteneğindedir. Yukarıda belirtildiği gibi görüntü kalitesi ayrıca görüntü kontrastı, perspektif hataları ve distorsiyon olmak üzere üç özelliğin birleşimidir.

3.1.6.1 Kontrast

Kontrast, siyahların beyazlardan ne kadar iyi ayırt edilebileceğini gösterir. Gerçek hayatta siyah ve beyaz çizgiler bir dereceye kadar bulanıklaşarak griye dönüşür. Gürültü ve kenarların bulanıklaşması kontrastın azalmasına neden olur. Görüntü üzerindeki sınır alanları arasındaki farkların birbirine göre ne kadar etkili yeniden üretildiği, genellikle gri tonlama veya sinyal-gürültü açısından tanımlanır. Bir görüntünün iyi tanımlanmış görünmesi için, Şekil 3.8'de gösterildiği gibi siyah ayrıntıların siyah görünmesi ve beyaz ayrıntıların beyaz görünmesi gerekir [50].



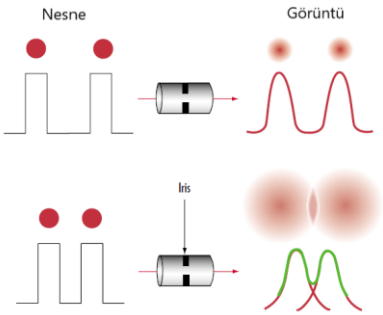
Şekil 3.8: Siyahlar ve beyazlar arasındaki yoğunluk farkı olarak tanımlanan kontrast şeması

Açık ve koyu çizgi arasındaki yoğunluk farkı ne kadar büyükse, kontrast o kadar iyidir. Bu sezgisel olarak açıktır, ancak ilk göründüğünden daha önemlidir. Kontrast, siyahlar ve beyazlar arasındaki yoğunluk ayrımıdır. Nesne kontrastının yeniden üretilmesi, esasen çözünürlük olan nesne ayrıntılarının yeniden üretilmesi kadar önemlidir. Lens, sensör ve aydınlatmanın tümü ortaya çıkan görüntü kontrastını belirlemede anahtar rol oynar. Lens kontrastı, genellikle nesne kontrastının yüzdesi cinsinden tanımlanır ve yeniden üretilir. Bir sensörün kontrastı yeniden üretme yeteneği, genellikle analog kameralarda desibel ve dijital kameralardaki bit cinsinden belirtilir.

$$\%Kontrast = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \times \%100 \tag{3.12}$$

Burada I_{max} maksimum yoğunluk ve I_{min} minimum yoğunluğu göstermektedir.

Bir görüntünün çözünürlüğü ve kontrastı ayrı ayrı tanımlanabilir. Fakat bunlar aynı zamanda yakından ilişkilidir. Aslında, belirli bir kontrastla tanımlanmadıkça çözünürlük genellikle anlamsızdır. Benzer şekilde kontrast, çözünürlük frekansına bağlıdır. Şekil 3.9'daki gibi birbirine yakın yerleştirilmiş ve bir mercekten görüntülenmiş iki noktayı düşündüğümüzde, mükemmel şekilde tasarlanmış ve üretilmiş bir lens bile bir nesnenin ayrıntılarını ve kontrastını doğru bir şekilde üretemeyeceği görülecektir [50]. Lens kırınım sınırında çalışırken bile, görüntüdeki noktaların kenarları bulanık olacaktır. Çok uzak olduklarında (başka bir deyişle, düşük bir frekansta) noktalar belirgindir. Ancak birbirlerine yaklaştıklarında, noktalar artık ayırt edilemeyecek hale gelene kadar bulanıklıklar üst üste gelir. Çözünürlük, görüntüleme sisteminin noktalar arasındaki boşluğu algılama yeteneğine bağlıdır. Bu nedenle sistemin çözünürlüğü kırınım ve diğer optik hataların neden olduğu bulanıklığa, nokta aralığına ve sistemin kontrastı algılama yeteneğine bağlıdır.



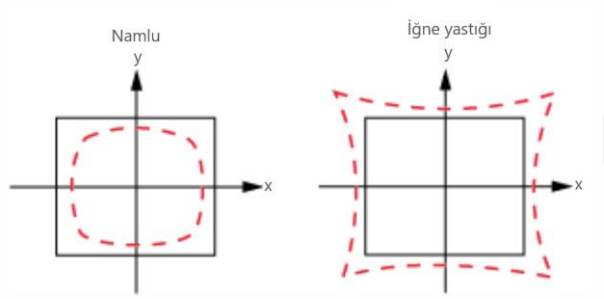
Şekil 3.9: Birbirine yakın yerleştirilmiş ve bir mercekten görüntülenmiş iki nokta [50]

3.1.6.2 Bozulma (Distorsiyon)

Bozulma, görüntünün farklı noktalarında nesnenin büyütmesinde farklılığa neden olan bir geometrik sapma türüdür. Işık ışınları bir nesnenin görüntüsünü bir sistem üzerinden taşıdığından, alanın merkezine veya görüntünün merkezi noktasına göre çeşitli noktalar yanlış yerleştirilir. Bu nedenle bozulma, bulanıklığa neden olan bir sapma değil, yanlış bölgeye neden olan bir sapmadır. Bozulma şu şekilde hesaplanır:

$$\%Bozulma = \frac{\psi - \zeta}{\zeta} \times \%100 \tag{3.13}$$

Burada, ψ gerçek uzaklıktır ve ζ öngörülen uzaklıktır. Yüzde olarak gösterilen bozulma, pozitif veya negatif olabilir. Şekil 3.10'da verilen örnekte pozitif ve negatif bozulmaya örnek verilmiştir [50]. Pozitif bir yüzde "iğne yastığı" bozulmasını temsil ederken, negatif bir yüzde "namlu" bozulmasını temsil eder.



Şekil 3.10: Pozitif ve negatif bozulma örneği

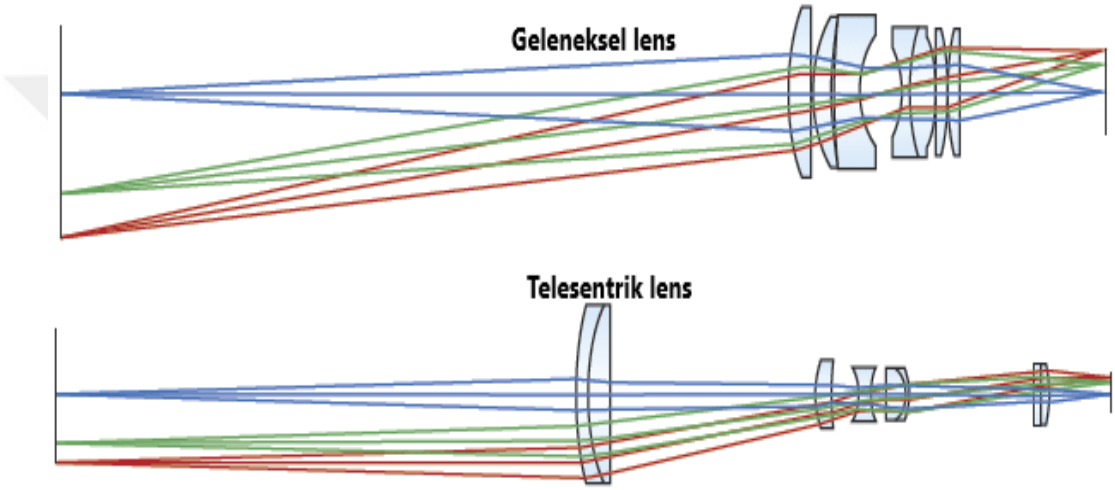
Hemen hemen tüm lenslerde bozulma olmasına rağmen kısa odak uzunlukları kullanılarak düzeltilebilir. Ne yazık ki, kısa odak uzaklığı sistemleri, daha uzun odak uzunluklu muadillerine göre daha fazla kırınım etkisinden mustariptir. Görüntü kalitesinin bir bileşeni için düzeltme yapılması diğerini inkar edilemez şekilde etkiler. Bu da her zaman dikkate alınması gereken bir gerçektir. Unutulmaması gereken önemli bir kavram bozulmanın nesne hakkındaki bilgilerin yanlış yerleştirilmesine, ancak kaybolmamasına neden olmasıdır. Orijinal yani bozulmamış görüntü, görüntü analiz yazılımı aracılığıyla yeniden oluşturulabilir.

3.1.6.3 Perspektif hataları

Paralaks olarak da bilinen perspektif hatası, ölçüm mesafesindeki günlük deneyimimizin bir parçasıdır. Beynimiz yakın nesnelerin, uzaktaki nesnelerden daha büyük görünmesini bekler. Perspektif, nesnenin büyütmesinin lense olan uzaklığıyla

değiştiği geleneksel görüntüleme sistemlerinde de mevcuttur. Bununla birlikte, bir görüntüleme sisteminin bir nesnenin uzunluğunu ölçmesi gerekiyorsa, perspektif hatası kritik hale gelir. Perspektif hataları en çok derinliği olan nesneler veya lense göre hareket eden nesneler içeren ölçüm uygulamalarında sorun çıkarır.

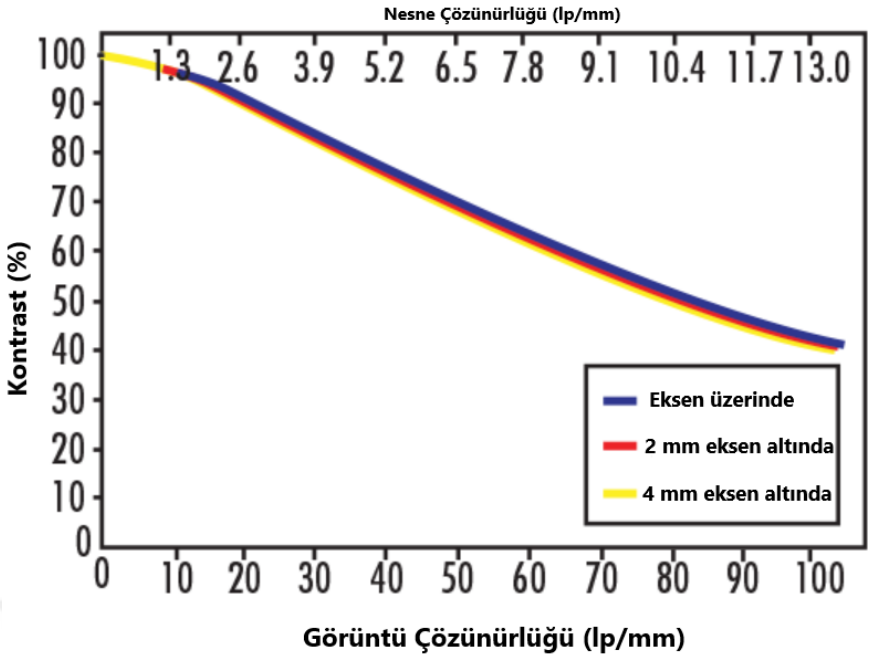
Telesentrik lensler bu uygulamalar için kullanışlıdır çünkü perspektif hatasını en aza indirirler. Telesentrik lensler perspektif için optik olarak düzelticidir, böylece nesnelerin bir alan derinliği içindeki konumlarından bağımsız olarak aynı algılanan boyutta kalmasına izin verir. Geleneksel ve telesentrik lenslerin görüş alanı karşılaştırılması Şekil 3.11'de verilmiştir [50].



Şekil 3.11: Geleneksel ve telesentrik lenslerin görüş alanı karşılaştırılması

3.1.7 Modülasyon transfer fonksiyonu (MTF) eğrileri

Bir kameranın çözünürlüğünü belirlemenin en etkili yolu, modülasyon transfer fonksiyonudur (MTF). MTF, bir sensörün toplam performansını belirlemek için kontrast ve çözünürlüğü birleştirmenin bir yoludur. Modülasyon transfer fonksiyonu veya MTF, bir görüntüleme merceğinin kontrastı nesne düzleminden görüntü düzlemine belirli bir çözünürlükte aktarma yeteneğinin bir ölçüsüdür. Nesne ve görüntü düzlemleri, nesnenin ve görüntünün bulunduğu uzamsal alanlardır. Nesne düzlemi görüntüleme sisteminin önündedir ve görüntü düzlemi, görüntünün gerçek veya sanal olmasına bağlı olarak görüntüleme sisteminin önünde veya arkasındadır. Şekil 3.12'de görüldüğü gibi, görüntü çözünürlüğü (lp/mm) ve kontrast (%) ile ifade edilir [50]. Tipik olarak çözünürlük arttıkça kontrast, görüntünün çözülemez ve gri hale geldiği bir kesme noktasına kadar azalır.



Şekil 3.12: 0.13xPMAG değerindeki bir görüntüleme lensi için örnek bir MTF eğrisi

MTF'nin yukarıda bahsedilen çözünürlük ve kontrasta ek olarak bir başka bileşeni kırınım sınırıdır. Kırınım sınırı, bir merceğin noktaları veya kenarları mükemmel şekilde görüntülemesini kısıtlayan fiziksel bir sınırdır. Işığın dalga doğası tarafından kısıtlandığından, mükemmel tasarlanmış ve üretilmiş bir lens bile kırınım sınırlı performans elde edemez. Bununla birlikte tasarımcılar, bir sistemin ideal kırınım sınırına olabildiğince yaklaşmak için sapmaları azaltmak ve genel sistem doğruluğunu artırmak için çeşitli yöntemler kullanır.

Buna bağlı olarak bir lens geometrisi, kaliteli görüntüyü yeniden üretme yeteneğine etki eder. Lens çapı (D), odak uzaklığı (f) ve f / # değerleri MTF'yi etkiler [50].

$$f/\# = \frac{f}{D} \tag{3.14}$$

f/# bir merceğin ışık toplama yeteneğidir. Lens çapı arttıkça f/# azalır. Düşük f/# lensler en fazla ışığı toplayarak onları ışığı kısıtlayıcı uygulamalar için ideal hale getirir. Yüksek f/# bir görüntüleme lensinin performansını iyileştirebilmesine rağmen, çok fazla arttırmak zararlı olabilir çünkü kırınım sınırının giderek daha da kötüleşmesine neden olabilir.

3.2 Lens

Bir görüntüleme lensi seçmek için, görüntüleme sisteminin temel sistem parametrelerinin bilinmesi gerekir. En azından, bir lensin doğru seçilebilmesi için; çalışma mesafesi, görüş alanı ve çözünürlük önemli unsurlardır.

Bu bağlamda sabit odak uzunluklu lensler, yakınlaştırma yapabilen lensler ve makro lenslerin aynı prensiplerle çalıştığı varsayılabilir ve aynı şekilde seçilebilir. Bu, yakınlaştırma lenslerinin ayrı odak uzunluklarında belirtildiği ve yakınlaştırma işlevlerinin kilitlendiği varsayılmaktadır.

Tüm değişken büyütme lensleri Denklem 3.15'e göre odaklanır [50].

$$1/z' = 1/z + 1/f \tag{3.15}$$

Burada z' görüntü mesafesi veya görüntü düzlemi ile son eleman arasındaki mesafe, z nesne mesafesi veya odaklanan nesne ile ön mercek elemanı arasındaki mesafe ve f merceğin odak uzaklığıdır.

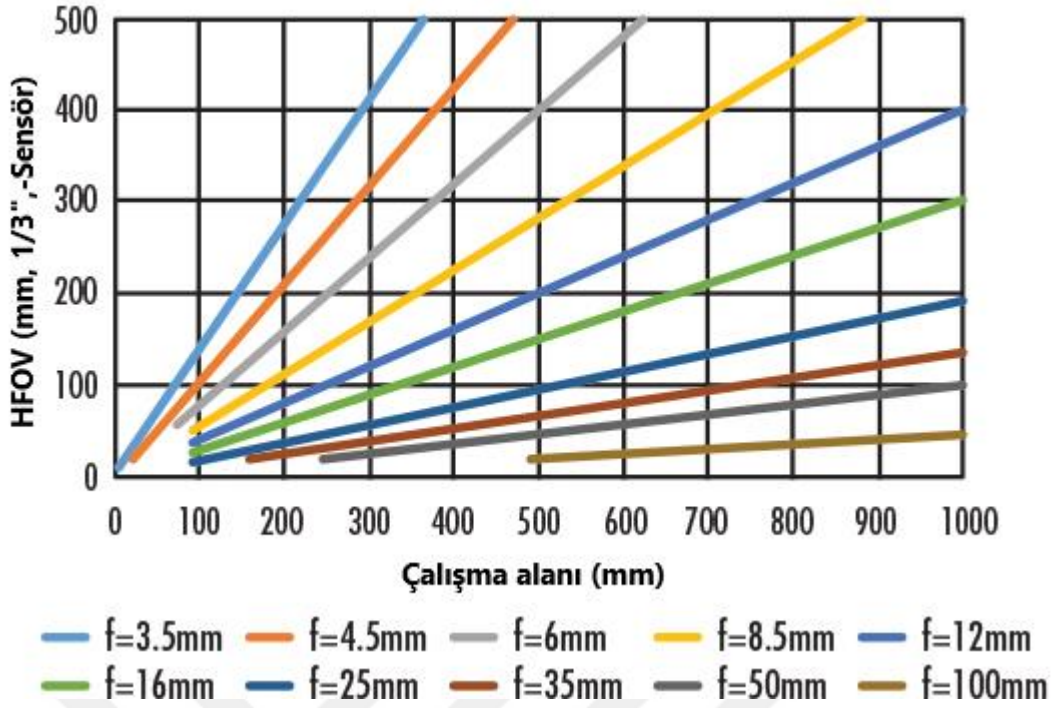
Denklem 3.15, lensin kalınlığının olmadığını varsayan yaklaşık bir denklemdir. Görüntü ve nesne mesafeleri arasındaki ilişkiyi göstermek için buraya dahil edilmiştir. Belirli bir odak uzaklığı için, nesne mesafesi yani çalışma mesafesi arttıkça, görüntü mesafesi azalacaktır.

Düz dışbükey veya çift dışbükey mercek gibi tek bir mercek elemanı için Denklem 3.15, bir nesne ve görüntü mesafesi verildiğinde hangi odak uzunluğunun uygun olduğunu belirlemede yararlıdır. Bununla birlikte, Şekil 3.13'deki gibi çizelgeleri kullanan bir makine görme sisteminde, Denklem 3.15 birkaç yönden yetersiz kalır [50]. Görüş alanını tanımlamaz ve bir makine görüş lensinde görüntü mesafesini ölçtüğü için pratik değildir, odak uzaklığını çözmek imkansız hale gelir.

Büyütme için Denklem 3.16 kullanılmaktadır.

$$m = \frac{z'}{z} = \frac{h'}{h} \tag{3.16}$$

h ve h' sırasıyla görüntü düzleminin boyutu yani sensör boyutu ve görüş alanıdır.



Şekil 3.13: 1/3" boyutundaki sensörün farklı odak uzunluklarına sahip lensleri ve bunların görüş alanları [50]

Denklem 3.15, Denklem 3.17'de gösterilen daha kullanışlı bir forma yeniden düzenlendiğinde:

$$h = \frac{h'}{\frac{z}{f} - 1} \tag{3.17}$$

Denklem 3.17; görüş alanı ve sensör boyutu gibi temel parametreler göz önüne alındığında, bir uygulamayı çözmek için hangi odak uzaklığı merceğinin gerekli olduğunu çözmenin hızlı ve kolay bir yolunu sağlar. Şekil 3.13 farklı sensörlerde farklı odak uzunluklarına sahip birkaç lens için çizilen Denklem 3.17'i göstermektedir.

Şekil 3.13, bir kamera seçilmişse bir makine görüş lensi için uygun odak uzunluğunun belirlenmesinde faydalıdır. x ekseni boyunca gerekli çalışma mesafesine kadar takip edilir ve karşılık gelen y eksenini kullanılarak, noktaların koordinat düzleminde buluştuğu yer bulunur. Kesişen noktalara en yakın mercek seçimi, hangi merceğin kullanılacağı konusunda en iyi araştırmaya başlangıç noktası olur ve aralarından seçim yapılabilecek geniş mercek alanını önemli ölçüde daraltılır.

Bu grafik aynı zamanda, makine görüşünde sabit odak uzaklığına sahip lenslerle ilgili birkaç önemli noktayı da göstermektedir. İlk olarak daha uzun odak uzaklığına sahip

lensler, optik tasarımlarının bir sonucu olarak daha uzun minimum çalışma mesafelerine sahiptir. Lens ve kamera arasına ara parçalar ekleyerek minimum çalışma mesafesi kısaltılabilir, ancak sonuçta görüntü kalitesi düşecektir. İkincisi daha büyük sensörler, aynı odak uzaklığına sahip lens ile daha geniş bir görüş alanı sağlar. Son olarak, grafiklerde standart bir kullanıma hazır sabit odak uzunluklu lensin olmadığını gösteren boşluklar vardır.

Şekil 3.13 yalnızca bir uygulama için hangi lensin en iyi olduğunu daraltmanın ilk adımı olarak kullanılır. Görüntü kalitesi, bozulma, göreceli aydınlatma veya bir görüntüleme merceğinin diğer önemli nitelikleri hakkındaki soruları yanıtlamaz. Sadece sensör boyutuna göre görüş alanını ele alırlar.

3.3 Aydınlatma

Görüş alanındaki nesneler yanlış şekilde aydınlatıldığı için çoğu zaman başarısız olan görüntüleme sistemi meydana getirir. Yeterli aydınlatma olmadan, sistemin kontrastı düşer ve bu nedenle görüntü kalitesi de düşer. Yaygın inanışın aksine, birçok görüntüleme sisteminde kontrast çözünürlükten daha önemlidir.

Bir görüntünün iyi tanımlanmış görünmesi için, siyah ayrıntıların siyah görünmesi ve beyaz ayrıntıların beyaz görünmesi gerekir. Aralarındaki yoğunluk farkı ne kadar büyükse, kontrast o kadar iyidir. Görüntüleme sisteminin iyi bir kontrast görüntüsü iletme şansına sahip olması için, nesnenin başlangıçta iyi bir kontrast sağlayacak şekilde aydınlatılması gerekir. Açılar önemlidir, aydınlatma tamamen geometri ile ilgilidir.

Çoğu zaman, bir müşteri uygun aydınlatmanın gücünü hafife alırken bir görüntüleme sistemindeki kontrast ve çözünürlük sorunları ile mücadele eder. Aslında istenen görüntü kalitesi, daha yüksek çözünürlüklü sensörlere, lenslere ve yazılımına yatırım yapmak yerine tipik olarak bir sistemin aydınlatmasını iyileştirerek karşılanabilir. Sistem entegratörleri, son görüntüdeki uygun ışık yoğunluğunun doğrudan bileşen seçimine bağlı olduğunu hatırlamalıdır.

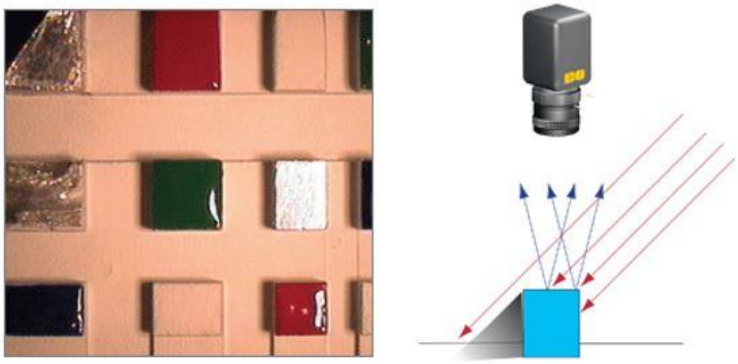
Bir görüntü sistemi için doğru aydınlatma çok önemlidir ve uygun olmayan aydınlatma çeşitli görüntü sorunlarına neden olabilir. Parlamalar, yansımalar ve gölgeleme gibi unsurlar önemli görüntü bilgilerini gizleyebilir. Kötü aydınlatma da düşük sinyal-gürültü oranına neden olabilir. Özellikle tek tip olmayan aydınlatma, sinyal-gürültü

oranlarına zarar verebilir ve eşikleme gibi görevleri daha zor hale getirebilir. Bunlar, uygulamada doğru aydınlatmanın ne kadar önemli olmasının nedenlerinden sadece birkaçıdır.

Bir sistemi entegre ederken optimum aydınlatmayı sağlamak için, doğru bileşenleri seçmenin oynadığı rolü kabul etmek önemlidir. Her bileşen, sensöre gelen ışık miktarını ve dolayısıyla sistemin görüntü kalitesini etkiler. Görüntüleme merceğinin açıklığı (f /#), kamera üzerine gelen ışık miktarını etkiler. Lens açıklığı kapatıldıkça aydınlatma artırılmalıdır (yani daha yüksek f/#). Daha küçük alanlar lense daha az ışığı geri yansıttığından, yüksek güçlü lensler genellikle daha fazla aydınlatma gerektirir. Sistemin ihtiyaç duyduğu minimum ışık miktarını belirlemede kameranın minimum hassasiyeti de önemlidir.

3.3.1 Yönlü aydınlatma

Tekli veya çoklu kaynaklardan nokta kaynak aydınlatmasıdır. Lensler, aydınlatmayı odaklamak veya yaymak için kullanılabilir. Parlak, esnek ve çeşitli uygulamalarda kullanılabilir fakat gölgeleme ve parlama yapabilir. Fiber optik ışık kılavuzları, odaklama tertibatları, LED spot ışıklar ve akkor ışık gibi ürün seçenekleri vardır. Ayrıca mat ve düz nesnelerin incelenmesi, ölçülmesinde kullanılırlar. Yönlü aydınlatma ile elde edilen görüntü örneği Şekil 3.14'te verilmiştir [50].

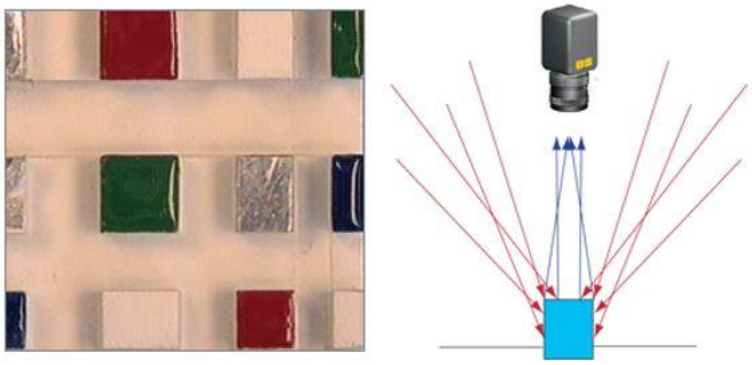


Şekil 3.14: Yönlü aydınlatma ile elde edilen görüntü [50]

3.3.2 Yaygın (Difüzör) aydınlatma

Yaygın, hatta genişletilmiş bir kaynaktan gelen ışık anlamına gelmektedir. Parlamayı azaltır ve eşit aydınlatma sağlar fakat büyük ve dar alanlara sığması zordur. Floresan lineer ışıklar gibi ürün seçenekleri vardır. Geniş çalışma mesafelerine sahip büyük ve

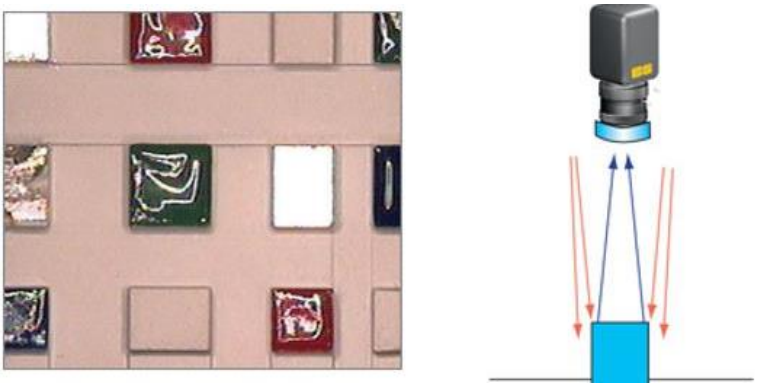
parlak nesneleri görüntülemek için en iyisidir. Yaygın aydınlatma ile elde edilen görüntü örneği Şekil 3.15'te verilmiştir [50].



Şekil 3.15: Yaygın aydınlatma ile elde edilen görüntü [50]

3.3.3 Halka aydınlatma

Doğrudan bir lense monte edilen koaksiyel aydınlatmadır. Doğrudan lense monte edilir ve gölgelenmeyi azaltır. Uygun mesafelerde kullanıldığında eşit aydınlatma sağlar. Fakat, yansıtıcı yüzeylerden dairesel parlama modeli oluşturur ve nispeten kısa çalışma mesafelerinde çalışır. Fiber optik halka ışık kılavuzları, floresan halka ışıklar ve LED halka ışıklar gibi ürün seçenekleri vardır. Mat nesnelerle çok çeşitli denetim ve ölçüm sistemlerinde kullanılırlar. Halka aydınlatma ile elde edilen görüntü örneği Şekil 3.16'da verilmiştir [50].

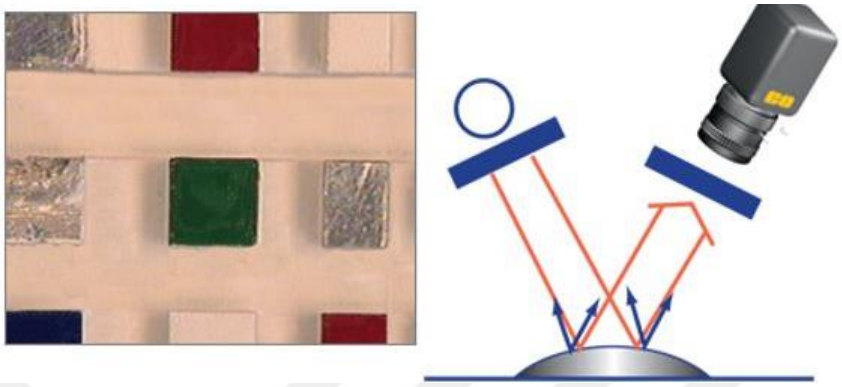


Şekil 3.16: Halka aydınlatma ile elde edilen görüntü [50]

3.3.4 Polarize aydınlatma

Yansımaları ve parlamaları ortadan kaldırmak için polarize ışığı kullanan bir tür yönlü aydınlatmadır. Polarizasyon altında nesnenin tüm yüzeyinde eşit aydınlatma sağlar ve yüzey özelliklerini ayırt edilebilir hale getirmek için parlamayı azaltır. Fakat polarizasyon filtresi, ışık kaynağı veya görüntüleme lensinin önüne yerleştirildikten

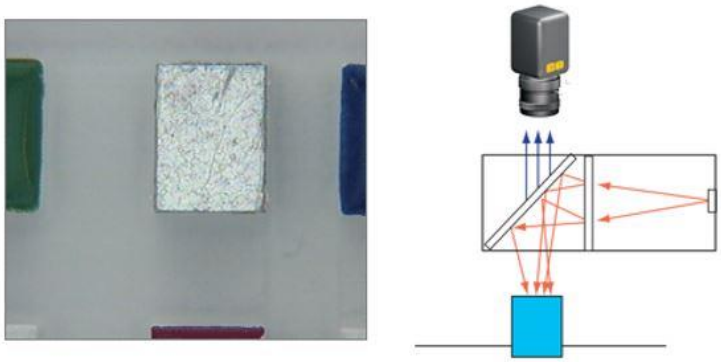
sonra genel ışık yoğunluğu azalır. Polarizasyon filtreleri ve Polarize/Analizör adaptörleri gibi ürün seçenekleri vardır. Ölçümler ve parlak nesnelerin muayenesinde kullanılırlar. Polarize aydınlatma ile elde edilen görüntü örneği Şekil 3.17'de verilmiştir [50].



Şekil 3.17: Polarize aydınlatma ile elde edilen görüntü [50]

3.3.5 Yaygın (Difüzör) eksenel aydınlatma

Işık optiklerle aynı hizada dağıtılır ve lens, ışığı nesneye yansıtan bir ışın ayırıcıdan bakar. Aydınlatma, görüntüleme erişimi için koaksiyeldir. Çok eşit ve dağınık gölgelenmeyi büyük ölçüde azaltır ve çok az parlama yapar. Ancak, büyük ve montajı zordur ve sınırlı çalışma mesafesi vardır. Yeterli aydınlatma sağlamak için birden fazla fiber optik kaynağa ihtiyaç duyulabilecek şekilde düşük verimlidir. Fiber optik difüz eksenel bağlantılı aydınlatma, tekli veya çoklu fiber optik aydınlatıcılar, bağlantı boyutuna ve kullanılan aydınlatıcıların sayısına bağlı olarak tekli, ikili veya dörtlü fiber demetleri, LED dağınık eksenel aydınlatıcılar gibi ürün seçenekleri vardır. Ölçümler ve parlak nesnelerin muayenesinde kullanılırlar. Yaygın eksenel aydınlatma ile elde edilen görüntü örneği Şekil 3.18'de verilmiştir [50].



Şekil 3.18: Yaygın eksenel aydınlatma ile elde edilen görüntü [50]

3.4 Dijital Kamera Haberleşme Arayüzleri

Dijital kameralar son yıllarda popülerlik kazanmıştır. Çünkü iletim gürültüsü, bozulma veya diğer sinyal bozulmaları iletilen bilgileri etkilemez. Çıkış sinyali dijital olduğu için, iletim sürecinde çok az bilgi kaybı olur. Giderek daha fazla kullanıcı dijital kameralara yöneldikçe, görüntüleme teknolojisi de çok sayıda dijital arabirimi içerecek şekilde gelişmiştir. Gelecek yıllarda görüntüleme ortamı çok farklı olacak, ancak bugün mevcut olan en yaygın arabirimler; FireWire, Camera Link®, GigE ve USB'dir. Bu haberleşme ara yüzlerinin karşılaştırması Çizelge 3.2'de gösterilmiştir [50]. Kamera seçimi kriterlerinin çoğunda olduğu gibi tek bir en iyi seçenek arabirimi yoktur, bunun yerine eldeki uygulama için en uygun cihazları seçmek gerekir. Eşzamanlı olmayan veya deterministtik iletim; veri aktarım girişlerine izin verir, sinyal bütünlüğünü garanti eder ve iki yönlü iletişim nedeniyle teslimatı zamanlama üzerine yerleştirir. Eşzamanlı iletimde ise, programlı paket transferleri gerçekleşir. Örnek verecek olursak her 125 μs'de bir yani zamanlamayı garanti eder, ancak paketleri yüksek transfer hızlarında düşürme olasılığına izin verir.

Çizelge 3.2: Haberleşme arayüzlerinin karşılaştırması

	FireWire 1394.b	Camera Link®	USB 2.0	USB 3.0	GigE
					
Veri aktarım hızı	800 Mb/s	3.6 Gb/s	480 Mb/s	5Gb/s	1000 Mb/s
Maksimum kablo uzunluğu	100m (GOF kablosu ile)	10m	5m	3m	100m
Cihazların sayısı	63'e kadar	1	127'ye kadar	127'ye kadar	Sınırsız
Konnektör	9pin-9pin	26pin	USB	USB	RJ45/Cat5e veya 6
Yakalama kartı	Opsiyonel	Gerekli	Opsiyonel	Opsiyonel	Gerekli değil
Enerji beslemesi	Opsiyonel	Gerekli	Opsiyonel	Opsiyonel	Gerekli (PoE için opsiyonel)

3.4.1 FireWire (IEEE 1394/IIDC DCAM standardı)

FireWire diğer adıyla IEEE 1394; bilgisayarlarda FireWire bağlantı noktalarının yaygın olması nedeniyle popüler bir seri, eş zamanlı kamera arayüzüdür. Firewire.a daha yavaş aktarım hızı arabirimlerinden biri olmasına rağmen, hem FireWire.a hem de FireWire.b birden fazla kameranın bağlanmasına izin verir ve FireWire kablosu aracılığıyla güç aktarımı sağlar. Konektörün tasarımı güç piminde sinyal pimlerine

kısa devre yapabileceğinden, bağlantı noktasına veya aygıta potansiyel olarak zarar verebileceğinden, çalışırken değiştirme veya takma önerilmez.

3.4.2 Camera link®

Camera Link®, özellikle otomatik inceleme ve süreç kontrolünü içerenler olmak üzere, makine görüsü uygulamaları için özel olarak geliştirilmiş yüksek hızlı bir seri arayüz standardıdır. Kullanım için bir Camera Link® yakalama kartı (frame grabber) gereklidir ve güç kameraya ayrı olarak sağlanmalıdır. Veri iletimi için tam bant genişliğini korumak amacıyla düşük gerilimli diferansiyel çifti (LVDP-Low Voltage Differential Pair) sinyal hatlarına ek olarak ayrı asenkron seri iletişim kanalları sağlandığından özel kablolama gereklidir. Tek kablolu temel yapılandırma, video için ayrılmış 255 MB/s aktarıma izin verir. Çift çıkışlar, aşırı yüksek hızlı uygulamalarda daha fazla veri aktarım alanını (680 MB/s) boşaltmak için ayrı kamera parametresi gönderme/alma hatlarına izin verir.

Camera Link® HS (yüksek hızlı), daha fazla kablo kullanarak çok daha yüksek hıza (15 m'de 2100MB/s'ye kadar) izin veren Camera Link® arayüzünün bir uzantısıdır. Ayrıca Camera Link® HS, yaklaşık 300 m'ye kadar uzunluklara sahip fiber optik kablolar için destek içerir.

3.4.3 GigE (Gigabit ethernet)

GigE (Gigabit ethernet), internet protokolünü temel alır ve yüksek hızlı kamera arayüzü için standart Cat-5 ve Cat-6 kabloları kullanır. Anahtarlar (switch), bağlantı göbekleri (hub) ve tekrarlayıcılar (repeater) gibi standart ethernet donanımı birden fazla kamera için kullanılabilir. Ancak eşler arası olmayan (doğrudan kameradan karta) bağlantılar kullanıldığında genel bant genişliği dikkate alınmalıdır. GigE Vision'da kamera kontrol kayıtları EMVA GenICam (Generic Interface for Cameras) standardını temel alır [50]. Bazı kameralarda isteğe bağlı olarak, bağlantı toplama (LAG, IEEE 802.3ad) veri aktarım hızlarını artırmak için paralel olarak birden çok ethernet bağlantı noktası ve işlemci yükünü dağıtmak için çok noktaya yayın kullanır. Bazı kameralar tarafından desteklenen ağ hassas zaman protokolü (PTP-Precision Time Protocol), aynı ağa bağlı birden fazla kameranın saatlerini senkronize etmek için kullanılabilir ve bu da ilişkili görüntü kareleri arasında sabit bir gecikme ilişkisine izin verir. Cihazlar çalışırken değiştirilebilip bağlantılarının çıkarılabilmeleri büyük avantajdır.

3.4.4 Evrensel seri veri yolu (USB-Universal serial bus)

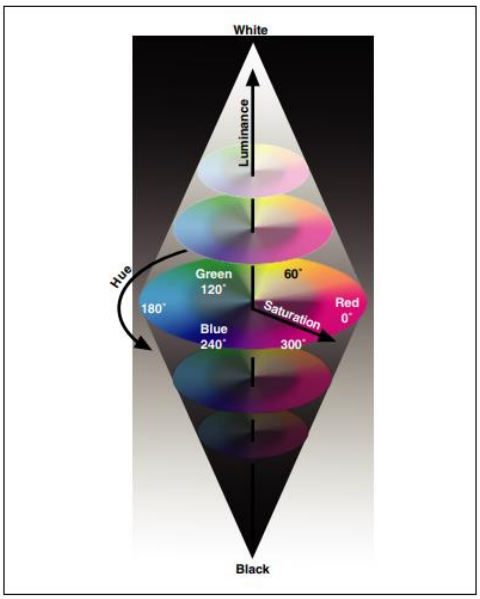
USB 2.0, bilgisayarlar arasında her yerde bulunmasından dolayı popüler bir arayüzdür. Yüksek hızda değil ama kullanışlıdır. Ulaşılabilen maksimum hız veri yolunun aktarım hızı toplam 480 Mb/s olarak sabitlendiğinden, USB çevre bileşenlerinin sayısına bağlıdır. Kablolar herhangi bir yerden kolayca temin edilebilir. Bazı durumlarda dizüstü bilgisayarlarda olduğu gibi, kameraya ayrı ayrı güç verilmesi gerekebilir. USB 3.0 çok daha yüksek veri aktarım hızlarına izin verirken, ayrıca USB 2.0'ın tak ve çalıştır avantajlarına da sahiptir.

4. OTOMATİK HATA TESPİTİ İÇİN GÖRÜNTÜ İŞLEME YÖNTEMLERİ

Kalite kontrol süreci için gerekli olan donanımlar ve özellikleri belirlendikten sonra alınan görüntü üzerinde gerekli tespit işlemleri yapılmıştır. Bu bölümde kullanılacak görüntü işleme için kullanılacak yöntemlerin matematiksel modelleri açıklanacaktır.

4.1 Görüntünün RGB (Red, Green, Blue)'den HSL (Hue, Saturation, Luminance)'e Dönüşümü

RGB kırmızı, yeşil ve mavi ışığın çeşitli şekillerde bir araya getirilmesidir. HSL, RGB modelinin alternatif gösterimidir. HSL'de her bir tonun renkleri, Şekil 4.1'deki gibi altta siyahtan üstte beyaza kadar değişen nötr renklerin merkezi bir ekseni etrafına radyal bir dilim halinde yerleştirilir [49].



Şekil 4.1: HSL renk uzayı [49]

HSL renk uzayında renkler ton, doygunluk ve açıklık olmak üzere üç farklı bileşenle temsil edilir. Ton, Çizelge 4.1'de gösterildiği gibi derece veya sayı olarak temel rengi belirtir [51]. Doygunluk renkliliğin parlaklığa oranı olarak tanımlanabilir ve her zaman yüzde olarak ifade edilmekte olup, %100 doygunluk rengin tamamen doygun olduğu anlamına gelir. Parlaklık aydınlatılmış beyazın parlaklığına göre parlaklık olarak

tanımlanabilir ve yüzde cinsinden ifade edilmekte olup, yani parlaklığın %100'ü beyazdır ya da %0'ı siyahtır.

Çizelge 4.1: Renk gösterimi ve ton değeri

Ton (Derece)	Ton (Değer)	Renk
0 ya da 360	0 ya da 6	Kırmızı (red)
60	1	Sarı (yellow)
120	2	Yeşil (green)
180	3	Cam göbeği (cyan)
240	4	Mavi (blue)
300	5	Eflatun (magenta)

HSL renk alanı, renk eşleştirme, renk konumu ve renk deseni eşleştirme gibi renk işleme işlevlerini çalıştırmaktadır. Bu da HSL'i renk eşleştirme gibi birçok görüntü işleme uygulaması için en iyi seçenek yapar. Bu yüzden, kameradan RGB formda alınan görüntü HSL forma dönüştürülmüştür.

RGB'den HSL'e döndürme işlemi ile ilgili matematiksel formüller aşağıda gösterilmiştir. Burada, H [−180º, +180º] aralığındadır [52].

$$\mathrm{H} = \begin{cases} \max(R,G,B) = 0, & 0° \\ \max(R,G,B) = R, & \dfrac{G-B}{\max(R,G,B) - \min(R,G,B)} \\ \max(R,G,B) = G, & 2 + \dfrac{B-R}{\max(R,G,B) - \min(R,G,B)} \\ \max(R,G,B) = B, & 4 + \dfrac{R-G}{\max(R,G,B) - \min(R,G,B)} \end{cases} \tag{4.2}$$

$$\mathrm{L} = \frac{\max(R,G,B) + \min(R,G,B)}{2} \tag{4.2}$$

$$\mathrm{S} = \begin{cases} \dfrac{\max(R,G,B) - \min(R,G,B)}{\max(R,G,B) + \min(R,G,B)}, & L < 0.5 \end{cases} \tag{4.3}$$

$$\mathrm{S} = \begin{cases} \dfrac{\max(R,G,B) - \min(R,G,B)}{2 - \max(R,G,B) - \min(R,G,B)}, & L > 0.5 \end{cases} \tag{4.4}$$

4.2 Desen Eşleştirme

Desen eşleştirme bir görüntü içindeki şablon görüntünün, matematiksel model olarak normalleştirilmiş çapraz korelasyon fonksiyonun kullanarak bulunmasıdır [53].

Korelasyon fonksiyonu $C(i, j)$ olarak tanımlanmaktadır;

$$C(i, j) = \sum_{x=0}^{l-1} \sum_{y=0}^{k-1} w(x, y) f(x+i, y+j) \tag{4.5}$$

Burada $w(x, y)$ kxl boyutunda şablon (template) görüntü ve $f(x + y)$ mxn (burada $k \le m$ ve $l \le n; i = 0,1,...,m-1, j = 0,1,...,n-1$ dir.) boyutunda orijinal görüntüdür.

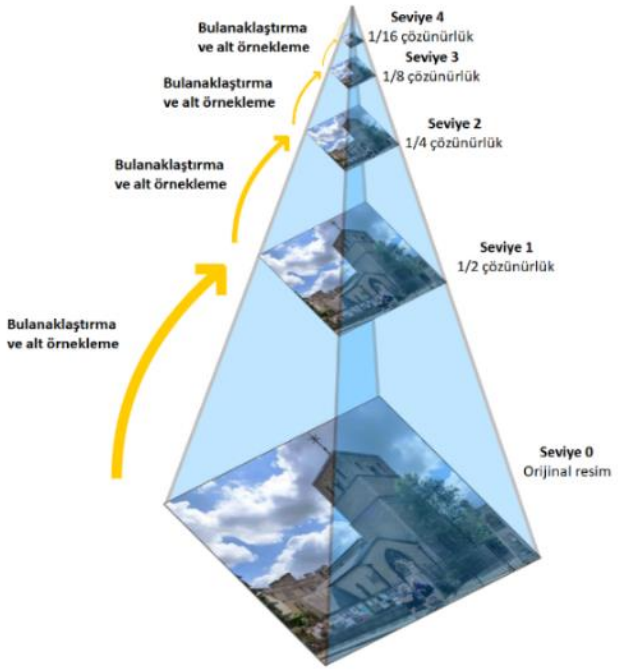
NI Vision da desen eşleştirme süreci, öğrenme ve eşleştirme olmak üzere iki aşamadan oluşur. Öğrenme aşaması sırasında, algoritma şablon görüntüsünden gri değeri ve/veya gradyen bilgisini çıkarır ve bu öğrenilen bilgiler şablon görüntünün bir parçası olarak saklanır. Eşleştirme aşamasında ise saklanan bu bilgiler model eşleştirme algoritması ile inceleme görüntüsünden çıkarılır. Bu algoritma, en yüksek çapraz korelasyonun gözlemlendiği inceleme görüntüsündeki bölgeleri konumlandırarak eşleşmeleri bulur [49].

NI (National Instruments) Vision desen eşleştirmede, piramit eşleştirme ve düşük tutarsızlık örnekleme olmak üzere iki model kullanır. Her iki modelde de normalleştirilmiş çapraz korelasyon yöntemi kullanılır.

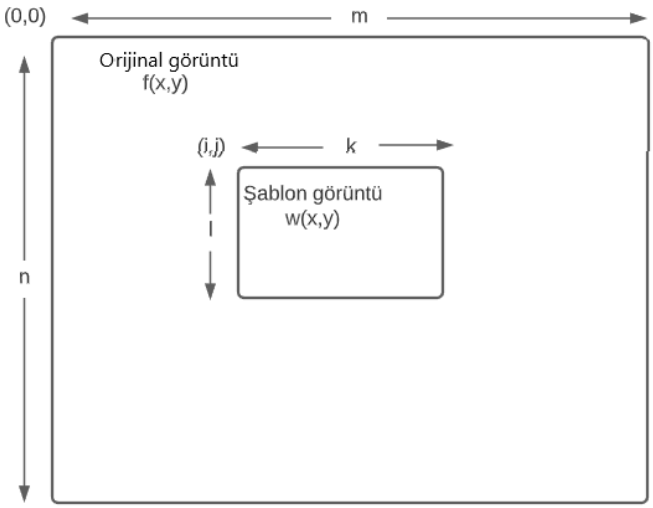
4.2.1 Piramit eşleştirme

Piramit eşleştirme modeli, hem şablon hem de hedef görüntünün Gauss piramitleri kullanılarak daha küçük çözünürlüklerde uzamsal olarak örneklenmesidir. Görüntü önce bir Gauss filtresi ile düzleştirilir ve ardından yarı boyuta indirgenir. Bu yinelemeli olarak yapılır ve istenen minimum boyuta ulaşılana kadar devam edilir. Gauss piramitlerine mümkün olan en düşük çözünürlükle başlayan, az detaydan çok detaya doğru bir eşleştirme yaklaşımı uygulanır [55]. Şekil 4.2'teki beş seviyeli bir Piramit eşleştirme modeli gösterilmiştir [54].

Çalışmada, eşleştirme için kullanılan yöntem, normalleştirilmiş çapraz korelasyondur ve benzerlik ölçüsü olarak iki görüntü arasındaki Öklid mesafesinin karesi kullanılır.



Şekil 4.2: 5 seviyeli bir görüntü piramidinin görsel temsili [54]



Şekil 4.3: Korelasyon prosedürü

$w(x, y)$ kxl boyutunda şablon (template) görüntünün, $(x + y)$ mxn boyutundaki bir hedef görüntüde, Şekil 4.3'de ki gibi yerleştirildiği varsayıldığında, bu ölçü şu şekilde tanımlanır [56]:

$$d^2(i, j) = \sum_{x=0}^{l-1} \sum_{y=0}^{k-1} [w(x, y) - f(x + i, y + j)]^2 \tag{4.6}$$

$$d^2(i, j) = \sum_{x=0}^{l-1} \sum_{y=0}^{k-1} w(x, y)^2 - 2w(x, y) f(x + i, y + j) + f(x + i, y + j)^2 \tag{4.7}$$

Denklem 4.7'de şablon görüntünün toplam enerjisi:

$$\sum_{x=0}^{l-1}\sum_{y=0}^{k-1} w(x,y)^2 \tag{4.8}$$

sabitidir. Hedef görüntüdeki yoğunluğun aşağı yukarı eşit bir şekilde dağıldığını varsayarsak:

$$\sum_{x=0}^{l-1}\sum_{y=0}^{k-1} f(x+i,y+j)^2 \tag{4.9}$$

yaklaşık olarak sabittir. Sonuç olarak (2) denklemi çapraz korelasyon denklemi olarak kalır.

$$C(i,j)=\sum_{x=0}^{l-1}\sum_{y=0}^{k-1} w(x,y)\, f(x+i,y+j) \tag{4.10}$$

Burada orijinal ve şablon görüntü (i, j)'de çakışırsa, bu görüntülerin benzer olduğu sonucuna varılır. Fakat eşleştirme, görüntü enerji konumunun değişmesi durumunda başarısız olur. Böyle durumlarda normalleştirilmiş bir korelasyon terimi hesaplanır. $t(i, j)$ şablondaki ortalama yoğunluk ve şablonla örtüşen bölgedeki hedef görüntünün ortalama yoğunluğu olmak üzere [56]:

$$t(i,j)=\frac{\sum_{x=0}^{l-1}\sum_{y=0}^{k-1}(w(x,y)-\overline{w})(f(x+i,y+j)-\overline{f(i,j)})}{\sqrt{\sum_{x=0}^{l-1}\sum_{y=0}^{k-1}(w(x,y)-\overline{w})^2\sum_{x=0}^{l-1}\sum_{y=0}^{k-1}(f(x+i,y+j)-\overline{f(i,j)})^2}} \tag{4.11}$$

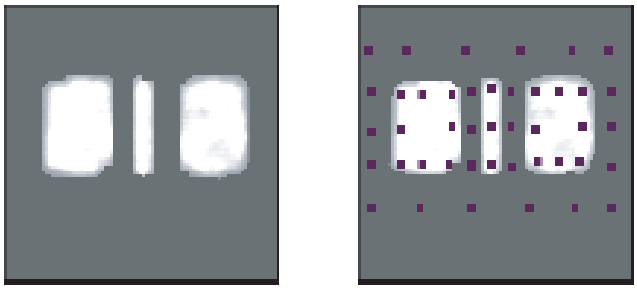
normalleştirilmiş korelasyon fonksiyonudur.

NI Vision'da, piramit eşleştirme modeli gri değer yöntemi ve gradyen yöntem olmak üzere ikiye ayrılır. Gri değer yönteminde normalleştirilmiş piksel değerleri kullanılırken, gradyen yöntemde filtrelenmiş kenar pikselleri kullanılır. Ayrıca, Gradyen yöntemde normalleştirilmiş çapraz korelasyon yerine vektör korelasyon kullanılmaktadır. Gradyen yöntem de daha az veri saklandığından, gri yönteme göre daha hızlıdır. Fakat çok düşük çözünürlüklerde kenarların sağlamlığı ve güvenirliği

azaldığından gradyen yöntemin gri değer yönteme göre daha yüksek çözünürlükte çalışmasını sağlar.

4.2.2 Düşük tutarsızlık örneklemesi (Görüntü anlama)

Düşük tutarsızlık örneklemeye dayanan yöntemler, komşuluklarının ne kadar doğru temsil ettiklerine göre sözde rastgele noktalarının seçilmesine dayanmaktadır. Şablon görüntü genelde Halton, Sobol veya Faure gibi düşük tutarsızlık dizileriyle örneklenir. NI Vision'da ise Şekil 4.4'te görüldüğü gibi, görüntüdeki fazla bilgiyi azaltmak için kenar piksellerin ve bölge piksellerin bir birleşimini içeren akıllı örnekleme tekniği kullanılmaktadır [55].

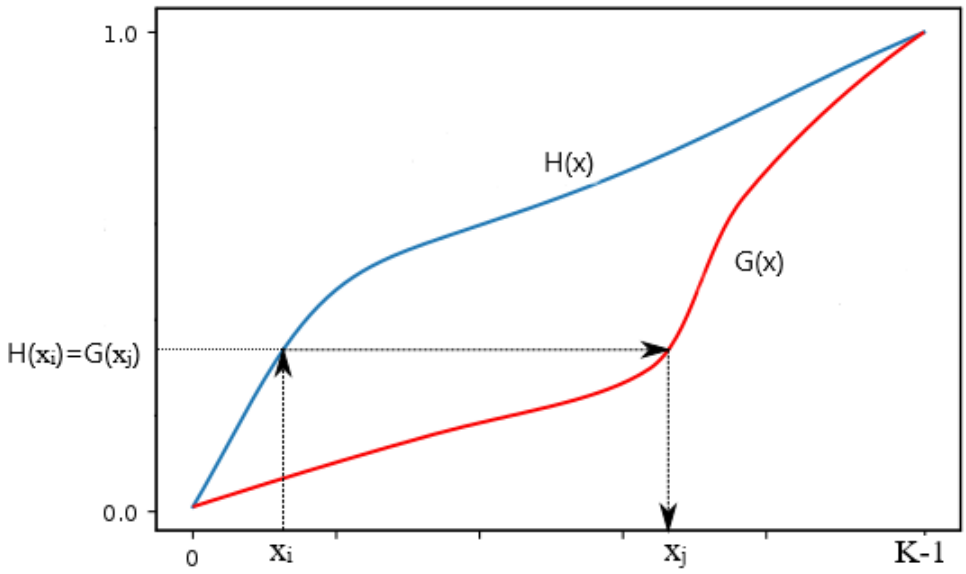


Şekil 4.4: Düşük tutarsızlık örneklemesi [49]

Bu örnekleme yönteminde; verimliliği artırmak için noktalar komşuluk değerine sınıflandırıldıktan sonra, çok küçük değerler atılır. Daha sonra çok büyük değere sahip noktalar seçilip hedef görüntüdeki çapraz korelasyon araması için kullanılır. Fakat bu örneklemede; benzer gri tonlama büyük bölgelerini içeren şablonlar ve çok küçük şablonlar az sayıda örnek noktası olması sebebiyle görüntü analizinde sorunlar oluşabilir [55].

4.3 Yüzey Deformasyonu

Bu çalışmada, bir nesenede yer alan çizik gibi hataların tespiti için histogram eşleştirme normalizasyonu kullanılmıştır. Histogram eşleştirme bir zaman serisinin, görüntünün veya daha yüksek boyutlu skaler verilerin histogramının başka bir veri kümesiyle eşleşecek şekilde değiştirildiği bir işlemdir. Histogram her veri kümesi için Kümülatif olarak hesaplanır. Şekil 4.5'te Histogram Eşleştirmeye örnek grafik gösterilmiştir [57].



Şekil 4.5: Histogram eşleştirme

Bir histogram görüntüsünün olasılık yoğunluk fonksiyonu $\rho_x(x_j)$ Denklem 4.13'de ki gibi hesaplanır [53]:

$$\rho_x(x_j) = \frac{n_j}{n} \tag{4.13}$$

Burada x_j, gri tonlamalı n_j'nin frekansı ve r görüntüdeki toplam piksel sayısıdır. Daha sonra Her bir PDF (olasılık yoğunluk fonksiyonu), kümülatif dağılım fonksiyonuna şu şekilde kolayca eşlenebilir [53]:

$$s = H(r) = (K-1)\int_0^r \rho_r(w)dw \tag{4.14}$$

$$s = G(z) = (K-1)\int_0^r \rho_z(w)dw \tag{4.15}$$

Burada, H(r) referans kümülatif olasılık dağılımı ve G(z) kümülatif olasılık dağılımıdır. Denklem 4.14 ve Denklem 4.15'te ki eşitlikten aşağıdaki ifade elde edilir [53]:

$$z = G^{-1}\left[H(r)\right] = G^{-1}(s) \tag{4.16}$$

Bir görüntünün ve referans görüntünün PDF'i şu şekildedir:

$$\begin{cases} \rho_r(r) = \dfrac{2r}{(K-1)^2}, & 0 \le r \le K-1 \\ \rho_r(r) = 0, & \text{diğer} \end{cases} \tag{4.17}$$

$$\begin{cases} \rho_z(z) = \dfrac{3z^3}{(K-1)^3}, & 0 \le z \le K-1 \\ \rho_z(z) = 0, & \text{diğer} \end{cases} \tag{4.18}$$

Histogram eşleştirme dönüşümü, $[0, \mathrm{K}-1]$ aralığı için aşağıdaki şekilde tanımlanır [53]:

$$s = H(r) = (K-1)\int_0^r \rho_r(w)dw = \frac{2}{K-1}\int_0^r w dw = \frac{r^2}{K-1} \tag{4.19}$$

$$s = G(z) = (K-1)\int_0^z \rho_z(w)dw = \frac{3}{(K-1)^2}\int_0^z w^2 dw = \frac{z^3}{(K-1)^2} \tag{4.20}$$

Denklem 4.15 ve Denklem 4.20'den Denklem 4.21 elde edilir [53]:

$$z = \left[(K-1)^2 s\right]^{1/3} \tag{4.21}$$

Aynı zamanda, Denklem 4.14'ten elde edilen eşitlikle z şu şeklide ifade edilir [53]:

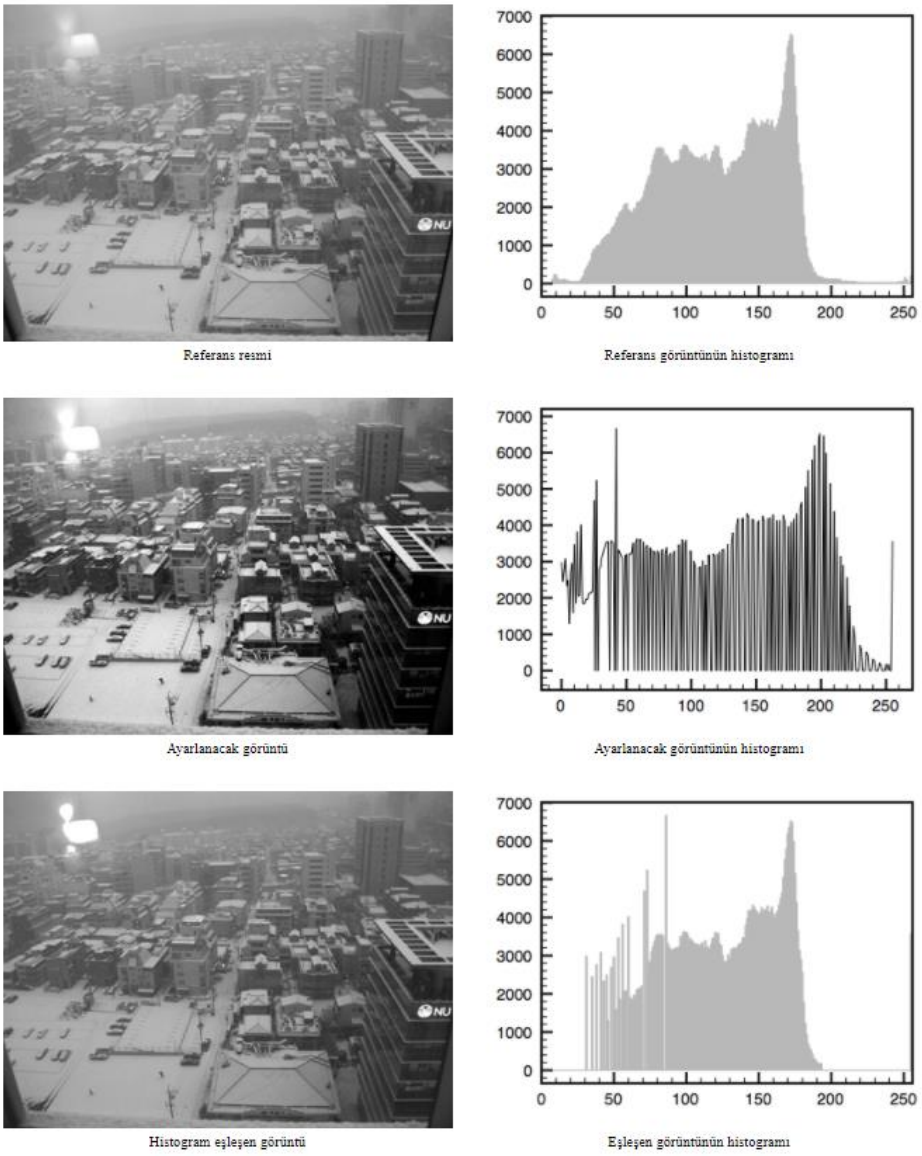
$$z = \left[(K-1)^2 s\right]^{1/3} = \left[(K-1)^2 \frac{r^2}{(K-1)}\right]^{1/3} = \left[(K-1) r^2\right]^{1/3} \tag{4.22}$$

Histogram dönüşümüm ayrık ifadesi ise aşağıdaki şekilde yazılır [53]:

$$s_l = H(r_l) = (K-1)\sum_{j=0}^{l} \rho_r(r_j) = \frac{(K-1)}{MN}\sum_{j=0}^{l} n_j, \;\; l = 0,1,2,3,\ldots,K \tag{4.23}$$

$$s_l = G(z_q) = (K-1)\sum_{j=0}^{q} \rho_z(z_j), \;\; q = 0,1,2,3,\ldots,K \tag{4.24}$$

Şekil 4.6'da gri tonlamalı görüntü kullanan bir örnek verilmiştir. İlk görüntüde referans görüntü ve histogram verilmiştir. İkinci görüntüde histogramı birinciyle eşleşecek olan görüntü ve üçüncüsü ortaya çıkan eşleşen görüntüyü göstermektedir.



Şekil 4.6: Gri tonlamalı bir görüntü kullanan histogram eşleştirmesi [57]

4.4 QR (Quick Response) Kod

QR kod, yukardan aşağıya ve soldan sağa doğru olmak üzere iki yönde okuma okuma yaptığı için barkota göre daha fazla veri depolayabilmektedir. QR kod arttırılmış gerçeklik, multimedya içeriğini görüntüleme, mobil işletim sistemleri, URL'ler, sanal mağazalar, QR kod ödemesi, web sitesi girişi, restoran siparişi, bir Wi-Fi ağına katılma, video oyunları ve ürün takibi gibi alanlarda sıklıkla kullanılmaktadır.

QR kodları, bir 2D (iki boyutlu) matris ve veri matrisidir. Model 1 ve Model 2 olan geleneksel QR kod çeşitleri kare bir şekle sahiptir. QR kodun üç köşesinde, kodu bulmak ve boyutlarını ve dönüşünü belirlemek için kullanılan tipik kare şekilli desenler vardır. Model 1 ve Model 2 olan geleneksel QR kod şekli, Şekil 4.7'de gösterilmiştir [58].



Şekil 4.7: Geleneksel QR kod şekli

Bulucu desenler (FP - finder patterns): QR kodun üç köşesine yerleştirilen bu desenler konum algılama deseni olarak da adlandırılır. Her bulucu desen, koyu renkli bir çerçeve (7 × 7 modül boyutunda) ile çevrelenmiş bir iç koyu kare (3 × 3 modül boyutunda) tarafından oluşturulur. Bulucu desenler, okuyucular tarafından bir QR kodunun konumunu ve yönünü belirlemek için kullanılır.

Veri (data): Bir QR Kodu içinde kodlanırlar. QR kod kısmen zarar görebilir fakat Reed-Solomon algoritması aracılığıyla gerçekleştirilen bir hata düzeltmesiyle korunduğundan, hasarlı veriler geri yüklenilebilir [59]. QR kodda hata düzeltme seviyesinin arttırılırsa bir QR kodunun mevcut veri kapasitesini azalır.

Modül (Module): Bir QR kodun en küçük yapı elemanı olup, bir modül 1 biti temsil eder. Küçük koyu veya açık kare ile temsil edilmektedir. Genelde, koyu modül için "1" ve açık modul için "0" biti kullanılır. Modüller satırlar ve sütünlar halinde kare matrisi oluşturur.

Zamanlama desenleri (Time patterns): Bu desenler QR koddaki bulucu desenlerin arasına yerleştirilir. Sırayla değişen koyu ve açık modüller tarafından oluşturulur. Zamanlama desenleri bir modülün boyutunu, bir kodun olası bozulmasını, satır ve sütun sayısını belirlemek için kullanılır.

Format bilgisi (Format bilgisi): Bir QR kodunu çözmek için gerekli olan, kullanılan hata düzeltme seviyesi veya bir maske deseni numrası gibi ek bilgiler içerir. Ayrıca format bilgisi 15 bit uzunluğuna sahiptir.

Hizalama deseni (Alignment patterns): Bir QR kodun versiyonuna göre hizalama deseni, QR kodu versiyon 1 de olduğu gibi hiç olmayabilir veya birden fazla olabilir. QR Kodu görüntüsünün olası perspektif bozulmasını düzeltmek için merkezi koordinatını belirler.

Sessiz bölge (Quiet zone): bir QR kodunun etrafına yerleştirilmiş en az dört modülünün genişliğinde beyaz bir alandır fakat pratikte bu alan standart gereği dört modül genişliğinden azdır. QR kodunu okunmasında, kod çözücünün geri kalan görüntüler arasında kodu tanımlamasını kolaylaştırmaktır.

QR Kodları 40 farklı versiyonda mevcuttur. Versiyon 1 21x21 modüllü ve versiyon 40 177x177 modüllü bir QR kodunu temsil etmektedir. Boyut ve versiyon arasındaki ilişki Denklem 4.25 şeklinde ifade edilebilir [58]:

$$Boyut = 21 + (Versiyon - 1)x4 \tag{4.25}$$

Her QR kod versiyonu veri mikatarına, karakter tipine ve hata düzeltme seviyesine göre maksimum veri kapasitesine sahiptir. Örneğin, version 1 de (21x21 modül) QR kodunda 17 nümerik karakter kapasite varken, version 40 da (177X177 modül) QR kodunda 3057 nümerik karakter kapasite vardır.

4.4.1 QR kodun özellikleri

- QR kodu nümerik, alfanumerik, unicode karakterleri gibi karakterleri kodlamak için yüksek kapasiteye sahiptir. QR kod ile kodlanabilir karakter seti Çizelge 4.2'de gösterilmiştir [59].

Çizelge 4.2: Kodlanabilir karakter dizisi

1	Numerik veriler (0-9)
2	Alfanümerik veriler (0-9 Rakamları, boşluk, $,%, +, *, -, /,.,:, Büyük harfler (A'dan Z'ye).
3	8 bit verileri
4	Kanji karakterleri

- Veriler bit olarak temsil edilir. Genellikle "1" biti koyu modülü ve "0" biti açık modülü genelde temsil eder.
- Hata düzeltme seviyeleri L, M, Q ve H ile gösterilir. L %7'lik veriyi, M %15'lik veriyi, Q %25'lik veriyi ve H %30'luk veriyi kurtarır [60]. Her hata düzeltme seviyesi L, M, Q ve H için bit dizileri sırasıyla 01, 00, 11, 10'dur. Reed Solomon

hata düzeltme yöntemi, genellikle Galois alanı ile birlikte polinom uzun bölme yöntemi dahil olmak üzere hata düzeltme kod sözcükleri oluşturmak için benimsenmiştir. Galois alanı, mevcut kümede bulunan sayıları oluşturan bazı matematiksel işlemlerin yanı sıra sınırlı bir sayı kümesidir.

4.4.2 QR kodun avantajları

- Yüksek kapasiteye sahiptir. Barkodlar 20 adet 20 haneli uygulamayı kodlayabilirken, QR kodları birkaç yüz basamağı kodlayabilir.
- Verileri hem yatay hem de dikey olarak kodlar. Bu nedenden, barkodlara kıyasla çok daha az alan gerektirir ve daha fazla veri depolayabilir.
- Bir tam genişliği 13 bitte etkin bir şekilde kodlanan Kanji ve Kana karakterlerinin veri setlerini kodlayabilir [61].
- Desen kısmen kirli veya hasarlı olsa bile veriler geri yüklenebilir. Maksimum %30 kod kelimesi geri yüklenebilir.
- QR kodun üç köşesine yerleştirilmiş bulucu desenler sayesinde, QR kodu, 360 derece okuma yeteneğine sahiptir.
- QR kodu, birden çok veri alanına bölünebilir. Birden çok QR kodu deseninde saklanan bilgiler tek bir veri sembolü ve yardımcısı olarak yeniden yapılandırılabilir. Bir veri, bir alanda yazdırmaya izin verecek şekilde 16 sembole kadar saklanabilir.

QR kod ile geleneksel barkod arasındaki farklılıklar Çizelge 4.3'te gösterilmiştir [59].

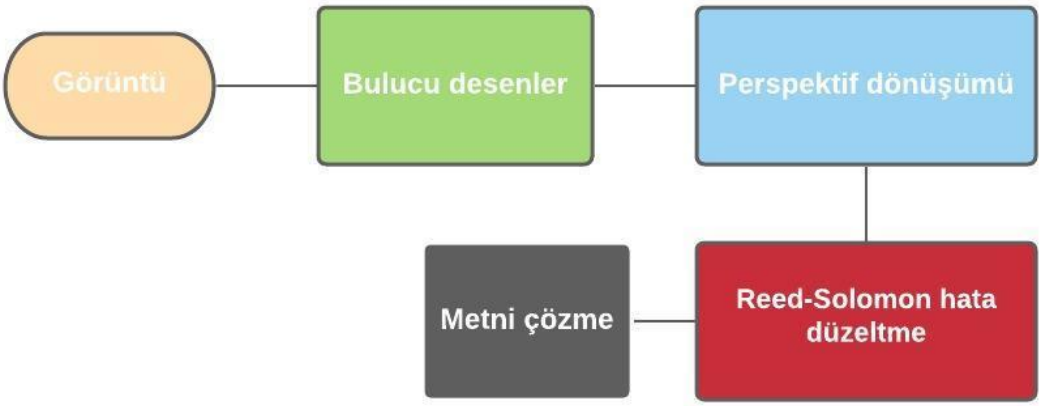
Çizelge 4.3: QR kod ile geleneksel barkod arasındaki farklılıklar

Özellikleri	QR kod	Barkod
Yüksek kapasite	7089 sayısal değere kadar	10-20 sayısal değer
Kirli ve hasara karşı dayanıklık	Okumak mümkün (%30 zarara kadar)	Okumak mümkün değil
Azaltılmış alan	40 basamak için 5mm*5mm alan	10 basamak için 50mm*20mm alan
360 derece okuma	360 derece okur	Yatay okur
Desteklenen diller	Nümerik, alfanümerik, Kanji, Kana	Nümerik, alfanümerik

4.4.3 QR kod matematiksel modeli

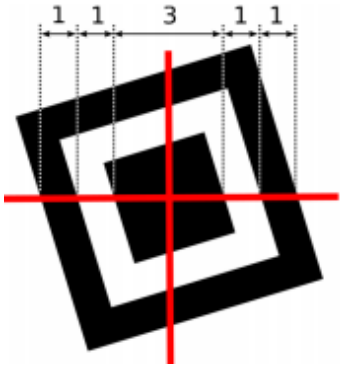
QR kodun doğru şekilde okunması için Şekil 4.8'de gösterilen prosedür uygulanmıştır. İlk olarak, QR kodu konumunu konumun bulunması için bulucu desenler bulunmuştur.

QR kodu konumunu belirledikten sonra, QR kod görüntüsünün perspektif dönüşümü yapılmıştır. Son olarak, Reed-Solomon hata düzeltme algoritması ile düzeltilmiş veriler elde edilir.



Şekil 4.8: QR kod okuma prosedürü

Bulucu desenlerin belirlenmesi için öncelllikle, 1: 1: 3: 1: 1 (Şekil 4.9) oranlarıyla eşleşen tüm noktaları bulmak için ikili görüntü yatay olarak taranır. Daha sonra, oranlarla eşleşen her nokta için dikey olarak taranır. Son olarak, hem yatay hem de dikey olarak 1: 1: 3: 1: 1 oranlarıyla eşleşen resimdeki tüm noktalar toplanır [58].



Şekil 4.9: Bulucu desen

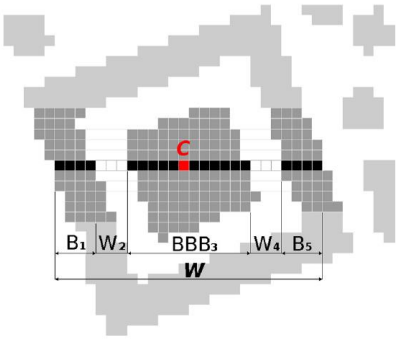
1: 1: 3: 1: 1 ($B_1 : W_2 : BBB_3 : W_4 : B_5$ burada B_x, W_x sırasıyla siyah ve beyaz modüllerin sayısını göstermektedir.) oranındaki bulucu desenin merkezinin hesaplanması için n ikili görüntü yatay olarak olarak taranır. Gerçek görüntülerde siyah ve beyaz noktaların oranı ideal değildir, bu nedenle toleransları dikkate alınmaktadır [58]:

$$B_1, W_2, W_4, B_5 \in (w-1.5, w+1.5)$$

$$BBBB_3 \in (3w-2, 3w+2) \qquad , w = \frac{B_1 + W_2 + BBBB_3 + W_4 + B_5}{7} \qquad (4.26)$$

$$BBBB_3 > \max(B_1 + W_2, W_4 + B_5)$$

Her bir eşleşme için dizinin Geometrik Merkez (C) ve Genişlik ($W = B_1 + W_2 + BBBB_3 + W_4 + B_5$) koordinatları desen bulucu Şekil 4.10'da gösterilmiştir [58].

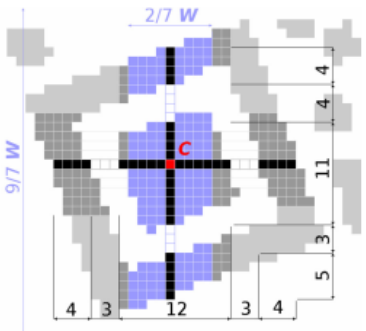


Şekil 4.10: 1: 1: 3: 1: 1 ile eşleşen bulucu desen

Bulucu desen aramasında, geometrik merkezleri yatayda en fazla 3 nokta ve dikeyde en fazla (3W)/7 olanlar bir araya getirilmektedir. Bulucu desenlerin bir araya getirilmesinden sonra C'nin ortalama x, y koordinatları ve W belirlenir [58].

$$x \in (C_x \pm W/7) \text{ ve } y \in (C_y \pm 4.5W/7) \qquad (4.27)$$

Ardından, dikey yönde de siyah ve beyaz noktaların oranının 1: 1: 3: 1: 1 olup olmadığı kontrol edilir ve eşleşmeyenler atılır (Şekil 4.11) [58].



Şekil 4.11: Her iki eksende de 1: 1: 3: 1: 1 ile eşleşen bulucu desenler

Her bulucu desen, 7 × 7 modül boyutu (R_C) ile çevrelenmiş 3 × 3 modüllü kare R_A tarafından oluşturulur (Şekil 4.12) [58]. Bu yüzden bulucu desenler aşağıdaki özellikleri içermelidir [58].

- Alan(R_A)<Alan(R_B)<Alan(R_C), Alan(R_B)/Alan(R_A)<3 ve Alan(R_c)/Alan(R_A)<4
- 0.7<Genişlik(R_B)/Yükseklik(R_B)<1.3 ve 0.7<Genişlik(R_C)/Yükseklik(R_C)<1.3
- Mesafe(Geometrik Merkez(R_A),Geometrik Merkez(R_B))<3 ve Mesafe(Geometrik Merkez(R_A),Geometrik Merkez(R_C))<3



Şekil 4.12: Bulucu desenin bağlantı bileşenleri

R_A , R_B , R_C özelliklerinden yola çıkarak bir modülün genişliği MW hesaplanır.

$$MW = \frac{\sqrt{M_{00}R_A + M_{00}R_B + M_{00}R_C}}{7} \tag{4.28}$$

Burada, M_{00} ham (raw) görüntünün momentidir.

Tüm bu işlemlerden sonra, bir görüntüde yer alan üç adet bulucu desenin bulunma işlemi yapılır. Bunun için geometrik merkezler arasında bir mesafe matrisi kullanılır [58]. Üç bulucu model için karşılıklı konumuna dayalı olarak sırasıyla FP1, FP2, FP3 şeklinde tanımlanmış ve yanlış pozitif durumları tespit etmek için QR Kodu etrafındaki sessiz bölgenin ve QR içindeki zamanlama desenin varlığı doğrulanmaktadır (Şekil 4.13). QR kodu içindeki zamanlama desenin doğrulanması için siyah ve beyaz çizgi modüllerinin ortalama uzunluğu L_{AVG} ve standart sapması L_{STD} hesaplanmaktadır [58].

$$L_{AVG} - MW < 1 \text{ ve } L_{STD} < 1 \tag{4.29}$$



Şekil 4.13: Bir QR kod içindeki zamanlama desenleri

Bulucu desenlerin bulunması işleminden sonra Perspektif dönüşümü yapılır. Perspektif dönüşümü sayasinde bozuk QR kod görüntüleri geri yüklenebilir. Persperktif dönüşümü [62] genel olarak $x = x'/w'$ ve $y = y'/w'$ şeklinde gösterilir. Denklem 4.30'da her orijinal koordinat (u, v), 3'e 3 matris kullanılarak yeni bir koordinata (x, y) dönüştürülebilir.

$$\begin{bmatrix} x' & y' & w' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u & v & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \tag{4.30}$$

Denklem 4.30 referans alınarak x ve y aşağıdaki şekilde ifade edilir [62]:

$$x = \frac{x'}{w'} = \frac{a_{11}u + a_{21}v + a_{31}}{a_{13}u + a_{23}v + a_{33}} \tag{4.31}$$

$$y = \frac{y'}{w'} = \frac{a_{12}u + a_{22}v + a_{32}}{a_{13}u + a_{23}v + a_{33}} \tag{4.32}$$

3'e 3 matris genellik kaybı olamadan normalleştirilebilir [62]. Bu durumda $a_{33} = 1$ olur ve Denklem 4.31 ve Denklem 4.32 tekrar yazılır:

$$x = a_{11}u + a_{21}v + a_{31} - a_{13}ux - a_{23}vx \tag{4.33}$$

$$y = a_{12}u + a_{22}v + a_{32} - a_{13}uy - a_{23}vy \tag{4.34}$$

Denklem 4.33 ve Denklem 4.34'e dört çift yazışma noktası uygulanarak, aşağıdaki gibi doğrusal bir sistem elde edilir [62]:

$$\begin{bmatrix} u_0 & v_0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -u_0x_0 & -v_0x_0 \\ u_1 & v_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -u_1x_1 & -v_1x_1 \\ u_2 & v_2 & 1 & 0 & 0 & 0 & -u_2x_2 & -v_2x_2 \\ u_3 & v_3 & 1 & 0 & 0 & 0 & -u_3x_3 & -v_3x_3 \\ 0 & 0 & 0 & u_0 & v_0 & 1 & -u_0y_0 & -v_0y_0 \\ 0 & 0 & 0 & u_1 & v_1 & 1 & -u_1y_1 & -v_1y_1 \\ 0 & 0 & 0 & u_2 & v_2 & 1 & -u_2y_2 & -v_2y_2 \\ 0 & 0 & 0 & u_3 & v_3 & 1 & -u_3y_3 & -v_3y_3 \end{bmatrix} x \begin{bmatrix} a_{11} \\ a_{21} \\ a_{31} \\ a_{12} \\ a_{22} \\ a_{32} \\ a_{13} \\ a_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ y_0 \\ y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix} \tag{4.35}$$

Kameradan alınan QR kod görüntüsüne perspektif dönüşümü uygulandıktan sonra Reed-Solomon hata düzeltme algoritması uygulanır. İkili olmayan döngüsel hata düzeltme kodları olarak adlandırılan Reed-Solomon kodları hata bilgilerini düzeltmemize yardımcı olur. Reed-Solomon hata düzeltme algoritması sendromları hesaplama, bir hata bulucu polinomu belirleme ve hata değerlerini çözmekten oluşur [62].

Sendromları hesaplamak için, alınan mesaj bir polinomun S(x) katsayıları olarak görülür [62]:

$$S(x) = \sum_{i=0}^{n-1} r_i x^j \tag{4.36}$$

Burada r_i, i konumunda alınan mesajdır. Bu nedenle sendromlar $(S_0, S_1, ..., S_{2t-1})$ şu şekilde tanımlanır [62]:

$$S_0 = S(\alpha^0),\ S_1 = S(\alpha^1),\ \dots,\ S_{2t-1} = S(\alpha^{2t-1}) \tag{4.37}$$

Burada 2t, hata düzeltmesi için kullanılabilen kod sözcüklerinin sayısına eşittir ve α, Galois alanındaki ilkel öğedir. Sendrom polinomu şu şekilde tanımlanır [62]:

$$S(x) = \sum_{i=0}^{2t-1} S_i x^j \tag{4.38}$$

Sendrom polinomunu hesapladıktan sonra hata bulucu polinomunu ve hata değerlendirici polinomunu oluşturmak için Öklid algoritması kullanılmaktadır [62]. Hata bulucu polinomu hata konumlarını bulmak için ve hata değerlerini bulmak için hata değerlendirici polinomu kullanılır. Öklid algoritması, içindeki anahtar denkleme dayanmaktadır [62]:

$$\Omega(x) = S(x)\Lambda(x) (\mathrm{mod}\, x^{2t}) \tag{4.39}$$

Yalnızca $S(x)$ ve t verildiğinde hata bulucu polinomu $\Lambda(x)$ ve hata değerlendirici polinomu $\Omega(x)$ elde edilmek istenirse, Denklem 4.39 şu şekilde tanımlanır [62]:

$$\Omega(x) = \theta(x)x^{2t} + S(x)\Lambda(x) \tag{4.40}$$

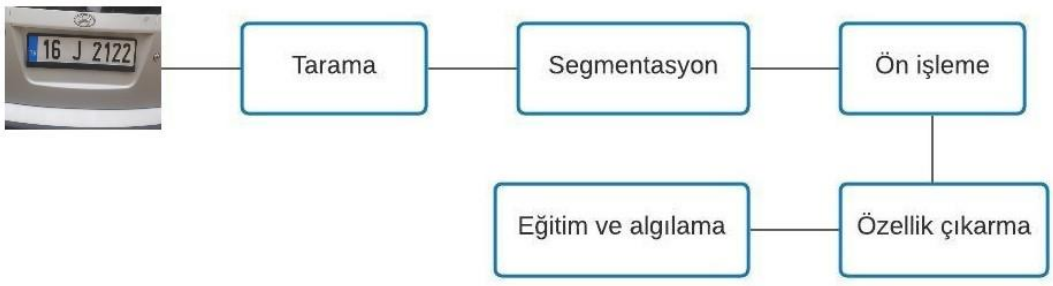
Son olarak, hata bulucu polinomunu ve hata değerlendirici polinomunu oluşturmak için Öklid algoritması kullanır [62].

$$e_{i_k} = \frac{\Omega(X_k^{-1})}{\Lambda'(X_k^{-1})} \tag{4.41}$$

e_{i_k}, i_k konumundaki düzeltilmiş değerdir. X_k^{-1}, k konumundaki $\Lambda(x)$'nin köküdür. $\Lambda'(x)$, $\Lambda(x)$'nin biçimsel türevidir. Denklem 4.41 ile QR kod görüntülerinin düzeltilmiş verileri elde edilir.

4.5 Optik Karakter Tanıma (OCR-Optical Character Recognition)

OCR; basılı metnin, el yazısı veya dijital ortamda yazılmış taranmış görüntülerinin makine tarafından kodlanmış metne çevrilmesidir. OCR teknolojisi iş belgesi veri girişi, banka sistemleri, otomotik plaka tanımlama, basılı belgelerin elektronik ortamda aranmasını sağlama, görme engelli olan kişilere yardımcı teknolojiler gibi birçok farklı alanda kullanılmaktadır. OCR, Şekil 4.14'te gösterilen işlemler yapılarak algılanmaktadır [63].



Şekil 4.14: OCR algılama aşamaları

Tarama aşamasında, orijinal görüntü taranarak dijital görüntü haline getirilir. Tarama, çok seviyeli görüntüyü iki düzeyli görüntüye dönüştüren eşikleme işlemi ile gelir. Bu, bellek alanından ve hesaplamada kazanç sağlar.

Segmantasyon aşamasında metin şekiller ve grafiklerden ayrılır. Bir metne segmantasyon uygulandığında karakterler veya kelimeler ayrılmış olur. Fakat, karakterlerin grafiklerle birleşik olması durumunda karakter grafik gibi algılanabilir.

Tarama işlemi sırasında oluşabilecek gürültüden dolayı karakterler tanınmayabilir. Bu sorunun aşılması için ön işleme yapılır. Ön işleme aşamasında, düzelteme ve normalleştirme yapılmaktadır.

Özellik çıkarma aşamasında sembollerin özellikleri çıkarılarak, semboller karakterize edilir ve önemsiz nitelikler dışarıda bırakılır.

Son aşama ise OCR işleminin eğitilmesi ve algılanmasıdır. Şablon eşleştirme, istataiksel teknikler, yapısal teknikler ve yapay sinir ağları gibi yaklaşımlarla OCR işleminin eğitilmesi yapılır. Eğitim işleminden sonra karakterlerin algılanması sağlanır.

4.6 Kenar Algılama, Deliklerin Algılanması ve Çapların Ölçülmesi

4.6.1 Deliklerin geometrik eşleştirme algoritması ile algılanması

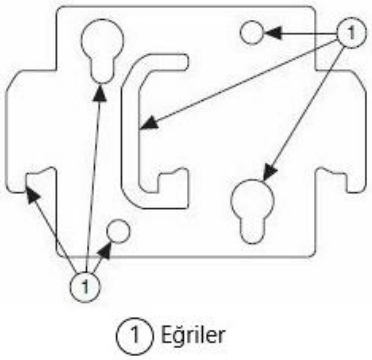
Bu çalışmada, çap tespiti ve çap ölçümü için geometrik eşleştirme algoritması kullanılmıştır. Bu algoritma, desen eşleştirme tekniği gibi inceleme görüntüsünde şablondaki bilgilere benzer bilgiler içeren bölgeleri bulur. Fakat desen eşelştirmeden farklı olarak eşleştirme için birincil özellikler olarak şablon görüntüsünde bulunan geometrik bilgileri kullanır. Geometrik bilgiler, kenarlar veya eğriler gibi düşük seviyeli unsurlardan görüntüdeki eğriler tarafından yapılan geometrik şekiller gibi daha yüksek seviyeli unsurlara kadar değişebilir.

Geometrik eşleştirme algoritması öğrenme ve eşleştirme olmak üzere iki aşamadan oluşur. Bu algoritmada, şablon görüntüsünden çıkarılan geometrik özellikler ve bu özellikler arasındaki uzamsal ilişkileri inceleme görüntüsünde daha hızlı aramayı kolaylaştıracak şekilde düzenler ve saklar. Bu aşamada öğrenilen bilgiler şablon görüntüsünün bir parçası olarak saklanır.

Eşleştirme aşamasında ise şablon görüntüsündeki bilgilere karşılık gelen inceleme görüntüsünden geometrik bilgiler çıkarılır. Daha sonra, özelliklerin şablondaki özelliklerin uzamsal modellerine benzer şekilde uzamsal modellerde kendilerini hizaladıkları inceleme görüntüsünde bölgeleri konumlandırarak eşleşmeleri bulur.

NI Vision'da Geometrik Eşleştirme Algoritması, özellik tabanlı geometrik eşleştirme yöntemi ve kenar bazlı geometrik eşleştirme yöntemi olmak üzere iki yöntem vardır. Bu çalışmada kenar bazlı geometrik eşleştirme yöntemi kullanılmıştır. Kenar bazlı geometrik eşleştirme yöntemi, gradyen değerli eşlemeyi gerçekleştirmek için şablonun merkezi noktasının konumunu kullanır ve boyunca her noktada kenarın gradyen değerini hesaplar. Şekil 13'de şablon görüntüsündeki kenarlara karşılık gelen eğriler gösterilmektedir.

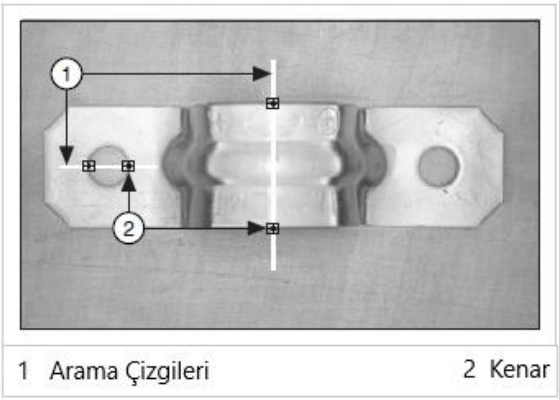
Şekil 4.15'te kenar tabanlı geometrik eşleştirme tekniği tarafından kullanılan temel bilgileri oluşturan şablon görüntüsündeki kenarlara karşılık gelen eğrileri gösterir [49].



Şekil 4.15: Şablon görüntüsündeki kenarlara karşılık gelen eğriler

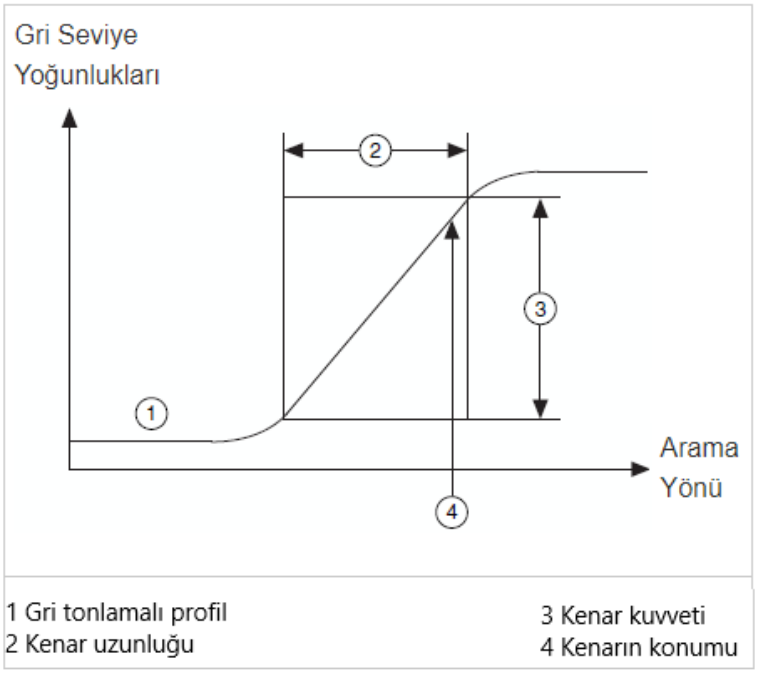
4.6.2 Basit kenar algılama yöntemi

Görüntüdeki bitişik pikseller arasında gri tonlama değerlerinin önemli bir değişikliğine kenar denir. NI Vision'da kenar algılama, Şekil 4.16'da gösterildiği gibi arama bölgesi boyunca 1D (bir boyutlu) piksel değerleri üzerinde yapılır [49]. 1D boyutlu arama bölgesi çizgi, daire, elips, dikdörtgen, çokgen veya serbest bir bölge olabilir. Kenarın belirlenmesi için piksel yoğunluk değişikliklerine bakılır.



Şekil 4.16: Kenar algılama 1D arama bölgesi [49]

Bir kenarı karakterize etmek için kullanılan genel model Şekil 4.17'de gösterilmektedir [49].



Şekil 4.17: Bir kenarın karakterize modeli

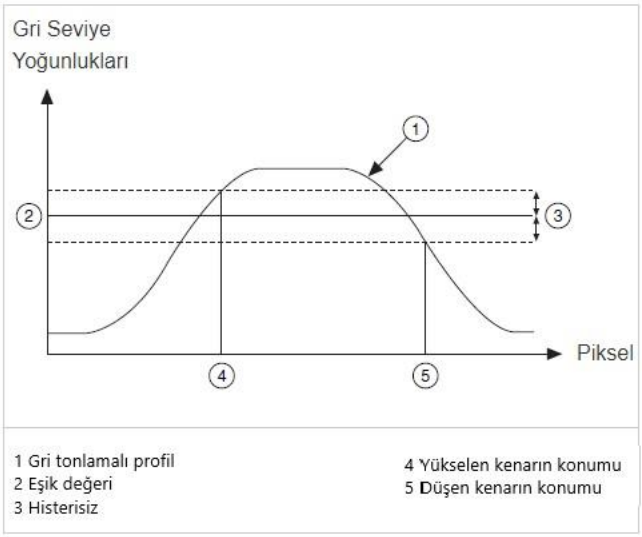
Kenar kuvveti; arka plan ile kenar arasındaki gri tonlama değerlerinde minimum farkı tanımlar ve kenar kontrastı olarak da adlandırılır. Kenar kuvveti aydınlatma koşulları ve farklı gri tonlama özelliklerine sahip nesnelerden dolayı değişebilir.

Kenar uzunluğu; kenar ile arka plan arasında istenen gri tonlama farkının oluşması gereken mesafeyi tanımlar.

Kenar konumu; görüntüdeki bir kenarın x , y konumudur.

Kenar polaritesi; bir kenarın yükselen ya da düşen olup olmadığını tanımlar. Yükselen kenar, gri tonlama değerlerinde bir artışla karakterize edilir. Düşen kenar, gri tonlama değerlerinde bir azalma ile karakterize edilir. Bir kenarın polaritesi arama yönüne bağlıdır.

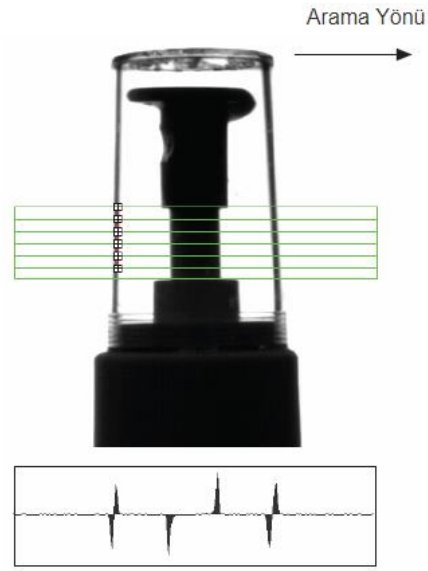
Kenarın algılanması görüntünün başından sonuna kadar piksel piksel taranması ile sağlanır. Piksel değerinin bir eşik değeri artı bir histerezis değerinden daha büyük olduğu ilk noktada yükselen bir kenar tespit edilir. Yükselen kenar algılandıktan sonra, piksel değeri belirtilen eşik değerinin altına düştüğünde düşen kenar algılanır. Bu işlem görüntü sonuna kadar devam eder. Şekil 4.18'de basit kenar yöntemi karakteristiği gösterilmektedir [49].



Şekil 4.18: Basit kenar yöntemi karakteristiği

Düz kenarları bulmak, 2D arama bölgesi içindeki bir görüntüdeki düz kenarları veya çizgileri bulmayı içerir. Düz kenarlar, önce arama bölgesinde 1D kenar noktalarının bulunması ve ardından tespit edilen kenar noktalarına en iyi uyan düz çizgilerin hesaplanmasıyla bulunur.

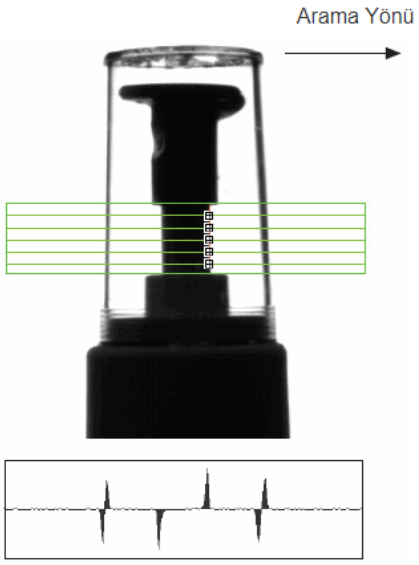
İlk kenar noktasına düz bir çizgi uydurulur. Şekil 4.19, bir arama çizgisi boyunca hesaplanan kenar büyüklükleri ile birlikte ilk koyu ve parlak kenarları kullanarak bir nesnede tespit edilen düz kenarın bir örneğini göstermektedir [49].



Şekil 4.19: Bir nesnede tespit edilen düz kenar örneği [49]

En iyi kenar hesaplaması için ise, her arama çizgisi boyunca en iyi kenar noktasına düz bir çizgi uydurulur. Şekil 4.20, bir arama çizgisi boyunca hesaplanan kenar

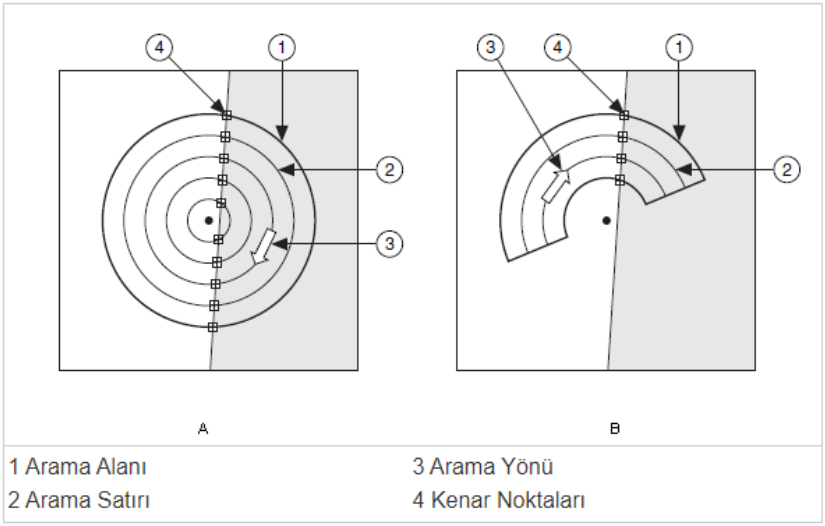
büyüklükleri ile birlikte en iyi karanlıktan parlaklığa kenarları kullanan bir nesnede tespit edilen düz kenarın bir örneğini göstermektedir [49].



Şekil 4.20: Bir nesnede tespit edilen en iyi düz kenar örneği [49]

4.6.3 Hough dönüşümü ile çap ölçümü

Dairesel bir görüntüdeki kenarın algılanması, eşmerkezli çizginin dairesel bir bölgeye uydurulması ile sağlanır. Şekil 4.21 eşmerkezli bir çizginin temellerini göstermektedir. Kenar tespiti, arama bölgesinde meydana gelen ve dış dairesel sınıra eşmerkezli olan arama hatları boyunca gerçekleştirilir [49]. Öncellikle, eşmerkezli çizgiler arasındaki radyal mesafeyi piksel cinsinden belirterek kenar algılama için kullanılan eş merkezli arama çizgilerinin sayısını kontrol edilir. Daha sonra, arama yönünü belirlenir.

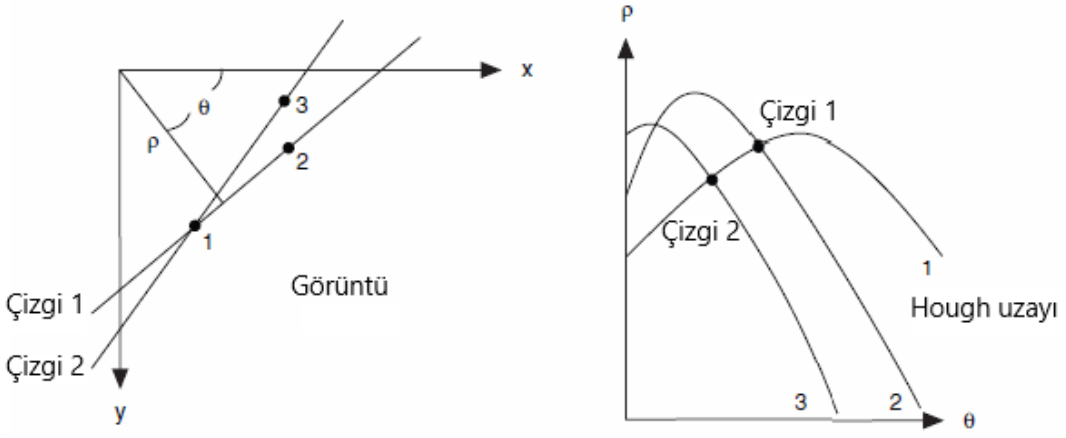


Şekil 4.21: Eşmerkezli bir çizginin temelleri

Bu çalışmada delik çaplarının hesaplanması Hough dönüşümü ile yapılmıştır. Hough dönüşümü düz çizgiler, polinomlar ve daireler gibi parametrelendirilebilen eğrileri bulmak için görüntü analizinde kullanılan standart bir tekniktir. Bir görüntüdeki düz çizgileri tespit etmek için çizginin parametreli biçimi kullanılır [53].

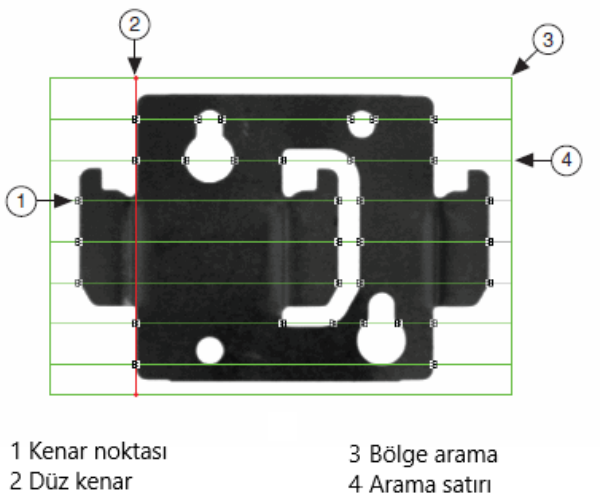
$$\rho = x\cos\theta + y\sin\theta \tag{4.42}$$

Burada, ρ orijinden çizgiye dik mesafedir ve θ orijinden çizgiye normalin açısıdır. Şekil 4.22, Hough uzayında üç görüntü noktasının oluşturduğu sinüzoidal eğrileri göstermektedir [53]. Görüntüdeki eş doğrusal noktalarla ilişkili eğriler, Hough uzayında benzersiz bir noktada kesişir. Kesişme koordinatları (ρ,θ), görüntüdeki karşılık gelen çizgi için bir denklem tanımlamak için kullanılır. Örneğin, 1 ve 2 noktalarının oluşturduğu eğrilerin kesişme noktası, görüntüdeki Çizgi 1 denklemini temsil eder.



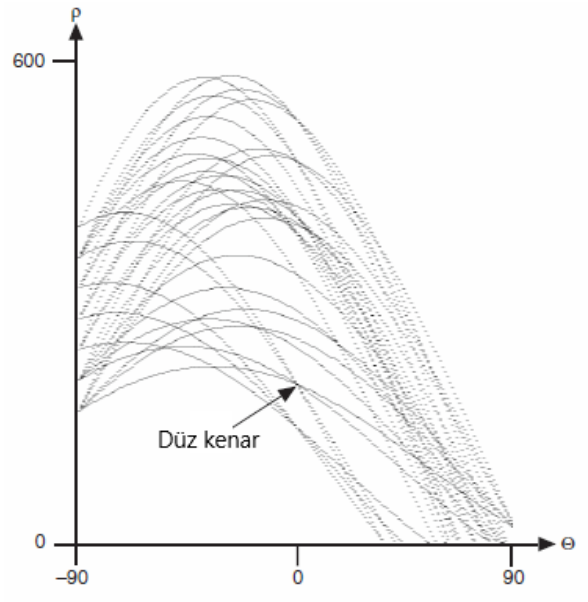
Şekil 4.22: Hough uzayında üç görüntü noktasının oluşturduğu sinüzoidal eğrileri

Şekil 4.23, NI Vision'ın bir görüntüdeki düz kenarları algılamak için Hough dönüşümünü nasıl kullandığını göstermektedir [49]. Saptanan her kenar noktasının konumu (x, y), (ρ,θ) uzayda sinüzoidal bir eğriye eşlenir. Hough uzayı, eksenlerin ρ ve θ için nicelleştirilmiş değerleri temsil ettiği iki boyutlu bir histogram olarak uygulanır. θ aralığı görüntüde tespit edilecek düz çizgiler için açı aralığı ile belirlenir. Görüntüdeki her kenar konumu, Hough histogramındaki birden çok konuma eşlenir ve histogramdaki her konumdaki sayı bir artar. Histogramdaki iki veya daha fazla sayıdaki konumlar, (ρ,θ) uzayındaki eğriler arasındaki kesişim noktalarına karşılık gelir.



Şekil 4.23: NI Vision kenar algılama Hough dönüşümü [49]

Şekil 4.24, Hough histogramının iki boyutlu bir görüntüsünü göstermektedir [49]. Her pikselin yoğunluğu, o konumdaki histogramın değerine karşılık gelir. Birden çok eğrinin kesiştiği konumlar, histogramdaki diğer konumlardan daha koyu görünür. Daha koyu pikseller, orijinal görüntüde düz bir kenarın varlığına dair daha güçlü kanıtları gösterir çünkü çizgi üzerinde daha fazla nokta bulunur. Şekil 4.24 ayrıca görüntüde tespit edilen dört kenar noktasının oluşturduğu çizgiyi ve Hough histogramında karşılık gelen kesişme noktasını gösterir.



Şekil 4.24: Hough histogramının iki boyutlu bir görüntüsü

Görüntüdeki düz kenarlar, yerel maksimumlar veya Hough histogramındaki pikler tanımlanarak tespit edilir. Yerel maksimum değerler, histogram sayısına göre azalan

sırada sıralanır. Düz kenar algılama işleminin hesaplama hızını iyileştirmek için, algılanan düz kenarlar için en yüksek pikin yalnızca birkaçı kabul edilir. Her aday için, adaya karşılık gelen çizgi için orijinal resimde bir puan hesaplanır. En iyi puana sahip çizgi düz kenar olarak döndürülür. Hough tabanlı yöntem, orijinal görüntüdeki birden çok düz kenarı tespit etmek için de kullanılabilir. Bu durumda, düz kenarlar puanlarına göre döndürülür.

Kenar algılama puanı s şu şekilde tanımlanır [49]:

$$s = \frac{c}{m+n} \tag{4.43}$$

Burada c belirtilen kenar polaritesiyle eşleşen kenar noktalarındaki gradyenlerin toplamı, m düz çizgi üzerinde belirtilen kenar polaritesiyle eşleşen kenar noktalarının sayısı ve n belirtilen kenar polaritesiyle eşleşmeyen düz çizgi üzerindeki kenar noktalarının sayısıdır.

5. ENDÜSTRİYEL UYGULAMALAR İÇİN GELİŞTİRİLEN OTOMATİK HATA TESPİT SİSTEMİ

Bu çalışmada hedeflenen, kamera ve LabVIEW programı kullanılarak endüstriyel proseslerdeki çeşitli hataların tespit edilmesidir. Çalışmada alan tarayıcı tipte bir kamera kullanılmıştır. Bu kamera ile örnek test parçasının kalite kontrolü, insan gözünün ayırt edemeyeceği hassasiyette ve hızda gerçekleştirilmiştir. Kameranın kadrajına giren alanda önceden tanımlanan kontroller yapılarak, parça OK veya not OK şeklinde kalite kontrol prosesi gerçekleştirilmiştir. Tanımlanan dokunun yakalanması ve tespiti işlemleri yapılmış, aynı zamanda kameradan gelen sürekli veri akışı sayesinde gerçek zamanlı izleme ve kontrol gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen sistem, donanım ve yazılım olmak üzere iki bölümden oluşmaktadır.

5.1 Donanım Bölümü

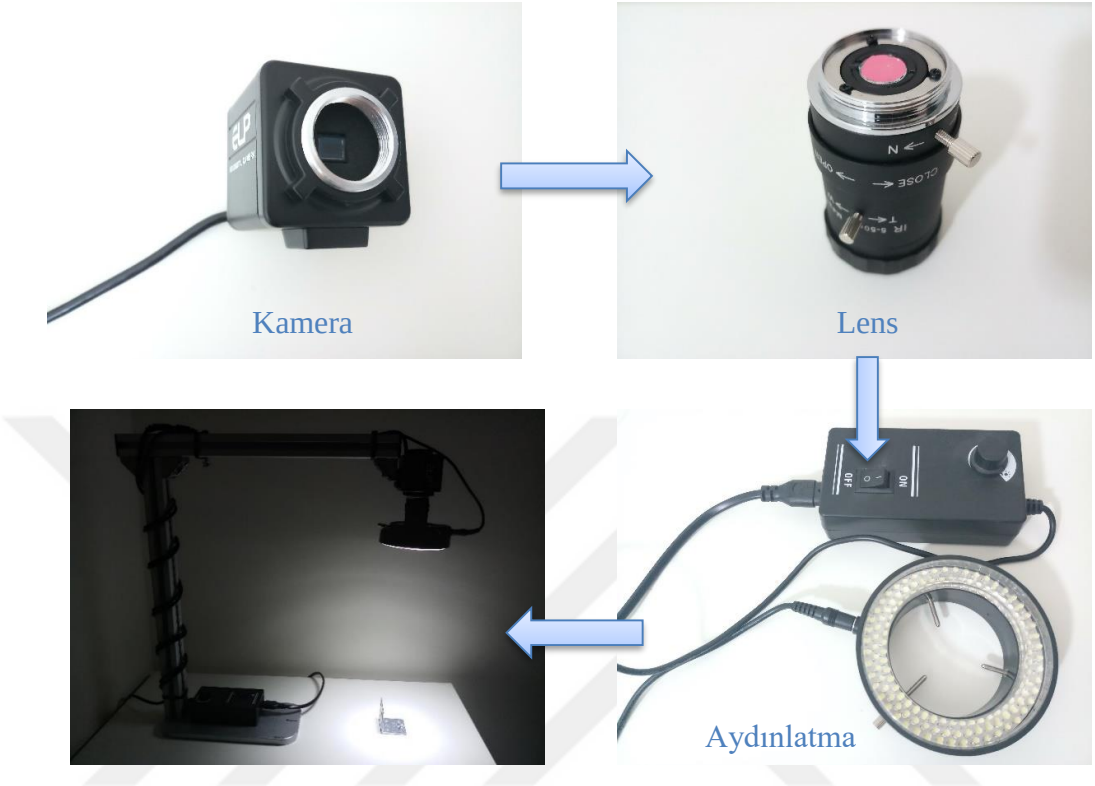
Kamera seçimi ile başlanacak, hat tespitlerinin daha hassas olabilmesi amacıyla renkli ve daha aktif kullanılan bir sensör seçilmesi planlanmaktadır. Lens seçimi kameraya ve odak uzaklığına bağlı olmak üzere, manuel odaklamalı bir lens seçimi yapılacaktır. Aydınlatma olarak düşük güç tüketen ve daha net görüntü alabilecek bir aydınlatma tercih edilecektir. Bütün bu sistemi yürütecek seviyede bir bilgisayar üzerinden kontrol edilecektir. Şekil 5.1'de bu yapı gösterilmektedir.



Şekil 5.1: Geliştirilen sistemin donanım seçimine ait akış diyagramı

Bu çalışmada yapılan hata tespit işlemi için işlenmiş bir metal parçası kullanılmış ve 100 farklı işlenmiş metal parçası görüntüsü kullanılmıştır. İşlenmiş metal parçasının

görüntüsü; SONY IMX214 sensörü, 300 mm olarak hesaplanan çalışma mesafesi ve 90 mm olarak hesaplanan FOV değeri verilerine dayanılarak Şekil 5.2'deki düzenek kurularak alınmıştır.



Şekil 5.2: Kalite kontrol sistemindeki donanım bileşenleri ve oluşturulan düzenek

Uygun ortam olarak yansıma yapamayan karanlık bir ortam seçilmiştir. Kullanılan donanım verileri Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1: Donanım özellikleri

Sensör modeli	SONY IMX 214 (1/3")
Çözünürlük	3840 x 2160
Güç beslemesi	5V DC 200 mA
Lens	5-50 mm manuel değişken odaklı
Aydınlatma iç çapı	60 mm
Aydınlatma dış çapı	95mm
LED tipi	F3
LED sayısı	144
Parlaklık	Ayarlanabilir

Çizelge 5.2'de kullanılan sensöre ait datasheet değerleri ve Çizelge 5.3'te donanım için kullanılan sabit değerler verilmiştir (Sensör datasheet bilgisi EK A'da yer almaktadır).

Çizelge 5.2: Kullanılan sensöre ait datasheet değerleri

Sensör boyutu	1/3”
Yatay sensör boyutu	4.8 mm
Dikey sensör boyutu	3.6 mm
Köşegen sensör boyutu	6 mm
Piksel boyutu	1.12 μm

Çizelge 5.3: Donanım için kullanılan sabit değerler

Çalışma mesafesi	300 mm
Yatay görüş alanı	90 mm
Dikey görüş alanı	68 mm
Köşegen görüş alanı	113 mm

Çizelge 5.2’de ve Çizelge 5.3’teki değerler kullanılarak donanım için gerekli olan hesaplamalar yapılmıştır. Yatay açısal görüş alanı, Denklem 3.2 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$YatayAFOV = 2\tan^{-1}\left(\frac{90}{2\times 300}\right) = 17.1^{\circ} \tag{5.1}$$

Dikey açısal görüş alanı Denklem 5.1’de elde edilen değerden yola çıkarak oran-orantı ile bulunmuştur:

$$\frac{HFOV}{VFOV} = \frac{YatayAFOV}{DikeyAFOV} = \frac{90}{68} = \frac{17.1}{DikeyAFOV} \Rightarrow DikeyAFOV = 12.8^{\circ} \tag{5.2}$$

Köşegen açısal görüş alanı Denklem 5.1’de ve Denklem 5.2’de elde edilen değerleri ile hesaplanmıştır:

$$KösegenAFOV = \sqrt{YatayAFOV^2 + DikeyAFOV^2} = \sqrt{17.1^2 + 12.8^2} = 21.3^{\circ} \tag{5.3}$$

Odak uzaklığı Denklem 3.3 ve Denklem 3.4 kullanılarak hesaplanmış ve elde edilen sonuç Denklem 5.4’te gösterilmiştir.

$$f = \frac{h}{2\tan\left(\frac{Yatay\ AFOV}{2}\right)} = \frac{4.8}{2\tan\left(\frac{17.1}{2}\right)} = 16mm \tag{5.4}$$

Birincil büyütme (PMAG) Denklem 3.5 kullanılarak hesaplanmış ve elde edilen sonuç Denklem 5.5'te gösterilmiştir.

$$PMAG = \frac{h}{HFOV} = \frac{4.8}{90} = 0.053 \tag{5.5}$$

Çözünürlük hesaplaması için öncellikle sensör çöznürlüğü hesaplanmıştır. Sensör çöznürlüğü Denklem 3.9 kullanılarak hesaplanmıştır. Daha sonra, Denklem 5.5 elde edilen sonuç ve Denklem 3.10'dan yararlanılarak çözünürlük hesaplanmıştır. Son olarak Denkelem 3.10'da elde edilen çözünürlük değerinden yararlanılarak, çözünürlüğün μm değeri bulunmuştur.

$$\delta[lp/mm] = \frac{1}{2 \times 1.12\mu m} \times \frac{1000\mu m}{1mm} \tag{5.5}$$

$$o[lp/mm] = 0.053 \times 446.4\ lp/mm = 23.66 lp/mm \tag{5.6}$$

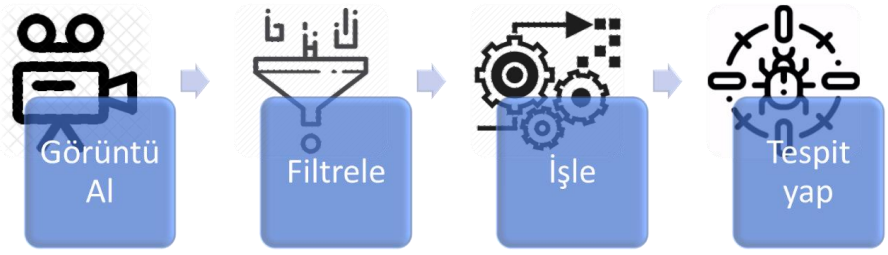
$$o[\mu m] = \frac{1}{(2 \times 23.66 lp/mm)} \times \frac{1000\mu m}{1mm} = 21\mu m \tag{5.7}$$

Çizelge 5.4: Hesaplanan değerler

Yatay açısal görüş alanı	17.1 º
Dikey açısal görüş alanı	12.8 º
Köşegen açısal görüş alanı	21.3º
Odak uzaklığı	16 mm
Birincil büyütme	0.053
Çözünürlük	21 μm

5.2 Yazılım Bölümü

Yazılım olarak LabVIEW programı seçilmiştir. Görüntü kamera üzerinden alınacak, alınan görüntü filtrelenecek, daha sonra program içerisinde işlenecek ve işlenen görüntüde otomatik tespitler yapılıp ara yüzde gösterilecek şekilde bir çalışma yapılmıştır.



Şekil 5.3: Geliştirilen sistemin yazılım genel prensip şeması

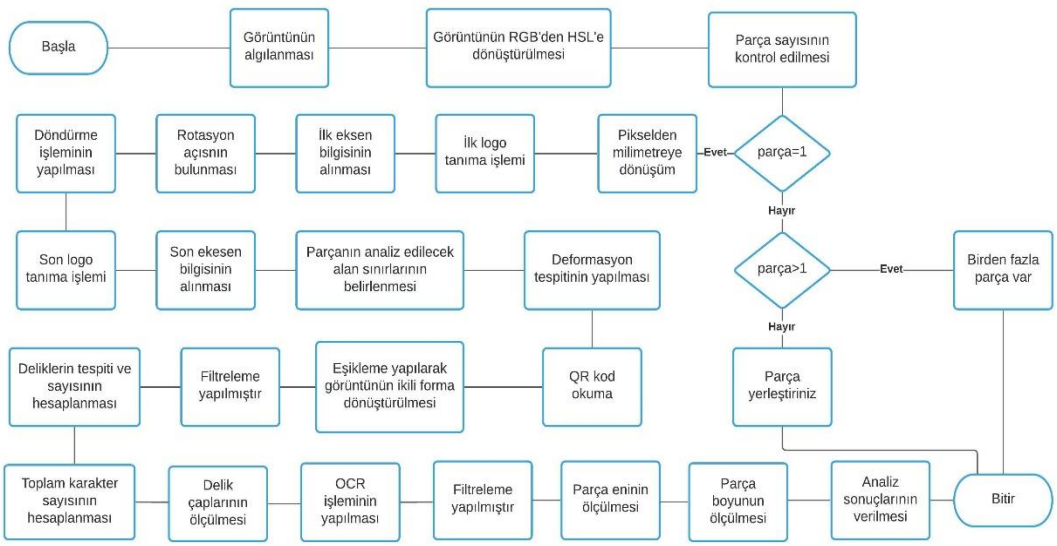
Görüntünün alınması bölümünde; donanım bölümünde belirlenen donanımlar ve uygun ortam sayesinde alınmıştır. Filtre bölümünde; işlenmiş metal parçasının görselde yer alan kısmı dışındaki alanlar maskelenmiştir. İşleme bölümünde; altı adet görüntü işleme algoritmaları NI Vision Modül kullanarak işlenmiştir. Tespit bölümünde; belirlenen eşik değerler altında bu altı adet kalite kontrol sürecinin raporlaması programın arayüzünde gösterilmiştir.

NI Vision Modül, makine görüsü ve görüntü işleme uygulamaları için yazılım geliştirmesine yardımcı olur. Bu modül, Windows sistemlerindeki C, C++, C# ve gerçek zamanlı sistemler için LabVIEW ve LabVIEW NXG grafik programlama ortamı kullanılabilir. Filtreler, morfolojik işlemler, desen eşleştirme ve sınıflandırma dahil yüzlerce görüntü işleme algoritmaları yapılabilir. Modül, hem işlemcileri hem de FPGA'leri hedeflemektedir. Aynı zamanda, TensorFlow'da geliştirilen derin öğrenme modellerini kullanarak çıkarım yapabilir.

Görüntü geliştirme modülünü kullanarak, yapay görme yazılımı geliştirmeye açık ve uyarlanabilir bir yaklaşım benimsemektedir. Tamamen özelleştirilmiş makine görüsü sistemleri oluşturmak için doğru donanım seçilerek kameralar yapılandırabilir, görüntüler alınabilir ve inceleme sonuçlarını analiz edilebilir.

Hata tespit işlemi için altı adet kalite kontrol süreci gerçekleştirilmiştir. Kalite kontrol işlemi için yapılan işlemler Şekil 5.4'de akış şeması olarak gösterilmiştir. Öncellikle kameradan işlenmiş metal parçasının görüntüsü alınmıştır. Alınan görüntü renk alanı, renk eşleştirme, renk konumu ve renk deseni eşleştirme gibi renk işleme işlevlerini gerçekleştirebilmesi için RGB'den HSL'e dönüştürülmüştür. Daha sonra, HSL'e dönüştürülen görüntüdeki parça sayısının kontolü yapılmıştır. Parça sayısının 1'e eşit olduğu durum için analizi işlemi yapılmış olup, diğer durumlar için ekrana parça sayısının durumuna göre hata mesajı yazdırılmış ve program bitirilmiştir.

Analiz kısmında öncellikle ilk logo tanımlama işlemi yapılmaktadır. Logo tanımlama işleminden sonra, ilk eksen bilgisinin alınması, rotasyon açısının hesaplanması ve döndürme işleminin yapılması gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, son logo tanımlama işlemi yapılarak son eksen bilgisi alınmış ve koordinat referansı belirlenmiştir. Parça dışında kalan kısımların işlem dışı tutabilmek için analiz edilecek parçanın alan sınırları belirlenmiştir. Alan sınırı belirlendikten sonra, parçada yer alan deformasyonların tespiti yapılmıştır. Bu işlemden sonra QR kodun okuması gerçekleştirilmiştir. Hata tespitinin geri kalan kontrol işlemlerinin gerçekleştirilebilmesi için eşikleme yapılarak görüntünün ikili forma dönüştürülmesi sağlanmıştır. Bu aşamada öncelikle, tespiti yapılan bölümlere filtreleme uygulayarak bu bölümler kaldırılmıştır. Filtreleme işleminde, morfolojik filtrelemeler yapılarak görüntünün özniteliği alınmıştır. Bu sayede, en az veri kullanılarak gereksiz detaylar kaldırılmıştır. Daha sonra, delik çaplarının ölçüm işlemi yapılmıştır. Ardından OCR işlemi yapılıp, tekrardan morfolojik filtreleme yapılmıştır. Filtreleme ile tespit edilen bölümler kaldırılıp parçanın eni ve boyu ölçülmüştür. Tüm yapılan bu işlemlerin sonuçları parça üzerinde gösterilmiştir.

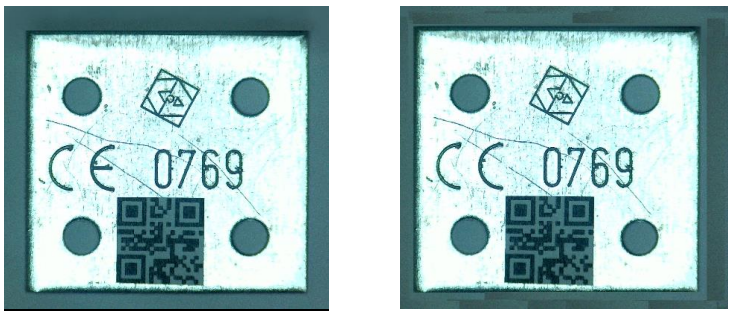


Şekil 5.4: Hata tespit sisteminin akış şeması

5.3 Otomatik Kalite Kontrol Sistemi Test Sonuçları

Otomatik hata tespit sistemi için kullanılan işlenmiş metal parçası için olması gereken yüzey deformasyon miktarı, çap ölçüsü, parçanın en ve boy değerleri Çizelge 5.5'te

gösterilmiştir. İşlenmiş metal parçasının logosu, üzerindeki QR kod bilgisi ve ürün numarası Şekil 5.5'te gösterilmiştir.



(a) **(b)**

Şekil 5.5: Kamerdan alınan işlenmiş metal parçasının görüntüsü **(a)** hatasız görüntü **(b)** hatalı görüntü

Çizelge 5.5: İşlenmiş metal parçasının değerleri

Kalite kontrol adımı	Nominal değer	Tolerans
Yüzey deformasyon miktarı	0 mm^2	20 mm^2
Çap ölçüsü	5.5 mm	±0.08 mm
Parçanın eni	40 mm	±0.08 mm
Parça boyu	36 mm	±0.08 mm
Logo tanıma	1 Adet	Yok
QR kod değeri	BTU 2010	Yok
Ürün numarası	CE 0769	Yok

5.3.1 Logo tanımlama

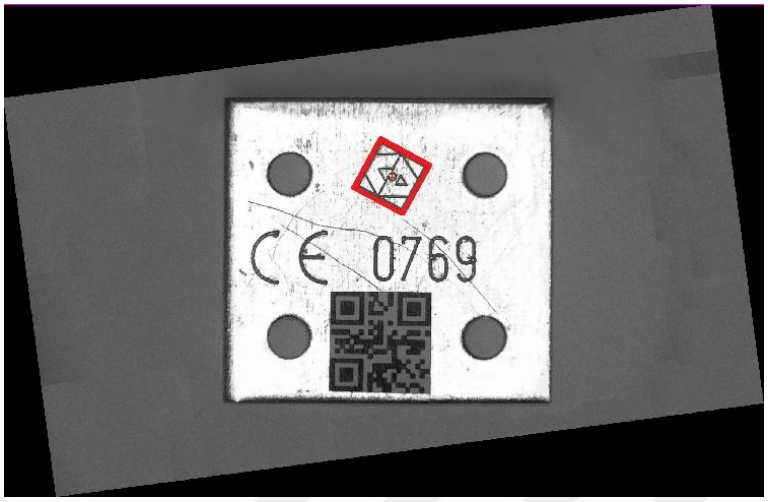
İşlenmiş metal parçası üzerinde logonun bulunması düşük tutarsızlık örnekleme ve piramit eşleştirme modelinde yer alan gri değer ve gradyen yöntemleri ile yapılmıştır. Logo tanımada yapılan işlemler Şekil 5.6'da gösterilmiştir.



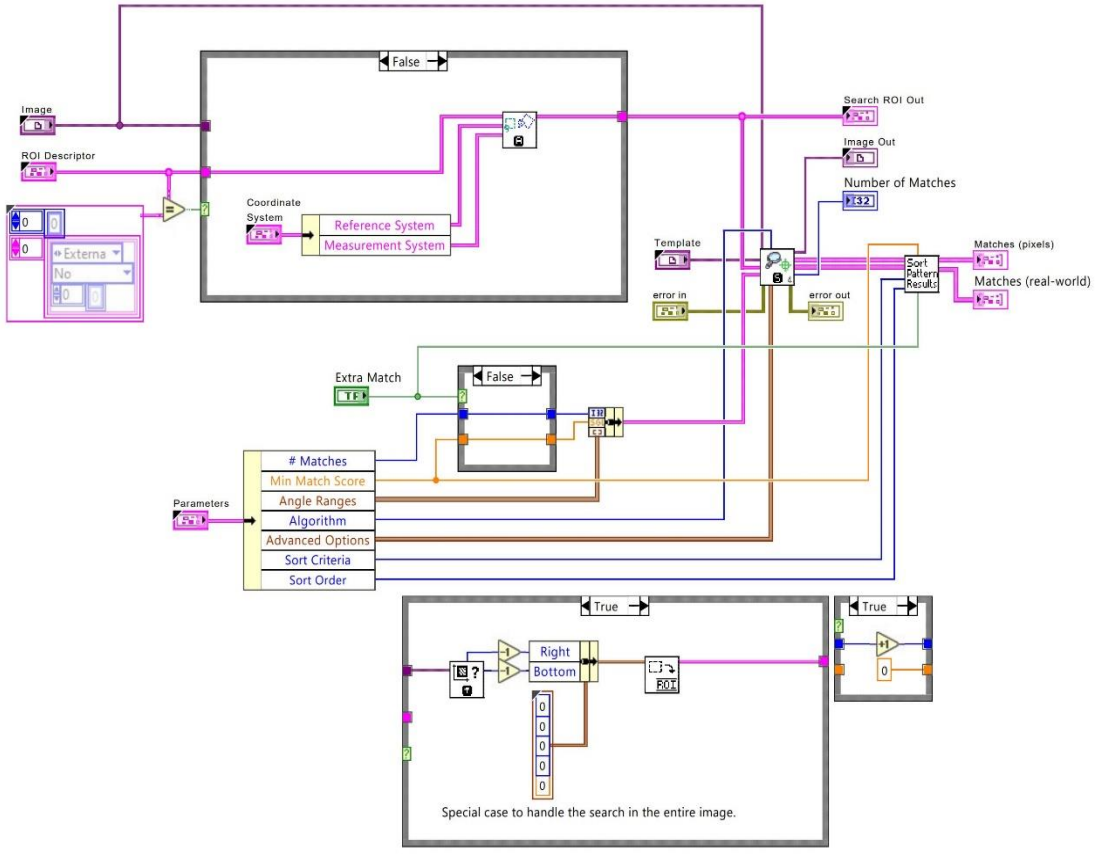
Şekil 5.6: Logo tanımada yapılan işlemler

Düşük tutarsızlık örnekleme ve piramit eşleştirme modelinde yer alan gri değer ve gradyen yöntemleri zaman ve doğruluk yüzdesi açısından karşılaştırılmış olup, ortalama zaman değeri hesaplanmıştır. Bu üç yöntemde de orijinal görüntü içerisindeki logo görüntüsünün bulunması Şekil 5.7'de gösterilmiştir. Ayrıca, logo tanımlama

işlemi için kullanılan NI LabVIEW programından yer alan önemli bir bölümü Şekil 5.8'de gösterilmiştir.



Şekil 5.7: Orijinal görüntü içerisindeki logo görüntüsünün bulunması



Şekil 5.8: Logo tanımlama işlemi için kullanılan NI LabVIEW programında yer alan önemli bir bölümü

Desen eşleştirme tekniği için NI Vision' da düşük tutarsızlık örnekleme modeli için Çizelge 5.6'da ve piramit eşleştirme modeli için Çizelge 5.7'de yer alan nümerik değerler kullanılmıştır.

Çizelge 5.6: Düşük tutarsızlık örnekleme modeli için nümerik değerler

Minimum kontrast	10
Arama Stratejisi	Dengeli
İlk eşleşme liste uzunluğu	300
Eşleşme listesi azaltma faktörü	3
İlk adım boyutu	5
Orta açısal doğruluk	2
Alt piksel doğruluğunu etkinleştirme	Evet
Alt Piksel yinelemeleri	20
Alt piksel toleransı	0

Çizelge 5.7: Piramit eşleştirme modeli için nümerik değerler

Maksimum piramit seviyesi	3
Minimum Kontrast	10
İlk eşleşme liste uzunluğu	300
Eşleşme listesi azaltma faktörü	0
Orta açısal doğruluk	6
İşlem sınır eşleşmeleri	Evet
Minimum eşleşme ayırma mesafesi	20
Minimum eşleşme ayırma açısı	10
Minimum eşleşme örtüşmesi	20
Alt piksel doğruluğunu etkinleştirme	Evet
Alt Piksel yinelemeleri	20
Alt piksel toleransı	0

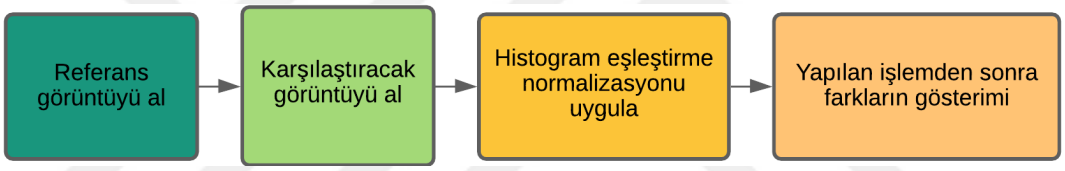
Elde edilen sonuçlarda ortalama süre; düşük tutarsızlık örnekleme 98.6 ms, gri değer yöntem 785.6 ms, gradyen yöntem 335.6 ms olarak bulunmuştur. Bu karşılaştırma verileri Çizelge 5.8'de gösterilmiştir. Böylece, Düşük tutarsızlık örnekleme piramit eşleştirmeye göre daha iyi sonuç vermiştir. Piramit eşleştirmede yer alan yöntemler karşılaştırıldığında, gradyen yöntemin gri değer yönteme kıyasla daha iyi bir sonuç verdiği gözlemlenmiştir.

Çizelge 5.8: Desen eşleştirme yöntemlerin zaman açısından karşılaştırılması

Desen eşleştirme yöntemleri	Zaman
Düşük tutarsızlık örnekleme	98.6 ms
Gri değer yöntem	785.6 ms
Gradyen yöntem	335.6 ms

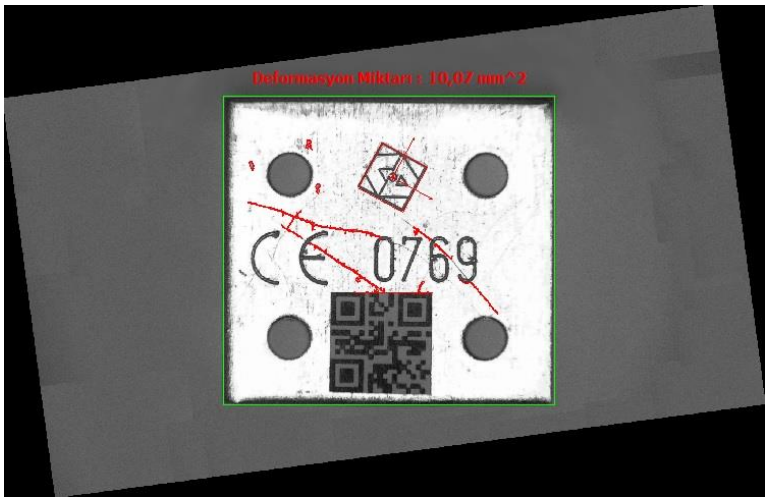
5.3.2 Yüzey deformasyonu tespiti

Histogram eşleştirme normalizasyonu kullanılarak işlenmiş metal parçası üzerinde yer alan çizik hatasının tespiti yapılmıştır. Çizik hatasının tespitinin yanı sıra; kaç adet çizik hatası olduğu, en büyük çiziğin alanı ve alana göre yüzdesi, tespit edilen çizik hatalarının alanı bulunmuştur. Bu işlem için gerekli olan hatasız bir parça referans alınmıştır. Bu sayede, alınan referans görüntü üzerindeki işlem süreçlerinin hiçbiri hata olarak algılanmamaktadır. Yüzey deformasyonu tespitinde yapılan işlemler Şekil 5.9'da gösterilmiştir.

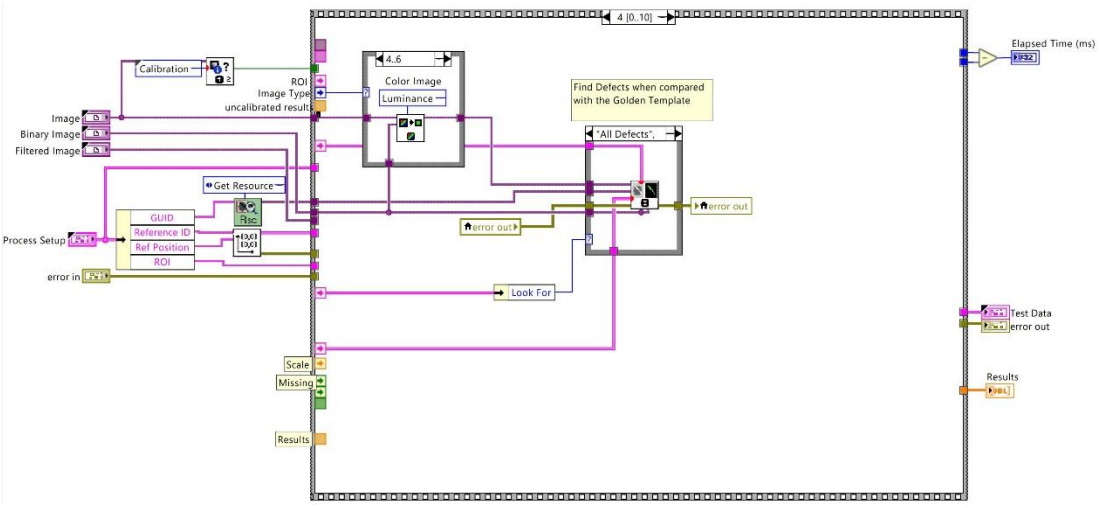


Şekil 5.9: Yüzey deformasyonu tespitinde yapılan işlemler

Düzey deformasyonu için kullanılan NI LabVIEW programından yer alan önemli bir bölümü Şekil 5.10'da gösterilmiştir. Şekil 5.11'de de görüleceği gibi işlenmiş metal parçasında yer alan farklı boyuttaki çizik hataların tespiti yapılmış ve detaylarıyla birlikte gösterilmiştir.



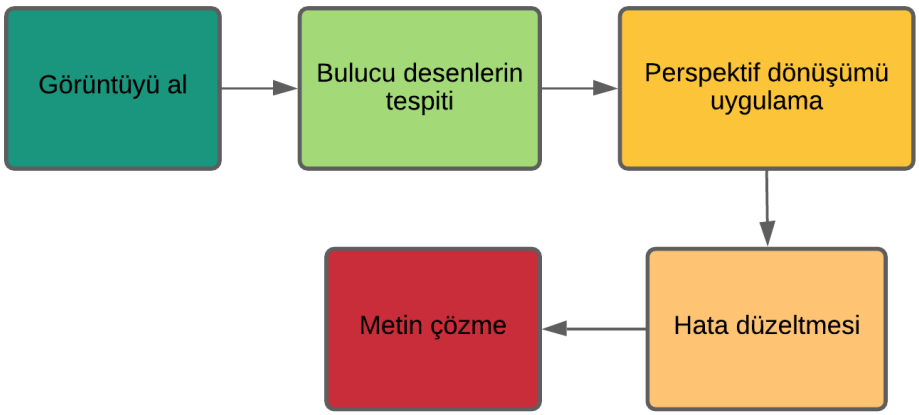
Şekil 5.10: Algılanan görüntü içerisinde yüzey deformasyonu tespiti



Şekil 5.11: Düzey deformasyonu tespiti için kullanılan NI LabVIEW programında yer alan önemli bir bölümü

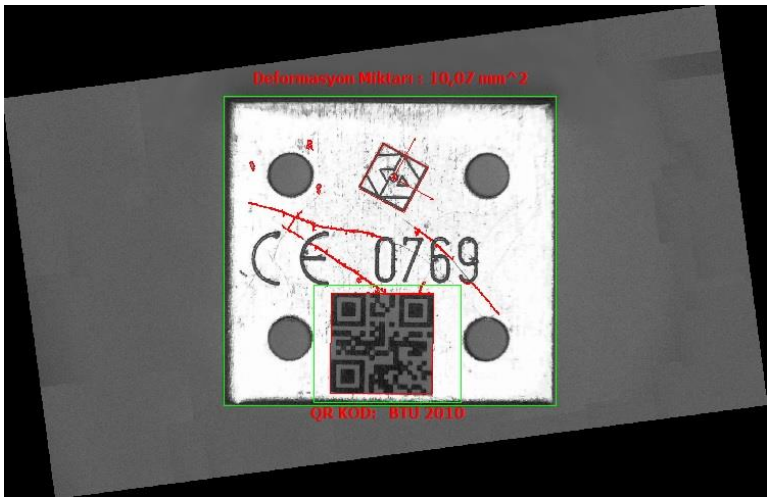
5.3.3 QR (Quick response) tespiti

21x21 lik model 2 tip seçilen QR kodu okunmaktadır. QR koda "BTU 2010" verisi depolanmış ve bu verinin karşılaştırılması ile doğruluğuna karar verilmiştir. Bu veri ile eşleştiği zaman QR kod kalite kontrol sürecini geçmiş olacaktır. Okunan bu veri sayesinde, üretim süreçlerinin detaylı bilgileri bu görsel kalite kontrol sürecine eklenebilir ve raporlanabilir hale getirilmiştir. QR kodu okumada yapılan işlemler Şekil 5.12'de gösterilmiştir.

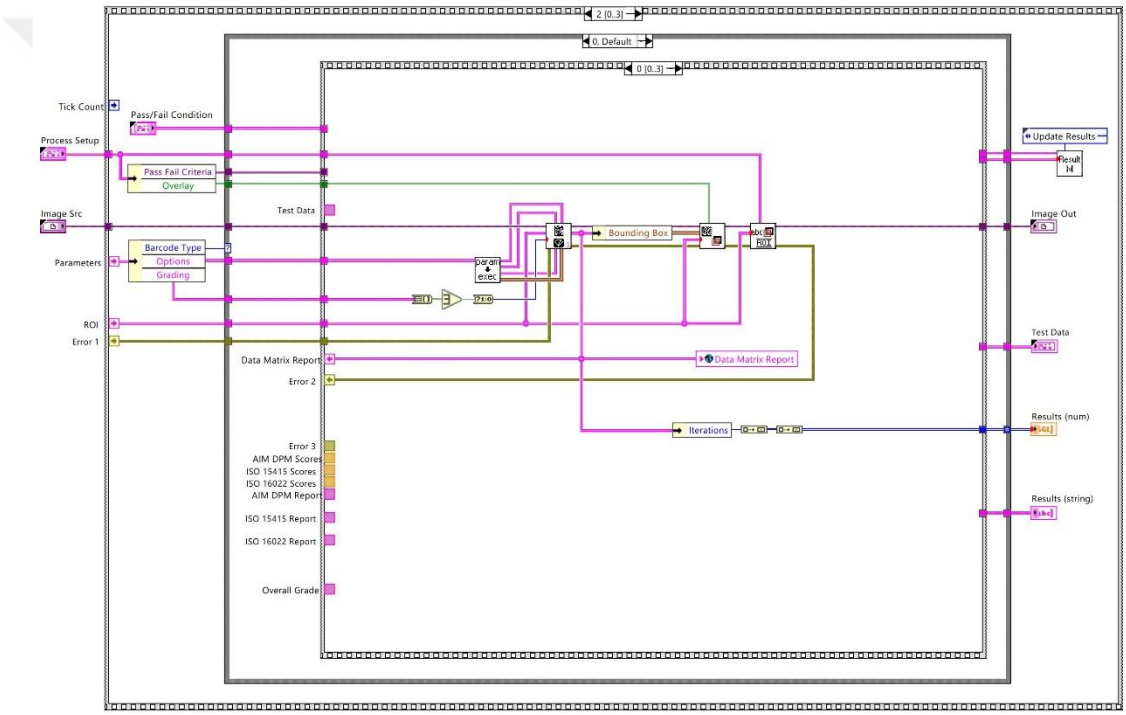


Şekil 5.12: QR kodu okumada yapılan işlemler

Algılan görüntü içerisindeki QR kodun okunmasının yapıldığı ve elde edilen sonuçlar Şekil 5.13'te gösterilmiştir. Ayrıca, QR kod okunması için kullanılan NI LabVIEW programından yer alan önemli bir bölümü Şekil 5.14'te gösterilmiştir.



Şekil 5.13: Algılanan görüntü içinde QR kod okuma

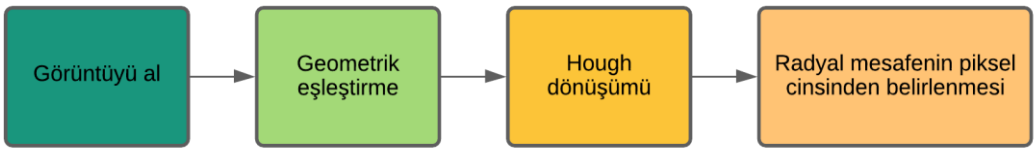


Şekil 5.14: QR kod okuma için kullanılan NI LabVIEW programında yer alan önemli bir bölümü

5.3.4 Çap öçümü

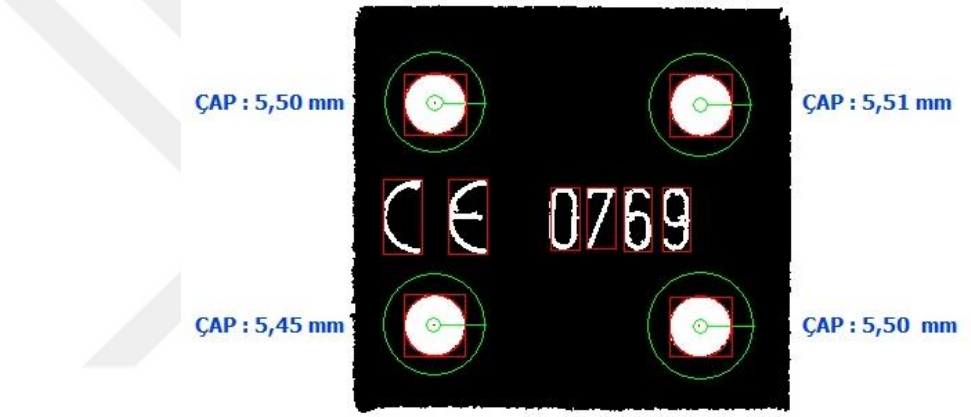
Geometrik eşleştirme kullanılarak işlenmiş metal parçası üzerinde yer alan dört adet deliğin tespiti yapılmıştır. Ayrıca, kenar tabanlı algoritma kullanılarak bu deliklerin çap ölçümü yapılmıştır. Burada deliklerin çap ölçümünün yanı sıra deliklerin kaç tane olduğuda hesaplanmıştır. Çap ölçümünde ±0.08 mm değerinde bir tolerans olduğu durum göz önüne alınarak kalite kontrolü değerlendirilmiştir. Ayrıca, delik sayısının

da kalite kontrolü yapılmaktadır. Çap ölçümünde yapılan işlemler Şekil 5.15'te gösterilmiştir.

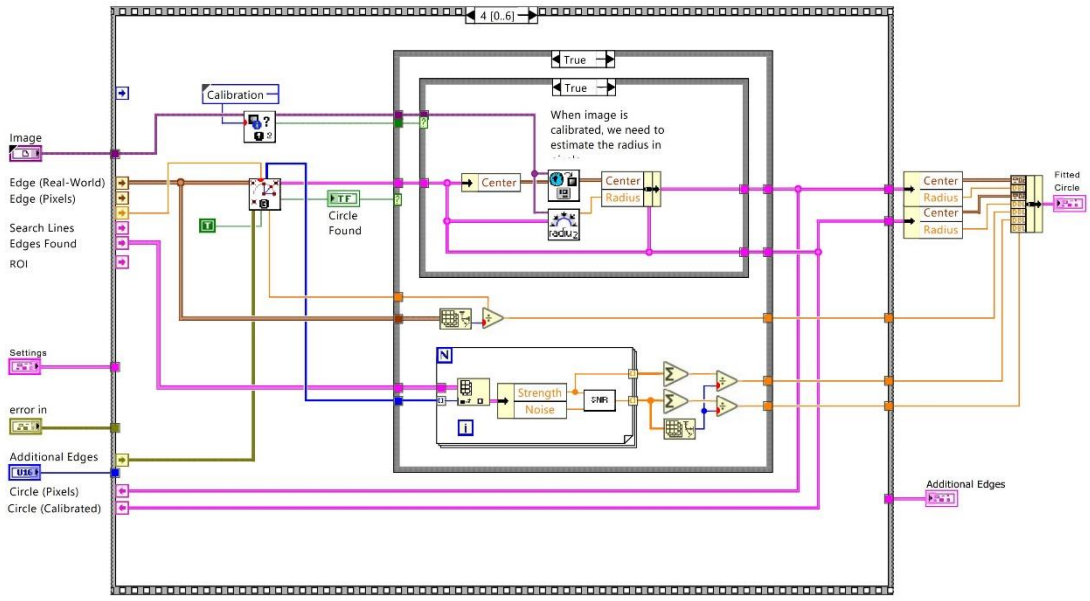


Şekil 5.15: Çap ölçümünde yapılan işlemler

Çap ölçümünde yapılan işlemlerle ilgili elde edilen sonuçlar Şekil 5.16'da gösterilmiştir. Ayrıca, deliklerin tespiti ve çaplarının ölçülmesi için kullanılan NI LabVIEW programından yer alan önemli bir bölümü Şekil 5.17'de gösterilmiştir.



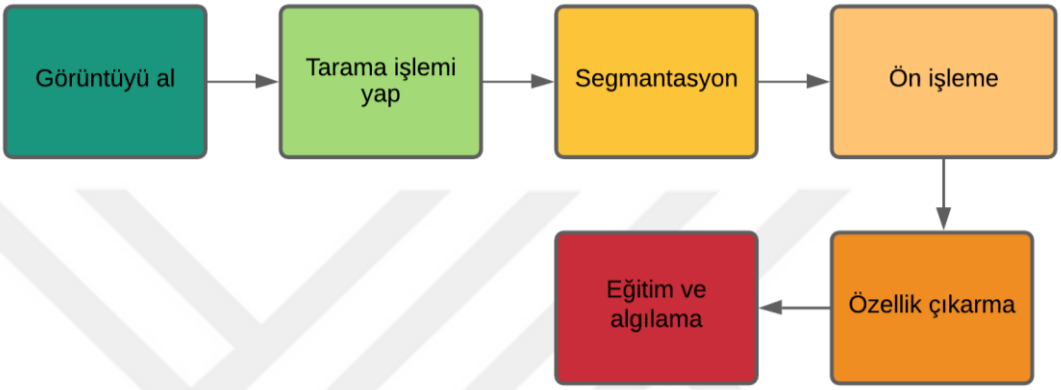
Şekil 5.16: Algılanan görüntü içinde deliklerin tespiti ve çaplarının ölçümü



Şekil 5.17: Deliklerin tespiti ve çaplarının ölçümü için kullanılan NI LabVIEW programında yer alan önemli bir bölümü

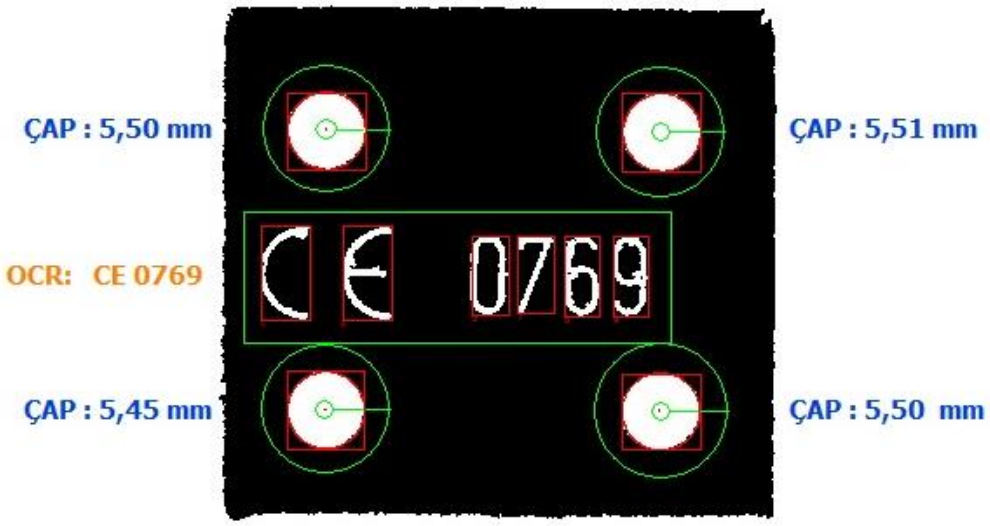
5.3.5 Optik karakter tanıma (OCR-Optical character recognition) işlemi

İşlenmiş metal parçası üzerinde yer alan "CE 0769" ürün numarasının kontrolü yapılmıştır. Bu karakterlerin doğruluğunun tespiti için öncellikle bir eğitim kümesi oluşturulmuştur. Daha sonra bu eğitim kümesi verilerine dayalı olarak karakterlerin okunması gerçekleştirilmiştir. Bu karakterler istenilen ürün numarası ile eşleşmediği durumda kalite kontrol bu aşama için başarısız olmaktadır. OCR'da yapılan işlemler 5.18'de gösterilmiştir.

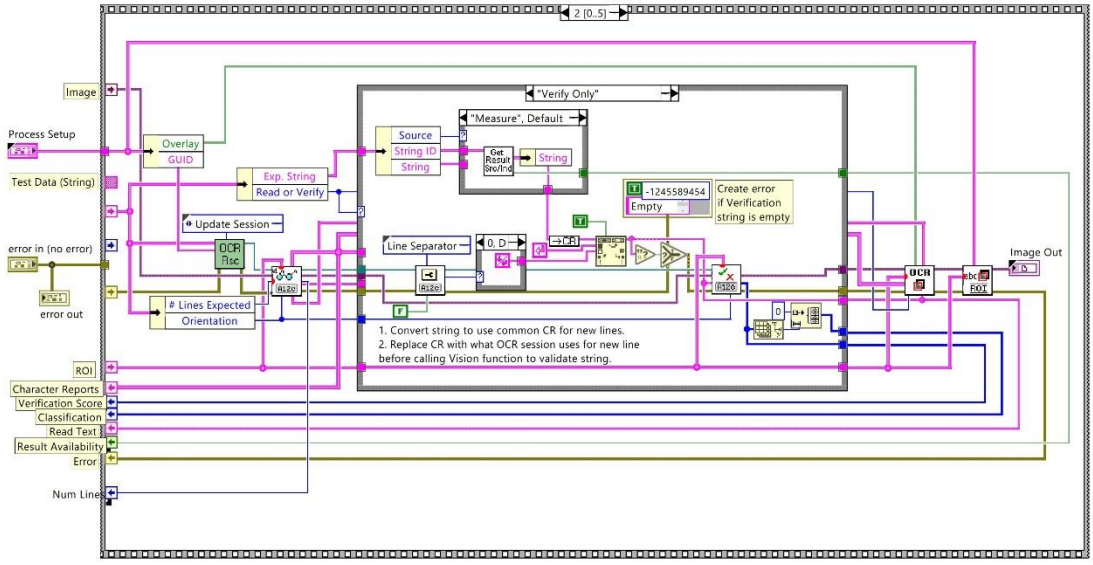


Şekil 5.18: OCR'da yapılan işlemler

Optik karakter okumada yapılan işlemlerle ilgili elde edilen sonuçlar Şekil 5.19'da gösterilmiştir. Ayrıca, OCR işlemi için kullanılan NI LabVIEW programından yer alan önemli bir bölümü Şekil 5.20'de gösterilmiştir.



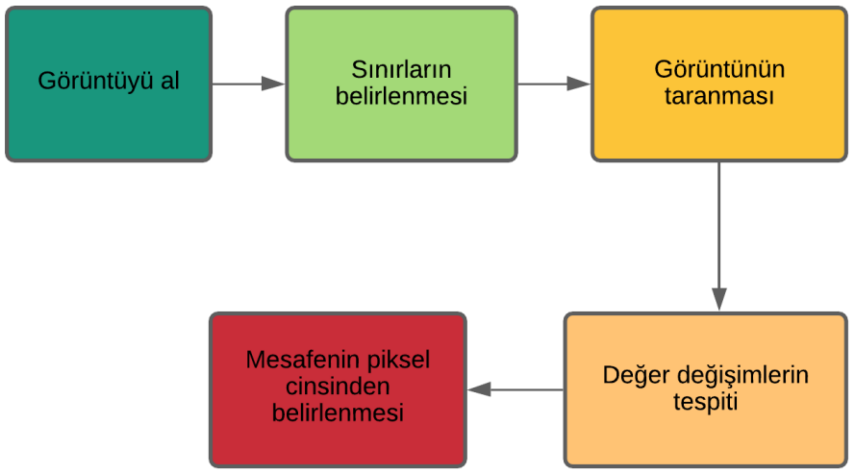
Şekil 5.19: Algılanan görüntü içinde karakterlerin okunması



Şekil 5.20: OCR işlemi için kullanılan NI LabVIEW programında yer alan önemli bir bölümü

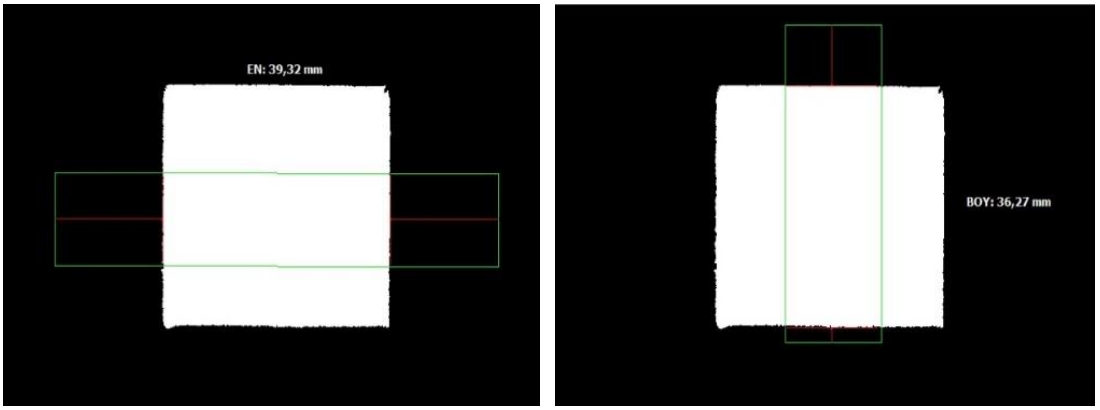
5.3.6 Kenar testipi ve en-boy ölçümü

Hough dönüşümü ve kenar tespit yöntemi kullanılarak işlenmiş metal parçasının kenar tespiti yapılmıştır. Burada kenar tespiti için kalibre edilmiş yatay ve dikey ebat ölçümleri yapılmıştır. Ölçümler en iyi kenar tespiti yapılabilmesi amacıyla kenarları bulunan parçanın iç kısmı doldurularak gürültüye olan hassayiyeti en aza indirilmiştir. Ölçümdeki tolerans değeri malzemenin kamera lensi ile aynı merkezde olması ve aydınlatmanın kusursuz olması gerektiğinden bir miktar perspektif hatası ve distorsiyon gözlemlenmiştir. Bu yüzden gerçek tolerans değeri ±0.01 mm değerinin altındadır. Kenar tespitinde yapılan işlemler 5.21'de gösterilmiştir.



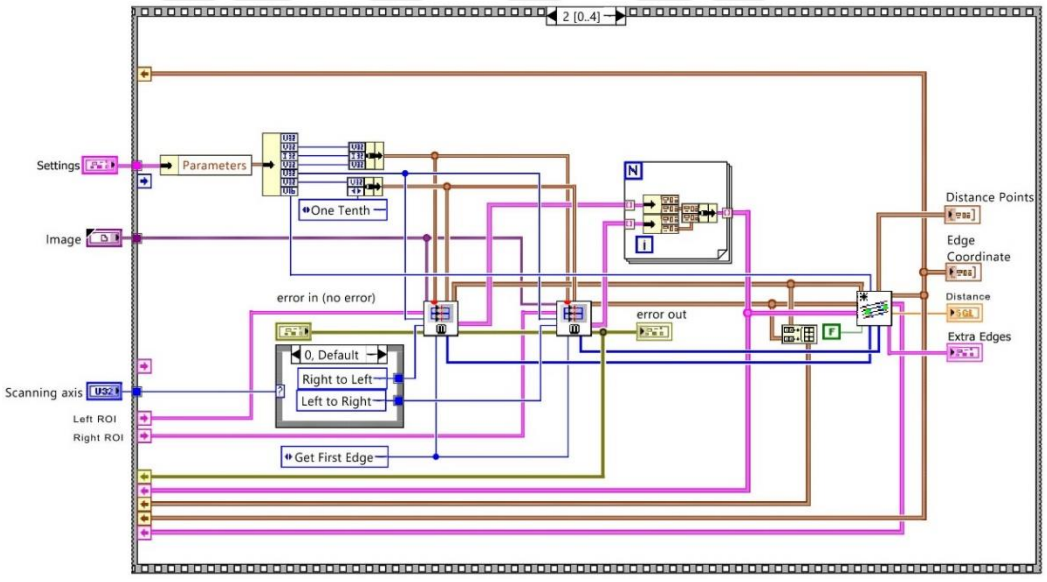
Şekil 5.21: Kenar tespitinde yapılan işlemler

Kenar tespit işlemi ile ilgili elde edilen sonuçlar Şekil 5.22'de gösterilmiştir. Ayrıca, Kenar tespit işlemi işlemi için kullanılan NI LabVIEW programından yer alan önemli bir bölümü Şekil 5.23'te gösterilmiştir.



(a) **(b)**

Şekil 5.22: Algılanan görüntü içinde parçanın eninin ve boyunun ölçülmesi **(a)** eninin ölçülmesi **(b)** boyunun ölçülmesi



Şekil 5.23: Kenar tespiti için kullanılan NI LabVIEW programında yer alan önemli bir bölümü

5.4 Geliştirilen Uygulama Arayüzü

Otomatik hata tespiti için bir arayüz geliştirilmiştir. Bu arayüz programı sayesinde görsel kalite kontrol operasyonunda yapılan analizlerin, kullanılacak kişi tarafından kolaylıkla algılanabilmesi ve raporlanabilmesi sağlanmıştır. Ayrıca, arayüz

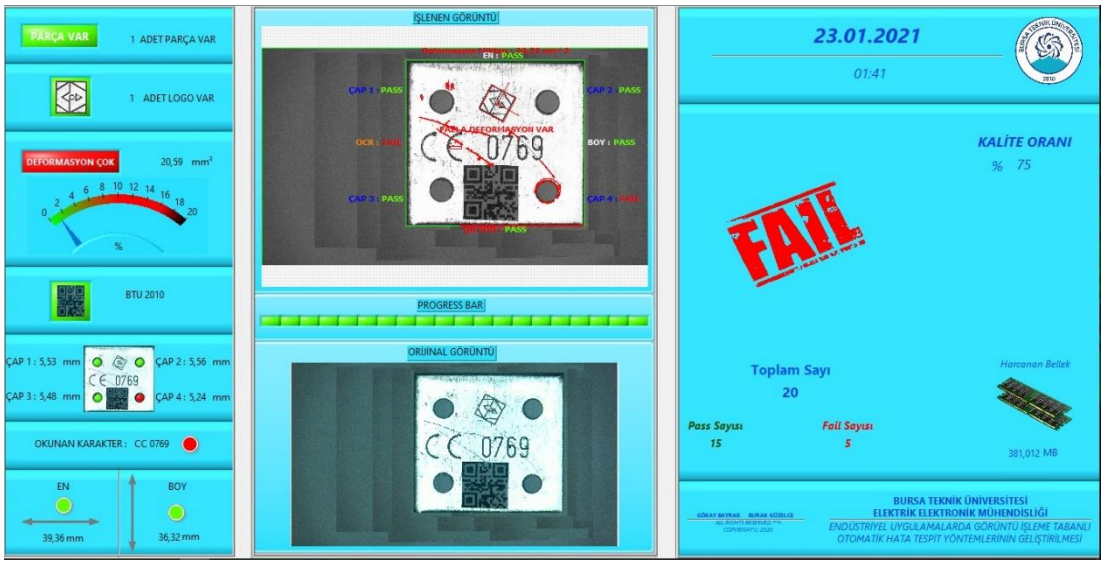
programında, görsel kalite kontrol sürecindeki tüm adımlar ve üretim kalite performansı gerçek zamanlı bir şekilde detaylı olarak gösterilmektedir.

Arayüz programında ele alınan kalite kontrol süreçlerinin hepsinin hatasız olduğu bir parçanın program arayüzü Şekil 5.24'te gösterilmiştir.



Şekil 5.24: Kalite kontrol sürecini geçen bir parçanın program arayüzü

Arayüz programında ele alınan kalite kontrol süreçlerinden bazılarının hatalı olduğu bir parçanın program arayüzü Şekil 5.25'te gösterilmiştir. Bu parçada yer alan logo, QR kod, delik sayıları ve çapları, parçanın en ve boy değerlerinin hatasız olduğu görülmektedir. Fakat parçada yer alan karakterlerin yanlış ve yüzey deformasyonun fazla olmasından dolayı parça kalite kontrol sürecini geçememiştir.



Şekil 5.25: Kalite kontrol sürecini geçemeyen bir parçanın program arayüzü

6. YAPAY SİNİR AĞI (YSA) TABANLI EŞİK DEĞER BELİRLEME YÖNTEMİ

6.1 Parametrelerin Yapay Sinir Ağı ile Belirlenmesi

Yapay sinir ağı (YSA), insan beyninin bilgiyi analiz etmesi ve işlemesini simüle eden bir yapı olarak düşünülebilir. Yapay zekanın (AI-Artificial Intelligence) temeli olan YSA, insani istatistiksel standartlara göre imkansız veya zor olduğu kanıtlanan sorunları çözer. YSA'lar, daha fazla veri elde edildikçe daha iyi sonuçlar üretilmesini sağlayan kendi kendine öğrenme yeteneklerine sahiptir [47].

Bu çalışmada, desen eşleştirme tekniğinde yer alan etkin parametrelerin optimum değerinin belirlenebilmesinde YSA kullanılmıştır. Uygun algoritmanın belirlenmesi için YSA'da genellikle kullanılan algoritmalardan Levenberg–Marquardt (LM), ölçekli eşlenik gradyen (scaled conjugate gradient-SCG) ve Bayesian düzenlemesi (Bayesian regularization-BR) seçilmiştir. Bu algoritmalar karşılaştırılmış ve aynı doğruluk çatısı altında, işleme süresi açısından en optimum değeri sağlayan algoritma tercih edilmiştir.

6.1.1 Levenberg–Marquardt (LM)

LM algoritması, Hessian matrisini hesaplamak zorunda kalmadan ikinci dereceden eğitim hızına yaklaşmak için tasarlanmıştır. Performans fonksiyonu bir kareler toplamı biçimine sahip olduğunda, Hessian matrisi tahmin edilebilir ve gradyen şu şekilde tanımlanabilir [64]:

$$He = J_k^T J_k \tag{6.1}$$

$$g = J_k^T e \tag{6.2}$$

Burada, J_k^T, ağırlıklara ve önyargılara göre ağ hatalarının birinci dereceden türevlerini içeren k'inci girdi için Jacobian matrisidir ve e, ağ hatalarının bir vektörüdür. Jacobian matrisi, Hessian matrisini hesaplamaktan çok daha az karmaşık olan standart bir geri yayılım tekniği ile hesaplanabilir [64].

$$W_{k+1} = W_k - \left[J_k^T J_k + \mu I\right]^{-1} J_k^T e_k \tag{6.3}$$

Burada I birim matris, W_k mevcut ağırlık, W_{k+1} sonraki ağırlık, e_k son toplam hata ve μ kombinasyon katsayısıdır.

6.1.2 Bayesian düzenlemesi (Bayesian regularization-BR)

BR algoritması lineer olmayan bir regresyonu, bir tepe regresyonu aracılığıyla iyi modellenmiş bir istatistiksel probleme dönüştüren bir süreçtir. Bu algoritmada, performans işlevini ($F(w)$) optimize ederek ağı iyileştirmek için kullanılır. Performans fonksiyonu $F(w)$, ağ ağırlıklarının (E_W) hatalarının karelerinin toplamı ve verilerin kareler hatası (E_D) toplamıdır [64]:

$$F(w) = \alpha E_W + \beta E_D \tag{6.4}$$

$$E_W = \sum_{i=1}^{n} w_i^2 \tag{6.5}$$

$$E_D = \sum_{k=1}^{n} e_k^2 \tag{6.6}$$

Hem α hem de β amaç fonksiyon parametreleridir. BR çerçevesinde, ağın ağırlıkları rastgele değişkenler olarak görülür ve ardından ağ ağırlıklarının ve eğitim setinin dağılımı Gauss dağılımı olarak kabul edilir. α ve β faktörleri Bayes teoremi kullanılarak tanımlanır [64]:

$$P(A \mid B) = \frac{P(B \mid A)P(A)}{P(B)} \tag{6.7}$$

$P(A \mid B)$ A olayının koşullu olasılığı, $P(B \mid A)$ B olayının koşullu olasılığı, $P(A)$ A olayının önceki olasılığı ve $P(B)$ B olayının önceki olasılığıdır. En iyi ağırlık değerlerini elde etmek için, performans fonksiyonu $F(w)$'nin en aza indirilmesi gerekir ki bu, aşağıdaki gibi verilen olasılık fonksiyonunu maksimize durumudur [64]:

$$P(\alpha,\beta \mid D, M) = \frac{P(D \mid \alpha,\beta, M)P(\alpha,\beta \mid M)}{P(D \mid M)} \tag{6.8}$$

M belirli sinir ağı mimarisi, D ağırlık dağılımı, $P(D \mid M)$ normalizasyondur. Faktör, $P(D \mid \alpha,\beta, M)$ verilen α, β, M için D'nin olasılık fonksiyonudur. $P(\alpha,\beta \mid M)$, düzenleme parametreleri için değişmeyen önceki yoğunluktur. Bu yöntemin bir sonucu olarak, belirli bir ağırlık alanı için α ve β faktörleri için en iyi değerler bulunur. Ardından, algoritma Hessian matris hesaplamalarının yapıldığı LM aşamasına geçer ve ağırlıkları, amaç fonksiyonunun değerini en aza indirecek şekilde hesaplanır. Daha sonra amaç fonksiyonunun yakınsaması beklentiyi karşılamazsa, algoritma α ve β faktörleri için yeni değerler tahmin eder ve gerekli yakınsama elde edilene kadar tüm prosedür kendini tekrar eder [64].

6.1.3 Ölçekli eşlenik gradyen (Scaled conjugate gradient-SCG)

Eşlenik gradyen algoritması, en dik iniş algoritmasının değiştirilmiş bir versiyonudur. Eşlenik gradyen algoritmalarında, önceki tüm adımlarda elde edilen hata minimizasyonunu korurken, genellikle en dik iniş yönünden daha hızlı yakınsama üreten eşlenik yön olarak adlandırılan bir yönde bir arama gerçekleştirilir. Bu algoritmada genellikle adım boyutu her yinelemede ayarlanır. Algoritma, Denklem 6.9'da [64] olduğu gibi gradyenin negatifiyle verilen ilk yineleme sırasında en dik iniş yönünde başlar:

$$p_0 = -g_0 \tag{6.9}$$

Ağırlıklar aşağıdaki şekilde düzenlenir:

$$x_{k+1} = x_k + \alpha_k g_k \tag{6.10}$$

Burada, α_k belirlenen adım boyutudur ve sonraki adım boyutu şu şekilde hesaplanır:

$$P_k = -g_k + \beta_k P_{k-1} \tag{6.11}$$

Burada P arama yönü vektörü ve g gradyen yön vektörüdür.

SCG algoritmalarında, hata minimizasyonu korunarak performans fonksiyonunun hızla azaldığı yön boyunca bir arama yapılır. Her yinelemede, adım boyutu ayarlanır ve adım boyutunu hesaplamak için gradyen yönü boyunca bir arama yapılır. Genel olarak, adım boyutunu belirlemek için satır arama algoritması kullanılır. Bu satır araması, ölçeklendirilmiş eşlenik gradyen iniş algoritmalarını tüm yinelemelerde gerekli olduğundan zaman alıcı hale getirir [64]. SCG için, β_k faktörü hesaplaması ve yeni aramanın yönü aşağıdaki denklemlerde gösterildiği gibi gösterilebilir [64]:

$$\beta_k = \frac{(|g_{k+1}|^2 - g_{k+1}^T g_k)}{g_k^T g_k} \tag{6.12}$$

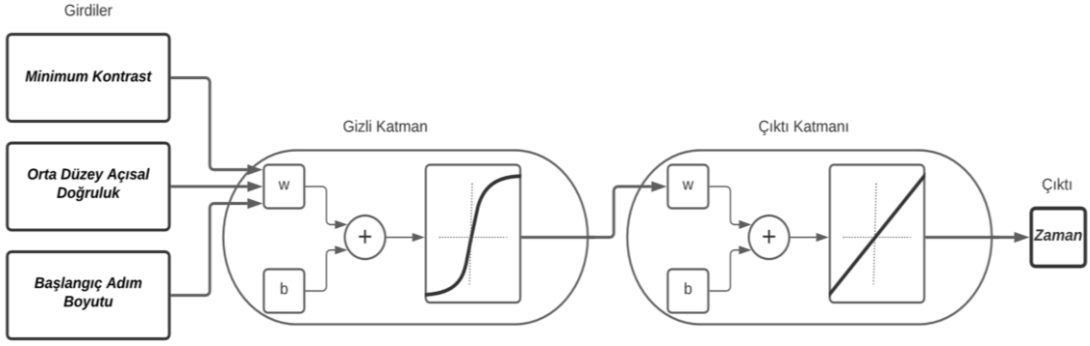
$$P_{k+1} = -g_{k+1} + \beta_k P_k \tag{6.13}$$

Tasarım parametreleri, her yineleme kullanıcısında bağımsız olarak güncellenir. bu, algoritmanın başarısı için çok önemlidir. Bu, satır arama tabanlı algoritmalara kıyasla büyük bir avantajdır [64].

6.2 YSA ile Düşük Tutarsızlık Örneklemenin Optimize Edilmesi

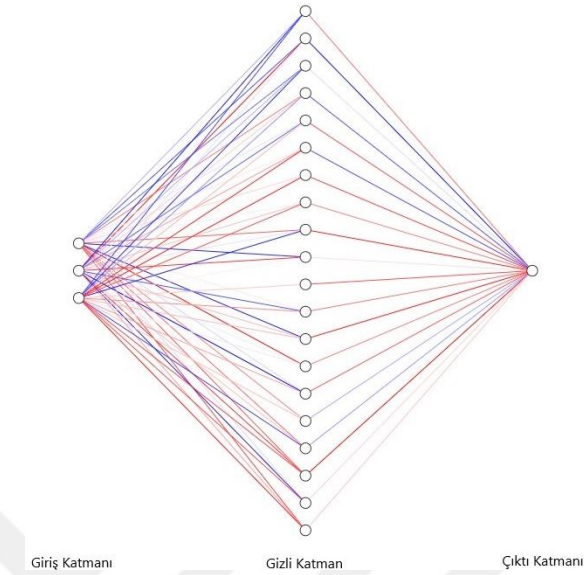
Düşük tutarsızlık örnekleme için "minimum kontrast", "orta düzey açısal doğruluk" ve "başlangıç adım boyutu" parametreleri seçilmiştir. Bu parametrelerin en optimum değerlerinin belirlenmesinde Levenberg–Marquardt (LM), ölçekli eşlenik gradyen (scaled conjugate gradient-SCG) ve Bayesian düzenlemesi (Bayesian regularization-BR) kullanılmıştır.

YSA'ya sokulması için bu üç parametre, düzenli aralıklarla bir kombinasyon şeklinde 500'den fazla elemanlı veri kümesi oluşturulmuştur (Çizelge B.1'de verilmiştir). Bu üç parametre girdisinin yapay sinir ağı blok şeması 6.1'de gösterilmiştir.



Şekil 6.1: Yapay sinir ağı blok şeması

Ayrıca burada kullanılan “minimum kontrast”, “orta düzey açısal doğruluk” ve “başlangıç adım boyutu” parametre girdileri tek katmanlı 20 nöronlu yapay sinir ağı gösterimi Şekil 6.2’de gösterilmiştir. ve



Şekil 6.2: Tek katmanlı 20 nöronlu yapay sinir ağı gösterimi

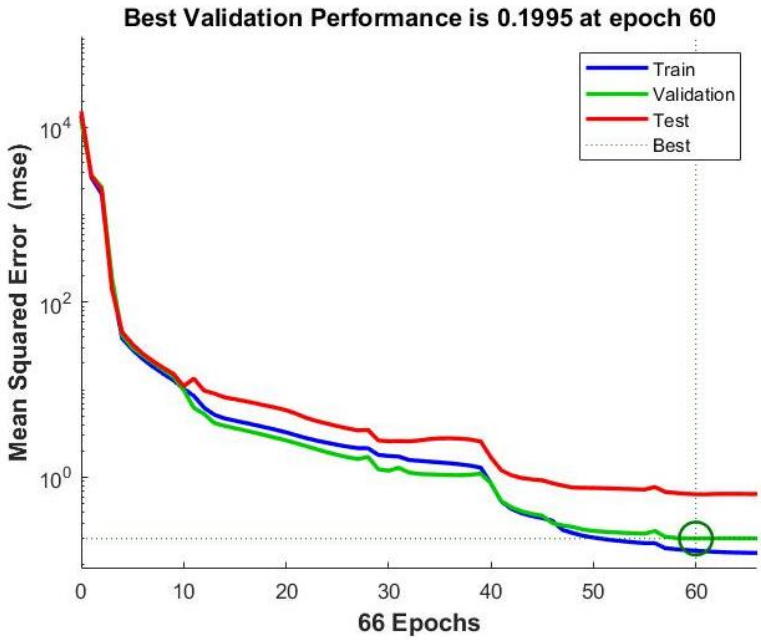
Bu çalışmada “minimum kontrast”, “orta düzey açısal doğruluk” ve “başlangıç adım boyutu” parametrelerin YSA ile optimizasyonu MATLAB benzetim programında yer alan NN (Neural Network) aracı kullanılarak eğitim işlemi yapılmıştır. MATLAB benzetim programında yer alan nntool içerisindeki validation checks değeri 6 olarak seçilmiştir. Aşırı uydurma probleminin önüne geçmek amacıyla üste üste gelecek 6. hatadan sonra 6 iterasyon gerideki değer seçilmiştir.

Levenberg–Marquardt algoritmasında girdi olarak verilen veri seti sonucunda elde edilen Ortalama Karesel Hata (MSE – Mean Square Error) ve R değerleri Çizelge 6.1’de verilmiştir.

Çizelge 6.1: Levenberg–Marquardt algoritması MSE ve R değerleri

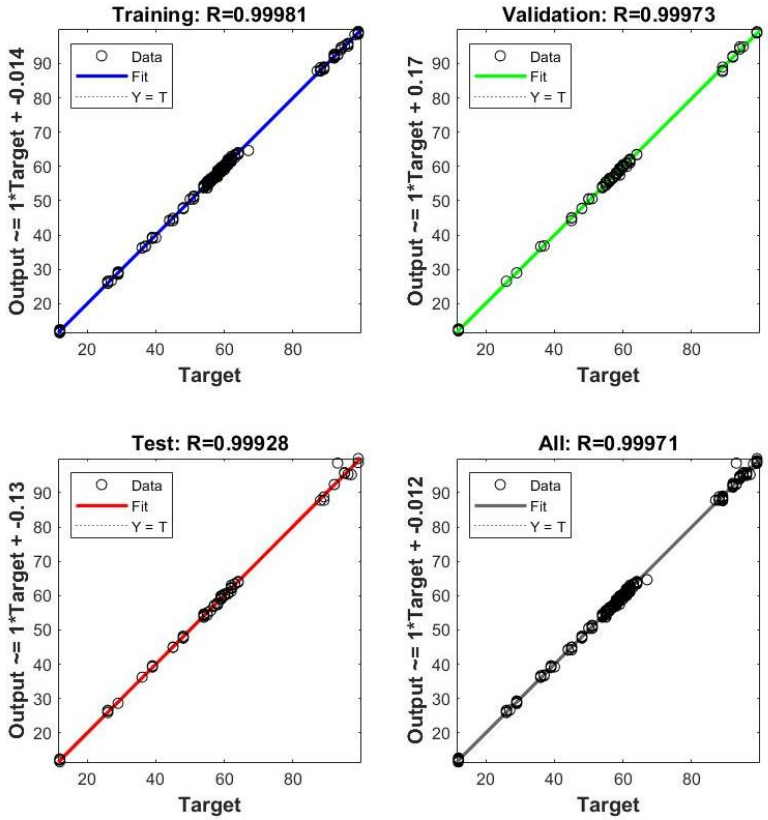
	Örnekler	MSE	R değeri
Eğitim (Training)	358	1.44829e-1	9.99811e-1
Doğrulama (Validation)	77	1.99502e-1	9.99731e-1
Test (Testing)	77	6.39772e-1	9.99275e-1

Levenberg–Marquardt algoritmasında, girdi olarak verilen veri seti sonucunda elde edilen MSE grafiği Şekil 6.3’te gösterilmiştir. Şekil 6.3’te görüldüğü gibi MSE değeri 66 iterasyon yapılmış ve 60. iterasyonda en ideal değere ulaşılmıştır. Bu iterasyonda elde edilen MSE değeri 0.1995 dir.



Şekil 6.3: Levenberg–Marquardt algoritması MSE grafiği

512 adet örneğin %70'i eğitimde kullanılmış ve elde edilen R değeri 0.99981, %15'i doğrulamada kullanılmış ve R değeri 0.99973, %15'i test amaçlı kullanılmış ve R değeri 0.99928 olarak elde edilmiştir. Eğitim, doğrulama, test ve bu üç verinin tamamının R değerleri ayrı grafiklerde Şekil 6.4'te gösterilmiştir.



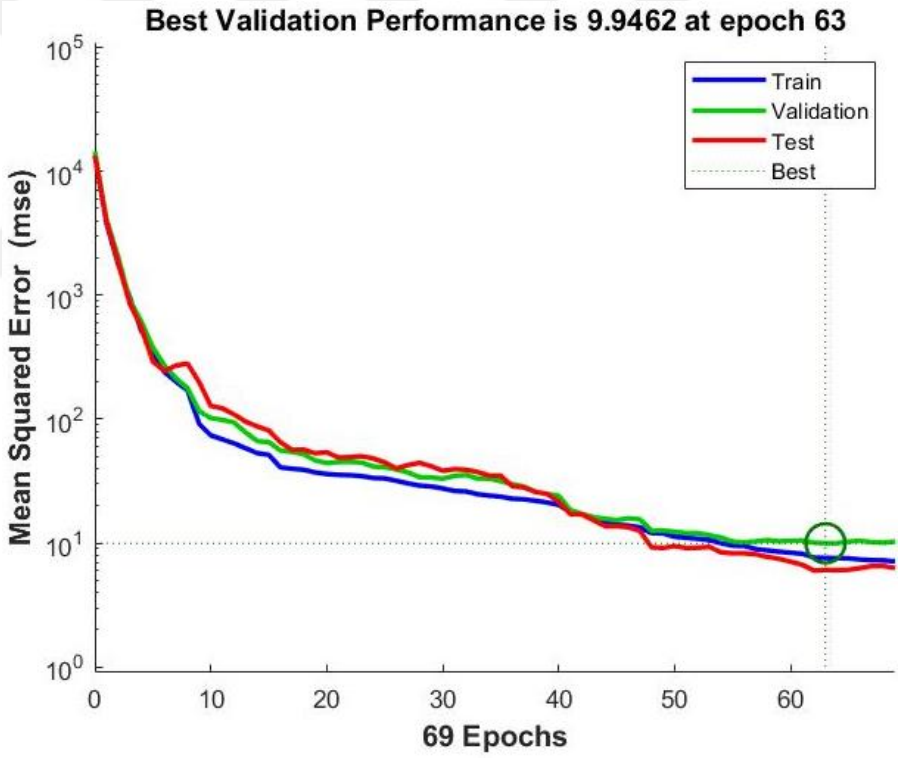
Şekil 6.4: Levenberg–Marquardt algoritması R değeri grafikleri

Ölçekli eşlenik gradyen algoritmasında girdi olarak verilen veri seti sonucunda elde edilen Ortalama Karesel Hata (MSE – Mean Square Error) ve R değerleri Çizelge 6.2'de verilmiştir.

Çizelge 6.2: Ölçekli eşlenik gradyen algoritması MSE ve R değerleri

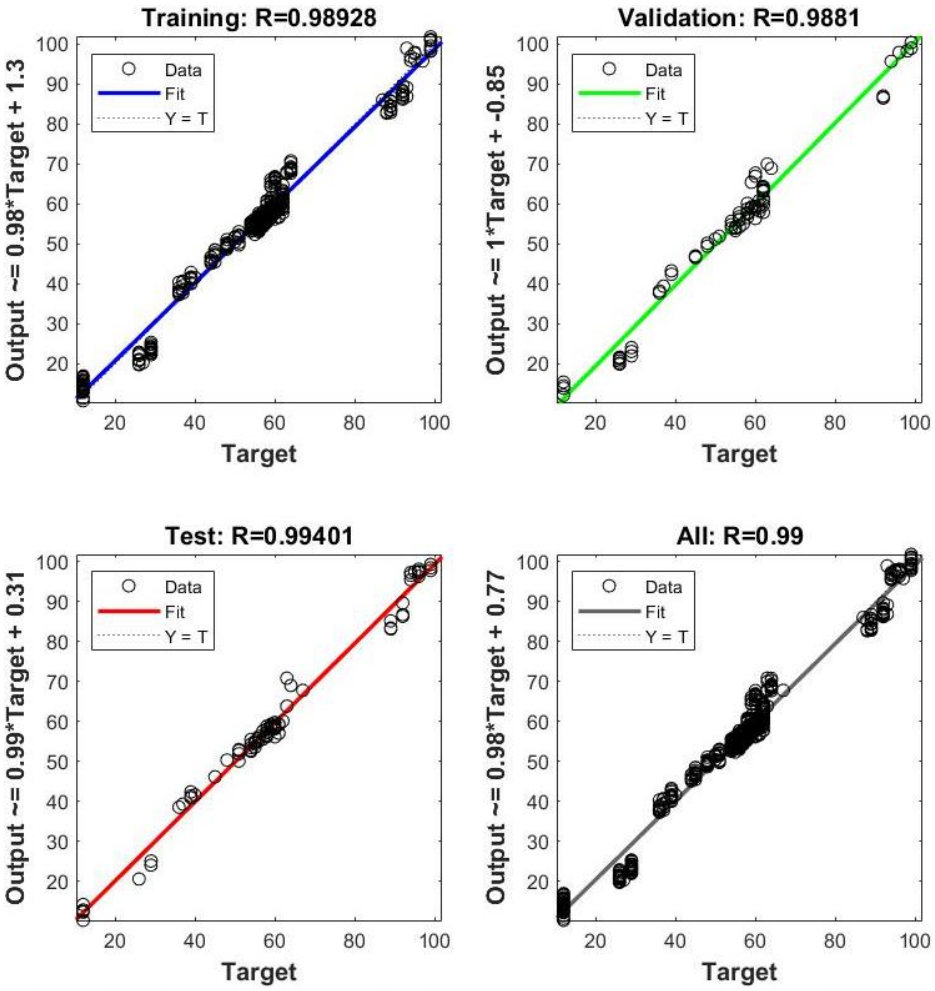
	Örnekler	MSE	R değeri
Eğitim (Training)	358	7.57221e-0	9.89284e-1
Doğrulama (Validation)	77	9.94623e-0	9.88096e-1
Test (Testing)	77	6.05784e-0	9.94011e-1

Ölçekli eşlenik gradyen algoritmasında, girdi olarak verilen veri seti sonucunda elde edilen MSE grafiği Şekil 6.5'te gösterilmiştir. Şekil 6.5'te görüldüğü gibi MSE değeri 69 iterasyon yapılmış ve 63. iterasyonda en ideal değere ulaşılmıştır. Bu iterasyonda elde edilen MSE değeri 9.9462 dir.



Şekil 6.5: Ölçekli eşlenik gradyen algoritması MSE grafiği

512 adet örneğin %70'i eğitimde kullanılmış ve elde edilen R değeri 0.98928, %15'i doğrulamada kullanılmış ve R değeri 0.98810, %15'i test amaçlı kullanılmış ve R değeri 0.99401 olarak elde edilmiştir. Eğitim, doğrulama, test ve bu üç verinin tamamının R değerleri ayrı grafiklerde Şekil 6.6'da gösterilmiştir.



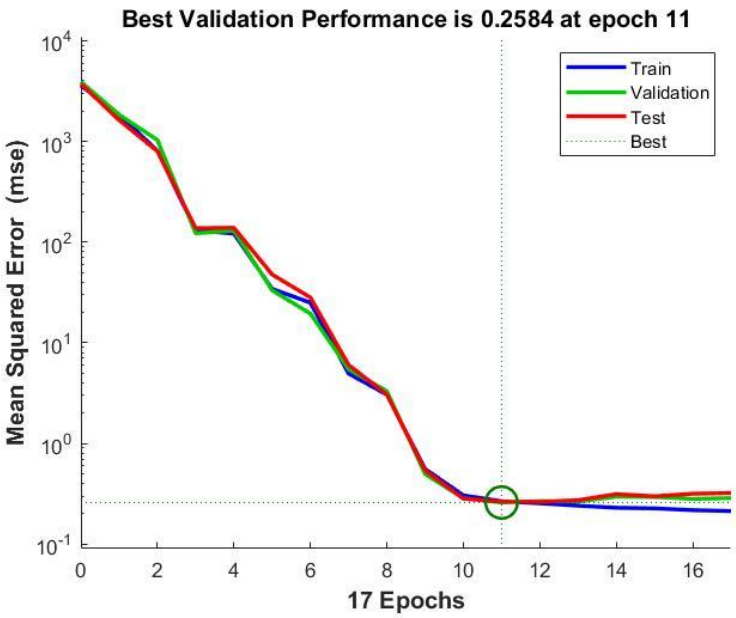
Şekil 6.6: Ölçekli eşlenik gradyen algoritması R değeri grafikleri

Bayesian düzenlemesi algoritmasında girdi olarak verilen veri seti sonucunda elde edilen Ortalama Karesel Hata (MSE – Mean Square Error) ve R değerleri Çizelge 6.3'te verilmiştir.

Çizelge 6.3: Bayesian düzenlemesi algoritması MSE ve R değerleri

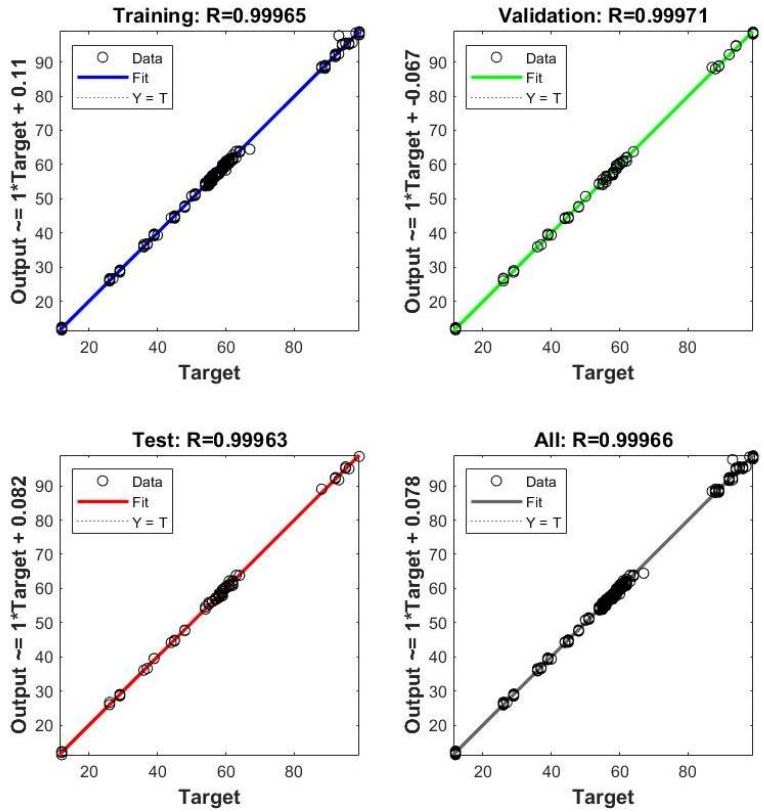
	Örnekler	MSE	R değeri
Eğitim (Training)	358	2,55685e-1	9,99654e-1
Doğrulama (Validation)	77	2,58434e-1	9,99713e-1
Test (Testing)	77	2,61312e-1	9,99631e-1

Bayesian düzenlemesi algoritmasında, girdi olarak verilen veri seti sonucunda elde edilen MSE grafiği Şekil 6.7'de gösterilmiştir. Şekil 6.7'de görüldüğü gibi MSE değeri 1000 iterasyon yapılmış ve 11. iterasyonda en ideal değere ulaşılmıştır. Bu iterasyonda elde edilen MSE değeri 0.2584 dir.



Şekil 6.7: Bayesian düzenlemesi algoritması MSE grafiği

512 adet örneğin %70'i eğitimde kullanılmış ve elde edilen R değeri 0.99965, %15'i doğrulama için kullanılmış ve R değeri 0.99971 %15'i test amaçlı kullanılmış ve R değeri 0.99963 olarak elde edilmiştir. Bu algoritmada doğrulama R değeri grafiği elde edilmemiştir. Eğitim, test ve bu iki verinin tamamının R değerleri ayrı grafiklerde Şekil 6.8'de gösterilmiştir.



Şekil 6.8: Bayesian düzenlemesi algoritması R değeri grafikleri

Çalışmada Levenberg–Marquardt, ölçekli eşlenik gradyen ve Bayesian düzenlemesi algoritmalarında girdi olarak verilen veri seti sonucunda elde edilen performans değerleri Çizelge 6.4'te gösterilmiştir.

Çizelge 6.4: Levenberg–Marquardt, ölçekli eşlenik gradyen ve Bayesian düzenlemesi algoritmaları performans değerleri

	MSE test değeri	R değeri	İterasyon sayısı
Levenberg–Marquardt	0.6397	0.99971	60
Ölçekli eşlenik gradyen	6.0578	0.99000	63
Bayesian düzenlemesi	0.2613	0.99963	11

Burada, MSE test değeri, R değeri ve iterasyon sayısı açısından Levenberg–Marquardt algoritmasının eşlenik gradyen algoritmasına göre daha iyi performans sağladığı görülmüştür. Fakat, bu değerler açısından Bayesian düzenlemesi algoritması Levenberg–Marquardt algoritmasına göre daha iyi olduğu elde edilen sonuçlarda görülmüştür. Bu veriler doğrultusunda, bu çalışma için en uygun algoritmanın Bayesian düzenlemesi olduğuna karar verilmiştir.

Bu yapılan çalışmadaki bulgular uygulamaya özel koşullar olan; aydınlatma miktarı, cismin şekli ve algılama mesafesi gibi özel koşullar için geçerlidir. Benzer bir uygulamada dahi bu değerleri sağlamak adına yeniden eğitim işlemi yapılmalı ve ona en uygun YSA algoritması seçilmelidir.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, endüstriyel uygulamalar için görsel hata tespit sistemi NI LabVIEW programı aracığıyla işlenmiş bir metal parçası kullanılarak geliştirilmiştir. Geliştirilen hata tespit sistemi, görüntünün daha doğru şekilde algılanmasını sağlama ve kalite kontrol sürecinin daha doğru yapılması olmak üzere iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Görüntünün algılanması süreci için belirlenen uygun ortam ve kullanılan donanım verileri test sonuçları bölümünde detaylı olarak belirtilmiştir.

Kalite kontrol sürecinde; logo tanımlama, yüzey deformasyonu, QR kod okuma, deliklerin tespiti ve çaplarının ölçümü, OCR işlemi, parça eni ve boyunun ölçülmesi işlemleri yapılmıştır. Burada önerilen yöntem ile kalite kontrolü yapılacak tüm işlemler sırasıyla denetlenmiş ve el elde edilen veriler oluşturulan arayüz ile ekranda gösterilmesi sağlanmıştır.

Bu önerilen sistem için öncellikle, logo tanımlama için kullanılan desen eşleştirme tekniklerinin aynı doğrulukta karşılaştırılıp, zaman açısından iyi sonuç veren algoritmanın seçimini temel almaktadır. Test sonuçlarında, düşük tutarsızlık örneklemenin piramit eşleştirmeye göre daha iyi performans sağladığı görülmüştür. Bu yüzden logo tanımlama için düşük tutarsızlık örnekleme kullanılmıştır. Hata tespit sisteminin referans noktası logo tanımlama olduğundan tüm süreçler için önem arz etmektedir. Kullanılan düşük tutarsızlık örneklemenin etkin parametrelerinin zaman açısından en ideal değerlerinin bulunması gerçekleştirilmiştir. Varsayılan olarak NI tarafından sunulan otomatik belirlenen parametreler ile yapılan logo tanımlama işlemi aynı doğruluk çatısı altında 90 ms dolaylarında zaman alıyorken, bu parametrelerin geliştirilen akıllı yöntem sayesinde 12 ms dolaylarına gelmesi sağlanmıştır. Bu yöntem ile seri üretim bandında çalışacak bir görsel kalite kontrol işlemi için en az 7 kat hızlanması sağlanmıştır.

Zaman açısından optimum değerin bulunması işlemi MATLAB benzetim programının YSA araç kutuları kullanılarak yapılmıştır. Araç kutusu içerisinde birden fazla algoritma olduğundan öncellikle bu algoritmalardan en ideal olanları seçilmiştir. Bu

algoritmalar, YSA'da genellikle kullanılan Levenberg–Marquardt (LM), ölçekli eşlenik gradyen (scaled conjugate gradient-SCG) ve Bayesian düzenlemesi (Bayesian regularization-BR) algoritmalarıdır. Düşük tutarsızlık örnekleme için; "minimum kontrast", "orta düzey açısal doğruluk" ve "başlangıç adım boyutu" parametreleri yapılan uzun süreçli deneme testlerinde seçilmiş aynı zamanda bu parametrelerden düzenli aralıklarla bir kombinasyon şeklinde 500'den fazla elemanlı veri kümesi oluşturulmuştur. Bu algoritmalar Ortalama Karesel Hata (MSE – Mean Square Error), R değerleri ve iterasyon değerleri açısından karşılaştırılmıştır. En iyi sonuçları Bayesian düzenlemesi algoritması sağlamıştır. Bu yüzden, bu algoritma tercih edilmiştir. Bu yöntem sayesinde; deney yapmaya gerek kalmaksızın, YSA modeli ile parametrelere denk gelen zamanın tahmin edilmesine olanak sağlar. Bu sayede, parametre araması yaparken, tek tek işlemleri gerçekleştirip geçen zamanı ölçmeye gerek kalmayacaktır.

Yüzey deformasyonu işleminde; çizik hatasının tespiti, tespit edilen kaç adet çizik hatası olduğu, en büyük çiziğin alanı ve alana göre yüzdesi hesabı histogram eşleştirme normalizasyonu kullanılarak başarıyla gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda 21x21 lik bir model 2 tip QR koda gömülen "BTU 2010" verisinin ve işlenmiş metal parçası üzerinde "CE 0769" ürün numarasının okunması ve kontrol işlemi gerçekleştirilmiştir. Kullanılan Hough dönüşümü ile kenar tespitinin yapılması, geometrik eşleştirme algoritması ile deliklerin tespitinin yapılması sağlanmıştır. Ayrıca, kenar tabanlı algoritma kullanılarak deliklerin çap ölçümleri de yapılmıştır. Bu ölçümlerde, bir miktar perspektif hatası ve distorsiyon gözlemlenmiştir. Bunun sebebi, tolerans değeri malzemenin kamera lensi ile aynı merkezde olması ve aydınlatmanın kusursuz olmamasındandır. Bu yüzden tolerans değeri ±0.08mm olarak alınsa da, gerçek tolerans değeri ±0.01 mm değerinin altındadır.

Geliştirilen hata tespit sisteminde, öznitelik çıkarımı, maskeleme ve morfolojik filtreleme işlemleri yapılmıştır. Bu işlemler, kalite kontrol sürecinin daha hızlı tamamlanması amacıyla uygulanmıştır. Öznitelik çıkarma işlemi, yüzey deformasyon tespitinden sonra OCR ve ölçüm işlemlerinde yapılarak veri boyutu küçültülmüştür. HSL formdaki görüntü ikili hale getirilerek gereksiz detaylardan arındırılmıştır. Maskelemede amaç parçada analiz edilecek alanın dışında kalan alanların silinmesidir. Morfolojik filtrelemede ise oluşan gürültüleri elemine etmek amaçlıdır.

Tüm yapılan işlemlemle ilgili sonuçlar test programı arayüzünde başarıyla gösterilmiştir. Ayrıca, hata tespit sistemi için oluşturulan arayüz programında hataların hangi süreçte meydana geldiği, hatanın ne olduğu gibi bilgiler verilmiştir. Program arayüzü sayesinde analiz verileri için kolaylıkla rapor oluşturabilme olanağı sunulmuştur.

Tüm bu elde edilen verilere bakıldığında geliştirilen hata tespit sistemin birçok kalite kontrol işlemini tek seferde yapabildiği görülmektedir. Ayrıca, önerdiğimiz bu sistemin etkin ve hızlı bir şekilde kalite kontrolünün gerçekleştirebildiği gösterilmiştir. Bu sistem işlenmiş bir metal parçası üzerinde yapılmış olsa da farklı uygulamalar için donanım ve yazılımda bazı değişiklikler yapılarak kolaylıkla uygulanabilir. Bunun yanı sıra, oluşturulan arayüz sayesinde sadece tespit işlemi yapılmayıp, yapılan tespitlerin ekranda gösterilmesi sağlanarak raporlanabilir bir sistem oluşturulmuştur.

NI Labview programının geliştirmelere açık olduğu görülmektedir. İçerisinde çok fazla akıllı yöntem barındıran program, MATLAB benzetim programının YSA araç kutuları entegrasyonu ile çok daha verimli çalıştığı görülmüştür.

Endüstriyel otomasyonun kalbi olan kamera sistemleri için, hazır kamera modüllerine ve lisanslara ödenen ciddi ödemelerin yerine, birçok farklı görsel kalite kontrol sürecinin tek sefere mahsus bir yatırımla bir kamera modülü ve bilgisayar ile yapılabileceği gösterilmiştir.

İlerde yapılacak çalışmalarda, görsel kalite kontrol süreci için incelediğimiz desen eşleştirme, yüzey deformasyonu tespiti, mesafe ölçümü, OCR ve QR kod okuma işlemleri için çalışmalar yapılabilir. Stereo kamera, lazer kamera veya lidar sensörleri ile bir nesnedeki üç boyutlu deformasyon çıkarma işlemleri akıllı yöntem entegrasyonu ile daha da geliştirilebilir. QR kod kısmında ise, daha fazla veri depolanmasını sağlayacak versiyonlara ve renkli QR kod modelleri üzerinde incelemeler yapılabilir. Derin öğrenme yöntemleri kullanılarak gölgelenme, distorsiyon ve perspektif hatalarının sebep olduğu çap ve uzunluk ölçümü işlemlerindeki hatalar en aza indirgenebilir. Bu yapılan çalışma sayesinde, National Instruments görüntü işleme araç kutularının akıllı yöntemler ile kullanıldığında daha fazla son kullanıcıya hitap eden, daha hızlı ve kararlı çalışan kullanıcı dostu bir platform elde edebildiği gösterilmiştir.

KAYNAKLAR

[1] **Ioannoua, D., Hudab, W. ve Laine, A.F.** (1999). Circle recognition through a 2D Hough Transform and radius histogramming, *Image and Vision Computing, 17,* 15-26.

[2] **Laligant, O., Nicolier, F. ve Truchetet, F.** (2001). Subpixel edge detection for dimensional control by artificial vision, *Journal of Electronic Imaging, 10* (1), 234-239.

[3] **Gu, W., Li, Q. ve Wang, M.** (2002). Computer vision based system for apple surface defect detection, *Computers and Electronics in Agriculture, 36,* 215-223.

[4] **Chang, T. S., Jia, H., Murphey, Y. L. ve Shi, J.** (2004). An intelligent real-time vision system for surface defect detection, *Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition*, Cambridge, UK : August.

[5] **Chang, Y. H., Chen, M. S. ve Chu, C. H.** (2007). A General scheme for extracting QR code from a non-uniform background in camera phones and applications, *Ninth IEEE International Symposium on Multimedia,* Taichung, Taiwan : December.

[6] **Stache, N. C. ve Zimmer, H.** (2007). Robust Circle Fitting in Industrial Vision for Process Control of Laser Welding, *International Student Conference on Electrical Engineering POSTER,* Prague : May.

[7] **Gamage, P. ve Xie, S. Q.** (2008). A real-time vision system for defect inspection in cast extrusion manufacturing process, *Int J Adv Manuf Technol, 40,* 144–156.

[8] **Cai, W., Deng, S., Liang, B. ve Xu, Q.** (2010). Defect detection of bearing surfaces based on machine vision technique, *International Conference on Computer Application and System Modeling,* Taiyuan, China : October 548-554.

[9] **Hughes, K., Surgenor, B. ve Szkilnyk G.** (2011). Vision based fault detection of automated assembly equipment, *International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications,* Washington, DC, USA : June 691-697.

[10] **Hareesh, K. S. ve Narendra, V. G.** (2011). Study and comparison of various image edge detection techniques used in quality inspection and evaluation of agricultural and food products by computer vision, *Int J Agric & Biol Eng, 4* (2), 83-90.

[11] **Deguchi, D., Ide, I., Kato, Y., Murase, H. ve Takahashi, T.** (2011). Low resolution QR-code recognition by applying super-resolution using the

property of QR-codes, *International Conference on Document Analysis and Recognition,* Beijing, China : September 992-996.

[12] **Do, Y., Kim, Y. ve Lee, S.** (2011). Vision-based surface defect inspection of metal balls, *Measurement Science and Technology, 22*, 1-4.

[13] **Gu, Y. ve Zhang, W.** (2011). QR code recognition based on image processing, *International Conference on Information Science and Technology,* Nanjing, China : March 733-736.

[14] **Anezaki, T., Eimon, K., Tansuriyavong, S. ve Yagi, Y.** (2011). Development of a human-tracking robot using QR code recognition, *17th Korea-Japan Joint Workshop on Frontiers of Computer Vision (FCV)*, Ulsan, South Korea : February.

[15] **Charles, P. K., Deepthi, C. H., Harish, V. ve Swathi, M.** (2012). A review on the various techniques used for optical character recognition, *International Journal of Engineering Research and Applications, 2* (1), 659-662.

[16] **Chang, H., Gu, D., Li, S. ve Shen, H.** (2012). Bearing defect inspection based on machine vision, *Measurement, 45*, 719-723

[17] **García, A. S., García, J. G., Martínez, S. S. ve Ortega, J. G**. (2012). A machine vision system for defect characterization on transparent parts with non-plane surfaces, *Machine Vision and Applications, 23,* 1-13.

[18] **Chen. X., Gao, Y. ve Lu, L.** (2012). A new concentric circle detection method based on Hough transform, *7th International Conference on Computer Science & Education (ICCSE), Melbourne,* VIC, Australia : July 753-758.

[19] **Chen, Y. H., Li, S. A., Lin, Y. C., Lo, C. H., Hsieh, M. H., Weng, C. W., Wong, C. C. ve Yang, M. H.** (2012). Circle object recognition based on monocular vision for home security robot, *International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communications Systems,* Taipei, Taiwan : November 258-261.

[20] **Scherer, S. A., Yang, S. ve Zell, A.** (2013). An Onboard Monocular Vision System for Autonomous Takeoff, Hovering and Landing of a Micro Aerial Vehicle, *Journal of Intelligent & Robotic Systems t., 69,* 499–515.

[21] **Arivazhagan, S., Kannan, R. R., Shebiah, R. N., Sudharsan, H. ve Ramesh, R.** (2013). External and Internal Defect Detection of Egg using Machine Vision, *Journal of Emerging Trends in Computing and Information Sciences, 4* (3), 257-262.

[22] **Chu C. C., Jiang, B. C., Lin, C. Y. ve Wang, C. C.** (2013). Machine Vision-Based Defect Detection in IC Images Using the Partial Information Correlation Coefficient, *Transactions on Semiconductor Manufacturing, 26* (3), 378-384.

[23] **Çelik, H. İ., Dülger, L. C. ve Topalbekiroğlu, M.** (2014). Development of a machine vision system: real-time fabric defect detection and classification with neural networks, *The Journal of The Textile Institute, 105 (6),* 575–585.

[24] **Chen, L., Feng, H., Jiang, Z., Shi, J., Xie, F. ve Yang, P.** (2014). Automatic Fastener Classification and Defect Detection in Vision-Based Railway Inspection Systems, *Transactions on Instrumentation and Measurement, 63* (4), 877 – 888.

[25] **Chauhan, V. ve Surgenor, B.** (2015). A Comparative Study of Machine Vision Based Methods for Fault Detection in an Automated Assembly Machine, *Procedia Manufacturing, 1,* 416–428.

[26] **Akinci, B., Georgieva, K., Fieguth, P., Kasireddy, V. ve Koch, C.** (2015). A review on computer vision based defect detection and condition assessment of concrete and asphalt civil infrastructure, *Advanced Engineering Informatics.*

[27] **Lee, B. R. ve Nguyen, H. C.** (2015). Development of laser-vision system for three-dimensional circle detection and radius measurement, *Optik, 126* (24), 5412-5419.

[28] **Chu, H. H. ve Wang, Z. Y.** (2016). A vision-based system for post-welding quality measurement and defect detection, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 86,* 3007–3014.

[29] **He, Y., Liu, L., ve Zhou, F.** (2016). Vision-based fault inspection of small mechanical components for train safety, *Intelligent Transport Systems, 10* (2), 130-139.

[30] **Destruel, C., Gaudin, J. M., Guichard, C., Puech, W., Strauss, O. ve Tkachenko, I.** (2016). Two-Level QR Code for Private Message Sharing and Document Authentication, *Transactions on Information Forensics and Security, 11* (3), 571-583

[31] **Moughyt, S., Schaefer, G., Tribak, H. ve Zaz, Y.** (2016). Remote QR code recognition based on HOG and SVM classifiers, *International Conference on Informatics and Computing (ICIC)*, Mataram, Indonesia : October

[32] **Destruel, C., Gaudin, J. M., Guichard, C., Puech, W., Strauss, O. ve Tkachenko, I**. (2016). Centrality bias measure for high density QR code module recognition, *Signal Processing: Image Communication, 41*, 46-60.

[33] **Guo, Y., Liu, M., Ren, Y., Yang, S., Yin, S. ve Zhu, J.** (2016). An improved method for location of concentric circles in vision measurement, *Measurement, 100,* 243-251.

[34] **Rao, X., Rong, D. ve Ying, Y.** (2017). Computer vision detection of surface defect on oranges by means of a sliding comparison window local segmentation algorithm, *Computers and Electronics in Agriculture, 137,* 59-68.

[35] **Lee, S. J., Kim, D., Kim, K., Kim, S. W., Park, C. H. ve Yun, J. P.** (2017). Vision-based surface defect inspection for thick steel plates, *Optical Engineering, 56* (5), 1-12.

[36] **Tribak, H. ve Zaz, Y.** (2017). QR Code Recognition based on Principal Components Analysis Method, (IJACSA) *International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 8* (4), 241-248.

[37] **Chen, L., Fan, J., Luo, H., Peng, J. ve Zhang, X.** (2017). Fast QR code detection, *International Conference on the Frontiers and Advances in Data Science (FADS),* Xi'an, China : October 151-154.

[38] **Gao, Huang, D., G., Li, C., Liu, Z. ve Yu, M.** (2018). Fabric Defect Detection Based on Biological Vision Modeling, *IEEE Access, 6,* 27659 – 27670.

[39] **Li, B.** (2018). Research on geometric dimension measurement system of shaft parts based on machine vision, *EURASIP Journal on Image and Video Processing, 2.*

[40] **Li, B.** (2018). Application of machine vision technology in geometric dimension measurement of small parts, *EURASIP Journal on Image and Video Processing, 2.*

[41] **Chen, R., Huang, B., Liu, C., Yu, J., Yu, X. ve Zhou, Q.** (2019). An Automatic Surface Defect Inspection System for Automobiles Using Machine Vision Methods, *Sensors, 19,* 1-18.

[42] **Fua, P., Gao, R. X. ve Wanga, J.** (2019). Machine vision intelligence for product defect inspection based on deep learning and Hough transform, *Journal of Manufacturing Systems, 51,* 52-60.

[43] **Fatikow, S., Lia, C., Huanga, Y., Tanga, C. ve Zhanga, X.** (2020). A novel algorithm for defect extraction and classification of mobile phone screen based on machine vision, *Computers & Industrial Engineering, 146.*

[44] **Fu1, Z. ve Wang, Z.** (2020). Research on Vision-based Intelligent Detection Method of Circle Features, *International Seminar on Artificial Intelligence, Networking and Information Technology,* Shanghai, China : September 1-5.

[45] **Lin, J., Li, W. ve Xia, J.** (2020). Circle detection and location based on binocular stereo vision, *International Conference on Mechatronics and Computer Technology Engineering,* ChangSha, China : September.

[46] **Patil, V. ve Ingle, D. R.** (2020). An association between fingerprint patterns with blood group and lifestyle based diseases: a review. *Springer Artificial Intelligence Review.*

[47] **Khan, R. A., Memon, J., Sami, M. ve Uddin. M.** (2020). Handwritten optical character recognition (OCR): A comprehensive systematic literature review (SLR), *IEEE Access, 8,* 142642 – 142668.

[48] **Liu, T., He, S., Wang, H., Wang, L. ve Yu, J.** (2020). Research and Implementation of Vehicle Target Detection and Information Recognition Technology Based on NI myRIO, *Sensors, 20* (6), 1-15.

[49] **National Instruments Corporation.** (2005). *NI Vision Concepts Manual.* USA.

[50] **Url-1** < https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/>, erişim tarihi 18.12.2020.

[51] **Bashashaik, K., Ganesan, P., Jenitha, J. M. M., Kalist, V. ve Sathish, B.S.** (2015). Possiblistic-Fuzzy C-Means Clustering Approach for the Segmentation of Satellite Images in HSL Color Space, *Procedia Computer Science, 57,* 49-56.

[52] **Url-2** <https://www.cis.rit.edu/class/simg361/Notes_11222010.pdf>, erişim tarihi 14.12.2020.

[53] **Gonzalez, R. C. ve Woods R. E.** (2007). *Digital Image Processing*. United States of America.

[54] **Url-3** <https://en.wikipedia.org/wiki/Pyramid_(image_processing >, erişim tarihi 20.11.2020.

[55] **National Instruments Corporation.** (2014). *NI Vision Builder for Automated Inspection Development Toolkit Tutorial*. USA.

[56] **B. Plötzeneder**,. (2010). *Praxiseinstieg LabVIEW*. Germany.

[57] **Url-4** < http://paulbourke.net/miscellaneous/equalisation/>, erişim tarihi 25.12.2020.

[58] **Božek, P., Karrach, L. ve Pivarčiová, E.** (2020). Identification of QR Code Perspective Distortion Based on Edge Directions and Edge Projections Analysis, *J. Imaging, 6* (7), 1-19.

[59] **Bhondekar, A. P. ve Sidhu, B. S. ve Rudnicky, A. I.** (2015). *Generation and Recognition of Covert Quick Response (QR),* Giani Zail Singh Punjab Technical University Campus.

[60] **Blasinski, H., Bulan, O. ve Sharma, G.** (2013). Per-Colorant-Channel Color Barcodes for Mobile Applications: An Interference Cancellation Framework, *Transactions on Image Processing, 22* (4), 1498-1511.

[61] **Brennan, R. A., and Polifroni, J. H. ve Rudnicky, A. I.** (2012). Research and realization of encoding on QR code, *5th International Congress on Image and Signal Processing,* Chongqing, China : October.

[62] **Lin, J.A. ve Fuh, C. S.** (2013). 2D Barcode Image Decoding, *Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering.*

[63] **Badelia, P., Chaudhuri, A., Ghosh, S. K. ve Mandaviya, K.** (2017). *Optical Character Recognition Systems for Different Languages with Soft Computing*. Switzerland.

[64] **Parmar, R., Shah, M. ve Shah, M. G.** (2017). A Comparative study on Different ANN Techniques in Wind Speed Forecasting for Generation of Electricity, *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE), 12* (1), 19-26.

EKLER

EK A: Sensör Datasheet Bilgisi

EK B: 512 Elemanlı Veri Kümesi

EK A

SONY

[Product Brief]

Ver.1.0

IMX214

Diagonal 5.867mm (Type 1/3.06) 13Mega-Pixel CMOS Image Sensor with Square Pixel for Color Cameras

Description

IMX214 is a diagonal 5.867mm(Type 1/3.06) 13 Mega-pixel CMOS active pixel type stacked image sensor with a square pixel array. It adopts Exmor RS™ technology to achieve high speed image capturing by column parallel A/D converter circuits and high sensitivity and low noise image (comparing with conventional CMOS image sensor) through the backside illuminated imaging pixel structure. R, G, and B pigment primary color mosaic filter is employed.

By introducing spatially multiplexed exposure technology, high dynamic range still pictures and movies are achievable. It equips an electronic shutter with variable integration time. It operates with three power supply voltages: analog 2.7 V, digital 1.0V and 1.8 V for input/output interface and achieves low power consumption. IMX214 is designed for use in cellular phones or tablet devices*.

.

Functions and Features

- ◆Back illuminated and stacked CMOS image sensor Exmor RS™
- ◆Single Frame High Dynamic Range (HDR) with equivalent full pixels.
- ◆High signal to noise ratio (SNR).
- ◆Full resolution @30fps (Nonmal / HDR).4K2K @30fps (Normal / HDR)1080p @60fps (Normal / HDR)
- ◆Output video format of RAW10/8, COMP8/6
- ◆Pixel binning readout and H/V sub sampling function
- ◆Advanced Noise Reduction (Chroma noise reduction and luminance noise reduction)
- ◆Independent flipping and mirroring.
- ◆CSI 2 serial data output (MIPI 2lane/4lane, Max. 1.2Gbps/lane, DPHY spec. ver. 1.1 compliant)
- ◆2wire serial communication
- ◆Two PLLs for independent clock generation for pixel control and data output interface.
- ◆Advanced Noise Reduction.
- ◆Dynamic Defect Pixel Correction.
- ◆Zero shutter lag.
- ◆Power on reset function
- ◆Dual sensor synchronization operation.
- ◆8K bit of OTP ROM for users.
- ◆Built in temperature sensor

NOTE)

1. When using this product for another application, Sony does not guarantee the quality and reliability of product. Therefore, don't use this for applications other than cellular phone and Tablet PCs. Consult your Sony sales representative if you have any questions.

1

Şekil A.1: Sensör datasheet sayfa 1

Device Structure

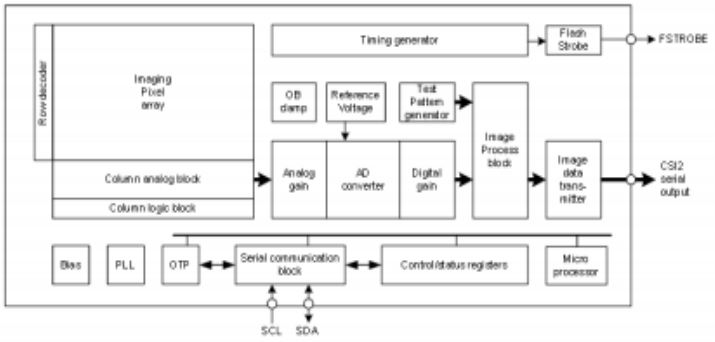
- ◆CMOS image sensor
- ◆Image size : Diagonal 5.867mm (Type 1/3.06)
- ◆Total number of pixels: 4224 (H) ×3200(V) approx. 13.51M pixels
- ◆Number of effective pixels : 4224 (H) ×3136 (V)approx. 13.25 M pixels
- ◆Number of active pixels : 4208 (H) ×3120 (V) approx. 13.13 M pixels
- ◆Chip size : 6.100mm (H) × 4.524mm (V)
- ◆Unit cell size : 1.12 µm (H) × 1.12 µm (V)
- ◆Substrate material : Silicon

Functional Description

System Outline

IMX214 is a CMOS active pixel type image sensor which adopts the Exmor RS ™ technology to achieve high sensitivity, low noise and high speed image capturing. It is embedded with backside illuminated imaging pixel, low noise analog amplifier, column parallel A/D converters which enables high speed capturing, digital amplifier, image binning circuit, timing control circuit for imaging size and frame rate, CSI2 image data high speed serial interface, PLL oscillator, and serial communication interface to control these functions.
Several additional image processing functions and peripheral circuits are also included for easy system optimization by the users.
A one time programmable memory is embedded in the chip for storing the user data. It has 8 K-bit for users, 10 K-bit as a whole.

Block Diagram



Exmor RS™

* Exmor RS is a trademark of Sony Corporation. The Exmor RS is a Sony's CMOS image sensor with high-resolution, high-performance and compact size by replacing a supporting substrate in Exmor R which changed fundamental structure of Exmor pixel adopted column parallel A/D converter to back-illuminated type, with layered chips formed signal processing circuits.

Sony reserves the right to change products and specifications without prior notice.

This information does not convey any license by any implication or otherwise under any patents or other right. Application circuits shown, if any, are typical examples illustrating the operation of the devices. Sony cannot assume responsibility for any problems arising out of the use of these circuits.

Şekil A.2: Sensör datasheet sayfa 2

EK B

Çizelge B.1: Düzenli aralıklı kombinasyonel 512 elemanlı veri kümesi

Değişkenler			Sonuç
minimum kontrast	orta düzey açısal doğruluk	başlangıç adım boyutu	Zaman (ms)
5	5	0	99
20	5	0	92
45	5	0	67
60	5	0	62
75	5	0	61
90	5	0	61
105	5	0	60
120	5	0	60
140	5	0	59
155	5	0	59
170	5	0	58
185	5	0	54
200	5	0	48
215	5	0	39
240	5	0	29
255	5	0	12
5	25	0	99
20	25	0	92
45	25	0	64
60	25	0	62
75	25	0	62
90	25	0	61
105	25	0	61
120	25	0	60
140	25	0	60
155	25	0	59
170	25	0	58
185	25	0	54
200	25	0	48
215	25	0	39
240	25	0	29
255	25	0	12
5	45	0	93
20	45	0	92
45	45	0	64
60	45	0	62
75	45	0	62
90	45	0	61
105	45	0	61
120	45	0	60
140	45	0	59
155	45	0	59
170	45	0	59
185	45	0	54
200	45	0	48
215	45	0	39
240	45	0	29
255	45	0	12

Çizelge B.1 (devam): Düzenli aralıklı kombinasyonel 512 elemanlı veri kümesi

Değişkenler			Sonuç
minimum kontrast	orta düzey açısal doğruluk	başlangıç adım boyutu	Zaman (ms)
5	65	0	99
20	65	0	93
45	65	0	64
60	65	0	63
75	65	0	62
90	65	0	62
105	65	0	61
120	65	0	60
140	65	0	60
155	65	0	59
170	65	0	58
185	65	0	54
200	65	0	48
215	65	0	39
240	65	0	29
255	65	0	12
5	75	0	99
20	75	0	92
45	75	0	64
60	75	0	62
75	75	0	62
90	75	0	61
105	75	0	61
120	75	0	60
140	75	0	59
155	75	0	59
170	75	0	58
185	75	0	54
200	75	0	48
215	75	0	39
240	75	0	29
255	75	0	12
5	95	0	99
20	95	0	92
45	95	0	63
60	95	0	62
75	95	0	61
90	95	0	61
105	95	0	60
120	95	0	60
140	95	0	60
155	95	0	59
170	95	0	58
185	95	0	55
200	95	0	48
215	95	0	39
240	95	0	29
255	95	0	12

Çizelge B.1 (devam): Düzenli aralıklı kombinasyonel 512 elemanlı veri kümesi

Değişkenler			Sonuç
minimum kontrast	orta düzey açısal doğruluk	başlangıç adım boyutu	Zaman (ms)
5	115	0	99
20	115	0	92
45	115	0	63
60	115	0	62
75	115	0	61
90	115	0	61
105	115	0	61
120	115	0	60
140	115	0	59
155	115	0	59
170	115	0	58
185	115	0	55
200	115	0	48
215	115	0	39
240	115	0	29
255	115	0	12
5	135	0	99
20	135	0	93
45	135	0	64
60	135	0	62
75	135	0	62
90	135	0	62
105	135	0	60
120	135	0	60
140	135	0	60
155	135	0	59
170	135	0	58
185	135	0	55
200	135	0	48
215	135	0	39
240	135	0	29
255	135	0	12
5	5	2	99
20	5	2	92
45	5	2	64
60	5	2	62
75	5	2	62
90	5	2	61
105	5	2	60
120	5	2	60
140	5	2	60
155	5	2	59
170	5	2	58
185	5	2	54
200	5	2	48
215	5	2	39
240	5	2	29
255	5	2	12

Çizelge B.1 (devam): Düzenli aralıklı kombinasyonel 512 elemanlı veri kümesi

Değişkenler			Sonuç
minimum kontrast	orta düzey açısal doğruluk	başlangıç adım boyutu	Zaman (ms)
5	25	2	99
20	25	2	92
45	25	2	63
60	25	2	62
75	25	2	62
90	25	2	61
105	25	2	61
120	25	2	60
140	25	2	60
155	25	2	59
170	25	2	58
185	25	2	54
200	25	2	48
215	25	2	39
240	25	2	29
255	25	2	12
5	45	2	98
20	45	2	92
45	45	2	64
60	45	2	62
75	45	2	62
90	45	2	61
105	45	2	61
120	45	2	60
140	45	2	59
155	45	2	59
170	45	2	58
185	45	2	54
200	45	2	48
215	45	2	39
240	45	2	29
255	45	2	12
5	65	2	99
20	65	2	92
45	65	2	63
60	65	2	62
75	65	2	62
90	65	2	61
105	65	2	61
120	65	2	60
140	65	2	59
155	65	2	59
170	65	2	58
185	65	2	54
200	65	2	48
215	65	2	40
240	65	2	29
255	65	2	12

Çizelge B.1 (devam): Düzenli aralıklı kombinasyonel 512 elemanlı veri kümesi

Değişkenler			Sonuç
minimum kontrast	orta düzey açısal doğruluk	başlangıç adım boyutu	Zaman (ms)
5	75	2	99
20	75	2	92
45	75	2	63
60	75	2	62
75	75	2	61
90	75	2	61
105	75	2	60
120	75	2	60
140	75	2	59
155	75	2	59
170	75	2	58
185	75	2	54
200	75	2	48
215	75	2	40
240	75	2	29
255	75	2	12
5	95	2	99
20	95	2	92
45	95	2	64
60	95	2	62
75	95	2	62
90	95	2	61
105	95	2	60
120	95	2	60
140	95	2	59
155	95	2	59
170	95	2	58
185	95	2	54
200	95	2	48
215	95	2	39
240	95	2	29
255	95	2	12
5	115	2	99
20	115	2	92
45	115	2	64
60	115	2	62
75	115	2	62
90	115	2	61
105	115	2	60
120	115	2	60
140	115	2	60
155	115	2	59
170	115	2	58
185	115	2	54
200	115	2	48
215	115	2	39
240	115	2	29
255	115	2	12

Çizelge B.1 (devam): Düzenli aralıklı kombinasyonel 512 elemanlı veri kümesi

Değişkenler			Sonuç
minimum kontrast	orta düzey açısal doğruluk	başlangıç adım boyutu	Zaman (ms)
5	135	2	99
20	135	2	92
45	135	2	64
60	135	2	62
75	135	2	61
90	135	2	61
105	135	2	60
120	135	2	60
140	135	2	60
155	135	2	59
170	135	2	58
185	135	2	54
200	135	2	48
215	135	2	39
240	135	2	29
255	135	2	12
5	5	4	96
20	5	4	89
45	5	4	60
60	5	4	59
75	5	4	58
90	5	4	58
105	5	4	57
120	5	4	56
140	5	4	56
155	5	4	56
170	5	4	54
185	5	4	51
200	5	4	45
215	5	4	37
240	5	4	26
255	5	4	12
5	25	4	94
20	25	4	89
45	25	4	60
60	25	4	58
75	25	4	58
90	25	4	58
105	25	4	57
120	25	4	56
140	25	4	56
155	25	4	56
170	25	4	55
185	25	4	51
200	25	4	45
215	25	4	37
240	25	4	26
255	25	4	12

Çizelge B.1 (devam): Düzenli aralıklı kombinasyonel 512 elemanlı veri kümesi

Değişkenler			Sonuç
minimum kontrast	orta düzey açısal doğruluk	başlangıç adım boyutu	Zaman (ms)
5	45	4	95
20	45	4	89
45	45	4	60
60	45	4	59
75	45	4	59
90	45	4	58
105	45	4	57
120	45	4	57
140	45	4	56
155	45	4	55
170	45	4	54
185	45	4	51
200	45	4	45
215	45	4	37
240	45	4	26
255	45	4	12
5	65	4	95
20	65	4	89
45	65	4	60
60	65	4	59
75	65	4	58
90	65	4	58
105	65	4	57
120	65	4	56
140	65	4	56
155	65	4	56
170	65	4	54
185	65	4	51
200	65	4	45
215	65	4	37
240	65	4	26
255	65	4	12
5	75	4	96
20	75	4	89
45	75	4	60
60	75	4	59
75	75	4	58
90	75	4	58
105	75	4	57
120	75	4	56
140	75	4	56
155	75	4	56
170	75	4	54
185	75	4	51
200	75	4	45
215	75	4	36
240	75	4	26
255	75	4	12

Çizelge B.1 (devam): Düzenli aralıklı kombinasyonel 512 elemanlı veri kümesi

Değişkenler			Sonuç
minimum kontrast	orta düzey açısal doğruluk	başlangıç adım boyutu	Zaman (ms)
5	95	4	96
20	95	4	89
45	95	4	60
60	95	4	59
75	95	4	58
90	95	4	57
105	95	4	57
120	95	4	56
140	95	4	56
155	95	4	56
170	95	4	55
185	95	4	51
200	95	4	45
215	95	4	37
240	95	4	26
255	95	4	12
5	115	4	97
20	115	4	88
45	115	4	60
60	115	4	59
75	115	4	58
90	115	4	58
105	115	4	57
120	115	4	56
140	115	4	56
155	115	4	56
170	115	4	55
185	115	4	51
200	115	4	45
215	115	4	37
240	115	4	26
255	115	4	12
5	135	4	95
20	135	4	89
45	135	4	60
60	135	4	59
75	135	4	58
90	135	4	58
105	135	4	57
120	135	4	56
140	135	4	56
155	135	4	55
170	135	4	54
185	135	4	51
200	135	4	45
215	135	4	37
240	135	4	27
255	135	4	12

Çizelge B.1 (devam): Düzenli aralıklı kombinasyonel 512 elemanlı veri kümesi

Değişkenler			Sonuç
minimum kontrast	orta düzey açısal doğruluk	başlangıç adım boyutu	Zaman (ms)
5	5	6	96
20	5	6	87
45	5	6	60
60	5	6	58
75	5	6	58
90	5	6	57
105	5	6	56
120	5	6	56
140	5	6	55
155	5	6	55
170	5	6	54
185	5	6	50
200	5	6	45
215	5	6	36
240	5	6	26
255	5	6	12
5	25	6	95
20	25	6	88
45	25	6	60
60	25	6	60
75	25	6	58
90	25	6	57
105	25	6	56
120	25	6	56
140	25	6	55
155	25	6	55
170	25	6	54
185	25	6	51
200	25	6	44
215	25	6	36
240	25	6	26
255	25	6	12
5	45	6	96
20	45	6	89
45	45	6	60
60	45	6	59
75	45	6	58
90	45	6	57
105	45	6	56
120	45	6	56
140	45	6	55
155	45	6	55
170	45	6	55
185	45	6	51
200	45	6	44
215	45	6	36
240	45	6	26
255	45	6	12

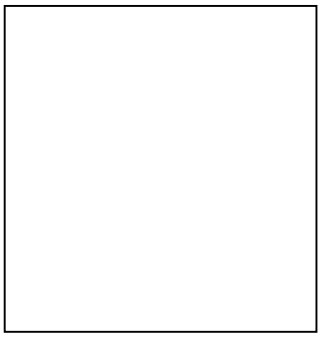
Çizelge B.1 (devam): Düzenli aralıklı kombinasyonel 512 elemanlı veri kümesi

Değişkenler			Sonuç
minimum kontrast	orta düzey açısal doğruluk	başlangıç adım boyutu	Zaman (ms)
5	65	6	94
20	65	6	89
45	65	6	59
60	65	6	58
75	65	6	58
90	65	6	57
105	65	6	56
120	65	6	56
140	65	6	56
155	65	6	55
170	65	6	54
185	65	6	51
200	65	6	45
215	65	6	36
240	65	6	26
255	65	6	12
5	75	6	94
20	75	6	89
45	75	6	59
60	75	6	58
75	75	6	58
90	75	6	57
105	75	6	56
120	75	6	56
140	75	6	56
155	75	6	55
170	75	6	54
185	75	6	50
200	75	6	44
215	75	6	36
240	75	6	26
255	75	6	12
5	95	6	94
20	95	6	88
45	95	6	59
60	95	6	58
75	95	6	58
90	95	6	57
105	95	6	56
120	95	6	56
140	95	6	55
155	95	6	55
170	95	6	55
185	95	6	50
200	95	6	44
215	95	6	36
240	95	6	26
255	95	6	12

Çizelge B.1 (devam): Düzenli aralıklı kombinasyonel 512 elemanlı veri kümesi

Değişkenler			Sonuç
minimum kontrast	orta düzey açısal doğruluk	başlangıç adım boyutu	Zaman (ms)
5	115	6	94
20	115	6	88
45	115	6	59
60	115	6	58
75	115	6	58
90	115	6	57
105	115	6	56
120	115	6	56
140	115	6	55
155	115	6	55
170	115	6	54
185	115	6	50
200	115	6	44
215	115	6	36
240	115	6	26
255	115	6	12
5	135	6	94
20	135	6	89
45	135	6	59
60	135	6	58
75	135	6	58
90	135	6	57
105	135	6	56
120	135	6	56
140	135	6	55
155	135	6	55
170	135	6	54
185	135	6	50
200	135	6	45
215	135	6	36
240	135	6	26
255	135	6	12

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad **: Burak GÜZELCE**

Doğum Tarihi ve Yeri **: -**

E-posta **: -**

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** **:** 2015, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** **:** 2021, Bursa Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik- Elektronik Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- ELSAN Elektrik Sanayi (2020-Halen)
- PEKS Automation (2017-2019)
- İleri Teknik Makine Sanayi (2015-2016)

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER, SUNUMLAR VE PATENTLER::

- **Güzelce, B. ve Bayrak, G.** (2021). Developing a Real-Time Pattern Matching Algorithm Using Artificial Neural Network for a Reliable Quality Control in Industrial Applications, *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 11*.