



**GÖRME TABANLI KALİTE KONTROL İÇİN YÜKSEK PERFORMANSLI ENDÜSTRİYEL
KAMERA VE AKILLI TANIMA SİSTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

Mehmet BAYĞIN

**Doktora Tezi
Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Mehmet KARAKÖSE
NİSAN-2018**

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GÖRME TABANLI KALİTE KONTROL İÇİN YÜKSEK PERFORMANSLI ENDÜSTRİYEL
KAMERA VE AKILLI TANIMA SİSTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

DOKTORA TEZİ

Mehmet BAYĞIN

(131129206)

Anabilim Dalı: Bilgisayar Mühendisliği

Programı: Yazılım

Danışman: Doç. Dr. Mehmet KARAKÖSE

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 06.03.2018

NİSAN-2018

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GÖRME TABANLI KALİTE KONTROL İÇİN YÜKSEK PERFORMANSLI ENDÜSTRİYEL
KAMERA VE AKILLI TANIMA SİSTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ

DOKTORA TEZİ

Mehmet BAYĞIN

(131129206)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 06.03.2018
Tezin Savunulduğu Tarih: 02.04.2018

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mehmet KARAKÖSE (F.Ü)

Diğer Jüri Üyeleri: Prof. Dr. Erhan AKIN (F.Ü)

Doç. Dr. Hakan ÇEVİKALP (O.G.Ü)

Doç. Dr. Muhammed Fatih TALU (İ.Ü)

Doç. Dr. Ayşegül UÇAR (F.Ü)

NİSAN-2018

ÖNSÖZ

Gerçekleştirilen bu tez çalışmasında kalite kontrol sistemleri için yüksek performanslı endüstriyel kamera tasarımı ve akıllı tanıma sistemlerinin geliştirilmesi hedeflenmiştir. Gerçekleştirilen tez çalışması ile endüstriyel üretim tesislerinde sıklıkla kullanılan bir sayısal kamera prototipi özgün olarak geliştirilmiştir. Ayrıca tez çalışması kapsamında çeşitli makine görmesi yaklaşımları geliştirilerek endüstriyel üretim sahalarında ürün sayma, boyut ölçümü ve kusur tespiti gibi önemli parametrelerin tespit edilebilmesi sağlanmıştır. Tez çalışması süresince geliştirilen sayısal kamera prototipi ve akıllı kontrol algoritmaları bir bütün haline getirilerek sistemin senkronize bir şekilde çalışabilmesi sağlanmıştır. Ortaya koyulan bu sistem ile endüstriyel üretim tesisleri için kullanımı kolay, modüler ve uygun maliyetli bir çözüm sunulmuştur.

Bu tez çalışması süresince desteğini eksik etmeyen, değerli bilgileri ile sürekli olarak yol gösteren ve bana zaman harcayarak gelişimime katkı sağlayan başta sayın danışman hocam Doç. Dr. Mehmet KARAKÖSE'ye tez izleme jürimde yer alan sayın Prof. Dr. Erhan AKIN'a ve sayın Doç. Dr. Ayşegül UÇAR'a saygı ve teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca tez çalışmam süresince desteğini eksik etmeyen değerli arkadaşlarım Orhan YAMAN, Hasan YETİŞ ve Ferhat YOL'a teşekkür ederim.

Doktora tez çalışmam boyunca bana destek olan, maddi ve manevi sıkıntılara katlanan sevgili eşim Nursena BAYĞIN ve oğlum Yusuf Ali BAYĞIN'a çok teşekkür ederim.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması ve çalışma kapsamında gerçekleştirilen yöntemler, 0743.STZ.2014 nolu SAN-TEZ projesi kapsamında desteklenmiştir. Tezdeki bu çalışmaların gerçekleştirilmesi konusundaki maddi desteklerinden dolayı Türkiye Cumhuriyeti Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı ile MEDEL Elektronik Elektrik Mak. Dem. Araç. Ürt. ve Paz. San. ve Tic. Ltd. Şti. firmasına teşekkür ederim.

Mehmet BAYĞIN
ELAZIĞ - 2018

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER	III
ÖZET	VI
SUMMARY	VII
ŞEKİLLER LİSTESİ	VIII
TABLolar LİSTESİ	XIV
SİMGELER LİSTESİ	XV
KISALTMALAR LİSTESİ	XVII
1. GİRİŞ	1
1.1. Endüstriyel Kalite Kontrol Sistemlerindeki Eksiklikler	20
1.2. Tezin Amacı ve Kapsamı.....	23
1.3. Tezin Yapısı	26
2. MAKİNE GÖRMESİ	27
2.1. Makine Görmesi İşlevleri	28
2.2. Temel Görüntü İşleme Teknikleri	30
2.2.1. Renk Uzayları	30
2.2.2. Eşikleme Yöntemleri	31
2.2.3. Kenar Çıkarım Yöntemleri	32
2.2.4. Histogram Kavramı	32
2.2.5. Morfolojik İşlemler	33
2.3. Makine Görmesi Tabanlı Kalite Kontrol Yaklaşımları	34
3. GELİŞTİRİLEN ENDÜSTRİYEL KAMERA SİSTEMİ.....	41
3.1. Giriş Bilgileri	43

3.2.	Temel Görüntü Sensörü Özellikleri	44
3.3.	Seçilen Görüntü Sensörü ve Özellikleri	47
3.4.	Sayısal Kamera Geliştirme Adımları	50
3.4.1.	Sayısal Kamera Prototipi-1	50
3.4.2.	Sayısal Kamera Prototipi-2	57
3.4.2.1.	Cmos Görüntü Sensörü Tabanlı Kamera Modülü Tasarımı	57
3.4.2.2.	Kamera Modülü için Lens Yuvası Tasarımı	61
3.4.2.3.	Kamera Modülü için Lens Seçimi ve Kullanılan Lensler	62
3.4.2.4.	Kamera Modülü için STM32F746 ile Gerçekleştirilen Yazılım	64
3.4.3.	Sayısal Kamera Prototipi-3	70
3.4.3.1.	VGA Portu ile Görüntü Aktarımı	70
3.4.3.2.	Ethernet Portu ile Görüntü Aktarımı	72
3.4.3.3.	Sistem Mimarisi	72
3.4.3.4.	Ethernet ile Haberleşme Protokolü	74
3.4.3.5.	OSI Modeli Katmanları	76
3.4.3.6.	UDP Veri Transfer Protokolü	77
3.4.3.7.	Sistem Tümlleştirme	83
3.5.	GigE Vision	97
3.6.	Ana Kontrol Birimi Tasarımı	98
3.7.	Test Sonuçları	109
3.7.1.	Harddisk Okuma/Yazma Testi	109
3.7.2.	GPU Kart Hız Testi	111
3.7.3.	FPGA Tabanlı Sayısal Kamera için Performans Analizi	115
4.	ÖNERİLEN AKILLI KALİTE KONTROL ALGORİTMALARI	118
4.1.	Nesne Sayma Algoritması	121

4.1.1.	Nesne Sayma Yaklaşımı-1.....	121
4.1.2.	Nesne Sayma Yaklaşımı-2.....	128
4.1.3.	Nesne Sayma Yaklaşımı-3.....	135
4.2.	Boyut Ölçme Algoritması	141
4.2.1.	Görüntü İşleme Modülü	143
4.2.2.	Matematiksel Hesaplama Modülü	144
4.3.	Hata Tespit Algoritması	149
4.4.	Kamera Dizileri ile Yüksek Çözünürlük-1	156
4.5.	Kamera Dizileri ile Yüksek Çözünürlük-2	161
4.6.	Arayüz Tasarımı	165
4.6.1.	Makine Görmesi Yazılımları	166
4.6.2.	Görüntü İşleme Kütüphaneleri	168
4.6.3.	Arayüz Tasarımı Versiyon 1.0.....	171
4.6.4.	Arayüz Tasarımı Versiyon 1.1	173
4.7.	Sistem Tümlleştirme	176
4.8.	Kalite Kontrol Yazılımı için Performans Analizi	179
5.	SONUÇLAR	182
5.1.	Maliyet Analizi	183
5.2.	Bilimsel Katkıları.....	184
5.3.	Toplam Sistem	185
5.4.	Önerilen Kontrol Algoritmalarının Karşılaştırılması.....	187
5.5.	Gelecek Çalışmalar	188
	KAYNAKLAR	189
	EKLER	198
	ÖZGEÇMİŞ	203

ÖZET

Makine görmesi sistemleri özellikle endüstride görüntü işleme tabanlı otomatik kalite kontrolü, veya analizi yapmak için kullanılan yöntemler ve teknolojiler bütünüdür. Günümüzde hızlı seri üretim bantlarını kullanan işletmelerin sayısı arttıkça bu sistemlerde kullanılması gereken sistem ve algoritmaların gereksinimleri de artmaktadır. Görüntü işleme tabanlı bir kalite kontrol sisteminin endüstriyel sayısal kamera ve akıllı tanıma algoritması olmak üzere iki bileşeni bulunmaktadır.

Bu doktora tezinde görüntü işleme tabanlı bir akıllı kontrol algoritması sistemi geliştirmek için iki katkı sunulmaktadır. Birincisi, görüntü oluşturma algoritması ve haberleşme algoritmasına sahip bir programlanabilir endüstriyel kamera, ikincisi ise bir konveyör üzerinde hızla hareket eden nesnelerin sayılması, boyutlarının ölçülmesi ve olası hataların tespiti için akıllı tanıma algoritmalarının geliştirilmesidir. Öncelikle tez kapsamında tamamı özgün olarak geliştirilen algoritmalar, Cyclone IV serisi FPGA kullanılarak 0.3 MP – 5 MP aralığında programlanabilir çözünürlüğe sahip bir sayısal kamera için geliştirilmiş ve yaklaşık 1 gbps hızla haberleşme yapacak şekilde gerçek zamanlı olarak gerçekleştirilmiştir. Daha sonra seri üretim bantlarında hızla hareket edecek nesnelerin sayımı, boyutlarının ölçülmesi ve hata tespiti için geliştirilen farklı algoritmalar, farklı görüntüler ve nesneler üzerinden doğrulanmıştır. Ayrıca tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen arayüz tasarımı ile geliştirilen bu algoritmaların bir arayüz üzerinde çalışabilmesi sağlanmıştır. Tez kapsamında elde edilen bu bütünsel kalite kontrol sistemi temel olarak bir adet sayısal kamera, akıllı kontrol yazılımları ve ana işlem birimi modüllerini bünyesinde barındırmaktadır.

Sonuç olarak bu doktora tezinde yapılan çalışmalar ile bilime, özgün bir endüstriyel sayısal kameranın geliştirilmesi için gerekli görüntü elde etme ve sayısal haberleşme algoritmalarının ortaya konulması ile nesne sayma, boyut ölçme ve hata tespiti için gerekli algoritmaların geliştirilmesi açısından katkılar sunulmuştur. Bu doktora tezi kapsamında geliştirilen çalışmalar T.C. Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı tarafından 0743.STZ.2014 numaralı SAN-TEZ projesi ile desteklenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sayısal kamera, Makine görmesi, Kalite kontrol, Görüntü işleme, Görüntü tanıma.

SUMMARY

Development of High Performance Industrial Camera and Intelligent Recognition System for Vision-Based Quality Control

Machine vision systems are the whole of the methods and technologies used to perform automated quality control, or analysis, especially on an industrial image processing basis. Today, as the number of facilities which use fast mass production lines increases, the requirements of systems and algorithms which need to be used in such systems are also increasing. A quality control system based on image processing has two components which are industrial digital camera and intelligent recognition algorithm.

In this PhD thesis two contributions are presented to develop an image processing based intelligent control algorithm system. The first is a programmable industrial camera which has image construction algorithm and communication algorithm, the second is development of the intelligent recognition algorithms for counting of fast moving objects on a conveyor, the measurement of their dimensions and the detection of possible faults. First of all, the algorithms originally developed in the scope of thesis were developed for a digital camera with programmable resolution in the range of 0.3 MP - 5 MP using Cyclone IV series FPGA and realized in real time to communicate at about 1 Gbps. After, different algorithms which are developed for counting, measuring dimensions and detecting faults of objects that will move rapidly on mass production lines have been verified through different images and objects. Furthermore, it is provided that these developed algorithms can be operated on an interface with the interface design which is developed in the scope of the thesis. The quality control systems, which is obtained within the scope of the thesis, basically contains a digital camera, intelligent control software and main processing unit modules.

In conclusion, with the studies done in thesis, some contributions are provided to science with production of image obtaining and digital communication algorithms which are required for development of industrial digital camera in terms of developing the algorithms which are necessary for object counting, dimension measurement and fault detection. The studies developed within the scope of doctoral thesis were supported by the SAN-TEZ project number 0743.STZ.2014 by the Ministry of Science, Industry and Technology.

Key Words: Digital camera, Machine vision, Quality control, Image processing, Pattern recognition.

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1 Örnek bir sayısal kamera sistemi	2
Şekil 1.2 (a) CCD görüntü sensörü (b) CMOS görüntü sensörü [9].....	2
Şekil 1.3 CCD kamera çalışma prensibi [10].....	4
Şekil 1.4 CMOS kamera çalışma prensibi [10].....	4
Şekil 1.5 Örnek bir sayısal kamera sistemi [12]	5
Şekil 1.6 Literatürde gerçekleştirilen örnek bir sayısal kamera sistemi [13]	6
Şekil 1.7 Literatürde gerçekleştirilen örnek bir sayısal kamera sistemi [14].....	6
Şekil 1.8 İki FPGA kullanılarak gerçekleştirilen örnek sayısal kamera [18].....	7
Şekil 1.9 Mozaik line-scan kamera sistemi [19]	8
Şekil 1.10 Temel bir kamera dizisi sistemi	9
Şekil 1.11 Yönsüz iletişim mimarisi (a) Ekran verici (b) Kamera alıcı [37]	11
Şekil 1.12 Görüntü sinyali işleme süreci [39].....	12
Şekil 1.13 Asenkron optik kamera iletişim sistemi [40].....	12
Şekil 1.14 Görüntü karesi yapısı [40]	12
Şekil 1.15 FPGA tabanlı görüntü işleme boru hattı mimarisi [41]	13
Şekil 1.16 Kalp atış aralığı tespit yaklaşımı [43]	14
Şekil 1.17 Bisküvi çatlak tespiti için önerilen bir yaklaşım [45]	15
Şekil 1.18 Literatürden örnek bir çalışma [46]	16
Şekil 1.19 Konveyör sistemleri için kusur tespit yaklaşımı [46]	16
Şekil 1.20 Rulman yüzey kontrolü için önerilen bir yaklaşım [53]	17
Şekil 1.21 Peynir içerisinde yer alan malzemelerin belirlenmesi [55]	18
Şekil 1.22 O-ring için önerilen sistemin deneysel düzeneği [57]	19
Şekil 1.23 Literatürde önerilen bir yaklaşım [59]	19
Şekil 2.1 Makine görmesi tabanlı çözüm sistemleri	28
Şekil 2.2 Örnek bir görüntünün farklı renk uzaylarındaki durumları	31
Şekil 2.3 Örnek bir görüntü karesinin eşiklenmesi	31
Şekil 2.4 Örnek bir görüntü karesine kenar çıkarım uygulanması	32
Şekil 2.5 Örnek bir görüntü karesinde histogram eşitleme ve germe işlemleri	33

Şekil 2.6 Örnek bir görüntü karesine morfolojik işlemlerin uygulanması	34
Şekil 2.7 Literatürden örnek bir çalışma [62]	35
Şekil 2.8 Literatürden örnek bir çalışma [63]	35
Şekil 2.9 Literatürden örnek bir çalışma [65]	36
Şekil 2.10 Görme tabanlı bir kalite kontrol sisteminin temel yapısı [96]	39
Şekil 3.1 Gerçekleştirilen kalite kontrol sistemine ait bir blok diyagram	42
Şekil 3.2 Tez süresince geliştirilen sayısal kamera prototipi aşamaları	43
Şekil 3.3 Görüntü sensörleri için örnek optik formatlar	45
Şekil 3.4 Görüntü sensörlerinde enstantane kavramı	46
Şekil 3.5 APTINA MT9P001 görüntü sensör modülü	48
Şekil 3.6 OV9655 görüntü sensörü	50
Şekil 3.7 STM32F407 işlemci tabanlı geliştirme kartı	51
Şekil 3.8 OV9655 Veri aktarım protokolü	53
Şekil 3.9 RGB565 görüntü formatı	53
Şekil 3.10 RGB565 görüntü formatı ve OV9655 modülünde kullanımı	54
Şekil 3.11 OV9655 kamera modülü kullanılarak elde edilen prototip kamera	55
Şekil 3.12 Kamera ile haberleşmek için yazılan bir kod parçası (main.c).....	56
Şekil 3.13 Tasarlanan kamera modülü	58
Şekil 3.14 Aptina görüntü sensörü bağlantı şeması	59
Şekil 3.15 Aptina görüntü sensörü pin çıkış diyagramı	59
Şekil 3.16 Aptina görüntü sensörü giriş çıkış diyagramı	60
Şekil 3.17 Aptina görüntü sensörü kompozit çizim	60
Şekil 3.18 Lens türlerinin özellikleri	61
Şekil 3.19 C türü lens yuvası	61
Şekil 3.20 Çalışmalarda kullanılan lense ait görüntüler	62
Şekil 3.21 Çalışmada test amaçlı kullanılan lense ait görüntüler	63
Şekil 3.22 Çalışmalarda kullanılan STM32F746 Discovery Geliştirme Kiti	64
Şekil 3.23 DCMI modülü için hazırlanan adaptör	65

Şekil 3.24 Kamera modülü ve STM32F746 ön yüz	66
Şekil 3.25 Kamera modülü ve STM32F746 arka yüz	66
Şekil 3.26 Çözünürlük ayarı için örnek register değerleri	67
Şekil 3.27 Görüntü sensörünün Raw Bayer formatında renk dizilimi	67
Şekil 3.28 Mavi ve yeşil renk kanalları kullanılarak ekrana basılmış görüntüler	68
Şekil 3.29 Bayer Raw formatı gözetilerek ekrana basılan sonuç	68
Şekil 3.30 Altera Cyclone IV DE2-115 FPGA geliştirme kiti ve kamera modülü	70
Şekil 3.31 Sistemin çalışma durumuna ait bir görüntü	71
Şekil 3.32 Sistemin çalışma zamanında alınan örnek bir görüntü	71
Şekil 3.33 Modüler sistem mimarisi	73
Şekil 3.34 OSI referans modelinin katmanları	75
Şekil 3.35 UDP veri paketinin içeriği	78
Şekil 3.36 Ethernet header	78
Şekil 3.37 IP Header	79
Şekil 3.38 UDP Header	79
Şekil 3.39 Signal Tap II Logic Analyzer	80
Şekil 3.40 RTL Viewer	81
Şekil 3.41 WireShark yazılımı ile elde sonuçlar	81
Şekil 3.42 Gerçek zamanlı testlerden elde sonuçlar	82
Şekil 3.43 ModelSim testlerinden elde edilen sinyal sonuçları	83
Şekil 3.44 Ağın durumuna ait wireshark'dan elde edilen örnek bir durum	85
Şekil 3.45 Windows işletim sistemi üzerinde ağın durumuna ait bir sonuç	85
Şekil 3.46 Kamera modülü çalışırken elde edilen ağ detayları	86
Şekil 3.47 Wireshark programında frame'lerin durumu	87
Şekil 3.48 Wireshark programında UDP içerik bilgileri	87
Şekil 3.49 Wireshark programında bir UDP paketinin içeriği	88
Şekil 3.50 UDP veri bloğunun çözülmesi	89
Şekil 3.51 UDP haberleşme protokolü (socket programlama)	91
Şekil 3.52 FPGA geliştirme kitinin çalışma durumu (üstten görünüm)	92
Şekil 3.53 FPGA geliştirme kitinin çalışma durumu (yandan görünüm)	92
Şekil 3.54 Deneyisel çalışmalar (yandan görünüm)	93

Şekil 3.55 Deneysel çalışmalar (görüntüleme işlemi)	93
Şekil 3.56 Örnek test sonuçları-1 (düşük ışık koşulu)	94
Şekil 3.57 Örnek test sonuçları-2 (düşük ışık koşulu)	94
Şekil 3.58 Örnek test sonuçları-1 (normal ışık koşulu)	95
Şekil 3.59 Örnek test sonuçları-2 (normal ışık koşulu)	95
Şekil 3.60 Örnek test sonuçları-1 (yüksek ışık koşulu)	96
Şekil 3.61 GigE Vision paket yapısı	97
Şekil 3.62 Sistemin çalışma durumuna ait bir görüntü	99
Şekil 3.63 CPU ve GPU'ya ait örnek bir blok diyagram	102
Şekil 3.64 CPU ve GPU'ya ait örnek bir blok diyagram	102
Şekil 3.65 Ana işlem biriminde kullanılan ethernet tabanlı frame grabber	106
Şekil 3.66 Ana işlem biriminde kullanılan USB tabanlı frame grabber	107
Şekil 3.67 Hafıza birimi (harddisk) okuma/yazma hızları	110
Şekil 3.68 Hafıza birimi (SSD) okuma/yazma hızları	111
Şekil 3.69 CPU işlemci için gerçekleştirilen örnek bir OpenCV kod parçası	112
Şekil 3.70 Opencv örnek kod parçası çıktısı	113
Şekil 3.71 CPU işlemci için gerçekleştirilen örnek bir OpenCV kod parçası	113
Şekil 3.72 CPU ve GPU için hazırlanan kod parçacıklarının zamansal karşılaştırması	114
Şekil 3.73 CPU ve GPU performans testi	115
Şekil 4.1 Makine görmesi ölçüm işlemi	119
Şekil 4.2 Önerilen nesne sayma yaklaşımı-1	122
Şekil 4.3 Sanal çizgi ile sayma işlemi	123
Şekil 4.4 Siyah beyaz geçişleri ile sayma işlemi	123
Şekil 4.5 Deneysel çalışmalardan elde edilen örnek bir sonuç (sarı renk) (a) Orijinal görüntü (b) HSV renk uzayı (c) Eşiklenmiş görüntü (d) Canny kenar çıkarımı sonucu (e) Konturları çizilmiş, merkezi işaretlenmiş, sayma işlemine tabi tutulmuş görüntü karesi	125
Şekil 4.6 Deneysel çalışmalardan elde edilen örnek bir sonuç (kırmızı renk) (a) Orijinal görüntü (b) HSV renk uzayı görüntüsü (c) Eşiklenmiş görüntü karesi (d) Canny kenar çıkarımı sonucu (e) Konturları çizilmiş, merkezi işaretlenmiş ve sayma işlemine tabi tutulmuş görüntü karesi.....	126

Şekil 4.7 Deneysel çalışmalardan elde edilen örnek bir sonuç (üst üste binme) (a) Orijinal görüntü (b) HSV renk uzayı görüntüsü (c) Eşiklenmiş görüntü karesi (d) Canny kenar çıkarımı sonucu (e) Konturları çizilmiş, merkezi işaretlenmiş ve sayma işlemine tabi tutulmuş görüntü karesi.....	126
Şekil 4.8 Önerilen yaklaşımın akış diyagramı	128
Şekil 4.9 Önerilen yaklaşımın sözde kodu	130
Şekil 4.10 Sistemin çalışma durumuna ait bir görüntü	131
Şekil 4.11 İki nesnenin örtüşmesi durumu	131
Şekil 4.12 Deneysel çalışmalardan elde edilen örnek bir sonuç (a) Orijinal görüntü (b) Arkaplanı çıkarılmış görüntü (c) Sayma işlemine tabi tutulmuş görüntü karesi	132
Şekil 4.13 Deneysel çalışmalardan elde edilen örnek bir sonuç (a) Orijinal görüntü (b) Arkaplanı çıkarılmış görüntü (c) Konturları çizilmiş, merkezi işaretlenmiş ve sayma işlemine tabi tutulmuş görüntü karesi	133
Şekil 4.14 Deneysel çalışmalardan elde edilen örnek bir sonuç (a) Orijinal görüntü (b) Arkaplanı çıkarılmış görüntü (c) Konturları çizilmiş, merkezi işaretlenmiş ve sayma işlemine tabi tutulmuş görüntü karesi	133
Şekil 4.15 Yakın şekillerin birleştirilmesi	133
Şekil 4.16 İki farklı durum için belirlenen bölgedeki yoğunluk değişimi (a) Gürültüsüz nesne (b) Gürültülü nesne	134
Şekil 4.17 Her bir frame'in işleme zamanı	134
Şekil 4.18 Önerilen yöntemin blok diyagramı	135
Şekil 4.19 Örnek görüntüler a) Soda şişesi paketi b) Yumurta paketi	136
Şekil 4.20 Hough dönüşümü sözde kodu	138
Şekil 4.21 Deneysel düzeneğe ait bir blok diyagram	138
Şekil 4.22 Önerilen otomatik nesne sayma yöntemi	139
Şekil 4.23 Yumurta paketleri için örnek test sonuçları	140
Şekil 4.24 Soda şişesi paketleri için örnek görüntü işleme sonuçları	140
Şekil 4.25 Soda şişesi paketleri için örnek test sonuçları	141
Şekil 4.26 Çalışmada kullanılan örnek nesneler	142
Şekil 4.27 Önerilen hesaplama yaklaşımı	143
Şekil 4.28 Önerilen otomatik ölçüm yaklaşımı	143

Şekil 4.29 Önerilen yaklaşımın ilk hesaplamaları	145
Şekil 4.30 Ölçüm işlemi için matematiksel hesaplama	145
Şekil 4.31 Önerilen sistemin deneysel düzeneği	146
Şekil 4.32 Su şişesi paketleri için görüntü işleme modülü sonuçları	147
Şekil 4.33 Soda şişesi paketleri için görüntü işleme modülü sonuçları	148
Şekil 4.34 Her iki ürün grubu için deneysel sonuçlar	149
Şekil 4.35 PCB için örnek görüntü	150
Şekil 4.36 Önerilen yöntemin akış diyagramı.....	150
Şekil 4.37 Önerilen yaklaşıma ait deneysel düzenek	152
Şekil 4.38 PCB kartlar için eğitim işlemi	153
Şekil 4.39 PCB kartlar için test işlemi	155
Şekil 4.40 Test işleminden elde edilen örnek sonuçlar	155
Şekil 4.41 Temel kamera dizisi yapısı	157
Şekil 4.42 Görüntü birleştirme için önerilen yaklaşım	158
Şekil 4.43 Önerilen yaklaşımda kullanılan deney düzeneği	159
Şekil 4.44 Kameralardan elde edilen görüntüler birleştirme işlemleri	160
Şekil 4.45 Önerilen yaklaşım sonucu elde edilen tek görüntü karesi	160
Şekil 4.46 Mikro genetik algoritma adımları	162
Şekil 4.47 Yatay birleştirme işlemi	162
Şekil 4.48 Önerilen görüntü birleştirme yaklaşımı	163
Şekil 4.49 Üretim hattında kameraların yerleşimi	164
Şekil 4.50 Kameralardan elde edilen görüntüler birleştirme işlemleri	165
Şekil 4.51 Arayüz tasarımı versiyon 1.0	171
Şekil 4.52 Kameraların aynı pencere anlık olarak gösterilmesi	172
Şekil 4.53 Kamerayı kontrol edebilmek için tasarlanan menü	172
Şekil 4.54 Dosya menüsü	172
Şekil 4.55 Filtre ekleme menüsü	173
Şekil 4.56 Wrapper işlemi	174
Şekil 4.57 Arayüz tasarımı Versiyon 1.1	175
Şekil 4.58 Arayüz tasarımından örnek sonuçlar	176
Şekil 4.59 Sistem tümleştirme çalışmaları	177

TABLolar LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 1.1 CCD ve CMOS görüntü sensörü karşılaştırma	3
Tablo 2.1 Otomatik kalite kontrol konusunda yapılan çalışmalar	38
Tablo 2.2 İnsan ve makine görmesi arasındaki karşılaştırma [96]	39
Tablo 3.1 Seçilen görüntü sensörü APTINA MT9P001.....	47
Tablo 3.2 Uygulamada kullanılan görüntü sensörü (OV9655)	50
Tablo 3.3 OV9655 pin diyagramı	51
Tablo 3.4 OV9655 ve STM32F407 bağlantı pin diyagramı	52
Tablo 3.5 Tercih edilen lens türü	62
Tablo 3.6 Test işlemlerinde kullanılan lens türü	63
Tablo 3.7 Ana işlem biriminde kullanılan işlemci	100
Tablo 3.8 GPU tabanlı ekran kartı	101
Tablo 3.9 Harddisk hafıza birimi	105
Tablo 3.10 SSD hafıza birimi	105
Tablo 3.11 Ethernet tabanlı frame grabber teknik özellikler	106
Tablo 3.12 USB tabanlı frame grabber teknik özellikler	107
Tablo 3.13 FPGA tabanlı sayısal kamera için performans analizi	116
Tablo 4.1 Kalite kontrol sisteminde kullanılan kameranın temel özellikleri	124
Tablo 4.2 Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar	127
Tablo 4.3 Ardışık iki frame için nesne tespit işleminin olası durumları	130
Tablo 4.4 Kalite kontrol sisteminde kullanılan kameranın temel özellikleri	132
Tablo 4.5 Kullanılan kamera özellikleri	139
Tablo 4.6 Çalışmada kullanılan kamera ve bilgisayar özellikleri	146
Tablo 4.7 Kamera karakteristiği	157
Tablo 4.8 Önerilen yaklaşımın performansı	160
Tablo 4.9 Önerilen yaklaşımın karşılaştırmalı sonuçları	165
Tablo 4.10 Kalite kontrol yazılımı için performans analizi	180
Tablo 5.1 Geliştirilen kalite kontrol sisteminin maliyet analizi	183
Tablo 5.2 Önerilen kalite kontrol algoritmalarının özellikleri	187

SİMGELER LİSTESİ

$GxYxU$	: Genişlik, yükseklik, uzunluk
I	: Bir frame
B	: Arka plan görüntüsü
x, y	: Piksel koordinatları
$P(x)$	: Olasılık yoğunluk fonksiyonu
w_k	: Gaussian dağılımının ağırlığı
u_k	: Ortalama değer
σ^2	: Varyans
N	: Gaussian karışım modeli
$\max$	: Verilen değerler için maksimum
$\min$	: Verilen değerler için minimum
H	: HSV renk uzayı H kanalı
S	: HSV renk uzayı S kanalı
V	: HSV renk uzayı V kanalı
R	: RGB renk uzayı R kanalı
G	: RGB renk uzayı G kanalı
B	: RGB renk uzayı B kanalı
$G(r)$	: Gauss filtresi
G_x	: Sobel filtresi x eksen
G_y	: Sobel filtresi y eksen
r	: Yarıçap
t	: Theta açısı
h	: Yükseklik
d	: Mesafe
a	: Merkeze uzaklık
b	: Kameraya uzaklık
Y	: YUV renk uzayı Y kanalı
U	: YUV renk uzayı U kanalı
V	: YUV renk uzayı V kanalı

$P_{x,y}$	: x,y pikselinin renk değeri
α	: Alfa-denklemdaki ağırlık değeri
β	: Beta-denklemdaki ağırlık değeri
$h(m,n)$	: Konvolüsyon matrisi
$Y(i,j)$	: Ortalama filtresi
k_r	: Kırmızı kanal için kontrast katsayısı
k_g	: Yeşil kanal için kontrast katsayısı
k_b	: Mavi kanal için kontrast katsayısı
$A(i,j)$	: Normalizasyon işlemi
t	: Eşik değeri
μ_b	: Arka plan görüntüsü piksel ortalaması
μ_f	: Ön plan görüntüsü piksel ortalaması
σ_B^2	: Optimum eşik değeri
i_{max}	: Verilen bir bölgede i koordinatının maksimum değeri
i_{min}	: Verilen bir bölgede i koordinatının minimum değeri
L	: Sınır piksel sayısı
a_e	: Elips ekseni-1
b_e	: Elips ekseni-2
e_x	: Eksantrik
F_n	: Ayırık fourier dönüşümü

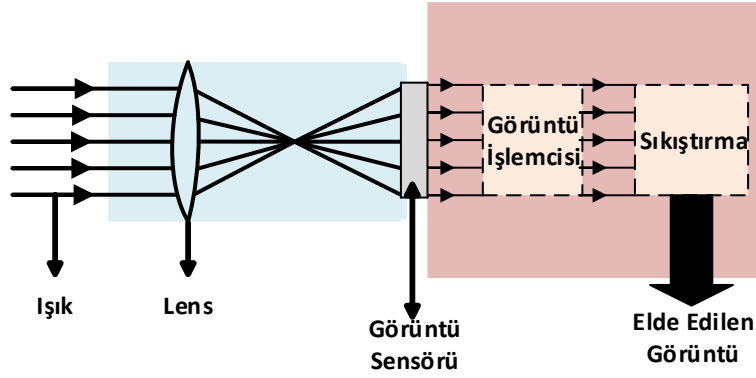
KISALTMALAR LİSTESİ

CMOS	: Complementary Metal Oxide Semiconductor
CCD	: Charge Coupled Device
FPGA	: Field Programmable Gate Array
OCC	: Optic Camera Communication
DSP	: Digital Signal Processor
RGB	: Red, Green, Blue
HSV	: Hue, Saturation, Value
BPS	: Bit Per Second
MBIT	: Megabit
USB	: Universal Serial Bus
RS232	: Seri Port
MP	: Mega Pixel
VGA	: Video Graphics Array
SVGA	: Super Video Graphics Array
XGA	: eXtended Video Graphics Array
SXGA	: Super eXtended Video Graphics Array
UXGA	: Ultra eXtended Video Graphics Array
QXGA	: Quad eXtended Graphics Array
YCbCr	: Parlaklık ve renk bilgilerini saklayan renk uzayı
YUV	: Luminance, Chrominance1, Chrominance2
DCMI	: Digital Camera Interface
RAM	: Random Access Memory
MAC	: Media Access Control
CSMA/CD	: Carrier Sense Multiple Access With Collision Detection
ICMP	: Internet Control Message Protocol
UDP	: User Datagram Protocol
TCP	: Transmission Control Protocol
IP	: Internet Protocol
RGBA	: Red, Green, Blue, Alpha

GPU	: Graphics Processing Unit
SSD	: Solid State Disk
HDMI	: High Definition Multimedia Interface
CPU	: Central Processing Unit
PCI	: Peripheral Component Interconnect
DVI	: Digital Visual Interface
RJ45	: Registered Jack 45
MB	: Mega Bayt
OS	: İşletim Sistemi
KNN	: K-Nearest Neighbor
IDE	: Integrated Development Environment

1. GİRİŞ

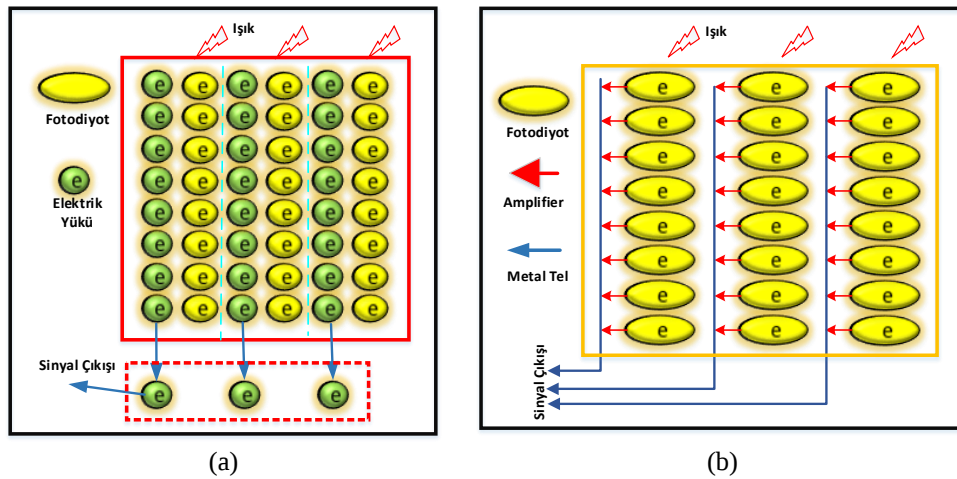
Bilgisayarlı görü, seri üretim işlemleri için hata bulma ve ayıklama konusunda oldukça hızlı, etkili ve uygun maliyetli çözümler sunan bir teknoloji olup, genellikle seri üretim hatlarında üretilen ürünlerin herhangi bir eksikliğe sahip olup olmadıklarını kontrol etmek amacıyla kullanılan sistemlerdir [1]. Otomatik görme tabanlı kontrol işlemi, özellikle bir ürünün üretim safhasında meydana gelen arızaları, eksikleri belirleyerek, bu tür ürünlerin ayıklanmasını sağlayan önemli bir yapıdır. Görme tabanlı kalite kontrol teknikleri tekstil, elektronik, otomobil, gıda ve ambalaj gibi birçok endüstriyel alanda yoğun bir şekilde kullanılmaktadır [2]. Günümüzde, ürünlerdeki istenmeyen eksiklikleri tespit etme ve kalite kontrol işlemleri genellikle uzman kişiler tarafından gerçekleştirilmektedir. Fakat çoğu durumda, bu manuel kontrol işlemi insan gözünün algılama hızına göre değişiklik göstererek çok fazla zaman tüketimine ve fazla işgücü kullanılmasına sebep olmaktadır. Buna bağlı olarak uzun vadede maliyet artmakta ve personelin performansına göre sistem verimliliği sürekli değişiklik göstermektedir. Ayrıca yapılan bu kontrollerin doğruluğu özellikle yüksek hızlı üretim hatlarında tam olarak garanti edilememektedir. Günümüzde sürekli olarak gelişen bilgisayarlı kontrol, otomatik makine sistemleri ve kameralar sayesinde bu işlemler, giderek otomatik bir hale gelmekte ve bilgisayarlı kontrol sistemleri ile hızlı, güvenli ve daha doğru bir şekilde gerçekleştirilmektedir [2, 3]. Bölüm başında da belirtildiği üzere bilgisayar görmesi sistemleri günümüz dünyasında üretim tesislerinde sıklıkla kullanılan ve hatasız ürün üretmeyi hedefleyen temassız kontrol sistemleridir. Temel olarak bir kamera aracılığıyla ürünün geçtiği hattı izleyen ve inceleyen bir sistem olan bilgisayar görmesi yaklaşımında, bir kamera, kontrol yazılımı ve bu yazılımı yürüten bir ana işlem birimi yer almaktadır. Literatürde bu konu ile alakalı yapılan çalışmalar incelendiğinde gerçekleştirilen sistemlerin giriş olarak bir görüntü aldığı ve bu görüntü üzerinde gerekli işlemleri yaptığı görülmektedir. Görüntü alma işlemi ise yüksek hızlı bir kamera aracılığıyla gerçekleştirilmekte ve bu kamerada genellikle üç ana bölümden oluşmaktadır. Bunlar sırasıyla, gelen ışık sinyalini tek bir noktada toplayabilen lens, üzerine düşen ışığı elektriksel sinyallere dönüştürebilen bir görüntü sensörü ve bu elektrik sinyallerini normal bir görüntüye çevirebilecek görüntü işleme birimidir [4-6]. Temel olarak otomatik kontrol işlemini gerçekleştirebilen yüksek hızlı bir kamera sisteminin şematik diyagramı Şekil 1.1’de verilmiştir.



Şekil 1.1. Örnek bir sayısal kamera sistemi

Şekil 1.1’den de görülebileceği üzere bir sayısal kamera sistemi temel olarak 3 bölümden meydana gelmektedir. Bunlar sırasıyla lens, görüntü sensörü ve görüntü işlemcisidir. Bir sayısal kameranın en hassas bölümlerinden birisi şüphesiz lensdir. Çünkü dış dünyadan gelen ışık bilgisi bir lens aracılığıyla görüntü sensörü üzerine düşürülmektedir. Bu sayede sensör üzerinde görüntü bilgisi sayısal olarak elde edilmekte ve görüntü işlemcisine iletilerek gerçek görüntüye dönüştürülmektedir. Lensler kullanım amacına göre normal, hassas görme veya otomatik kontrol işlemlerine göre sınıflandırılabilir [4]. Otomatik kontrol sistemlerinde lenslerin oldukça hassas ve düzgün bir şekilde odaklama yapabilmesi bu sistemlerin verimli çalışabilmesi için son derece önemlidir [5, 6].

Temel bir sayısal kameranın bir diğer önemli bölümü görüntü sensörüdür. Literatürde ve piyasada temel olarak 2 çeşit görüntü sensörü bulunmaktadır. Bunlar sırasıyla CCD (Charge Coupled Device) ve CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) sensörlerdir [5-8]. Bu sensörlere ait bir blok diyagram Şekil 1.2-(a) ve (b)’de sırasıyla sunulmaktadır [9].



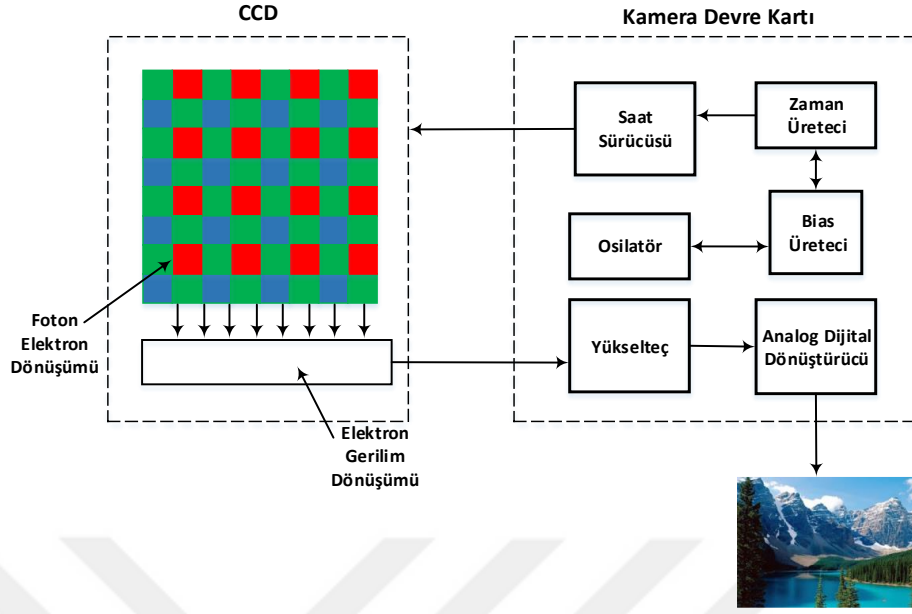
Şekil 1.2. (a) CCD görüntü sensörü (b) CMOS görüntü sensörü [9]

Şekil 1.2’den de görülebileceği üzere her iki sensör türünün de yaptığı işlem temel olarak gelen ışığı elektrik sinyallerine dönüştürmektir [5-8]. Fakat gerek maliyet açısından gerekse performans açısından her iki görüntü sensörünün de kullanıldığı çeşitli alanlar mevcuttur. Bu çerçevede CCD ve CMOS görüntü sensörlerinin karşılaştırması Tablo 1.1’de detaylı bir şekilde verilmektedir.

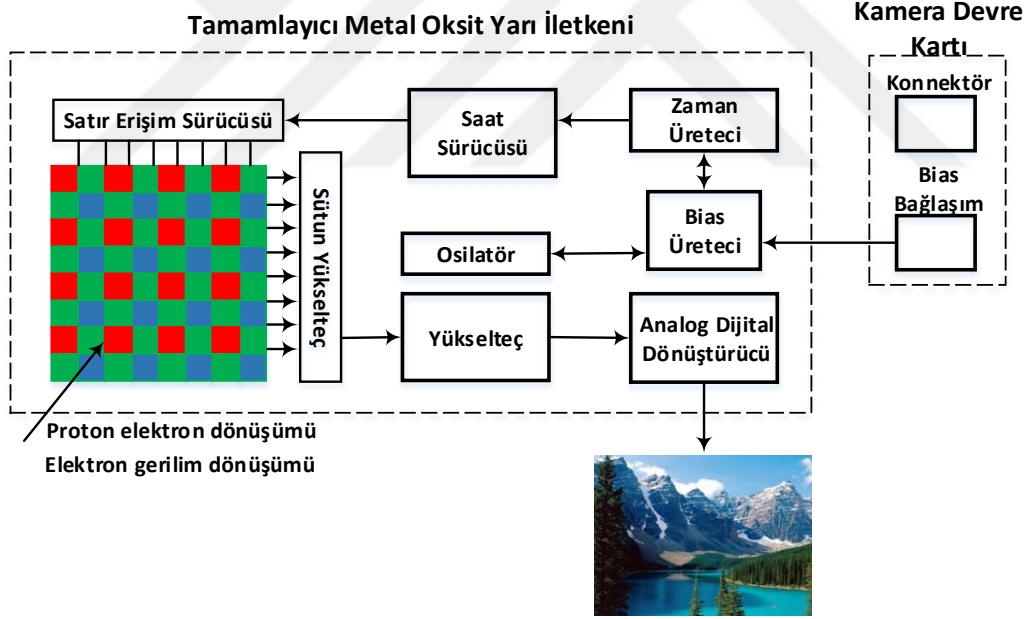
Tablo 1.1. CCD ve CMOS görüntü sensörü karşılaştırma

Özellik	CCD	CMOS
Hız	Orta - Hızlı	Hızlı
Hassasiyet	Yüksek	Düşük
Gürültü	Düşük	Orta
Sistem karmaşıklığı	Yüksek	Düşük
Sensör karmaşıklığı	Düşük	Yüksek
Sensör çıkışı	Gerilim (Analog)	Bit (Dijital)
Piksel sinyali	Elektron	Gerilim
Maliyet	Yüksek	Düşük

Tablo 1.1’den de görülebileceği üzere CCD sensörlerin gürültü durumu CMOS sensörlere göre daha düşüktür. CCD sensörler uzun süreden beri kullanılan bir teknolojiye sahiptirler. Günümüzde de bu sensör türü aktif olarak kullanılmaktadır. Fakat bu sensör türünün en önemli dezavantajları sırasıyla pratik kullanım durumunda karmaşık yapısı ve maliyetidir. CMOS görüntü sensörlerinin en önemli avantajı ise yüksek hız ve maliyettir. CMOS görüntü sensörleri özellikle yaygın üretim sürecine sahip olduklarından dolayı maliyetleri son derece uygundur. Günümüzde gelişen son teknolojiye bağlı olarak bu sensör türü daha da geliştirilmiş ve birçok sayısal kamerada aktif olarak kullanılabilir hale gelmiştir. Tablo 1.1’den de tekrar görülebileceği üzere CCD ve CMOS sensör türleri arasındaki en önemli farklardan birisi de sensör karmaşıklığıdır. CCD görüntü sensörleri çıkış olarak analog sinyal verirken CMOS görüntü sensörleri dijital çıkış sinyali üretmektedir. Bu durumda sensörlerin bünyesinde farklı devre elemanları barındırmasına sebep olmaktadır. CCD görüntü sensörü elde ettiği analog sinyali kamera için kullanılan devre üzerinde dijital görüntüye dönüştürürken, CMOS sensör bu durumun aksine bünyesinde barındırmış olduğu ADC (Analog Digital Converter) ile bu işlemi gerçekleştirmektedir. Bu çerçevede CCD ve CMOS kamera sistemlerinin çalışma prensiplerini özetleyen blok diyagramlar sırasıyla Şekil 1.3 ve 1.4’de verildiği gibidir [10].



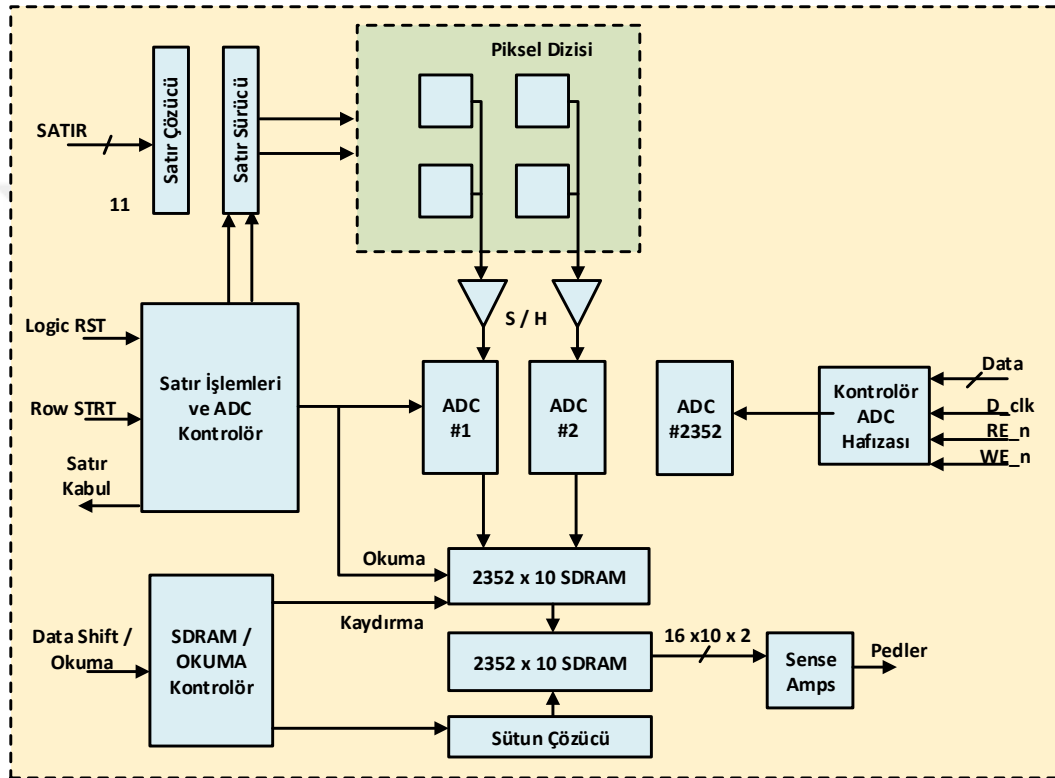
Şekil 1.3. CCD kamera çalışma prensibi [10]



Şekil 1.4. CMOS kamera çalışma prensibi [10]

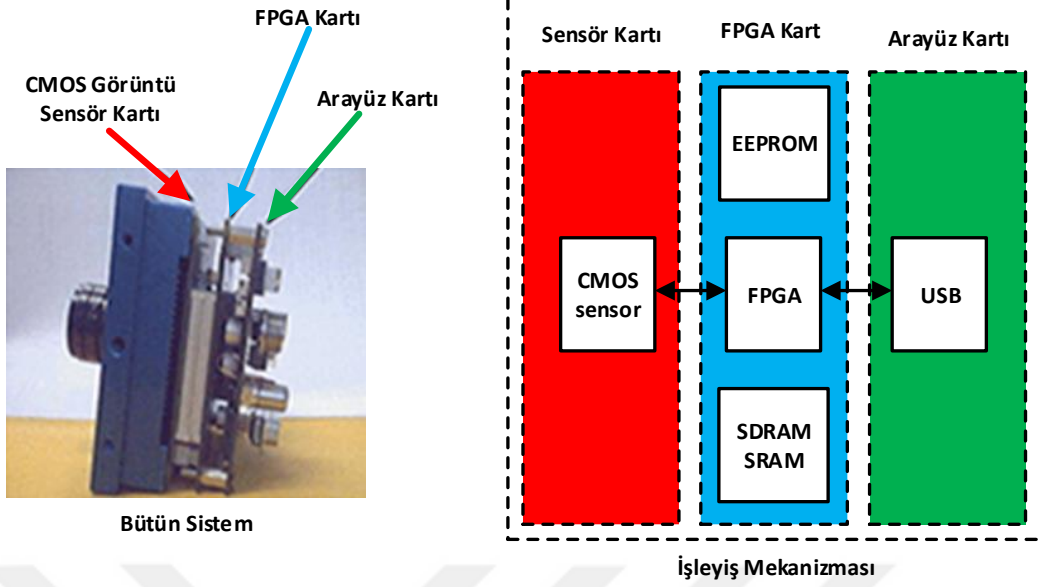
Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen incelemelere göre bilgisayar görmesi üzerine yapılan çalışmalar genellikle CMOS tabanlı olup, özellikle maliyet ve daha az karmaşık oluştundan ötürü tercih edilmektedir. Konu ile alakalı gerçekleştirilen çalışmaların birinde Field Programmable Gate Array (FPGA) kullanılarak akıllı CMOS kamera gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında 1.3 MP ve maksimum 1280x1024 piksel özelliklerine sahip saniyede 500 görüntü alabilen monochrome (tek renkli) CMOS sensör

kullanılmıştır. Sensörden alınan bilgi FPGA üzerinde işlenerek görüntünün elde edilmesi sağlanmıştır [11]. CMOS sensörler üzerine gerçekleştirilen bir diğer çalışmada ise yüksek hızlı bir kamera gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. Maksimum 4 MP ve 2352x1728 piksel özelliklerine sahip sensörden, 10 bitlik analog-dijital dönüştürücü kullanılarak 240 frame/sn elde edilmeye çalışılmıştır [12]. Bu çalışmayı özetleyen bir blok diyagram Şekil 1.5’de verildiği gibidir.



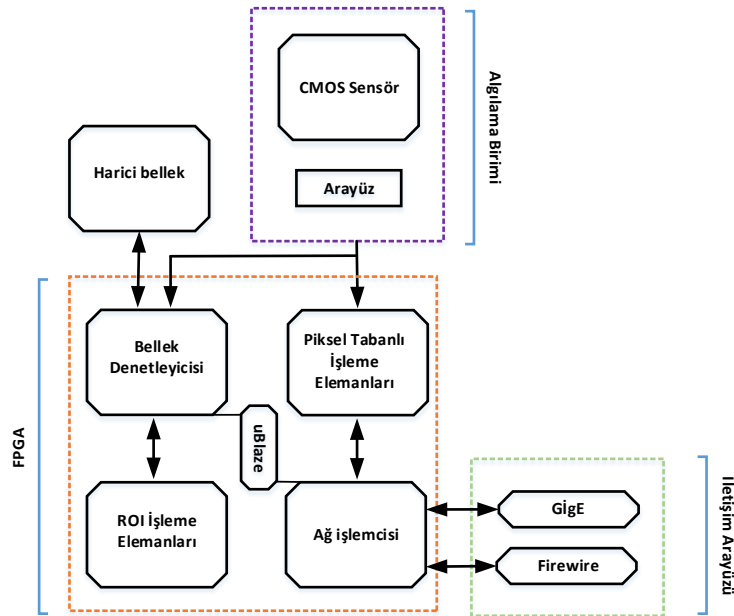
Şekil 1.5. Örnek bir sayısal kamera sistemi [12]

Konu üzerine gerçekleştirilen bir diğer çalışmada ise yine CMOS sensörler kullanılarak yüksek çözünürlüklü ve yüksek hızlı akıllı kamera gerçekleştirilmiştir. 1.3 MP ve 1280x1024 çözünürlüğe sahip kamera içerisine yerleştirilen FPGA ile saniyede 500 frame alınması sağlanmıştır. Ayrıca FPGA kart üzerinde kenar çıkartımı, nesne takibi ve dalgacık analizi gibi çeşitli görüntü işleme uygulamaları gerçekleştirilmiştir [13]. Bu çalışmada kullanılan kamera sistemine ait bir görüntü Şekil 1.6’da sunulmaktadır.



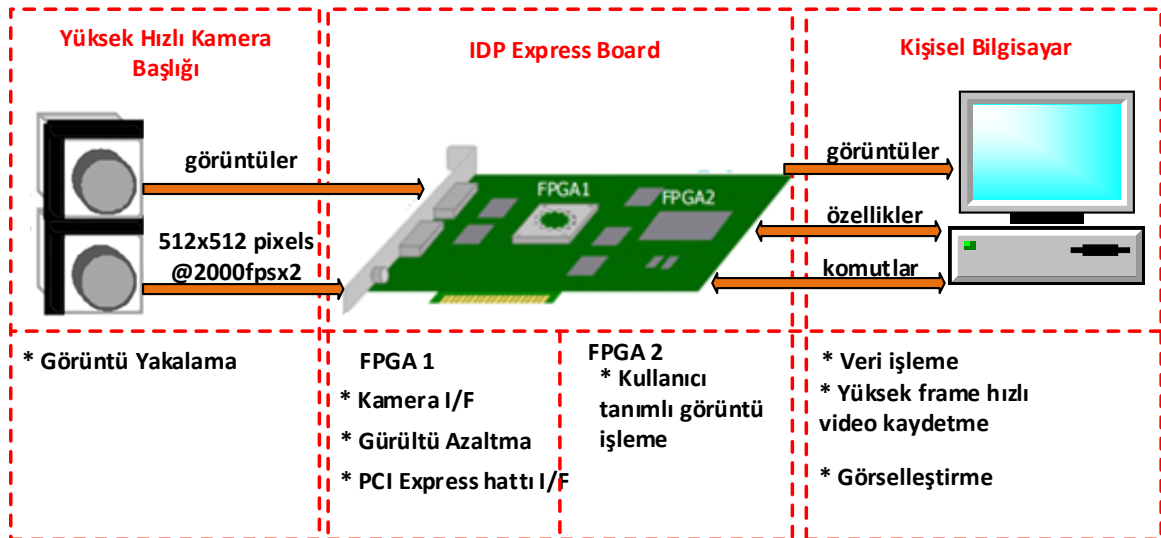
Şekil 1.6. Literatürde gerçekleştirilen örnek bir sayısal kamera sistemi [13]

Akıllı kamera tasarımına yönelik gerçekleştirilen bir başka çalışmada ise otomatik video gözetleme sistemleri için yüksek çözünürlüklü bir akıllı kamera tasarımı yapılmıştır. Endüstriyel sayısal kameralarda sıklıkla kullanılan ve iletişim konusunda bir çözüm olan GigE Vision uzantısının kullanıldığı bu sisteme ait mimariyi özetleyen bir blok diyagram Şekil 1.7’de verilmektedir [14].



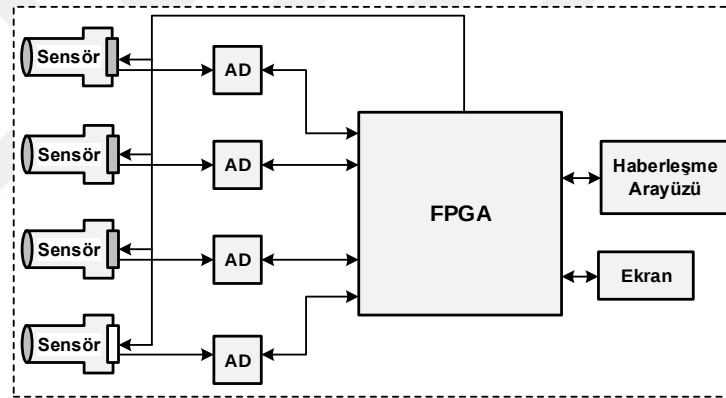
Şekil 1.7. Literatürde gerçekleştirilen örnek bir sayısal kamera sistemi [14]

Yüksek performanslı sayısal kameraların geliştirilebilmesinde ki en önemli etkenlerden birisi de donanım teknolojisinde yaşanan gelişmelerdir. Özellikle FPGA tabanlı sistemlerin donanımsal olarak çalışabilmesi, paralel işlem yapabilmesi ve bu duruma bağlı olarak çok hızlı olması bu gelişimdeki en önemli etkenlerdendir [15]. Özellikle CMOS görüntü sensörü tabanlı uygulamalarda kameradan elde edilebilecek frame sayısını arttırabilmek için yüksek hızlı işlem yapabilecek donanımsal tabanlı kartların tercih edilmesi oldukça önemlidir [16]. Bu noktada literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde işlemlerin genellikle FPGA kartları üzerinde gerçekleştirildiği görülmektedir. FPGA'ların yüksek hızlı kameraların gerçekleştirilmesi konusundaki önemi oldukça büyüktür [17]. Bu konu üzerine gerçekleştirilen çalışmaların birinde 2 farklı kameradan alınan görüntülerin 2 farklı FPGA üzerinde işlenmesi sağlanmıştır. Kameraların her biri 48 bitlik paralel veri içermektedir. Bu veriler ilk olarak FPGA üzerinde işlenmekte ve 40 bitlik verilere dönüştürülerek toplamda 80 bitlik görüntü verisinin elde edilmesinde kullanılmaktadır. Kullanılan ikinci FPGA ile de bu 80 bitlik verinin üzerinde kullanıcı tanımlı görüntü işleme algoritmalarının yürütülmesi gerçekleştirilmektedir. Gerçekleştirilen bu çalışmada FPGA'lar kullanılarak 2000 frame hızına sahip bir kamera geliştirilmiş olup, yine çeşitli görüntü işleme uygulamaları da çalışmada kullanılan bu FPGA'lar üzerinde geliştirilmiştir [18]. Bu çalışmayı özetleyen bir blok diyagram ise Şekil 1.8'de sunulmaktadır.



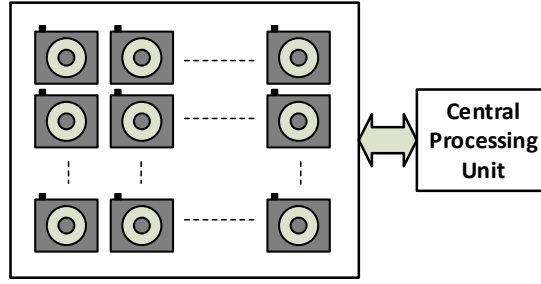
Şekil 1.8. İki FPGA kullanılarak gerçekleştirilen örnek sayısal kamera [18]

Literatürde çok çeşitli kamera sistemleri bulunmaktadır. Bu sistemlerden birisi de line-scan kameralardır. Bu kameralar görüntü sensörü olarak lineer CCD veya CMOS sensör kullanmaktadır. Bu kameralar hızlı tarama, temassızlık gibi karakteristiklerinden ötürü nesne veya nesne yeri tespiti işlemlerinde sıkça kullanılmaktadır. Ancak bu kameralar geniş açıya sahip görüntüleme işlemlerinde lens etkisi ve ışık kaybından dolayı kullanışsız olabilmektedir. Bu konu üzerine Xia ve ark. [19] yaptığı bir çalışmada, bu problemlerin üstesinden gelebilmek için FPGA tabanlı mozaik line-scan kamera tasarlamışlardır. Her kameranın görüş açısı küçültülerek çoklu line-scan kamera kullanılmış olup, nesne tanımlama işlemi için de FPGA tabanlı tespit algoritması geliştirilmiştir. FPGA'nın paralel çalışma özelliği kullanılarak kameraların eş zamanlı görüntü alması sağlanmış ve görüntü karesi elde edilmiştir. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen bu sistemin şematik diyagramı Şekil 1.9'da verildiği gibidir.



Şekil 1.9. Mozaik line-scan kamera sistemi [19]

Günümüzde dijital görüntü sensörleri oldukça iyi ve kaliteli görüntüler sunmasına rağmen bazı problemler için yetersiz kalabilmektedir. Ayrıca yüksek çözünürlüklü görüntü sensörlerinin maliyetlerinin yine de yüksek olması son kullanıcıları da çeşitli sınırlamalara ve yeni çözüm arayışlarına götürmektedir. Bu şekildeki problemlerin üstesinden gelebilmek amacıyla kullanılan bir yaklaşım kamera dizileridir. Temel olarak kamera dizileri, düşük çözünürlüklere sahip kameralardan elde edilen görüntü karelerinin bir araya getirilerek birleştirilmesi ve sonuç olarak daha yüksek çözünürlüklü görüntülerin elde edilmesidir. Bu işlem genellikle yazılım gücüyle gerçekleştirilmekte ve düşük performansa sahip kameralardan yüksek performanslı çözümler üretilebilmektedir. Temel bir kamera dizini özetleyen bir blok diyagram Şekil 1.10'da verildiği gibidir.



Şekil 1.10. Temel bir kamera dizisi sistemi

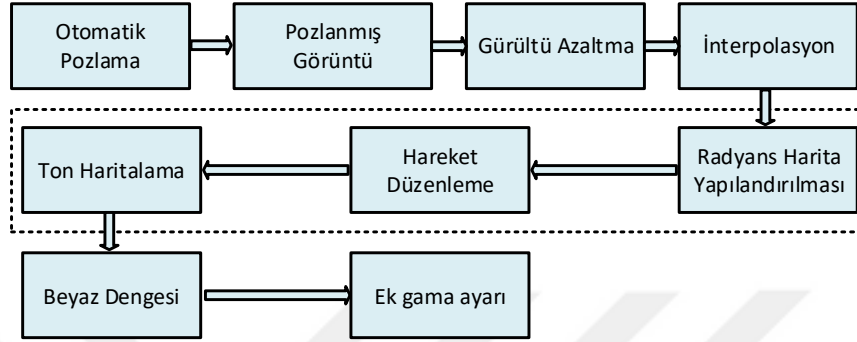
Yüksek hızlı görüntüleme sistemleri otomotiv, ambalaj, paketleme gibi birçok endüstriyel alanda sıklıkla kullanılmaktadır. Fakat bu sistemlerin maliyetinin yüksek olması en büyük dezavantajdır. Kamera dizileri ile bu dezavantaj ortadan kaldırılmakta ve daha az maliyetli yeni sistemler oluşturulabilmektedir [20]. Çünkü kamera dizilerinin sağlamış olduğu en önemli avantaj, düşük çözünürlüklü ve düşük maliyetli görüntü sensörlerinin kullanılmasıyla yüksek çözünürlüklü ve kaliteli tek bir sistemin elde edilebilmesidir [21, 23]. Bu sayede kullanıcılar yüksek çözünürlüklü resimler ve yüksek hızlı videolar üzerinde çeşitli görüntü işleme algoritmalarını yürütebilmektedirler [21-25]. Bu şekilde bir sistemin bir araya getirilmesi, temel olarak mikro denetleyici ve yazılım gücüyle oluşturulmaktadır [26]. Genel olarak her bir kameraya bağlı mikro denetleyiciler, giriş olarak aldıkları görüntüyü ana merkeze iletmektedirler. Ana merkez biriminde, farklı mikro denetleyicilerden gelen görüntüler, tek bir görüntü meydana getirecek şekilde birleştirilmektedirler. Bu alanda yapılmış olan çalışmaların biri sanal gerçeklik projesidir ve çoklu kamera sistemlerine temel oluşturmaktadır [27]. Bu çalışmada toplam 51 kamera kullanılmıştır ve kameralar bir kubbe üzerine yerleştirilmiştir. Bu sayede bir senaryoya ait tüm ayrıntıların yakalanması amaçlanmıştır. Bir diğer çalışmada ise büyük ölçekli kamera dizileri kullanılarak yüksek performanslı görüntüleme sistemi elde edilmiştir [28]. Deneysel çalışmalarda 100 video kamera kullanılmış ve görüntüleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada MPEG2 sıkıştırma tekniği kullanılarak görüntülerin aktarılması sağlanmıştır.

Bu konu üzerine gerçekleştirilen bir başka çalışmada ise Zhang ve Chen [29], kendi kendine yeniden düzenlenebilen bir kamera dizisi gerçekleştirmiştir. Çalışmada, mobil bir platform üzerine 48 tane kamera yerleştirilmiş ve 4-10 fps'de derinlik değerlerinin tahmin edilmesi sağlanmıştır. Ayrıca, gerçekleştirilen sistemde servo motorlar kullanılarak kameraların her iki yana hareket edebilmesi sağlanmıştır. Gerçekleştirilen bir diğer çalışmada da kamera dizilerinin senkronize edilmesi sağlanmıştır [30]. Bu çalışmada kamera dizilerinin geometrik, fotometrik ve geçici kalibrasyonu için tam otomatik bir

yaklaşım sunulmuştur. Kamera dizileri kullanılarak gerçekleştirilen bir çalışmada doğal video görüntüsü elde etme işlemi gerçekleştirilmiştir [31]. Sistem kamera dizileri ile sentetik açıklıklı bir görüntü oluşturarak sonuç görüntüyü hesaplamaktadır. Görüntü üzerinde çeşitli işlemler yapılarak ön plandaki resim arka plandan ayrıştırılmaktadır. Bir başka çalışmada ise network kamera dizisi kullanılarak video tabanlı sahneleme işlemi gerçekleştirilmiştir [32]. Bu çalışmada toplam 64 kamera kullanılmış ve kameralar gigabit ethernet yoluyla tek bir PC'ye bağlanmıştır. Vaish ve ark. [33], yoğun kamera dizilerinde paralaks tabanlı kalibrasyon tekniğini incelemişlerdir. Bu amaçla yapay açıklık fotoğraflama tekniği ile çalılar arkasında duran öğrencilerin tespit edilmesine çalışılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalarda tam metrik ve paralaks tabanlı kalibrasyon karşılaştırması gerçekleştirilmiştir. Bu karşılaştırma işleminde paralaks tabanlı kalibrasyon işleminin daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Wilburn ve ark. [34], kamera dizilerini kullanarak yüksek hızlı videolar elde etmişlerdir. Çalışmada yüksek hızlı video yakalayabilmek için 52 kameralı bir dizi oluşturulmuştur. Kameralar projeksiyonun tek merkeze yaklaşması için birbirine yakın yerleştirilmiştir. 30 fps'lik kameralar kullanılarak 1560 fps'lik video sağlanmıştır. Bir diğer çalışmada ışık alanlı video kamera geliştirilmiştir [35]. Bu çalışmada video tabanlı sahneleme uygulamaları için kamera dizisi kullanılmıştır. Önerilen yöntemin avantajları altı kamera kullanılarak doğrulanmıştır.

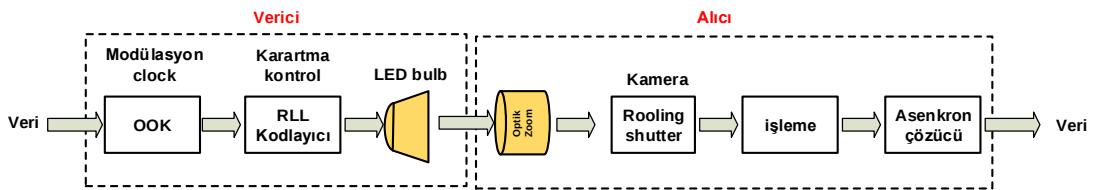
Bölüm başında da belirtildiği üzere makine ve bilgisayar görmesi sistemlerinin en temel donanımı endüstriyel sayısal kameralardır. Bu kameralar sayesinde seri üretim hatlarından görüntüler alınmakta ve gerçekleştirilen bazı işlemler neticesinde ürünlere ait belirli nitelikler elde edilmektedir. Elde edilen bu niteliklere göre belirli sinyaller üretilmekte ve ürünler ayıklanmaktadır. Yüksek performanslı bu sayısal kameralar aracılığıyla alınan görüntüler çeşitli kalite kontrol tabanlı yaklaşımlar ile incelenmektedir. Genellikle görüntü işleme tabanlı gerçekleştirilen bu yaklaşımlarda makine ve bilgisayar görmesi uygulamaları geliştirilmektedir. Bu amaçla gerçekleştirilen çalışmaların birinde dijital kamera ve taranmış görüntüyü birbirinden ayırt etmek için bir yöntem önerilmiştir [36]. Gradient vektörünün gri format ve RGB format için elde edilen matematiksel denklemlerinden faydalanılarak elde edilen gradient değerleri kullanılmaktadır. Yöntemin doğrulanması işlemi için farklı kameralardan alınan 150 fotoğraf görüntüsü test edilmiştir. Elde edilen değerlerin sınıflandırılması işlemi için destek vektör makineleri yöntemi kullanılmıştır. Sınıflandırma sonucu elde edilen değerler önerilen yöntemin yaklaşık %95 oranında performansla sınıflandırma yapabildiğini göstermiştir.

eşik değeri kullanılmıştır. Önerilen yöntemin uygulanması ile elde edilen görüntü sonuçları, otomatik pozlama, histogram eşitleme ve ikili filtreleme yöntemlerinden elde edilen sonuçlarla karşılaştırmalı bir şekilde sunulmaktadır. Bu çalışmayı özetleyen bir blok diyagram Şekil 1.12’de sunulmuştur.

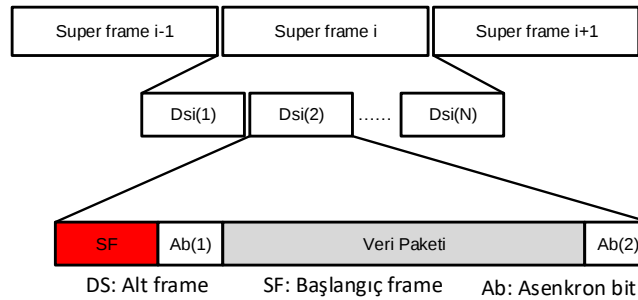


Şekil 1.12. Görüntü sinyali işleme süreci [39]

Kamera sistemleri üzerine gerçekleştirilen bir diğer çalışmada ise asenkron optik kamera iletişimine yönelik bir yöntem önerilmiştir [40]. Bu sistemi özetleyen şematik bir diyagram Şekil 1.13’de sunulmaktadır. Gerçekleştirilen bu çalışmada iletişim için önerilen yöntemde kullanılan çerçeve yapısı içerisinde, başlangıç frame bilgisi, veri alt çerçeve bilgisi ve asenkron bit bilgisi yer almaktadır. Bu çerçevelere ait örnek bir görüntü ise Şekil 1.14’de verilmiştir.

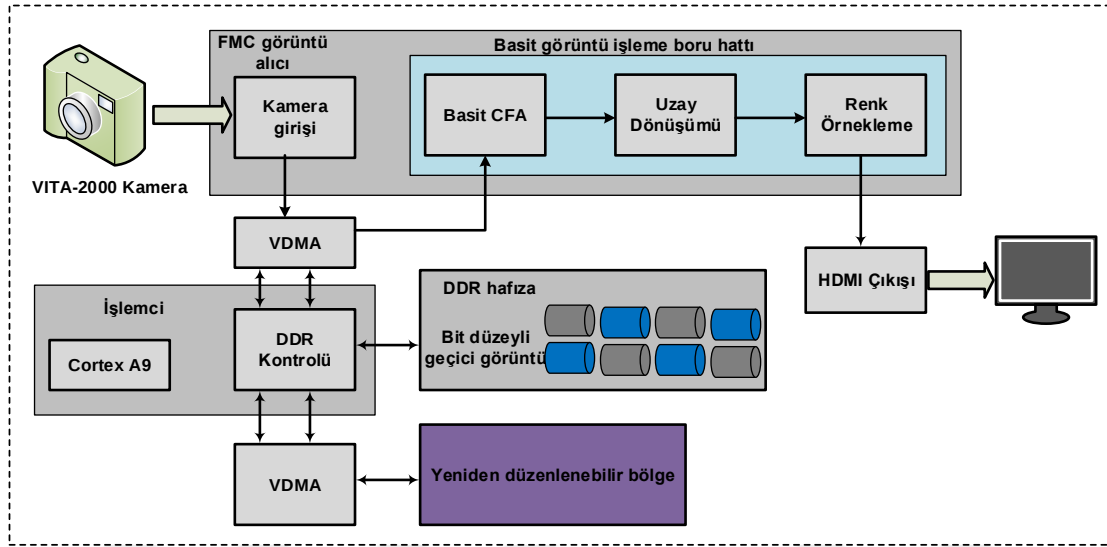


Şekil 1.13. Asenkron optik kamera iletişim sistemi [40]



Şekil 1.14. Görüntü karesi yapısı [40]

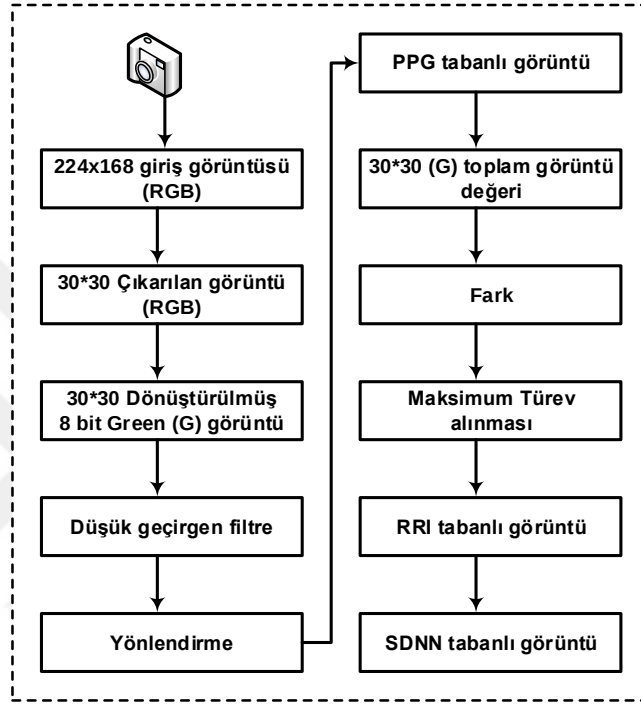
Khalifat ve diğ. [41] yaptığı çalışmada, FPGA’larda görüntü işleme amacıyla boru hattı tasarımı için maksimum iyileştirme aşaması içeren ve güç tüketimini düşüren bir yöntem önermişlerdir. Çalışma kapsamında önerilen sistem sabit ve yeniden düzenlenebilir olmak üzere iki kısımda yapılandırılmıştır. Sistemde kullanılan sabit bölüm kullanıcının herhangi bir anı yakalayabilmesine olanak sağlamaktadır. Çalışma çerçevesinde önerilen bu yaklaşıma ait bir blok diyagram Şekil 1.15’de sunulmaktadır.



Şekil 1.15. FPGA tabanlı görüntü işleme boru hattı mimarisi [41]

Kuhajda ve diğ. [42], gerçekleştirmiş oldukları bir çalışmada nesnelerin hareketlerini ve konumlarını ölçmek için kamera sensörlerinin kullanımına ilişkin bir yöntem geliştirmişlerdir. Gerçekleştirilen bu çalışmanın temel amacı nesnelerin konumları ve hareketlerinin ölçümü için kamera sensörlerinin kullanılmasıdır. Çalışma süresince kamera sistemi merkezi olan ve merkezi olmayan şekilde tasarlanmıştır. Merkezi sistemde temel amaç akıllı bir kameranın görüntüleri alıp veriyi eşzamanlı işleyebilmesidir. Kamera bu aşamada veri yolu bağlantısı için frame grabber kartı kullanmaktadır. Yine merkezi sistemde kullanılan lens ise odak mesafesi değiştirilebilen bir lenstir. Çalışmanın bir sonraki aşamasında bir eşik değeri kullanılarak kamera kalibrasyonu yapılmaktadır. Bu işlemin ardından, görüntü üzerinde hareket eden nesnelerin yapmış olduğu titreşimlerin incelenmesi sağlanmaktadır. Bu sayede gerekli frekans ölçümleri gerçekleştirilebilmektedir. Bu konuya benzer olarak gerçekleştirilen bir başka çalışmada ise kalp hızı değişkenliğini belirlemeye yönelik bir yöntem önerilmiştir [43]. 224x168 çözünürlüğe ve 420 fps görüntü alabilme kapasitesine sahip bir kamera kullanılarak .avi formatında görüntüler alınmaktadır. Çalışma

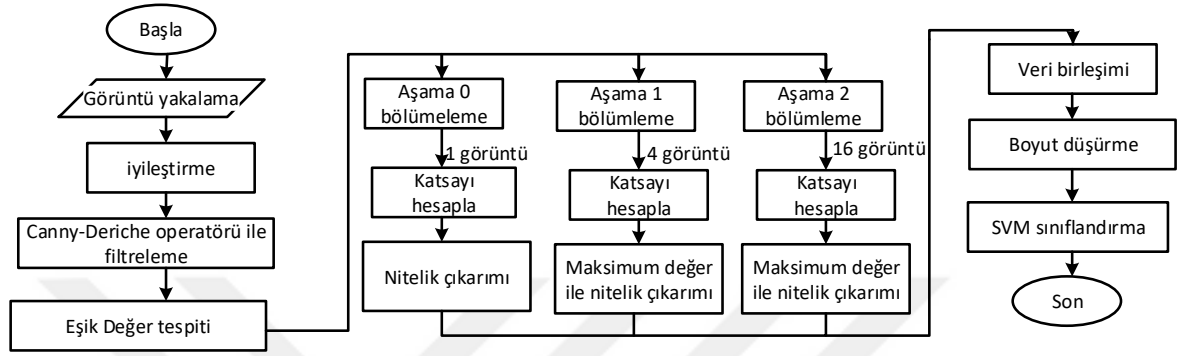
kapsamında beş farklı kişi üzerinde 13 dakika boyunca bir egzersiz-dinlenme süreci oluşturulmuştur. Dinlenme esnasında, denekler kamera karşısına oturtulmuş ve gözleri kapatılmıştır. Kamera aracılığıyla deneklerin yüz mimikleri alınmış ve bu bilgi kullanılarak kalp atış aralıkları bulunmaya çalışılmıştır. Yöntemde kullanılan görüntü işleme sürecine ait bir blok şeması Şekil 1.16’da verilmektedir.



Şekil 1.16. Kalp atış aralığı tespit yaklaşımı [43]

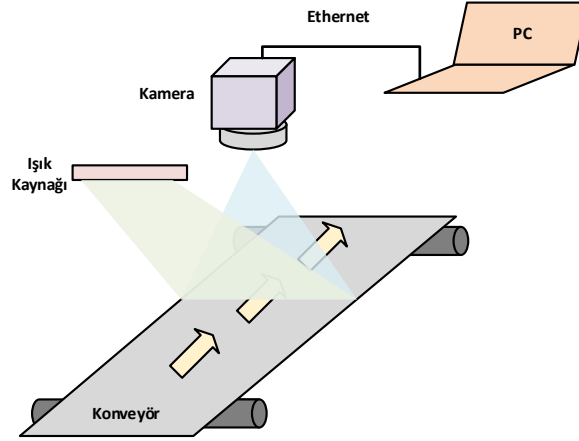
Kalite kontrol sistemleri üzerine gerçekleştirilen bir diğer çalışmada ise bir CCD kamera kullanılarak herhangi bir makine parçasındaki yuvarlaklık hatalarının tespitine yönelik uygulama geliştirilmiştir. Deneysel çalışmalar için otomobillerde yer alan ekzantirik mili incelenmiştir. Çalışmada kamera aracılığıyla alınan görüntüler bir ana işlem birimine iletilmekte ve burada frame grabber kartı üzerinde çeşitli görüntü işleme adımlarına tabi tutulmaktadır. Sistemin test edilmesi sürecinde 25 adet görüntü kullanılmış olup, önerilen yaklaşımın temassız ve son derece yüksek bir doğrulukla çalıştığı tespit edilmiştir [44]. Bu konuya benzer olarak gerçekleştirilen bir diğer kalite kontrol yaklaşımında ise bisküvi kırıklarını tespit etmeye yönelik bir uygulama geliştirilmiştir. Çalışmada temel donanım olarak bir sayısal kamera, bir aydınlatma sistemi ve bir frame grabber kartı kullanılmaktadır. Sistemde kamera aracılığıyla alınan görüntüler iki bölümde incelenmektedir. İlk aşamada görüntünün toplanması, görüntü iyileştirme, kenar çıkarımı ve

bölümleme işlemleri gerçekleştirilmektedir. Önerilen yaklaşımın ikinci ve son aşamasında ise hough yöntemi ile nitelik çıkarımı, boyut azaltma ve destek vektör makineleri kullanılarak sınıflandırma işlemi gerçekleştirilmektedir. Gerçekleştirilen bu çalışmaya ait bir blok diyagram Şekil 1.17’de sunulduğu gibidir [45].

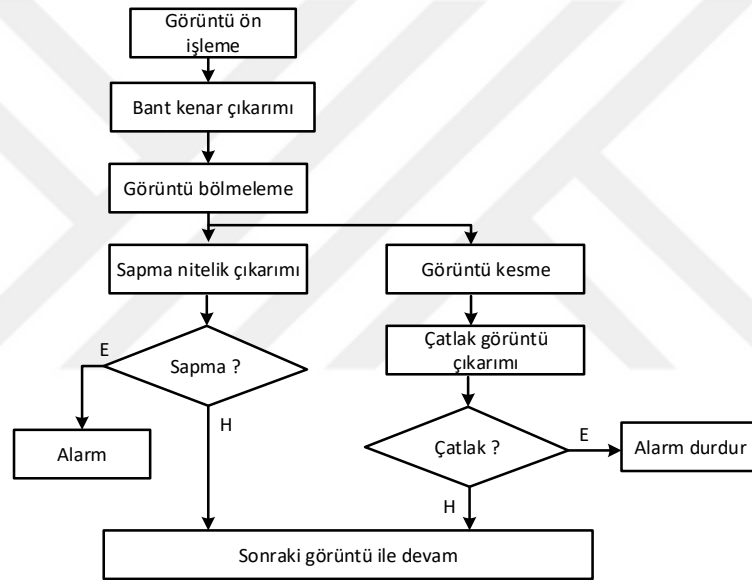


Şekil 1.17. Bisküvi çatlak tespiti için önerilen bir yaklaşım [45]

Kalite kontrol sistemlerine yönelik gerçekleştirilen bir başka çalışmada ise seri üretim tesislerinde sıklıkla kullanılan konveyör hatlarının durumu gözlemlenmiştir [46]. Bu çalışmada da bir öncekine benzer şekilde bir CCD kamera ve 5 adet doğrusal ışık kaynağı kullanılmaktadır. Sistem temel olarak dört aşamadan meydana gelmektedir. Bunlar sırasıyla görüntü toplama, görüntü iletimi, görüntü işleme ve kusur tespitidir. Çalışma kapsamında önerilen yaklaşım laboratuvar ortamında hazırlanan ve 1 metre boyunda, 6 m/s hızda dönen bir konveyör üzerinde test edilmiştir. Sistemin görüntü işleme aşamasında çeşitli matematiksel morfolojik işlemler kullanılarak gürültü azaltılması işlemi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra uygulama için adaptif bir eşik değeri belirlenmekte ve görüntü bölümlendirmesi işlemi sağlanmaktadır. Sistemin son aşamasında ise kusur tespiti işlemi gerçekleştirilmektedir. Çalışma kapsamında kullanılan deneysel düzeneğe ait bir blok diyagram Şekil 1.18’de sunulmuş olup, yine çalışma kapsamında gerçekleştirilen görüntü işleme yaklaşımına ait bir akış diyagramı ise Şekil 1.19’da verilmiştir [46].



Şekil 1.18. Literatürden örnek bir çalışma [46]

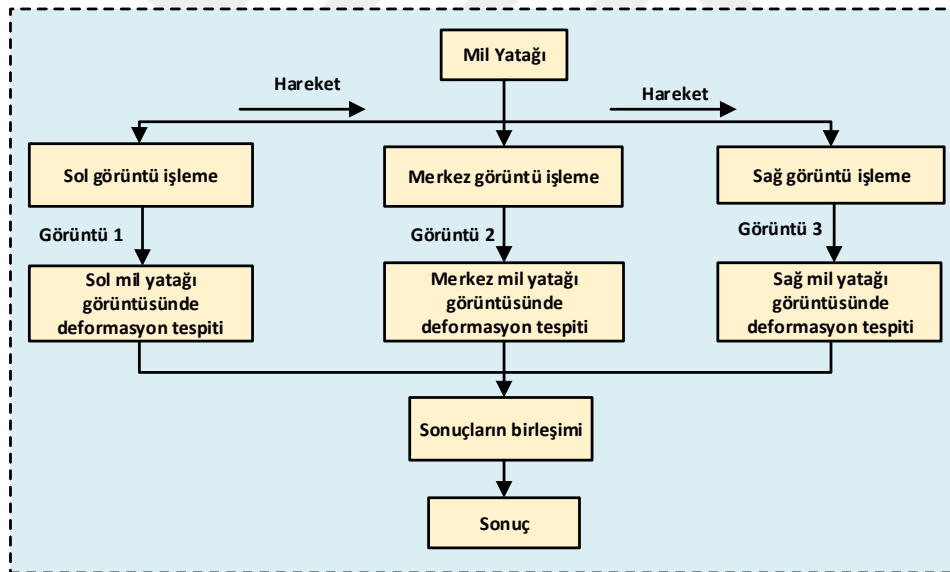


Şekil 1.19. Konveyör sistemleri için kusur tespit yaklaşımı [46]

Bilgisayar görmesi uygulamaları endüstride sıklıkla kullanılan ve kullanıcılarına önemli avantajlar sağlayan sistemlerdir [47]. Bu sistemler, üretim tesislerinde kapasite ve verimliliği artırmayı, hassas ölçümler yapmayı ve mükemmel yakın ürünleri son kullanıcıya ulaştırmayı hedeflemektedir [48, 49]. Bu sistemlerin kurulum ve bakım maliyetlerinin düşük olması, uzaktan kontrol ve müdahale imkânı sağlaması en önemli avantajlarındandır. Günümüzde bilgisayar görmesi sistemlerinin etkin kullanımı için en önemli nedenlerden biri, bu alandaki teknolojik imkânların sürekli olarak geliştirilmesidir. Kamera teknolojisindeki ilerleme ve yüksek hesaplama kapasitesine sahip bilgisayarların ortaya çıkması, bu sistemlerin maliyetlerini düşürmüş ve performanslarını arttırmıştır [50]. Üretim tesislerinde, ürünler üzerindeki ölçümler genellikle temaslı ve temassız olmak üzere

iki farklı şekilde yapılmaktadır. Temaslı ölçüm yaklaşımında, uzmanlar ürünleri uzaktan incelemekte ve ürünlerin kusurlarını tamamen görsel ölçüme dayandırarak tespit etmektedir. Temassız ölçüm sistemlerinde ise, konveyörden geçen ürünler bir veya daha fazla kamera sistemi ile kontrol edilmekte ve bir makine görme sistemi ile ölçüm işlemine tabi tutulmaktadır [51].

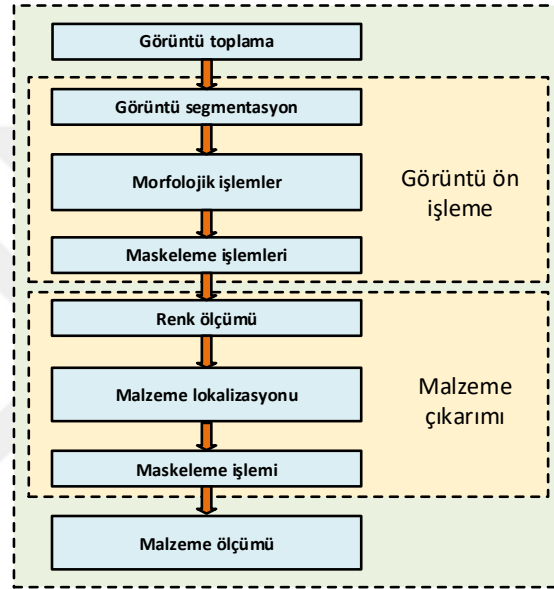
Bilgisayarlı görü uygulamaları konusunda literatürde çok çeşitli araştırma ve yöntemler sunulmaktadır. Özellikle bu çalışmaların başında yüksek hızlı ürün sayımı, yüksek hassasiyetli ölçüm ve ürünler üzerindeki kusurların tespit edilmesi gibi konular gelmektedir [45, 52]. Bu amaçla gerçekleştirilen çalışmaların birinde, rulman yüzeylerini kontrol etmek için bir bilgisayar görmesi sistemi geliştirilmiştir. Ek olarak, yüzeydeki deformasyonları kontrol etmek için yeni bir inceleme algoritması önerilmiştir. Testler yaklaşık 5000 veri ile yürütülmüş ve önerilen yaklaşımın yaklaşık %1 hata oranıyla çalıştığı gözlenmiştir [53]. Bu yaklaşımı özetleyen bir blok diyagram Şekil 1.20’de sunulduğu gibidir.



Şekil 1.20. Rulman yüzey kontrolü için önerilen bir yaklaşım [53]

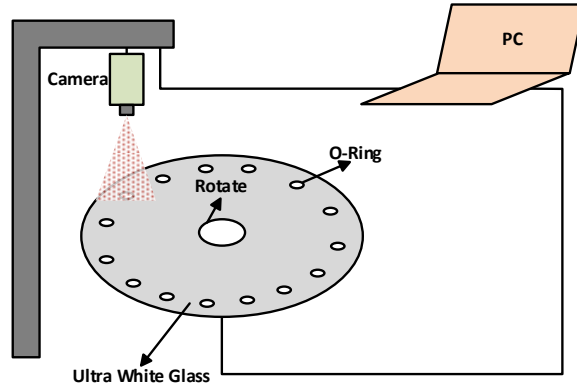
Konuyla ilgili yapılan bir başka çalışmada ise, inceleme ve kontrol için patatesler tercih edilmiştir. Öncelikle, CCD kamera ile alınan patates görüntülerine çeşitli görüntü işleme algoritmaları uygulanmış ve patateslerin sınırları tespit edilmiştir. Bu işlemi takiben destek vektör makineleri kullanılarak tespit edilen patatesler sınıflandırılmıştır. Sınıflandırma sürecinde, patatesler sağlıklı ve kusurlu olarak iki gruba ayrılmıştır. Elde edilen sonuçlar, destek vektör makinelerinin ürünleri yüksek doğrulukla sınıflandırdığını göstermiştir [54].

Bilgisayar görmesi üzerine yapılan bir başka çalışmada, pastörize peynirlerin muhteviyatının miktarı ve dağılımı üzerine bir kontrol uygulaması geliştirilmiştir. Çalışmanın ilk bölümünde, alınan görüntülerde peynirin sınırlarının bulunması sağlanmıştır. Bu işlemi takiben, peynir yüzeyinde görünen içeriğin miktarının ve dağılımının belirlenmesi için bir uygulama geliştirilmiştir. Uygulamada aynı zamanda iki farklı test kümesi kullanılmış olup, yaklaşık %85'lik bir performans elde edilmiştir. Önerilen bu yaklaşımı özetleyen bir akış diyagramı Şekil 1.21'de sunulmaktadır [55].



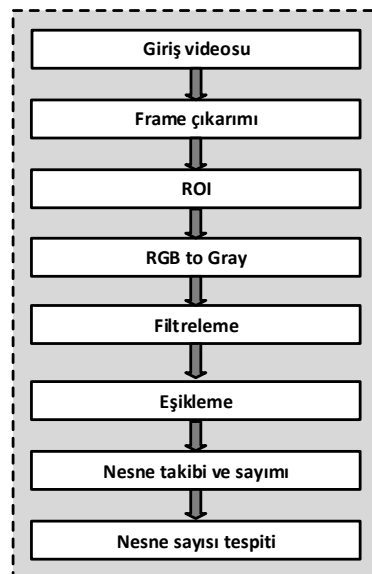
Şekil 1.21. Peynir içerisinde yer alan malzemelerin belirlenmesi [55]

Gadelmawla [56], düz dişlilerin ölçümü ve kontrolü için bir bilgisayar görmesi uygulaması geliştirmiştir. Önerilen yaklaşım görüntü işleme ve dişli algoritmasından meydana gelmektedir. Dişli algoritması bölümünde dış çap, merkez çap ve dişli sayısını belirlemek için çeşitli algoritmalar geliştirilmiştir. Yapılan testlerde önerilen yaklaşımın 0.101 mm'lik bir hata oranı ile sonuçlandığı gözlemlenmiştir. Peng ve ark. [57] endüstride yaygın olarak kullanılan O-ringlerin tespitini yapmak için bir bilgisayar tabanlı görme uygulaması geliştirmiştir. Önerilen yaklaşımla, yüzey kusurları, O-halkalarının iç ve dış çaplarının ölçülmesinin yanı sıra bir sınıflandırma algoritması geliştirilmiştir. Deneysel sonuçlar, önerilen sisteminin O-halkaları için yüksek hassasiyet ve doğrulukla çalıştığını göstermiştir. Gerçekleştirilen bu çalışmayı özetleyen bir blok diyagram Şekil 1.22'de sunulmaktadır.



Şekil 1.22. O-ring için önerilen sistemin deneysel düzeneği [57]

Bilgisayar görmesi odaklı bir başka alan da ürün sayımıdır. Bölüm başında da belirtildiği üzere, bu tarz sistemleri kullanmadan bu gibi kontrol işlemlerini yüksek hız ve hassasiyetle gerçekleştirmek oldukça zordur. Baygın ve diğ. [58], gerçekleştirdiği bir çalışmada konveyör üzerinde yüksek hızda geçen ürünlerin saydırılması işlemini gerçekleştirmiştir. Uygulama kapsamında 60 fps hızında bir kamera ve konveyörden geçen ürünlerin görüntüleri gerçek zamanlı olarak alınmış ve işlenmiştir. Bu konuda yapılan bir başka çalışmada ise, ilaç tabletlerindeki nesnelerin sayımı için bir uygulama geliştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, yüksek hızlı sayma işleminin bu çalışmada önerilen yaklaşıma göre yapılabileceğini göstermiştir. Bu çalışmaya ait bir akış diyagramı ise Şekil 1.23’de sunulduğu gibidir [59].



Şekil 1.23. Literatürde önerilen bir yaklaşım [59]

Bilgisayar görmesi tabanlı kalite kontrol yaklaşımları birçok farklı endüstriyel alanda sıklıkla kullanılmaktadır. Bölüm başında da belirtildiği üzere günümüzde paket ürünlerin son kullanıcıya oldukça hızlı ve kusursuz bir şekilde teslim edilmesi gerekmektedir. Bu noktada devreye giren bilgisayar görmesi tabanlı kalite kontrol sistemleri bir veya birden fazla sayısal kamera aracılığıyla ortamdan toplamış olduğu görüntüyü işleyerek gerekli öznitelikleri tespit etmektedir. Son olarak tespit edilen bu özelliklere göre kusurlu ürünler seri üretim hattından uzaklaştırılmakta ve son kullanıcıya hatasız yakın ürünler teslim edilebilmektedir.

1.1. Endüstriyel Kalite Kontrol Sistemlerindeki Eksiklikler

Kalite kontrol sistemleri temel olarak bir üretim sürecinin performansını arttırmayı hedefleyen ve meydana gelebilecek hatalara karşı önceden önlem alabilmeye olanak sağlayan süreçlerin bütününe verilen addır. Kalite kontrol sistemlerinde, sistem ile ürün arasında doğrusal bir ilişki mevcuttur. Başka bir deyişle kullanıcılar üretim sistemlerindeki her bir parametreyi kontrol altına alabilirlerse ürün özelliklerini de doğrudan kontrol altına alabilirler anlamına gelmektedir. Kalite kontrol sistemlerinden beklenen faydalar aşağıda maddeler halinde verildiği gibidir:

- Üretimde kalitesizliği engellemek
- En az maliyetler ile hızlı ve etkili bir kalite muayene sistemi oluşturmak
- Ürünlerde beklenenin dışındaki değişimlerin önceden tespit edilip hatalı parça sayısını azaltmak
- İşçi ve makine kayıp zamanlarını azaltıp üretimi artırmaktır [60, 61].

Kalite kontrol yaklaşımlarının en temel amacı, tüketici ve üreticinin genel gayesini ekonomik koşullar altında karşılayabilmek ve buna bağlı olarak hem üretici hem de tüketici tarafında maksimum verimi sağlayabilmektir. Ayrıca bu sistemlerin bir diğer amacı yüksek kaliteli mal veya hizmet üreterek iç ve dış pazarlarda tüketicilerin ihtiyaçlarını en optimum kalite ve seviyede karşılamaktır. Bu süreçlere bağlı olarak geliştirilen kalite kontrol sistemlerinde teorik ve pratik anlamda çeşitli sıkıntılar yaşanabilmektedir. Bu sıkıntıların bazıları maddeler halinde aşağıda sunulduğu gibidir:

- **Maliyet:** Kalite kontrol sistemlerinin en büyük dezavantajlarından birisi maliyettir. Özellikle ilk kurulum maliyetlerinin yüksek olduğu bu sistemler, her ne kadar üretim sürecinde belirli avantajlara sahip olsa da, kullanıcılar genellikle bu ilk maliyet sebebiyle tercih etmemektedir. Fakat günümüz teknolojisinde bu maliyetler her geçen gün azalmasına karşın daha kompleks sistemler üretilmektedir. Özellikle bir uzman görüşüne dayanmadan ölçüm sağlayan bu sistemler, çok kısa süreler içerisinde kendisini amorti edebilmekte ve üreticiyi kâra geçirebilmektedir. Fakat bu noktada da kullanıcının isteklerini tam olarak belirleyebilmesi ve bu istekleri karşılayabilecek sistemleri temin edebilmesi oldukça önemlidir. Aksi takdirde hedeflenenler ile elde edilenler birbirini tutmayacak ve süreç başarısızlıkla sonuçlanacaktır.
- **Statik Uygulamalar:** Kalite kontrol sistemleri genellikle kullanıcılarının belirli gereksinimlerini karşılayabilecek nitelikte tasarlanmış yapılardır. Bu sebepten ötürü geliştirilen kalite kontrol yazılımları genel bir yapıya sahip olmakta ve kullanıcılarına sabit işlemleri yapabilme kabiliyeti sunmaktadır. Piyasada çok çeşitli kalite kontrol yazılımları mevcut bulunmaktadır. Fakat maliyet performans durumu düşünüldüğünde bu yazılımlar ya yetersiz kalmaktadır ya da oldukça kompleks olmaktadır. Başka bir deyişle kullanıcının doğrudan alıp rahatlıkla kullanabileceği, başka üretim süreçlerine entegre edebileceği ve bu işlemi az maliyetle sağlayabileceği sistemler yok denecek kadar azdır. Bu noktadaki bir diğer önemli husus ise kullanıcıların mevcut üretim sistemlerini bu kalite kontrol sistemlerine göre düzenleme gereksinimidir. Yani kullanıcı kamerası ve yazılımıyla bir bütün olarak sistem aldığı anda, mevcut üretim sürecinde kalite kontrol sisteminin stabil çalışabilmesi için bazı değişiklikler yapmak zorundadır. Bu durumda kullanıcıları oldukça zorlayan ve ekstra maliyetler çıkaran konulardandır.
- **Çevresel Koşullara Bağımlılık:** Kalite kontrol sistemlerinin sürekli ve düzgün performansla çalışabilmesi için üretim tesislerinin belirli bölgelerinin ıslık, nem gibi çevresel koşullardan arındırılması gerekmektedir. Örneğin kameranın kapalı bir kutu içerisine alınması, kameraya bağılı bir flaş yerleştirilmesi, flaş ve kameranın senkron bir şekilde çalışabilmesi bu çevresel koşulları ortadan kaldırabilmek için bazı gereken durumlardandır.

- **Uzaktan İzleme ve Dökümantasyon:** Kalite kontrol sistemlerindeki en önemli eksikliklerden birisi de sistemin uzaktan izlenebilirliği ve dökümantasyonudur. Online çalışan kalite kontrol sistemleri olduğu gibi, offline çalışan sistemler de çoğunluktadır. Bu durum üreticinin aleyhine olan bir konudur. Bir diğer konu ise dökümantasyondur. Başka bir deyişle üretim sürecinin raporlanmasıdır. Kalite kontrol yaklaşımlarının teorideki en önemli avantajları sürekli olarak izlenebilirlik ve raporlama konusudur. Fakat bu sistemler genellikle kullanıcılarına bu konuda çözüm sunamamakta ve üreticiler üretim süreçlerini tam olarak gözlemleyememektedir. Kalite kontrol sistemlerinde üreticilere süreçler ile ilgili detaylı rapor sunmak ve istatistiki bilgiler verebilmek, kullanıcıların performansını arttıracak en önemli unsurdur.
- **Destek:** Kalite kontrol sistemlerinde üretici firmalara ve kullanıcılara anında destek sunabilmek oldukça önemli bir konudur. Özellikle yüksek kapasitede üretim yapan tesislerin kalite kontrol sistemleri göz önüne alındığında, bu sistemlerde yaşanabilecek herhangi bir problem telafisi mümkün olmayacak zararları da beraberinde getirecektir. Maddi olarak yaşanabilecek kayıpların yanı sıra üretici firmanın yaşayabileceği muhtemel marka itibarı sıkıntısı, firmayı gerek maddi gerekse manevi çok büyük sıkıntılara sokabilecektir. Bu sebepten kalite kontrol sistemi kullanıcılarına aktif olarak destek verebilmek en önemli konuların başında gelmektedir.
- **Yurtdışı Menşeli Ürünlere Bağımlılık:** Kalite kontrol sistemleri genellikle Amerika, Almanya gibi yüksek teknoloji üreten ülkeler tarafından üretilmekte ve yurtdışına pazarlanmaktadır. Bu durumda fiyat anlamında bu sistemleri tekelciliğe götürmekte ve üretici firmaların bu tarz sistemlere ulaşmasını ve kullanmasını zorlaştırmaktadır. Temel olarak ülkemizde de gözlemlenen bu durum neticesinde, çok büyük firmalar dışında kalan üreticiler tekrar uzman görüşüne yönelmekte ve inovasyondan uzak olan tekniklerle ölçüm işlemlerini yapmaktadır. Ayrıca yurtdışı pazarından temin edilen bu ürünler genellikle destekten yoksun ürünler olmakta ve üreticilerin ihtiyaçlarını kısmen karşılayabilmektedir. Üretici firmaların kendi anadillerinde geliştirdikleri bu yazılımları kullanmak ve inceleyebilmek genellikle mümkün olmamakta ve üreticiler oldukça büyük sıkıntılar yaşamaktadır.

1.2.Tezin Amacı ve Kapsamı

Gerçekleştirilen bu doktora tezinin temel amacı bütünsel bir kalite kontrol sisteminin oluşturulması ve kullanıma sunulmasıdır. Diğer bölümlerde de bahsedildiği üzere kalite kontrol sistemleri günümüz teknolojisinde sıklıkla kullanılan ve seri üretim sürecini doğrudan etkileyen yapılardır. Özellikle Sanayi 4.0'a geçiş sürecinin yaşandığı günümüzde bu sistemlere olan gereksinim her geçen gün katlanarak artmaktadır. Gerçekleştirilen bu tez çalışmasında da bütünsel bir kalite kontrol sistemi elde edebilmek için bir sayısal kamera prototipi tasarımı, kamera ile entegre çalışabilen kalite kontrol yazılımları, sistemin kontrol edilebildiği bir arayüz tasarımı ve tüm bu sistemi tek bir noktada toplayabilen ana işlem birimi tasarımı yapılmıştır.

Doktora tezi süresince gerçekleştirilen bu uygulamalar neticesinde bir kalite kontrol sistemi elde edilmiş ve sistemin bir bütün olarak kullanılabilirliği sağlanmıştır. Gerçekleştirilen bu tez çalışması temel olarak 3 ana bölümden meydana gelmektedir. Bu bölümlerden ilki olan sayısal kamera prototipi tasarımında tamamen özgün olarak ve FPGA kullanılarak yüksek performansta çalışabilen bir sayısal kamera elde edilmiştir. 0.3 MP ile 5 MP arasında değişebilen çözünürlüğe sahip olan bu sayısal kamera saniye de 100 görüntü karesi alabilecek şekilde dizayn edilmiştir. Ayrıca gerçekleştirilen bu prototipin UDP iletişim protokolünü kullanarak ana işlem birimi ile haberleşmesi sağlanmış olup saniyede 125 MB veri aktarım hızına erişilmiştir. Tez süresince gerçekleştirilen çalışmaların ikinci bölümünde ise kalite kontrol algoritmalarının geliştirilmesine odaklanılmıştır. Bu aşamada seri üretim tesislerinde sıklıkla kullanılan ürün sayma, boyut ölçüm ve hata tespiti gibi konulara yönelik özgün algoritmalar geliştirilmiş ve görüntü işleme tabanlı çalışan bu algoritmalar kullanılabilir hale getirilmiştir. Tez çalışmasının üçüncü aşamasında ise gerçekleştirilen bu modüllerin tek bir noktada toplanarak sistemin bir bütün halinde çalışabilmesine odaklanılmıştır. Bu amaç doğrultusunda bir ana işlem birimi tasarımı gerçekleştirilmiş ve daha önceden tamamlanmış olan sayısal kamera prototipi ile kalite kontrol algoritmalarının tek bir platform üzerinde bütünleşik olarak çalışabilmesi sağlanmıştır. Ayrıca bu aşamada hazırlanan bir arayüz ile hem sayısal kamera prototipinin hem de tez süresince gerçekleştirilen çeşitli makine görmesi tabanlı kalite kontrol algoritmalarının kontrol edilebilmesi ve izlenebilmesi sağlanmıştır.

Tez çalışması süresince gerçekleştirilen sayısal kamera prototipi yüksek veri işleme ve hızlı iletişim kurabilme özelliklerinden ötürü FPGA kullanılarak geliştirilmiştir. Bu amaç

doğrultusunda Altera firması tarafından üretilen ve Cyclone IV serisi işlemci kullanan DE2-115 kodlu FPGA geliştirme kartı kullanılmıştır. Çalışma süresince gerçekleştirilen algoritmalar, haberleşme sistemi ve kamera modülünden görüntü alımı tamamen özgün olarak gerçekleştirilmiş ve başarıyla sonuçlandırılarak test edilmiştir. Yine bu süreçte ana işlem birimi için gerçekleştirilen yazılım ile görüntü verileri bilgisayar ortamına aktarılmış ve tek görüntü karesi elde edilecek şekilde birleştirilmiştir. Tez süresi boyunca elde edilen bu bütünlük kalite kontrol sistemi ve yazılımları gerçek zamanlı olarak test edilmiş olup, elde edilen sonuçlar neticesinde önerilen sistemin performansı ortaya konulmuştur. Doktora tez süresi boyunca kalite kontrol sistemleri üzerine yoğun literatür araştırmaları yapılmış ve bu çalışmaların temel eksiklikleri belirlenmiştir. Özellikle tamamen özgün çalışabilen sistemlerin pek bulunmadığı bu alana tez süresince yapılan bilimsel çalışmalar ile katkı sağlanmış olup, gerçekleştirilen bu bilimsel yayın çalışmaları aşağıda sunulduğu gibidir:

- Baygin, M., Karakose, M., Sarimaden, A., and Akin, E., 2018. Implementation of UDP Communication Protocol with FPGA for Industrial Cameras, 7th International Conference on Advanced Technology & Sciences (ICAT'18), Antalya, Turkey.
- Baygin, M., and Karakose, M., 2018. Deep Learning based Approaches for Machine Vision Inspection Applications, 7th International Conference on Advanced Technology & Sciences (ICAT'18), Antalya, Turkey.
- Karaköse, M., Zorlu N. M., Baygin, M., Sarimaden, A., and Akin, E., 2017. A Machine Vision Approach Using Real Time Parallel Computing for Fuzzy Based Inspection Systems with Multiple Cameras, The 5th International Fuzzy Systems Symposium (FUZZYSS'17), Ankara, Turkey.
- Karaköse, M., Muezzinoglu, T., and Baygin, M., 2017. Development of Vision Based Multiple Anomaly Detection Algorithm Using Fuzzy System for Moving Objects on Conveyor, The 5th International Fuzzy Systems Symposium (FUZZYSS'17), Ankara, Turkey.
- Yetis, H., Baygin, M., and Karakose, M., 2016. A New Micro Genetic Algorithm Based Image Stitching Approach for Camera Arrays at Production Lines, The 5th International Conference on Manufacturing Engineering and Process (ICMEP), Istanbul, Turkey.

- Baygin, M., Karakose, M., Sarimaden, A., and Akin, E., 2017. Machine Vision based Defect Detection Approach using Image Processing, International Conference on Artificial Intelligence and Data Processing (IDAP), Malatya, Turkey.
- Baygin, M., Karakose, M., Sarimaden, A., and Akin, E., 2017. A New Fast Measurement and Inspection Approach Based On Machine Vision, 4rd International Conference on Advanced Technology & Sciences (ICAT'17), Istanbul, Turkey.
- Baygin, M., Karakose, M., Sarimaden, A., and Akin, E., 2017. An Image Processing based Object Counting Approach for Machine Vision Application, International Conference on Advances and Innovations in Engineering (ICAIE), Elazig, Turkey.
- Baygin, M., and Karakose, M., 2015. A new image stitching approach for resolution enhancement in camera arrays, 8th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), Bursa, Turkey.
- Karakose, M., Baygin M., Aydin, I., Sarimaden, A., and Akin, E., 2016. Endüstriyel Sistemlerde Arkaplan Çıkarımı Tabanlı Hareketli Nesne Tespiti ve Sayılması için Yeni Bir Yaklaşım, Muş Alparslan Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi.

Tez süresi boyunca bir adet ulusal dergi çalışması, dokuz adet uluslararası bildiri çalışması ortaya konmuştur. Gerçekleştirilen bu tez çalışması ve bilimsel yayınlar ile kalite kontrol sistemlerine farklı bir bakış açısı getirilerek makine görmesi tabanlı bütünsel bir kalite kontrol sistemi önerilmiştir. Çalışma boyunca önerilen bu kalite kontrol sistemi sonucunda seri üretim tesislerinde kullanılabilecek niteliklere sahip bir sayısal kamera prototipi elde edilmiş olup, bu sistemle entegre bir şekilde çalışabilen ürün sayma, boyut ölçüm ve kusur tespit işlemlerini gerçekleştirebilen bir kalite kontrol yazılımı elde edilmiştir.

1.3.Tezin Yapısı

Gerçekleştirilen bu doktora tez çalışması 5 ana bölümden oluşmaktadır. Bu bölümlerden ilki giriş bölümü olup, sayısal kamera sistemlerinin temel özellikleri ve kalite kontrol yaklaşımları gibi temel konular hakkında bilgi vermektedir. Literatürde gerçekleştirilen bazı sayısal kamera modelleri, bilgisayar görmesi yaklaşımları ve bütünsel kalite kontrol sistemleri bu bölümde incelenmiş olup, yapılan literatür araştırmaları da bu bölümde görsel öğelerle desteklenerek sunulmuştur. Ayrıca yine bu bölümde endüstriyel sistemlerdeki eksiklikler incelenmiş ve maddeler halinde detaylı bir şekilde verilmiştir. Tezin giriş kısmının son bölümünde ise bu doktora tezinin amaç ve kapsamı detaylı bir şekilde sunulmuştur.

Tez çalışmasının ikinci bölümünde makine görmesi kavramı ve bu kavramın detayları incelenmiştir. Yine bu bölümde de literatürden çeşitli örnekler verilmiş ve kullanılan yöntemlerin detayları incelenmiştir. Ayrıca makine görmesi kavramının kalite kontrol sistemleri ile olan ilişkisine ait temel bilgiler yine bu bölümde sunulmaktadır.

Tez çalışmasının üçüncü bölümünde doktora tezi süresince gerçekleştirilen sayısal kamera prototipinin tasarımına ve geliştirilmesine ait detaylar verilmektedir. Bu bölümde tasarım sürecinde yaşananlar, tez süresince elde edilen sayısal kamera prototipleri ve tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen UDP tabanlı haberleşme protokolüne ait detaylar paylaşılmıştır.

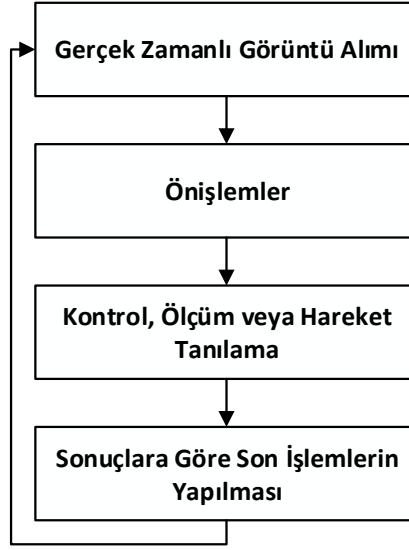
Dördüncü bölümde, tez süresince gerçekleştirilen akıllı kalite kontrol algoritmalarının detayları verilmiştir. Bu bölümde gerçekleştirilen algoritmalarından olan ürün sayma, boyut ölçümü ve kusur tespiti yöntemleri alt bölümler halinde sunulmuş ve bu yöntemlerin detayları paylaşılmıştır. Ayrıca yine bu bölümde gerçekleştirilen uygulamaların test sonuçlarına ait bilgiler paylaşılmış ve önerilen yöntemlerden elde edilen deneysel veriler sunulmuştur.

Tez çalışmasının beşinci ve son bölümünde tez çalışması boyunca gerçekleştirilen işlemler değerlendirilmiş olup, geliştirilen sayısal kameranın maliyet analizi yapılmıştır. Ayrıca önerilen kalite kontrol sisteminin temel avantaj ve dezavantajları, kullanıldığı sektörler bu bölümde sunulmuş olup, geleceğe yönelik hedefler ve sonuçlar yine bu bölümde tartışılmıştır.

2. MAKİNE GÖRMESİ

Makine görmesi, genellikle endüstride otomatik kontrol için kullanılan görüntü işleme tabanlı yaklaşımlara denilmektedir. Tanım olarak bilgisayarlı görmeye oldukça benzese de kısıtlama farklarından ötürü tamamen bilgisayarlı görme ile aynı değildir. Makine görmesi tabanlı çözüm önerilerinin, bilgisayarlı görme tabanlı çözüm önerilerinden kısıt olarak farkı çözüm önerilerinin işlevlerinden kaynaklanmaktadır. Makine görmesinin temelde dört adet işlevi bulunmaktadır. Bu işlevler sırasıyla; konum belirleme, ölçüm yapma, denetleme, tanılama olarak sınıflandırılmaktadır [1-3]. Makine görmesi tabanlı çözüm önerileri, otomotiv, elektronik, gıda, robotik, ambalaj ve ilaç gibi birçok farklı endüstri alanında kullanılmaktadır. Bununla beraber trafik kontrolü gibi endüstriyel olmayan alanlarda da makine görmesi tabanlı çözüm önerileri bulunmaktadır [2]. Genellikle makine görmesi ile üretim hızını ve verimliliğini arttırmak için farklı yaklaşımlarla çözümler üretilmektedir.

Makine görmesi algoritmaları iki boyutlu, üç boyutlu, lazer, X-Ray gibi farklı birçok türde görüntü üzerinde çalışabilmektedir. Bununla beraber makine görmesi algoritmaları birden fazla görüntüleme aygıtından eş zamanlı görüntü alarak bu görüntüleri birleştirmekte veya yapılan çeşitli özellik çıkarımlarından elde edilen bilgileri birleştirerek işlemlerini gerçekleştirebilmektedir. Genellikle makine görmesi tabanlı çözüm önerileri için geliştirilen sistemlerde öncelikle görüntüleme aygıtından anlık görüntü karesi yakalanmakta ve algoritmanın işlemlerini gerçekleştirebilmesi için algoritmaya tanıtılmaktadır. Daha sonra bu görüntü karesi üzerinde ön işlemler yapılarak özellik çıkarımı için görüntü uygun bir forma dönüştürülmektedir. Bu ön işlemler sırasıyla renk uzayı dönüşümleri, ikilileştirme işlemleri, kenar tespit etme yöntemleri, gürültü giderme işlemleri, morfolojik operasyonlar ve farklı görüntü işleme teknikleridir. Ön işleme adımından sonra görüntü üzerinden farklı yaklaşımda özellik çıkarımları yapılarak kontrol, hareket tanılama, konumlandırma veya ölçüm işlemleri gerçekleştirilebilmektedir. Son olarak elde edilen sonuca göre sistem kayıt, iletişim veya işlemlerin gerçekleştirildiği endüstriyel sisteme doğrudan müdahale ederek işlemlerini tamamlamaktadır. Şekil 2.1’de makine görmesi tabanlı algoritmaların genel blok diyagramı sunulmaktadır.



Şekil 2.1. Makine görmesi tabanlı çözüm sistemleri

Şekil 2.1’den de görülebileceği üzere sistem öncelikli olarak gerçek zamanlı görüntü alma işlemini gerçekleştirmektedir. Bu işlemin ardından alınan görüntü karesine çeşitli ön işlemler uygulanarak görüntünün iyileştirilmesi sağlanmaktadır. Bu aşamadan sonra amaca yönelik olarak gerekli kontrol, ölçüm veya hareket tanılama işlemleri gerçekleştirilmektedir. Bu aşamada elde edilen öz nitelikler ve gerekli bilgiler sayesinde son işlemler gerçekleştirilmekte ve algoritma sonlandırılmaktadır.

2.1. Makine Görmesi İşlevleri

Bölüm başında da belirtildiği üzere makine görmesinin işlevleri temel olarak 4 ana başlıkta sınıflandırılabilir. Bunlar sırasıyla konum belirleme, ölçüm yapma, tanılama ve denetlemedir. Makine görmesinin bu işlevlerine ait detaylar maddeler halinde aşağıda sunulmaktadır;

- **Konum belirleme:** Konum belirleme işleviyle yürütülen makine görmesi tabanlı çözüm önerilerinin pek çok kullanım alanı bulunmaktadır. Örneğin üretim sırasında, nesnelerin anlık görüntülerinden yararlanarak konum tespiti yapılabilir. Tespit edilen bu konumlar raporlamalar için kayıt edilebilir ya da anormal bir konum değişikliğinde üretim sistemine çözüm önerisi için geliştirilen sistem tarafından müdahale edilebilir. Makine görmesi konum belirleme işlemini çok hızlı bir

biçimde gerçekleştirilebilmekte ve üretim verimliliği geliştirilen görüntü işleme tabanlı yaklaşım ile arttırılabilmektedir. Konum tespitinin gerçekleştirilebilmesi için öncelikle konumu tespit edilecek nesnenin yapılacak görüntü işleme tabanlı özellik çıkarımları ile algoritma tarafından tanınması gerekmektedir. Nesne tespiti için desen eşleştirme, geometrik eşleştirme, renk tabanlı özellik çıkarımları ve boyut tabanlı özellik çıkarımları kullanılabilmektedir. Bununla beraber nesneyi tespit etmeden konum belirleme amacıyla yalnızca nesnenin görüntü üzerinde kenar ifade eden kısmının takibi de yapılabilmektedir.

- **Ölçüm yapma:** Ölçüm yapma işlevli makine görmesi uygulamaları, genellikle endüstride üretim aşamasında olan ürünlerin boyutsal özelliklerini belirlemek için kullanılmaktadır. Bir ürünün görüntü üzerinde kapladığı alanın piksel kare cinsinden büyüklüğü kullanılarak matematiksel eşitliklerle nesnenin gerçek boyutsal özelliklerine ulaşabilmek mümkün olmaktadır. Makine görmesi uygulamaları aynı anda birden fazla görüntüleme aygıtı ile nesnenin farklı açılardan yakalanmış görüntü kareleri üzerinde işlem yapılmasına da olanak sağlamaktadır. Farklı açılardan yakalanmış görüntü kareleri bazı matematiksel yöntemlerle (triangulation vb.) nesnelerin üç boyutlu uzaydaki özellik çıkarımları yapılmasını sağlayabilmektedir. Ürünlerin veya nesnelerin boyutsal özellikleri endüstri veya endüstri dışı alanlarda birçok noktada önemli bir kriterdir. Bu kapsamda makine görmesinin ölçüm yapma işlevli uygulamaları oldukça yaygın bir biçimde kullanılmaktadır.
- **Tanılama:** Tanılama işlevli makine görmesi uygulamaları, genellikle bir barkod üzerinden veya herhangi bir şekilde kodlanmış karakter dizisi içeren metinlerden, görüntüleme aygıtı aracılığıyla almış olduğu görüntü karesi üzerinden ayırma ve çözümleme işlevini yerine getirmektedir. Elde edilen bilgilere göre ürün veya nesneler birbirlerinden ayırt edilebilmektedir.
- **Denetleme:** Denetleme işlevli makine görmesi uygulamaları, bir nesnenin veya ürünün varlık, yokluk veya başka boyutsal, geometrik özelliklerini ve arıza gibi durumlarını kontrol etmektedir. Endüstride, üretilen ürünün müşteriye ulaştırılmadan önce tam ve kusursuz olduğunun garanti edilebilmesi oldukça önemlidir. Bu kapsamda makine görmesi uygulamaları ile ürünün yukarıda belirtildiği gibi bazı özelliklerinin denetlenmesi ve olağan dışı özellikli ürünlerin kayıt altına alınarak müşteriye kusurlu

ürünün teslim edilmesinin önüne geçilmelidir. Makine görmesi uygulamalarının denetleme mekanizması sayesinde bu kontroller kolaylıkla gerçekleştirilebilmektedir.

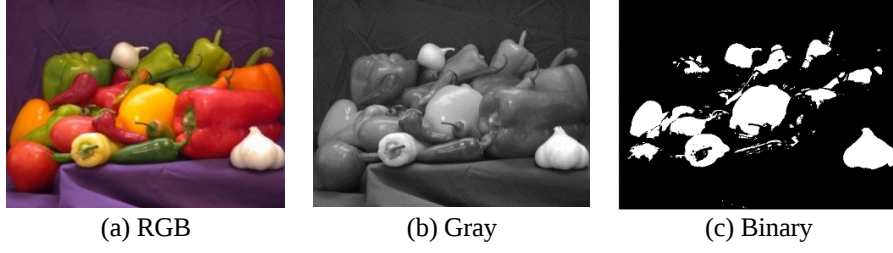
2.2. Temel Görüntü İşleme Teknikleri

Görüntü kavramı fiziksel bir değişken olan renklerin ayrı bir biçimde görüntü matrisleri ile ifade edilmesidir. Görüntü matrisinde bulunan ve renk değerlerini tutan her bir eleman piksel olarak adlandırılmaktadır. Her piksel görüntünün ifade edildiği renk uzayına göre hafızada farklı değerlerle yer kaplamaktadır ve buna göre minimum ve maksimum değerleri değişmektedir. Görüntü işleme kavramı ise, ayrı zamanlı bir işaret olarak kabul edilebilen görüntüler üzerinden bilgi elde edilerek ya da var olan görüntü üzerinde değişiklikler yapılarak uygulanan bir çeşit işaret işlemedir. Görüntü işleme teknikleri temelde yaptığı işlemleri piksellerin değerleri ile gerçekleştirmektedir. Bununla beraber piksellerin komşulukları, gradientleri, görüntünün fourier dönüşümüne tabii tutulmuş hali (frekans uzayı) gibi değerlerden de faydalanmaktadır.

Makine görmesi uygulamalarında temel görüntü işleme teknikleri oldukça büyük öneme sahiptir. Özellikle görüntünün iyileştirilmesi ve daha net sonuçlar elde edilebilmesi için kullanılan bu teknikler genellikle görüntü ön işleme adımları olarak adlandırılmaktadır. Örneğin renk uzayı dönüşümü ile görüntüdeki bazı ayrıntılar daha net bir şekilde elde edilebilmekte, eşikleme yöntemi ile görüntü belirli renk aralıklarına örneklenebilmektedir. Bu şekilde çeşitli görüntü işleme teknikleri olmasına rağmen oldukça sık kullanılan bazı teknikler alt bölümler halinde aşağıda verilmektedir.

2.2.1. Renk Uzayları

Bir sayısal kamera aracılığıyla elde edilen görüntü genellikle monochrome veya color türünde olmaktadır. Monochrome olarak belirtilen görüntü türü siyah/beyaz görüntüyü temsil ederken, color olarak adlandırılan görüntü türü ise renkli görüntüyü ifade etmektedir. Literatürde çeşitli renk uzayları bulunmaktadır. Bu renk uzaylarından en bilinenleri sırasıyla RGB, Gray, HSV, HSL, LAB, YUV, YCbCr ve Binary görüntülerdir. Kullanıcılar bu renk uzayları arasında geçişler yaparak mevcut görüntüyü iyileştirme ve istenen ayrıntıları ortaya çıkarma işlemini yapabilmektedir. Şekil 2.2’de örnek bir renk uzayı dönüşümü verilmektedir.

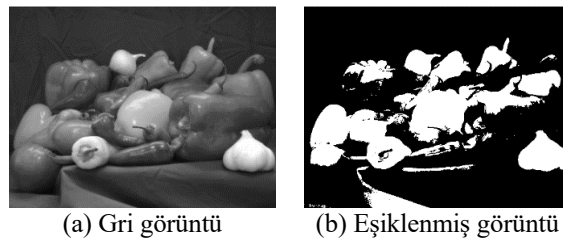


Şekil 2.2. Örnek bir görüntünün farklı renk uzaylarındaki durumları

Renk uzayları arasında geçişler genellikle çeşitli matematiksel operatörler ve bazı filtreler sayesinde gerçekleştirilmektedir. Bilineceği üzere bir görüntü karesinde yer alan veriler piksel değerleri olup, sayısal olarak belirli bir karşılığa sahiptirler. Bu sayısal değerlerin belirli matematiksel işlemlere tabi tutulması neticesinde renk uzayı dönüşümleri gerçekleştirilebilmektedir.

2.2.2. Eşikleme Yöntemleri

Bir görüntü karesinde istenmeyen detayları görüntüden elimine edebilmek amacıyla kullanılan yöntemlerin bütününe eşikleme adı verilmektedir. Eşikleme işlemi en genel tanımıyla kullanıcı veya makine tarafından belirlenen bir değerin altında kalan değerlere sıfır, üstünde kalan değerlere ise bir atanması işlemidir. Gerçekleştirilen bu işlem sayesinde görüntü 0-1 renk uzayına örneklenmiş ve görüntüdeki bazı detaylar daha net bir şekilde elde edilmiş olacaktır. Literatürde eşikleme işlemi için çeşitli yöntemler mevcutlar olmasına rağmen en bilinen yöntemler tekli eşikleme ve otsu eşikleme yöntemleridir. Tekli eşikleme işleminde görüntü karesinde yer alan piksel değerleri, daha önceden belirlenen eşik değerine göre örneklenmektedir. Otsu eşikleme yönteminde ise görüntü karesinde yer alan piksel değerlerinden belirli hesaplamalar neticesinde bir veya birden fazla eşik değeri belirlenmekte ve görüntü karesi bu belirlenen eşik değerlerine göre örneklenmektedir. Şekil 2.3’de örnek bir görüntü karesi için eşikleme sonucu verilmektedir.



Şekil 2.3. Örnek bir görüntü karesinin eşiklenmesi

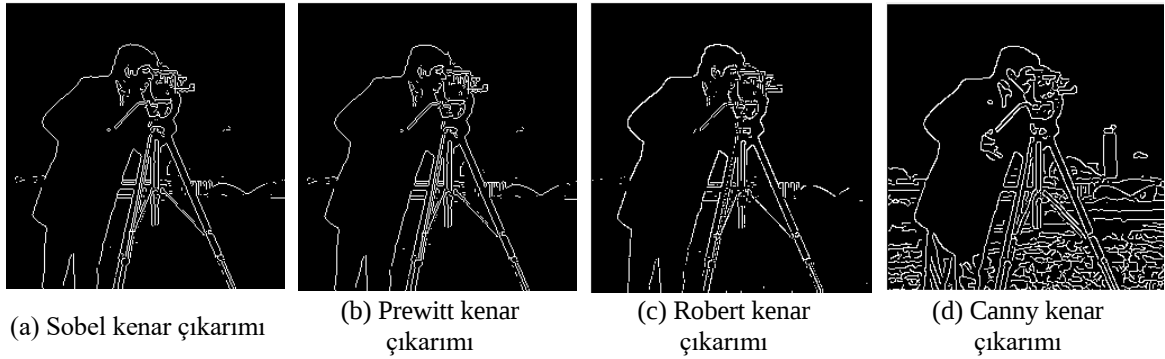
2.2.3. Kenar Çıkarım Yöntemleri

Görüntü işleme tekniklerindeki en önemli kavramlardan birisi de görüntü karesinde kenar çıkarım işleminin gerçekleştirilmesidir. Genellikle belirli ön işlemlerden geçirilmiş olan görüntü karesine bazı filtreler uygulanması neticesinde görüntüde yer alan nesnelerin kenarları elde edilebilmektedir. Kenar çıkarım yöntemleri makine görmesi uygulamalarında son derece büyük öneme sahiptir. Literatürde çeşitli kenar çıkarım yöntemleri bulunmaktadır. Bu yöntemlerden en bilinenleri sırasıyla Robert, Prewitt, Sobel ve Canny kenar çıkarım yöntemleridir. Bu yöntemlere ait kernel matrisleri sırasıyla Denklem 2.1, 2.2 ve 2.3’de verilmiştir. Ayrıca, bu yöntemlerden elde edilen örnek sonuçlar Şekil 2.4’de verilmektedir.

$$S_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, S_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, G_y = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

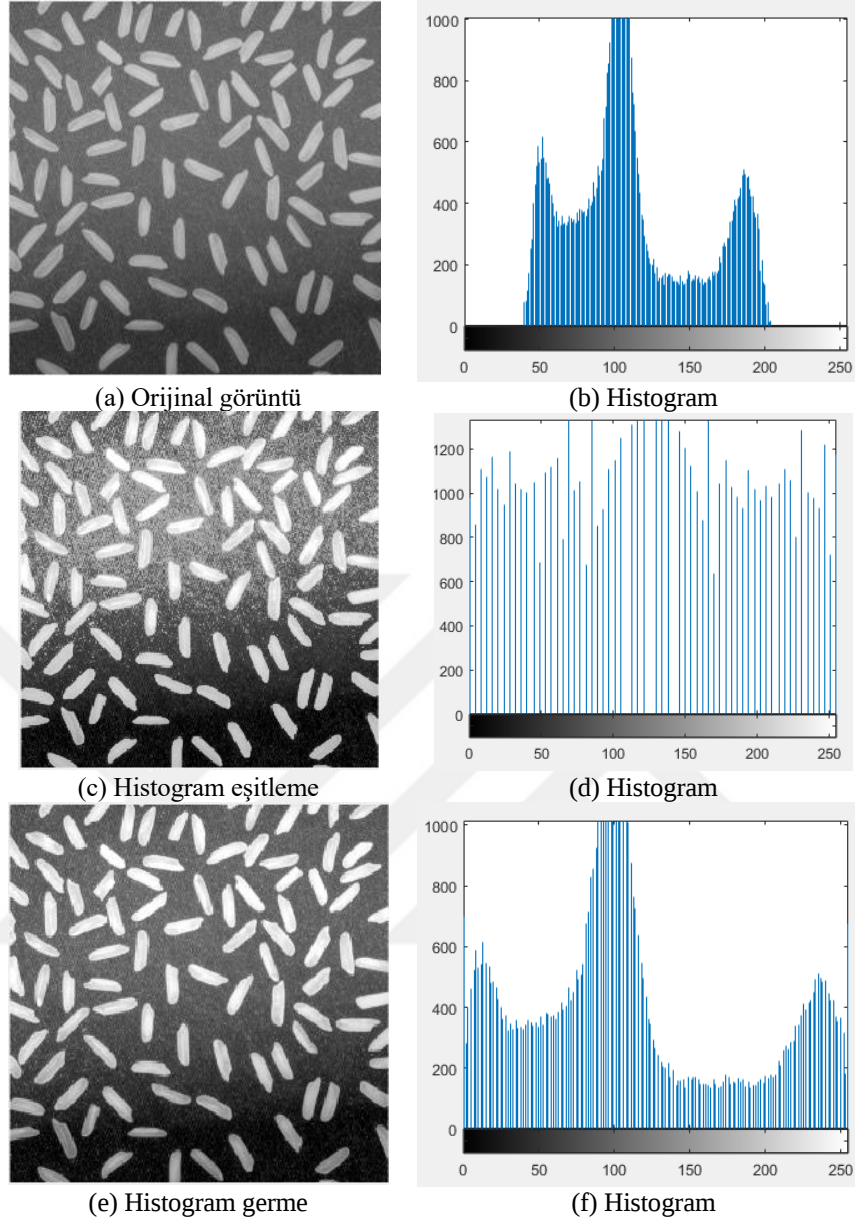
$$G_x = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}, G_y = \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$



Şekil 2.4. Örnek bir görüntü karesine kenar çıkarım uygulanması

2.2.4. Histogram Kavramı

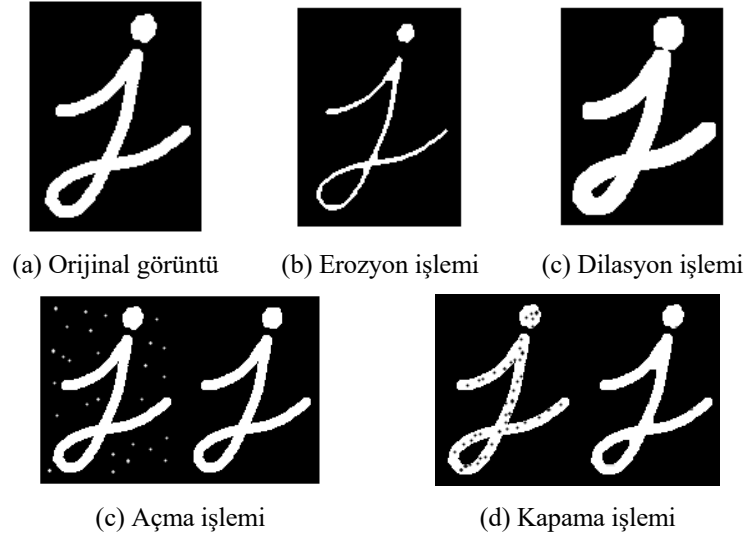
Histogram işlemi temel olarak bir görüntü karesinde yer alan her piksel değerinin kaç adet olduğunun gösterilmesidir. Histogram yöntemi kullanılarak özellik çıkarım işlemleri yapılabildiği gibi histogram germe ve histogram eşitleme gibi yöntemler ile çeşitli makine görmesi uygulamaları geliştirilebilmektedir. Şekil 2.5’de örnek bir görüntü için histogram, histogram germe ve histogram eşitleme yöntemlerinin sonuçları verilmektedir.



Şekil 2.5. Örnek bir görüntü karesinde histogram eşitleme ve germe işlemleri

2.2.5. Morfolojik İşlemler

Görüntü işleme yöntemlerinde sıklıkla kullanılan bir diğer teknik ise görüntüye çeşitli morfolojik işlemlerin uygulanmasıdır. Görüntü ön işleme adımlarından biri olan morfolojik işlemler sayesinde görüntüde inceltme, daraltma gibi işlemler gerçekleştirilebilmektedir. En çok bilinen morfolojik işlemler sırasıyla erozyon, dilasyon, açma ve kapama işlemleridir. Bu morfolojik işlemlerden açma ve kapama işlemleri erozyon ve dilasyon işlemlerinin belirli sırada işletilmesi neticesinde gerçekleştirilmektedir. Şekil 2.6'da yukarıda belirtilen morfolojik işlemlerin örnek sonuçları verilmektedir.

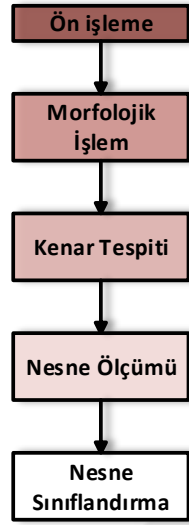


Şekil 2.6. Örnek bir görüntü karesine morfolojik işlemlerin uygulanması

Şekil 2.6'dan da görülebileceği üzere morfolojik işlemlerden birisi olan açma işleminde görüntüde yer alan gürültüler ortadan kaldırılmaktadır. Bu sayede daha pürüzsüz bir görüntü elde edilmektedir. Şekil 2.6-(d)'de verilen görüntüde ise gerçekleştirilen kapama işlemi neticesinde ana görüntü üzerinde yer alan belirsiz noktalar kaldırılmakta ve görüntü bir bütün haline getirilmektedir. Morfolojik işlemler makine görmesi tabanlı görüntü işleme uygulamalarında sıklıkla kullanılan ve kullanıcılarına son derece net görüntüler sunmaya yardımcı olan uygulamalardır.

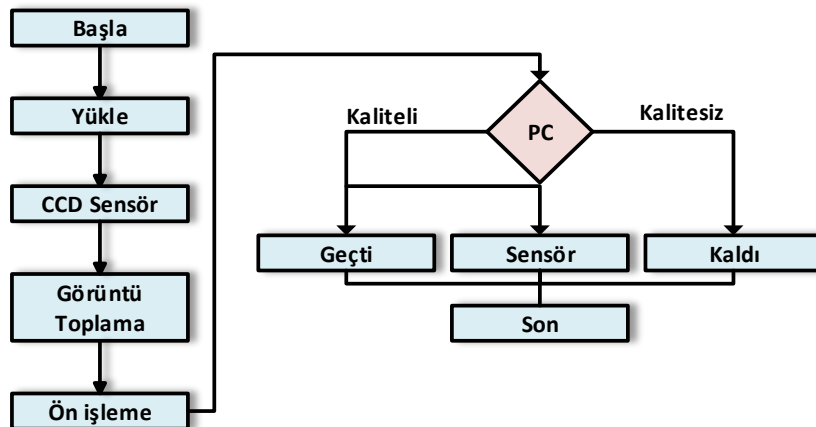
2.3. Makine Görmesi Tabanlı Kalite Kontrol Yaklaşımları

Bölüm başında da belirtildiği üzere makine görmesi tabanlı kalite kontrol yaklaşımları günümüzde birçok endüstriyel alanda sıklıkla kullanılmaktadır. Özellikle iş gücü kaybını ortadan kaldıran ve verimliliği son derece yüksek tutan bu sistemler sayesinde son kullanıcıya hatasız ve yakın ürünler teslim edilebilmektedir. Bu konu üzerine gerçekleştirilen çalışmaların birinde gıda endüstrisinde kullanılmak üzere pirinç tanelerinin kalitesini ölçen bir yaklaşım geliştirilmiştir. Bu amaçla gerçekleştirilen çalışmada görüntü işleme tabanlı bir kalite kontrol yöntemi uygulanmıştır. Deney kümesinde yer alan pirinç taneleri çeşitli görüntü işleme adımlarından geçirildikten sonra küçük, normal ve büyük diye sınıflandırılmıştır. Sınıflandırma işlemi nesnelerin boyutuna dayanarak gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen sistemi özetleyen bir blok diyagram Şekil 2.7'de verildiği gibidir [62].



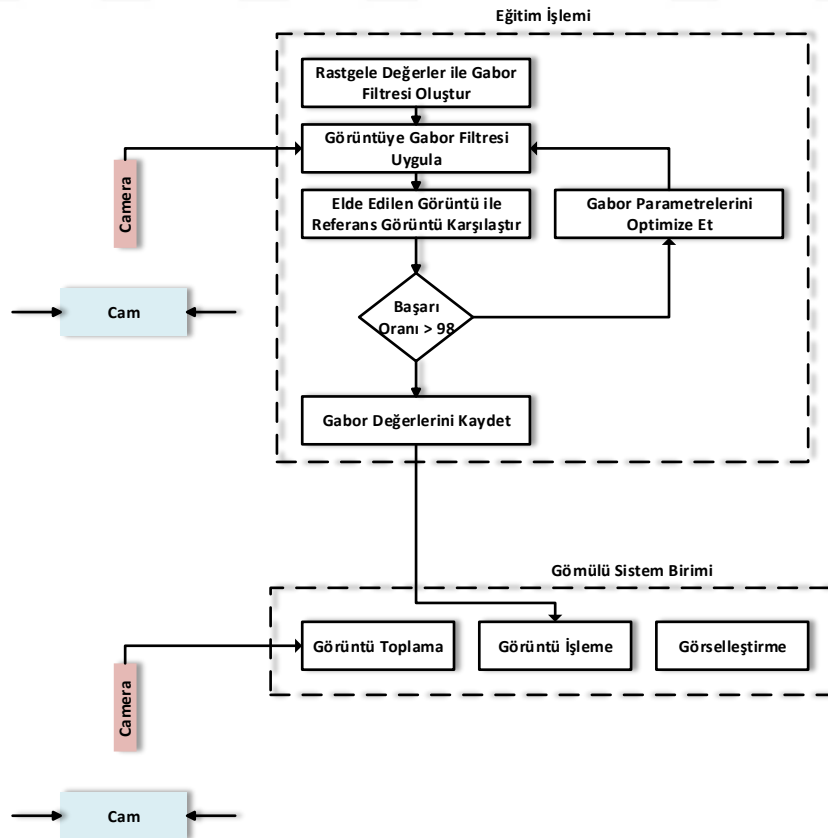
Şekil 2.7. Literatürden örnek bir çalışma [62]

Konu üzerine gerçekleştirilen bir başka çalışmada ise dişli yüzeylerinin kusur tespitine yönelik makine görmesi tabanlı bir uygulama geliştirilmiştir. Bu amaçla bir CCD tabanlı kamera kullanılarak dişlilerin görüntüsü alınmış olup, Halcon görüntü işleme kütüphanesi kullanılarak görüntülerin işlenmesi ve analizi sağlanmıştır. Gerçekleştirilen analiz işlemi neticesinde dişlinin hatalı veya hatasız olduğuna dair bir sinyal üretilmekte ve kusurlu olan dişliler üretim hattından ayrıştırılmaktadır. Makine görmesi tabanlı gerçekleştirilen bu sistemi özetleyen bir blok diyagram Şekil 2.8’de sunulmaktadır [63].



Şekil 2.8. Literatürden örnek bir çalışma [63]

Makine görmesi tabanlı gerçekleştirilen bir başka uygulamada ise ledler üzerinde yer alan deliklerin açıklıkları kontrol edilmeye çalışılmıştır. Temel olarak üç noktalı daire tespit ve klasik sinir ağları yönteminin kullanıldığı bu yaklaşım ile led üzerinde yer alan deliklerin açıklıkları seri üretim sistemleri için uygun olabilecek bir performansta belirlenmiştir. Önerilen yaklaşım sayesinde genellikle bir uzman görüşü ile gerçekleştirilen bu işlem tam otomatik hale getirilmiştir [64]. Makine görmesi üzerine gerçekleştirilen bir başka çalışmada da cam üretim sistemlerine yönelik uygulama geliştirilmiştir. Bu amaçla bir kamera, bir konveyör ve görüntü segmentasyon algoritması kullanılarak bir yaklaşım geliştirilmiştir. Sistemde öncelikli olarak konveyör üzerinde belirli bir alan dış ortamdan izole edilmiştir. Daha sonrasında konveyör üzerinde gelen cam yüzey bu alana girdiğinde kusur tespit işlemi başlatılmaktadır. Tespit işlemi sürecinde cam yüzeyi üzerindeki bölgeler hatalı veya hatasız olarak ayrıştırılmaktadır. Bu kusurların kalınlıkları temel olarak Gabor filtresi kullanılarak tespit edilmektedir. Ayrıca çalışmada kullanılan Gabor filtresinin parametreleri Gri Kurt Optimizasyonu (Gray Wolf Optimization) tekniği ile belirlenmektedir. Önerilen sistemin gerçek zamanlı testlerinde cam yüzeyindeki kusurların başarıyla tespit edildiği görülmüş ve bu aşamada en küçük kusurun 0.4 mm olduğu belirlenmiştir. Çalışma kapsamında önerilen bu yaklaşımı özetleyen bir blok diyagram Şekil 2.9’da verildiği gibidir [65].



Şekil 2.9. Literatürden örnek bir çalışma [65]

Makine görmesi sistemleri birçok farklı endüstriyel alanda sıklıkla kullanılmaktadır. Bu amaçla gerçekleştirilen bir çalışmada nar tohumlarının kalite kontrolü gerçekleştirilmiş ve tohumlar kalitelerine göre sınıflandırılmıştır [66]. Makine görmesi ve kalite kontrolü üzerine gerçekleştirilen bir diğer çalışmada otomatik kesme işlemlerinde serbest biçimli profillerin kalite kontrolü geliştirilmiştir. Bu amaçla deri üretim sanayisi otomatik kesme işleminde referans olarak alınmış ve önerilen sistem bu alanda uygulanmıştır [67]. Elektrik alanında gerçekleştirilen bir çalışmada ise elektrik motorlarının elektrik konnektörlerindeki kusurlarının tespiti için makine görmesinden yararlanılmıştır. Gerçek elektrik motorlarından alınan 20 konnektör gerçek zamanlı olarak test edilmiş ve kusurların tamamı yüksek doğruluk oranıyla tespit edilmiştir [68]. Gıda endüstrisine yönelik gerçekleştirilen bir başka uygulamada ise tavuk yumurtalarının sınıflandırılması işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla yumurta üzerinde yer alan çatlak, kırık, büyüklük ve kir gibi çeşitli kusurlar tespit edilmeye çalışılmıştır [69]. Gıda konusunda gerçekleştirilen bir diğer çalışmada da soya fasulyelerinin kalite kontrolü işlemi gerçekleştirilmiştir. Çok çeşitli kusurların kontrol edildiği bu çalışmada soya fasulyesinde yer alan kusurlar %98 oranında başarı ile tespit edilmiştir [70]. Kalite kontrolü konusunda gerçekleştirilen bir diğer çalışmada kuşe kağıtların kontrolü işlemi gerçekleştirilmiştir. Görüntü işleme tabanlı gerçekleştirilen bu çalışmada kuşe kağıdında yer alan çatlak gibi kusurlar başarıyla tespit edilmiştir [71]. Elektronik alanında gerçekleştirilen bir diğer çalışmada baskı devre kartlarında yer alan deliklerin ölçülmesi için makine görmesi tabanlı bir kalite kontrol yaklaşımı önerilmiştir. Önerilen bu yaklaşımda 2 mm çapında olan tüm deliklerin kalitesi yaklaşık 10 sn içinde tespit edilebilmiştir [72]. Farklı bir alanda gerçekleştirilen bir diğer çalışmada ise hareketli bir konveyör üzerinden geçen kömür külünün içeriğinin tespiti için makine görmesi yaklaşımı kullanılmıştır. Gerçekleştirilen bu çalışmada kömür kalitesinin belirlenmesi amacıyla küllerin incelenmesi sağlanmış olup, uygulamada üç farklı yöntem geliştirilmiştir. Önerilen yöntemde en iyi sonucun sinir ağı ve destek vektör makinelerinin beraber kullanılmasıyla elde edildiği gözlemlenmiştir [73].

Makine görmesi tabanlı kalite kontrol sistemleri için literatürde farklı alanlarda çalışmalar yer almaktadır. Bu çalışmalar Tablo 2.1’de özetlenmektedir. Seri üretim tesislerinde sıklıkla kullanılan makine görmesi tabanlı otomatik kalite kontrol sistemleri ilaç sanayi, otomotiv endüstrisi, baskı devre üretim tesisleri gibi alanlarda sıklıkla kullanılmakta olup hızlı, sorunsuz ve doğru bir şekilde çalışan ürünlerin üretimi için oldukça önemli bir yere sahiptir.

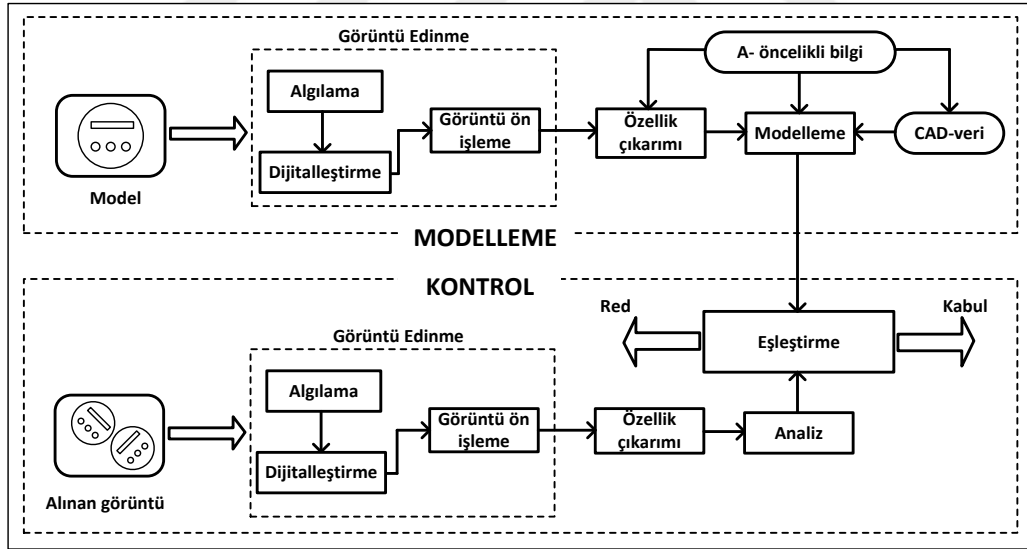
Tablo 2.1. Otomatik kalite kontrol konusunda yapılan çalışmalar

No	Çalışma alanı	Çalışmanın Kapsamı	Referans
1	Baskı endüstrisi	Kağıt paralar üzerindeki eksikliklerin otomatik kontrolü	[1]
2	İnşaat endüstrisi	Köprüler üzerinde meydana gelen eksikliklerin otomatik teftişi	[2]
3	Gıda endüstrisi	Et, peynir, pirinç gibi gıdaların teftişi ve sınıflandırılması	[74, 75, 76, 100]
4	Paketleme endüstrisi	Şişe kapaklarının yüzeylerindeki eksikliklerin tespit edilmesi	[77]
5	Televizyon endüstrisi	Kamera hareket parametrelerinin tahmin edilmesi	[78]
6	Tekstil endüstrisi	Fabrikalarda üretilen kumaşlardaki eksikliklerin otomatik olarak tespit edilmesi	[79, 80, 81]
7	Çelik endüstrisi	Üretilen çeliklerin yüzeylerinde meydana gelen aşınmaların, döküm kalitesinin tespit edilmesi, dişli yüzeylerinin kontrolü ve sayımı	[3, 52, 53, 56, 57, 82, 83, 84, 85, 86, 87]
8	Sanat	Doku özelliği analizine dayalı basılı çinilerin eksiklerinin tespit edilmesi, seramik dizilim ve kalite kontrolü	[47, 88, 89]
9	Gıda endüstrisi	Narenciye türevi meyvelerin otomatik olarak sınıflandırılması, sayılması, çürük meyvelerin ayıklanması, sebzelerin kalite kontrolü, paketleme kontrolü yapılması	[45, 90, 54, 55, 91, 92, 93, 99]
10	Ambalaj endüstrisi	Şişe makinesinde sıvı seviyesi ve şişe kapaklarının kontrolü	[94]
11	Paketleme endüstrisi	Nesne tespiti, takibi ve ürün sayımı	[49, 51, 58, 59, 95, 96]
12	Baskı devre endüstrisi	PCB yüzey kontrolü, delik sayımı ve kontrolü	[72, 97]
13	Tarım endüstrisi	Toprakta yer alan kil çeşitli partiküllerin sınıflandırılması	[98]

Birçok çalışmada belirtildiği gibi insan gücü kullanılarak yapılan kalite kontrolünün birçok açıdan makine görmesi tabanlı kalite kontrole göre dezavantajları bulunmaktadır [101]. Sablatnig tez çalışmasında [101] hem bu karşılaştırmayı Tablo 2.2'deki gibi vermiş hem de görme tabanlı bir kalite kontrol işleminin temel blok diyagramını Şekil 2.10'daki gibi oluşturmuştur. Görüleceği gibi model olarak alınan hatasız bir ürüne ait özelliklerle kameradan alınan görüntülerden alınan ürünlerin özellikleri karşılaştırılarak hata bulma veya ölçüm işlemi yapılmaktadır. Bu yapı temel bir gösterim olmakla birlikte günümüz donanım ve yazılım teknolojilerindeki gelişmeler ile oldukça ayrıntılı yaklaşımlar oluşturulabilmektedir.

Tablo 2.2. İnsan ve makine görmesi arasındaki karşılaştırma [101]

	İnsan	Makine
Esneklik	Görev ve giriş türü olarak çok uyumlu ve esnek	Görev olarak çok katı, nitelik verileri gerektirir
Yetenek	Sübjektif konularda doğru tahmin yapabilir	Önceden belirlenen veri girişine dayalı ölçümler yapabilir
Renk	Renk sübjektif	Kromatik parametrelerin büyüklüğünü ölçebilir
Duyarlılık	Aydınlanma koşullarına, nesne yüzeyinin fiziksel karakterine ve nesnenin uzaklığına adapte olabilmek	Hem aydınlatma seviyesi ve sıklığına hem de nesnenin fiziksel uzaklığına duyarlı
Tepki	1/10 saniye ile yavaş hıza sahip	1/1000 saniye veya donanımına bağlı olarak çok yüksek hıza sahip
Kavrama	Logaritmik ölçekte parlaklık algılar. Çevresi tarafından etkilenebilir (arka plan)	Doğrusal ya da logaritmik ölçekte parlaklık algılar
Spektrum	Görsel olarak spektrumu sınırlar	X ışınlarından yayılan kızılötesi tüm spektrumları kullanır



Şekil 2.10. Görme tabanlı bir kalite kontrol sisteminin temel yapısı [96]

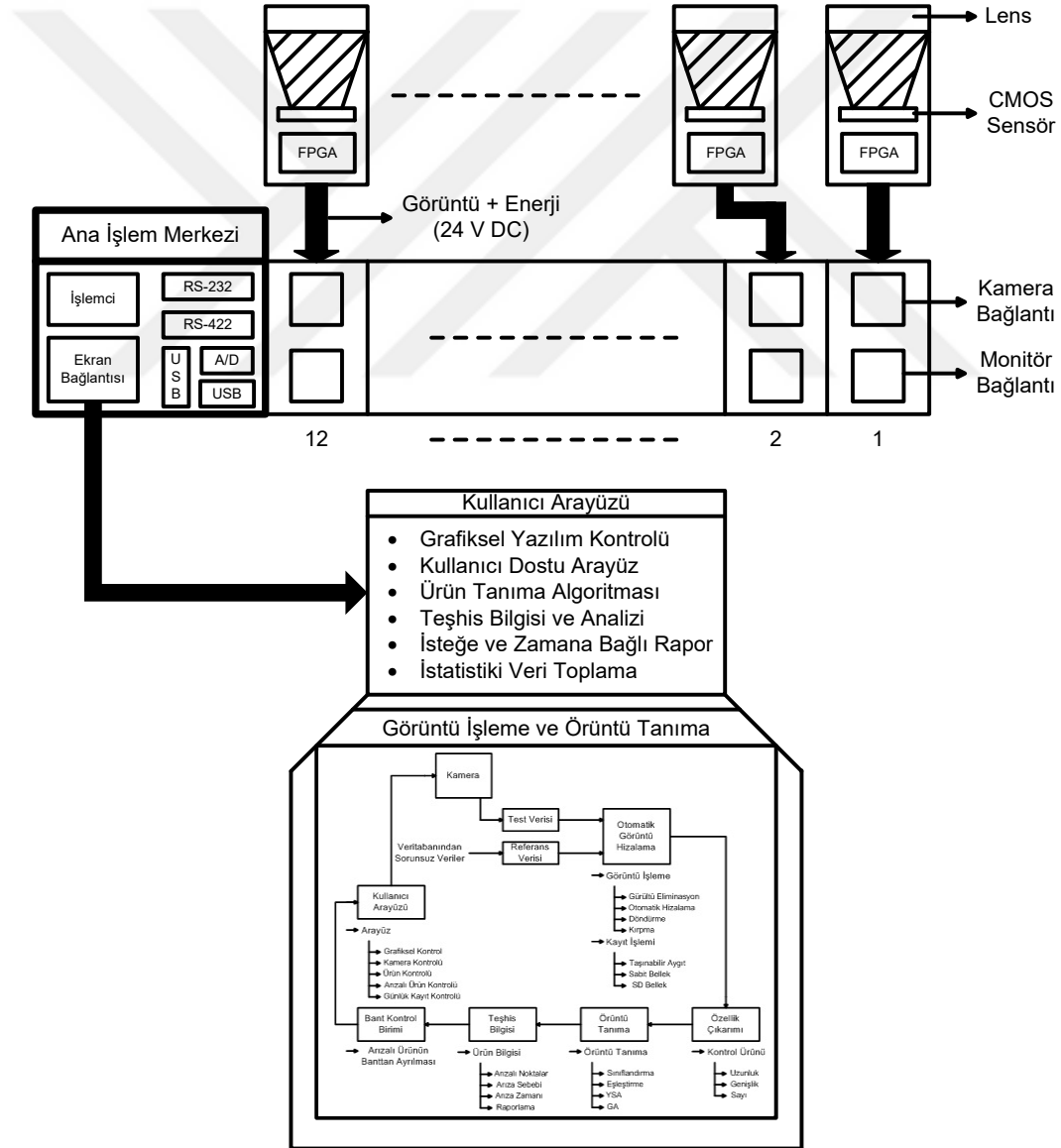
3. GELİŞTİRİLEN ENDÜSTRİYEL KAMERA SİSTEMİ

Endüstriyel alanlarda kullanılan kalite kontrol sistemlerinin en temel ekipmanı sayısal kameralardır. Çok farklı niteliklere ve özelliklere sahip olan bu sayısal kameralar sayesinde konveyör üzerinden geçen ürünlerin görüntüleri alınmakta, bir kalite kontrol algoritması aracılığıyla belirli işlemlerden geçirilmekte ve tüm bu işlemlerin sonucunda son kullanıcılara hatasız veya hatasız yakın ürünler teslim edilmektedir.

Kalite kontrol sistemleri önceki bölümlerde de bahsedildiği üzere temel olarak bir adet sayısal kamera, bir adet kalite kontrol yazılımı ve bir adet ana işlem biriminden meydana gelen sistemler bütünüdür. Bütünsel bir kalite kontrol sisteminin elde edilebilmesi için bu ekipmanların mevcut bulunması ve bunların bir bütün olarak senkronize bir şekilde haberleşebilmesi gerekmektedir. Gerçekleştirilen bu tez çalışmasında tam olarak çalışabilen bir kalite kontrol sistemi oluşturulmuştur. Çalışma kapsamında bir adet sayısal kamera prototipi, bu kamera ile entegre çalışabilen bir kalite kontrol yazılımı ve ana işlem birimi tasarımı başarıyla gerçekleştirilmiş olup, bu aygıtların birbirleri ile tam uyumlu bir şekilde çalışabilmesi sağlanmıştır. Tez süresince gerçekleştirilen çalışmaları özetleyen bir blok diyagram Şekil 3.1’de verildiği gibidir.

Gerçekleştirilen bu tez çalışmasının ilk ve en önemli adımı sayısal kamera prototipi tasarımıdır. Kalite kontrol sistemlerinin yüksek performansta çalışabilmesinin en önemli parametrelerinden birisi sayısal kameranın seçimidir. Yüksek çözünürlük ve hız sağlayan sayısal kameralar ile oldukça hassas ve doğru ölçümler yapılabilmekte ve buna bağlı olarak bir kalite kontrol sisteminden istenen düzeyde performans sağlanabilmektedir. Bu tez çalışması ile beraber, kalite kontrol sistemlerinde oldukça önemli bir yere sahip olan bir sayısal kamera prototipi geliştirilmiştir. Doktora tezi süresince geliştirilen bu kamera prototipi, endüstriyel tesislerde kullanılabilecek ve muadillerine göre oldukça performanslı çalışabilen bir yapıya sahiptir. Bu amaçla tez çalışmasının özellikle ilk aşamasında gerçekleştirilen literatür ve saha araştırmaları bölümünde mevcut sayısal kamera tasarımları büyük bir titizlikle incelenmiş ve kamera tasarımına yönelik detaylar elde edilmiştir. Yine bu detaylara bağlı olarak bir yol haritası belirlenmiş ve tez çalışmasının ilk zamanlarından itibaren endüstriyel sayısal kamera tasarımına yönelik çalışmalar sürekli olarak devam ettirilmiştir. Sayısal kamera tasarımı gerçekleştirilirken çalışmalar iki bölüm halinde yürütülmüştür. Bu bölümlerin ilkinde donanımsal tasarım işlemi gerçekleştirilmiş olup,

ikincisinde kamerayı çalıştırabilmek için gerekli olan yazılımsal tasarım sürecine odaklanılmıştır. Ayrıca kamera tasarım sürecinde temel olarak iki farklı kamera prototipi elde edilmiştir. Bu prototiplerin ilki düşük özelliklere sahip bir sensör ve yine alt seviye özelliklere sahip olan bir işlemci kullanılarak gerçekleştirilmiş olup, daha ileri seviye tasarımlar için bilgi edinilmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen ikinci prototipte ise belirlenen hedefleri kapsayan bir görüntü sensörü ve yine endüstriyel uygulamalarda sıklıkla kullanılan ve oldukça hızlı çalışabilen bir işlemci türü olan FPGA'lar kullanılmıştır. Tez süresince gerçekleştirilen bu sayısal kamera prototiplerine ait detaylar alt bölümler halinde ilerleyen bölümlerde detaylı bir şekilde sunulmaktadır.

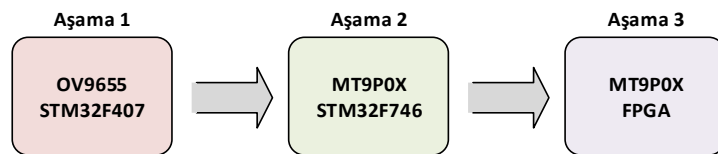


Şekil 3.1. Gerçekleştirilen kalite kontrol sistemine ait bir blok diyagram

3.1. Giriş Bilgileri

Bölüm başında da belirtildiği üzere tez süresince bir kalite kontrol sistemi için oldukça önemli olan bir sayısal kamera prototipi geliştirilmiştir. Kamera prototipi geliştirme sürecinde gerçekleştirilen işlemler donanımsal ve yazılımsal olarak iki bölüme ayrılmış olup, çalışmalar bu çerçevede yürütülmüştür. Ayrıca bu süreçte temel olarak üç farklı prototip gerçekleştirilmiş olup, her üç kamera prototipi için de donanımsal ve yazılımsal geliştirme süreçleri izlenmiştir.

Geliştirilen kamera prototiplerinden ilkinde görüntü sensörü olarak OV9655 kullanılmış olup, işlemci olarak STM32F407 tercih edilmiştir. Bu kamera prototipinin geliştirilmesinin en önemli nedeni kamera tasarımlarına ait detayları görmek ve incelemektir. Bu sayede, sürecin ilerleyen safhalarında gerçekleştirilecek olan ileri düzey kamera tasarımı için yeterince teorik ve pratik bilgi sağlanmış olacak ve yaşanabilecek muhtemel tüm aksaklıkların önceden ön görülebilmesi sağlanacaktır. Tez çalışmasının bir sonraki aşamasında ise daha önceden belirlenmiş bir görüntü sensörü olan MT9P0X serisi kullanılmış olup, bu görüntü sensöründen veri elde edebilmek için STM32F746 serisi işlemci tercih edilmiştir. Yüksek seviyede görüntü alabilme imkanı sağlayan bu sensör, tez çalışmasının ilerleyen süreçlerinde de kullanılmış olup, nihai kamera prototipinin elde edilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Doktora tez çalışmasının sayısal kamera tasarımı için gerçekleştirilen son adımında ise, yine MT9P0X serisi görüntü sensörü ve Altera Cyclone IV FPGA işlemci kullanılarak nihai sayısal kamera prototipi elde edilmiştir. Doktora tezi süresince her bir kamera prototipi için haberleşme ve görüntüleme yazılımları geliştirilmiş olup, istenilen çıktıların elde edilebilmesi amacıyla çalışmalar titizlikle yürütülmüştür. Sayısal kamera tasarımına ait detayları içeren bu bölümde, tasarlanan kamera prototiplerine ait donanımsal ve yazılımsal tasarımlar, haberleşme protokolleri ve görüntüleme yazılımları ilerleyen bölümlerde alt başlıklar halinde sunulmaktadır. Ayrıca tez süresince endüstriyel sayısal kamera tasarımı için gerçekleştirilen bu aşamaları özetleyen bir blok diyagram Şekil 3.2’de sunulduğu gibidir.



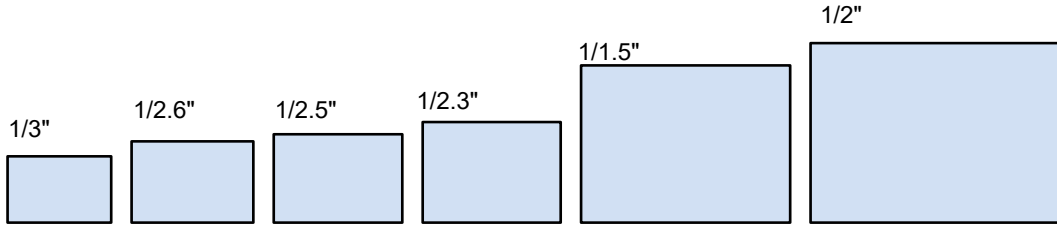
Şekil 3.2. Tez süresince geliştirilen sayısal kamera prototipi aşamaları

3.2. Temel Görüntü Sensörü Özellikleri

Bir kamera tasarımı gerçekleştirilirken bu noktadaki en önemli konulardan biri de görüntü sensörü seçimidir. Görüntü sensörlerinin en temel özellikleri arasında şüphesiz ki çözünürlük ve saniyedeki görüntü karesi gelmektedir. Bu faktörler normal bir kameranın kalitesini belirlemede ki önemli faktörler olsa da endüstriyel kameralar da bu durum geçerliliğini bazı noktalarda yitirebilmektedir. Özellikle yüksek hızlarda hareket eden üretim hatlarından sorunsuz bir şekilde görüntü alabilmek için bazı temel özelliklerin belirlenmesi gerekmektedir. Bu özellikler maddeler halinde aşağıda verildiği gibidir:

- Çözünürlük
- Görüntü Karesi Sayısı
- Optik Format
- Piksel Boyutu
- Shutter türü
- Bit Derinliği

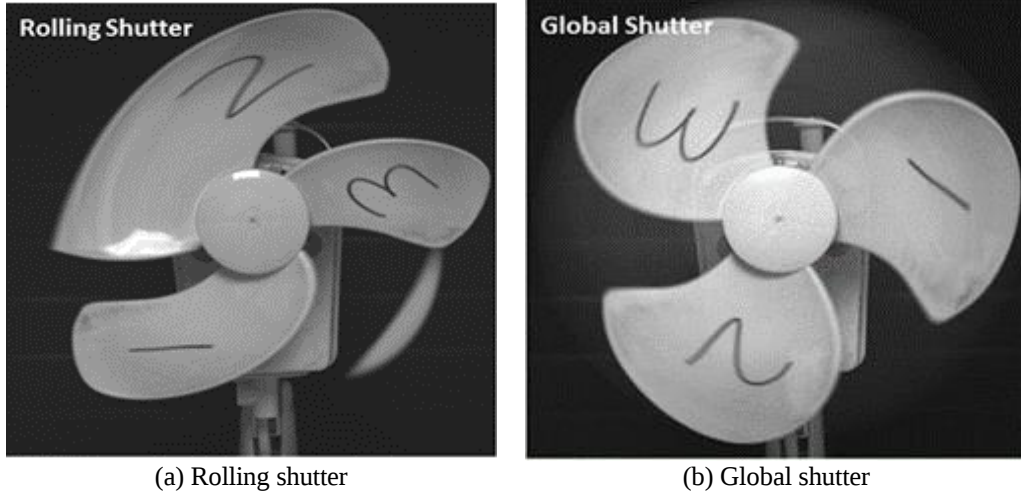
Bilindiği üzere çözünürlük ve görüntü karesi sayısı sayısal kameralarda oldukça dikkat edilen önemli parametrelerdendir. Hatta kişisel kullanım amaçlı kameralarda daha iyi bir görüntü alabilmek için dikkat edilen argümanlardandır. Fakat endüstriyel tabanlı kameralarda bu özellikler tek başına yeterli olmamaktadır. Esasında kişisel kullanıma dayalı kameralarda da önemli olan bu diğer parametreler, endüstriyel sayısal kameralarda daha da fazla önem kazanmaktadır. Optik format kavramı temel olarak görüntü sensörünün boyutunu belirtmektedir. Bu kavram oldukça önemlidir çünkü görüntü sensöründe ne kadarlık bir alana ne kadar piksel sığdırıldığıyla doğrudan ilişkilidir. Dolayısıyla bu durum da piksel boyutuna yansımaktadır. Şekil 3.3’de görüntü sensörlerinin optik formatlarını gösteren örnek bir blok diyagram verilmiştir. Görüntü sensörlerinin optik formatları genellikle inç cinsinden ifade edilmektedir. Görüntü sensörünün olabildiğince büyük olması elde edilen görüntünün kalitesini doğrudan etkilemektedir. Bu sebepten endüstriyel kameralarda büyük ölçekli görüntü sensörlerinin kullanılması tercih edilmektedir.



Şekil 3.3. Görüntü sensörleri için örnek optik formatlar

Piksel boyutu kavramı ise yine görüntü sensörünün boyutuyla doğrudan ilişkilidir. Bir örnek üzerinden açıklanacak olursa, 5 megapiksellik iki adet farklı optik formatlara sahip görüntü sensörlerini düşünelim. Temel olarak bu iki görüntü sensörüne de 5 milyon adet piksel sığdırılmış durumdadır. Fakat optik formatı daha büyük olan görüntü sensöründe yerleştirilen 5 milyon adet pikselin boyutu daha yüksektir. Çünkü pikseller küçültülmeden rahatlıkla yerleştirilmiştir. Optik formatı daha küçük olan sensör de ise bu 5 milyon adet piksel boyutları küçültülerek yerleştirilmiştir. Çünkü görüntü sensörünün optik formatı daha küçüktür. Piksel boyutunun büyük olmasının sağladığı en önemli avantaj, piksellerin daha fazla ışığı absorbe edebilmesi ve bünyesinde tutabilmesidir. Bu sebepten ötürü piksel boyutu büyük olan görüntü sensörlerinden genellikle iyi kalitede çekimler elde edilmektedir. Başka bir deyişle 16 mp olarak ifade edilen bir kameranın yeri geldiğinde 5 mp'lik bir kameradan daha kötü sonuçlar vermesinin en temel sebeplerinden birisi de piksel boyutudur. Bir başka sebebi ise dolaylı olarak optik formattır. Bu sebepten endüstriyel kameralarda kullanılan sensörlerin optik formatı ve piksel boyutu oldukça büyüktür. Bu durum ise bant üzerinde geçen ürünleri daha detaylı incelemeye ve daha net, daha doğru sonuçlar almaya olanak sağlamaktadır.

Bu doktora tezi çerçevesinde görüntü sensörü seçimi yapılırken çözünürlük ve optik format parametrelerine özellikle dikkat edilmiştir. Ayrıca piyasada mevcut bulunan kameraların sensör özellikleri detaylıca incelenmiş ve ortaya çıkarılmıştır. Görüntü sensörü seçiminde bir diğer önemli husus ise sensörün shutter türüdür. Shutter başka bir deyişle örtücü/enstantane sensör düzlemine ulaşacak ışık miktarının sensörü ne kadar süre ile etkileyeceğini belirleyen kısımdır. Genellikle iki kısımda incelenebilmektedir. Bunlar sırasıyla Rolling ve Global shutter'dır. Bu iki kavrama örnek teşkil eden görüntüler sırasıyla Şekil 3.4-(a) ve (b)'de verildiği gibidir.



Şekil 3.4. Görüntü sensörlerinde enstantane kavramı

Şekil 3.4’den de görülebileceği üzere özellikle hareketli nesneleri incelerken shutter türü oldukça büyük önem kazanmaktadır. Bu sebepten tercih edilecek görüntü sensörün de bu kavramında dikkate alınması özellikle endüstriyel tabanlı kamera sistemleri için oldukça önemlidir. Yine tez süresince geliştirilecek endüstriyel sayısal kamera prototipi için kullanılacak olan görüntü sensörünün seçiminde dikkate alınan parametrelerden birisi de budur.

Çok önemli gibi görünmeyen fakat elde edilecek görüntülerin kalitesini ve formatını etkileyebilecek olan bir diğer parametre ise bit derinliğidir. Bit derinliği tabiri ile genel olarak fotoğrafı oluşturmada kullanılacak renklerin sayısı ifade edilmektedir. CMOS görüntü sensörleri genellikle 10 veya 12 bit çıkış üretmektedir. Bit sayısı arttıkça renkler arasındaki geçişlerde yumuşamaktadır. Piyasada 16, 24 veya 36 bit derinliğine sahip görüntü sensörleri bulunsa da bu sensörlerden elde edilen görüntülerin boyutları çok yüksek olmaktadır. Endüstriyel tabanlı kamera sistemlerinde kullanılan görüntü sensörleri genellikle 10 veya 12 bittir. Bu durum da 1024 ile 4096 adet farklı renk arasından görüntü karesinin oluşturulacağı anlamına gelmektedir.

Gerçekleştirilen bu doktora tez çalışmasında çözünürlüğü 0.3 MP ile 5 MP arasında değişebilen, çözünürlük ile ters orantılı olan ve frame hızı 15 fps ile 70 fps arasında değişebilen bir sayısal kamera prototipi geliştirilmiştir. Bu değişiklikler yine tez çerçevesinde geliştirilen bir yazılım aracılığıyla gerçekleştirilmekte ve anlık olarak kamera ile iletişim kurulabilmektedir. Kamera ile ana işlem birimi arasındaki haberleşme işlemi ethernet portu üzerinden gerçekleştirilmektedir. Bu amaçla gerçekleştirilen haberleşme protokolünde UDP haberleşme formatı kullanılmaktadır. Sayısal kameranın hem işlemcisi

içerisinde hem de gelen veriyi çözecek olan yazılım projesi içerisinde bu haberleşme protokolü gerçekleştirilmiştir. Özellikle ses, görüntü gibi yüksek oranlarda veri boyutuna sahip verilerin aktarılması için kullanılan bu haberleşme protokolünde saniyede yaklaşık 125 MB veri aktarım hızına çıkılmıştır. Bu sayede görüntü sensöründen elde edilen görüntü verilerinin kesintisiz bir şekilde ana makineye iletilebilmesi sağlanmıştır. Tez çalışması çerçevesinde bütün haliyle çalışabilen bir kalite kontrol sistemi geliştirilmiştir. Bu amaçla tamamen yerli imkânlar kullanılarak bir sayısal kamera geliştirilmiş olup, bu kameraya bağlı olarak çalışabilen bir kalite kontrol yazılımı da ortaya konmuştur. Gerçekleştirilen bu sayısal kamera prototipi yerli imkanlar gözetildiğinde alanında ilklerden biri olma niteliğini taşımaktadır. Ayrıca bu sayısal kamera teknik yönden incelendiğinde muadilleri ile rekabet edebilecek kapasiteye sahiptir.

3.3. Seçilen Görüntü Sensörü ve Özellikleri

Tez süresince gerçekleştirilen literatür, teorik, saha araştırmaları ve elde edilen verilere dayanılarak bir görüntü sensörü seçimi yapılmıştır. Özellikle çözünürlük, görüntü karesi sayısı, optik format, piksel boyutu ve shutter türüne bakılarak yapılan bu seçim işleminde bir diğer faktör ise maliyet olmuştur. Yapılan incelemelerde APTINA firmasına ait MT9P001 nolu modele sahip görüntü sensörünün kullanılması uygun görülmüştür. Bu sensörün detaylı özellikleri Tablo 3.1’de verildiği gibidir

Tablo 3.1. Seçilen görüntü sensörü APTINA MT9P001

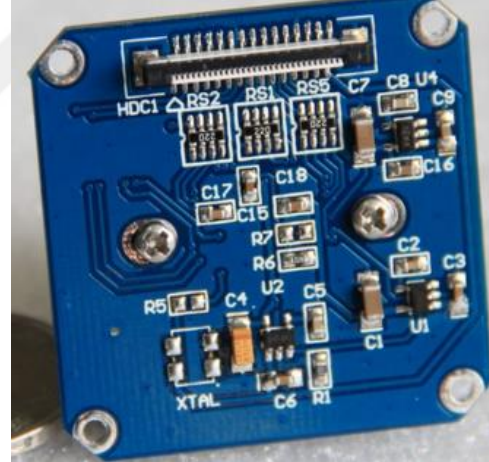
Parametre	Değer
Optik Format	1/2.5 inç (4:3)
Aktif Piksel	2592H x 1944V
Çözünürlük	5 Mp
Piksel Boyutu	2.2 x 2.2 μ m
Shutter Türü	- Global Reset Release - Elektronik Rolling Shutter
Bit Derinliği	12 bit
Görüntü Karesi Sayısı	Programlanabilir; - Tam Çözünürlük (2592x1944, 15 fps) - QXGA (2048x1536, 21 fps) - UXGA (1600x1200, 31 fps) - SXGA (1280x1024, 42 fps) - XGA (1024x768, 63 fps) - SVGA (800x600, 90 fps) - VGA (640x480, 123 fps)

Çalışma kapsamında bu görüntü sensörünün tercih edilmesindeki en önemli faktörlerden birisi frame sayısının programlanabilir olması özelliğidir. Özellikle endüstriyel üretim hatlarındaki üretim çeşitliliği düşünüldüğünde ve yapılan saha araştırmalarına bakıldığında birçok farklı endüstriyel alan için ortak bir kamera ortaya konulması ve bu kameranın sorunsuz bir şekilde tüm üretim sistemlerinde çalışabilmesi kaçınılmaz bir gerekliliktir.

Doktora tez çalışmaları çerçevesinde kullanılan bu görüntü sensörünün bir diğer önemli avantajı sensörün maliyetidir. APTINA firmasının piyasaya sürmüş olduğu bu modeller gerek ham görüntü sensörü olarak gerekse modül şeklinde satılabilmektedir. Ham görüntü sensörü olarak satılan modeller yaklaşık 20\$ iken modül halinde satılanların fiyatları 40-50\$ bandında seyretmektedir. Modül olarak satılan sensörler de, sensörün elektriksel bağlantıları yapılmış fakat herhangi bir işlemci falan kullanılmamıştır. Bunun yerine sensörün bazı pinlerinden dişi veya erkek konnektörler aracılığıyla çıkış verilmiş ve kullanıcının bu çıkışları kullanarak programlama yapabilmesi sağlanmıştır. Bu sensör modülünü gösteren bir örnek Şekil 3.5’de verilmiştir.



(a) Ön yüz



Bu görüntü sensörünün tercih sebeplerinden bir diğeri ise APTINA firmasının üretmiş olduğu bazı sensörlerde gerekli konfigürasyon ayarlarını ücretsiz bir şekilde paylaşmasıdır. Özellikle açık kaynaklı üretimlere destek veren bu firma, görüntü sensörünün başlangıç ayarlarını ücretsiz bir şekilde paylaşarak kullanıcıların bireysel olarak proje geliştirmesine olanak sağlamaktadır. Bu başlangıç ayarları bir kamera modülünden düzgün bir şekilde piksel verilerini okuyabilmek için son derece önemlidir. Pek tabi ki birçok görüntü sensörü üreticisi firma bu ayarlarını kullanıcılarına açmamaktadır. Böylesi bir durumda ise kamera üreticisi firmalar kendi sürücülerini kendileri yazmakta ve bunu da dışarıya açmamaktadır. APTINA firmasının yapmış olduğu bu paylaşım, gerçekleştirilecek endüstriyel sayısal kameranın düzgün bir şekilde çalışabilmesi için gerekli tüm adres ve veri ayarlamaları sağlanmış durumdadır.

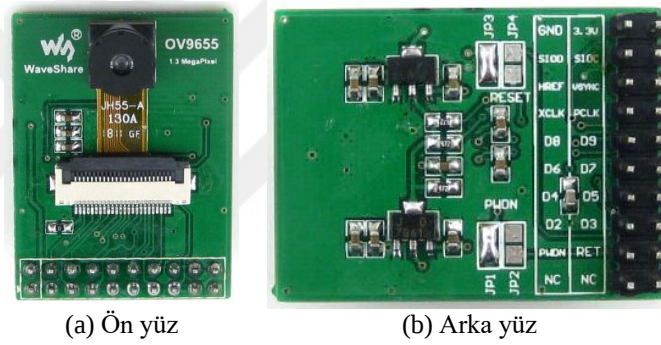
Endüstriyel amaçlarla kullanılan sayısal kameralarda mevcut bulunan görüntü sensörlerinin birçok farklı alanda kullanılabilmesi için programlanabilir yapıda olması genellikle zaruridir. Başka bir deyişle bu görüntü sensörlerinin çözünürlük ve saniyedeki görüntü karelerinin sayısı değiştirilebilir nitelikte olmalıdır. Bu sebepten bu tez çalışmasında da programlanabilir bir görüntü sensörü olan APTINA MT9P001 CMOS renkli görüntü sensörü tercih edilmiştir. Ayrıca maliyet yönünden de önemli bir avantaj sağlayan bu sensörlerin register değerlerinin açık olarak paylaşılması da çalışmalarda kullanılmasının bir diğeri sebebinin oluşturmaktadır. Fakat doktora tezi süresince gerçekleştirilen çalışmalarda hedeflenen amaca adım adım ulaşılmıştır. Bu sebeple sayısal kamera tasarımıdaki ilk çalışmalar daha alt seviye olan görüntü sensörleri ve işlemciler kullanılarak gerçekleştirilmiş olup, konu hakkında teorik ve pratik bilgi birikimi sağlanması hedeflenmiştir. Tez çalışmasının ilk evrelerinde bölüm başında da belirtildiği üzere basit niteliklere sahip olan OV9655 kamera modülü ve STM32F407 işlemci kullanılarak basit bir sayısal kamera prototipi gerçekleştirilmiştir. Doktora tez çalışmasının ikinci aşamasında, daha önceden belirlenen görüntü sensörü olan APTINA MT9P001 görüntü sensörü ve STM32F746 işlemci kullanılarak bir sayısal kamera prototipi geliştirilmiştir. Gerçekleştirilen çalışmaların son safhasında ise yine MT9P001 görüntü sensörü kullanılmış olup, işlemci olarak Altera firmasının üretmiş olduğu Cyclone IV FPGA işlemciye sahip DE2-115 geliştirme kartı tercih edilmiştir. Bu şekilde adım adım geliştirme süreçleri uygulanarak olası problemlerin önceden görülebilmesi sağlanmış ve geliştirilen nihai prototipte hedefe tam olarak ulaşılması amaçlanmıştır.

3.4. Sayısal Kamera Geliştirme Adımları

Görüntü sensörlerinin çalışma prensibinin tam olarak anlaşılabilmesi amacıyla sayısal kamera tasarımında 3 aşamalı bir tasarım süreci izlenmiştir. Bu aşamalara ait detaylar alt bölümler halinde sunulmaktadır.

3.4.1. Sayısal Kamera Prototipi-1

Sayısal kamera tasarımının ilk aşamasında basit bir kamera modülü temin edilmiş ve bu modül için donanım ve yazılım geliştirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Üzerinde gerekli çalışmaların gerçekleştirildiği modül OmniVision firmasına ait OV9655 model görüntü sensörüdür. Bu modüle ait örnek bir görüntü Şekil 3.6-(a) ve (b)'de verildiği gibidir.



Şekil 3.6. OV9655 görüntü sensörü

Şekilden de görülebileceği üzere kullanılan bu modül üzerinde herhangi bir işlemci bulunmamaktadır. Çıkışlar bir erkek konnektör üzerinden dışarıya verilmektedir. Bu görüntü sensör modülü FPC konnektöre bağlanmakta ve buradan sensörün bacakları dış dünyaya verilmektedir. Bu sensör modelinin temel özellikleri ise Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2. Uygulamada kullanılan görüntü sensörü (OV9655)

Parametre	Değer
Optik Format	1/4 inç
Aktif Piksel	1280H x 1024V
Çözünürlük	1.3 Mp
Piksel Boyutu	3.18 μ m x 3.18 μ m
Bit Derinliği	8 bit/10 bit
Görüntü Karesi Sayısı	Programlanabilir; - SXGA (1280x1024, 15 fps) - VGA (640x480, 30 fps)

Tez çalışmaları kapsamında temin edilen bu kamera modülü 2x10 erkek konnektöre sahiptir. Kameranın tüm bağlantıları bu noktalardan yapılmaktadır. Kamera modülünün pin dağılımı ise Tablo 3.3’de sunulduğu gibidir.

Tablo 3.3. OV9655 pin diyagramı

Bacak No	Değer	Bacak No	Değer
1	3.3V	11	D5
2	GND	12	D4
3	SCL	13	D3
4	SDA	14	D2
5	VSYNC	15	D1
6	HREF	16	D0
7	PXCLK	17	RESET
8	XCLK	18	PWDN
9	D7	19	NC
10	D6	20	NC

Gerçekleştirilen bu çalışmada geliştirme kiti olarak STM32F407 kullanılmıştır. Bu geliştirme kiti ARM Cortex M4 tabanlı 168 MHz’lik bir mikrodenetleyiciye sahiptir. Bu geliştirme platformu üzerinde dahili olarak DCMI (Digital Camera Module Interface) modülü bulunmaktadır. Genel olarak görüntü sensörlerinden veri okuma işlemi oldukça yüksek hız gerektiren işlemlerdir. Fakat STM32F407 içerisinde bulunan DCMI modülü ile herhangi bir ekstra işleme gerek kalmadan ve işlemcinin gücü kullanılmadan görüntü alabilme işlemi gerçekleştirilebilmektedir. Çalışma kapsamında kullanılan bu işlemciye ait örnek bir görüntü Şekil 3.7’de verildiği gibidir.



Şekil 3.7. STM32F407 işlemci tabanlı geliştirme kartı

Şekil 3.6'dan da tekrar görülebileceği üzere temin edilen görüntü sensörü modülü üzerinde herhangi bir kristal bulunmamaktadır. Bu durumun en temel sebebi modülün programlanabilir olması ve bu işlemin kullanıcıya bırakılmasıdır. Kamera modülü 24 ve 48 MHz'de çalışabilmektedir. Kullanıcılar bu frekansları sensör modülünün 8 numaralı bacağına uyguladığında 15 veya 30 fps'lik görüntüler elde edebileceklerdir. Gerçekleştirilen çalışmada hem 24 hem de 48 MHz, sensör modülünün XCLK pinine uygulanmıştır. Sensör modülü ile STM32F407 arasında kurulan bağlantı şeması Tablo 3.4'de maddeler halinde verildiği gibidir.

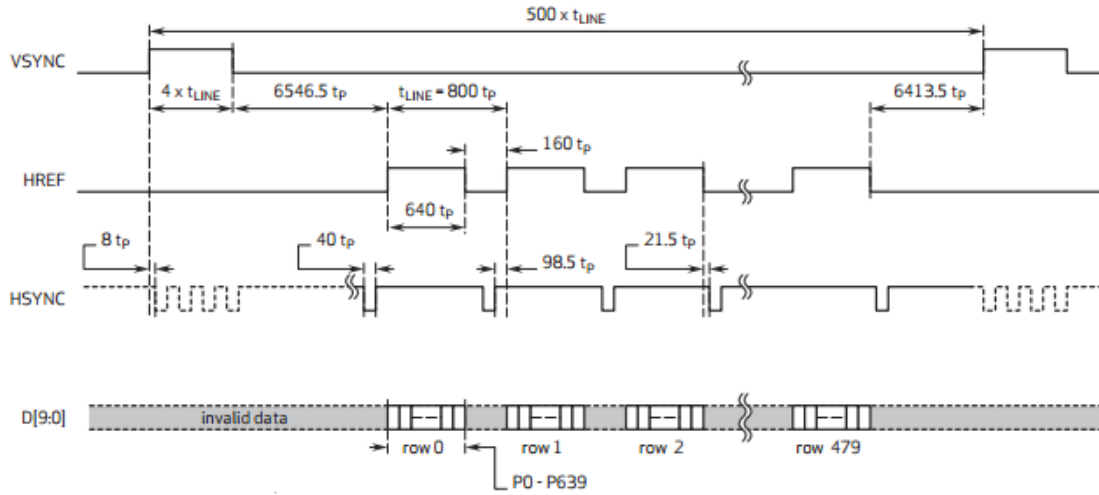
Tablo 3.4. OV9655 ve STM32F407 bağlantı pin diyagramı

Sensör Modülü	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
STM32F407	PC6	PC7	PE0	PE1	PE4	PB6	PE5	PE6
Sensör Modülü	HSYNC		VSYNC		XCLK	PCLK	SCL	SDA
STM32F407	PA4		PB7		PC9	PA6	PB8	PB9

Bu noktadaki önemli hususlardan birisi HREF/HSYNC, VSYNC, XCLK, PCLK, SCL ve SDA pinlerinin kullanım amaçlarıdır. Farklı görüntü sensörü modellerinde bu isimlendirmeler de değişiklikler olabilse de hemen hepsinde kullanımları aynıdır. Aşağıda maddeler halinde bu pinlerin kullanım amaçları sunulmuştur;

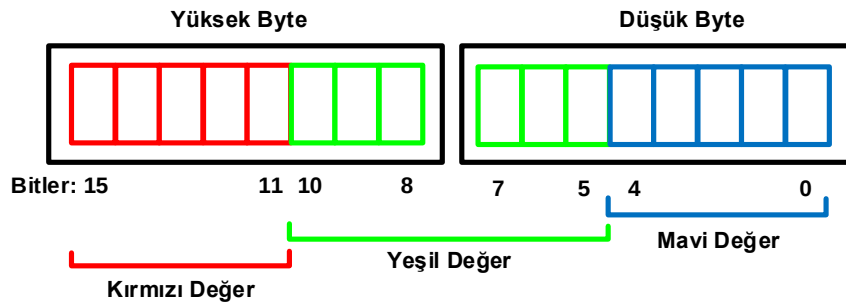
- **HREF/HSYNC:** Bu pin kamera sensöründen gelen ve işlemciye giden bir sinyaldir. Bu sinyal görüntü karesinin bir satırının iletildiğini göstermektedir.
- **VSYNC:** Bu pinde tıpkı HSYNC gibi görüntü sensöründen gelen ve işlemciye giden bir bildirim sinyalidir. Bu sinyal görüntü karesinin tamamının iletildiğini göstermektedir.
- **XCLK:** Sensörün harici sinyal girişi kaynağıdır.
- **PCLK:** Bu pin piksel clock'u temsil etmektedir.
- **SDA ve SCL:** I2C iletişimi için kullanılan çift yönlü sinyal hattıdır. Kamera ayarlarının yapılması ve düzgün başlatılması amacıyla kullanılmaktadır.

Bu sinyallerin kullanımını VGA çözünürlüğünde görüntü alma için gösteren bir blok diyagram ise Şekil 3.8'de verilmiştir.



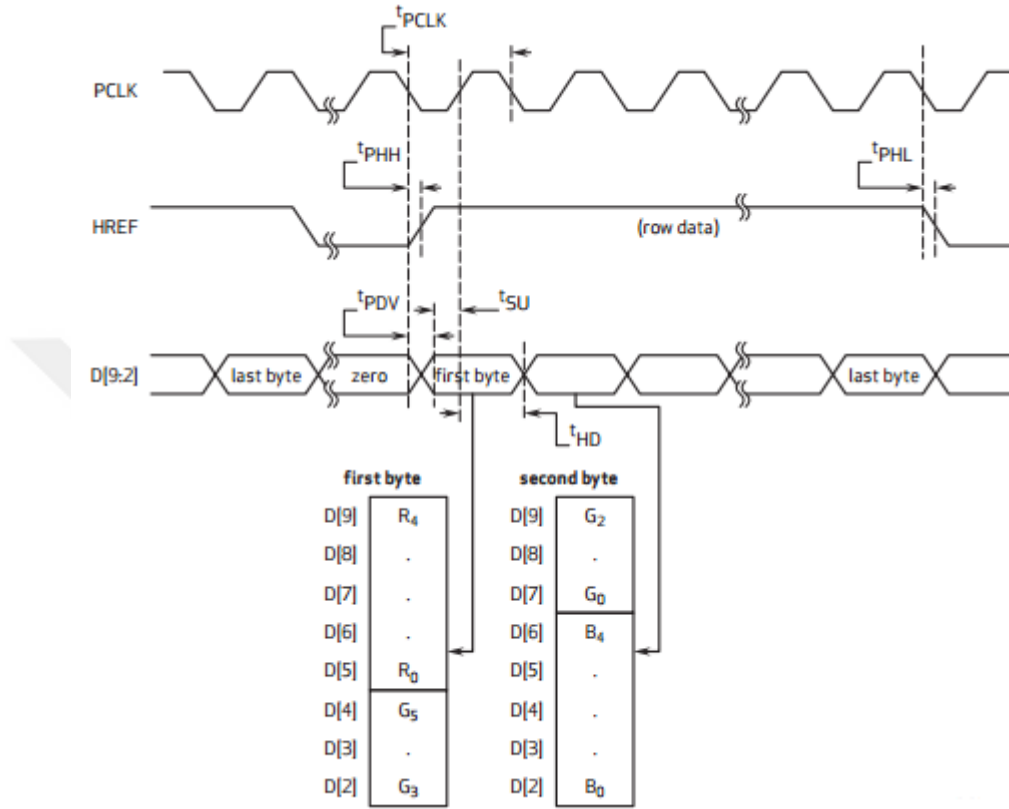
Şekil 3.8. OV9655 Veri aktarım protokolü

Şekil 3.8’den de görülebileceği üzere VSYNC sinyali sadece iki noktada aktif olmuştur ve bu sinyaller görüntü karesinin tüm satırları tamamlandıktan sonra aktif olmaktadır. HREF sinyali ise her yeni satıra geçildiğinde aktif olmakta ve bulunulan satır tamamlanana kadar lojik bir de çekili kalmaktadır. Benzer işleve sahip HSYNC sinyali ise normal durumdayken lojik 1’de, yeni bir satır okuma işlemine başlanacağı sırada toggle durumuna geçmektedir. D[9:0] ise dijital çıkışları göstermektedir. Kullanılan OV9655 kamera modülü çeşitli görüntü formatlarını destekleyebilmektedir. Bunlar sırasıyla RAW RGB, RGB565/555, GRB 4:2:2, YUV (4:2:2) ve YCbCr (4:2:2)’dir. Gerçekleştirilen bu çalışmada RGB565 formatı kullanılmıştır. RGB565 formatında, RGB karakterleri (red, green, blue), 565 ise hem bir pikseli oluşturmak için kaç bit kullanılacağını hem de bu bitlerin kaç tanesinin kırmızıyı, kaç tanesinin yeşili ve yine kaç tanesinin maviyi göstereceğini temsil etmektedir. RGB565 formatında bir piksel değeri için toplam 16 bit kullanılmaktadır ve bu 16 bit’de 2 byte değerine tekabül etmektedir. RGB565 formatı için bit ve renk dağılımını gösteren örnek bir şema Şekil 3.9’da verildiği gibidir.



Şekil 3.9. RGB565 görüntü formatı

Şekil 3.9'dan da görülebileceği üzere 16 bitlik piksel verisinin ilk 5 biti kırmızı rengi, diğer 6 biti yeşil rengi ve kalan son 5 biti ise mavi rengi temsil etmektedir. Ayrıca bu formatın OV9655 modülü üzerindeki kullanımı Şekil 3.10'da verildiği gibidir.



Şekil 3.10. RGB565 görüntü formatı ve OV9655 modülünde kullanımı

Şekil 3.10'dan da görüleceği üzere toplam 2 byte, başka bir deyişle 16 bit olan piksel verisi, modül 10 bit desteği sağlamasına rağmen 8'er bitlik iki byte şeklinde alınmıştır. Verinin ilk byte'ı kırmızı ve yeşil rengi depolarken, ikinci byte'ı yeşil ve mavi renk verisini tutmaktadır.

Bu işlemde modül 8 bitlik olarak kullanıldığı için bir piksel verisini elde edebilmek amacıyla 2 PCLK sinyali ortaya çıkmaktadır. Başka bir deyişle görüntü verisinin bir pikselini transfer edebilmek için 2 PCLK darbesi kullanılmaktadır. Bilindiği üzere HSYNC sinyali her satır okunduğunda tetiklenmekteydi. Eğer biz VGA bir görüntü karesini aktaracak olursak toplam PCLK sinyali sayısı $640 \times 2 = 1280$ PCLK darbesi olacaktır. Başka bir deyişle 1280 PCLK darbesi ile ilk satır tamamlanmış olacaktır ve her 1280 PCLK'da bir HSYNC sinyali aktif olacaktır. Ayrıca VSYNC sinyali ise bir görüntü karesinin tamamının aktarıldığını temsil etmektedir. Eğer her satır 1280 PCLK darbesinde tamamlanıyor ise,

1280x480=614400 PCLK darbesinde görüntü karesi elde edilmiş olacaktır. Başka bir deyişle her 614400 PCLK'da bir VSYNC sinyali aktif olacaktır.

Bu işlemlerin tamamı görüntü boyutuna göre saniyede 15 veya 30 kere tekrarlanmaktadır. Tez süresince kullanılacak sensör olan MT9P001'de de bölüm başında sunulan Tablo 3.1'de de verildiği üzere 15 fps'den 123 fps'ye kadar tekrarlanacaktır.

Çalışma süresince modülün tüm muhtemel konfigürasyonlarının öğrenilmesine gayret edilmiş, ayrıca modüldeki işlemlerin MT9P001'de ki karşılıkları irdelenmeye çalışılmıştır. Yine bu süreçte tamamen imkanlar dahilinde bu kamera modülü başarıyla çalıştırılmış ve test edilmiştir. Ayrıca bölüm başında da belirtildiği üzere OV9655 kamera modülü, STM32F407 geliştirme kitiyle beraber kullanılmış ve aktif hale getirilmiştir. Kullanılan bu işlemci üzerinde herhangi bir görüntü işleme algoritması koşturulmamış ve işlemci vasıtasıyla modülden alınan görüntüler doğrudan yine işlemciye bağlı bir LCD'ye gönderilmiştir. Sonuç olarak alınan görüntü kareleri kullanılan bu LCD üzerinde kullanıcılara gösterilmiştir. Ayrıca sistemde kullanılan OV9655 kamera modülü, STM32F407 geliştirme kiti ve LCD, bir delikli pertinaks üzerine yerleştirilmiş ve sabitlenmiştir. Yapılan tüm bu çalışmalar tamamen yerli imkânlar kullanılarak ortaya çıkarılmış olup, elde edilen kamera sistemini gösteren bir görüntü Şekil 3.11'de verilmektedir.



Şekil 3.11. OV9655 kamera modülü kullanılarak elde edilen prototip kamera

Kamera modülü ile iletişimi sağlamak amacıyla STM32F407 üzerinde çeşitli C kodları yazılmış olup, ayrıca bu geliştirme kitinin de kütüphanelerinden faydalanılmıştır. Bu amaçlar doğrultusunda gerçekleştirilen ve main bloğuna ait örnek bir kod parçası Şekil 3.12’de verildiği gibidir.

```
STM3240F_LCD_Init();
LCD_Clear(Black);
LCD_SetColors(Green,Black);
LCD_SetFont(&Font8x8);

if(OV9655_Configuration()==0xFF)
{
    LCD_DisplayStringLine(0,0,"Camera Failed");
}else{
    LCD_DisplayStringLine(0,0,"Camera OK!");
}

/* Start Image capture */

LCD_SetDisplayWindow(0, 0, 319, 239);
LCD_WriteRAM_Prepare();
DCMI_CaptureCmd(ENABLE);
/* Enable DMA transfer */
DMA_Cmd(DMA2_Stream1, ENABLE);
/* Enable DCMI interface */
DCMI_Cmd(ENABLE);
/* Start Image capture */
DCMI_CaptureCmd(ENABLE);
// Delay(2);
// DCMI_SingleRandomWrite(OV9655_DEVICE_WRITE_ADDRESS,0x8d, 0x10);//Came
// temp=DCMI_SingleRandomRead(OV9655_DEVICE_WRITE_ADDRESS,Ov9655_COM15);
// sprintf(data,"Okunan Data=0x%02X",temp);
// LCD_DisplayStringLine(0,0,data);
while(1)
{
    |
}
}
```

Şekil 3.12. Kamera ile haberleşmek için yazılan bir kod parçası (main.c)

Kamerayı çalıştırabilmek için yazılan main fonksiyonu ilk olarak temel LCD ayarlamalarını yapmaktadır. Bu işlemin ardından “OV9655_Configuration()” isimli fonksiyon çağrılmakta ve bu fonksiyonda kamera modülünün çözünürlük, kontrast vs. gibi ilk ayarlamaları yapılmaktadır. Eğer bu ayarlamalar başarısız olursa fonksiyondan 0xFF değeri dönmektedir ve LCD’nin ilk satır ilk sütunundan başlayarak “Camera Failed” yazısı basılmaktadır. Eğer konfigürasyon ayarları düzgün bir şekilde yapılandırılabilirse “Camera OK!” ifadesi LCD ekranın sol üst köşesinde belirlemekte ve sıradaki işlemlere geçilmektedir.

Çalışmada kullanılan LCD’nin çözünürlüğü 320x240 olup, “SetDisplayWindow” komutu ile pencere boyutu ayarlanmaktadır. Ayrıca “WriteRam_Prepare” komutu ile LCD’de mevcut bulunan GRAM (Grafik Ram) boşaltılmaktadır. Bu işlemin ardından DMA_Cmd komutu ile DMA akışı başlatılmaktadır. Bu noktada “DMA2_Stream1” komutu

ile DCMİ modülünün DR-Data Register'ından hedef hafıza arabelleğine veri transferi sağlanmaktadır ve "ENABLE" komutu ile kanal 1 aktif edilmektedir. Bu işlemten sonraki komut olan "DCMI_Cmd" ile dijital kamera arayüzü modülü aktif hale getirilmektedir. Son olarak "DCMI_CaptureCmd" komutu ile görüntü yakalama işlevi başlatılmaktadır. Yapılan tüm bu işlemler STM32F407'nin datasheet'in de bir kamera modülünden görüntü yakalayabilmek amacıyla belirtmiş olduğu adımlardır. Nihai olarak kod sonunda bir sonsuz döngü kurulmuş ve güç bağlantısı kesilene dek kameradan görüntü alınarak LCD'de gösterilmesi işlemi sorunsuz bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

Yapılan tüm bu işlemler ile bir CMOS tabanlı görüntü sensörünün ne şekilde konfigüre edilebileceği detaylarıyla belirlenmiş ve farklı türlerdeki görüntü sensörlerinin nasıl kullanılabileceği hakkında önemli bilgiler edinilmiştir.

3.4.2. Sayısal Kamera Prototipi-2

Doktora tez çalışmasının bu bölümünde daha önceden de belirlenmiş olan CMOS görüntü sensörü için gerekli çizimler gerçekleştirilmiş ve elektriksel bağlantıları tamamlanmış bir kamera modülü elde edilmiştir. Ayrıca bu kamera modülü için bir lens yuvası tasarlanmış ve CNC makinesinde bu yuva hazırlanmıştır. Netice olarak STM32F746 işlemci kullanılarak gerçekleştirilen bu sayısal kamera prototipinin detayları aşağıda alt bölümler halinde sunulmaktadır.

3.4.2.1. CMOS Görüntü Sensörü Tabanlı Kamera Modülü Tasarımı

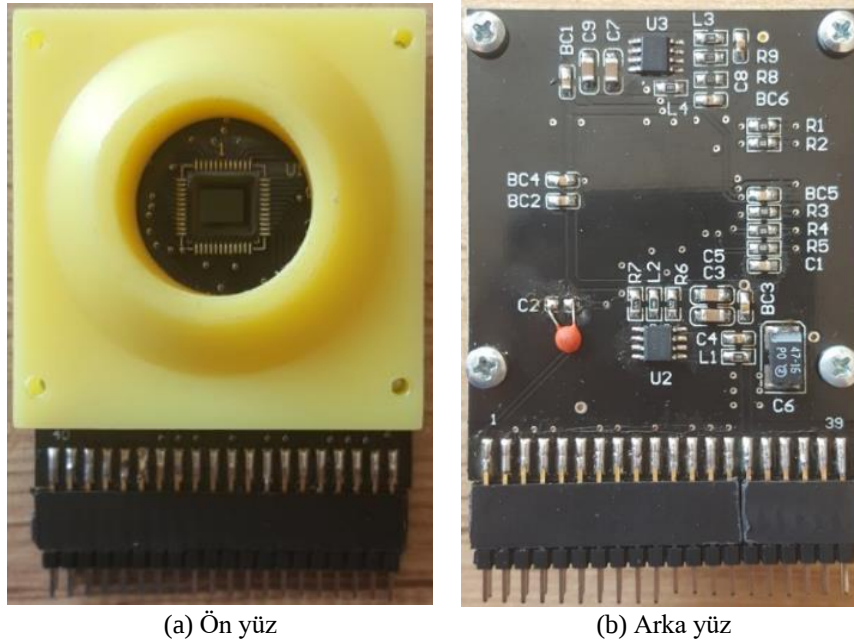
Bir önceki bölümde de belirtildiği üzere çözünürlük, saniyedeki görüntü karesi sayısı ve shutter türü gibi temel özellikler tez süresince dikkate alınmış ve buna yönelik bir görüntü sensörü modeli belirlenmiştir. Aptina markasının üretmiş olduğu MT9P0X serisi görüntü sensörleri de çalışma süresince kullanılacak olan sensör türü olup, tasarlanan prototip kamera modülünde de temel argüman olarak görev almaktadır.

Bu görüntü sensörünün tercih edilmesindeki en önemli sebeplerden birisi şüphesiz ki çözünürlük ve frame sayısının ayarlanabilir olmasıdır. Bu sayede istenilen özellikte görüntüler elde edilebilmektedir. Yine bu sensör modelinin tercih sebeplerinden birisi de aptina firmasının görüntü sensörüne ait register değerlerini ücretsiz olarak paylaşmasıdır. Bu oldukça önemli bir konu olup, kameranın düzgün çalışabilmesi ve net görüntü

sunabilmesi açısından bu referans değerlerinin sensöre belirli haberleşme standartları kullanılarak iletilmesi gerekmektedir. Yapılan çalışmalar neticesinde bu işlemler gerçekleştirilmiş ve tez kapsamında ortaya konan kamera modülünden görüntüler elde edilmiştir.

Tez çalışması çerçevesinde yapılan çalışmalar öncelikli olarak ARM tabanlı bir işlemciye sahip olan STM32F serisi kartlar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Özellikle bir önceki prototipte ortaya konan ve OmniVision firmasına ait OV9655 kamera modülü kullanılarak gerçekleştirilen çalışmalar kart üzerindeki hâkimiyeti sağlamış olup, yeni görüntü sensörü için de gerekli alt yapıyı sunmuştur. Bu sebepten tasarlanan kamera modülünü gerçekleştirmek için STM32F746 discovery geliştirme kiti kullanılmıştır. Fakat ilerleyen süreçlerde işlemcinin haberleşme hızının yetersiz kalması bu konudaki çalışmaları FPGA kitler üzerine yoğunlaştırmıştır. Yapılan bu çalışmalar ilerleyen bölümlerde detaylı bir şekilde sunulacaktır.

Bölüm başında da belirtildiği üzere doktora tezi çalışması kapsamında Aptina firmasının görüntü sensörleri kullanılmıştır. Bu çerçevede görüntü sensörünün katalogu detaylı bir şekilde incelenmiş ve bacakları hakkında detaylı bilgi edinilmiş olup, çalışmada kullanılacak kamera modülünün tasarımı sağlanmıştır. Bu çerçevede ortaya konan kamera modülüne ait bir görüntü Şekil 3.13’de sunulduğu gibidir.



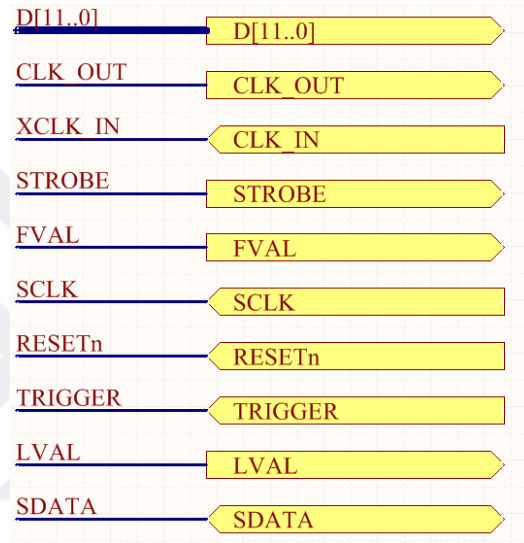
Şekil 3.13. Tasarlanan kamera modülü

Pin connection diagram for the P1 header of the STM32F407VGT6. The diagram shows connections for 40 pins. Pins 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19, 21, 23, 25, 27, 29, 31, 33, 35, 37, and 39 are connected to various signals. Pins 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 30, 32, 34, 36, 38, and 40 are connected to various signals. Pins 17, 18, 21, 22, 27, 28, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, and 39 are marked with a red 'X', indicating they are not connected. A 3V3 supply is connected to pin 29. Ground (GND) is connected to pins 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 30, 32, 34, 36, 38, and 40.

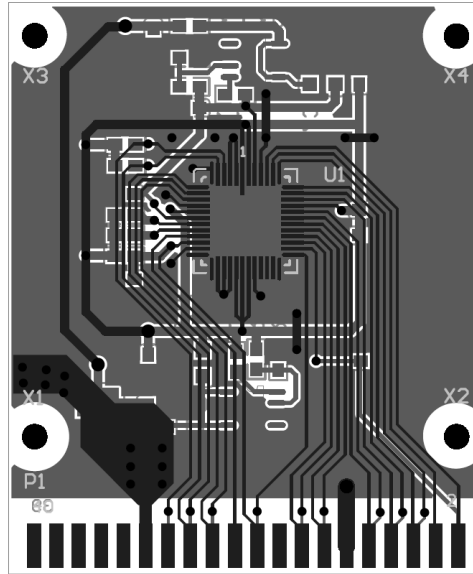
Signal	Pin	Signal	Pin
CLK OUT	1	D11	2
	3	D10	4
D9	5	D8	6
D7	7	D6	8
D5	9	D4	10
	11	D2	12
D3	13	D0	14
D1	15		16
CLK IN	17	RESETn	18
	19	TRIGGER	20
STROBE	21	LVAL	22
FVAL	23	SDATA	24
SCLK	25		26
	27		28
	29		30
	31		32
	33		34
	35		36
	37		38
	39		40

59

Ortaya konulan kamera modülünün en önemli özelliklerinden birisi bünyesinde Aptina görüntü sensörünü barındırmasıdır. Yapılan incelemelerde Aptina firmasının üretmiş olduğu görüntü sensörlerinin neredeyse tamamının pin dağılımının aynı olduğu görülmüştür. Bu sayede görüntü sensörü üzerinde yapılacak herhangi bir modifikasyon, değişiklik çok rahatlıkla gerçekleştirilebilecek durumdadır. Ayrıca görüntü sensörünün giriş ve çıkışlarını gösteren bir blok diyagram Şekil 3.16’da sunulduğu gibidir. Sistemin kompozit çizimi ise Şekil 3.17’de verilmiştir.



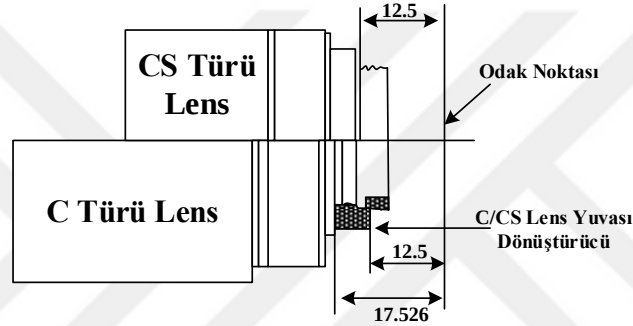
Şekil 3.16. Aptina görüntü sensörü giriş çıkış diyagramı



Şekil 3.17. Aptina görüntü sensörü kompozit çizim

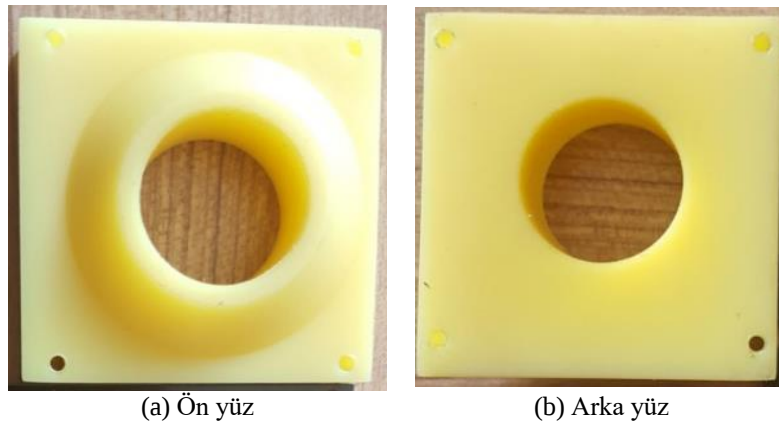
3.4.2.2. Kamera Modülü için Lens Yuvası Tasarımı

Tasarlanan kamera modülünden görüntüyü net bir şekilde alabilmek amacıyla bir adet lens yuvası hazırlanmıştır. Piyasada genellikle sayısal kameralar için kullanılan iki tür lens yuvası vardır. Bunlar sırasıyla C ve CS tipteki yuvalardır. Yapılan incelemelerde genellikle bu tür kameralarda C tipi lens yuvası kullanıldığı görülmüştür. Ayrıca C tipi lens yuvalarının CS türdeki lens yuvalarına bir ring aracılığıyla dönüştürülebilmesi C türü yuvanın seçilmesinde bir diğer faktörü oluşturmuştur. C ve CS tipi lens yuvalarının farklarını özetleyen bir blok diyagram Şekil 3.18’de verildiği gibidir.



Şekil 3.18. Lens türlerinin özellikleri

Bu tez çalışmasında C türü lens yuvası hazırlanmıştır. CNC tezgâhında hazırlanan bu yuva ile piyasada mevcut bulunan lenslerin görüntü sensörünün önüne düzgünce yerleştirilmesi sağlanmıştır. Yapılan bu işlem ile CS türünde lens yuvası kullanılması gerektiğinde temin edilecek dönüştürücü adaptör ile rahatlıkla değişim yapılabilir. Tez çerçevesinde geliştirilen bu lens yuvasına ait bir görüntü Şekil 3.19’da verildiği gibidir.



Şekil 3.19. C türü lens yuvası

3.4.2.3. Kamera Modülü için Lens Seçimi ve Kullanılan Lensler

Tez çalışmasının bir diğer önemli ayağı kamerada kullanılacak lenslerin seçimidir. Kamera karşısındaki nesnenin görüntüsünün net bir şekilde görüntü sensörüne düşürülmesini sağlayacak olan bu önemli donanım piyasada gerçekleştirilen incelemeler ve yapılan literatür taramaları neticesinde belirlenmiştir. Bu çerçevede kamera modülünden görüntü alabilmek amacıyla odak uzaklığı ve diyafram aralığı değişebilen bir lens tercih edilmiştir. Bu lense ait teknik detaylar Tablo 3.5’de sunulduğu gibidir. Ayrıca çalışmada kullanılan bu lense ait çeşitli görüntüler Şekil 3.20’de verildiği gibidir.

Tablo 3.5. Tercih edilen lens türü

Parametre	Değer
Marka	Goyo Optical
Model	GAZ804801
Kontrol	Kontrol edilebilir motorlu
Odak Uzaklığı	8-48 mm
Diyafram Aralığı	F1.0-1200
Yuva Türü	C
Ağırlık	500 gr
Boyutlar (GxYxU)	70x60x100 mm



(a) Yan görünüm



(b) Ön görünüm



(c) Arka görünüm

Şekil 3.20. Çalışmalarda kullanılan lense ait görüntüler

Yapılan incelemeler neticesinde bu ürünün geliştirilecek kamera için uygun olduğu görülmüştür. Ayrıca bu ürünün tercih edilmesindeki bir diğer sebep ise bu lensin motorlu olmasıdır. Hem diyafram hem de zoom özellikleri elektrik sinyalleri ile kontrol edilebilmektedir. Bu sayede kameranın optimum noktası rahatlıkla belirlenebilmekte ve doğru ışık seçimi diyafram kontrolü ile sağlanabilmektedir. Kamera modülünün testi sürecinde bu lens kullanılmıştır. Fakat bu lensin motorlu olması, 9v güç kaynağı ile kontrol edilebilmesi ve ortam parametrelerinin değişken olmasından ötürü yapılan çalışmalarda manuel diyafram kontrolüne sahip sabit odak uzunluklu bir lens kullanılmıştır. Bu lens tez sürecinde temin edilmiş ve sadece kamera modülünün test işlemlerinde kolaylık sağlanması amacıyla kullanılmıştır. Yine bu lense ait teknik detaylar Tablo 3.6’da verilmiş olup, lensin görüntüleri Şekil 3.21’de sunulmuştur.

Tablo 3.6. Test işlemlerinde kullanılan lens türü

Parametre	Değer
Marka	RICOH
Model	FL-HC0416X-VG
Kontrol	Sabit
Odak Uzaklığı	4.2 mm
Diyafram Aralığı	F1.6-Close
Yuva Türü	C
Ağırlık	120 gr
Boyutlar (GxU)	42x43.5 mm



Şekil 3.21. Çalışmada test amaçlı kullanılan lense ait görüntüler

3.4.2.4. Kamera Modülü için STM32F746 ile Gerçekleştirilen Yazılım

Kamera modülünün test işlemlerini gerçekleştirebilmek amacıyla öncelikli olarak STM32F746 Discovery geliştirme kiti kullanılmıştır. Bu kitin dahili ARM işlemcisine sahip olması, ayarlanabilir clock üreteçlerini barındırması ve C dilinde programlanabilmesi tercih sebeplerinin başında gelmektedir. Yapılan hesaplamalarda bu kit ile kamera modülünün tam verimlilikle kullanılabileceği saptanmıştır. Bilineceği üzere bir önceki prototipte bu kit kullanılarak bir sayısal kamera uygulaması geliştirilmiş ve kart hakkında detaylı bilgiye sahip olunmuştur. Yine bu prototip için de yapılan çalışmalarda bu kit üzerine yoğunlaşmış ve kamera modülüne dair önemli sonuçlar elde edilmiştir. Çalışmalarda kullanılan STM32F746 kitine ait bir görüntü Şekil 3.22’de verildiği gibidir.



(a) Ön yüz



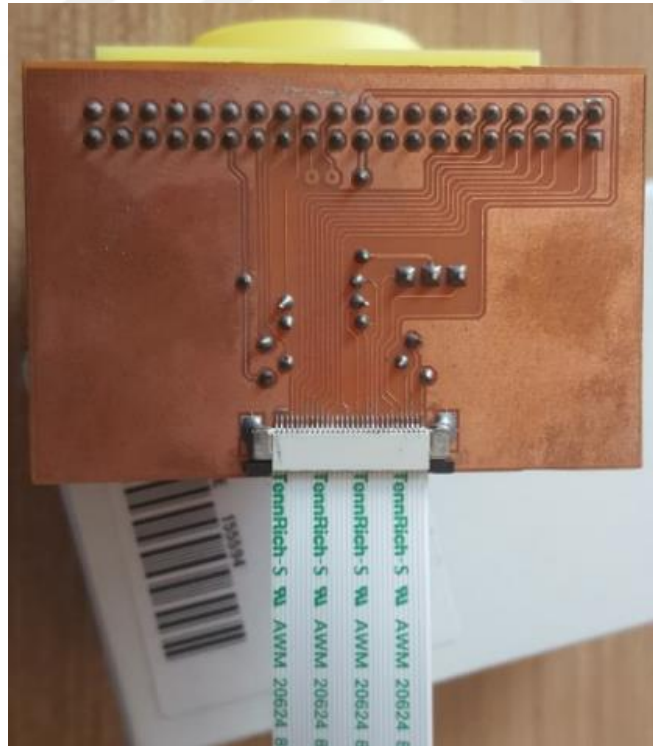
(b) Arka yüz

Şekil 3.22. Çalışmalarda kullanılan STM32F746 Discovery Geliştirme Kiti

Bu kitin dahili DCMI (Digital Camera Modul Interface) modülüne sahip olması özellikle kamera uygulamaları geliştirme açısından oldukça büyük kolaylık sağlamaktadır. Yine tez

süresince ortaya çıkarılacak ürünün ticari amaçlı olacağı düşünüldüğünde ve kartın donanımın açık kaynaklı olarak sunulduğu dikkate alındığında tercih sebepleri artmaktadır. Şekil 3.22’den de görüleceği üzere yine bu kit dahili bir dokunmatik panele sahiptir. Kamera modülünün ayarlanabilir özelliklerinin bu ekran üzerinden yapılacağı düşünülmüş ve kamera modülünden alınacak görüntülerin bu panel üzerinde de ön izlemesinin sağlanacağı planlanmıştır. Bu kit ayrıca gerek Ethernet gerekse USB üzerinden PC ile haberleşebilmektedir. Bu portlar aracılığıyla görüntüler ana makineye aktarılabilir. STM32F kitinin maliyetinin de düşük olması kartın kullanılabilirliğini arttırmaktadır.

STM32F746 kit ile kamera modülü birbirine DCMI modülü üzerinden bağlanmıştır. Modül ve kit arasındaki haberleşme bu hat üzerinden sağlanmış ve görüntüler de yine bu hat üzerinden elde edilmiştir. Aradaki bu bağlantıyı sağlayabilmek için FPC kablo kullanılmış ve kamera modülüne ek bir kart hazırlanmıştır. Hazırlanan bu ek kart sayesinde kamera modülünün kite tam uyumluluğu sağlanmıştır. Hazırlanan bu karta ait bir görüntü Şekil 3.23’de sunulmaktadır. Ayrıca sistemin bütün halini gösteren örnek şekiller ise Şekil 3.24 ve 3.25’de verilmektedir.



Şekil 3.23. DCMI modülü için hazırlanan adaptör



Şekil 3.24. Kamera modülü ve STM32F746 ön yüz



Şekil 3.25. Kamera modülü ve STM32F746 arka yüz

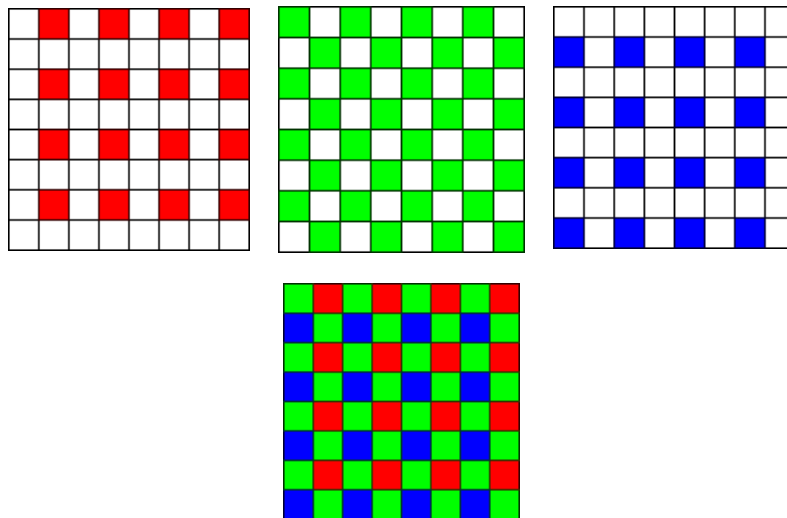
Kamera modülünden görüntüyü net bir şekilde edebilmek için görüntü sensörüne ait register değerlerinin programda düzgün bir şekilde ayarlanması gerekmektedir. Bu amaçla açık olarak paylaşılan bu değerler kamera test yazılımında ayarlanmıştır. Gerekli adres ve referans değerler programda kodlanmış olup, bu değerlerden bazı önemlileri Şekil 3.26’da verilmiştir.

Resolution	Frame Rate	Sub-sampling Mode	Column_Size (R0x04)	Row_Size (R0x03)	Shutter_Width_Lower (R0x09)	Row_Bin (R0x22 [5:4])	Row_Skip (R0x22 [2:0])	Column_Bin (R0x23 [5:4])	Column_Skip (R0x23 [2:0])
2592 x 1944 (Full Resolution)	14	N/A	2591	1943	<1943	0	0	0	0
2048 x 1536 QXGA	21	N/A	2047	1535	<1535	0	0	0	0
1600 x 1200 UXGA	31	N/A	1599	1199	<1199	0	0	0	0
1280 x 1024 SXGA	42	N/A	1279	1023	<1023	0	0	0	0
1024 x 768 XGA	63	N/A	1023	767	<767	0	0	0	0
	63	skipping	2047	1535		0	1	0	1
	47	binning	2047	1535		1	1	1	1
800 x 600 SVGA	90	N/A	799	599	<599	0	0	0	0
	90	skipping	1599	1199		0	1	0	1
	65	binning	1599	1199		1	1	1	1
640 x 480 VGA	123	N/A	639	479	<479	0	0	0	0
	123	skipping	2559	1919		0	3	0	3
	53	binning	2559	1919		3	3	3	3

Şekil 3.26. Çözünürlük ayarı için örnek register değerleri

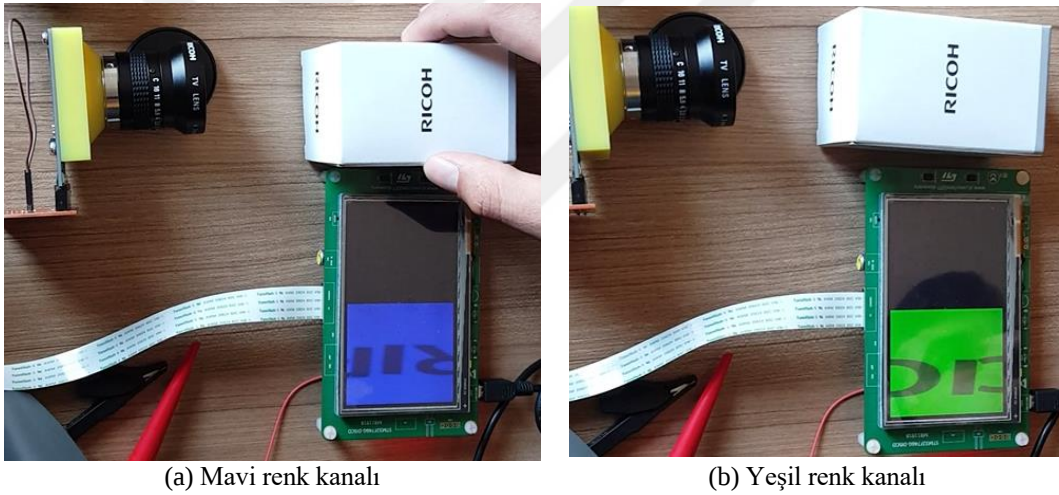
Şekil 3.26’da kırmızı blok ile belirtilen kısım 0x04 ve 0x03 adreslerine yazılacak örnek değerleri göstermektedir. Bu değerler kit üzerinde yazılan programda değiştirilerek kameranın çözünürlüğü ayarlanabilmektedir. Bu register değerleri sensörün sadece iki adresi için olan değişiklikleri göstermektedir. Rezerve edilmiş adresler ile birlikte görüntü sensörünün toplam 255 adet register’ı bulunmaktadır ve bu 255 farklı adresin birçoğu farklı bir işlemi temsil etmektedir. Bu değerlerin tamamı incelenerek kamera modülünün optimum ve stabil çalışması sağlanmıştır.

Tez çalışmasında kullanılan kamera modülünden elde edilen veriler RAW Bayer formatındadır ve işlemciye piksel verileri bu formatta gelmektedir. Literatürde farklı Bayer dizilimleri mevcut olmakla beraber çalışmalarda kullanılan görüntü sensörünün renk dizilimi Şekil 3.27’de verildiği gibidir.



Şekil 3.27. Görüntü sensörünün Raw Bayer formatında renk dizilimi

Şekil 3.27’den de görülebileceği üzere piksel verilerinin bayer formatında okunması gerekmektedir. Bu sayede tam bir görüntü karesi elde edilebilmekte ve objenin görüntüsü sağlanmaktadır. Yine şekilden görüleceği üzere okunacak ilk piksel verisinin renk kanalı yeşil olmalıdır. Sonraki ise kırmızı olmalıdır. Bu şekilde ilk satırın okunması işlemi soldan sağa doğru gerçekleştirilecektir. Daha sonra ikinci satırda ilk olarak mavi renk sonrasında yeşil renk okunacaktır. Ve bu işlemlerin tamamı görüntü karesi tamamlanıncaya kadar sürdürülecektir. Bu işlemlerin düzgün bir şekilde yapılması görüntünün elde edilmesi açısından oldukça önemlidir. Test sürecinde yapılan çalışmalarda öncelikli olarak tüm pikseller tek renk üzerinden ekrana basılmış ve görüntü elde edilmiştir. Bir sonraki aşamada ise Bayer formatı dikkate alınarak renk değerlerinin ekrana basılması işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu süreci özetleyen örnek görüntüler Şekil 3.28 ve 3.29’da sunulduğu gibidir.



Şekil 3.28. Mavi ve yeşil renk kanalları kullanılarak ekrana basılmış görüntüler



Şekil 3.29. Bayer Raw formatı gözetilerek ekrana basılan sonuç

Yapılan incelemelerde görüntü sensörünün tam verimlilikle kullanılabildiği tespit edilmiştir. Başka bir deyişle full frame ve VGA çözünürlükleri arasında geçişler rahatlıkla yapılabilmekte farklı durumlarda da görüntü elde edilebilmektedir. Full frame’de alınan görüntü, kitin ekran boyutunu aştığı için alınan görüntülerde kesme işlemi yapılmakta ve o şekilde ekrana basılmaktadır. Fakat alınan görüntünün çözünürlüğü yine 5 MP olmaktadır. Bayer formatına göre alınan piksel verileri direkt olarak ekrana basıldığında pikseller arasındaki geçişler gözle görülür derecede hissedilmektedir. Bu işlemin üstesinden gelebilmek için RAW görüntü verisine interpolasyon işleminin uygulanması gerekmektedir. Bu işlem de STM32F746 discovery kitinin işlemcisi yoracağından, bu adımın ana işlem biriminde gerçekleştirilmesi öngörülmüştür. Bu sebepten RAW formatta alınan görüntü verisi bilgisayara iletilmekte ve interpolasyon işlemi ile görüntünün netleştirilmesi sağlanmaktadır.

STM32F746 geliştirme kiti üzerinde yapılan çalışmalar neticesinde istenilen özelliklere ve formata sahip görüntüler elde edilebilmiştir. Bu aşamadan sonra görüntünün bilgisayar ortamına aktarılması süreci için çalışmalar da bulunulmuştur. Bu noktada piyasadaki mevcut endüstriyel kameralar incelenmiş ve bu kameraların iletişim standartları ele alınmıştır. Yapılan araştırmalarda kameraların genellikle ya Ethernet ya da USB portu üzerinden haberleştiği görülmüştür. Gerçekleştirilen bu tez çalışmasında yaklaşık olarak saniyede aktarılması gereken veri miktarı full çözünürlük için aşağıda hesaplandığı gibidir;

$$1 \text{ piksel} = 32 \text{ bit} = 4 \text{ byte}$$

$$1 \text{ frame} = 5.000.000 \text{ piksel} \times 4 \text{ byte} = 20 \text{ megabyte}$$

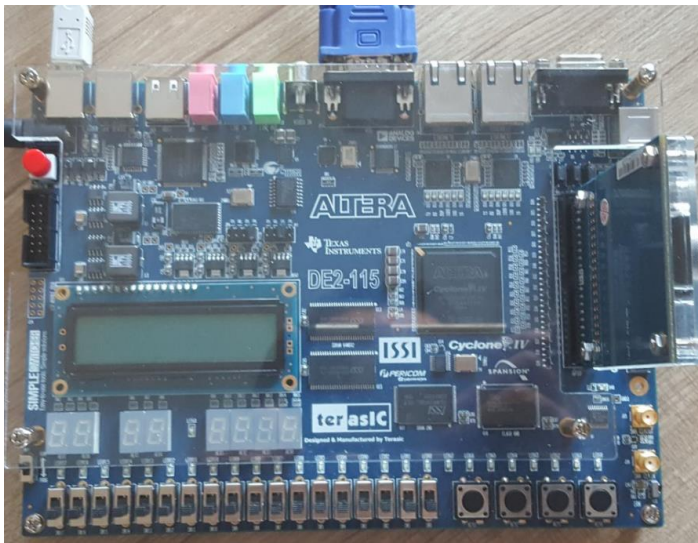
Hesaptan da görülebileceği üzere sıkıştırılmamış bir görüntü karesinin boyutu tam çözünürlükte 20 MB’dır. Saniyede gelen görüntü karesi miktarı dikkate alındığında, bu miktarda veriyi aktarabilmek için kullanılması gereken minimum veri transfer oranı 1 gbps olmak zorundadır. Bu durumda da ya 10/100/1000 mbit veri transfer oranına sahip Ethernet portu ya da USB 3.0 (4.8 gbit) destekli bir iletişim standardına ihtiyaç duyulmaktadır. Yukarıda verilen hesaplamalar RAW veri formatı için geçerli olmak ile beraber TIFF gibi görüntüyü az kayıpla sıkıştıran formatlar kullanıldığında veri transfer oranı miktarı da aşağıya çekilecektir. Piyasada yapılan incelemeler neticesinde 1000 mbit Ethernet portuna sahip kartların FPGA boardlarında olduğu görülmüş ve bu aşamadan sonra çalışmalar bu kanala yönlendirilmiştir.

3.4.3. Sayısal Kamera Prototipi-3

Sayısal kamera tasarımının son aşamasında FPGA işlemciler kullanılarak bir prototip geliştirilmiştir. Bu amaçla öncelikli olarak VGA hattı üzerinden aldığı görüntüleri gönderen bir sistem oluşturulmuş olup, kamera modülünün çalışma durumu test edilmiştir. Çalışmanın bir sonraki aşamasında ise Ethernet aracılığıyla haberleşme protokolü gerçekleştirilmiş ve sayısal kamera prototipi çalışır hale getirilmiştir. Tez çalışmasının bu adımına ait detaylar alt bölümler halinde aşağıda sunulduğu gibidir.

3.4.3.1. VGA Portu ile Görüntü Aktarımı

Bilindiği üzere FPGA'ların en önemli özellikleri tüm işlemlerini donanımsal ve paralel olarak gerçekleştirmesidir. Buradan hareketle kamera modülü için bir FPGA geliştirme kitinde yazılımlar geliştirilmiştir. Tez kapsamında hazırlanan prototip kamera modülü için Cyclone IV FPGA üzerinde test işlemleri yapılmıştır. Bu amaçla Altera DE2-115 geliştirme kartı kullanılmış olup, yine bu kart ile uyumlu olan ve Terasic firması tarafından üretilen bir kamera modülü test sürecinde ele alınmıştır. Test işleminde kullanılan bu kamera modülü tarafımızca geliştirilen modül ile aynı sensöre sahip olup, bağlantı şeması da yine tamamen uyumludur. Çalışmalarda kullanılan DE2-115 kit'e ait bir görüntü Şekil 3.30'da verildiği gibidir.



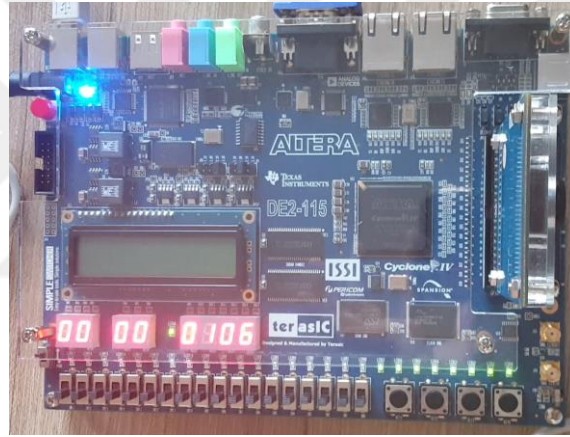
(a) Geliştirme kiti



(b) Kamera modülü

Şekil 3.30. Altera Cyclone IV DE2-115 FPGA geliştirme kiti ve kamera modülü

Çalışma kapsamında kullanılan FPGA kit 1000 mbit Ethernet portuna sahiptir. Bu durum da kamera modülünden saniyede 125 megabyte veri aktarılabilmesi anlamına gelmektedir. FPGA kit üzerinde yapılan çalışmalar neticesinde kamera modülünden görüntü verileri alınmış ve kitin VGA portu üzerinden bu görüntüler monitöre gönderilmiştir. Sistemde alınan frame sayısı seven segment display’de görüntülenmektedir. Ayrıca yine kitte bulunan anahtarlar sayesinde rgb2gray ve sobel kenar çıkarımı işlemleri gerçekleştirilebilmektedir. Kit üzerindeki butonlar sayesinde yakınlaştırma ve uzaklaştırma işlemleri yapılabilmektedir. Yine bu butonlar sayesinde kiti resetleme ve dondurma işlemleri de sağlanabilmektedir. Kitin çalışma durumunu gösteren örnek bir anlık görüntü Şekil 3.31’de sunulduğu gibidir. Ayrıca VGA port üzerinden aktarılan görüntünün monitör üzerinde görüntülenmesi durumuna ait bir görüntü Şekil 3.32’de verilmiştir.



Şekil 3.31. Sistemin çalışma durumuna ait bir görüntü



Şekil 3.32. Sistemin çalışma zamanında alınan örnek bir görüntü

FPGA kit üzerinde devam eden ve özellikle Ethernet yoluyla haberleşme konusu üzerine gerçekleştirilen çalışmalar neticesinde, kamera modülünden alınan görüntülerin ana işlem birimine sorunsuz ve hızlı bir şekilde iletilmesi sağlanmıştır. VGA port üzerinden haberleşme işlemini sağlayan bu süreçte, kamera modülünün gönderdiği veriler incelenmiş ve bu verilerin sahip oldukları yapı gözlemlenmiştir. Bu sayede Ethernet yoluyla iletişim konusunda gereken protokoller bu tasarıma göre gerçekleştirilmiştir.

3.4.3.2. Ethernet Portu ile Görüntü Aktarımı

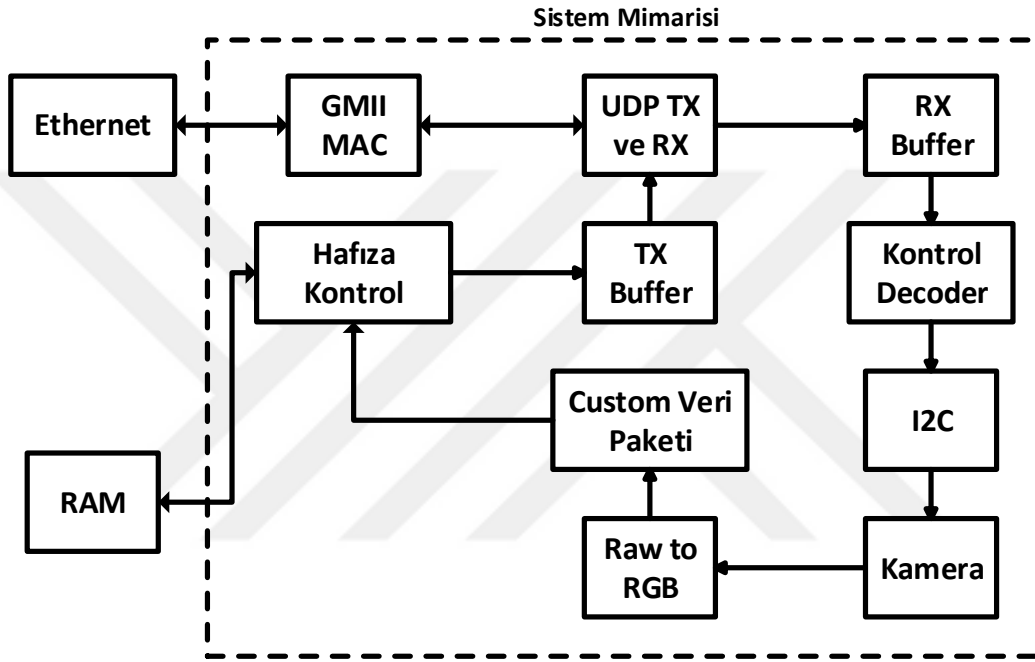
Doktora tez çalışmasının son aşamasında gerçekleştirilen sayısal kamera prototipinde önceki bölümlerde belirtilen kamera modülü ve FPGA kit kullanılarak bir geliştirme süreci yaşanmıştır. Bu amaçla yapılan çalışmaların ilk aşamasında Altera DE2-115 FPGA kit ve bu kite uyumlu bir kamera modülü kullanılarak sistemden görüntü alınmıştır. Görüntü çıkışı VGA portu aracılığıyla sağlanmış ve sistem çalıştırılabilir hale getirilmiştir. Çalışmalarda FPGA kitlerine yoğunlaşılmasının temel sebebi hız faktörüdür. Bilindiği üzere sistemin tam performansta çalışması durumunda (12 bit derinlik, 5 MP ve 14 fps) ortaya çıkan veri boyutu yaklaşık olarak 105 megabyte'dır. Bu veri oranı ise saniyede 840 mbit veri transferi anlamına gelmektedir. Bu noktada mevcut seçenekler düşünüldüğünde ve piyasadaki çözümler incelendiğinde en mantıklı yaklaşımın 10/100/1000 mbit Ethernet hattı üzerinden haberleşme olduğu görülebilmektedir. Çalışma kapsamında tercih edilen ve kullanılan bu kit 2 adet 1G (1000 mbit) Ethernet portuna sahiptir. Bu sebepten çalışmalar bu kite doğru kaydırılmış ve tüm tasarımlar bu çerçevede yapılmıştır.

Çalışma kapsamında kullanılan bu kit ile saniyede 125 megabyte veri aktarımı sağlanabilmektedir. Bu kit üzerinde gerçekleştirilen ilk çalışmalar neticesinde VGA çözünürlük için yaklaşık 15 fps görüntü elde edilmiştir. Daha sonrasında bu kart üzerinde Ethernet yoluyla veri aktarımı için çalışmalar sürdürülmüş ve sistem tümleştirme süreci başarıyla tamamlanmıştır. Bu noktada yapılan çalışmalar alt başlıklar halinde ilerleyen bölümlerde detaylı bir şekilde sunulmaktadır.

3.4.3.3. Sistem Mimarisi

Tez çalışması kapsamında yürütülen çalışmalar neticesinde sistemin mimarisi nihai olarak elde edilmiş durumdadır. Temel olarak Ethernet portu üzerinden haberleşerek çalışan

bu sistemin iç dinamiğini özetleyen bir blok diyagram Şekil 3.33’de sunulduğu gibidir. Sistem modüler bir yapıda tasarlanmış olup, istenildiği an düzenlenebilecek bir yapıdadır. İstenilen özellikler çok rahat bir şekilde sisteme eklenebilecek veya istenmeyen özellikler herhangi bir aksama yaşanmadan sistemden çıkarılabilecek bir durumdadır. Böylesi bir modüler tasarımın yapılmasının en temel sebebi ilerleyen zamanlarda kamera tasarımını geliştirmek ve o günün ihtiyacını karşılayacak şekilde yeniden dizayn edebilmektir.



Şekil 3.33. Modüler sistem mimarisi

Şekil 3.33’den de görülebileceği üzere kamera modülünden piksel verileri RAW formatta gelmektedir. Bu değerler RAW2RGB modülünde görüntü verilerine dönüştürülmekte ve gerekli düzenlemelerin ardından Ethernet portu aracılığıyla dış dünyaya aktarılmaktadır. Gerçekleştirilen bu mimaride temel olarak herhangi bir görüntü işleme veya sıkıştırma algoritması yer almamaktadır. Bunun temel sebebi ise piyasada bu tarz çalışan endüstriyel kameraların büyük bir çoğunluğunun görüntüyü RAW RGB formatta kullanıcılarının hizmetine sunmasıdır. Bu sebepten ötürü FPGA içerisinde JPEG, H264 gibi encoding formatları kullanılmamış ve görüntü verisi direk ana makineye aktarılmıştır. Ana makine ile haberleşme işlemi Ethernet aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Ethernet ile haberleşme işlemi çift yönlü olarak sağlanmaktadır. Başka bir deyişle ana makine üzerinden kamera ile ilgili gerekli ayarlamalar yapılarak yine Ethernet aracılığıyla FPGA’ya

iletilmekte ve bu bilgi FPGA üzerinde işlenerek gerekli düzenlemeler yapılmaktadır. Daha sonrasında onay bilgisi, sistem bilgisi ve görüntü verileri Ethernet portu üzerinden ana makineye iletilmektedir. Yine şekilden de görülebileceği üzere aslında her bir kutu bir modülü temsil etmektedir. Yani kullanıcı örneğin bir encoding (JPEG, PNG vs.) sisteme eklemek istediğinde bunu RAW2RGB modülünün hemen sonrasına yerleştirecek ve elde edilen çıkış bu sefer bu formatlara göre olacaktır. Veya kullanıcı herhangi bir görüntü işleme yöntemini eklediğinde (Color2Gray, Canny vs.) yine bunu RAW2RGB modülünün önüne yerleştirecek ve sistemden doğrudan bu filtrelerden geçirilmiş sonuçlar elde edilecektir. Fakat bölüm başında da belirtildiği üzere bu özellikler sisteme eklenmemiş tamamen kullanıcıya bırakılmıştır. Önerilen yaklaşımda hedeflenen temel amaca göre Ethernet üzerinden görüntü verisi alınacak ve ana makine üzerine bu görüntü verisi işlenecektir. Son kullanıcı ise bir arayüz üzerinden bu çalışmayı kontrol edebilecek gerekirse sisteme müdahalelerde bulunabilecektir.

Tez çalışması kapsamında bu FPGA kitinin tercih edilmesindeki bir diğer sebep ise 2 adet 1G Ethernet portuna sahip olmasıdır. İlerleyen süreçlerde daha yüksek kapasitelere sahip kamera modüllerinin kullanılması durumunda bu iki portta aynı anda kullanılabilecek ve gelen görüntü verileri iki farklı kanaldan ana işlem birimine iletilecektir. Ayrıca mevcut çalışmalarda da hız ile ilgili bir sıkıntı yaşanması durumuna karşılık bu seçenek bir çözüm olarak düşünülmüştür. Sistem mimarisinde önemli bir konuma sahip bazı modüller ilerleyen bölümlerde detaylı bir şekilde sunulmaktadır.

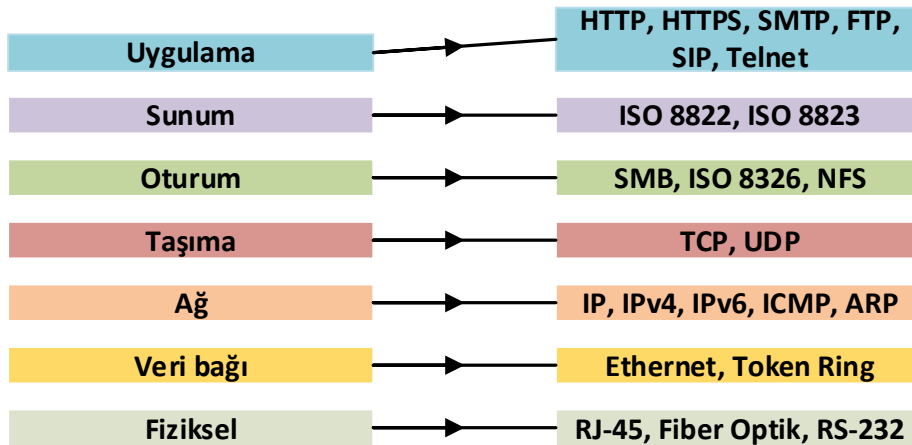
3.4.3.4. Ethernet ile Haberleşme Protokolü

Gerçekleştirilen bu tez çalışmasının en önemli kısımlarından birisini Ethernet ile haberleşme sistemi oluşturmaktadır. Özellikle veri boyutunun yüksek olması ve FPGA tarafından üretilen görüntü verisinin kayıpsız olarak ana makineye iletilmesi en önemli kısımlardandır. Bilindiği üzere FPGA'lar yeniden yapılandırılabilir ve içerisinde yeniden işlemciler oluşturulabilir yapıya sahiptirler. Bu yapısı sayesinde kullanıcılar kişisel ihtiyaçlarına göre yeni tasarımlar ortaya koyabilmekte ve farklı farklı alanlar için oldukça iyi çözümler üretebilmektedirler.

Her FPGA içerisinde belirli standartlara göre hazırlanmış ve optimize edilmiş bazı hazır fonksiyonlar bulunmaktadır. Bu fonksiyonlara “Intellectual Property Core-IP Core” adı verilmektedir. Fikri mülkiyet çekirdekleri olarak adlandırılan bu yapılar gerektiğinde son

kullanıcı tarafından değişikliğe uğratarak kullanılabilmekte ve bu çerçevede istenilen uygulamalar ortaya konabilmektedir. Bu konuda mevcut olan IP Core'lar dan birisi de Ethernet Mac Core'dur. Genellikle Ethernet portuna sahip her FPGA geliştirme kitinde bulunan bu core ile Ethernet tabanlı uygulamalar geliştirilebilmekte ve kullanıcılar dış dünya ile haberleşebilmektedir. Ethernet Mac Core gerçekleştirilen bu tez çalışması için oldukça kritik bir öneme sahiptir. Önceki bölümlerde de bahsedildiği üzere sistemden saniyede yaklaşık olarak 105 MB veri akışının hedeflenmesi planlanmakta olup, bu da yaklaşık olarak 840 mbit'e denk gelmektedir. Bu amaçla Ethernet yoluyla haberleşme tercih edilmiş ve sistem mimarisi bu yaklaşıma göre dizayn edilmiştir. Fakat gerçekleştirilen çalışmalarda ne yazık ki FPGA kiti içerisinde hazır olarak bulunan bu Ethernet Mac Core'un kapalı bir yapıya sahip olduğu ve sadece belirli uygulamalar için kullanılabildiği gözlemlenmiştir. Başka bir deyişle spesifik bir uygulama geliştirmeyi hedefleyen kullanıcıların kendi Mac Core'larını tasarlaması gerektiği görülmüştür. Bu sebepten tez sürecinde hazır Mac Core kullanılamamış olup, yeni tasarım sürecine girilmiştir.

Yapılan araştırmalar neticesinde açık kaynaklı olarak sunulan bazı Ethernet Mac Core'lar bulunmuş, fakat hedeflenen çıktıyı elde edebilmek için bu çekirdeklerin yetersiz kalacağı görülmüştür. Bu sebepten hali hazırda açık kaynak olarak sunulan bu çekirdeklerden en uygun olanı tespit edilmiş ve belirlenen hedeflerin sağlanabilmesi için bu çekirdeğin geliştirilmesi yolu tercih edilmiştir. Ethernet Mac Core geliştirme işleminin tam manasıyla yapılabilmesi için ağ konusunda önemli bir yere sahip olan OSI modelinin incelenmesi gerekmektedir. Bu modeli özetleyen bir blok diyagram Şekil 3.34'de verildiği gibidir.



Şekil 3.34. OSI referans modelinin katmanları

3.4.3.5. OSI Modeli Katmanları

OSI modeli temel ağ yapısını özetleyen bir yapı olup, bir ağa sahip cihazların birbirleriyle nasıl iletişim kuracağını gösteren bir modeldir. 1984 yılında nihai şeklini alan bu yapı ile ağ işlemlerinin ne şekilde yapılacağı belirlenmiştir. Temel olarak 7 katmandan oluşan bu yapıya ait katmanların detayları maddeler halinde aşağıda sunulduğu gibidir.

- **Fiziksel Donanım Katmanı:** Bu katman sistemin dış dünyayla nasıl ve ne şekilde iletişim kuracağını belirlemektedir. Aktarım modelleri (simplex, half duplex, full duplex), bazı ağ topolojileri (bus, mesh, ring vs.) ve fiziksel/elektriksel aygıtlar (RJ45, Fiber optik kablo vs.) bu katmanda tanımlanmaktadır. Gerçekleştirilen bu tez çalışmasında iletim aygıtı olarak RJ45 jakları ve Cat 5e/Cat 6 kablo türü kullanılmaktadır. Aktarım modeli olarak 1000 mbit full duplex ve ağ topolojisi olarak bus modeli tercih edilmiştir.
- **Veri Bağı Katmanı:** Bu katman verilerin parçalara ayrıldığı ve çerçeveler haline getirildiği kısımdır. Bu katmanda Ethernet, Wi-Fi, Token Ring gibi çeşitli protokoller tanımlıdır. Tez çalışması kapsamında bu katmanda kullanılan protokoller Ethernet, CSMA/CD ve MAC'dir. Çalışmalarda 1000 mbit yani 1G (Gigabit Ethernet) kullanılacağı için Ethernet protokolü tercih edilmiştir. Başka bir deyişle GigaBit Ethernet=IEEE 802.3=Ethernet=CSMA/CD'dir. Ayrıca ana işlem biriminde kullanılacak olan switch'ler de bu katmanda tanımlıdır. Çünkü bu katmanda tanımlı olan MAC adreslerini çözümleyebilmekte ve gelen veri paketini sadece o MAC'e iletebilmektedir.
- **Ağ Katmanı:** Bu katmanda IP, IPV4, IPV6, ARP gibi protokoller tanımlıdır. Tez çalışması çerçevesinde ise bu katmanda sırasıyla ARP, ICMP ve IPV4 protokolleri kullanılmaktadır. ARP (adres çözümleme protokolü) ile ağ katmanı adreslerinin (IPV4) veri bağı katmanı adreslerine çözümleme işlemini yerine getirilmektedir. ICMP (Internet kontrol mesaj iletişim protokolü) ile de katmanlar arasındaki kontrol mesajları IP yerine bunun üzerinden aktarılmaktadır. Sistemde kontrol amaçlı kullanılmaktadır.
- **Taşıma Katmanı:** Bu katmanda genel olarak iki tipte protokol kullanılmaktadır. Bunlar sırasıyla TCP/IP ve UDP'dir. Gerçekleştirilen bu çalışmada bazı sebeplerden ötürü UDP protokolü kullanılmaktadır. Bu protokolün kullanım sebepleri, amacı,

Çalışma mantığı ve paket içeriğı ilerleyen bölümlerde detaylı bir şekilde sunulacaktır.

- **Oturum Katmanı:** Bu katman ana işlem birimi ile kamera prototipi arasında oturum kurulmasını sağlayan katmandır. Yani oturumun kurulmasını, yönetilmesini ve sonlandırılmasını sağlamaktadır. Bu bölüm ana işlem birimi üzerinde çalışan arayüz ve kamera içerisinde çalışan Ethernet MAC kontrolcüsünün haberleşmesi için kullanılmaktadır.
- **Sunum Katmanı:** Bu katmanda temel olarak elde edilen verilerin dönüştürölmesi işlemi bulunmaktadır. Başka bir deyişle kullanıcıya verilerin ne şekilde gösterileceğı belirlenmektedir. Gerçekleştirilen çalışmada bu katmanda tanımlı olanlar RGB RAW, JPEG ve H.264 formatlarıdır. Fakat çalışma sadece RGB Raw data üzerinden sürdürölmüştür. Bunun temel sebebi endüstriyel sistemlerde genel olarak ham görüntü verisi üzerinde işlem yapılmasıdır. Fakat önceki bölümlerde de bahsedildiğı üzere tasarlanan sistem modülerdir ve bu encoding'ler istenildiğı an sisteme adapte edilebilecektir.
- **Uygulama Katmanı:** Bu katman OSI referans modelinin son katmanı olup, tamamen kullanıcıyı alakadar eden ve kullanıcının sistemle haberleşebilmesine yardımcı olan bölümdür. Bu katmanda tez çalışması kapsamında tasarlanmış olan arayüz bulunmaktadır. Kullanılacak bu arayüz ise UDP receiver'dır. Bu arayüz üzerinden kullanıcı ana işlem birimine gerekli direktifleri gönderebilmekte ve yine elde edilen sonuçları bu katmanda mevcut bulunan arayüz üzerinde gözlemleyebilmektedir.

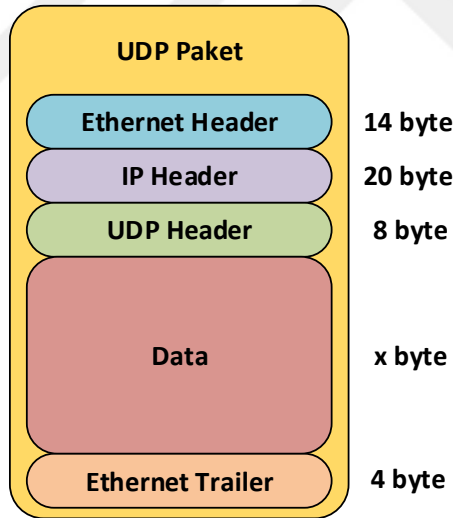
3.4.3.6. UDP Veri Transfer Protokolü

Gerçekleştirilen çalışmalarda taşıma katmanında da belirtildiğı üzere UDP (User Datagram Protocol) veri transfer protokolü kullanılmıştır. OSI modeline göre taşıma katmanında temel olarak TCP/IP ve UDP olmak üzere iki tipte veri aktarım protokolü bulunmaktadır. Bu protokollerden biri olan UDP, tez çerçevesinde belirli sebeplerden ötürü tercih edilmiş olup, bu tercih sebepleri maddeler halinde aşağıda özetlendiğı gibidir;

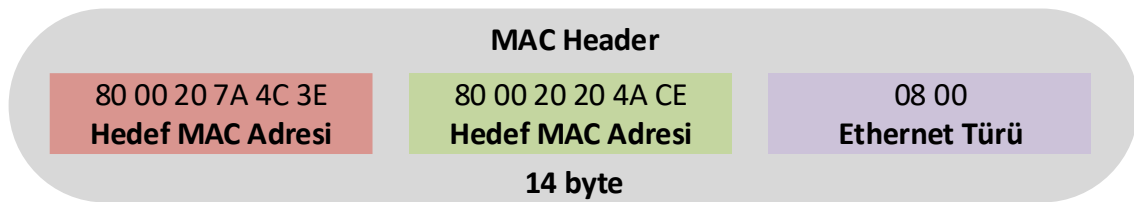
- Geniş alan ağlarında sıklıkla tercih edilen bu protokol ile genellikle ses, görüntü gibi gerçek zamanlı veriler aktarılmaktadır.

- Veri iletim süresi TCP/IP yapısına göre daha kısadır.
- Bu protokol minimum protokol mekanizmasıyla bir uygulama programından diğerine mesaj göndermek için kullanılmaktadır.
- Uluslararası piyasada endüstriyel kameraların bağlı olduğu ve kullanmış olduğu sistem GigE olup, bu iletişim standartı UDP veri aktarım protokolü prensibine göre çalışmaktadır.
- UDP veri aktarım protokolü aktarılan verinin son durumunu kontrol etmediği için oldukça hızlı bir şekilde çalışmaktadır.
- Tüm bu durumlar göz önüne alındığında UDP veri aktarım protokolünün en uygun çözüm olacağı görülmüştür.

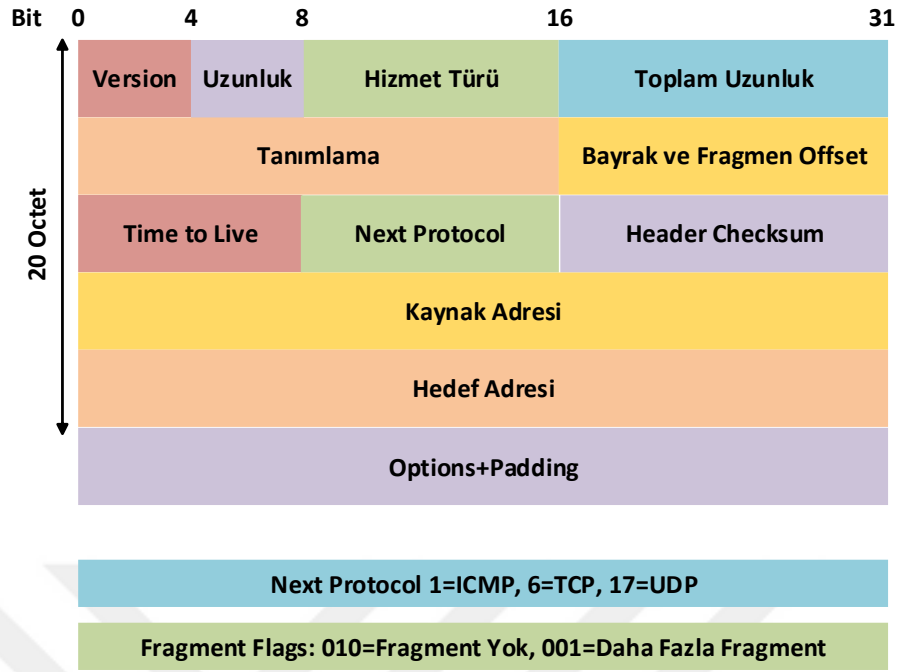
OSI referans modelinin taşıma katmanında tanımlı olan UDP veri transfer protokolündeki veri paketinin içeriği temel olarak Şekil 3.35’de verildiği gibidir. Ayrıca bu paket içerisinde yer alan başlıklar sırasıyla Şekil 3.36, 3.37 ve 3.38’de sunulduğu gibidir.



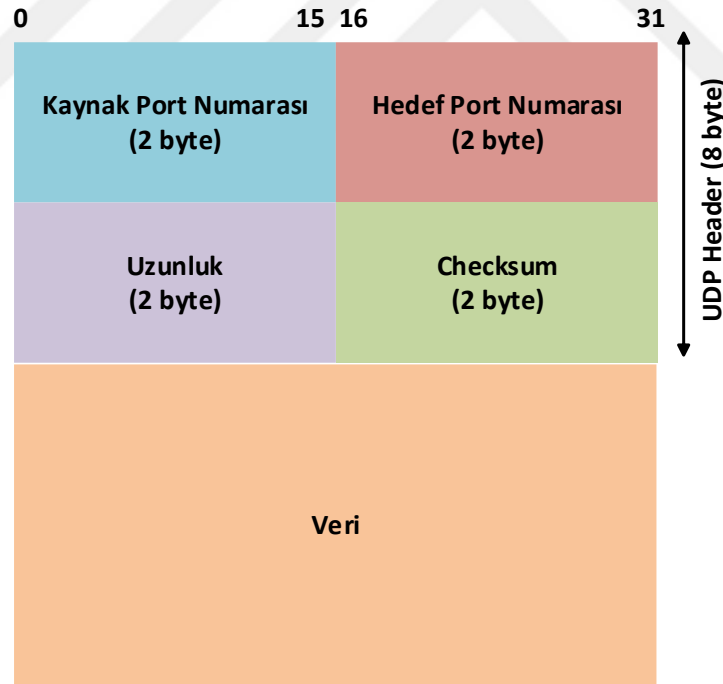
Şekil 3.35. UDP veri paketinin içeriği



Şekil 3.36. Ethernet header



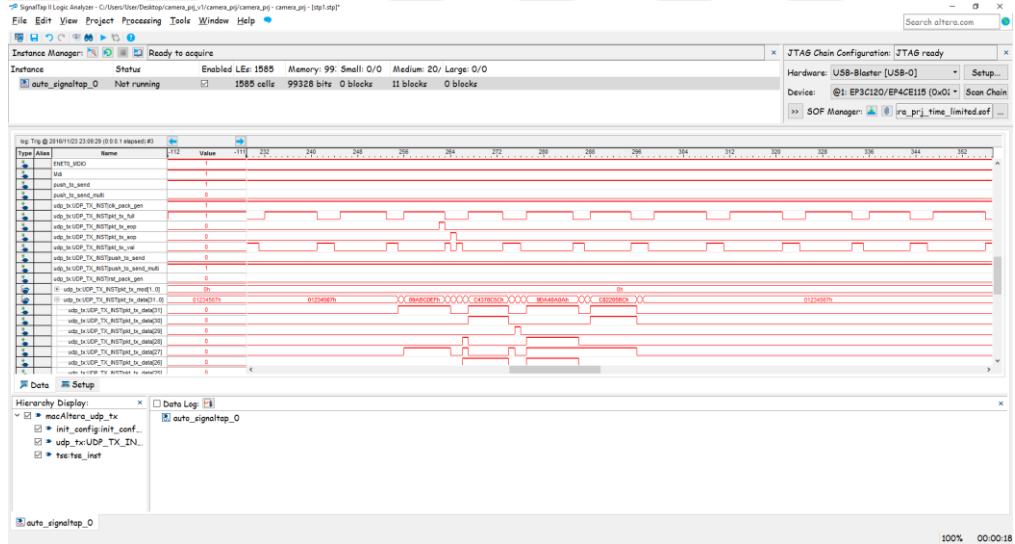
Şekil 3.37. IP Header



Şekil 3.38. UDP Header

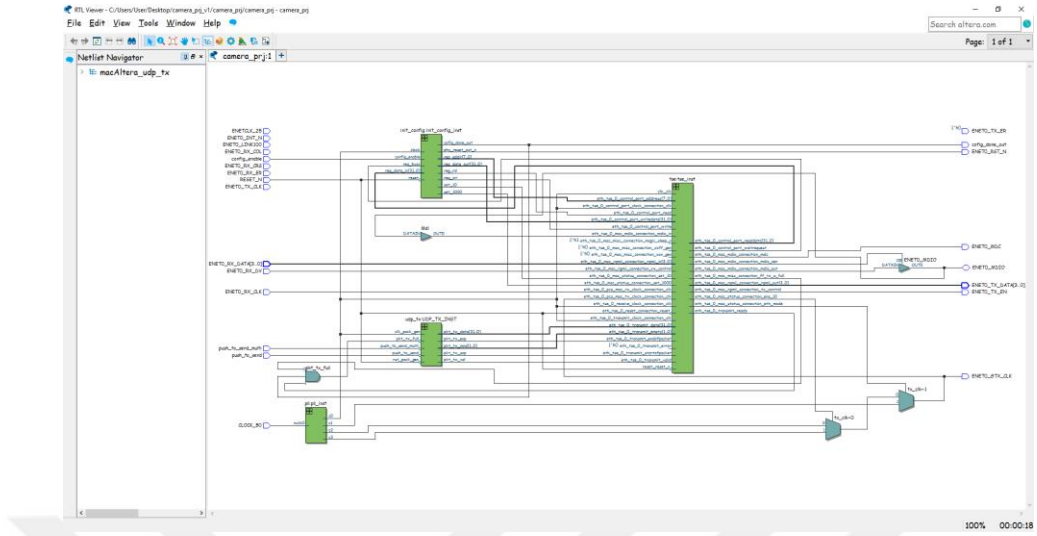
Çalışma kapsamında kamera modülünden elde edilen görüntü verisi bir UDP veri paketi haline getirilmekte ve 1 gbps hıza sahip ağ üzerinden ana işlem birimine iletilmektedir. Çalışma süresince tüm işlemler UDP protokolüne göre yürütülmüştür. Açık kaynak olarak bulunan Ethernet MAC üzerinde UDP veri transferini gerçekleştirebilmek için gerekli

düzenlemeler yapılmış olup, gerek OSI katmanlarında gerekse UDP paketlerinin elde edilmesinde gerekli çalışmalar yapılmıştır. Sonuç olarak tüm katmanlar tamamlanmış ayrıca veri paketleri UDP protokolüne uygun hale getirilmiştir. Tüm işlemlerin ardından fiziksel katman ile ana makine arasında bağlantı sağlanmış ve veri paketleri ana makineye iletilmiştir. Gerçekleştirilen işlemlerde ana makineye veri aktarımında başlangıçta kayıplar yaşandığı gözlemlenmiştir. Bu sebepten çalışmalar tekrar UDP yönüne kaydırılarak mevcut yazılımın optimizasyonu sağlanmaya çalışılmıştır. Bu çerçevede yapılan çalışmalar neticesinde Signal Tap II Logic Analyzer aracılığıyla yapılan gözlemlere ait bir ekran görüntüsü ise Şekil 3.39’da sunulduğu gibidir. Ayrıca tasarlanan ve programlanan sistemin RTL Viewer çıktısı Şekil 3.40’da verildiği gibidir.



Şekil 3.39. Signal Tap II Logic Analyzer

Bölüm başında da belirtildiği üzere veri transfer protokolünde UDP’nin kullanılmasının en önemli sebebi hız faktörüdür. UDP aktarım protokolünde verilerin kontrolü yapılmadığı için sistem üzerindeki veri akışı da hızlı olmaktadır. Ayrıca yine belirtildiği üzere bu yöntemin tercih edilmesindeki bir diğer sebep piyasadaki mevcut endüstriyel kameraların UDP aktarım protokolüne göre çalışmasıdır. Gerçekleştirilen çalışmalar neticesinde de UDP veri aktarım protokolü başarıyla sağlanmış olup, kurulan sistemin wireshark yazılımı ile ölçülmesi sonucu elde edilen sonuçlar Şekil 3.41’de sunulmuştur. Ayrıca sistemin çalışması sonucu Windows görev yöneticisi bölümünden elde edilen gözlem sonuçları Şekil 3.42’de verildiği gibidir. Yapılan konfigürasyonlar sonucu ModelSim yazılımından elde edilen sinyal çıktıları ise Şekil 3.43’de gösterildiği gibidir.



Şekil 3.40. RTL Viewer

21	7.3/4943	10.10.10.14	239.235.235.230	SSDP	215 M-SEARCH * HTTP/1.1
22	7.3/1033	10.10.10.14	224.0.0.251	MDNS	82 Standard query 0x0000
29	42.638758	10.10.10.13	10.10.10.14	UDP	1468 12345+51234 Len=1426
30	42.670847	10.10.10.14	220.255.255.250	SSDP	215 M-SEARCH * HTTP/1.1
31	42.684002	10.10.10.14	224.0.0.251	MDNS	82 Standard query 0x0000

Frame 29: 1468 bytes on wire (11744 bits), 1468 bytes captured (11744 bits) on interface 1

Ethernet II, Src: 08:1c:23:17:4a:cb, Dst: 08:62:66:0d:7e:06

Destination: 08:62:66:0d:7e:06

Source: 00:1c:23:17:4a:cb

Type: IPv4 (0x0800)

Internet Protocol Version 4, Src: 10.10.10.13, Dst: 10.10.10.14

0100 = Version: 4

... 0101 = Header Length: 20 bytes (5)

✓ Differentiated Services Field: 0x00 (DSCP: CS0, ECN: Not-ECT)

0000 00.. = Differentiated Services Codepoint: Default (0)

.... ..00 = Explicit Congestion Notification: Not ECN-Capable Transport (0)

Total Length: 1454

Identification: 0x0005 (5)

Flags: 0x00

Fragment offset: 0

Time to live: 255

Protocol: UDP (17)

Header checksum: 0x8e0b [validation disabled]

[Header checksum status: Unverified]

Source: 10.10.10.13

Destination: 10.10.10.14

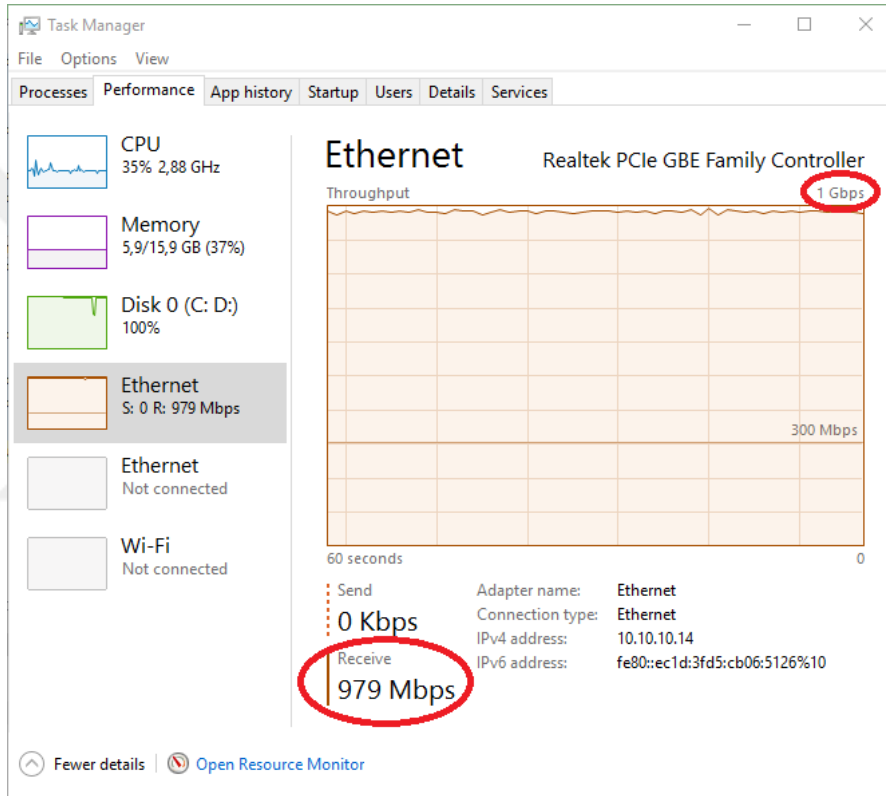
[Source GeoIP: Unknown]

[Destination GeoIP: Unknown]

00	08 62 66 0d 7e 06	00 1c 23 17 4a cb	08 00 45 00	..b... #.J...E.
10	05 ae 00 05 00 00 ff 11	8e 0b 0a 0a 0d 0a	0a 0a 0a 0a 0a 0a	
20	0a 0e 30 39 c8 22 05 9a	00 00 ah cd 01 23 45 67	01 23 45 67 01 23 45 67	..09."... #Eg
30	01 23 45 67 01 23 45 67	01 23 45 67 01 23 45 67	01 23 45 67 01 23 45 67	..#Eg.#Eg.#Eg.#Eg
40	01 23 45 67 01 23 45 67	01 23 45 67 01 23 45 67	01 23 45 67 01 23 45 67	..#Eg.#Eg.#Eg.#Eg
50	01 23 45 67 01 23 45 67	01 23 45 67 01 23 45 67	01 23 45 67 01 23 45 67	..#Eg.#Eg.#Eg.#Eg
60	01 23 45 67 01 23 45 67	01 23 45 67 01 23 45 67	01 23 45 67 01 23 45 67	..#Eg.#Eg.#Eg.#Eg
70	01 23 45 67 01 23 45 67	01 23 45 67 01 23 45 67	01 23 45 67 01 23 45 67	..#Eg.#Eg.#Eg.#Eg
80	01 23 45 67 01 23 45 67	01 23 45 67 01 23 45 67	01 23 45 67 01 23 45 67	..#Eg.#Eg.#Eg.#Eg
90	01 23 45 67 01 23 45 67	01 23 45 67 01 23 45 67	01 23 45 67 01 23 45 67	..#Eg.#Eg.#Eg.#Eg
100	01 23 45 67 01 23 45 67	01 23 45 67 01 23 45 67	01 23 45 67 01 23 45 67	..#Eg.#Eg.#Eg.#Eg

Şekil 3.41. WireShark yazılımı ile elde sonuçlar

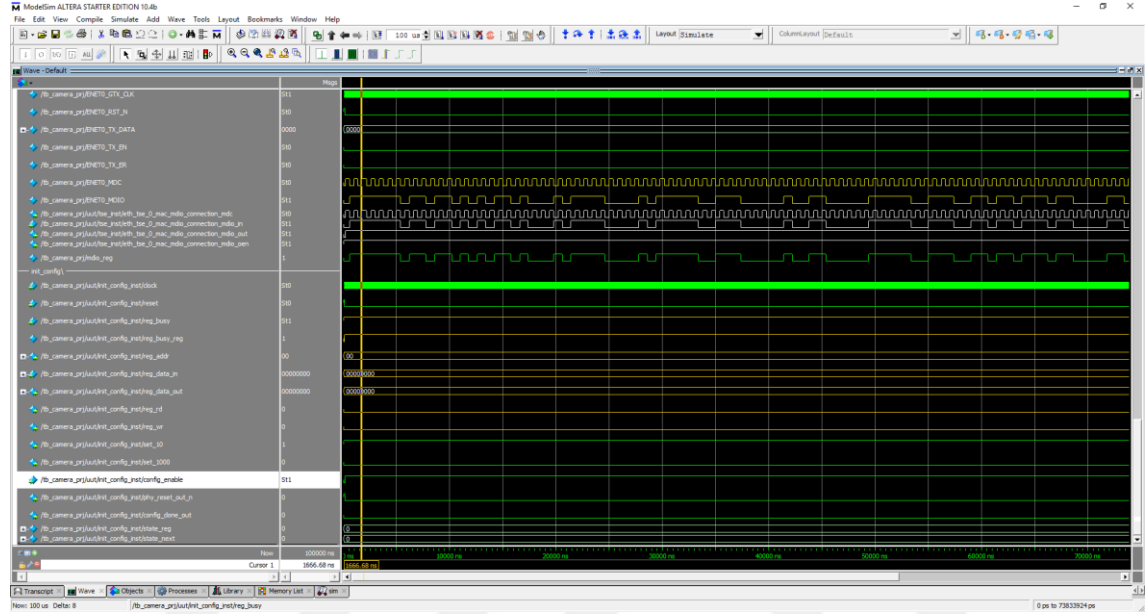
Şekil 3.41’den de görülebileceği üzere 1 numaralı bölümde kaynak ve hedef ip adresleri ile protokol türü görülmektedir. 2 numaralı bölümde yine hedef makine ile kaynak makinenin mac adresleri yer almaktadır. Hedef mac adresi kullanılan ana işlem biriminin mac adresini tanımlarken, kaynak mac adresi kullanılan FPGA’nın mac adresini göstermektedir. 3 numaralı bölüm gönderilen paketin ip detaylarına ait bilgileri gösterirken, 4 numaralı bölümde ise ana işlem birimine gönderilen sayısal veri paketleri gösterilmiştir. Şekil 3.42’de ise gerçek zamanlı hız testlerinden elde edilen sonuçlar sunulmuştur.



Şekil 3.42. Gerçek zamanlı testlerden elde sonuçlar

Şekil 3.42’den de görülebileceği üzere ana işlem biriminde bulunan ağ kartı 1000 mbps başka bir deyişle 1 Gbps hıza kadar destek sağlamaktadır. Yapılan gerçek zamanlı testlerde UDP veri paketleri FPGA üzerinden Ethernet yoluyla ana işlem birimine iletmeye çalışılmıştır. Yapılan bu testlerde teorik maksimum hız olan 1 gbps’ye neredeyse kayıpsız bir şekilde erişilmiştir. Şekilde yuvarlak içerisinde alınan alandan da görülebileceği üzere yaklaşık 980 mbit hıza çıkmıştır. Bu hız ile toplam olarak aktarılabilecek veri boyutu miktarı saniyede 980 mbit/8 bit oranından yaklaşık 122 mb’dır. Görüntü verisi aktarımı konusunda ise bu veri aktarım oranı oldukça tatmin edici bir değerdir. Çünkü görüntü verisi

konusunda elde edilmek istenen veri miktarı saniyede 105 mb olup, 840 mbit hıza denk gelmektedir. Elde edilen bu değerlere göre yaklaşık 15-20 mb oranında daha fazla veri aktarımı elde edilmiştir. Ayrıca FPGA programlanırken model sim yazılımından elde edilen sinyallere ait bir ekran görüntüsü Şekil 3.43’de sunulmuştur.



Şekil 3.43. ModelSim testlerinden elde edilen sinyal sonuçları

3.4.3.7. Sistem Tümlleştirme

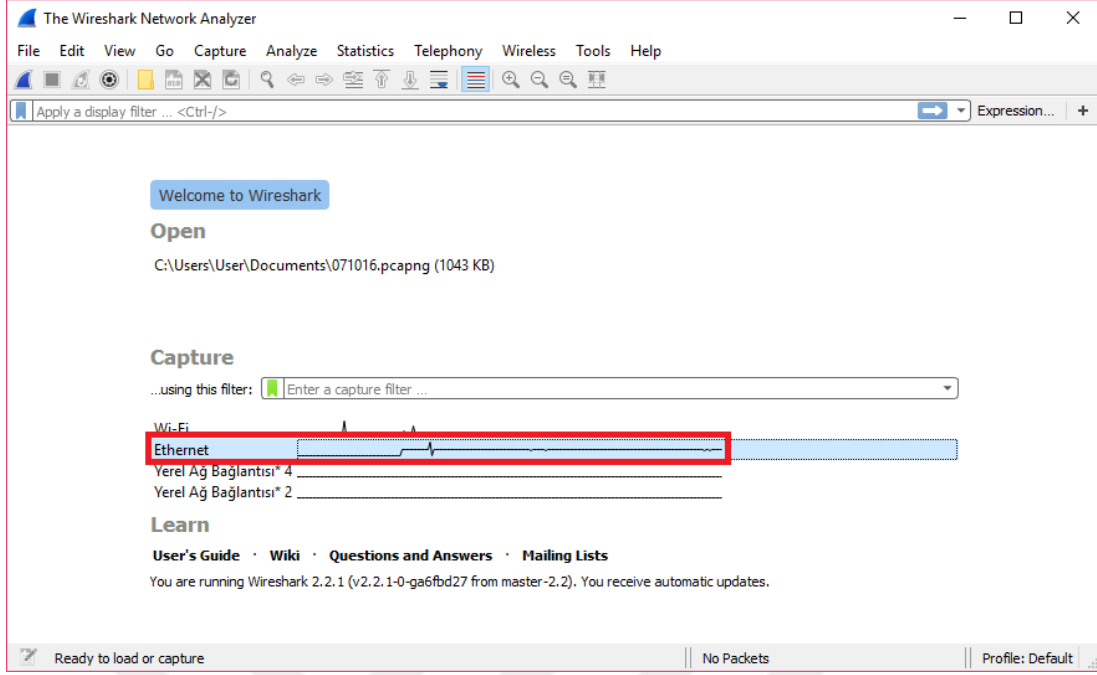
Gerçekleştirilen bu tez çalışmasında hem donanımsal tasarım hem de yazılımsal tasarım süreçleri yaşanmıştır. Bu amaçla donanımsal tasarım sürecinde öncelikli olarak FPGA üzerindeki mimari belirlenmiş ve ortaya konulmuştur. Daha sonrasında bu mimariye uygun olarak bir UDP haberleşme protokolü tasarlanmış ve Verilog dili kullanılarak FPGA üzerinde gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın ilk adımlarında görüntü aktarımından ziyade sadece UDP veri formatı ile rastgele veri aktarım işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla 1000 mbit hıza çıkabilen bir UDP haberleşme protokolü tasarlanmış ve rastgele üretilen sayısal veriler UDP paketlerine gömülerek ana makineye iletilmiştir.

Bölüm 3.6.1’de de verildiği üzere tez sürecinde ilk olarak VGA portu aracılığıyla görüntü alınması işlemi gerçekleştirilmiştir. Bir sonraki aşamada UDP ile haberleşme protokolü tasarlanmıştır. Sayısal kamera tasarımının son sürecinde ise bu iki bölümde gerçekleştirilen aşamaların entegre bir şekilde çalışabilmesi sağlanmıştır. Yapılan uygulamalar neticesinde, ilk bölümde gerçekleştirilen ve görüntüyü VGA portuna aktaran

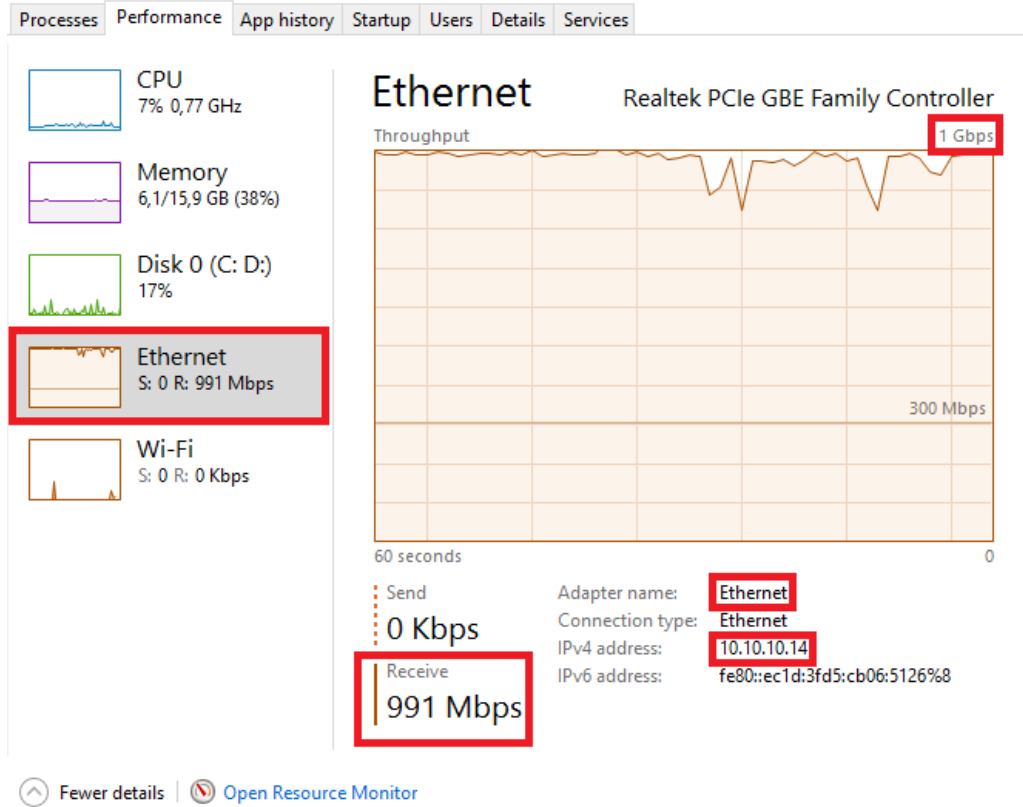
Verilog yazılımı, Ethernet çıkışına kanallize edilerek verilerin Ethernet portundan alınabilmesi sağlanmıştır. Bu amaçla RAM bloklarında bulunan veriler VGA portuna gönderilmeden hemen önce Ethernet hattına yönlendirilmiştir. Tabi ki bu işlem gerçekleştirilirken veriler bir UDP paketi içerisine gömülmüş ve o şekilde aktarılmıştır. UDP haberleşme protokolü tasarlanırken Şekil 3.35, 3.36, 3.37 ve 3.38’de verilen tüm adımlar oluşturulmuş ve sayısal görüntü verisi bu paketlerin içerisine yerleştirilerek gönderilmiştir.

Çalışma sürecinde bu iki bölümün birleştirilmesinin ardından ana makine üzerinde çalışan ve gelen verileri okumaya yarayan bir UDP server programı oluşturulmuştur. Bu amaçla C++ programlama dili kullanılarak gelen veriler hexadecimal formatta okunmuştur. Bu programlama dilinin tercih edilmesinin en önemli sebebi açık kaynaklı bir kütüphane olan ve tamamen görüntü işleme için kullanılan OpenCV’yi destekleyebilmesidir. Gerek ilerleyen zamanlarda gerçekleştirilecek görüntü işleme uygulamaları için gerekse FPGA üzerinden gelen görüntü verilerini ekrana basabilmek için OpenCV’nin kullanılması zaruri hale gelmiştir ve bu sebepten tercih edilmiştir. Gerçekleştirilen bu uygulamanın da detayları ilerleyen bölümlerde sunulmaktadır.

Sistem tümleştirme çalışmaları neticesinde sayısal kamera modülünden alınan piksel verileri herhangi bir kayıp olmadan UDP veri aktarım protokolünü kullanarak ethernet portu üzerinden ana makineye iletebilmektedir. Ana makine üzerinde çalışan ve C++ tabanlı olan bir uygulama sayesinde bu veriler alınmakta ve ekranda görüntülenmektedir. Bu çalışmalar sonucunda elde edilen programlar optimize edilmiş olmuş, gelen verilerin boyutunu gösteren sonuçlar Şekil 3.44 ve 3.45’de verildiği gibidir. Ayrıca kamera çalışırken sistemin bağlı olduğu ağın durumuna ait detaylar ise Şekil 3.46’da sunulmaktadır.



Şekil 3.44. Ağın durumuna ait wireshark'dan elde edilen örnek bir durum



Şekil 3.45. Windows işletim sistemi üzerinde ağın durumuna ait bir sonuç

Network Details		
Property	Ethernet	Wi-Fi
Network utilization	99,70%	0%
Link speed	1 Gbps	135 Mbps
State	Connected	Connected
Bytes sent throughput	0%	0%
Bytes received throughput	99,70%	0%
Bytes throughput	99,70%	0%
Bytes sent	21.435	74.753
Bytes received	41.538.768.3...	56.283
Bytes	41.538.789.7...	131.036
Bytes sent per interval	42	0
Bytes received per interval	124.636.152	0
Bytes per interval	124.636.194	0
Unicasts sent	12.773.299	163
Unicasts received	0	168
Unicasts	12.773.299	331
Unicasts sent per interval	0	0
Unicasts received per interval	38.326	0
Unicasts per interval	38.326	0
Nonunicasts sent	0	72
Nonunicasts received	401	112
Nonunicasts	401	184
Nonunicasts sent per interval	1	0
Nonunicasts received per inter...	0	0
Nonunicasts per interval	1	0

Şekil 3.46. Kamera modülü çalışırken elde edilen ağ detayları

Kamera modülünün bağlı olduğu FPGA çalışırken UDP formatında gelen verilerin ana makine tarafında yazılan bir uygulama ile dinlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla C++ programlama dili ve OpenCV kütüphaneleri beraber kullanılmıştır. Yazılımda öncelikli olarak gelen verilerin çözümlenmesi gerekmektedir. Önceki bölümler de bahsedildiği üzere UDP header, IP header veya kontrol bitleri gibi çeşitli veriler bir bütün halinde gelmektedir. Bu verilerin ayrıştırılarak ham verilere dönüştürülmesi gerekmektedir.

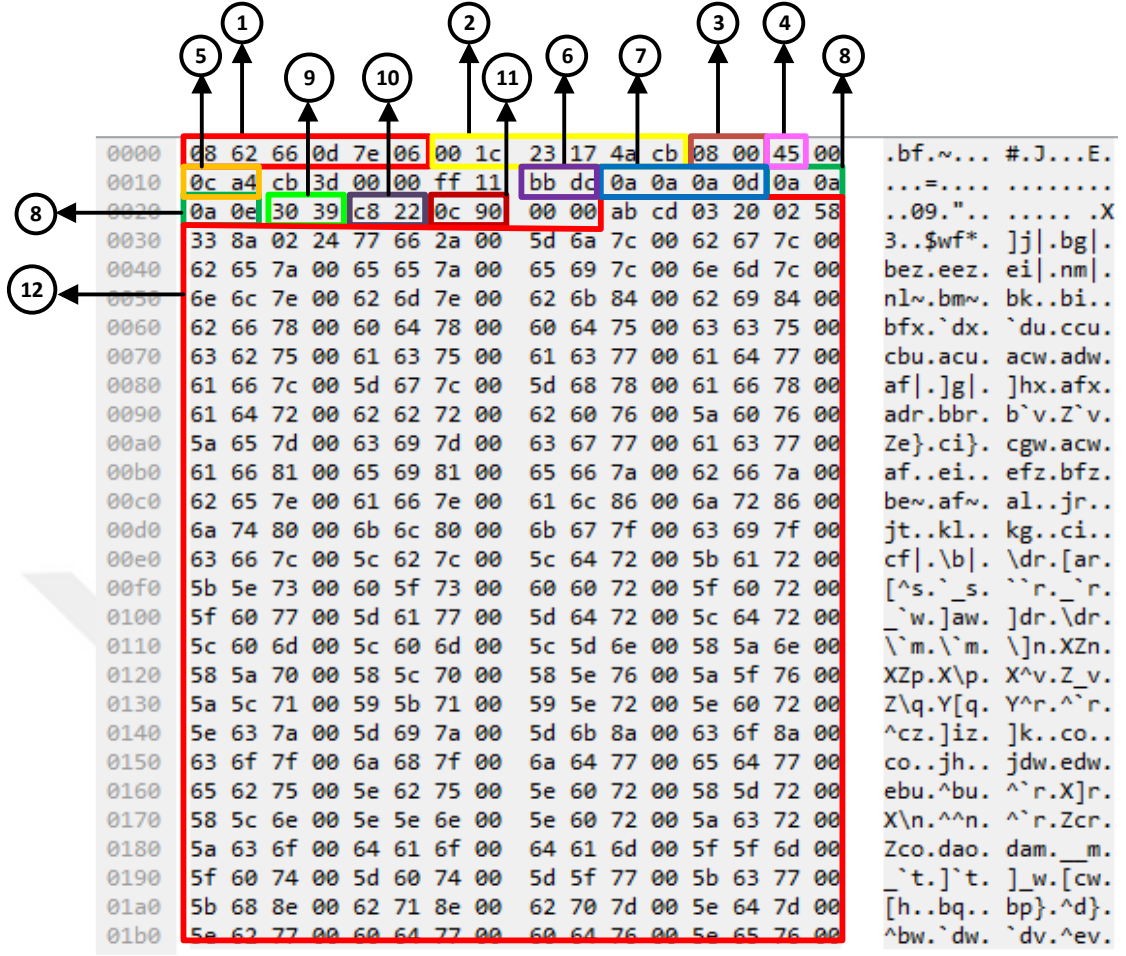
Gerçekleştirilen sayısal kamera prototipinde veriler satır satır olarak gelmektedir. Yani gelen piksel verisi içerisinde satır numarası, çözünürlük, frame sayısı gibi bilgilerde bulunmaktadır. Bu sebepten gerçekleştirilecek yazılımda bu verilerin görüntü verisinden ayıklanması gerekmektedir. Ayrıca başka bir hafıza bölgesinde gelen her yeni satırın depolanması ve tüm satırlar tamamlandıktan sonra elde edilen bütün frame'in ekrana basılması gerekmektedir. Bu sebepten öncelikli olarak wireshark programında gelen veriler detaylı bir şekilde incelenmiştir. Wireshark programından elde edilen sonuçlar sırasıyla Şekil 3.47, 3.48 ve 3.49'da verildiği gibidir.

1	0.000000	10.10.10.13	10.10.10.14	UDP	3252	12345+51234	Len=32
2	0.000004	10.10.10.13	10.10.10.14	UDP	3252	12345+51234	Len=32
3	0.000006	10.10.10.13	10.10.10.14	UDP	3252	12345+51234	Len=32
4	0.000008	10.10.10.13	10.10.10.14	UDP	3252	12345+51234	Len=32
5	0.000009	10.10.10.13	10.10.10.14	UDP	3252	12345+51234	Len=32
6	0.000011	10.10.10.13	10.10.10.14	UDP	3252	12345+51234	Len=32
7	0.000013	10.10.10.13	10.10.10.14	UDP	3252	12345+51234	Len=32
8	0.000015	10.10.10.13	10.10.10.14	UDP	3252	12345+51234	Len=32
9	0.000017	10.10.10.13	10.10.10.14	UDP	3252	12345+51234	Len=32
10	0.000019	10.10.10.13	10.10.10.14	UDP	3252	12345+51234	Len=32
11	0.000128	10.10.10.13	10.10.10.14	UDP	3252	12345+51234	Len=32
12	0.000130	10.10.10.13	10.10.10.14	UDP	3252	12345+51234	Len=32
13	0.000132	10.10.10.13	10.10.10.14	UDP	3252	12345+51234	Len=32
14	0.000135	10.10.10.13	10.10.10.14	UDP	3252	12345+51234	Len=32
15	0.000137	10.10.10.13	10.10.10.14	UDP	3252	12345+51234	Len=32
16	0.000139	10.10.10.13	10.10.10.14	UDP	3252	12345+51234	Len=32
17	0.000141	10.10.10.13	10.10.10.14	UDP	3252	12345+51234	Len=32

Şekil 3.47. Wireshark programında frame'lerin durumu

>	Frame 8: 3252 bytes on wire (26016 bits), 3252 bytes captured (26016 bits) on interface 0
▼	Ethernet II, Src: 00:1c:23:17:4a:cb, Dst: 08:62:66:0d:7e:06
	> Destination: 08:62:66:0d:7e:06
	> Source: 00:1c:23:17:4a:cb
	Type: IPv4 (0x0800)
▼	Internet Protocol Version 4, Src: 10.10.10.13, Dst: 10.10.10.14
	0100 = Version: 4
	 0101 = Header Length: 20 bytes (5)
	> Differentiated Services Field: 0x00 (DSCP: CS0, ECN: Not-ECT)
	Total Length: 3236
	Identification: 0x0006 (6)
	> Flags: 0x00
	Fragment offset: 0
	Time to live: 255
	Protocol: UDP (17)
	Header checksum: 0x8714 [validation disabled]
	[Header checksum status: Unverified]
	Source: 10.10.10.13
	Destination: 10.10.10.14
	[Source GeoIP: Unknown]
	[Destination GeoIP: Unknown]
▼	User Datagram Protocol, Src Port: 12345, Dst Port: 51234
	Source Port: 12345
	Destination Port: 51234
	Length: 3216
	[Checksum: [missing]]
	[Checksum Status: Not present]
	[Stream index: 1]
▼	Data (3208 bytes)
	Data: abcd0320025800010005822e220076728300746d8300746f...
	[Length: 3208]
▼	VSS-Monitoring ethernet trailer, Source Port: 12544
	Src Port: 12544

Şekil 3.48. Wireshark programında UDP içerik bilgileri



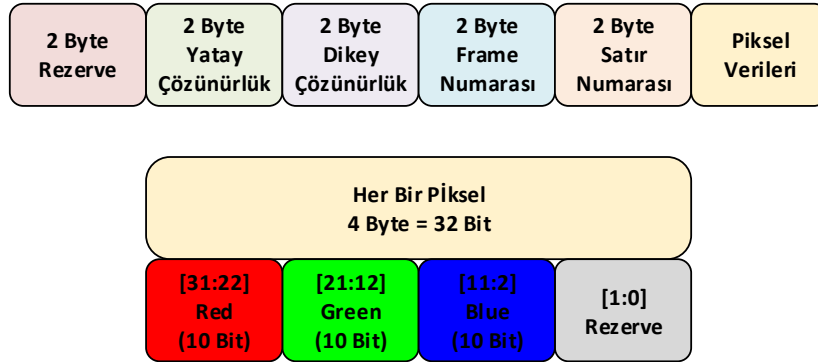
Şekil 3.49. Wireshark programında bir UDP paketinin içeriği

Şekil 3.49'dan da görülebileceği üzere bir UDP paketinde yer alan bütün alanlar farklı renklerle gösterilmiştir. Şekil 3.49'da özet olarak sunulan bu verilerin içeriği Şekil 3.50'de gösterildiği gibidir. Her biri farklı bir renk ile temsil edilen bu alanların detayları maddeler halinde aşağıda verildiği gibidir.

- 1- Hedef Mac Adres: 08:62:66:0d:7e:06
- 2- Kaynak Mac Adres: 00:1c:23:17:4a:cb
- 3- Tür: IPv4 (0x0800)
- 4- Internet Protocol: Version 4 (0x0100)
Header Length: 20 Byte (5) (0x0101)
- 5- Toplam Uzunluk: 3236 (0x0ca4)
- 6- Header Checksum: 0xbbdc
- 7- Kaynak IP Adresi: 10.10.10.13 (0a 0a 0a 0d)

- 8- Hedef IP Adresi: 10.10.10.14 (0a 0a 0a 0e)
- 9- Kaynak Port Adresi: 12345 (0x3039)
- 10- Hedef Port Adresi: 51234 (0xc822)
- 11- Uzunluk: 3216 (0x0c90)
- 12- Data

Şekilden de görülebileceği üzere her bir renkli alan farklı bir bilgiyi temsil etmektedir. Gelen bu verilerin yazılımsal olarak incelenmesi ve çözülmesi görüntü elde edilebilmesi açısından oldukça önemlidir. Gerçekleştirilen çalışmalar neticesinde C++programı içerisinde bu çözme işlemi gerçekleştirilmiş ve piksel verileri görüntü haline dönüştürülmüştür. 12 madde halinde verilen bu bilgiler tamamen ağ ile olan bilgileri içermektedir. Ayrıca bir diğer çözümleme işlemi ise data verisi içerisinde yapılmalıdır. Şekil 3.50’den de görülebileceği üzere 12 numaralı data bölümü “ab cd 03 20 02 58 33 8a” şeklinde ilerlemektedir. Bölüm başında da belirtildiği üzere kamera modülünden piksel verileri satır satır alınmaktadır. Şekil 3.50’de UDP veri paketinin çözülme şeması detaylı bir şekilde sunulmuş olup, Şekil 3.49’da verilen örnek görüntü karesi için çözümleme işlemi maddeler halinde aşağıda verildiği gibidir.



Şekil 3.50. UDP veri bloğunun çözülmesi

Şekil 3.50’de verilen örnek incelenecek olursa her bir ikili blok 2 byte’a karşılık gelmektedir. Bu duruma bağlı olarak çözümleme işlemi gerçekleştirilecek olursa;

- ab cd = 2 Byte Rezerve (Bu bloğun kullanılmasının sebebi gelecekte yapılacak çalışmalarda herhangi bir ekstra işleme gerek kalmadan doğrudan veri görebilmektir.)

- 03 20 = 2 Byte Yatay Çözünürlük (Hexadecimal bu sayının karşılığı 800'dür. 800x600 çözünürlükteki bir görüntünün yatay çözünürlüğünü temsil etmektedir.)
- 02 58 = 2 Byte Dikey Çözünürlük (Hexadecimal bu sayının karşılığı 600'dür. 800x600 çözünürlükteki bir görüntünün dikey çözünürlüğünü temsil etmektedir.)
- 33 8a = 2 Byte Frame Numarası (Hexadecimal bu sayının karşılığı 13194'dür. Sistemin çalışmaya başlamasından itibaren saymaya başlamaktadır ve sistem kapatılana kadar devam etmektedir.)
- 02 24 = 2 Byte Satır Numarası (Hexadecimal bu sayının karşılığı 548'dir. Bölüm başında da belirtildiği üzere piksel verileri satır satır ana makineye iletilmektedir. Başka bir deyişle her yeni satır iletildiğinde bu değer bir artmaktadır. Verilen bu örnek için satır numarası 800'e ulaştığında son satır iletilmiş olacak ve frame tamamlanmış olacaktır. Bu adımın ardından Frame Numarası değeri bir arttırılacak ve Satır numarası değeri tekrar bir'e set edilecektir.)
- 77 66 2a 00 = 4 Byte (32 Bit) Piksel Verisi
 (0111011101 1001100010 1010000000 00)
 (R) (G) (B) (A)

Maddelerden de görülebileceği üzere sistemde ağ çözümlemesinin yanı sıra veriler içerisinde de bir çözümleme işlemi gerçekleştirilmektedir. Son madde de verilen piksel verileri her defasında 4 byte olacak şekilde ele alınmaktadır. Gelen piksellerin formatı "RGBA" şeklinde olmakla beraber yazılım tarafında "A-(Alfa)" değeri göz ardı edilmektedir. Başka bir deyişle işlemler içerisinde dikkate alınmamaktadır. Bu değerın kullanılmasının sebebi OpenCV'nin desteklemiş olduğu formatlara uyumlu hale getirebilmek içindir.

Her yeni satırda toplam dikey çözünürlük kadar piksel verisi bulunmaktadır. Şekil 3.50'de verilen örnek dikkate alınarak incelenirse, her 600 defa da bir satır numarası tekrar bir yapılmakta ve frame numarası bir arttırılmaktadır. Başka bir deyişle satır numarası hexadecimal olarak "02 58" olduğunda son satır gelmiş olacaktır. Bu işlemin ardından yeni gelecek veri de satır numarası "00 01" olacak ve frame numarası mevcut örnek için "33 8b" olacaktır.

Bölüm başında da belirtildiği üzere bu işlemleri gerçekleştirebilmek için ana makine tarafında C++ ve OpenCV kullanılarak bir UDP veri okuyucusu geliştirilmiştir. Gerçekleştirilen bu yazılımdan örnek bir kod parçası Şekil 3.51'de verildiği gibidir.

```

void Image_Rx::udp_server()
{
    slen = sizeof(si_other);

    //Initialise winsock
    printf("\nInitialising Winsock...");
    if (WSAStartup(MAKEWORD(2, 2), &wsa) != 0)
    {
        printf("Failed. Error Code : %d", WSAGetLastError());
        exit(EXIT_FAILURE);
    }
    printf("Initialised.\n");

    //Create a socket
    if ((s = socket(AF_INET, SOCK_DGRAM, 0)) == INVALID_SOCKET)
    {
        printf("Could not create socket : %d", WSAGetLastError());
    }
    printf("Socket created.\n");

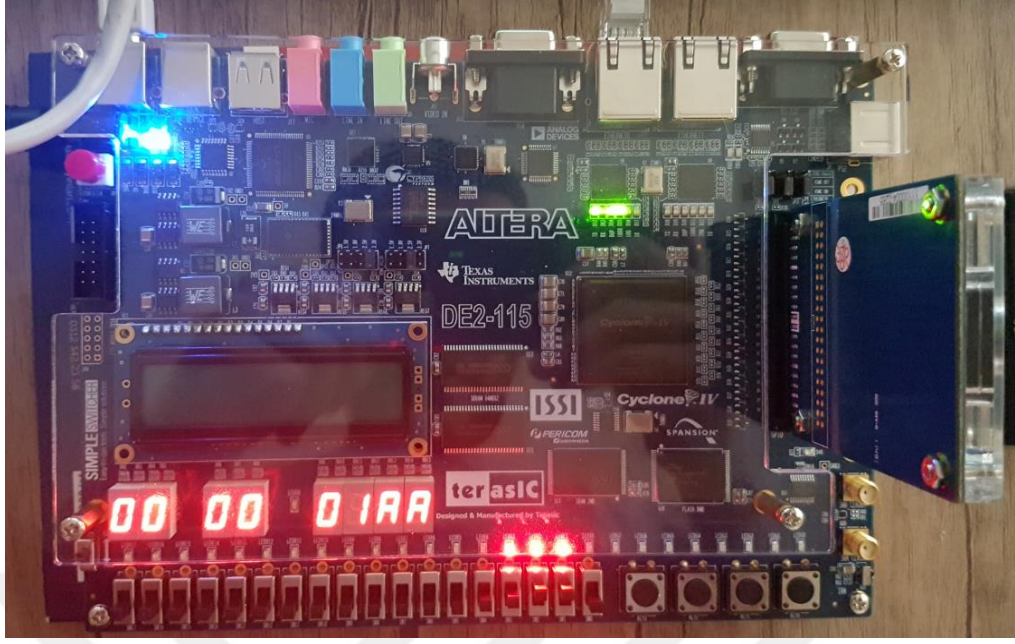
    server.sin_family = AF_INET;
    server.sin_addr.s_addr = inet_addr("10.10.10.14");
    server.sin_port = htons(51234);

    if (bind(s, (struct sockaddr *)&server, sizeof(server)) == SOCKET_ERROR)
    {
        printf("Bind failed with error code : %d", WSAGetLastError());
        exit(EXIT_FAILURE);
    }
    puts("Bind done");
}

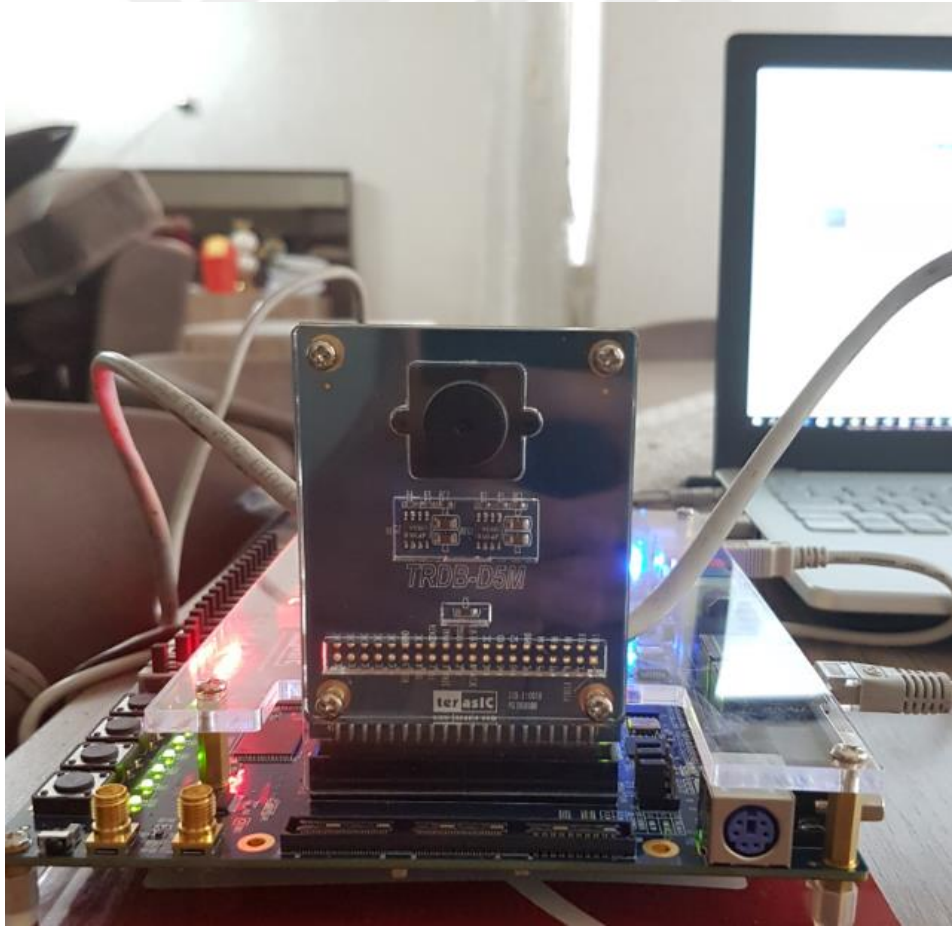
```

Şekil 3.51. UDP haberleşme protokolü (socket programlama)

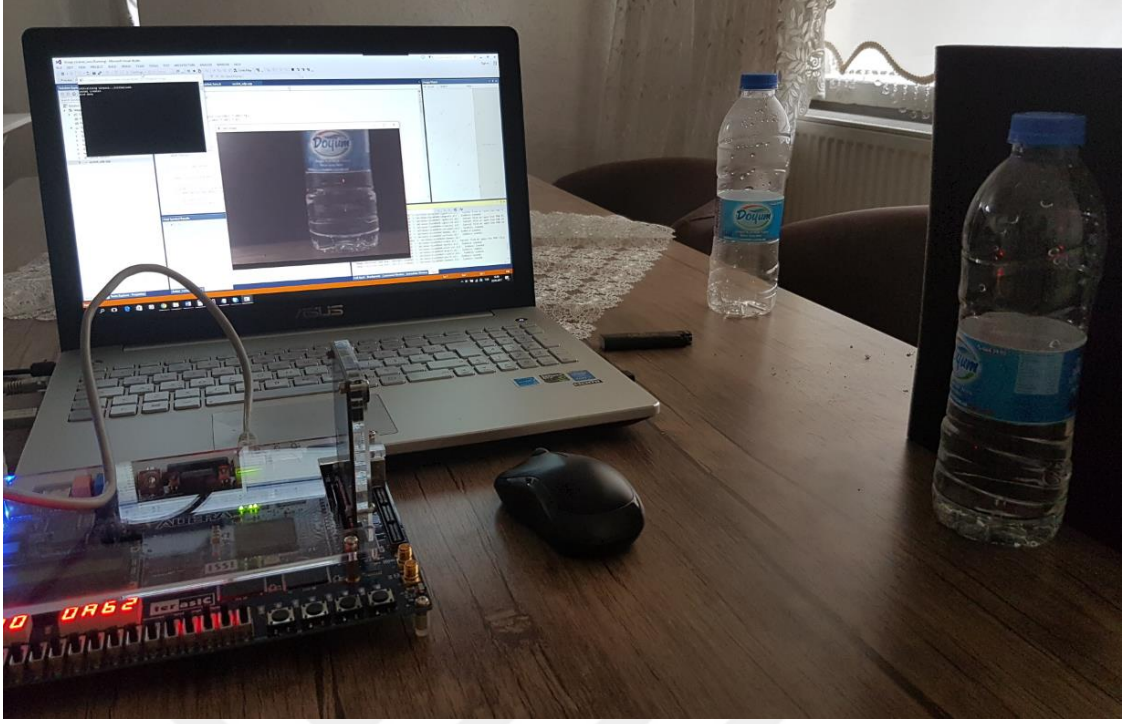
Gerçekleştirilen çalışmalar neticesinde Altera Cyclone IV DE2-115 FPGA geliştirme kiti aracılığıyla kamera modülünden piksel verileri sorunsuz bir şekilde alınmış ve ana işlem birimine iletilmiştir. Sistemin çalışma durumundayken alınan görüntüleri sırasıyla Şekil 3.52, 3.53, 3.54 ve 3.55’de verildiği gibidir.



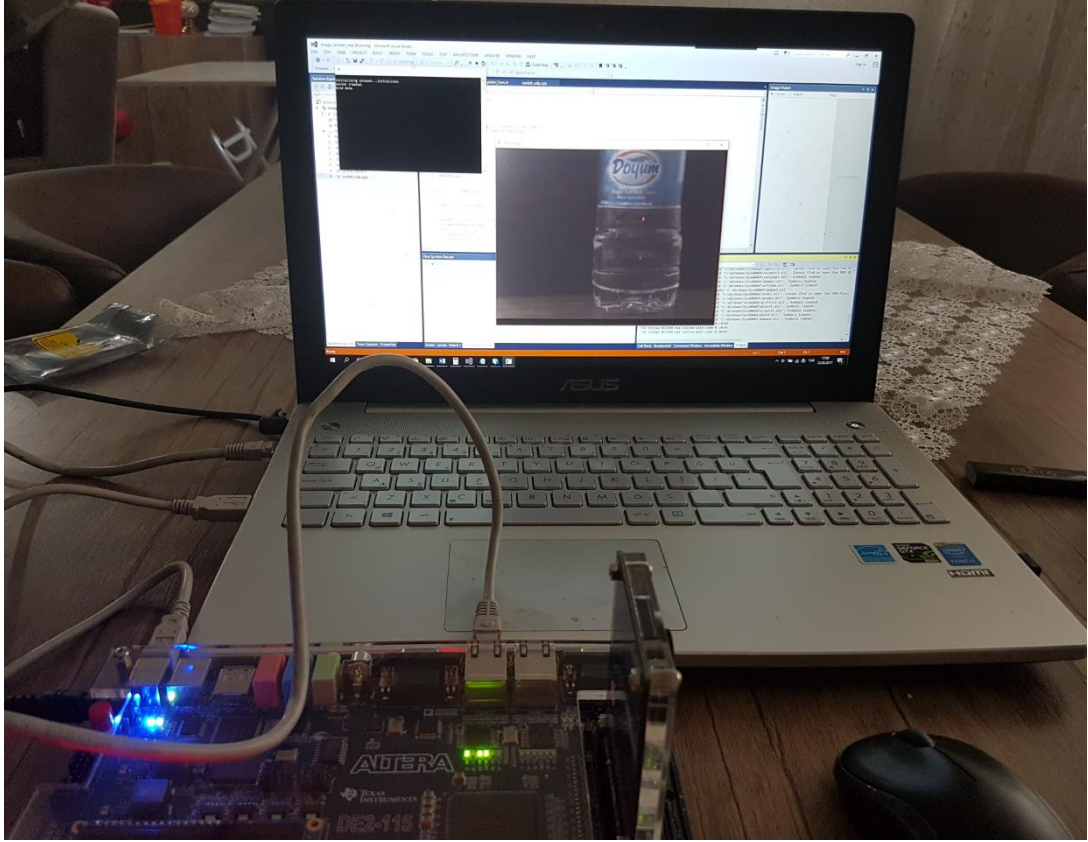
Şekil 3.52. FPGA geliştirme kitinin çalışma durumu (üstten görünüm)



Şekil 3.53. FPGA geliştirme kitinin çalışma durumu (yandan görünüm)

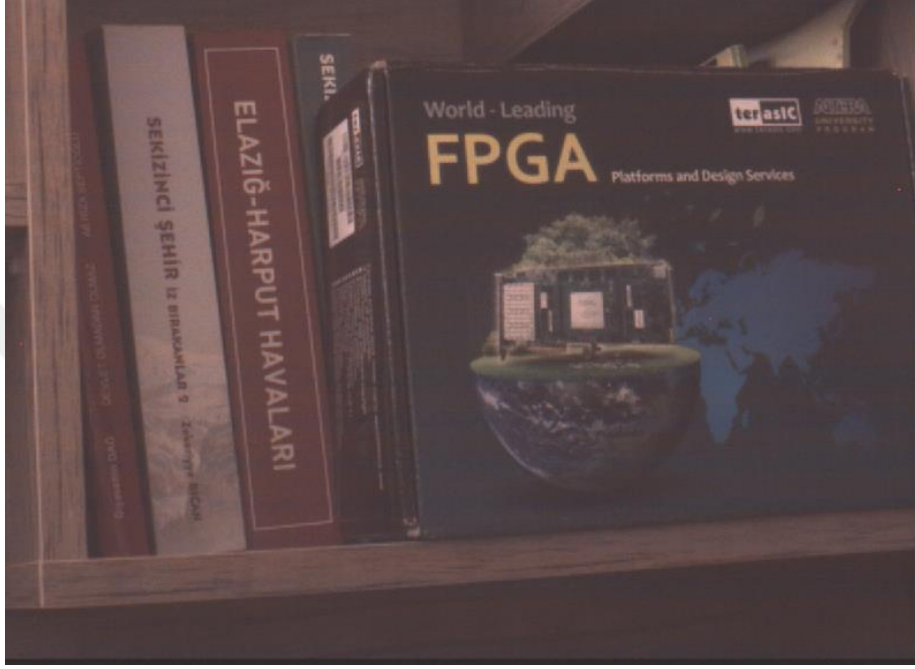


Şekil 3.54. Deneysel çalışmalar (yandan görünüm)



Şekil 3.55. Deneysel çalışmalar (görüntüleme işlemi)

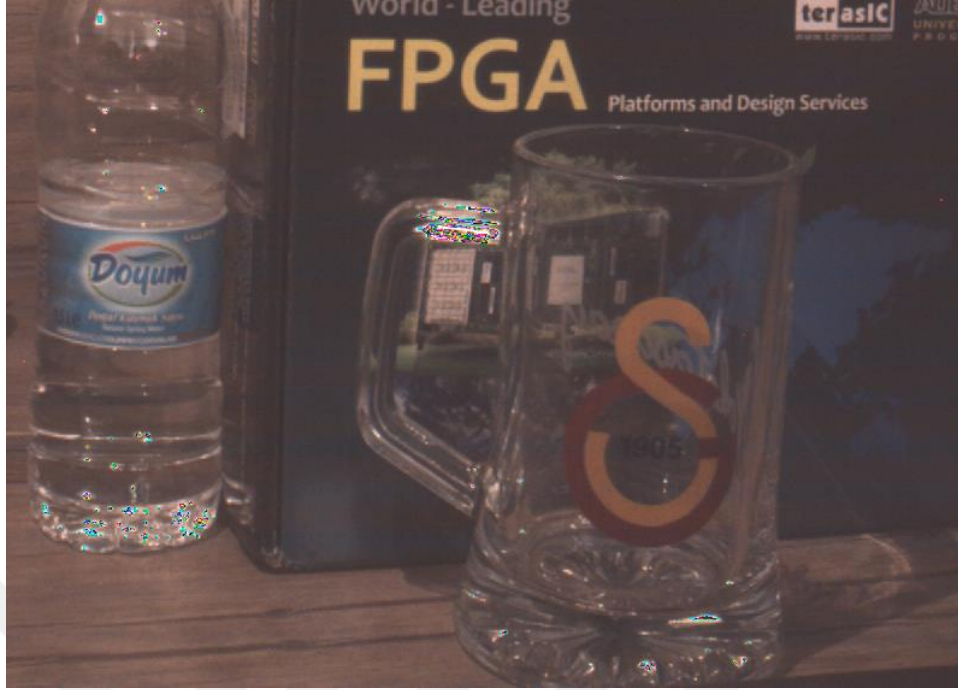
Deneyisel test çalışmaları süresince oldukça farklı koşullar ve renk durumları için testler gerçekleştirilmiş ve gerçekleştirilen yazılımlar optimize edilmeye çalışılmıştır. Bu çalışmalardan elde edilen örnek sonuçlar sırasıyla Şekil 3.56, 3.57, 3.58, 3.59 ve 3.60'da verildiği gibidir.



Şekil 3.56. Örnek test sonuçları-1 (düşük ışık koşulu)



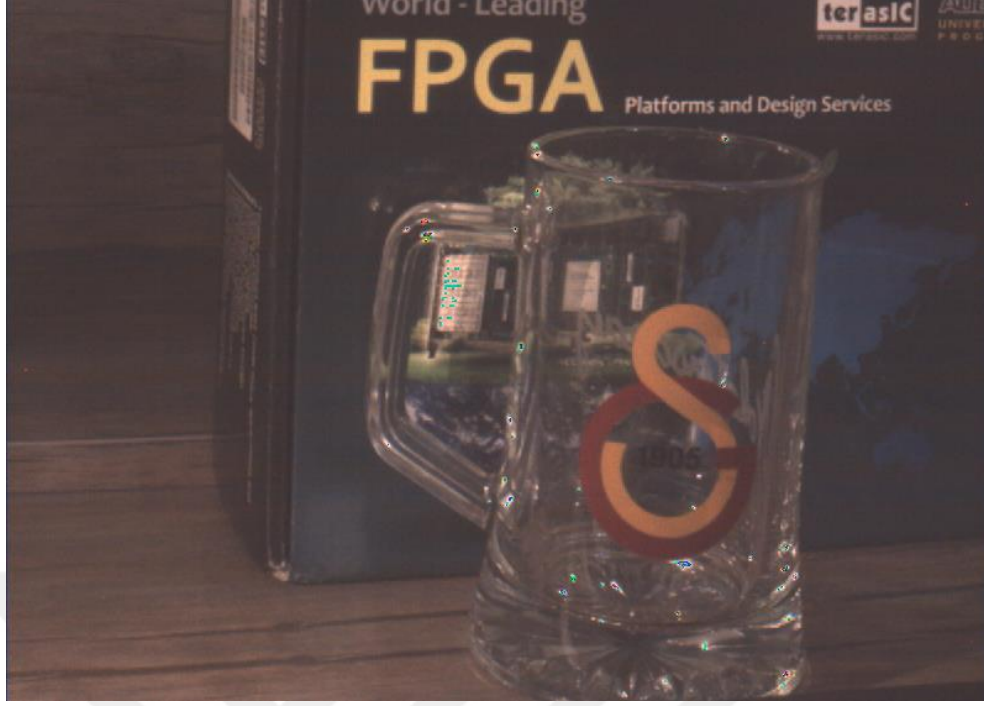
Şekil 3.57. Örnek test sonuçları-2 (düşük ışık koşulu)



Şekil 3.58. Örnek test sonuçları-1 (normal ışık koşulu)



Şekil 3.59. Örnek test sonuçları-2 (normal ışık koşulu)

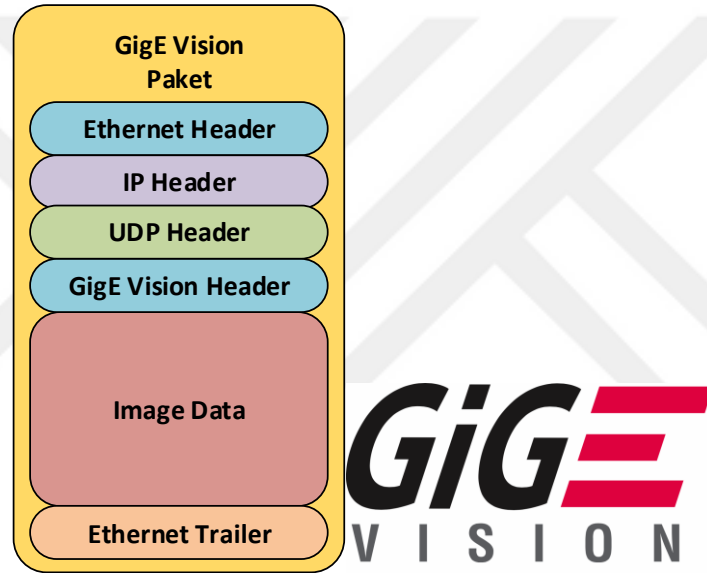


Şekil 3.60. Örnek test sonuçları-1 (yüksek ışık koşulu)

Şekillerden de görülebileceği üzere deneysel çalışmalar farklı çevresel koşullar için gerçekleştirilmiştir. Ayrıca test işlemlerinde farklı renklere sahip objelerin görüntülenmesi sağlanarak kameranın tepkisi ölçülmeye çalışılmıştır. Tez çalışmasının bu bölümünde deneysel çalışmalardan sadece belirli bir kısım sunulmaya çalışılmıştır. Ayrıca alınan bu görüntüler kamera modülü sürekli çalışma durumundayken elde edilmiştir. Başka bir deyişle kamera modülü bir video kaydedici gibi sürekli çalışır durumdadır ve bu çalışma durumundayken ekran görüntüleri alınmıştır. Görüntüler üzerinde herhangi bir kontrast iyileştirme, görüntü kalitesi artırma gibi ön işlemler uygulanmamış olup, doğrudan gelen RAW veriler görüntü karesine dönüştürülmüştür. Ayrıca sistemde kullanılan kamera modülü dahili bir lense sahiptir ve çalışmalar bu lens kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Oldukça amatör ve sadece amaca yönelik çalışan bu lens de görüntüde bir takım bozulmalara sebep olmaktadır. Bölüm başında da belirtildiği üzere bu kamera modülünün kullanılmasının temel sebebi içerisinde mevcut bulunan görüntü sensöründendir. Çünkü tez çalışması neticesinde ortaya çıkacak olan nihai üründe kullanılacak görüntü sensörü ile aynı model numarasına sahiptir. Bu sebepten bu kamera modülü geliştirme sürecinde tercih edilmiş ve kullanılmıştır.

3.5. GigE Vision

Dünyanın lider firmalarının bir araya gelerek oluşturmuş olduğu bazı standartlar mevcuttur. Bunlardan en önemlileri USB3.0 Vision, CameraLink ve GigE'dir. Bu üç farklı bağlantı platformu yüksek hızlarda görüntü verisi aktarabilmek için ortaya konulmuş standartlardır. Bu standartlardan birisi olan GigE Vision'da kameralar ana işlem birimi ile Ethernet portu üzerinden haberleşmektedir ve bu standart endüstriyel kameralarda en çok kullanılanların başında gelmektedir. GigE standartında sistem UDP ile haberleşme esasına dayanmaktadır. Bu sistem içerisindeki verinin paket yapısı Şekil 3.61'de verildiği gibidir.



Şekil 3.61. GigE Vision paket yapısı

Şekil 3.61'den de görülebileceği üzere paket yapısı UDP ile aynı olmakla beraber sisteme sadece GigE Vision başlığı eklenmektedir. Bu GigE header adlı yapı ise tamamen lisanslama amaçlıdır. Başka bir deyişle bu lisansın olup olmaması mevcut kameraların çalışmasında herhangi bir sıkıntıya sebep olmayacak sadece bu sistem ile kameralar lisanslanmış olacaktır. Bu sebepten ilerleyen süreçlerde böylesi bir lisansın satın alınması halinde kameraların yazılımlarına GigE Vision Header eklenmesi ile işlemler direkt olarak tamamlanacak ve kamera GigE lisansına kavuşmuş olacaktır. Tamamen ileriye dönük olan bu lisanslama işlemi ile üretilen kameralar uluslararası arenada söz sahibi ve itibarlı bir yapıya kavuşabilecektir.

3.6. Ana Kontrol Birimi Tasarımı

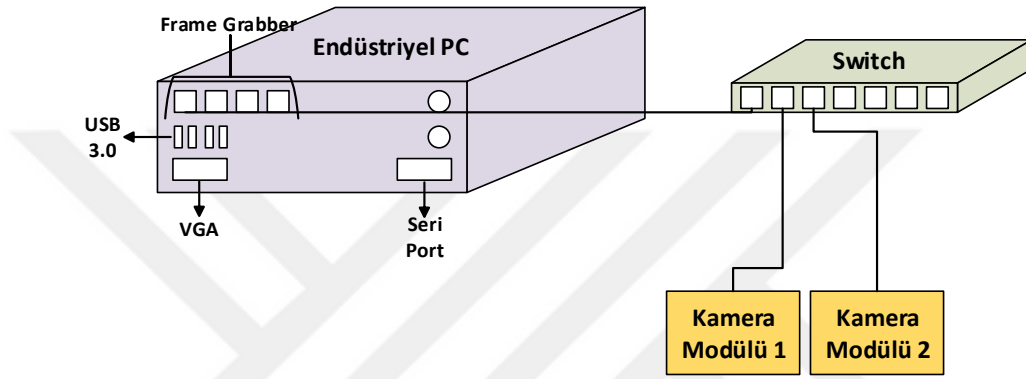
Bu tez çalışmasının bir diğer bölümü ana kontrol biriminin tasarlanmasıdır. Bu bölümde tasarlanan bir endüstriyel PC ile kalite kontrol sisteminde kullanılan sayısal kamera, görüntü ve görüntü işleme algoritmaları ile arayüz tasarımının birbirleriyle entegre bir şekilde çalışabilmesi sağlanmıştır. Bu bölümde tüm sistemin birbiriyle uyumlu ve stabil çalışabilmesi hedeflenmiştir. Ayrıca tasarlanan bu kontrol biriminin genişlenebilir yapıda olması sağlanarak ilerleyen süreçlerde sisteme yeni eklemeler yapılabilmenin önü açılmıştır.

Ana işlem biriminin temel amacı birden fazla sayısal kameranın aynı anda ve stabil bir şekilde çalışabilmesini sağlamaktır. Ayrıca bu kameralardan elde edilen görüntülerin işlenmesi ve bu görüntülerden sonuçların çıkarılması işlemi yine ana işlem biriminde gerçekleştirilmektedir. Başka bir deyişle son kullanıcıların ürünlere ait sonuçları gözlemlediği ve sistem ile sürekli iletişim kurduğu bölüm ana işlem birimidir. Bu sebepten bu birimin hızlı bir şekilde giriş çıkış işlemlerini gerçekleştirebilmesi ve herhangi bir yavaşlama, problem yaşamadan istenen amaçları sonuçlandırabilmesi gerekmektedir. Ana işlem biriminin tasarımında temel olarak bir endüstriyel PC tasarım süreçleri izlenmiştir. İleriye dönük olarak tasarlanan bu sistemde temel kriter maliyet/fayda ilişkisinin olabildiğince uygun olması durumudur. Geliştirilen bu endüstriyel sistemde kullanılan temel ekipmanlar maddeler halinde aşağıda verildiği gibidir:

- İşlemci
- RAM
- GPU Tabanlı Ekran Kartı
- Harddisk ve SSD
- Frame Grabber Kartları
- I/O Birimleri
- İşletim Sistemi

Bölüm başında da belirtildiği üzere kurulan makine görmesi tabanlı kalite kontrol sisteminin bir diğer önemli kısmı ana işlem biriminin tasarımıdır. Bu noktada sistemle uyumlu çalışabilecek bir endüstriyel bilgisayar kullanılması hedeflenmiştir. Intel işlemciye sahip bu sistemde temel olarak 16 gb ram ve 1 tb 7200 RPM hard disk bulunmaktadır. Bunların yanı sıra sistem içerisinde frame grabber kartı yer almaktadır. Sistem bir adet

VGA porta sahip olup, yine üzerinde gigabit seviyede iletişime olanak sağlayan ağ kartı yer almaktadır. Tasarlanan kamera modülünün hem frame grabber üzerinde hem de sisteme eklenmiş gigabit switch vasıtasıyla kontrol edilmesi sağlanmıştır. Bu sayede IP kontrollü çalışan kameralar tek bir switch'e bağlanacak switch ise ana makineye bağlantı sağlayacaktır. Hem ucuz maliyetli hem de optimal çözüm bu şekilde sağlanmaktadır. Ana işlem birimini ve bu birimin kamera modülü ile iletişimini gösteren bir blok diyagram Şekil 3.62'de verildiği gibidir.



Şekil 3.62. Sistemin çalışma durumuna ait bir görüntü

Şekilden de görülebileceği üzere sistemde mevcut bulunan switch ana işlem birimi ile kamera modülü arasında bir köprü görevi görmektedir. Gigabit düzeyde haberleşme hızına sahip olan bu switchler konfigüre edilebilmekte ve bu konfigürasyon ile sistemde mevcut bulunan kameralardan istenilenler kontrol edilebilmektedir. Hazırlanan arayüz yazılımı ile ana işlem biriminin hem switch hem de kamera modülü ile sorunsuz haberleşebilmesi sağlanmaktadır. UDP soket programlama işlemini içeren arayüz yazılımı ile hem kameralara erişim sağlanabilmekte hem de kameralardan görüntü verisi alınabilmektedir. Başka bir deyişle tasarlanan arayüz yazılımı ile çift yönlü haberleşme sağlanabilmektedir. Sistemde kullanılan önemli donanımsal ekipmanlara ait detaylar başlıklar ve maddeler halinde aşağıda verildiği gibidir;

- **İşlemci:** Ana işlem biriminde işlemci olarak Intel firmasının üretmiş olduğu Core i7 tabanlı işlemciler tercih edilmiştir. 4. Nesil intel işlemcileri olarak adlandırılan bu ekipmana ait temel teknik detaylar Tablo 3.7'de verildiği gibidir.

Tablo 3.7. Ana işlem biriminde kullanılan işlemci

İşlemci Özellikleri	
Özellik	Değer
İşlemci No	i7-4700HQ
Çekirdek Sayısı	4
İş Parçacığı Sayısı	8
İşlemci Frekansı	2.40 GHz
Önbellek	6 MB
Maks. Bellek Boyutu	32 GB
İşlemci Grafiği	Intel® HD Graphics 4600
Maks. Çözünürlük (HDMI)	3840x2160@60Hz
Maks. Çözünürlük (VGA)	2880x1800@60Hz
Desteklenen Ekran Sayısı	3
PCI Express Değişiklik Sürümü	3
PCI Express Yapılandırma	1x16, 2x8, 1x8 2x4
Maksimum PCI Express Hattı Sayısı	16

Tablodan da görülebileceği üzere sistem tasarlanırken seçilen işlemci temel bir kalite kontrol sistemi için gerekli tüm aygıtlara sahiptir. İşlemci üzerinde dahili olarak bulunan grafik işlemcisi ile, işlemciye bağlı ekranda görüntüler gösterilebilmektedir. Ayrıca işlemci bünyesinde bulunan PCI desteği ile sistem genişleyebilir bir yapıya sahiptir. Bu sayede sisteme ekstra yeni donanımlar zaman içerisinde rahatlıkla eklenebilecektir.

➤ **RAM:** Tasarlanan ana işlem biriminde 16 GB ram bloğu kullanılmıştır. Fakat tasarlanan sistem büyüyebilir bir yapıya sahiptir ve slot sayısına göre 32 GB'a kadar genişleyebilmektedir. Gerçekleştirilen tez çalışmasında belirlenen bu ram miktarı uygulamaları yürütebilmek ve işletim sistemini sorunsuz kullanabilmek için yeterli miktardadır. Bu ram bloğunun kullanılacağı alan ise temel olarak arayüz ve işletim sistemi üzerinedir. Bu sebepten temel bir kalite kontrol sistemi için yeterli olmaktadır.

➤ **GPU Tabanlı Ekran Kartı:** GPU tabanlı ekran kartları gerçek zamanlı işlemlerde oldukça önemli avantajlar sağlamaktadır. Özellikle paralel işlem yapabilme kapasitesine sahip olan bu kartlar sayesinde gündelik yaşamda sıklıkla kullanılan kalite kontrol sistemleri kullanılabilir hale gelmektedir. Ana işlem birimi üzerinde de GPU tabanlı işlem yapabilen bir ekran kartı kullanılmıştır. OpenCV tabanlı gerçekleştirilen görüntü işleme ve örüntü tanıma uygulamalarında kullanılan fonksiyonların büyük bir kısmı

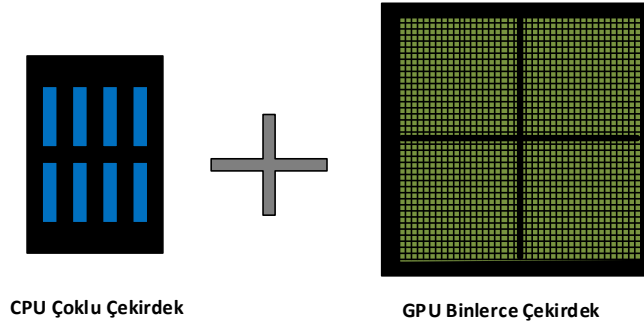
GPU destekli olup, gerçek zamanda hesaplama işlemleri gerçekleştirilebilmektedir. Ana işlem biriminde kullanılan bu ekran kartına ait teknik detaylar Tablo 3.8’de verildiği gibidir.

Tablo 3.8. GPU tabanlı ekran kartı

Ekran Kartı Özellikleri	
Özellik	Değer
Firma	NVidia
Grafik Kart No	GeForce GTX 850M
CUDA Çekirdek Sayısı	640
Video Hafıza	4 GB DDR3
Grafik Clock	936 MHz’ye kadar
Hafıza Clock	2500 MHz’ye kadar
Standart Hafıza Konfigürasyonu	DDR3 veya DDR5
Hafıza Arayüz Genişliği	128 bit
Hafıza Bant Genişliği	80 GB/sn
OpenGL	4.5
OpenCL	1.1
DirectX	12.0
Desteklenen Teknolojiler	NVIDIA BatteryBoost, Optimus, GeForce Experience, TXAA, PhysX, FXAA, Direct Compute, GPU Boost 2.0, Blu-Ray 3D, CUDA

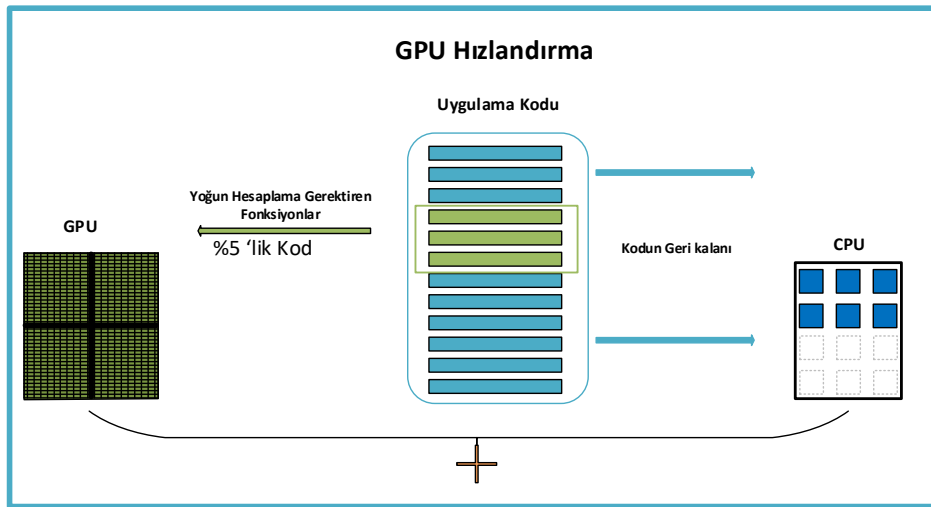
Bölüm başında da belirtildiği üzere GPU tabanlı ekran kartları gerçek zamanlı işlem yapabilme konusunda oldukça gelişmiş özelliklere sahiptir. Bu sebepten tasarlanan ana işlem biriminde GPU desteği sağlayan bir ekran kartının kullanılması kaçınılmazdır.

GPU hesaplama ile derin öğrenme, analiz ve mühendislik uygulamalarının hızlandırılması sağlanmaktadır. Genellikle CPU ile birlikte kullanılan bu işlemcide çoğunlukla yüksek hesaplama derecesine sahip kod parçacıkları GPU üzerinde yürütülmekte ve kalan kod parçacıkları ise CPU üzerinde çalıştırılmaktadır. Bu sayede yapılan işlemlerin son kullanıcı tarafında oldukça hızlı ve etkili bir şekilde gerçekleştirilebilmesi sağlanmaktadır. Temel olarak bir CPU üzerinde 1-2-4-8-16 gibi çeşitli sayılarda çekirdekler yer alırken GPU tarafında binlerce çekirdek yer alabilmektedir. Bu duruma bağlı olarak da çok daha kompleks işlemler hızlı ve sorunsuz bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Ayrıca GPU’lar üzerinde daha fazla transistör, daha geniş bellek bandı gibi grafik üzerine özelleşmiş birimler de yer almaktadır. CPU ve GPU işlemcilerine ait örnek bir blok diyagram Şekil 3.63’de verildiği gibidir.



Şekil 3.63. CPU ve GPU'ya ait örnek bir blok diyagram

Şekil 3.63'den de görülebileceği üzere CPU sınırlı sayıda bir çekirdeğe sahipken, GPU tam aksine binlerce çekirdeğe sahip olabilmektedir. Tabi bu işlemlerde CPU az sayıda çekirdeğe sahip olmasına rağmen, çekirdeklerin büyüklüklerinden ötürü yüksek hesaplama işlemlerini tek seferde yapabilmektedir. GPU'da ise küçük hesaplamaları yapabilen binlerce çekirdek yer almaktadır. Bu sebepten büyük bir matematiksel işlem bu çekirdeklere dağıtılmakta ve hesaplama işlemleri çok kısa sürede gerçekleştirilebilmektedir. GPU'lar üzerinde kod yazım işlemi gerçekleştirilirken, yazılan tüm kod parçası GPU tabanlı olarak yapılmamaktadır. Bunun yerine işlem süresi fazla olan kod parçaları GPU'ya uygun olarak yazılırken kalan kod parçaları CPU üzerinde yürütülebilecek şekilde hazırlanmaktadır. Bu sayede her iki işlemci türü de kullanılmakta ve işlemler hızlı bir şekilde yapılmaktadır. Bu işlemi özetleyen bir blok diyagram da Şekil 3.64'de verildiği gibidir.



Şekil 3.64. CPU ve GPU'ya ait örnek bir blok diyagram

Şekil 3.64’den görülebileceği üzere uygulama kodunun sadece belirli bir bölümü GPU üzerinde gerçekleştirilmektedir. Bu kod bölümü de genellikle yoğun hesaplama fonksiyonları içeren bölümlerden meydana gelmektedir. Kalan diğer bölümler ise genellikle sıralı işlem yapabilen CPU’ya yüklenmektedir. Bu sayede her iki işlemcinin de olabildiğince efektif kullanılabilmesi sağlanmaktadır. GPU tabanlı görüntü kartları Google, Yahoo, Microsoft, Intel, IBM gibi birçok büyük firma tarafından aktif olarak kullanılmaktadır. Yoğun hesaplama gerektiren alanlarda kullanılan bu kartların bazı kullanım bölgeleri aşağıda maddeler halinde sıralandığı gibidir;

- Sokak görüntülerini birleştirme,
- Otomatik kontrol ve denetleme,
- Robot ve sürücüsüz araç kontrol sistemleri,
- Medikal görüntü analizleri
- Video/görüntü arama
- Film endüstrisi, 3d görüntü oluşturma.

GPU ekran kartları NVidia firması tarafından önerilmiş ve geliştirilmiş yüksek kapasiteli hesaplama aygıtlarıdır. Ayrıca firmanın OpenCV’ye vermiş olduğu destek sayesinde gerçek zamanlı görüntü işleme uygulamalarında bu kartlar aktif olarak kullanılabilir hale gelmiştir. OpenCV kütüphanesinin içeriği incelendiğinde yaklaşık olarak 2500 adet fonksiyonun yer aldığı görülecektir. Bu fonksiyonların tamamı CPU tabanlı çalışan fonksiyonlar olmakla beraber, yine NVidia firmasının desteği ile bu fonksiyonlardan yoğun hesaplama gerektiren bazı temel fonksiyonlar GPU üzerinde çalışabilir hale getirilmiştir. Yaklaşık olarak 250 adet olan bu fonksiyonlar ile 5 kat ve 100 kat arasında değişen oranlarda performans artışı sağlanabilmektedir.

GPU ekran kartlarının programlama işlemlerinde aktif olarak kullanılabilmesi için paralel hesaplama mimarisini kullanmaya olanak sağlayan CUDA’nın ekran kartında halihazırda kullanılabilir olması gerekmektedir. Bu sebepten ana işlem birimi tasarlanırken bu kritere dikkat edilmiş ve ona göre seçim işlemi yapılmıştır. CUDA ve GPU terimleri NVidia tarafından ortaya atılmış ve geliştirilmiş terimler olup, ana işlem biriminde de bu firmaya ait olan Geforce GTX 850M serisi GPU ve CUDA tabanlı çalışabilen bir ekran kartı kullanılmıştır. CUDA, NVidia firması tarafından geliştirilmiş ve çalışabilmesi için NVidia GPU kartına ihtiyaç duymaktadır. Sunduğu paralel hesaplama mimarisi sayesinde

kullanıcıların kolaylıkla GPU'yu programlayabilmesini sağlamak ve CPU üzerindeki işlem yükünü hafifletebilmektedir.

Yine belirtildiği üzere önerilen sistemde GPU tabanlı ekran kartının kullanılmasının temel sebebi kalite kontrol sistemlerinin gerçek zamanlı işlem yapmaya gereksinim duymasıdır. Bu ekran kartları sayesinde geliştirilen görüntü işleme ve örüntü tanıma uygulamaları mili saniyeler mertebesinde hesaplanabilmekte ve sonuçlandırılabilir. Tez çerçevesinde geliştirilen uygulamalarda da GPU ve CUDA tabanlı çalışan uygulamalar geliştirilmiştir. Bu sayede yürütülen programların hızlı bir şekilde sonuçları hesaplayabilmesi sağlanmıştır. NVidia firması tarafından üretilen bu kartlar sürekli artan bir şekilde OpenCV fonksiyonlarını CUDA'da programlanabilir hale getirmekte ve geliştirmektedir. Tüm bu durumlar göz önüne alındığında tasarlanan ana işlem biriminde GPU tabanlı ekran kartının kullanımı zorunlu hale gelmiştir. Ayrıca CPU ve GPU tabanlı gerçekleştirilen ve birbirinin aynısı olan uygulamalara ait performans testleri ilerleyen bölümlerde detaylı bir şekilde incelenmektedir.

➤ **Harddisk ve SSD:** Tasarlanan ana işlem biriminde harddisk ve SSD depolama aygıtları beraber kullanılmaktadır. Bu iki aygıtın beraber kullanılmasının temel sebebi harddisklerin uygun fiyata daha çok depolama alanı sunması fakat okuma/yazma hızının düşük olması, SSD'lerin ise yüksek fiyat, düşük depolama alanı fakat okuma/yazma hızlarının oldukça yüksek olmasıdır. Bu sebepten geliştirilen ana işlem biriminde bu iki aygıt beraber yer almaktadır. Bu aygıtlardan SSD üzerinde işletim sistemi kurulmuş olup, tasarlanan arayüz ve görüntü işleme ile örüntü tanıma algoritmaları yürütülmektedir. Özellikle okuma/yazma hızının yüksekliğinden ötürü anlık hesaplama işlemleri gerektiren uygulamalar bu bölümde yer almaktadır. Yine ana işlem biriminde kullanılan harddisk ise genel olarak depolama amacıyla kullanılmaktadır. Başka bir deyişle bir kalite kontrol sistemi çalışırken sistemden alınan anlık görüntüler, sonuçlar, raporlar vs. bu bölüme aktarılmakta ve burada saklanmaktadır. Ana işlem biriminde geliştirilen bu yaklaşım ile hem uygun maliyetli bir çözüm sağlanmış hem de depolama alanından kısımdan yüksek hızlı işlem yapabilen bir sistem oluşturulmuştur. Kalite kontrol sistemlerinde bu şekilde hibrit bir yaklaşımın oluşturulması fayda/maliyet oranı açısından oldukça büyük önem arz etmektedir. Ana işlem biriminde kullanılan bu aygıtlara ait teknik detaylar sırasıyla Tablo 3.9 ve 3.10'da verildiği gibidir. Yine bu aygıtlara ait performans test karşılaştırması ise ilerleyen bölümlerde detaylı bir şekilde sunulmaktadır.

Tablo 3.9. Harddisk hafıza birimi

Harddisk Hafıza Birimi Özellikleri	
Özellik	Değer
Firma	Seagate
Ürün No	Freeplay
Boyut	1 TB
Bellek Teknolojisi	5400 RPM
Bağlantı Arayüzü	SATA
Ön Bellek	8 MB
Yazma Hızı	120 MB/s
Okuma Hızı	130 MB/s
Çerçeve Boyutu	2.5"

Tablo 3.10. SSD hafıza birimi

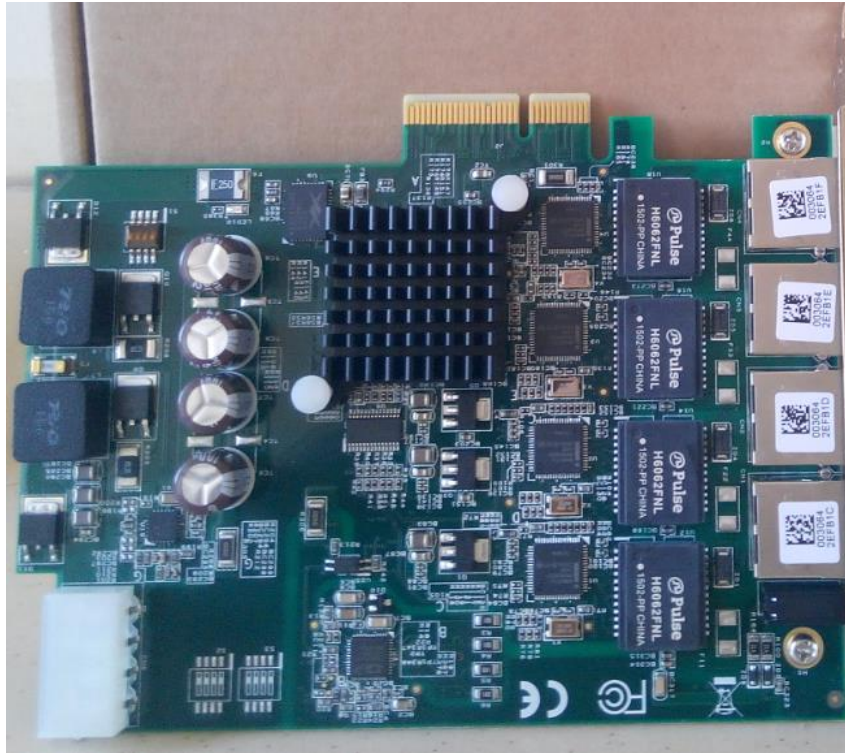
SSD Hafıza Birimi Özellikleri	
Özellik	Değer
Firma	Samsung
Ürün No	Evo 750
Boyut	250 GB
Bellek Teknolojisi	SSD
Bağlantı Arayüzü	SATA
Ön Bellek	256 MB
Yazma Hızı	520 MB/s
Okuma Hızı	540 MB/s
Çerçeve Boyutu	2.5"

- **Frame Grabber:** Ana işlem biriminde kullanılan bir diğer aygıt ise frame grabber kartlarıdır. Frame grabber'lar temel olarak kamera sisteminden aldıkları görüntüleri ana işlem birimine bağlı ekranda görüntüleyebilen ve aynı anda birden fazla kamera modülünün bağlandığı aygıtlardır. Ana işlem biriminin PCI slotuna yerleştirilen bu kartlar ile işletim sistemine kurulan ve frame grabber kartı ile uyumlu çalışabilen bir yazılım ile kontrol edilebilmektedirler. Gerçekleştirilen bu tez çalışmasında 2 farklı frame grabber yerleştirilmiştir. Yerleştirilen iki frame grabber kartı da 4 kanallı olup, aynı anda 4 kamerayı destekleyebilmekte ve çalıştırabilmektedir. Bu frame grabber kartlarından ilki ethernet portu aracılığıyla kamera modülleri ile haberleşmektedir. Bu frame grabber kartının teknik detayları Tablo 3.11'de verildiği gibidir.

Tablo 3.11. Ethernet tabanlı frame grabber teknik özellikler

Parametre	Değer
Marka	Adlink
Model	GIE64+
Kanal Sayısı	4
İletişim	Ethernet
İletişim Standardı	GiGE
Hız	1000 Mb/s
Uyumluluk	Mono/Color
Uygulamalar	Machine Vision Inspection Systems

Tablodan da görülebileceği üzere ana işlem biriminde kullanılan ilk frame grabber kartı Adlink firmasının üretmiş olduğu GIE64+ modeli olup 4 kanala sahiptir. GigE iletişim formatının kullanıldığı bu kart UDP standartına göre haberleşme işlemini gerçekleştirmekte ve saniyede 1000 mbit veri aktarım hızını desteklemektedir. Hem renkli hem de mono görüntüleri destekleyebilen bu kart genellikle makine görmesi ve kalite kontrol sistemleri uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır. Proje çerçevesinde temin edilen ve ana işlem biriminin PCI slotuna yerleştirilerek kullanılan bu karta ait bir görüntü Şekil 3.65’de verildiği gibidir.

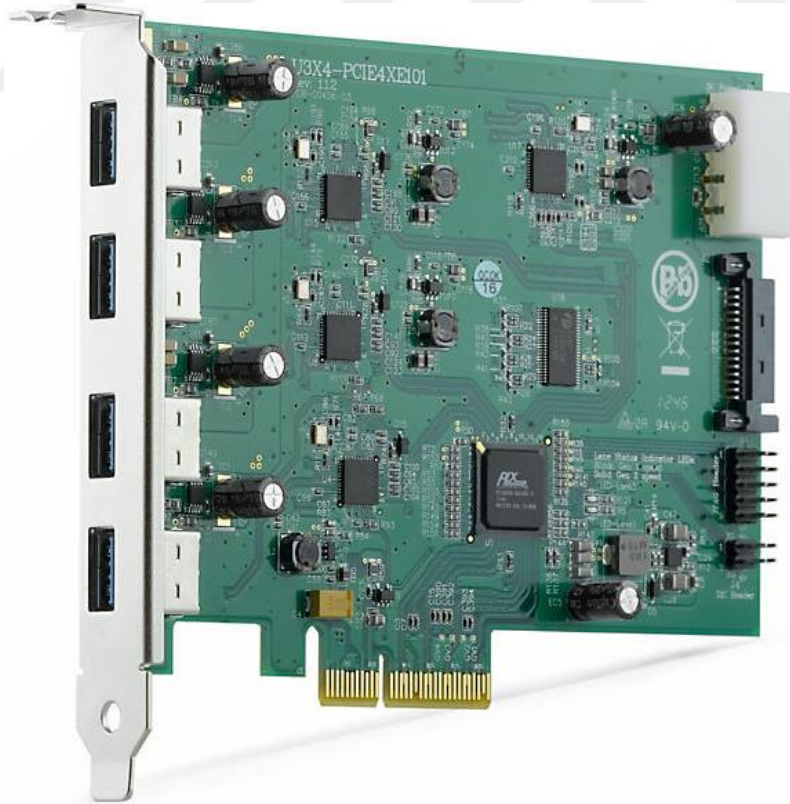


Şekil 3.65. Ana işlem biriminde kullanılan ethernet tabanlı frame grabber

Ana işlem biriminde kullanılan frame grabber'lar sayesinde direkt olarak kamera modülleri ile iletişim sağlanabilmektedir. Başka bir deyişle kamera modülleri doğrudan ana işlem birimine bağlanabilmektedir. Bu amaçla kullanılan bir diğer frame grabber kartı ise kamera modülleri ile USB portu üzerinden iletişim sağlayabilmektedir. Bu frame grabber kartına ait teknik detaylar ise Tablo 3.12'de verildiği gibidir. Ayrıca yine bu frame grabber kartına ait bir görüntü Şekil 3.66'da verildiği gibidir.

Tablo 3.12. USB tabanlı frame grabber teknik özellikler

Parametre	Değer
Marka	National Instruments
Model	NI PCIe-8244
Kanal Sayısı	4
İletişim	USB
İletişim Standardı	USB3.0 Vision
Hız	480 Mb/s
Uyumluluk	Mono/Color
Uygulamalar	Machine Vision Inspection Systems



Şekil 3.66. Ana işlem biriminde kullanılan USB tabanlı frame grabber

Bölüm başında da belirtildiği üzere ana işlem birimi üzerinde iki farklı türde frame grabber kartı kullanılmıştır. Bu kartların ilki ethernet portu üzerinden haberleşme sağlarken diğeri USB portu üzerinden iletişim kurmaktadır. Tez çalışması çerçevesinde geliştirilen sayısal kamera prototipleri ethernet portu üzerinden haberleşme işlemini gerçekleştirmektedir. Buna bağlı olarak sayısal kamera prototipleri ethernet tabanlı frame grabber kartı ile doğrudan iletişim kurabilmektedir. Fakat yine belirtildiği üzere bu ethernet tabanlı frame grabber kartı 4 kanala sahiptir ve anlık olarak 4 kameradan görüntü çekebilmektedir. Ayrıca aynı anda 4 farklı kamera aktifleştirildiğinde kameralardan elde edilen frame oranları düşmektedir. Bu durumların önüne geçebilmek için sistemde konfigüre edilebilir bir switch kullanılmıştır. Bu aygıta ait detaylar ilerleyen bölümlerde detaylı bir şekilde verilmektedir.

Sistemde frame grabber kartının kullanılmasının temel sebebi ileriye dönük bir sistem geliştirme gayretidir. Kullanıcıların hangi porta kamerayı bağlamak istedikleri yine tamamen kullanıcıya bırakılmıştır. Ayrıca tasarlanan sayısal kamera prototipi her ne kadar ethernet tabanlı iletişim kursa da sisteme yine ek olarak bir USB tabanlı kart eklenmiştir. Bu kart sayesinde yine kullanıcılar istedikleri takdirde USB tabanlı çalışan kameralarını bağlayabilmektedir. Bu sayede kullanıcılar farklı iletişim standartlarına sahip kameraları da rahatlıkla kullanabilmektedirler. Yine çalışmalar neticesinde belirlenen işlemci ve anakarta bağlı olarak sistemde dahili bir network kartı yer almaktadır. Bu kart sayesinde ana işlem birimi internet yoluyla dış dünyaya açılabilen ve switch üzerinden sayısal kamera prototipleri ile haberleşebilmektedir. Yine bu ağ kartı da 10/100/1000 mbit haberleşme hızına sahip olup, çift yönlü iletişim kurabilmektedir.

➤ **I/O Birimleri:** Ana işlem biriminde gerek dış dünya ile haberleşebilmek için gerekse modüller arasında veri alışverişinde bulunabilmek çeşitli çevresel arabirimler yer almaktadır. Bunlar maddeler halinde aşağıda verildiği gibidir:

- 1 adet VGA portu
- 2 adet RS232 portu
- 2 adet RJ45 portu
- 4 adet USB 2.0
- 2 adet USB 3.0
- 1 adet HDMI

- 1 adet DVI
- 1 adet PS2

➤ **İşletim Sistemi:** Tasarlanan endüstriyel PC üzerinde Windows 10 Pro işletim sistemi yürütülmektedir ve bu işletim sistemi 64 bittir. Tasarlanan ana işlem biriminde bu işletim sisteminin tercih edilmesinin temel sebebi kullanımının birçok kişi tarafından bilinmesi ve en aygın kullanım ağına sahip olmasıdır. Ayrıca proje çerçevesinde tasarlanan arayüz yazılımı da C# tabanlı olup, wrapper'lar sayesinde OpenCV uygulamalarının bu arayüze entegre edilebilmesi sağlanmıştır. Bu sebepten tüm uygulamaların senkron ve stabil çalışabilmesi amacıyla işletim sistemi olarak Windows tercih edilmiştir. Ayrıca yine kullanıcıların isteğine bağlı olarak Linux işletim sistemine de geçiş yapılabilmektedir.

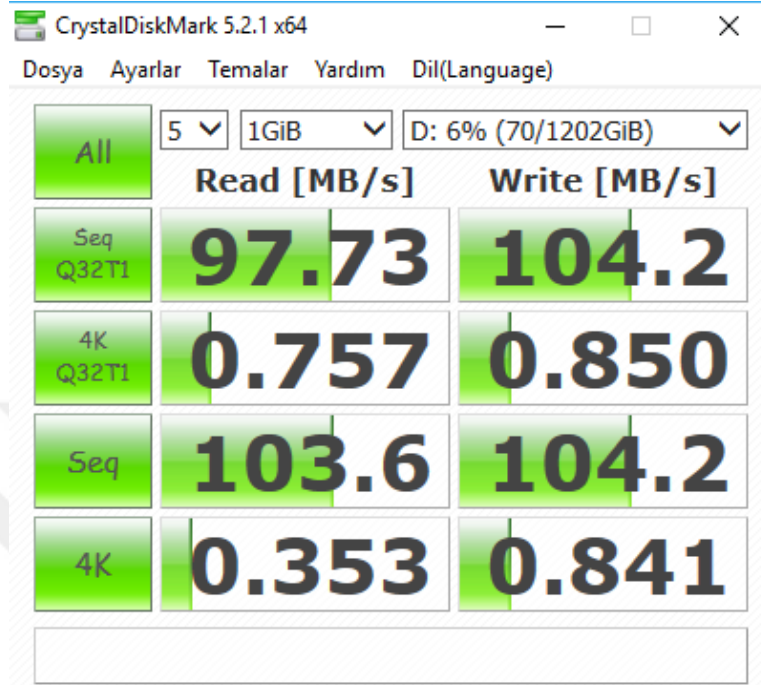
3.7. Test Sonuçları

Ana kontrol biriminin tasarım süreci tamamlandıktan sonra kullanılan aygıtların test işlemleri gerçekleştirilmiş ve nihai istenen sonuçlar elde edildikten sonra sistem tümleştirme çalışmaları yürütülmüştür. Test sürecinde sırasıyla hard disk ve SSD okuma/yazma hızları kontrol edilmiş olup, daha sonrasında GPU kartı için test işlemi yapılmıştır. Endüstriyel sayısal kamera tasarımı sürecinin son aşamasında ise sayısal kamera prototipinin hız testleri gerçekleştirilmiştir. Uygulanan bu testlere ait detaylar ilerleyen bölümlerde alt başlıklar halinde sunulmuştur.

3.7.1. Harddisk Okuma/Yazma Testi

Tez çalışması çerçevesinde yürütülen uygulamalar neticesinde ana işlem birimine iki adet hafıza birimi entegre edilmiştir. Bu birimlerden ilki normal hard disk olup okuma/yazma hızı düşük olan hafıza birimidir. Fakat bu hafıza biriminin okuma/yazma hızı düşük olmasına rağmen maliyetlerinin oldukça uygun olması önemli bir tercih sebebini oluşturmaktadır. Gerçekleştirilen bu tez çalışmasında ana işlem birimine entegre edilen bu hafıza birimi ile kamera modülünden elde edilen görüntüler kayıt edilebilmekte ve sistemden anlık olarak alınan raporlar depolanabilmektedir. Ana işlem biriminde yer alan bu birim sadece depolama amaçlı kullanılmakta olup, işletim sistemi ve gerekli diğer

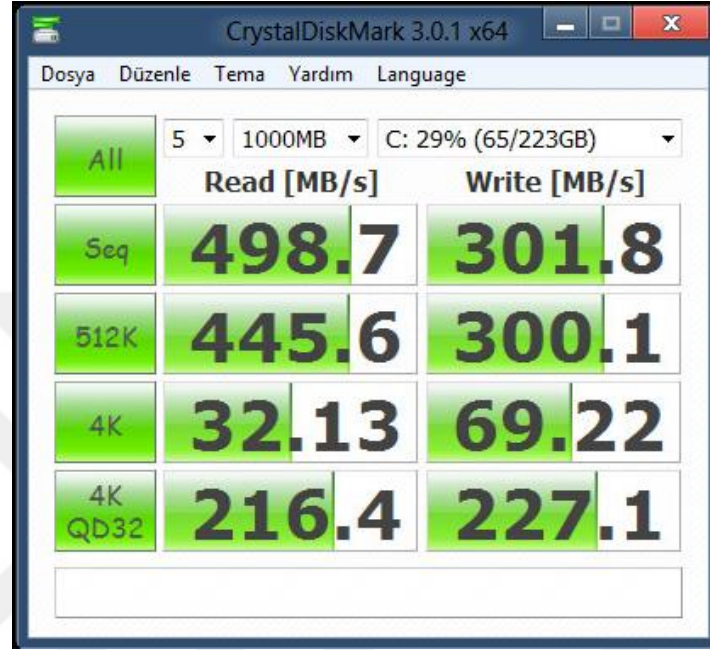
uygulamalar SSD üzerinde çalıştırılmaktadır. Bu hafıza birimine ait okuma/yazma hızını gösteren detaylı bir sonuç grafiği Şekil 3.67’de verildiği gibidir.



Şekil 3.67. Hafıza birimi (harddisk) okuma/yazma hızları

Şekil 3.67’den de görülebileceği üzere ana kontrol sisteminde yer alan bir hafıza birimi olan harddiskin okuma hızı yaklaşık 98 mb iken, bu birimin yazma hızı 104 mb’dır. Bilindiği üzere kamera modülünden anlık olarak elde edilen veri miktarı yaklaşık 125 mb’dır. Şekil 3.66’da verilen okuma/yazma hız değerleri göz önüne alındığında bu değerler hedeflenen veri miktarının altında kalmaktadır. Bu sebepten bir hafıza birimi olarak harddisk’ler hedeflenen amaçlar için yetersiz kalmaktadır. Yine bu duruma bağlı olarak ana kontrol sistemine bir adet daha hafıza birimi yerleştirilmiş olup, daha yüksek okuma/yazma hızına sahip olan SSD’ler tercih edilmiştir. Bu hafıza birimi bölüm başında da belirtildiği üzere oldukça yüksek okuma/yazma oranına sahiptir. Bilindiği üzere tez çerçevesinde geliştirilen kamera modülü yaklaşık 1000 mbit oranında veri aktarım kapasitesine sahiptir. Bu duruma bağlı sürekli olarak ana işlem birimine görüntü karelerinin gelmesi sağlanmakta ve bu görüntülerin anlık olarak işlenmesi gerekmektedir. Yine bu sebepten oldukça hızlı çalışan bir hafıza birimine gereksinim duyulmaktadır. Bu amaçla kullanılan SSD üzerine işletim sistemi ve C# tabanlı çalışan arayüz programı kurulmuştur. Oldukça hızlı çalışan bu birim sayesinde gerek işletim sisteminde gerekse

arayüz de herhangi bir donma, yavaşlama gibi sık karşılaşılan problemler yaşanmadan işlemler hızlı bir şekilde gerçekleştirilmektedir. Bu kapsamda ana işlem birimine yerleştirilen SSD'ye ait okuma/yazma hız oranını gösteren bir görüntü Şekil 3.68'de sunulduğu gibidir.



Şekil 3.68. Hafıza birimi (SSD) okuma/yazma hızları

Şekil 3.68'den de görülebileceği üzere SSD hafıza birimi için okuma hızı yaklaşık 500 mb iken yazma hızı 300 mb'dır. Bu oran da kamera modülü üzerinden elde edilen veri miktarını yeterli miktarda karşılamaktadır. Kamera modülünde işlemler genel olarak FPGA üzerinde gerçekleştirilmektedir ve sadece görüntüleme işlemi ile elde edilen sonuçların gösterimi ana işlem biriminde yapılmaktadır. Fakat yüksek oranda görüntü karesi ana makineye geldiği için bu görüntü karelerinin herhangi bir kayıp yaşanmadan işlenmesi ve nihai sonucun kullanıcıya gösterilmesi oldukça önemlidir. Bu sebepten SSD hafıza biriminin kullanılması bu noktada oldukça büyük bir problemi de ortadan kaldırmaktadır.

3.7.2. GPU Kart Hız Testi

Bölüm başında da belirtildiği üzere GPU kartları üzerinde gerçekleştirilen işlemler, bu kartların paralel işlem yapabilmesinden ötürü oldukça hızlı bir şekilde yapılmaktadır. Bu

kartlar bünyesinde barındırdığı 100’den fazla çekirdek ile yoğun matematiksel işlemleri çok kısa sürede yapabilmekte ve bu işlemlerin sonuçlarını hesaplayabilmektedir.

GPU kartları genellikle yoğun veri kümelerinin işlendiği noktalarda kullanılmaktadır. Bunlara verilebilecek en iyi örnekler sırasıyla big data, derin öğrenme, makine öğrenmesi ve gerçek zamanlı bilgisayar görmesi işlemleridir. Gerçekleştirilen bu tez çalışmasında da temel olarak gerçek zamanlı bilgisayar ve makine görmesi işlemleri yapılmaktadır. Bu amaçla opencv kütüphanesi kullanılarak çeşitli görüntü işleme uygulamaları gerçekleştirilmekte ve hedeflenen sonuçlar elde edilmektedir. Yine bölüm başında belirtildiği üzere, gerçekleştirilen bu tez çalışmasında yoğun bir şekilde ana makineye görüntü kareleri gelmektedir. Ayrıca bu görüntü karelerinin kayıpsız bir şekilde işlenebilmesi büyük önem arz etmektedir. Bu sebepten ana işlem biriminin merkezi işlemcisi olan CPU bu noktada yetersiz kalabilmektedir ve bu nedenle GPU kullanımı zaruri hale gelmektedir. GPU kullanımının gerçekleştirilen bu tez çalışması açısından bir diğer önemli noktası ise, bu kartların Nvidia tarafından üretilmesi ve bu firmanın OpenCV kütüphanesine doğrudan destek sağlamasıdır. Başka bir deyişle Nvidia firması hali hazırda CPU için yazılmış olan çeşitli görüntü işleme fonksiyonlarını sürekli olarak GPU üzerinde çalışabilir hale getirmekte ve kullanıcıların hizmetine sunmaktadır. Bu amaçla CPU üzerinde çalışabilecek örnek bir kod parçası Şekil 3.69’da verildiği gibidir.

```
#include <opencv2/opencv.hpp>
using namespace cv;
int main() {
    Mat src = imread("car1080.jpg", 0);
    if (!src.data) exit(1);
    Mat dst;
    bilateralFilter(src, dst, -1, 50, 7);
    Canny(dst, dst, 35, 200, 3);
    imwrite("out.png", dst);
    return 0;
}
```

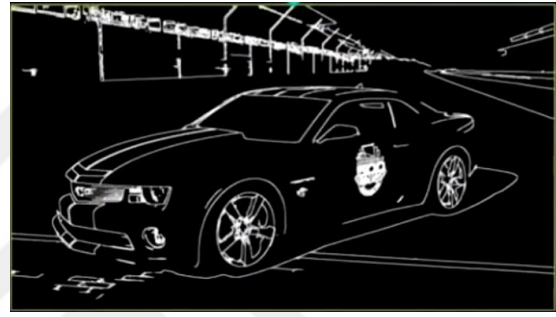
Şekil 3.69. CPU işlemci için gerçekleştirilen örnek bir OpenCV kod parçası

Şekil 3.69’dan da görülebileceği üzere, kodun ilk satırında sistemde kurulu bulunan OpenCV kütüphanesinin hafızaya yüklenmesi işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu kod parçasığının bir sonraki satırında ise OpenCV’de sıklıkla kullanılan bir isim uzayı tanımlaması (cv) yapılmıştır. Bu işlemin ardından main bloğu tanımlaması yapılmış ve

“car1080.jpg” görüntü dosyası “imread” komutu kullanılarak “src” isimli değişkene atanmıştır. Kod parçasının bir sonraki aşamasında görüntü yumuşatma işlemlerinden biri olan ve oldukça zaman harcayan bir fonksiyon olan “bilateralFilter” komutu görüntüye uygulanmış ve elde edilen sonuç “dst” isimli değişkene gönderilmiştir. Bu işlemin ardından görüntüye “Canny” fonksiyonu uygulanmış ve görüntünün kenarları çıkarılmıştır. Kod parçasının son aşamasında ise kenarı çıkarılmış olan görüntü “imwrite” komutu kullanılarak “out.png” adlı dosyaya yazılmıştır. Bu kod parçasığına ait giriş ve sonuç görüntülerinin durumu sırasıyla Şekil 3.70-(a) ve (b)’de verildiği gibidir.



(a) Giriş görüntüsü



(b) Çıkış görüntüsü

Şekil 3.70. Opencv örnek kod parçasığı çıktısı

Şekil 3.70’den da görülebileceği üzere giriş olarak alınan renkli araba görüntüsü Şekil 3.69’da verilen kod parçasığı uygulandıktan sonra yumuşatılmış ve kenarları çıkarılmış bir hale gelmiştir. Şekil 3.69’da verilen kod parçasığı OpenCV Kütüphanesi ve C++ programlama dili kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada aynı işlem için GPU tabanlı çalışan bir uygulamaya ait örnek kod parçası ise Şekil 3.71’de verildiği gibidir.

```
#include <opencv2/opencv.hpp>
#include <opencv2/gpu/gpu.hpp>
using namespace cv;
int main() {
    Mat src = imread("car1080.jpg", 0);
    if (!src.data) exit(1);
    gpu::GpuMat d_src(src);
    gpu::GpuMat d_dst;
    gpu::bilateralFilter(d_src, d_dst, -1, 50, 7);
    gpu::Canny(d_dst, d_dst, 35, 200, 3);
    Mat dst(d_dst);
    imwrite("out.png", dst);
    return 0;
}
```

Şekil 3.71. CPU işlemci için gerçekleştirilen örnek bir OpenCV kod parçası

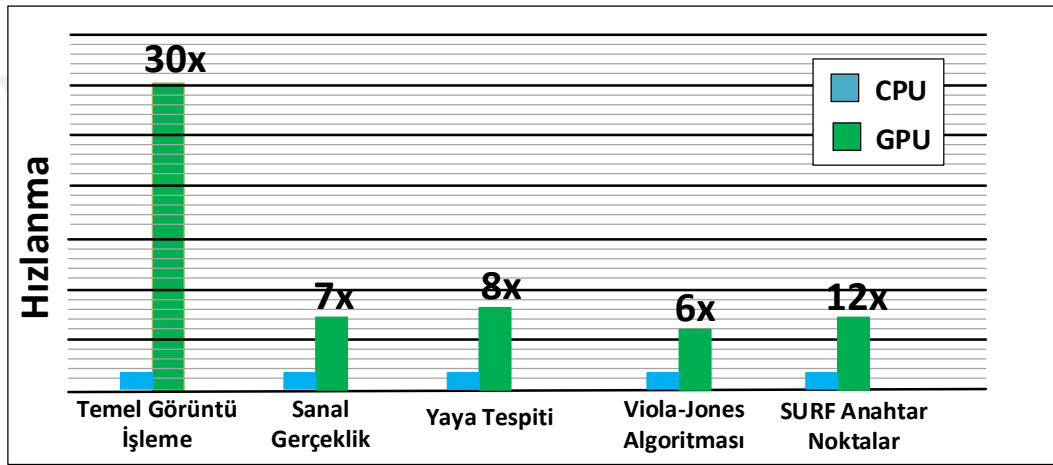
Şekil 3.71’den de görülebileceği üzere yeşil renk ile belirtilen kod parçaları CPU için yazılan kod parçacığına eklenmiş mevcut kod parçacığının GPU üzerinde çalışabilir hale gelmesine yardımcı olmuştur. Bu amaçla öncelikli olarak sisteme OpenCV’nin GPU kütüphanesi eklenmiştir. Diğer kısımlar aynı olmasına rağmen, GPU kodlamasında görüntünün doğrudan GPU kartına yüklenmesi işlemi mevcut bulunmamaktadır. Bu sebepten daha öncesinde “src” değişkenine yüklenen görüntü verisi “d_src” isimli GpuMat değişkenine okunmuştur. Bu işlemin ardından bilateralFilter ve Canny fonksiyonlarının başına “gpu” ön eki getirilmiş ve bu fonksiyonların GPU kart üzerinde çalışabilmesi sağlanmıştır. Nihai olarak GPU üzerinde işlenen görüntü tekrar normal CPU üzerinde çalışan “dst” değişkenine geri okunmuş ve hafızaya görüntü olarak kaydedilmiştir.

CUDA genel amaçlı GPU hesaplamalarında grafik işlemcisinin çekirdeklerinin kullanılmasını sağlayan ve paralel işlem yapabilmeye olanak tanıyan bir mimaridir. Temel olarak C programlama dilini kullanan bu mimari ile GPU programlama işlemi gerçekleştirilebilmektedir. Ayrıca bu mimarinin sağladığı bir diğer avantaj ise herhangi bir GPU kart yükseltmesinde kod değişikliğine gerek kalmadan, mevcut kodun yeni bir kart üzerinde çalışabilmesine imkan vermesidir. Bu sayede yeni yükseltmelerde kod içerisinde herhangi bir güncelleme işlemine gerek kalmadan performans artışı sağlanabilmektedir. Bu durumu sağlayan en önemli faktör ise tüm bu geliştirmelerin Nvidia firması tarafından gerçekleştirilmesidir. CPU ve GPU için ayrı ayrı hazırlanan aynı kod parçasının zamansal yönden performansına ait bir karşılaştırma Şekil 3.72’de verildiği gibidir.

CPU	vs.	CUDA	NVIDIA
<pre>#include <opencv2/opencv.hpp> using namespace cv; int main() { Mat src = imread("car1080.jpg", 0); if (!src.data) exit(1); Mat dst; bilateralFilter(src, dst, 3, 255, -1, 7); Canny(dst, dst, 35, 200, 3); imwrite("out.png", dst); return 0; }</pre>		<pre>#include <opencv2/opencv.hpp> #include <opencv2/gpu/gpu.hpp> using namespace cv; int main() { Mat src = imread("car1080.jpg", 0); if (!src.data) exit(1); 0.5ms→ gpu::GpuMat d_src(src); 0ms→ gpu::GpuMat d_dst; 0.187ms→ gpu::bilateralFilter(d_src, d_dst, -1, 50, 7); 12ms→ gpu::Canny(d_dst, d_dst, 35, 200, 3); ↳ Mat dst(d_dst); 0.5ms→ imwrite("out.png", dst); return 0; }</pre>	

Şekil 3.72. CPU ve GPU için hazırlanan kod parçacıklarının zamansal karşılaştırması

Şekil 3.72’den de görülebileceği üzere bilateralFilter komutu CPU üzerinde 2521 ms zaman tüketirken GPU kart üzerinde aynı komut 187 ms tüketmektedir. Tüm kod parçacığındaki zamansal gelişim göz önüne alındığında sistemin performansı yaklaşık 12 kat artmaktadır. Bu kadar basit bir örnekte bile önemli avantajlar sağlayan GPU kartının gerçek zamanlı uygulamalardaki performansı oldukça fazla olmaktadır. Bu amaçla görüntü işleme konularında sıklıkla karşılaşılan ve gerçek zamanlı olarak düşünüldüğünde oldukça zaman tüketen bazı uygulama ve fonksiyonların CPU ve GPU karşılaştırması Şekil 3.73’de verildiği gibidir.



Şekil 3.73. CPU ve GPU performans testi

Şekilden de görülebileceği üzere yoğun hesaplama getiren fonksiyonların GPU kartlar üzerinde yürütülmesi oldukça avantajlı olmaktadır. Ayrıca Nvidia firmasının her geçen gün mevcut fonksiyonları arttırması ve GPU üzerinde çalışabilir hale getirmesi bu alandaki ilgiyi her geçen gün arttırmaktadır. Günümüzdeki yoğun veri işleme durumu da göz önüne alındığında özellikle gerçek zamanlı uygulamalarda GPU kullanımı neredeyse bir zorunluluk haline gelmiş ve gerçekleştirilen bu tez çalışmasında da geliştirilen görüntü işleme ve görüntü tanıma algoritmaları GPU kartlar üzerinde çalışabilir hale getirilmiştir.

3.7.3. FPGA Tabanlı Sayısal Kamera için Performans Analizi

Doktora tezi çerçevesinde gerçekleştirilen sayısal kamera prototipi bünyesinde Altera Cyclone IV model FPGA işlemci barındırmaktadır. Bu FPGA kullanılarak elde edilen sayısal kamera minimum VGA (640x480) görüntü sağlayabilirken, maksimum 5 MP

(2592x1944) görüntü verebilmektedir. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen arayüz ve kalite kontrol yazılımı aracılığıyla haberleşmenin sağlandığı bu prototipte görüntü sensörü programlanabilir bir yapıya sahiptir ve test işlemleri de bu durum gözetilerek gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sayısal kamera prototipinde toplam 5 farklı çözünürlük tercih edilmiştir. Gerçekleştirilen literatür, piyasa ve saha araştırmalarına göre en çok tercih edilen çözünürlükler belirlenmiş ve test işlemleri bu çözünürlüklere göre gerçekleştirilmiştir. Kameradan saniyede alınan görüntü karesi miktarı baz alınarak yapılan bu testlere ait detaylı sonuçlar Tablo 3.13’de verildiği gibidir.

Tablo 3.13. FPGA tabanlı sayısal kamera için performans analizi

FPGA Tabanlı Sayısal Kamera					
Görüntü Çözünürlüğü	Piksel Sayısı	Piksel Bit Derinliği	Boyut (Byte)	Ethernet Hız (MBit)	FPS
640x480	307200	32	1228800	993	101.7
800x600	480000	32	1920000	976	65.1
1280x720	921600	32	3686400	996	33.9
1600x1200	1920000	32	7680000	995	16.2
2592x1944	5038848	32	20155392	998	6.2

Gerçekleştirilen bu tez çalışmasında elde edilen sayısal kamera prototipinde her bir piksel 32 bit renk derinliğine sahiptir. Bunlardan 10 bit Kırmızı (R), 10 bit Yeşil (G), 10 bit Mavi (B) ve 2 bit Alpha (A)’yı temsil etmektedir. Başka bir deyişle ethernet portuna gelen toplam bit sayısı görüntü çözünürlüğü ile bit derinliğinin çarpımından elde edilmektedir.

Tablo 3.13’den de görülebileceği üzere görüntü çözünürlükleri sırasıyla VGA, SVGA, 1 MP, 2 MP ve 5 MP olarak belirlenmiş ve FPGA üzerinde hazırlanan kod parçacığı bu işlevleri yerine getirebilecek şekilde programlanmıştır. Yine tablo 3.13’den hareketle bu çözünürlüklerden elde edilen saniyedeki görüntü karesi sayıları yaklaşık olarak sırasıyla 100, 65, 33, 16 ve 6 olarak belirlenmiştir. Burada elde edilen görüntülerdeki pikseller herhangi bir sıkıştırma işlemine tabi tutulmamış olup ham piksel verileridir. FPGA üzerinde tasarlanan sistem mimarisine görüntü sıkıştırma bloğu eklendiğinde (JPEG2000, H.264 vs.) FPGA’den elde edilebilecek saniyedeki görüntü karesi miktarı da arttırılmış olacaktır. Fakat elde edilen bu değerler piyasadaki muadil örnekler ile karşılaştırıldığında gerçekleştirilen sayısal kamera prototipinin fiyat/performans oranının oldukça iyi seviyede olduğu gözlemlenecektir. Ayrıca elde edilen veriler dikkate alındığında ve CMOS görüntü sensörünün katalogu incelendiğinde, bu değerlerin katalog verileriyle uyum sağladığı

görülebilecektir. Sayısal kamera prototipi için gerçekleştirilen bu analiz kameranın performansını ölçmek ve muadilleriyle kıyaslayabilmek için gerçekleştirilmiştir. Elde edilen saniye başına görüntü karesi miktarları incelendiğinde endüstriyel bir alan için bu değerlerin fazlasıyla yeter miktarda olduğu görülmektedir.



4. ÖNERİLEN AKILLI KALİTE KONTROL ALGORİTMALARI

Gerçekleştirilen bu doktora tez çalışmasının bir diğer önemli aşaması kalite kontrol algoritmalarının geliştirilmesidir. Bu bölümde seri bant üzerinden geçen ürünlere ait özellikler çıkarılarak, bu ürünlerdeki eksikliklerin, kusurların ve problemlerin tespit edilmesi sağlanmıştır. Pratik olarak makine görmesi işlemini gerçekleştirmek için kullanılan bu yöntemler, dijital görüntülerden otomatik bilgi çıkarımı temeline dayanmaktadır. Özellikle fabrikalardaki ürünlerin kalite kontrolü için kullanılan görüntü tanıma işlemleri, olabildiğince hassas, hızlı ve doğru sonuç verebilmelidir. Bu sebepten sistemde meydana gelecek herhangi bir eksiklik veya arıza istenmeyen ürünlerin banttıan geçmesine ve kullanıcıya kusurlu ürünlerin ulaşmasına sebep olabilmektedir. Makine işlemi temel olarak 5 işlem adımından oluşmaktadır. Bunlar sırasıyla aşağıda verildiğı gibidir.

- Görüntünün sayısallaştırılması
- Görüntüye bazı morfolojik işlemlerin uygulanması
- Görüntü segmentasyon işlemi
- Özellik çıkarımı
- Karar verme ve sınıflandırma işlemi

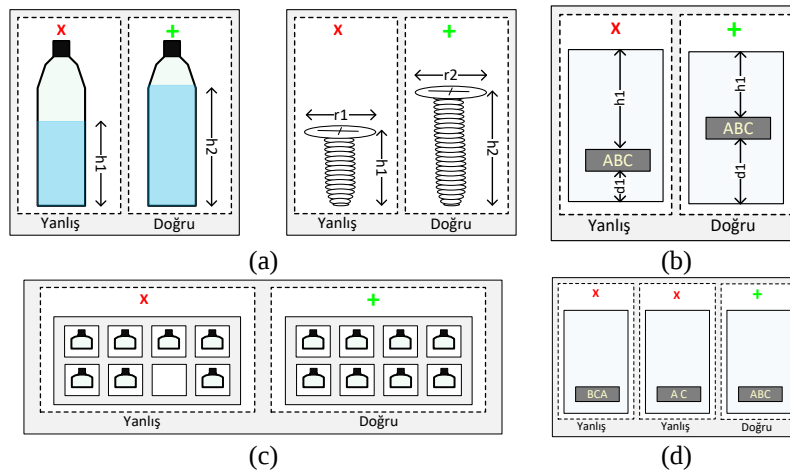
Görüntü Sayısallaştırma: Tez kapsamında geliştirilmiş olan kalite kontrol algoritmalarının temeli makine görmesine dayanmaktadır. Bu amaçla bir sayısal kamera prototipi geliştirilmiş ve bu kamera prototipinden piksel verileri gerçek zamanlı olarak ana işlem birimine iletilmiştir. Bu uygulamaların ilk aşaması kameradan alınan görüntü karesinin sayısallaştırılmasıdır. Bu sayısallaştırma işlemi sayesinde görüntü üzerinde çeşitli algoritmalar koşturulabilmekte ve yapılması istenen işlemler hızlı bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Görüntüdeki piksellerin renk değerleri kullanılarak görüntünün bir matris dizisi haline getirilmesi işlemini kapsamaktadır.

Morfolojik İşlemler: Kalite kontrol sistemlerinde kullanılan bir diğer önemli adım sayısallaştırılan görüntüye çeşitli morfolojik işlemlerin uygulanmasıdır. Literatürde çok çeşitli morfolojik yöntemler olmasına rağmen bunların en bilinenleri erozyon, dilasyon, görüntü açma, görüntü kapama gibi yöntemlerdir. Bu yöntemler ile temel olarak

görüntülerdeki ayrıntıların ortaya çıkarılması hedeflenmektedir. Ayrıca kamera aracılığıyla yakalanmış görüntüde gerekli döndürme, hizalama ve kırpma işlemleri yapılarak, sistemde daha önceden kayıtlı olan düzgün verilerle aynı orana getirilmesi de geliştirilen uygulamaların bu aşamasında yapılmaktadır.

Görüntü Segmentasyon İşlemi: Makine görmesi sistemlerinin en temel adımlarından birisi olan bu bölümde görüntülerdeki her bir parça ayrıştırılmakta ve bu parçaların üzerinde ön işlemler yapılması sağlanmaktadır. Otomatik makine görmesi işleminde nesnelerin farklı büyüklük ve yapıda olması, ayrıca görüntünün kullanılmayacak detayları içerisinde barındırması gibi sebeplerden dolayı bu işlem makine görmesi adına oldukça önemli bir bölümdür. Bu bölümde yapılan işlemler sonucunda gerek hız gerekse doğruluk açısından sistemin kararlılığını önemli ölçüde etkileyen sonuçlar elde edilmektedir.

Özellik Çıkarımı: Özellik çıkarımı görüntü işlemenin en önemli kısmıdır. Çünkü taranması istenen özellikler bu bölümde elde edilmekte ve bu bölümde işlem görmektedir. Farklı ürünler için kontrol edilmesi gereken çeşitli özellikler vardır. Örneğin bir şişe içindeki sıvı seviyesinin belirlenmesi, bir vida da çapların istenen düzeyde olması veya paketleme işleminde her paketteki ürünlerin aynı sayıda olması gibi istenen çeşitli özellikler mevcuttur. Bu adım da bu özellik bilgilerinin elde edilmesi ve işlenmesi amacını taşımaktadır. Özellik çıkarım işlemi genellikle belirli eşik değerlerinin sisteme verilmesi sonucu görüntüde istenen bölgenin ortaya çıkarılmasıdır. Özellik çıkarımına ait bir örnek durum Şekil 4.1’de verilmektedir.



Şekil 4.1. Makine görmesi ölçüm işlemi

Gerçekleştirilen bu işlemlerin hepsi özellik çıkarım bölümünde gerçekleştirilmekte olup temel görüntü işleme algoritmalarının kullanılmasıyla elde edilmektedir. Gürültü azaltma, eşik değeri belirleme, eşik değerini görüntüye uygulama, görüntüyü belirli filtrelerden geçirme gibi işlemler arayüzden kontrol edilmesi istenen özelliklerin seçilmesiyle otomatik bir şekilde gerçekleştirilmekte ve sadece kullanıcının kontrol etmeyi istediği özellikler ortaya çıkarılmaktadır.

Karar Verme ve Sınıflandırma İşlemleri: Kalite kontrol sistemlerinin bu bölümünde özellikleri çıkarılan ürünlerin veri tabanındaki sağlıklı veriler ile karşılaştırılması işlemi gerçekleştirilmektedir. Karşılaştırma işlemi sonucunda ürünün arızalı olup olmadığına karar verilmektedir ve bu durum temel olarak bir sınıflandırma işlemidir. Bu bölümdeki en önemli nokta ürünlerin yüksek bir hassasiyetle tespit edilebilmesidir. Bu tarz kontrol sistemlerinin kararlılığı ve devamı için bu bölümün yüksek doğrulukla gerçekleştirilmesi büyük bir önem arz etmektedir.

Kalite kontrol sistemlerinin hızlı, doğru ve etkili bir şekilde çalışabilmesini sağlayan en önemli bölümlerden biriside bu sistemler için geliştirilen yazılımdır. Genellikle kameraya bağlı olarak geliştirilen bu yazılım sayesinde nesneler üzerinde sayma, ölçüm yapma ve kusur tespiti gibi işlemler gerçekleştirilebilmektedir. Diğer bölümlerde de bahsedildiği üzere tez çerçevesinde bir adet sayısal kamera prototipi geliştirilmiştir. Ayrıca bu süreçte kamera ile entegre çalışabilecek ve ana işlem biriminde yürütülebilecek bir kalite kontrol yazılımı geliştirilmiştir. Bu kalite kontrol yazılımı kendi bünyesinde barındırdığı bazı uygulamalar için makine görmesi ve görüntü tanıma algoritmaları sayesinde ürünler üzerinde meydana gelen kusurları tespit edebilmekte ve buna bağlı olarak hatalı ürünleri yüksek bir doğrulukla banttan ayırıştırabilmektedir.

Bu doktora tezi kapsamında tamamen özgün ve yenilikçi bir yapıya sahip görüntü ve görüntü tanıma algoritmaları geliştirilmiştir. Geliştirilen yüksek performanslı kamera prototipinin gereksinimlerini karşılamayı amaçlayan bu uygulamalar ile gerçek zamanlı olarak kamera sistemiyle haberleşme sağlanabilmektedir. Kameradan anlık olarak alınan yüksek çözünürlük ve frame oranına sahip görüntü kareleri yine anlık olarak ethernet üzerinden ana işlem birimine iletilmekte ve bu noktada gerçekleştirilen görüntü işleme tabanlı uygulamalar sayesinde bant üzerinden geçen ürünlerin kusurlarının tespiti sağlanmaktadır. Bu kapsamda toplam 4 temel uygulama geliştirilmiştir. Bu uygulamalar maddeler halinde aşağıda verildiği gibidir.

- Nesne Sayımı
- Boyut Ölçüm
- Kusur Tespiti
- Çözünürlük Arttırma

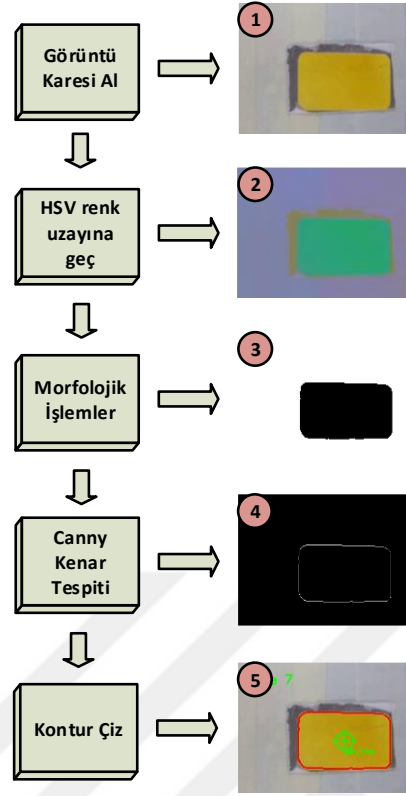
Tez çalışması kapsamında geliştirilen özgün yazılımlar sayesinde hareketli konveyörler üzerinden geçen nesneler başarıyla tespit edilmiş ve bu nesnelere ait detaylı özellikler ortaya çıkarılmıştır. Bu amaçla nesne sayımı konusunda 3 farklı özgün algoritma, çözünürlük arttırma konusunda 2 farklı yeni yaklaşım ve boyut ölçümü ile kusur tespiti konularında 1'er adet yeni görüntü işleme tabanlı uygulamalar geliştirilmiştir. Bu yaklaşımlar ve uygulamalara ait detaylar alt başlıklar halinde ilerleyen bölümlerde sunulmaktadır.

4.1. Nesne Sayma Algoritması

Tez kapsamında özgün olarak geliştirilen 3 farklı nesne sayma yaklaşımı bulunmaktadır. Bu algoritmalara ait detaylar alt bölümler halinde sunulmaktadır.

4.1.1. Nesne Sayma Yaklaşımı-1

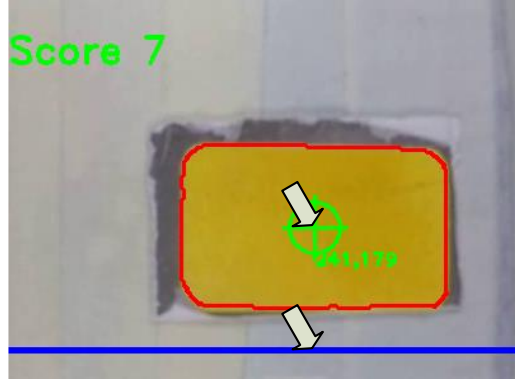
Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen görüntü işleme tabanlı makine görmesi uygulaması ile endüstriyel sistemden alınan bir video üzerinde banttan geçen ürünlerin belirlenmesi ve saydırılması işlemleri yapılmıştır. Gerçekleştirilen bu yaklaşım ile yüksek hızda dönen konveyör üzerinde geçen ürünler belirlenmiş ve bu ürünlerin adet sayısı tam olarak tespit edilmiştir. Gerçekleştirilen uygulama C++ dili ve OpenCV kütüphanesi kullanılarak geliştirilmiştir. Önerilen yaklaşımın en önemli avantajı yüksek hızda çalışan bir sistemden alınan görüntü karelerinin anlık olarak işlenebilmesidir. Endüstriyel üretim hatlarındaki en büyük sıkıntı bu hatların yüksek hızda ve kapasitede çalışmasından ötürü gerçekleştirilecek kalite kontrol uygulamalarının da bu hıza uygun bir şekilde çalışabilmesini sağlamaktır. Önerilen yaklaşım ile bant üzerinden geçen ürünler hızlı bir şekilde saydırılmıştır. Çalışma süresince gerçekleştirilen bu uygulamanın adımlarını özetleyen bir akış diyagramı Şekil 4.2'de verildiği gibidir.



Şekil 4.2. Önerilen nesne sayma yaklaşımı-1

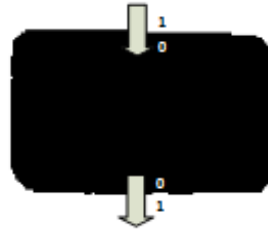
Şekil 4.2’den de görülebileceği üzere sistem ilk olarak bir görüntü karesini RGB formatında almaktadır. Daha sonra bu formattaki görüntü HSV renk uzayına dönüştürülmektedir. Bu dönüştürme işlemi ile görüntüdeki belirli alanlar daha net bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Bu işlemin ardından erozyon ve dilasyon gibi morfolojik işlemler HSV renk uzayına dönüştürülmüş görüntü üzerine uygulanmaktadır. Bu sayede görüntüde istenmeyen ayrıntıların kaldırılması ve başka diğer detaylarında görülebilmesi sağlanmaktadır. Bu işlemin ardından morfolojik işlem uygulanmış görüntünün kenarları Canny kenar tespiti yöntemi kullanılarak tespit edilmektedir. Son olarak kenarları bulunan nesnelerin görüntü üzerinde konturlarının işaretlenmesi işlemi gerçekleştirilmektedir. Yapılan tüm bu işlemler ile görüntü üzerindeki nesne tespit edilebilmektedir. Ayrıca yapılan bu işlemler tüm görüntü kareleri için gerçekleştirilmekte ve video süresi tamamlanana kadar devam ettirilmektedir.

Görüntü işleme tabanlı bu uygulamanın son aşaması ise ürünlerin saydırılması işlemidir. Bu süreçte iki farklı teknik denenmiştir. Yöntemlerin ilkinde ana görüntü üzerine sanal bir çizgi çekilerek geçen ürünlerin saydırılması işlemi gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. Bu işlemi örnekleyen bir blok diyagram Şekil 4.3’de verildiği gibidir.



Şekil 4.3. Sanal çizgi ile sayma işlemi

Şekil 4.3'den de görülebileceği üzere görüntü karesine yerleştirilen sanal çizgi ile ürünün merkez noktasının eşleşip eşleşmediği kontrol edilmektedir. Başka bir deyişle x eksenini boyunca çizilen çizgideki piksel değerleri ile ürünün merkez noktasındaki piksel değeri birbiriyle örtüşürse sayaç değeri bir arttırılmaktadır. Fakat yapılan bu işlemde verimli sonuçlar elde edilememiştir. Bu durumun en önemli sebebi üzerinde çalışılan videonun yüksek görüntü karesi hızına sahip olması ve bant üzerindeki ürünlerin yüksek hızda geçmesidir. Bundan dolayı ürünler geçerken bazı görüntü karelerin de bu ürünler yakalanamamakta veya ürün bant üzerinde yavaş geçerken birden fazla sayma işlemine tabi tutulabilmektedir. Saydırma işlemindeki bu sıkıntının önüne geçebilmek amacıyla görüntüye bir eşik değeri uygulanmıştır. Belirlenen bu eşik değeri ile bant üzerinde geçen ürünlerin olduğu kısım siyah renge diğer kısımlar ise beyaz renge dönüştürülmüştür. Bu işlemin ardından belirlenen bir koordinat noktasında beyazdan siyaha veya siyahtan beyaza geçişler incelenmiş ve bu geçişlere göre saydırma işlemi yapılmıştır. Gerçekleştirilen bu işlemde sayaç değerinin doğru ve tam değeri tespit ettiği görülmüş ve işlemler sonlandırılmıştır. Eşik değeri yöntemine göre saydırma işlemini özetleyen örnek bir görüntü Şekil 4.4'de verildiği gibidir.



Şekil 4.4. Siyah beyaz geçişleri ile sayma işlemi

Şekil 4.4'den de görülebileceği üzere ürünler siyah renk ile işaretlenirken etraftaki kısımlar tamamen gürültüden arındırılmış ve beyaz ile işaretlenmiştir. Yapılan bu işlem ile 1-0 veya 0-1 geçişleri sürekli olarak incelenmekte ve saydırma işlemleri buna göre yapılmaktadır. Önerilen bu yaklaşım ile yüksek hızda üretim kapasitesine sahip bir üretim bandı için görüntü işleme tabanlı kalite kontrol uygulaması geliştirilmiştir. Önerilen metot tamamen açık kaynaklı bir kütüphane olan OpenCV kullanılarak ortaya konulmuş ve yüksek görüntü karesine sahip videodaki tüm resimler işlenmiştir. Kalite kontrol sistemleri üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde bu yazılımların genellikle lisanslı kütüphaneler kullanılarak geliştirildiği görülecektir. Bu anlamda önemli bir çözüm sunan bu yaklaşım ile bant üzerinde geçen ürünlerdeki saydırma işlemi rahatlıkla kontrol edilebilmektedir. Ayrıca uygulamanın modüler olması ürünlerdeki eksikliklerinde tespit edilebilmesine veya sınıflandırılabilmesine olanak sağlayacaktır.

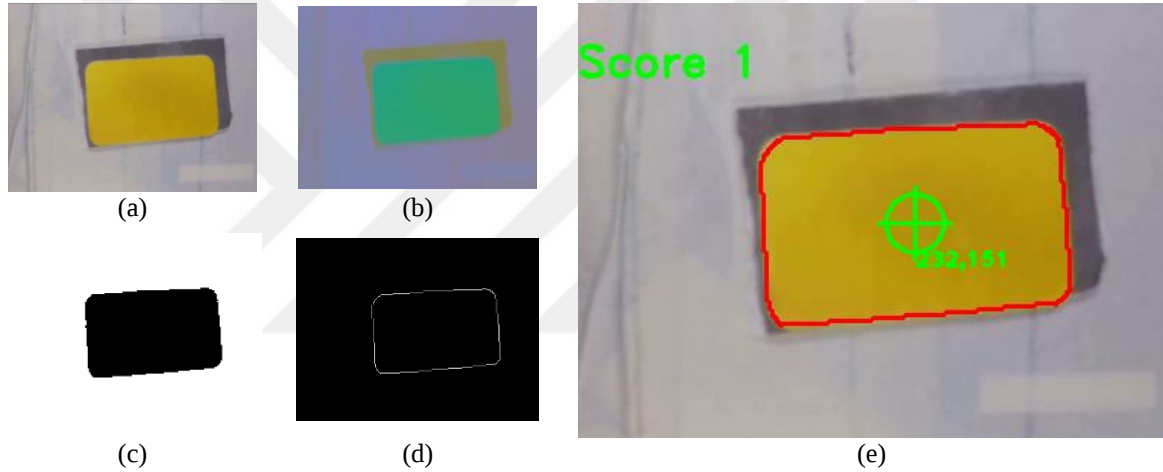
Önerilen bu yaklaşım ile gerçek zamanlı çalışan bir üretim bandındaki ürünlerin saydırılması işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla ortaya konan makine görmesi tabanlı kalite kontrol uygulaması ile bu işlem hızlı ve sorunsuz bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Önerilen yaklaşım gerçek zamanlı endüstriyel bir sistemden alınan video üzerinde test edilmiş ve doğrulanmıştır. Diğer bölümlerde de belirtildiği üzere çalışmalar açık kaynaklı bir görüntü işleme kütüphanesi olan OpenCV ve C++ programlama dili kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Endüstriyel sistemden alınan bu video bir kalite kontrol kamerası aracılığıyla elde edilmiştir. Kalite kontrol sisteminde kullanılan bu kameranın temel özellikleri Tablo 4.1'de verildiği gibidir.

Tablo 4.1. Kalite kontrol sisteminde kullanılan kameranın temel özellikleri

Kamera Özellikleri	
Özellik	Değer
Çözünürlük	1280x720 px
Frame Oranı	59 fps
Shutter Türü	Global
Sensör Türü	CCD
Mono/Color	Color
Arayüz	GigE
Piksel Bit Derinliği	12 bit

Gerçekleştirilen bu çalışmada yapılan testlerde farklı durumlar ile karşılaşılmıştır. Bunlardan ilki bant üzerinden geçen ürünlerin renklerinin farklı olmasıdır. Endüstriyel bir

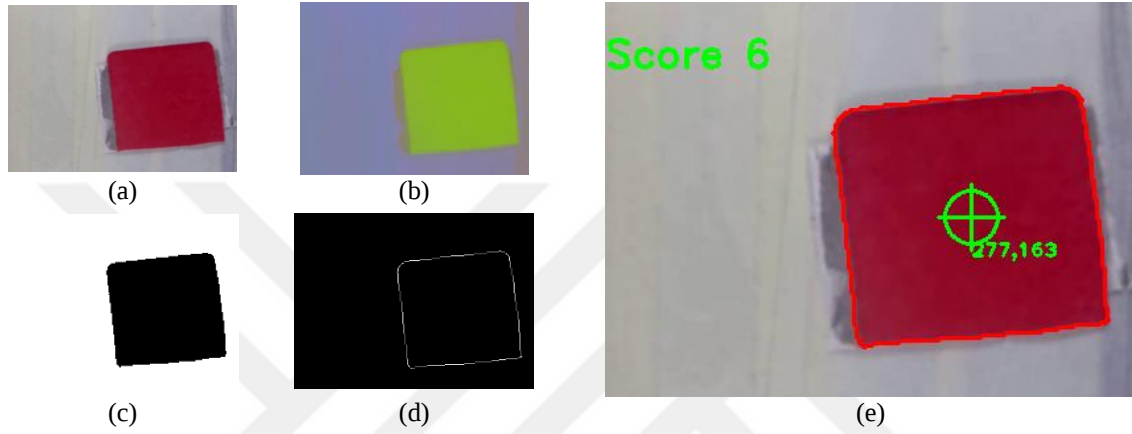
sistemden elde edilen bu görüntülerde temel olarak 2 farklı renk durumu vardır ve bunlar sarı ile kırmızıdır. Ayrıca sistemde kameranın izlediği alanda arka plan tamamen beyaz ile kaplanmıştır. Bu şekilde kontrast değerlerinin oldukça farklı olduğu yapılarda kontrol işlemleri kolaylaşmakta ve daha doğru sonuçlar elde edilebilmektedir. Çalışma süresince karşılaşılan bir diğer durum ise aynı görüntü karesinde iki tane ürünün görünmesidir. Bu durumda ise ya ürünler birbirine çok yakındır ya da üst üste binmiş durumdadır. Yine böylesi durumlarda da sayma işleminin sorunsuz bir şekilde yapılması oldukça önemlidir. Tüm bu durumları örnekleyen deneysel sonuçlar farklı renk durumları için Şekil 4.5 ve 4.6’da verilmiş olup, ayrıca üst üste gelen ürünler için durumlar ise Şekil 4.7’de sunulduğu gibidir.



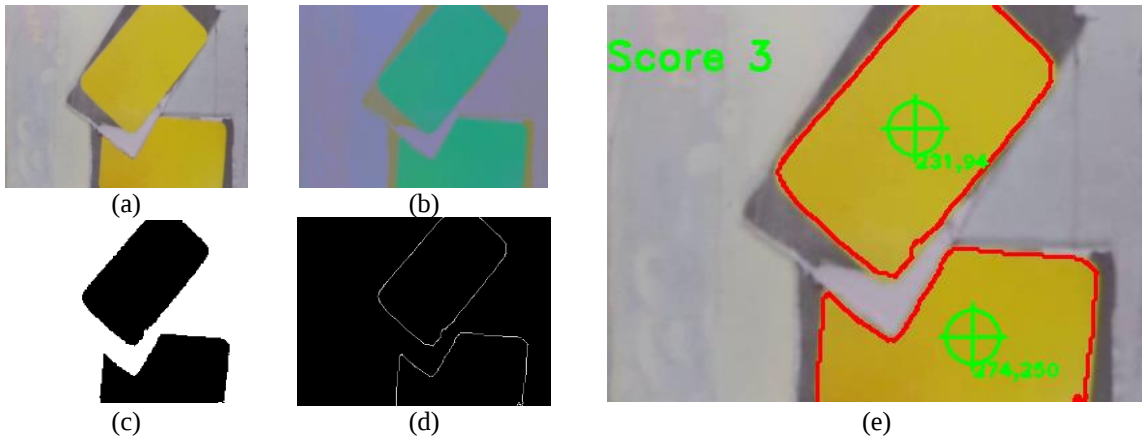
Şekil 4.5. Deneysel çalışmalardan elde edilen örnek bir sonuç (sarı renk) (a) Orijinal görüntü (b) HSV renk uzayı görüntüsü (c) Eşiklenmiş görüntü karesi (d) Canny kenar çıkarımı sonucu (e) Konturları çizilmiş, merkezi işaretlenmiş ve sayma işlemine tabi tutulmuş görüntü karesi

Şekil 4.5’den de görülebileceği üzere uygulama temel olarak 5 adımdan oluşmaktadır. Bunlardan ilki görüntü karesinin hafızaya yüklenmesidir. Bu işlemden sonra HSV renk uzayına geçilerek ayrıntıların belirginleştirilmesi sağlanmaktadır. Daha sonra erozyon ve dilasyon gibi morfolojik işlemlere ek olarak görüntü karesine bir eşik değeri uygulanmaktadır. Bu eşik değeri ile görüntü sadece siyah ve beyaza dönüştürülmektedir. Bu işlemin de ardından Canny kenar çıkarım yöntemi görüntüye uygulanmaktadır. Bu işlem ile ürünün sınırları tespit edilmekte ve merkez noktası hesaplanabilmektedir. Yapılan tüm bu işlemlerin sonunda ise ana görüntü üzerinde Canny yöntemi ile bulunan kenarlar işaretlenmektedir. Bu sayede kullanıcıya anlaşılabilir sonuçlar verilmektedir. Bölüm başında da belirtildiği üzere saydırma işlemi beyaz siyah geçişleri kontrol edilerek

yapılmaktadır. Bu işlemde aynı eksen üzerinde belirlenen birkaç noktada geçiş kontrolleri yapılmaktadır. Bu belirlenen noktaların yeni değeri ve bir önceki değeri her görüntü karesinde tutularak kontrol işlemi gerçekleştirilmektedir. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde genellikle sanal bir çizgi çizilmesiyle yapılan saydırma işlemi, gerçekleştirilen bu çalışmada literatürden farklı olarak siyah-beyaz geçişleri kontrol edilerek yapılmıştır.



Şekil 4.6. Deneysel çalışmalardan elde edilen örnek bir sonuç (kırmızı renk) (a) Orijinal görüntü (b) HSV renk uzayı görüntüsü (c) Eşiklenmiş görüntü karesi (d) Canny kenar çıkarımı sonucu (e) Konturları çizilmiş, merkezi işaretlenmiş ve sayma işlemine tabi tutulmuş görüntü karesi



Şekil 4.7. Deneysel çalışmalardan elde edilen örnek bir sonuç (üst üste binme) (a) Orijinal görüntü (b) HSV renk uzayı görüntüsü (c) Eşiklenmiş görüntü karesi (d) Canny kenar çıkarımı sonucu (e) Konturları çizilmiş, merkezi işaretlenmiş ve sayma işlemine tabi tutulmuş görüntü karesi

Şekil 4.6'dan da görülebileceği üzere çalışma süresince yapılan testlerde iki farklı renk durumu ile karşılaşılmıştır. Bunlar sırasıyla sarı ve kırmızıdır. Yine bu sonuçta da bir öncekinde olduğu gibi aynı işlemler görüntü karesine uygulanmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 4.6-(b) incelenecek olursa, renkli görüntü uzayından HSV renk uzayına

geçiş ile görüntü daha belirgin hale getirilmiştir. Ayrıca bu renk uzayına geçiş ile orijinal görüntü karesinde olumsuzluğa sebep olabilecek tüm gürültüler otomatik olarak elimine edilmiştir. Çalışma süresince karşılaşılan bir diğer durum olan ürünlerin aynı görüntü karesinde geçmesi durumu ise Şekil 4.7’de verildiği gibidir. Ayrıca Şekil 4.7’den de görülebileceği üzere aynı anda iki ürün tek bir görüntü karesinde yer almış durumdadır. Yapılan işlemlerde bu durum için iki adet merkez nokta tespit edildiğinden iki adet ürün geçtiğine dair bilgi elde edilmiştir. Gerçekleştirilen bu çalışmada ürünlerin eksiklikleri, ölçüleri veya şekillerine dair bir uygulama geliştirilmediğinden bu durumlar sayma işleminde dikkate alınmamıştır. Tablo 4.2’de deneysel çalışmalar sonucu elde edilen verilere ait bilgiler detaylı bir şekilde sunulmuştur.

Tablo 4.2. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar

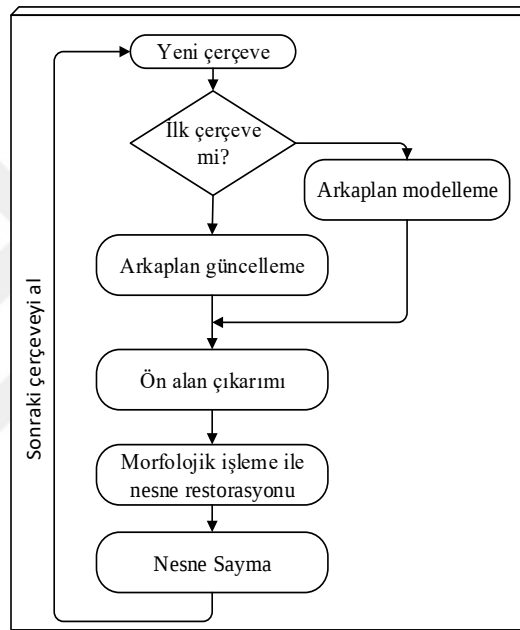
Video ve Ürün Özellikleri	
Özellik	Değer
Video Süresi	54 sn
Video İşleme Süresi	57,2 sn
Süre Farkı	3,2 sn
Saniyedeki Görüntü Karesi Oranı	59 fps
Toplam Görüntü Karesi Sayısı	3186 frame
Toplam İşlenen Görüntü Karesi	3177 frame
Görüntü Karesi Farkı	9 frame
Sarı Renkli Ürün Sayısı	172
Kırmızı Renkli Ürün Sayısı	7
Üst Üste Gelen Ürün Sayısı	3
Toplam Ürün Sayısı	182
Yakalanan Toplam Ürün Sayısı	174
Doğruluk Oranı	%95.6

Tablo 4.2’den de görülebileceği üzere videonun işlenme süresi ile video süresi arasında yaklaşık 3.2 sn fark bulunmaktadır. Bu süreç videonun işlenmeye hazır hale getirilmesinden kaynaklanan bir farktır ve saydırma işleminde çok ufak bir farka sebep olmaktadır. Bu tarz uygulamalarda yapılacak kod optimizasyonu veya paralel işleme teknikleri ile bu problemlerin üstesinden çok rahatlıkla gelinebilmektedir.

Gerçekleştirilen bu yaklaşım ile renk ayrımı yapmaksızın hızlı bir üretim bandı üzerinden geçen ürünlerin saydırılması işlemi gerçekleştirilmiştir. Önerilen bu yöntem ile endüstriyel üretim hattında kullanılan bir kalite kontrol kamerasına yazılım geliştirilmiş olup, bant üzerindeki ürünlerin sorunsuzca sayılması sağlanmıştır.

4.1.2. Nesne Sayma Yaklaşımı-2

Bu aşamada gerçekleştirilen bir çalışmada ise yine bant üzerinde geçen ürünleri saydırmaya yönelik bir uygulama geliştirilmiştir. Farklı bir yöntemin geliştirildiği bu uygulamada yüksek hızda gelen görüntü verisi işlenmiş ve ürünler başarıyla saydırılmıştır. Bu yöntemde arka plan çıkarımı yapılarak nesnelerin saydırılması işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın akışını gösteren bir blok diyagram Şekil 4.8’de sunulduğu gibidir.



Şekil 4.8. Önerilen yaklaşımın akış diyagramı

Önerilen yöntemde, arka plan çıkarımı metodu ile hareket eden nesnelerin tespiti yapılmaktadır. Arka plan çıkarımında ön alan ve arka plan görüntüsü arasındaki fark ile elde edilmektedir. Daha sonra bir eşik değeri uygulanarak görüntü üzerinde hareket eden nesneler tespit edilmektedir. İkili formatta fark imgesi aşağıdaki gibi elde edilmektedir.

$$D(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{eger } |I(x, y) - B(x, y)| > t \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad (4.1)$$

Denklem 4.1’de, x ve y piksel koordinatlarını göstermektedir. Videodan alınan bir görüntü karesi I ve arkaplan görüntüsü B olmak üzere aradaki her bir piksel için bir eşik değeri ile karşılaştırılarak ön alan elde edilmekte ve hareket eden nesneler sayılmaktadır.

Fakat geleneksel eşik tabanlı veya ardışık çerçevelerin farkına dayalı arka plan çıkarım yöntemleri gürültüden ve ani ışık değişimlerinden oldukça etkilenmektedir. Bu yüzden arka plan Gaussian karışım modeliyle modellenerek hareket eden nesneler tespit edilebilmektedir. Gaussian karışım modeli çok modlu bir dağılım için tanımlayıcı olarak kullanılabilir. Gaussian karışım modeli K bileşenden oluşmakta olup modelin olasılık yoğunluk fonksiyonu aşağıdaki gibi tanımlanabilmektedir.

$$P(x) = \sum_{k=1}^K w_k N(x|\mu_k, \sigma^2) \quad (4.2)$$

Denklemden w_k tek bir Gaussian dağılımının ağırlığını göstermektedir. Her aşamada model güncellenerek yoğunluk tekrar tespit edilmektedir. Denklemden μ_k ve σ^2 sırasıyla tahmin edilen ortalama değeri ve varyansı göstermektedir. N değeri ise aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$N(x|\mu_k, \sigma^2) = \frac{1}{(2\pi)^{d/2} |\Sigma|^{1/2}} x e^{-\frac{1}{2}(x-\mu)^T \Sigma^{-1}(x-\mu)} \quad (4.3)$$

Gaussian karışım modeli üretildikten ve parametreler ayarlandıktan sonra görüntünün bütün pikselleri modele verilmektedir. Her piksel için arka plan veya ön plana ait olma olasılıkları hesaplanmakta ve büyük olan değere göre pikselin ait olduğu model belirlenmektedir.

Arka plan çıkarıldıktan sonra tespit edilen nesnelerin bir kısmı gürültü ve ışıktan dolayı arka plana ait olabilmektedir. Aynı şekilde arka planın bazı kısımları nesne olarak görülebilmektedir. Bunları ortadan kaldırmak için morfolojik işlemler olarak genişleme ve erozyon operatörleri uygulanmıştır. İlk olarak görüntü üzerinde erozyon işlemi ile gürültüler giderilmekte daha sonra ise genişleme işlemi ile delikler kapatılmaktadır. Bu çalışmada bant üzerinden geçen nesnelerin sayılması ve tespiti için belli bir bölgede nesne olup olmadığı kontrol edilmiştir. Bu amaçla Şekil 4.9’da verilen algoritma kullanılmıştır.

```

For i=1 to Framesayısı
    Geçerli Frame'den bir bölge belirle(M(x1:x2,y1:y2))
    F1=false, F2=false;
    Seçilen bölgenin yoğunluğunu hesapla (yogunluk)
    Yoğunluğu normalize et(normyogunluk)
    If(normyogunluk>esik) then
        if(i==1) then
            F1=true;
        else
            F1=F2;
            F2=true;
        endif
    else
        if(i==1) then
            F1=False;
        else
            F1=F2;
            F2=False;
        endif
    endif
endfor
if(F1=true && F2=false) then
    nesnesay++
endif

```

Şekil 4.9. Önerilen yaklaşımın sözde kodu

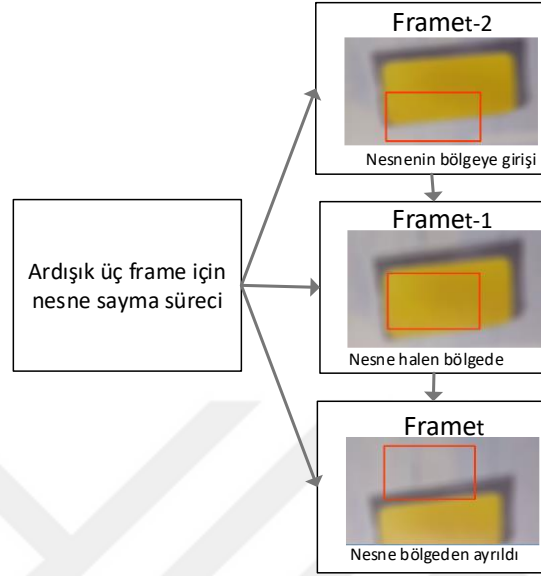
Şekil 4.9'da verilen algorithmada ardışık iki frame üzerinde nesne tespiti yapılmaktadır. Eğer önceki frame'de nesne var ve mevcut frame'de yok ise nesne sayılmaktadır. Tablo 4.3'de ardışık iki frame için nesne tespitinin bütün durumları verilmiştir.

Tablo 4.3. Ardışık iki frame için nesne tespit işleminin olası durumları

Frame _{t-1} (F1)	Frame _t (F2)	Nesne tespiti
False	False	Nesne yok
False	True	Nesnenin bölgeye girişi
True	False	Nesne bölgeden ayrılması
True	True	Nesne halen bölgede

Tablo 4.3'den de görülebileceği üzere eğer F1 ve F2 değerleri false ise son iki frame'de nesne gelmediğinden sayma işlemi yapılmayacaktır. Eğer önceki frame'de bir nesne yok ve mevcut frame'de nesne var ise yeni bir nesne alana giriş yapmıştır. Önceki frame'de nesne var ve mevcut frame'de yok ise nesne bölgeden ayrıldığından sayma işlemi yapılacaktır. İki

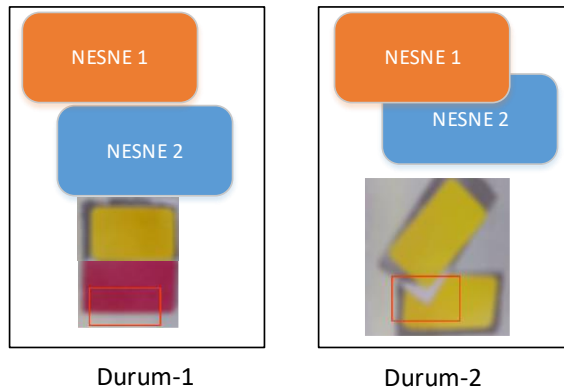
ardışık frame’de de bölgede nesne var ise sayma yapılmayacaktır. Şekil 4.10’da önerilen yöntemin bir örnek üzerinde gösterimi verilmiştir.



Şekil 4.10. Sistemin çalışma durumuna ait bir görüntü

Şekil 4.10’da üç ardışık frame için nesnelerin belirlenen bölgeye girişi, bölgede kalması ve çıkışları gösterilmiştir. Sayma işlemi ardışık iki frame’e göre yapılmaktadır. Şekil 4.10’dan da görüldüğü gibi eğer nesne önceki frame’de bölgenin içinde ve mevcut frame’de bölgeden ayrılmış ise sayma işlemi yapılacaktır.

Eğer nesneler birbirine çok yakın ise veya bir nesnenin bir kısmı diğer nesne üzerinde olması durumunda örtüşme olacağından yanlış sayma işlemi oluşabilir. Bu iki durum Şekil 4.11’de gösterilmiştir.



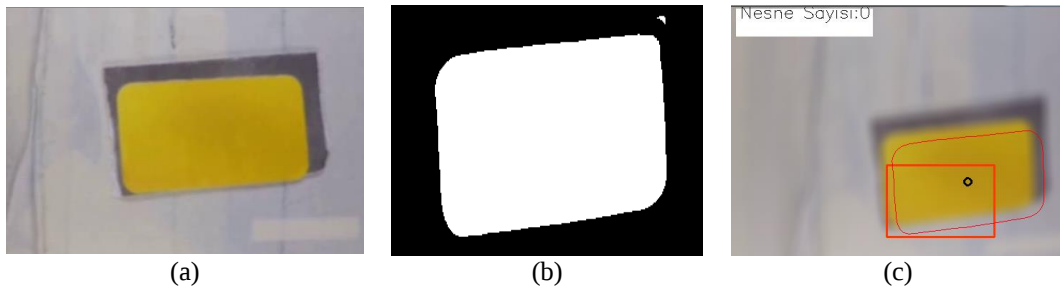
Şekil 4.11. İki nesnenin örtüşmesi durumu

Şekil 4.11'deki iki durumdan biri olduğu anda nesneleri farklı olarak tespit etmek için her bir nesnenin kontur grafi elde edilmektedir. Daha sonra konveks hull yaklaşımı metodu ile iki nesne birleştirilmektedir. Her bir nesnenin oranı ile birleştirilmiş nesnelerin alanları arasındaki oran bir eşik değeri ile karşılaştırılarak çift nesne olup olmadığı tespit edilmektedir.

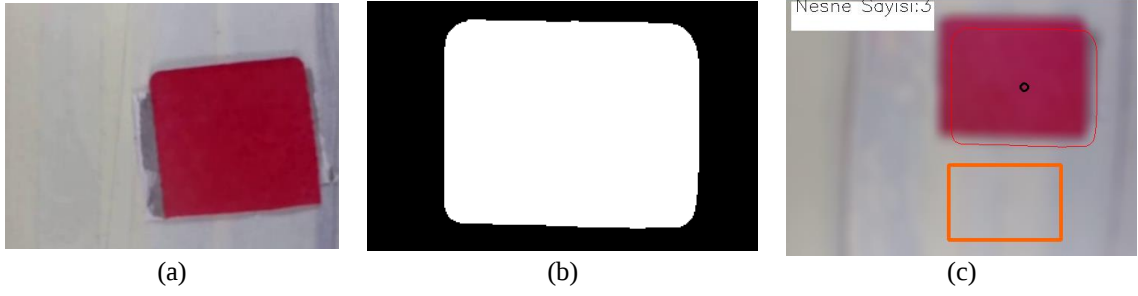
Önerilen bu yaklaşım ile gerçek zamanlı çalışan bir üretim bandındaki ürünlerin saydırılması işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla ortaya konan bilgisayar görmesi tabanlı kalite kontrol uygulaması ile bu işlem hızlı ve sorunsuz bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Önerilen yaklaşımın doğrulaması gerçek zamanlı endüstriyel bir sistemden alınan video üzerinde yapılmıştır. Diğer bölümlerde de belirtildiği üzere çalışmalar açık kaynaklı bir görüntü işleme kütüphanesi olan OpenCV ve C++ programlama dili kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Endüstriyel sistemden alınan bu video bir kalite kontrol kamerası aracılığıyla elde edilmiştir. Kalite kontrol sisteminde kullanılan bu kameranın temel özellikleri Tablo 4.4'de verildiği gibidir. Çalışma kapsamında karşılaşılan tüm durumları örnekleyen deneysel sonuçlar farklı renk durumları için Şekil 4.12, 4.13 ve 4.14'de verilmiştir.

Tablo 4.4. Kalite kontrol sisteminde kullanılan kameranın temel özellikleri

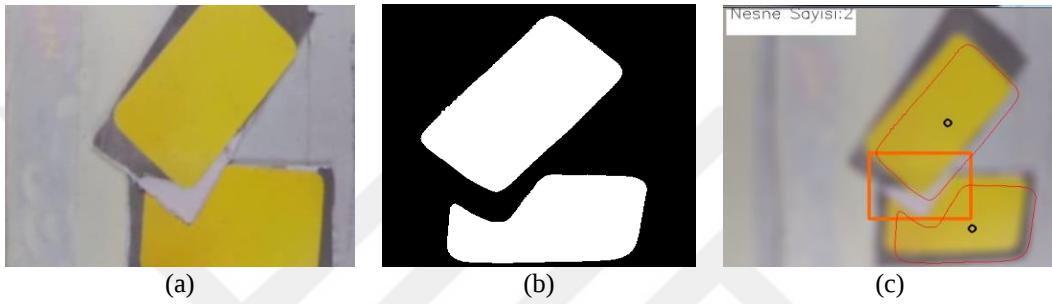
Kamera Özellikleri	
Özellik	Değer
Çözünürlük	1280x720 px
Frame Oranı	59 fps
Shutter Türü	Global
Sensör Türü	CCD
Mono/Color	Color
Arayüz	GigE
Piksel Bit Derinliği	12 bit



Şekil 4.12. Deneysel çalışmalardan elde edilen örnek bir sonuç (a) Orijinal görüntü (b) Arkaplanı çıkarılmış görüntü (c) Konturları çizilmiş, merkezi işaretlenmiş ve sayma işlemine tabi tutulmuş görüntü karesi

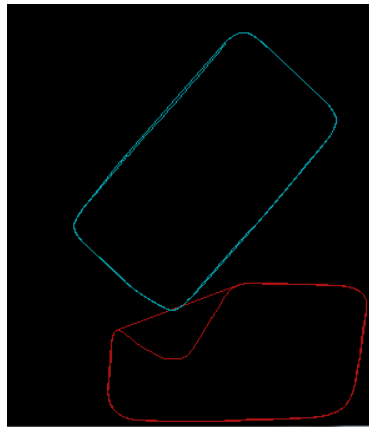


Şekil 4.13. Deneysel çalışmalardan elde edilen örnek bir sonuç (a) Orijinal görüntü (b) Arkaplanı çıkarılmış görüntü (c) Konturları çizilmiş, merkezi işaretlenmiş ve sayma işlemine tabi tutulmuş görüntü karesi



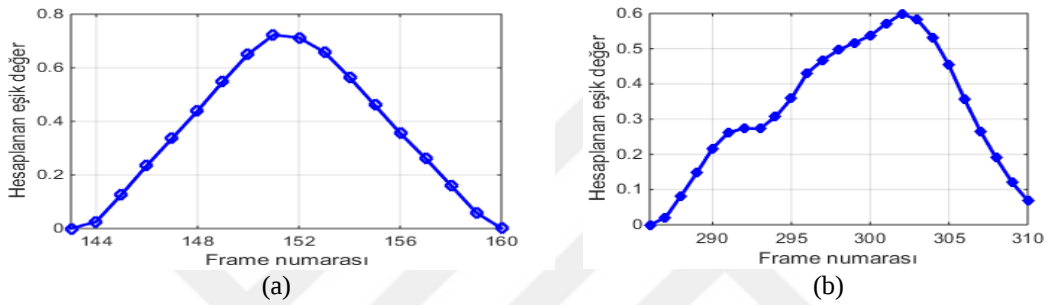
Şekil 4.14. Deneysel çalışmalardan elde edilen örnek bir sonuç (a) Orijinal görüntü (b) Arkaplanı çıkarılmış görüntü (c) Konturları çizilmiş, merkezi işaretlenmiş ve sayma işlemine tabi tutulmuş görüntü karesi

Şekil 4.14'den de görülebileceği üzere aynı anda iki ürün tek bir görüntü karesinde yer almış durumdadır. Gerçekleştirilen bu çalışmada birbirine yakın gelen ürünlerin sayılması için konveks hull yaklaşımı kullanılmıştır. Bu yöntemle göre birbirine yakın olan nesneler tek bir bölütlenmiş nesneye dönüştürülmekte ve bunların alanına göre ve nesnenin belirlenen bölgede ne kadar süre kaldığına göre çoklu nesneler tespit edilmektedir. Şekil 4.15'de konveks hull ile iki nesnenin birleştirilmiş şekli verilmiştir.



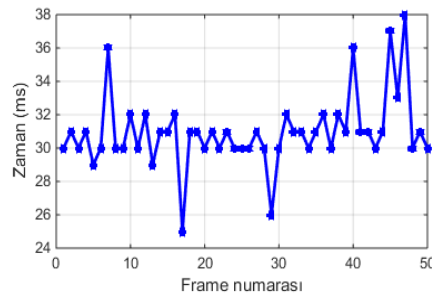
Şekil 4.15. Yakın şekillerin birleştirilmesi

Nesnelerin doğru bir şekilde sayılabilmesi için daha önce bahsedilen bir eşik değeri kullanılmıştır. Bu çalışmada eşik değeri 0.3 olarak seçilmiştir. Seçilen bölgedeki normalize edilmiş yoğunluk 0.3 değerinden yüksek ise ilgili bölgede bir nesne olduğu varsayılmaktadır. Bir nesne belirlenen bölgeye girdiğinde eşik değeri artmakta ve bölgenin bütün piksellerinde nesne var ise yoğunluk değeri 1 olmaktadır. Fakat her zaman nesne tam bölgenin içinden geçemeyebilmekte veya arka plan çıkarımında elde edilen nesnelerde gürültüler olabilmektedir. Şekil 4.16'da iki farklı nesnenin belirlenen bölgeden geçmesi durumunda hesaplanan yoğunluk değeri verilmiştir.



Şekil 4.16. İki farklı durum için belirlenen bölgedeki yoğunluk değişimi (a) Gürültüsüz nesne (b) Gürültülü nesne

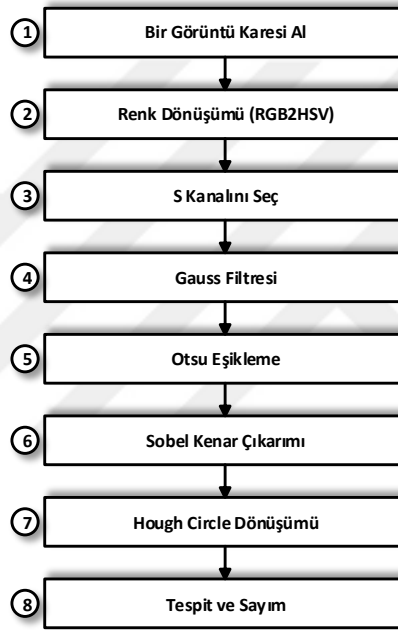
Şekil 4.16-(a)'da belirli sayıda frame için belirlenen bölgeye nesnenin girişi ile çıkışı arasında ilgili bölgenin normalize edilmiş yoğunluk değişimi düzgün bir dağılım göstermektedir. Eşik değeri 0.3 alındığından 11 frame boyunca nesnenin bu alandan geçtiği görülmektedir. Şekil 4.16-(b)'de ise gürültüye sahip olan bir nesnenin belirlenen bölgeden geçmesi ile oluşan yoğunluk değişimi grafiği verilmiştir. Elde edilen grafikte belirli noktalarda düzensiz artışlar olduğu gözlemlenmiştir. Burada temel iki sebep olabilir. Birincisi seçilen nesnenin sadece bir kısmının seçilen dikdörtgenden geçmesi ikincisi ise arka plan çıkarımı sonucu nesne üzerinde oluşan gürültülerdir. Şekil 4.17'de ise video için 50 frame boyunca her bir frame'in işleme zamanı verilmiştir.



Şekil 4.17. Her bir frame'in işleme zamanı

4.1.3. Nesne Sayma Yaklaşımı-3

Nesne sayma konusu üzerine gerçekleştirilen bir diğer çalışmada ise paketlenmiş ürünlerin tespiti ve saydırılması işlemi gerçekleştirilmiştir. Nesne türü ve renginden bağımsız olarak çalışan bu yaklaşımda yumurta ve soda şişesi paketleri incelenmiş olup, nesneler anlık olarak tespit edilmiş ve saydırılmıştır. Temel olarak Otsu eşikleme yöntemi ve hough dönüşümünün kullanıldığı bu çalışmaya ait bir akış diyagramı Şekil 4.18’de sunulduğu gibidir.



Şekil 4.18. Önerilen yöntemin blok diyagramı

Bilindiği üzere makine görmesi uygulamalarında sıklıkla karşılaşılan bir işlem olan nesne sayma işlemi birçok endüstriyel alanda kullanılmaktadır. Yüksek hızda çalışan konveyörler üzerindeki nesnelerin tespiti ve bu nesnelerin yüksek hassasiyet ile sayımı oldukça önemli bir konudur. Gerçekleştirilen bu çalışma ile yumurta ve soda şişesi paketlerindeki nesnelerin saydırılması işlemi gerçekleştirilmiştir. Önerilen yaklaşım gerçek zamanlı olarak çalışmakla beraber nesne türünden bağımsız olarak hesaplama yapabilmektedir. Bu çalışmada kullanılan örnek görüntüler Şekil 4.19’da verildiği gibidir.



Şekil 4.19. Örnek görüntüler a) Soda şişesi paketi b) Yumurta paketi

Çalışma temel olarak bir kamera aracılığıyla alınan ve konveyör üzerinden geçen ürünlerin görüntülenmesi, tespiti ve sayılması işlemlerini içermektedir. Çalışmada önerilen yaklaşım ilk olarak bir kamera yoluyla nesnenin görüntüsünü almaktadır. Daha sonra bu görüntü RGB renk uzayından HSV renk uzayına dönüştürülmektedir. Bu dönüşümün amacı, görüntüdeki detayları daha net bir şekilde ortaya çıkarabilmek ve ışık koşullarından ötürü meydana gelen gürültüleri elimine etmektir. Bu amaçla yapılan dönüşümde HSV renk uzayından sadece S kanalı dikkate alınmakta ve işlemlerde aktif olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemde de kullanılan ve RGB renk uzayından HSV renk uzayına dönüşüm işlemini gösteren bir eşitlik denklem 4.4’de verildiği gibidir. Ayrıca verilen bu hesaplamadan S kanalının elde edilmesi de yine aynı denklemde sunulmaktadır. Ayrıca Otsu eşikleme ve hough dönüşümleri yine bu çalışmada kullanılmaktadır. Çalışmada kullanılan görüntüler gerçek zamanlı işlem yapabilen bir sistemden temin edilmiştir. Üstten konveyörü izleyen bir kamera sisteme entegre edilmiş ve ürünlerin görüntüleri anlık olarak bu sistemden alınmıştır.

$$\begin{aligned}
 MAX &= \max\{R, G, B\} \\
 MIN &= \min\{R, G, B\} \\
 S &= \begin{cases} 0, & \text{if } MAX = 0 \\ 1 - \frac{MIN}{MAX}, & \text{else} \end{cases}
 \end{aligned} \tag{4.4}$$

Görüntü de S kanalının elde edilmesinin ardından, bir gürültü azaltma tekniği olan Gauss filtresi S kanalı görüntüye uygulanmaktadır. Görüntüdeki gürültüleri elimine edebilmek amacıyla kullanılan bu filtrenin genel matematiksel ifadesi denklem 4.5’de sunulduğu gibidir.

$$G(r) = \frac{1}{(2\pi\sigma^2)^{N/2}} e^{-r^2/2\sigma^2} \quad (4.5)$$

Görüntüde gürültü azaltma işleminin ardından Otsu eşikleme yöntemi ile görüntüdeki eşik değerler belirlenmektedir. Literatürde bu işlem için kullanılan teknikler genellikle iki seviyeli Otsu eşikleme yöntemini kullanmaktadır. Fakat bu çalışmada kullanılan yöntemde üç seviyeli Otsu eşikleme metodu geliştirilmiş ve uygulanmıştır. Gerçekleştirilen bu yaklaşım ile adaptif olarak 3 farklı eşik seviyesi belirlenmiş olup, gauss filtresinden geçirilen görüntü 4 farklı renk aralığına bölünmüştür. Bu işlemdeki temel amaç görüntüyü belirli renk aralıklarına örnekleyerek görüntüdeki detayları daha net bir şekilde belirleyebilmektir. Önerilen yaklaşımın bir sonraki aşamasında ise eşiklenmiş görüntüye kenar çıkarım işlemi uygulanmıştır. Gerçekleştirilen bu işlemde sobel kenar çıkarım algoritması tercih edilmiş ve görüntünün kenarları belirlenmiştir. Bu kenar çıkarım yönteminin tercih edilmesinin temel sebebi uygulanabilirliğinin son derece kolay olmasıdır. Temel olarak G_x ve G_y olarak adlandırılan iki konvülasyon matrisi görüntü verisinin üzerinde gezdirilmekte ve görüntünün kenarları ortaya çıkarılmaktadır. Bu konvülasyon matrislerinin detayları denklem 4.6’da sunulduğu gibidir.

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, G_y = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Önerilen yaklaşımın son adımında ise hough dönüşümü kullanılmaktadır. Bu yöntem ise temel olarak kenarların geometrik şekillerinin oranları ile çalışmaktadır. Kenarları çıkarılmış görüntüye bu yöntemin uygulanması ile görüntüdeki geometrik nesneler net bir şekilde tespit edilebilmektedir. Çalışmada kullanılan bu yönteme ait bir sözde kod Şekil 4.20’de verildiği gibidir.

```

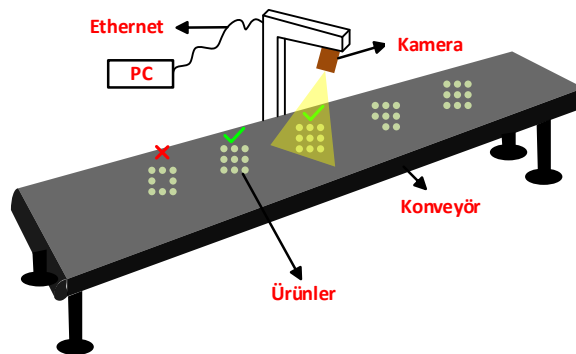
For each pixel (x,y)
  For each radius r=10 to r=60
    For each theta t=0 to 360
      a=x - r * cos(t * PI/180);
      b=y - r * sin(t * PI/180);
      A[a, b, r] += 1;
    end
  end
end

```

Şekil 4.20. Hough dönüşümü sözde kodu

Hough dönüşümünün sonucunda temel olarak belirlenen geometrik şekiller ve bu şekillerin merkezleri işaretlenmektedir. Bu sebepten herhangi bir ekstra işleme gerek kalmadan başka bir deyişle nesnelerin sınırlarını tespit etme ve işaretleme gibi metotlara gerek kalmadan tespit ve işaretleme işlemi gerçekleştirilebilmektedir. Ayrıca özellikle zamansal açıdan düşünüldüğünde algoritma herhangi bir ekstra hesaplama işlemi yapmamakta ve zaman açısından algoritmanın performansına katkı sağlanmaktadır.

Bölüm başında da belirtildiği üzere bu çalışmada elde edilen veriler gerçek zamanlı çalışan bir deneysel düzeneden elde edilmiştir. Bu amaçla konveyörü sürekli olarak izleyen bir kamera sisteme entegre edilmiş ve anlık olarak sistemden görüntüler alınması sağlanmıştır. Çalışma kapsamında kullanılan kamera saniyede 60 frame alabilmektedir. Kameradan elde edilen görüntüler yine anlık olarak ethernet portu aracılığıyla ana makineye iletilmektedir. Sistemin bilgisayar tarafında ise çalışma kapsamında geliştirilen ve uygulamaya konulan otomatik nesne tespit ve saydırma algoritması çalışmaktadır. Çalışmada kullanılan bu deneysel düzeneği özetleyen bir blok diyagram Şekil 4.21’de verildiği gibidir. Ayrıca yine bu çalışmada kullanılan kameraya ait detaylı özellikler Tablo 4.5’de sunulduğu gibidir.

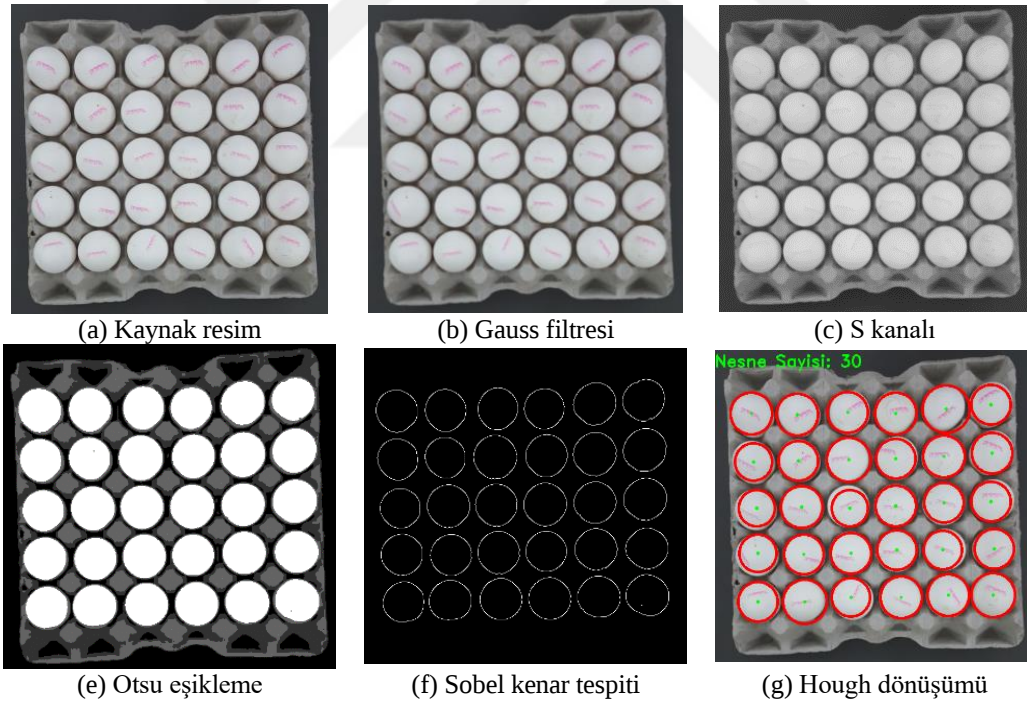


Şekil 4.21. Deneysel düzeneğe ait bir blok diyagram

Tablo 4.5. Kullanılan kamera özellikleri

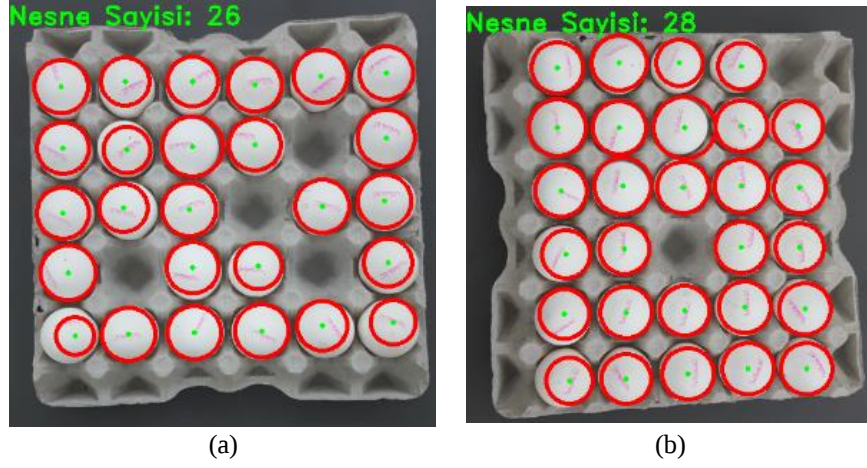
Kamera Özellikleri	
Özellik	Değer
Çözünürlük	1280x720 px
Frame Oranı	59 fps
Shutter Türü	Global
Sensör Türü	CCD
Arayüz	GigE
Piksel Bit Derinliği	12 bit
Mono/Color	Color

Bölüm başında da sunulduğu üzere çalışmada gerçekleştirilen deneysel testler iki farklı ürün grubu için uygulanmıştır. Bu ürün grupları sırasıyla yumurta ve soda şişesi paketleridir. Gerçekleştirilen tüm prosedürler her iki ürün grubu için de uygulanmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Bu amaçla yumurta paketleri üzerinde gerçekleştirilerek elde edilen örnek görüntü işleme sonuçları Şekil 4.22’de verildiği gibidir.



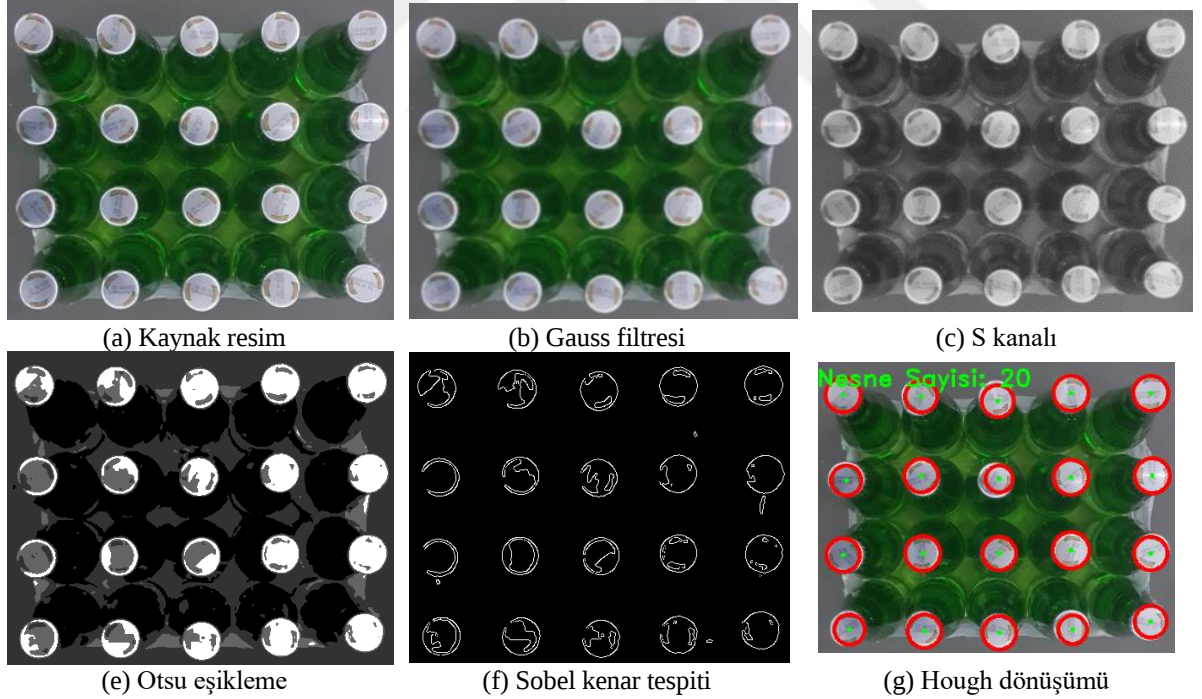
Şekil 4.22. Önerilen otomatik nesne sayma yöntemi

Şekil 4.22’den de görülebileceği üzere önerilen yaklaşım temel olarak 8 adımdan meydana gelmektedir. Önerilen yaklaşım farklı koşullar altında test edilmiş ve başarılı sonuçlar sağlanmıştır. Bu testlerden elde edilen örnek sonuçlar Şekil 4.23’de verildiği gibidir.



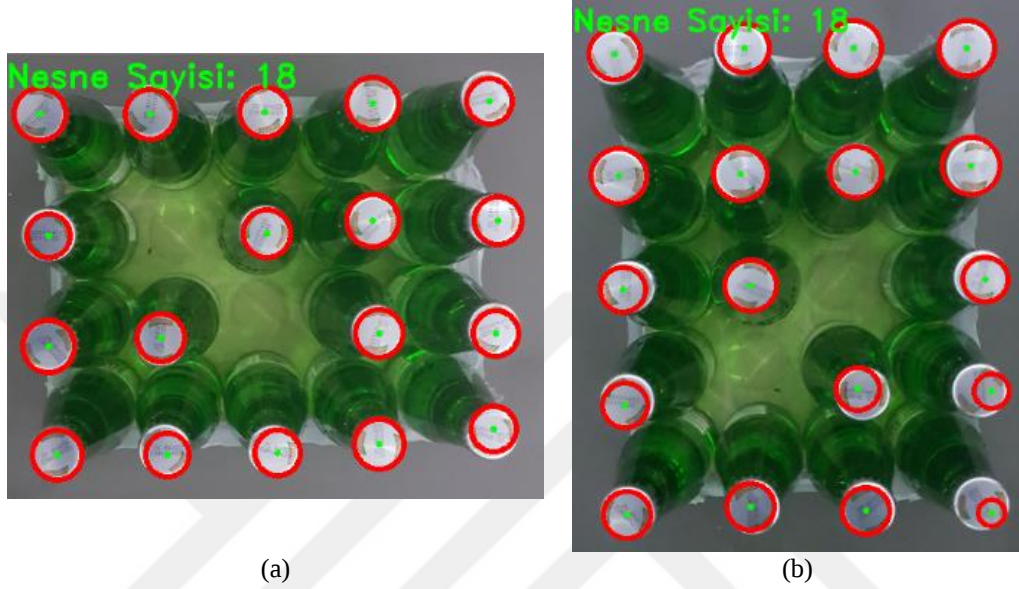
Şekil 4.23. Yumurta paketleri için örnek test sonuçları

Çalışma kapsamında kullanılan ürünlerden bir diğeri ise soda şişesi paketleridir. Görüntü işleme uygulamasının tüm adımları bu ürün grubu içinde uygulanmış ve iyi sonuçlar elde edilmiştir. Bu ürün grubu için gerçekleştirilen görüntü işleme algoritması sonuçları Şekil 4.24’de verildiği gibidir.



Şekil 4.24. Soda şişesi paketleri için örnek görüntü işleme sonuçları

Şekil 4.24'den de görülebileceği üzere yumurta paketleri için gerçekleştirilen işlemlerin aynısı bu ürün grubu içinde gerçekleştirilmiş ve iyi sonuçlar elde edilmiştir. Aynı şekilde bu ürün grubu için de test işlemleri olabildiğince farklı koşullar için gerçekleştirilmiş olup, elde edilen test sonuçları Şekil 4.25'de sunulmuştur.



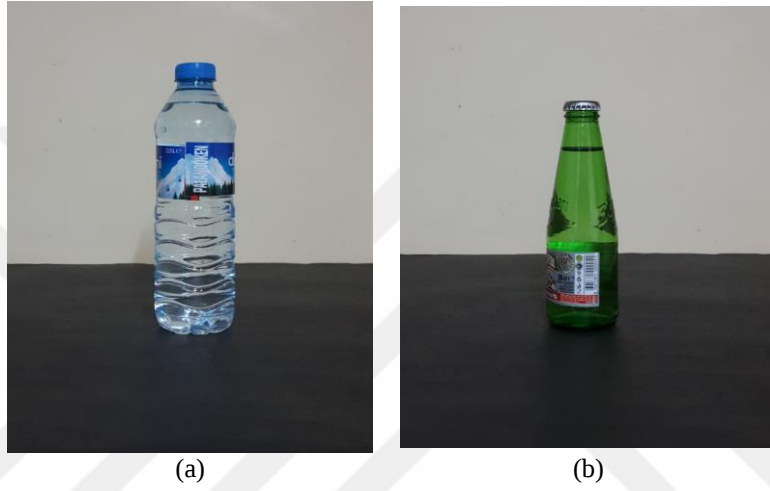
Şekil 4.25. Soda şişesi paketleri için örnek test sonuçları

Önerilen bu yaklaşımda makine görmesi uygulamalarında oldukça sık bir kullanım alanına sahip olan nesne saydırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde gerçekleştirilen yöntemlerin genellikle belirli bir ürün grubuna yönelik olduğu görülmüştür. Fakat önerilen bu yaklaşım ile bu durumların tamamının üstesinden gelinmiş ve tek bir algoritma ile farklı ürün gruplarının saydırılması işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla Otsu eşikleme ve hough dönüşümü yöntemleri kullanılmıştır. Bir konveyörden gerçek zamanlı olarak alınan görüntüler çalışmada geliştirilen makine görmesi uygulaması ile test edilmiş ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Yine bu noktada yapılan literatür araştırmalarına göre, önerilen yöntem oldukça doğru, hızlı ve yüksek hassasiyet ile tespit işlemi yapabilmektedir.

4.2. Boyut Ölçme Algoritması

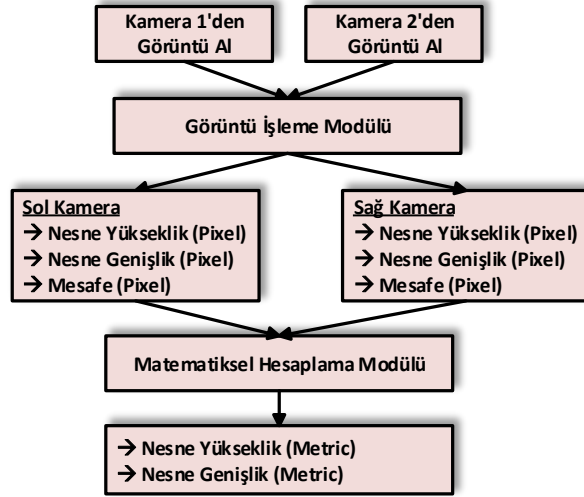
Nesnelerin boyutlarını ölçme ve kontrol etme işlemi makine görmesi sistemlerinde sürekli olarak kullanılmaktadır. Konveyör üzerinden geçen ürünlerin kusursuz veya

kusursuza yakın bir şekilde elde edilebilmesinin en önemli koşullarından birisi de ölçüm işleminin yüksek hassasiyet ile gerçekleştirilebilmesidir. Bu çalışmada önerilen yaklaşım ile makine görmesi sistemleri için yeni bir temassız ölçüm yöntemi geliştirilmiştir. Önerilen yaklaşım kamera, lens ve ürün türünden bağımsız olarak, gerçek zamanlı çalışabilmektedir. Gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda su ve soda şişelerinin boyutlarının ölçümü işlemi yapılmıştır. Çalışmada kullanılan bu nesnelere ait örnek görüntüler Şekil 4.26'da verildiği gibidir.



Şekil 4.26. Çalışmada kullanılan örnek nesneler

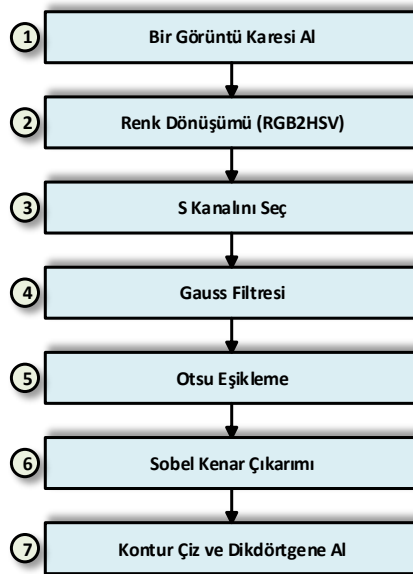
Bu çalışmada önerilen makine görmesi yaklaşımı temel olarak iki modülden oluşmaktadır. Bunlar sırasıyla görüntü işleme ve matematiksel hesaplama modülüdür. Görüntü işleme modülünde konveyör üzerinden geçen nesnelerin sınırları görüntü işleme algoritmaları ile tespit edilmektedir. Matematiksel hesaplama modülünde ise iki kameradan alınan görüntüler kullanılarak, konveyör üzerinden geçen ürünün boyutları metrik sistemde hesaplanmaktadır. Makine görmesi tabanlı önerilen bu ölçüm yaklaşımını özetleyen bir blok diyagram Şekil 4.27'de sunulmaktadır. Ayrıca önerilen yaklaşımın ortaya çıkmasında kullanılan alt modüller ve detayları alt bölümler de sunulmaktadır.



Şekil 4.27. Önerilen hesaplama yaklaşımı

4.2.1. Görüntü İşleme Modülü

Önerilen yaklaşımın bu bölümünde konveyör üzerinden geçen ürünleri tespit edebilmek için bir dizi görüntü işleme algoritması kullanılmıştır. Çalışmada karşılıklı olarak yerleştirilmiş, iki adet özdeş kamera kullanılmaktadır. Ürün konveyör üzerinden geçerken, bu iki kamera aynı anda ürünlerin görüntüsünü almakta ve görüntü işleme modülüne iletmektedir. Bu modülde kullanılan algoritmaların akışını gösteren bir blok diyagram ise Şekil 4.28’de verildiği gibidir.



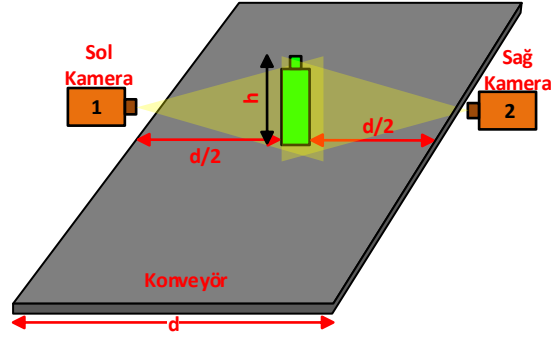
Şekil 4.28. Önerilen otomatik ölçüm yaklaşımı

Şekil 4.28'den de görülebileceği üzere bu modülün ilk adımı görüntülerin alınmasıdır. Görüntüdeki detayları ortaya çıkarabilmek için öncelikli olarak görüntü üzerinde renk uzayı dönüşümü yapılmaktadır. Bu işlemin ardından, görüntüdeki gürültüleri kaldırabilmek için bir gauss filtresi görüntüye uygulanmaktadır. Görüntüde gürültü azaltma işleminin ardından, Otsu eşikleme yöntemi kullanılmaktadır. Otsu eşikleme yönteminin temel amacı görüntüyü birden fazla eşik değeri aralığına bölmektir. Çalışmada 3 seviyeli Otsu yöntemi kullanılmıştır. Bu sayede 3 farklı eşik değeri bulunmuş olup, görüntünün 4 adet renk aralığına bölünmesi sağlanmıştır. Önerilen yaklaşımın bir sonraki aşamasında Sobel kenar çıkarım yöntemi kullanılmıştır. Uygulanması oldukça kolay olan bu teknik ile deneysel çalışmalarda kullanılan nesnelerin sınırları belirlenmektedir.

Uygulamanın son bölümünde ise kenarları çıkarılmış görüntünün sınırları belirlenmekte ve görüntülerdeki nesneler çerçeve içerisine alınmaktadır. Bu işlemin amacı matematiksel hesaplama modülünde, gerekli hesaplamaları daha kolay ve hızlı bir şekilde gerçekleştirebilmektir. Bu modülde iki kameradan aynı anda alınan görüntüler işlenmekte ve elde edilen bilgiler matematiksel hesaplama modülüne aktarılmaktadır. Bu elde edilen bilgiler ise sırasıyla, nesnenin sol kameraya piksel cinsinden uzaklığı, sağ kameraya piksel cinsinden uzaklığı ve çerçeve içerisine alınan görüntünün çerçeve büyüklüğüdür.

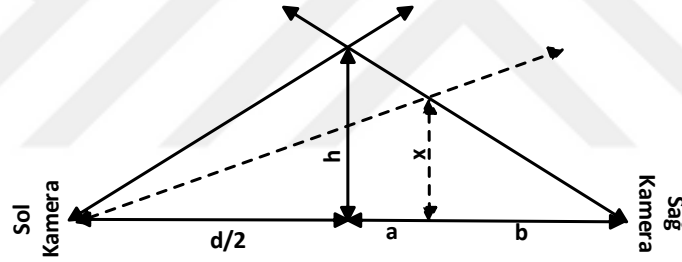
4.2.2. Matematiksel Hesaplama Modülü

Çalışmanın bu bölümünde görüntü işleme modülünden elde edilen bilgiler kullanılarak konveyör üzerinden geçen ürünlerin boyutları metrik cinsinden hesaplanmaktadır. Önerilen yaklaşımın ilk aşamasında konveyörün orta noktasına ölçülecek nesne yerleştirilmektedir. Daha sonra iki kameradan alınan görüntüler işlenmekte ve nesnenin kameralara olan uzaklığı görüntü işleme uygulaması ile piksel cinsinden hesaplanmaktadır. Ayrıca nesnenin her iki kameraya olan uzaklığı, nesnenin genişliği ve yüksekliği metrik birimde belirlenmektedir. Çalışmanın ilk aşamasını oluşturan bu adıma ait bir blok diyagram Şekil 4.29'da sunulmaktadır.



Şekil 4.29. Önerilen yaklaşımın ilk hesaplamaları

Makine görmesi sistemlerinde kullanılan konveyörlerin genişlikleri değişiklik gösterebilmektedir. Buna bağlı olarak bant üzerinden geçen nesnenin konumu kameralardan herhangi birine daha yakın olabilmekte ve bu nedenle hesaplamalarda dikkat edilmesi gereken noktalar ortaya çıkmaktadır. Fakat Bu duruma örnek teşkil eden bir görüntü Şekil 4.30’da verilmektedir.



Şekil 4.30. Ölçüm işlemi için matematiksel hesaplama

Şekil 4.30’dan da görülebileceği üzere konveyör üzerindeki nesne sol kameraya daha yakın bir pozisyonda yer almaktadır. Böylesi bir durumda her iki kameradan gelen görüntüye doğrudan piksel kıyaslaması yapılarak ölçüm gerçekleştirilmesi yanlışlıklara sebebiyet verecektir. Önerilen yaklaşımda bu tür hataların üstesinden gelinmesi için kullanılan denklemler sırasıyla denklem 4.7’de verildiği gibidir.

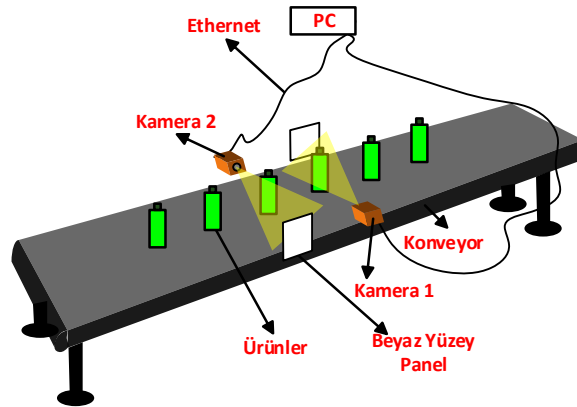
$$\begin{aligned}
 d_{konveyor} &= d_{solkamera} + d_{sagkamera} \\
 a &= d_{solkamera} - d/2, b = d_{sagkamera} \\
 x &= \frac{h * b}{a + b} \\
 a + b &= \frac{d}{2}
 \end{aligned} \tag{4.7}$$

Denklem 4.7’den de görülebileceği üzere yapılan hesaplamalar oransal olarak gerçekleştirilmektedir. Başka bir deyişle nesne yakın olduğu kamerada olduğundan daha büyük görünecek, ters yöndeki kamerada ise daha küçük görünecektir. Fakat verilen denklemler kullanılarak bu durumun üstesinden gelinmekte ve yüksek hassasiyetli ölçüm işlemi gerçekleştirilmektedir. Tüm hesaplamalar gerçekleştirildikten sonra ürüne ait elde edilen yükseklik ve genişlik değerleri milimetre (mm) cinsinden kullanıcıya sunulmaktadır.

Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar gerçek bir deney düzeneğinden elde edilmiştir. Bu çalışmada iki adet anlık görüntü alabilen ve konveyörü izleyen özdeş kameralar kullanılmıştır. Kameralar saniyede 60 görüntü karesi alabilmektedir. Bu sayede yüksek hızda görüntü işleme yapılabilmektedir. Önerilen yaklaşımda 2 kameradan anlık olarak alınan görüntüler Ethernet portu üzerinden ana makineye gönderilmektedir. Ana makine üzerinde ise OpenCV tabanlı görüntü işleme uygulaması çalıştırılmaktadır. GigE tabanlı çalışan bu kameralar ve sistemde kullanılan bilgisayara ait detaylı özellikler Tablo 4.6’da sunulmaktadır. Ayrıca çalışmada kullanılan deneysel düzeneği özetleyen bir blok diyagram Şekil 4.31’de verildiği gibidir.

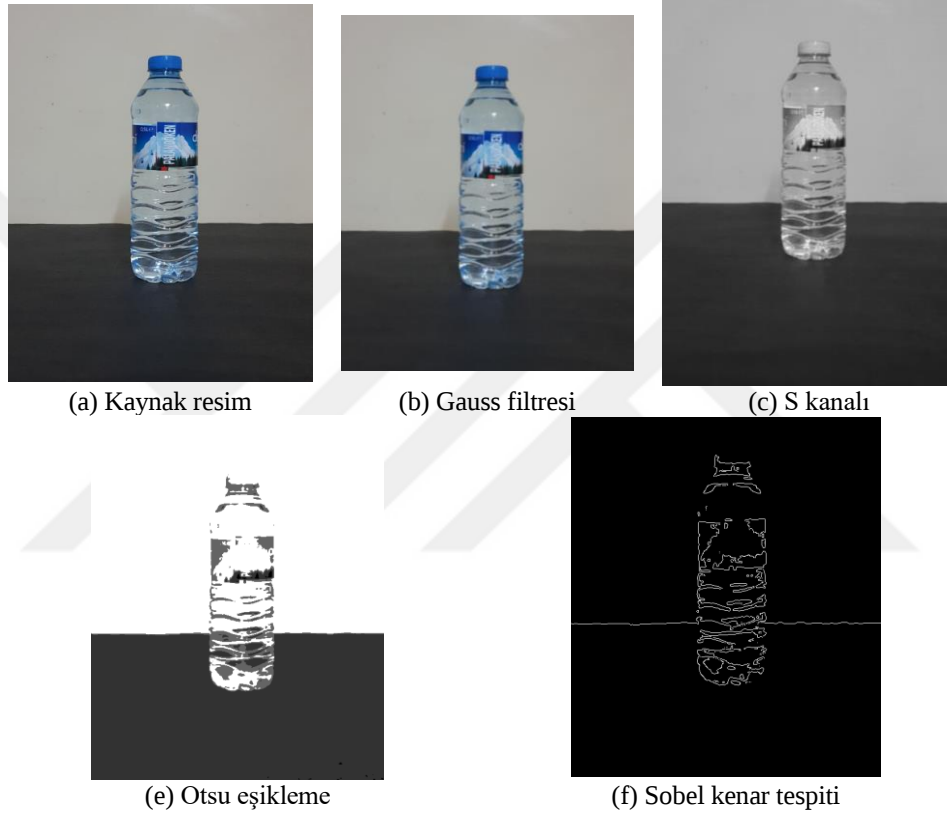
Tablo 4.6. Çalışmada kullanılan kamera ve bilgisayar özellikleri

Kamera Özellikleri		Bilgisayar Özellikleri	
Özellik	Değer	Özellik	Değer
Çözünürlük	1280x720 px	CPU Türü	Intel Core i7
Frame Oranı	59 fps	CPU Hız	2.4 GHz
Shutter Türü	Global	RAM	16 GB
Sensor Türü	CCD	RAM Türü	DDR3
Arayüz	GigE	Ethernet	1000 Mbit
Piksel Bit Derinliği	12 bit	OS	Windows 10
Mono/Color	Color	Ekran Kartı	4 GB

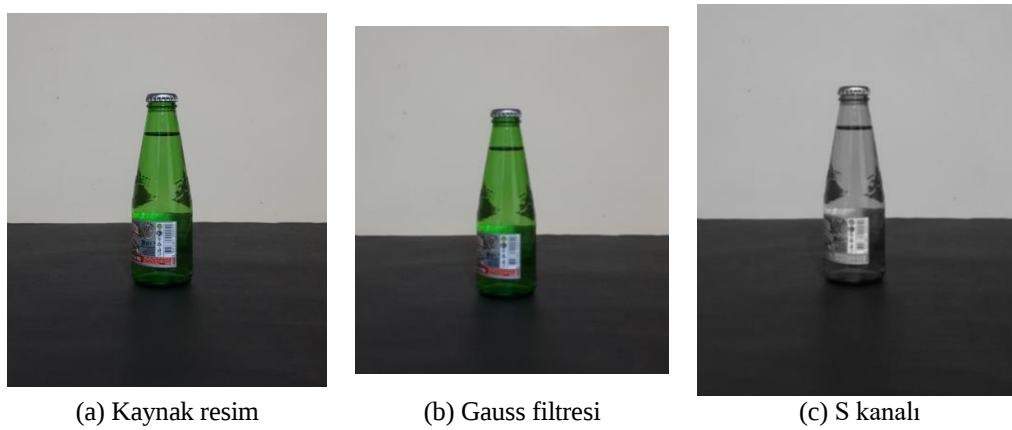


Şekil 4.31. Önerilen sistemin deneysel düzeneği

Bu çalışmada önerilen yaklaşım, kamera türü, kamera lensi ve ürün grubundan bağımsız olarak temassız ölçüm işlemi gerçekleştirebilmektedir. Deneysel çalışmalarda iki farklı ürün grubu test edilmiştir. Bunlar sırasıyla su ve soda şişeleridir. Bu ürünlerin tercih edilmesinin sebebi renklerinin farklı olmasıdır. Su şişesi şeffaf bir yapıya sahipken, soda şişesi yeşil renklidir. Her iki ürün grubu için gerçekleştirilen görüntü işleme yaklaşımının adımları Şekil 4.32 ve 4.33’de sunulmaktadır.

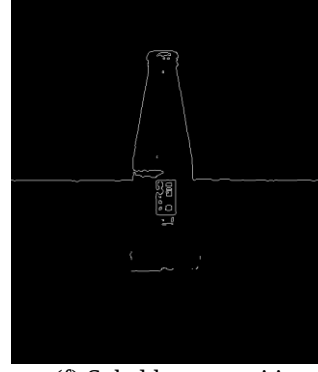


Şekil 4.32. Su şişesi paketleri için görüntü işleme modülü sonuçları





(e) Otsu eşikleme



(f) Sobel kenar tespiti

Şekil 4.333. Soda şişesi paketleri için görüntü işleme modülü sonuçları

Şekil 4.32 ve 4.33'den de görülebileceği üzere önerilen yaklaşım da öncelikli olarak kameralardan görüntüler anlık olarak alınmaktadır. Daha sonra bu görüntülere sırasıyla gauss filtresi, tek kanal seçimi, Otsu eşikleme, ve sobel kenar çıkarım işlemi uygulanmaktadır. Bu işlemler bütünü ile görüntünün sınırları belirlenmekte ve görüntüdeki nesne, nesneyi çevreleyen bir dikdörtgen içerisine alınmaktadır. Daha sonrasında bu dikdörtgenin piksel cinsinden yüksekliği ve genişliği hesaplanmaktadır. Önerilen yaklaşımın son adımında ise bu piksel değerleri metrik değerlere dönüştürülmekte ve hesaplanan ölçüm değerleri kullanıcıya gösterilmektedir. Çalışmada kullanılan ürün grupları için sağ ve sol kameralardan elde edilen görüntüler ile hesaplanan ölçüm değerlerini gösteren örnek sonuçlar Şekil 4.34'de verilmektedir.

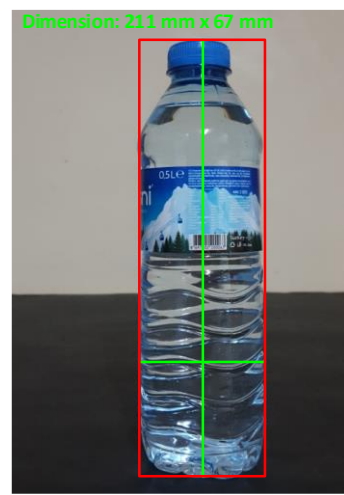


(a) Sol kamera

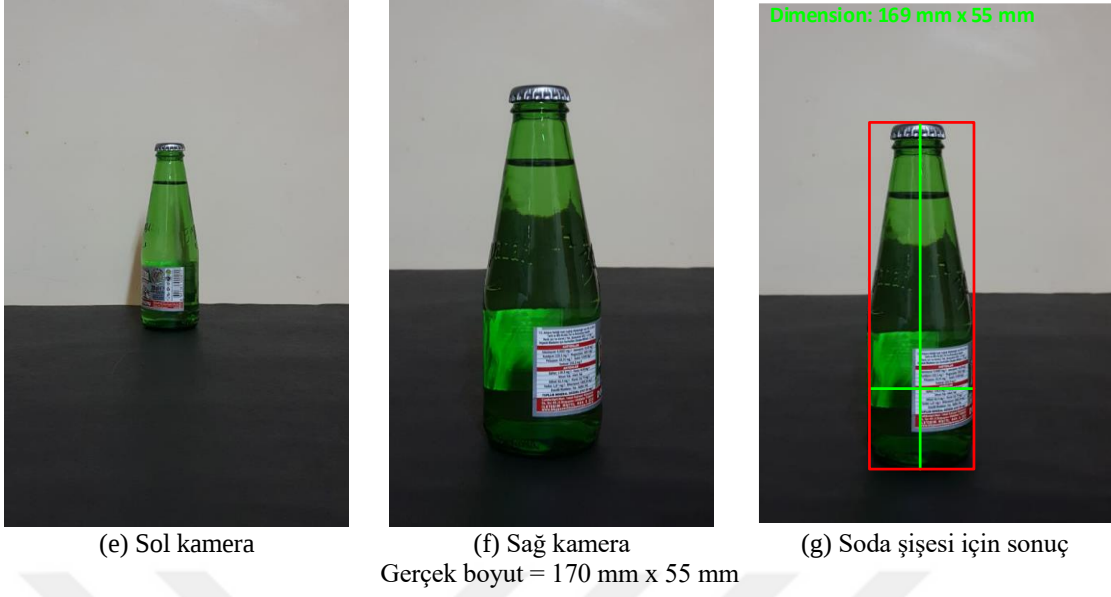


(b) Sağ kamera

Gerçek boyut = 210 mm x 65 mm



(c) Su şişesi için sonuç



Şekil 4.34. Her iki ürün grubu için deneysel sonuçlar

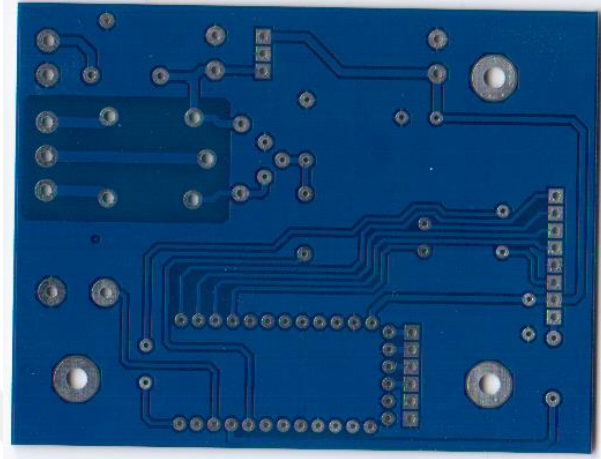
Bu çalışmada makine görmesi tabanlı temassız bir boyut ölçüm yöntemi geliştirilmiştir. Bu amaçla gerçek bir deney düzeneğinden iki kamera aracılığıyla görüntüler alınmış ve testlere tabi tutulmuştur. Önerilen yaklaşım temel olarak iki modülden oluşmaktadır. Bunlar sırasıyla görüntü işleme ve matematiksel hesaplama modülüdür.

Çalışmada kullanılan görüntü işleme modülü ile iki kameradan alınan nesnelerin görüntüsü işlenmektedir. Bu sayede görüntüdeki detaylar net bir şekilde ortaya çıkarılmakta ve nesnenin sınırları tam olarak tespit edilebilmektedir. Sınırları tespit edilen nesne bir çerçeve içerisine alınmakta ve bu çerçeve bilgileri ile mesafe değerleri matematiksel hesaplama modülüne iletilmektedir. Bu modülde ise gerekli dönüşümler yapılarak nesnelerin gerçek boyutları metrik birimde hesaplanmaktadır. Deneysel sonuçlar önerilen yaklaşımın ± 2 mm hata payı ile çalıştığını ortaya koymaktadır.

4.3. Hata Tespit Algoritması

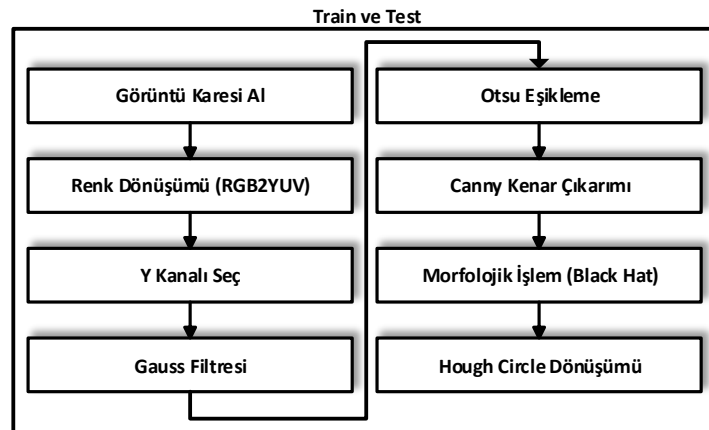
Makine görmesinin kullanıldığı alanların başında kusur tespiti gelmektedir. Bir konveyör üzerinden geçen ürünlerin eksiklikleri tespit edilerek, son kullanıcıya kusursuz ve hatasız ürünlerin teslim edilmesi amaçlanmaktadır. Genellikle makine görmesi uygulamalarının son aşamasını kapsayan bu incelemede, kusurlu ürünler tespit edilmekte ve konveyörden ayrıştırılmaktadır. Gerçekleştirilen bu çalışmada temel olarak makine görmesi uygulamaları için nesne tespiti, saydırma ve kusur tespiti işlemleri geliştirilmiştir. Önerilen yaklaşım

gerçek zamanlı olarak çalışabilmektedir ve PCB üzerindeki delikleri tespit ederek, bu ürünler üzerinde herhangi bir kusur olup olmadığını belirlemektedir. Çalışmada kullanılan PCB'ler için örnek bir görüntü Şekil 4.35'de sunulmaktadır.



Şekil 4.35. PCB için örnek görüntü

Önerilen yaklaşımda temel olarak özellik çıkarımı ve özellik eşleştirme işlemleri kullanılmaktadır. Özellik çıkarımı işleminde Otsu eşikleme ve hough dönüşümü yöntemleri kullanılmaktadır. Referans bir görüntü için bu işlemde elde edilen sonuçlar daha sonrasında kullanılmak üzere kaydedilmektedir. Bu noktada PCB üzerindeki deliklerin sayısı, konumu ve merkez bilgileri elde edilmektedir. Bu işlemin ardından gelen test görüntülerine de aynı işlemler uygulanmakta ve son olarak özellik eşleştirme işlemi ile beraber PCB üzerindeki kusurlar tespit edilmektedir. Önerilen yaklaşımın adımlarını özetleyen bir blok diyagram Şekil 4.36'da verilmektedir.



Şekil 4.36. Önerilen yöntemin akış diyagramı

Önerilen yaklaşımda öncelikli olarak bir kamera aracılığıyla PCB'nin görüntüsü alınmaktadır. Alınan bu görüntü ana makineye iletilmekte ve görüntü işleme algoritması çalıştırılmaktadır. Algoritmanın ilk adımında ise renk uzayı dönüşümü yapılarak, RGB görüntü YUV renk uzayına dönüştürülmektedir. Bu dönüşümün ardından, görüntüden Y kanalı elde edilmekte işlemler bu kanal üzerinde gerçekleştirilmektedir. RGB renk uzayından YUV renk uzayına dönüşüm işlemi Denklem 4.8'de verilmektedir.

$$\begin{aligned} Y &= 0.299xR + 0.587xG + 0.114xB \\ U &= -0.147xR - 0.289xG + 0.436xB \\ V &= 0.615xR - 0.515xG - 0.100xB \end{aligned} \quad (4.8)$$

Önerilen yaklaşımın sonraki adımında Gauss filtresi kullanılarak görüntüdeki gürültülerin elimine edilmesi sağlanmıştır. Çalışmanın bir sonraki adımında Otsu eşikleme yöntemi kullanılarak görüntünün ikilik görüntüye dönüştürülmesi sağlanmıştır. Bu yöntemde görüntünün en optimal eşik değeri adaptif olarak belirlenmektedir. Eşikleme yönteminin kullanılmasının sebebi görüntüdeki tüm ayrıntıları net bir şekilde ortaya koyabilmektir. Otsu yöntemi kullanılarak elde edilen görüntüye Canny kenar çıkarma yöntemi uygulanmaktadır. Bu sayede görüntüdeki tüm kenarlar tam olarak belirlenmektedir. Bu işlemin ardından görüntüye bir morfolojik işlem uygulanmaktadır. Bu işlem ile kenarları elde edilmiş görüntünün kenarları kalınlaştırılmaktadır. Literatürde Black Hat olarak geçen bu işlem Denklem 4.9'da verilmektedir.

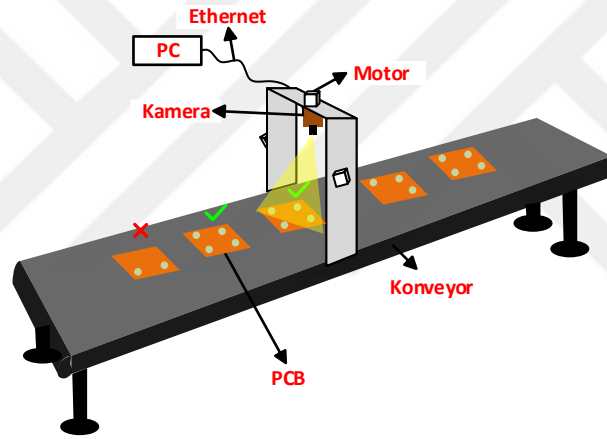
$$\begin{aligned} dst &= blackhat(src, element) = close(src, element) - src \\ close(src, element) &= dilate(erosde(src, element)) \end{aligned} \quad (4.9)$$

Önerilen yaklaşımın son bölümünde ise görüntüye Hough dönüşümü uygulanmaktadır. Hough dönüşümü ile görüntüdeki delikler tam olarak tespit edilmekte ve işaretlenmektedir. Ayrıca görüntüdeki deliklerin sayısı, pozisyonları ve çapları bu dönüşüm ile belirlenmektedir. Bu bilgiler test görüntülerinde özellik eşleştirme işlemi için kullanılmaktadır. Bu sayede her yeni gelen görüntüdeki eksik delikler tespit edilebilmekte ve kusurlu ürünler belirlenebilmektedir.

Önerilen yaklaşım temel olarak 8 adımdan oluşmaktadır. Fakat bu işlemlerin ardından test aşaması için özellik eşleştirme yöntemi kullanılmaktadır. Bu sayede sadece PCB

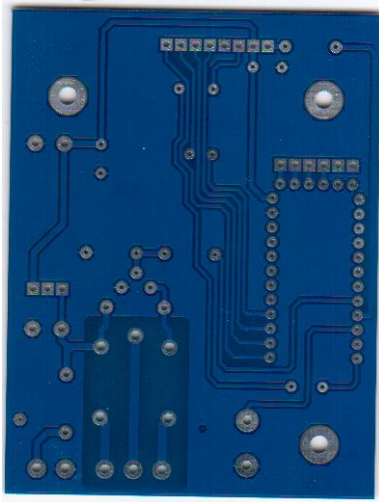
üzerindeki deliklerin sayısı değil, konumları da kontrol edilebilmektedir. Buna bağlı olarak kusurlu ürünler sistemde ayrıştırılmaktadır.

Çalışmada elde edilen sonuçlar gerçek zamanlı çalışan ve ölçüm yapabilen bir deneysel düzenden elde edilmiştir. Üç eksenle hareket edebilen ve motorlu bir yapıya sahip olan sisteme bir adet kamera entegre edilmiştir. Kamera sürekli olarak yüzeyi izlemekte ve görüntü toplamaktadır. Saniyede 60 görüntü alabilen bu kamera ile PCB'lerin görüntüsü anlık olarak ana makineye iletilmektedir. Kamera ve ana makine arasındaki bağlantı Ethernet yoluyla sağlanmaktadır. Ana makine üzerinde ise PCB'ler için tespit ve ölçüm yapabilen makine görmesi uygulaması çalıştırılmaktadır. Önerilen yaklaşım OpenCV kullanılarak gerçekleştirilmiş olup, çalışmada kullanılan deneysel düzeneği özetleyen bir blok diyagram Şekil 4.37'de verilmiştir.

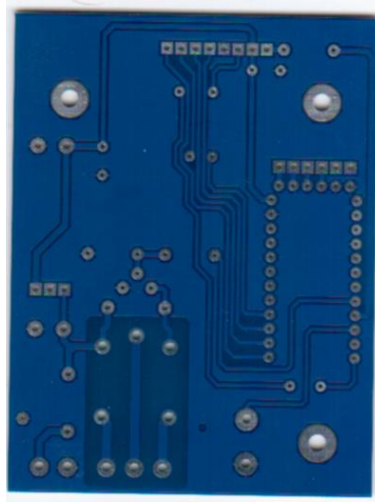


Şekil 4.37. Önerilen yaklaşıma ait deneysel düzeneğin blok diyagramı

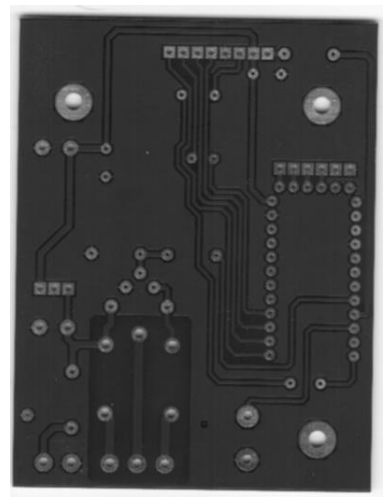
Önerilen yaklaşımda test işlemleri farklı koşullar için gerçekleştirilmiştir. Yön ve konumdan bağımsız olarak çalışabilen bu algoritma ile PCB üzerindeki delikler kusursuz bir şekilde tespit edilebilmektedir. Örnek bir eğitim verisine ait görüntü işleme sonuçları Şekil 4.38'de verilmektedir.



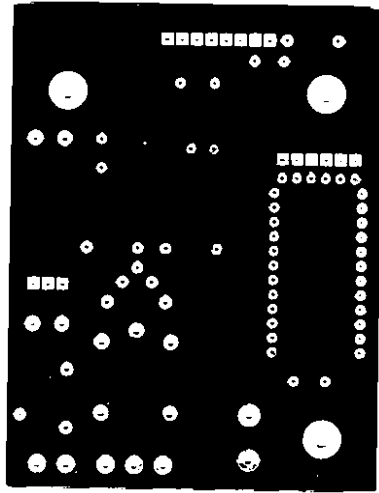
(a) Kaynak resim



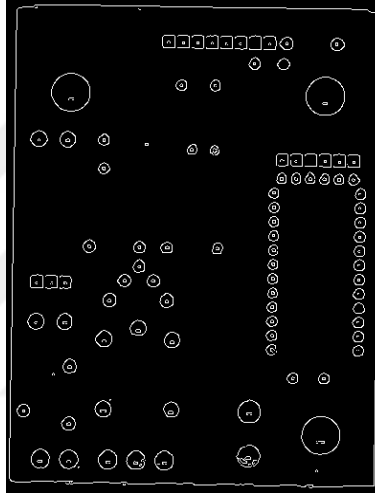
(b) Gauss filtresi



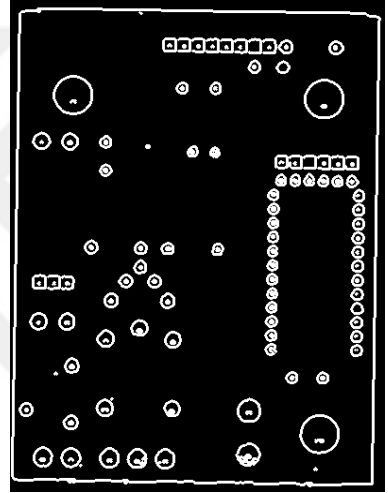
(c) Y kanalı



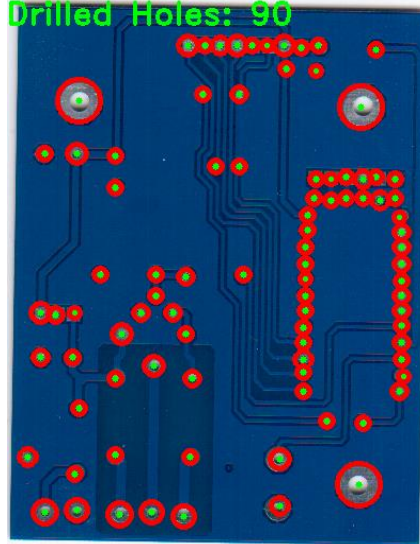
(e) Otsu eşikleme



(f) Canny kenar tespiti



(g) Black Hat

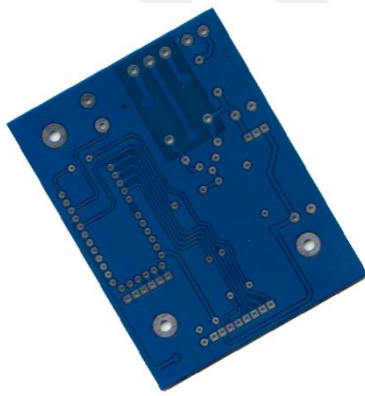


(h) Hough dönüşümü

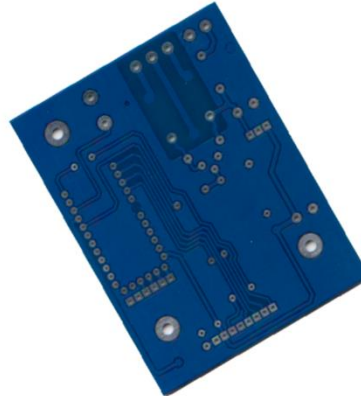
Şekil 4.38. PCB kartlar için eğitim işlemi

Şekil 4.38’den de görülebileceği üzere önerilen yaklaşım temel olarak 8 adımdan oluşmaktadır. İlk olarak görüntü alınmasıyla başlayan süreç PCB üzerindeki deliklerin tespit edilmesiyle son bulmaktadır. Tespit edilen deliklerin sayısı, koordinatları ve merkez bilgileri test işlemlerinde kullanılmak için kaydedilmektedir. Şekil 4.38’de verilen sonuçlar eğitim işleminin sonuçlarını göstermektedir.

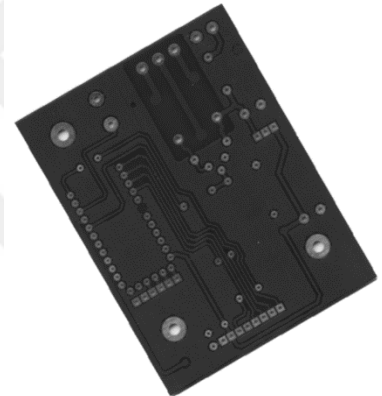
PCB’ler için gerçekleştirilen makine görmesi uygulamasının test sürecinde, özellik eşleştirme işlemi uygulanmaktadır. Şekil 4.38’de verilen adımlar öncelikle test görüntülerine uygulanmaktadır. Bu işlemin ardından elde edilen özellikler, eğitim verisinden elde edilen özellikler ile karşılaştırılmakta ve ürünün kusurları tespit edilmektedir. Önerilen yaklaşımın bu adımına ait örnek bir test görüntüsü Şekil 4.39’da sunulmaktadır.



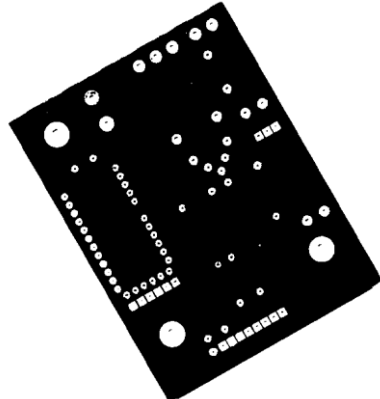
(a) Kaynak resim



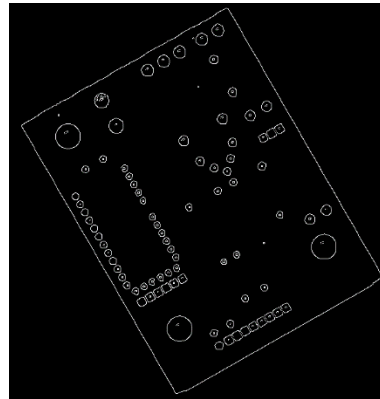
(b) Gauss filtresi



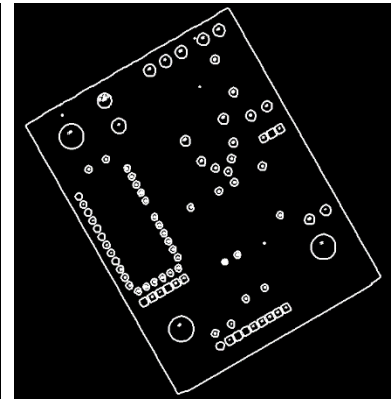
(c) Y kanalı



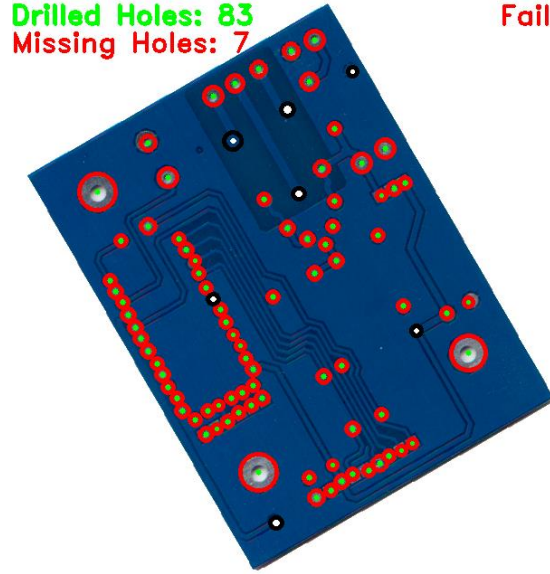
(e) Otsu eşikleme



(f) Canny kenar tespiti



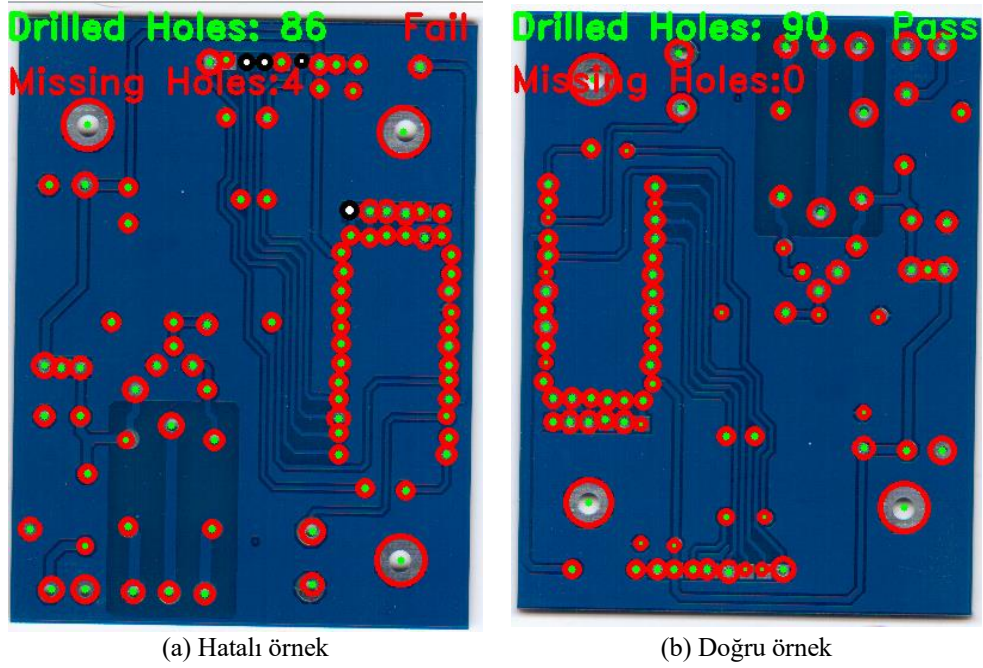
(g) Black Hat



(h) Hough dönüşümü

Şekil 4.39. PCB kartlar için test işlemi

Bölüm başında da belirtildiği üzere önerilen yaklaşım için gerçekleştirilen test çalışmaları farklı koşullar için uygulanmıştır. Özellikle, farklı konumlarda gelen görüntüler için test işlemleri gerçekleştirilmiş ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Bu testlere ait örnek sonuçlar Şekil 4.40’da sunulmaktadır.



Şekil 4.40. Test işleminden elde edilen örnek sonuçlar

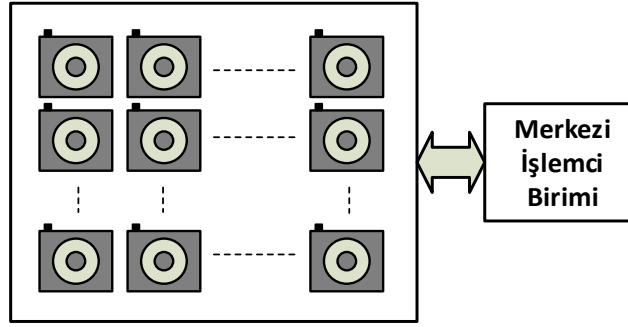
Günümüzde makine görmesi uygulamaları birçok endüstriyel üretim hattında sıklıkla kullanılmaktadır. Nesne sayımı, kusur tespiti, ölçüm işlemi gibi çeşitli amaçlarla kullanılan bu uygulamalar sayesinde üretim hatlarının kapasitesi arttırılmakta ve sıfır hataya yakın ürünler elde edilebilmektedir.

Gerçekleştirilen bu çalışmada makine görmesi tabanlı bir kusur tespit yöntemi geliştirilmiştir. Önerilen bu yaklaşım ile PCB'ler üzerindeki deliklerin sayısı ve konumu tespit edilmiş, ayrıca eksik deliklerin sayısı ve konumları belirlenmiştir. Gerçek zamanlı çalışan bir kamera aracılığıyla alınan görüntüler, çalışma kapsamında tasarlanan görüntü işleme algoritması ile incelenmiş ve özellik çıkarım işlemi gerçekleştirilmiştir. Test görüntüleri içinde aynı işlemlerin yapılmasının ardından özellik eşleştirme yöntemi kullanılmış ve ürünler üzerindeki kusurlar tespit edilmiştir. Önerilen yaklaşımda görüntüler üç ekseninde çalışabilen bir sisteme entegre edilen bir kamera ile alınmıştır. Temel olarak Otsu ve Hough dönüşümleri kullanılmış olup, adaptif yapıya sahip bir sistem oluşturulmuştur. Gerçek zamanlı yapılan deneysel çalışmalar, önerilen yöntemin oldukça hızlı ve etkili sonuçlar verdiğini göstermiştir.

4.4. Kamera Dizileri ile Yüksek Çözünürlük-1

Tez çalışması süresince gerçekleştirilen bir diğer uygulamada düşük özelliklere sahip benzer kameralar kullanarak görüntü çözünürlüğünün arttırılması sağlanmıştır. Literatürde özellikle kamera dizisi olarak geçen bu yaklaşım ile düşük maliyetli sistemler kullanarak yüksek kapasiteli çözümlerin üretilmesi amaçlanmıştır.

Konu üzerine gerçekleştirilen çalışmada benzer özelliklere ve düşük performansa sahip kameralar belirli bir düzene göre yerleştirilmiş ve anlık olarak bu kameralardan görüntü alınması sağlanmıştır. Sistemde ayrıca kameraların yerleşimlerinin kalibrasyonu yapılmış ve her bir kameradan bireysel olarak elde edilen görüntülerin birleştirilmesi sağlanmıştır. Bu sayede tek bir kameradan düşük çözünürlüklü görüntü elde edilebilecekken, birden fazla kamera kullanılarak bu çözünürlüğün arttırılması sağlanmıştır. Temel olarak kamera dizilerini özetleyen bir blok diyagram Şekil 4.41'de verildiği gibidir.



Şekil 4.41. Temel kamera dizisi yapısı

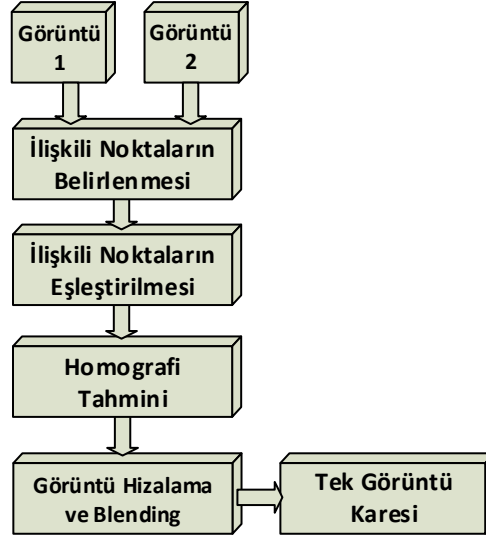
Tez çalışması çerçevesinde gerçekleştirilen bu çalışmada da yeni bir görüntü birleştirme yaklaşımı sunulmuştur. Bu amaçlar doğrultusunda 2x4 boyutunda bir kamera dizisi oluşturulmuş ve bu kameralardan alınan görüntülerin birleştirilmesi sağlanmıştır. Gerçekleştirilen uygulama görüntülerin çözünürlüğü artırılmış, düşük maliyetli sistemler kullanarak daha yüksek kapasiteli çözümler üretilmesine olanak tanınmıştır.

Önerilen yaklaşım ile bir kamera dizisi gerçek zamanlı olarak oluşturulmuş ve görüntü birleştirme algoritması gerçekleştirilmiştir. Bu amaçlar doğrultusunda ilk olarak 2x4 boyutunda bir kamera dizisi oluşturulmuştur. Kamera dizisini oluşturmak için kullanılan kameralar aynı özelliklerde olup, bu kameraların özellikleri Tablo 4.7’de sunulmuştur.

Tablo 4.7. Kamera karakteristiği

Özellikler	Değer
Çözünürlük	0.3 Mp
Hız	30 fps
Focus	Sabit
Bağlantı Türü	USB 2.0

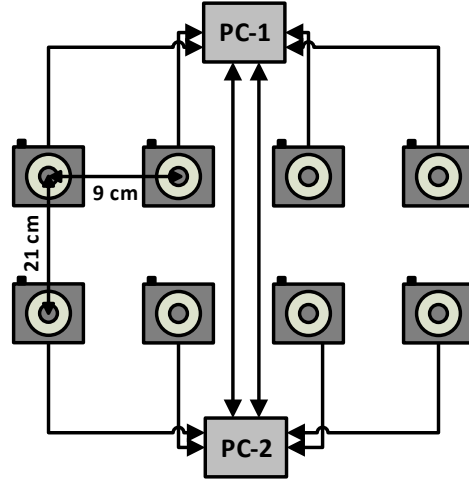
Önerilen yaklaşımda temel olarak iki görüntü arasında özellik çıkarımı ve eşleştirme, homografi tahmini ve blending işlemleri kullanılmaktadır. İlk olarak iki görüntü arasındaki birbiriyle ilişkili noktalar “Harris Corner Detection” yöntemi kullanılarak belirlenmektedir ve bu noktalar iki görüntü üzerinde de işaretlenmektedir. Daha sonra korelasyon işlemi kullanılarak iki görüntü arasında özellik eşleştirme işlemi yapılmaktadır. Bu işlemin ardından RANSAC algoritması aracılığıyla homografi tahmini gerçekleştirilmekte ve son olarak görüntülere blending işlemi uygulanmaktadır. Önerilen yaklaşım kullanılarak kameralardan elde edilen görüntülerin çözünürlüğünün artırılması amaçlanmıştır. Bu yaklaşımı özetleyen bir blok diyagram ise Şekil 4.42’de verilmiştir.



Şekil 4.42. Görüntü birleştirme için önerilen yaklaşım

Şekil 4.42’den de görülebileceği üzere önerilen yaklaşım giriş parametresi olarak iki ayrı kameradan çekilmiş fakat aynı senaryoya ait olan görüntü almakta ve bu ikisini birleştirerek tek görüntü karesi olarak vermektedir. Şekil 4.42 sadece iki görüntü için önerilen yaklaşımı icra etmektedir. Fakat tüm bu işlemler tüm kameralardan elde edilen görüntüler birleştirilinceye kadar devam etmektedir. Öncelikle görüntüler ikişerli olarak birleştirilmektedir. Sistemde $2 \times 4 = 8$ kamera kullanıldığından ve bu kameralardan elde edilen görüntüler ikişerli olarak birleştirildiğinden ortaya 4 farklı görüntü karesi çıkmaktadır. Bu görüntülerde tekrar ikişerli olarak birleştirilmekte ve bu işlemin sonucunda 2 adet görüntü karesi elde edilmektedir. Nihai olarak bu görüntülerde bir araya getirilmekte ve tek bir görüntü ortaya çıkarılmaktadır.

Çalışma kapsamında kurulan deney düzeneğinde toplam 8 adet kamera kullanılmıştır. Bu kameraların tamamı aynı özelliklerde olup, ilk satır için 4 adet ikinci satır içinde 4 adet olacak şekilde 2×4 boyutunda oluşturulmuştur. Ayrıca kameraların satırları arasındaki mesafeler 21 cm, yan yana iki kamera arasındaki mesafeler de 9 cm olacak şekilde yerleşim düzeni oluşturulmuştur. Kameraların bu yerleşim düzenlerini gösteren bir blok diyagram Şekil 4.43’de verildiği gibidir. Ayrıca kameralardan elde edilen görüntüler Şekil 4.44’de verildiği gibidir.



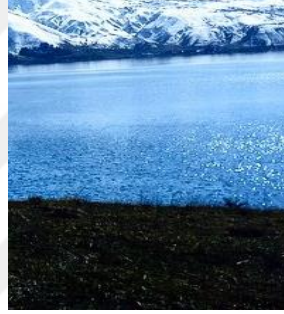
Şekil 4.43. Önerilen yaklaşımda kullanılan deney düzeneği



(a) 1. satır 1. kamera



(b) 1. satır 2. kamera



(c) 1. satır 3. kamera



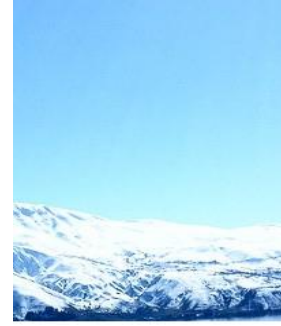
(d) 1. satır 4. kamera



(e) 2. satır 1. kamera



(f) 2. satır 2. kamera



(g) 2. satır 3. kamera



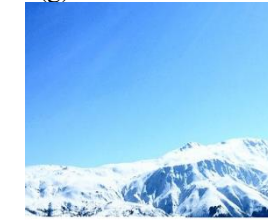
(h) 2. satır 4. kamera



(i) Birleşim (a) ve (b)



(j) Birleşim (c) ve (d)



(k) Birleşim (e) ve (f)



(l) Birleşim (g) ve (h)



(m) Birleşim (i) ve (j)



(n) Birleşim (k) ve (l)

Şekil 4.44. Kameralardan elde edilen görüntüler birleştirme işlemleri

Önerilen algoritma tarafından elde edilen sonuçlar Şekil 4.44’de sunulmuştur. Tüm kameralardan elde edilen görüntüler ve bu görüntülerin birleşim durumları da yine Şekil 4.44’de verildiği gibidir. Şekil 4.45’de ise elde edilen sonuç görüntü karesi yer almaktadır. Ayrıca verilen bu görüntü örnekleri için önerilen yaklaşımın çalışma süresi ve elde edilen görüntülerin boyutları Tablo 4.8’de sunulduğu gibidir.



Şekil 4.45. Önerilen yaklaşım sonucu elde edilen tek görüntü karesi

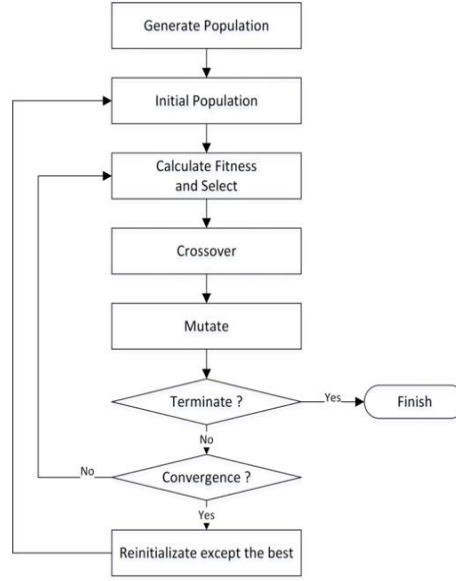
Tablo 4.8. Önerilen yaklaşımın performansı

İşlemler	Önerilen Yaklaşım		
	Genişlik	Yükseklik	Zaman (sn)
(a), (b), (c), (d), (e), (f), (g), (h)	201	263	0.04
(i)	361	264	0.27
(j)	320	263	
(k)	361	264	0.27
(l)	321	263	
(m)	641	264	0.44
(n)	643	260	
Görüntü	642	468	0.72
Toplam Zaman	---	---	1.74

Gerçekleştirilen bu çalışmada bir kamera dizisi oluşturulmaya çalışılmıştır. Bu kamera dizisinde aynı özellikteki 8 adet kamera kullanılmış ve her birinden alınan düşük performanstaki görüntüler tek bir görüntü olacak şekilde birleştirilmiştir. Önerilen bu yaklaşımın temel amacı yüksek performansa sahip kameraları daha düşük maliyet ile gerçekleştirebilmektir. Özellikle endüstriyel üretim hatlarında kullanılan kameraların özellikleri ve maliyetleri düşünüldüğünde önerilen yaklaşımın ehemmiyeti daha net bir şekilde görülmektedir.

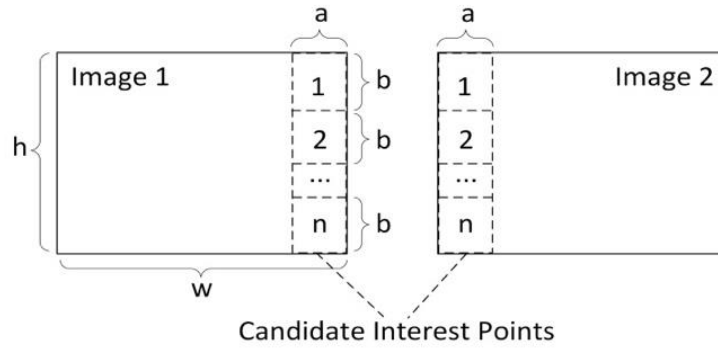
4.5. Kamera Dizileri ile Yüksek Çözünürlük-2

Bir önceki çalışmaya benzer şekilde gerçekleştirilen çalışmaların birinde birden fazla kamera kullanılarak bir üretim bandından geçen ürünlere ait parça parça görüntüler elde edilmiş ve bu görüntüler gerçek zamanlı olarak birleştirilmiştir. Bu kapsamda gerçekleştirilen uygulama ile 4 farklı kameradan aynı senaryoya ait görüntüler alınmış ve bir optimizasyon algoritması aracılığıyla birleştirilerek tam bir görüntü karesi elde edilmiştir. Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen bu uygulamada mikro genetik algoritma görüntüleri birleştirmek amacıyla optimizasyon yöntemi olarak kullanılmıştır. Mikro genetik algoritmanın bilinen klasik genetik algorithmadan en önemli farkı popülasyon boyutunun küçük olmasıdır. Bu küçüklükten kasıt 5 ile 10 arasında bir eleman sayısının olmasıdır. Ayrıca bir diğer fark uygunluktan belirli oranda uzaklaşıldığında popülasyonun yeniden yüklenmesidir. Bu işlemlerin haricinde kalan diğer tüm bölümler temel genetik algoritma ile aynıdır. Mikro genetik algoritmanın çalışmasını özetleyen bir blok diyagram ve algoritmanın sözde kodu Şekil 4.46’da sunulduğu gibidir.



Şekil 4.46. Mikro genetik algoritma adımları

Önerilen yaklaşımda temel amaç iki görüntü arasındaki eşleşen noktaların tespit edilmesidir. Bu amaçla başlangıçta bir arama uzayı belirlenmekte ve genetik algoritma bu arama uzayı içerisinde çalıştırılmaktadır. Mikro genetik algoritma çalışma prensibi gereği oldukça hızlı bir şekilde çözüme ulaşmaktadır. Şekil 4.47’de iki görüntü arasındaki ilişkiyi gösteren örnek bir blok diyagram verilmiştir.



Şekil 4.47. Yatay birleştirme işlemi

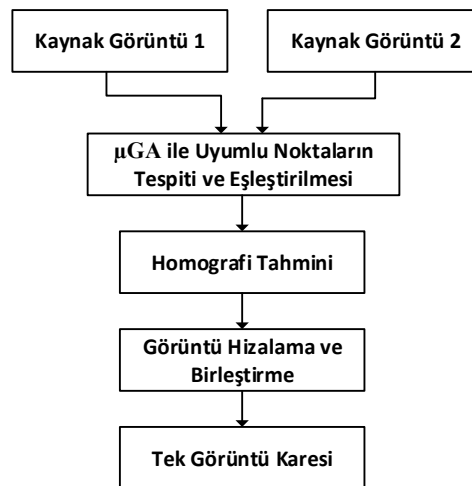
Önerilen yaklaşımda öncelikle muhtemel eşleşecek noktaların sınırlarının belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla “a” ile belirtilen ve arama uzayının sınırlarını belirleyen bir aralık tanımlanmıştır. “a” değeri üretim hattının hızına paralel olarak değişim göstermektedir. Yine iki görüntü arasında kullanılan bir diğer değer ise “b” değeridir. Bu değer ile “a” sınırı içerisinde bulunan parçalar “b” adet parçaya bölünmektedir. Yapılan bu

işlem ile “n” farklı adet aday interest nokta tespit edilmektedir. Bu “n” adet parça için mikro genetik algoritma çalıştırılmakta ve her alt alan için farklı bir eşleşme noktası tespit edilmektedir.

Uygulamanın ikinci aşaması uygunluk değerlerinin belirlenmesidir. İki piksel değeri arasındaki farkın bulunabilmesi amacıyla renk değerleri ve koordinat değerleri karşılaştırılmaktadır. Mikro genetik algoritmanın uygunluk fonksiyonu Denklem 4.10’da verildiği gibidir.

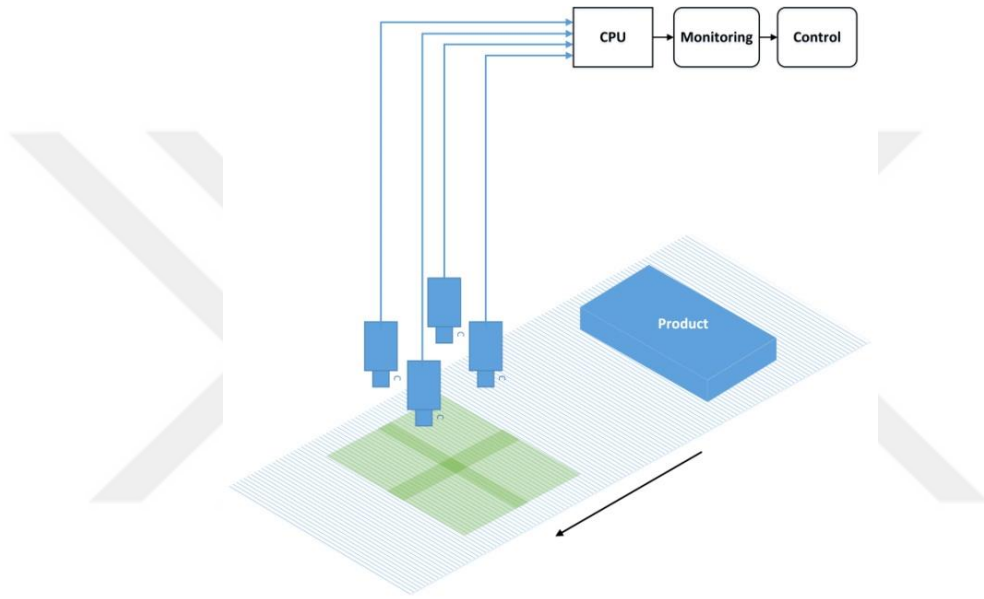
$$\begin{aligned} & \alpha|y_1 - y_2| + \beta\|P_{x_1, x_2} - P_{x_2, y_2}\| \\ & x_1 \in [w - a, w] \\ & x_2 \in [0, a] \\ & y_1, y_2 \in [(i - 1) * b, i * b] \end{aligned} \quad (4.10)$$

$P_{x,y}$ değerleri denklemde x, y pikselinin renk değerini temsil etmektedir. “ i ” ise alt bölgenin sırasını göstermektedir. Ayrıca α ve β değerleri denklemde ağırlıkları temsil etmektedir. Eğer fonksiyondan elde edilen değer “0” olursa ki bu değer minimumdur, işlem durdurulmaktadır. Çalışmada seçim işlemi olarak turnuva seçim yöntemi kullanılmıştır. Yine çalışmada permütasyon kodlama yöntemi kullanılmış olup, çaprazlama işlemi tek noktalı 0.95 çaprazlama oranı gerçekleştirilmiştir. Mutasyon oranı ise 0 seçilerek pasif edilmiştir. Önerilen görüntü birleştirme yaklaşımını özetleyen bir blok diyagram Şekil 4.48’de verildiği gibidir.

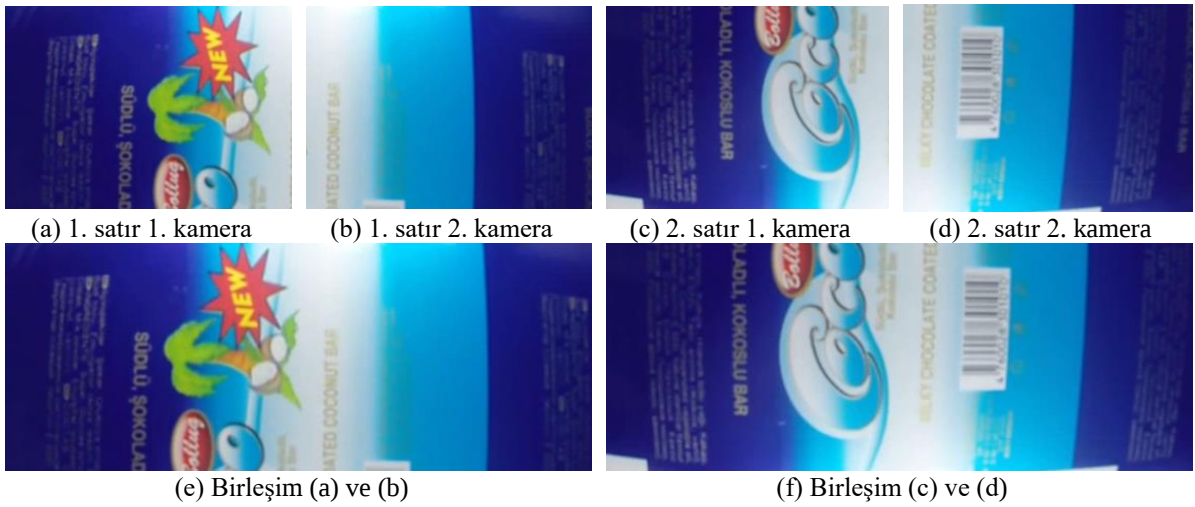


Şekil 4.48. Önerilen görüntü birleştirme yaklaşımı

Bu çalışmada görüntü birleştirme işlemi bir üretim hattındaki kamera dizisinden alınan görüntüler üzerinde uygulanmıştır. Kurulan sistemin örnek bir şematığı Şekil 4.49’da sunulmuştur. Kameralar aynı özelliklere sahiptirler. Çalışmada Intel i7, 6 GB Ram, ve Windows 7 işletim sistemine sahip bir bilgisayar kullanılmıştır. Önerilen yaklaşımda ambalaj sektöründen alınan veriler kullanılmış olup, sisteme ait sonuçlar Şekil 4.50’de verildiği gibidir. Ayrıca önerilen yaklaşımın klasik genetik algoritma ile karşılaştırmalı sonucu ise Tablo 4.9’da verildiği gibidir.



Şekil 4.49. Üretim hattında kameraların yerleşimi





(g) Birleşim (e) ve (f)

Şekil 4.50. Kameralardan elde edilen görüntüler birleştirme işlemleri

Tablo 4.9. Önerilen yaklaşımın karşılaştırmalı sonuçları

Şekil 4.45’de işlemler	Önerilen Yöntem ile Birleştirme Performansı		Klasik GA ile Birleştirme Performansı	
	Boyut	Zaman (ms)	Boyut	Zaman (ms)
e	623 x 241	17	622 x 240	136
f	624 x 239	19	625 x 241	156
g	623 x 352	32	625 x 352	253
Toplam	623 x 352	68	625 x 352	545

Önerilen bu yaklaşımda 4 kameralı bir sistem kurularak görüntülerin hızlı ve kusursuz bir şekilde birleştirilmesi işlemi gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda mikro genetik tabanlı yöntemin etkinliği kanıtlanmıştır.

4.6. Arayüz Tasarımı

Doktora tez çalışmaları süresince kalite kontrol algoritmalarını kullanıcıların kullanabileceği hale getirebilmek amacıyla bir arayüz tasarım işlemi gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen piyasa araştırmaları ve saha araştırmaları neticesinde belirlenen tasarımın arka planına daha önceden gerçekleştirilmiş olan görüntü işleme ve örüntü tanıma algoritmaları yerleştirilmiştir. Tamamen kullanıcı dostu ve Türkçe kullanım kolaylığı sunan bu bölümde gerçekleştirilen çalışmalar maddeler halinde aşağıda verildiği gibidir:

- Kullanıcı dostu ve kullanımı kolay bir arayüz hazırlayabilmek için piyasadaki mevcut yazılımlar irdelenmiş olup, bu yazılımların eksiklikleri, kolay yönleri vs. kısaca avantaj ve dezavantajları incelenmiştir.
- Görüntü işleme yazılımı olarak kullanılacak açık kaynaklı OpenCV'nin entegre çalışabileceği yazılım dilleri tekrar gözden geçirilmiş olup, bu noktada kullanılabilecek kütüphaneler belirlenmiştir.
- UDP soket programlama yazılımı tasarlanan arayüz'e entegre edilmiş ve çalışabilirliği test edilmiştir.
- OpenCV'nin direkt olarak C# veya Java gibi bilinen yazılım dilleri için gelişmiş GUI tasarım araçlarını sunmamasından ötürü kullanılabilecek framework'ler incelenmiş ve hangilerinin kullanılacağı tespit edilmiştir.
- Tespit edilen bu framework'ler çerçevesinde farklı arayüz tasarımları hazırlanmış ve nihai amaca ulaşılmıştır

Arayüz tasarımı kapsamında hem bazı önemli firmaların makine görmesi yazılımları incelenmiş hem de kullanımı kolay GUI tasarımı için kullanılabilecek framework ve kütüphaneler irdelenmiştir. Bu yazılımlar, frameworkler ve kütüphaneler ilerleyen bölümlerde detaylı bir şekilde sunulmaktadır.

4.6.1. Makine Görmesi Yazılımları

Piyasada çok çeşitli ve kullanım amacına göre değişebilen makine görmesi yazılımları mevcut bulunmaktadır. Arayüz tasarımı kapsamında bu yazılımlar detaylı bir şekilde incelenmiş ve özellikleri ortaya konmuştur. Hemen hemen her kamera üreticisi firmanın sahip olduğu bu yazılımlar ve özellikleri maddeler halinde aşağıda verildiği gibidir:

HALCON Makine Görmesi Yazılımı: Halcon makine görmesi yazılımı, MVTec firması tarafından üretilen ve endüstriyel üretim sistemlerinde kalite kontrol amaçlı kullanılan bir yazılımdır. Dünya çapında oldukça önemli bir yere sahip olan bu yazılımın temel özellikleri maddeler halinde aşağıda verildiği gibidir;

- Otomotiv, robotik, medikal görüntüleme ve kalite kontrol sistemlerinin mevcut olduğu birçok alanda aktif olarak kullanılmaktadır.

- 2000'den fazla barındırdığı görüntü işleme operatörü ile düşük, orta ve yüksek seviyeli görüntü işleme uygulamalarına olanak sağlamaktadır.
- Firma tarafından geliştirilen yine ürün ile aynı ada sahip Halcon kütüphanesini kullanmaktadır.
- Bu kütüphanenin aktif olarak kullanılabildiği HDevelop adı verilen bir IDE firma tarafından kullanıcılarına sunulmaktadır.
- C, C++, C#, Visual Basic .Net ve Delphi gibi önemli programlama dillerinde kullanım alanına sahiptir.
- Windows, Linux ve Mac gibi işletim sistemlerinin farklı farklı sürümlerinde çalışabilecek bir yapıya sahiptir.
- Paralel programlamaya olanak tanımaktadır. Çok çekirdekli sistemlerde sunduğu bu yapı ile daha hızlı bir görüntü işleme hizmeti sunabilmektedir.
- Piyasadaki birçok endüstriyel kamera ve frame grabber ile entegre bir şekilde çalışabilmektedir.
- GenICam, GigE Vision, IIDC 1394, USB, USB3 Vision, ve Camera Link gibi çeşitli standartlara uyum göstermektedir.
- Development ve Run-Time çalışacak sistemler için ayrı ayrı lisanslara sahip olup, bir lisans ile sadece bir makine çalışabilmektedir.
- USB Dongle aracılığıyla lisanslar başka makinelere taşınabilmektedir.
- Lisansın iptal edilmesi durumunda bilgisayarın ana kartı firmaya gönderilmekte ve lisans sadece firma aracılığıyla imha edilebilmektedir.

Bu yazılımın en önemli özelliği görüntü işleme kütüphanesinde bulunan temel fonksiyonların firma tarafından yazılmış olmasıdır. Bu sebeple bu fonksiyonlar kapalı bir yapıya sahip olup, müdahaleye izin vermemektedir.

Adaptive Vision Studio Makine Görmesi Yazılımı: Makine görmesi yazılımlarında söz sahibi olan bir diğer firma Polonya menşeli adaptive vision firmasıdır. Firma tarafından geliştirilen ve kullanıcılara sunulan Adaptive Vision Studio makine görmesi yazılımına ait detaylı özellikler maddeler halinde aşağıda sunulduğu gibidir;

- Barkod okuma, yüzey kusur tespiti gibi birçok endüstriyel alanda sıklıkla kullanılan bir üründür.
- Bu üründe bir önceki yazılımda olduğu gibi, firma tarafından geliştirilen kendine has kütüphaneleri kullanmaktadır ve bu kütüphane ile aynı adı taşıyan Adaptive Vision Studio IDE platformunu kullanmaktadır.
- Programlama dilleri arasında C++ desteğini sunmaktadır ve bazı özel durumlar hariç olmak üzere kendi kütüphanesini kullanan yazılımı C++ kodlarına dönüştürebilmekte ve kullanıcının geliştirmesine olanak sağlamaktadır.
- Firmanın üretmiş olduğu bu yazılımın en önemli özelliklerinden birisi sürükle bırak mantığına göre uygulama geliştirebilmeye olanak sağlayabilmesidir. Bu sayede kullanıcılar hızlı ve etkili görüntü işleme yazılımları ortaya koyabilmektedirler.
- Piyasadaki mevcut ürünler ile kıyaslandığında hız, zaman ve verimlilik açısından oldukça önde bir ürün gibi durmaktadır.
- Tıpkı Halcon'da olduğu gibi bu yazılımın lisansı da development ve run-time olmak üzere iki başlık altında pazarlanmaktadır. Bir adet USB Dongle aracılığıyla lisans farklı makinelere taşınabilmektedir.
- GigE standartlarına destek veren yazılım, AIA üyesi firmaların sistemlerine de yazılım desteği sunmaktadır.

Halcon ve Adaptive Vision SDK'ları piyasada makine görmesi alanında sıklıkla kullanılan en önemli yazılımlardandır. Kapsamlı kütüphanelere sahip olan bu yazılımlar ile endüstriye yönelik oldukça çeşitli uygulamalar geliştirilebilmektedir. Bu yazılımların haricinde kamera üreticisi olan firmalarda makine görmesi yazılımları üretmektedirler. Fakat bu yazılımların en önemli dezavantajı neredeyse tamamının sadece üretici firmanın kameraları ile uyumlu çalışabilmesidir. Buda kullanıcıları oldukça kısıtlamakta ve uygulama geliştirme konusunda yarı yolda bırakmaktadır.

4.6.2. Görüntü İşleme Kütüphaneleri

Görüntü işleme yazılımları geliştirmek amacıyla üretilmiş olan kapalı sistem yazılımların yanı sıra piyasada açık kaynaklı kütüphaneler de mevcuttur. OpenCV, EmguCV, Accord.Net, Aforge.Net gibi bu kütüphanelerin detaylı özellikleri maddeler halinde aşağıda sunulduğu gibidir:

OpenCV Görüntü İşleme Kütüphanesi: Görüntü işleme alanında neredeyse en önemli paya sahip açık kaynaklı bir kütüphane olan OpenCV ile akla gelebilecek neredeyse tüm görüntü işleme uygulamaları geliştirilebilmektedir. Hâlihazırda proje çerçevesinde geliştirilen görüntü işleme yazılımlarının neredeyse tamamı da bu kütüphane kullanılarak oluşturulmuştur. Açık kaynaklı olan bu kütüphaneye ait bazı temel özellikler aşağıda maddeler halinde verildiği gibidir;

- Tamamen açık kaynaklı bir kütüphane olan OpenCV, C++ programlama dili tabanlı olarak geliştirilmiştir.
- Bünyesinde barındırdığı 2500’den fazla fonksiyon ile görüntü işlemenin kullanıldığı hemen hemen tüm alanlarda uygulama geliştirebilme kapasitesine sahiptir.
- Açık kaynaklı olmasından da ötürü oldukça fazla dökümana sahip olup, gerçek zamanlı bilgisayar görmesi uygulamaları için de çok çeşitli örnek kod parçalarını kullanıcılarına sunmaktadır.
- Windows, Linux ve Mac gibi çeşitli işletim sistemlerinde uyum problemi olmaksızın çalışabilmektedir.
- Ayrıca Android ve IOS gibi mobil dünya için de çeşitli görüntü işleme uygulamaları hazırlanabilmesine olanak sağlamaktadır.
- Birçok farklı IDE platformuna (Netbeans, Visual Studio vs.) entegre edilebilmekte ve sorunsuz çalışabilmektedir.
- OpenCV bünyesinde sadece basit temel arayüz araçlarının kullanımına izin vermektedir (Buton, Trackbar vs.).

EmguCV Görüntü İşleme Kütüphanesi: EmguCV, OpenCV ile benzer özellikleri taşıyan ve görüntü işleme uygulamaları geliştirebilmek amacıyla kullanılan açık kaynaklı bir kütüphanedir. OpenCV’nin yüksek seviyeli programlama dili olan C# üzerinde kullanılabilmesine olanak sağlayan bu kütüphanenin detayları maddeler halinde aşağıda sunulduğu gibidir.

- EmguCV’de OpenCV’ye benzer şekilde açık kaynaklı bir kütüphanedir ve içerisinde birçok görüntü işleme fonksiyonunu barındırmaktadır.
- Bir önceki bölümde de bahsedildiği üzere OpenCV’nin GUI tasarımındaki eksikliklerini gidermeye yönelik bir kütüphanedir.

- Bu kütüphane ile C# programlama dilini kullanarak detaylı GUI tasarımı yapılabilmekte ve esnek kullanıcı arayüzleri oluşturulabilmektedir.
- OpenCV'nin içerisinde barındırdığı fonksiyonların birçoğunu bu kütüphane de bünyesinde barındırmaktadır.
- C#, Visual Basic, Visual C++ ve IronPython gibi .Net uyumlu programlama dilleri ile çalışabilmeye olanak sağlamaktadır.
- Windows, Linux ve Mac gibi çeşitli işletim sistemleri üzerinde uygulama geliştirebilmeyi sağlamaktadır. Ayrıca Android ve IOs mobil platformları için de ayrıca görüntü işleme uygulamaları geliştirebilmeye fırsat sunmaktadır.
- C# ile uyumlu çalışabildiği için gelişmiş arayüz tasarımları kolaylıkla yapılabilmekte ve kullanıcılar ile interaktif çalışabilen sistemler oluşturulabilmektedir.

Accord.Net Görüntü İşleme Kütüphanesi: Bu görüntü işleme kütüphanesi ise yine kullanıcı toplulukları tarafından oluşturulmuş ve açık kaynaklı olarak kullanıma sunulan görüntü işleme kütüphanesidir. Bu kütüphanenin en önemli özellikleri ise bulanık mantık ve genetik algoritma gibi bazı önemli algoritmaların görüntü işleme alanında kullanılabilirliğine olanak sağlamasıdır. Bu kütüphaneye ait temel özellikler ise aşağıda maddeler halinde verildiği gibidir.

- Açık kaynaklı olarak sunulan bu görüntü işleme kütüphanesi .Net programlama dilleri ile tam uyum göstermektedir.
- İçerisinde barındırdığı kompleks algoritmalar sayesinde kullanıcıların ekstra herhangi bir işlem yapmadan sonuç elde edebilmesini sağlamaktadır.
- Makine öğrenmesi, genetik algoritmalar ve bulanık mantık gibi literatürde oldukça önemli bir yere sahip olan öğrenmeli algoritmaları bünyesinde barındırmakta ve bu algoritmaları görüntü işleme alanında kullanabilmeye olanak tanımaktadır.
- Görüntüleri sınıflandırma, yüzey tespiti gibi endüstriyel alanlarda sıklıkla kullanılan bazı temel algoritmalar doğrudan fonksiyon olarak bu kütüphane içerisinde kullanıcıların hizmetine sunulmuştur.
- .Net programlama dillerini desteklemesinden ötürü C# gibi yüksek seviyeli bir programlama dilinde hazırlanmış olan arayüze kolayca entegre edilebilmektedir.

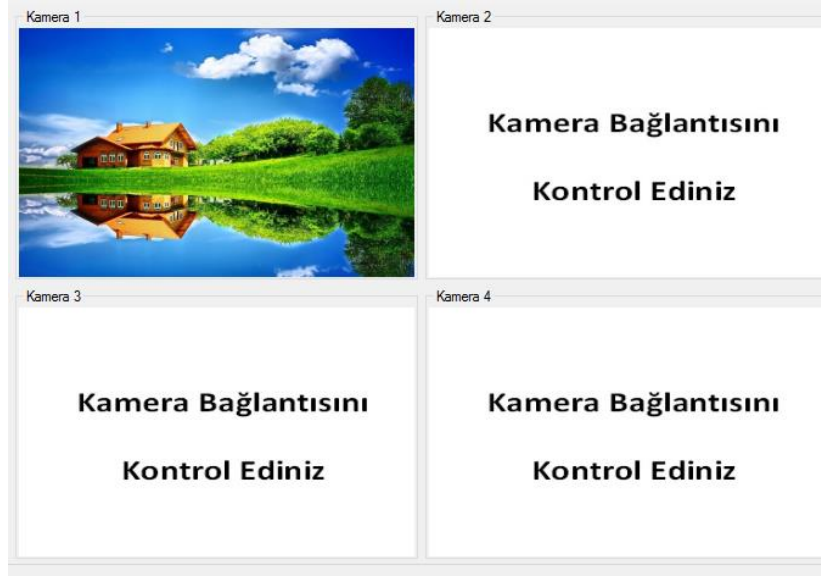
4.6.3. Arayüz Tasarımı Versiyon 1.0

Tez çalışması kapsamında tasarlanan arayüzün kullanıcı dostu olması ve görüntü işleme parametrelerinin kolay bir şekilde ayarlanabilmesi tasarımın öncelikli hedefini oluşturmuştur. Versiyon 1.0 olarak ön görülen bu tasarımın geliştirilmesine tez süresince devam edilerek yazılımın sürekli güncellenmesi hedeflenmiştir. Bu amaçlar doğrultusunda oluşturulan bu ilk yazılımın ekran görüntüsü Şekil 4.51’de sunulmuş olup, detayları aşağıda sırasıyla açıklandığı gibidir.



Şekil 4.51. Arayüz tasarımı versiyon 1.0

Tez çalışması kapsamında tasarlanan arayüze ait bir görüntü Şekil 4.52’de görülmektedir. Arayüz tasarımında ana işlem birimine bağlı olan kameraların tamamının listelenmesi sağlanmış durumdadır. Başka bir deyişle ana işlem birimine birden fazla kamera bağlı olduğunda bu kameralar 4 farklı pencerede anlık olarak gösterilebilmektedir. Bu duruma ait bir ekran görüntüsü Şekil 4.52’de sunulduğu gibidir. Çalışmalarda ayrıca kameraları aktif edebilmek, durdurabilmek ve sonlandırabilmek için bir menü bar tasarlanmış bu menüye ait bir görüntü Şekil 4.53’de verildiği gibidir.

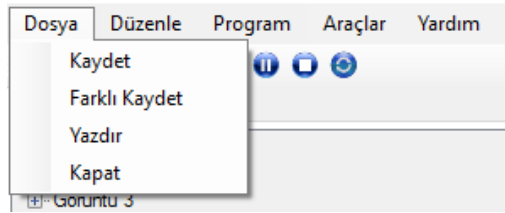


Şekil 4.52. Kameraların aynı pencere anlık olarak gösterilmesi



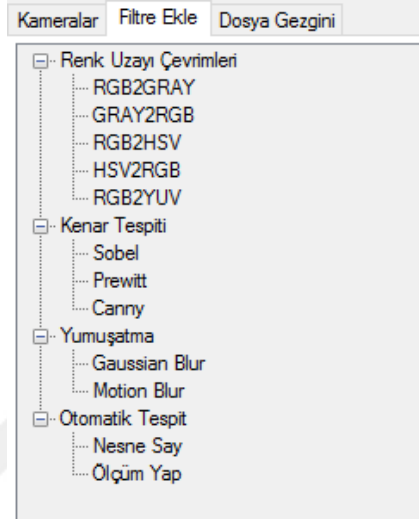
Şekil 4.53. Kamerayı kontrol edebilmek için tasarlanan menü

Bu menü ile seçilen kameralar oynatılabilmekte, duraksatılabilmekte ve tamamen durdurulabilmektedir. Ayrıca seçilen kameralarda ileri ve geri sarım işlemi yapılabilmekte ve frame'ler tekrar incelenebilmektedir. Ayrıca yine bu menüden kameranın anlık görüntüsü alınabilmekte ve hafızaya kaydedilebilmektedir. Menü üzerinde bulunan bir diğer buton ile ana işlem biriminde yer alan bir dosyadan görüntü aktarımı yapılabilmekte ve ilerleyen süreçlerde kontrol edilmek üzere tasarımda görüntülenebilmektedir. Ayrıca yine tasarımda arayüzün üst kısmına birçok kimsenin aşına olduğu gibi File menüsü eklenmiş ve kullanıma sunulmuştur. Bu genişleyebilen menüye ait bir ekran görüntüsü Şekil 4.54'de verildiği gibidir.



Şekil 4.54. Dosya menüsü

Arayüz tasarımında pencerenin sol tarafına kullanıcının sistemi kontrol edebileceği bir pencere yerleştirilmiştir. Kameraya ait mevcut durumu kontrol etmeye ve bu kamera modülünden elde edilen görüntüye uygulanan filtreleri gösteren bu pencereye ait bir ekran görüntüsü Şekil 4.55’de sunulduğu gibidir.



Şekil 4.55. Filtre ekleme menüsü

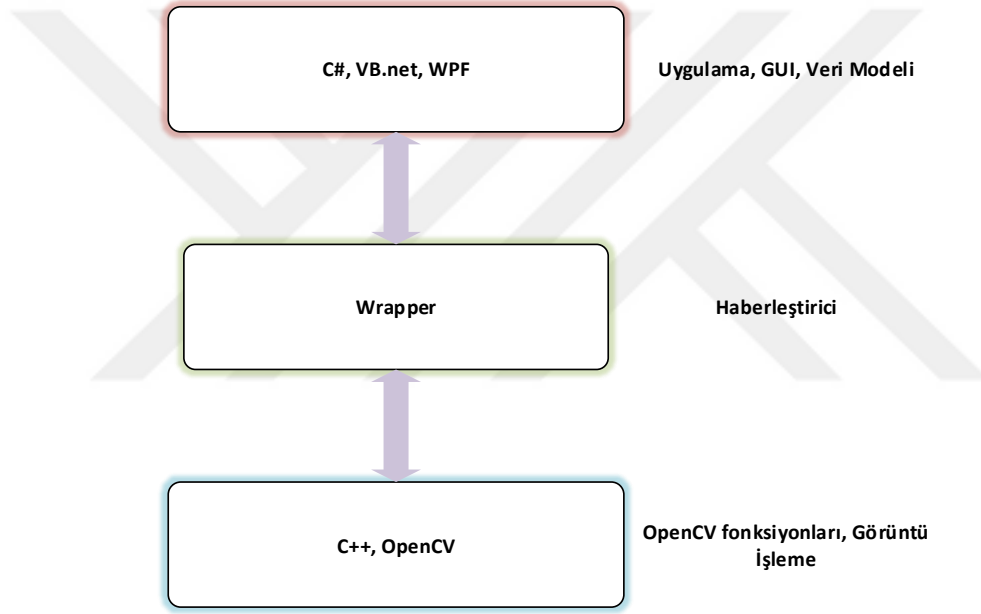
Şekil 4.55’den de görülebileceği üzere bazı temel metotlar hali hazırda arayüz tasarımına eklenmiştir. Fakat ilerleyen versiyonlarda bu filtrelerin genişletilmesi tasarımın sürekli olarak güncel tutulması hedeflenmiştir. Tasarımın bu şekilde gerçekleştirilmesinin sebebi daha önceden hazırlanmış olan kalite kontrol algoritmalarının kullanıcı tarafından doğrudan kullanılabilmesine olanak sağlamaktır. Ayrıca gerçekleştirilen bu ilk sürümde sadece kamera tanınması ve kameralardan alınan görüntülerin gösterilmesi işlemi gerçekleştirilmiştir. Çünkü gerçekleştirilen ilk sürümde OpenCV kütüphanelerinin C# ortamında kullanılabilmesi sağlanmamıştır. Arayüz tasarımının bir sonraki versiyonunda bu kütüphane arayüz üzerinde kullanılabilir hale getirilmiş ve önceki bölümlerde gerçekleştirilmiş olan kalite kontrol algoritmaları bu tasarıma entegre edilebilmiştir.

4.6.4. Arayüz Tasarımı Versiyon 1.1

Bir önceki bölümde (versiyon 1.0) C# programlama dili kullanılarak tasarlanan kullanımı kolay ve kullanıcı dostu arayüz ile işlemlere devam edilmiştir. Versiyon 1.0

olarak geliştirilen arayüze bir eklenti yazılarak OpenCV kütüphanelerinin bu arayüz üzerinde çalışabilmesi sağlanmıştır.

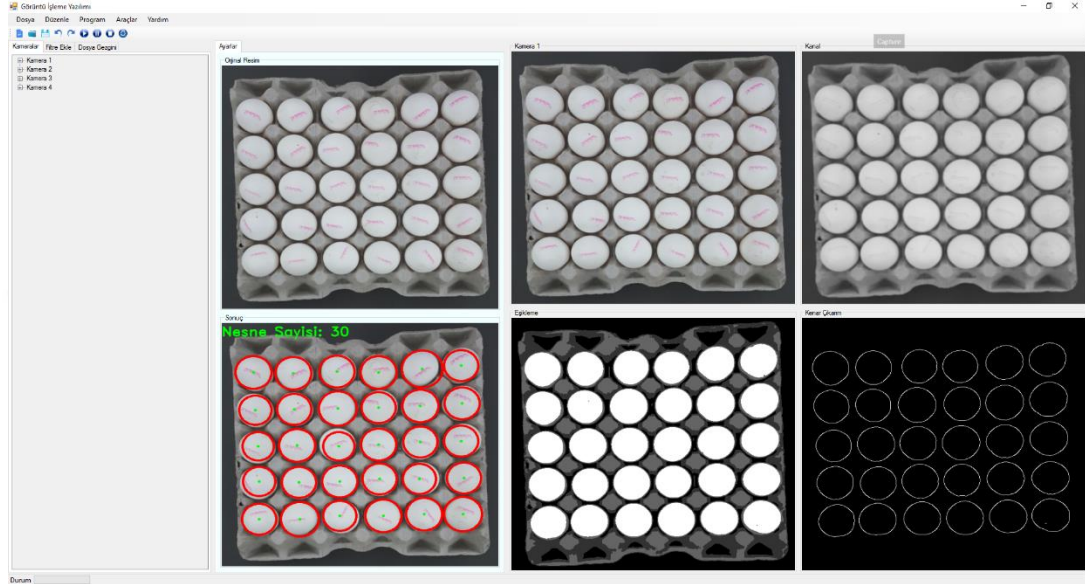
Tez çalışması kapsamında tasarlanan arayüzün kullanıcı dostu olması ve görüntü işleme parametrelerinin kolay bir şekilde ayarlanabilmesi tasarımın öncelikli hedefini oluşturmuştur. İlk olarak Versiyon 1.0 olarak gerçekleştirilen bu tasarımın geliştirilmesine devam edilmiş ve yazılımın sürekli güncellenerek versiyonun yükseltilmesi hedeflenmiştir. Bu amaçlar doğrultusunda OpenCV ve C# arasında haberleşme işlemini gerçekleştirebilecek olan bir wrapper tasarlanmış ve geliştirilmiştir. Wrapper işlemini temel olarak özetleyen bir blok diyagram Şekil 4.56’da verildiği gibidir.



Şekil 4.56. Wrapper işlemi

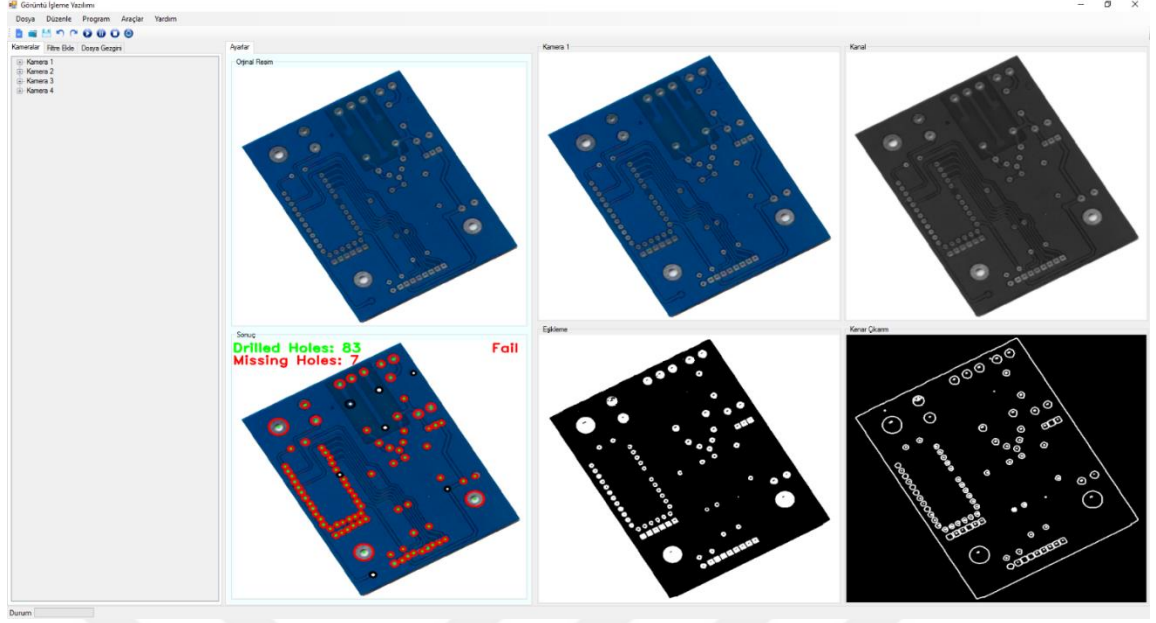
Şekil 4.56’den de görülebileceği üzere Wrapper kavramı temel olarak iki farklı platform arasında haberleşme işlemini gerçekleştiren bir ara bloktur. Bu amaçla piyasada hazırlanmış ve cross-platform olarak kullanılabilen çeşitli wrapper yazılımları mevcuttur. Bu noktada gerçekleştirilen bu projede OpenCvSharp adı verilen ve C# ile yazılmış, son derece güncel olan ve kullanıcılarına lisans sıkıntısı yaşatmayan bir kütüphane tercih edilmiştir. Bilindiği üzere bir önceki bölümde UDP soket programlama aracılığıyla kameradan alınan veriler arayüz üzerinde gösterilmiş fakat C#’da tasarlanan arayüze OpenCV kütüphaneleri gömülemediğinden sıkıntı yaşanmıştı. Gerçekleştirilen bu işlem ile bu problem giderilmiş ve OpenCV görüntü işleme kütüphaneleri arayüz arkasında çalıştırılabilir hale getirilmiştir.

Yine bu duruma bağılı olarak önceki bölümlerde geliştirilmiş olan görüntü işleme ve örüntü tanıma algoritmaları bu arayüze hızlıca entegre edilmiş ve sistem çalışabilir hale getirilmiştir. Bu amaçla Versiyon 1.1 adını alan arayüz ve bu arayüzün anlık çalışmasına ait bir görüntü Şekil 4.57’de verildiği gibidir.



Şekil 4.57. Arayüz tasarımı Versiyon 1.1

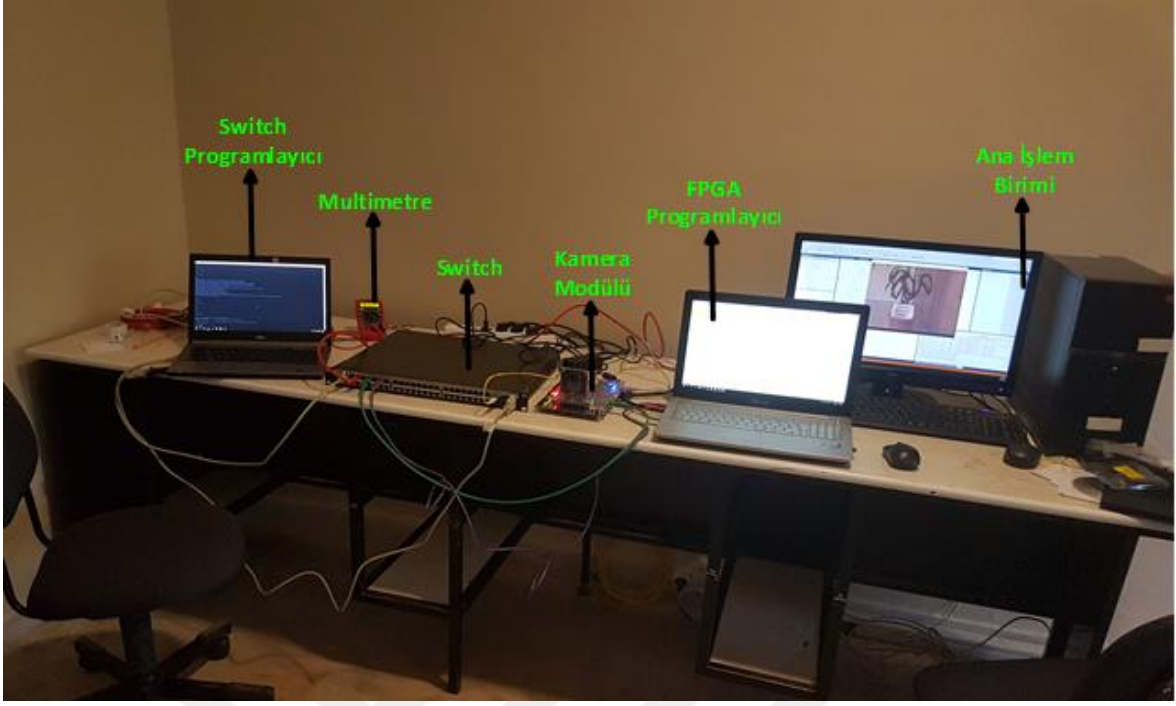
Tez çalışması kapsamında tasarlanan arayüze ait bir görüntü ve hesaplama sonuçları Şekil 4.57’de görülmektedir. Şekilden de görülebileceği üzere ilk pencerede kaynak görüntüye yer verilmektedir. Daha sonrasında renk uzayı dönüşümünden elde edilen sonuç gösterilmektedir. Bir diğer pencerede eşikleme işlemine ait detaylar verilmekte ve son pencerede kenar çıkarımı işleminin sonucu görüntülenmektedir. Sonuç penceresinde ise tespit edilen nesnelere ait detaylar işaretlenerek son kullanıcıya sunulmaktadır. Bu işleme ait başka bir örnek sonuç Şekil 4.58’de verildiği gibidir.



Şekil 4.58. Arayüz tasarımından örnek sonuçlar

4.7. Sistem Tümleştirme

Tez çalışmaları çerçevesinde önerilen bütün bir kalite kontrol sisteminin oluşturulması aşamasında gerçekleştirilen bu bölüm son süreç olup, genel itibariyle önceden hazırlanan alt modüllerin birleştirilmesi sistemin bir bütün olarak ortaya konulmasını hedeflemektedir. Bu süreçte geliştirilen kamera modülü ve ana işlem birimi arasında iletişim sağlanmış olup, bu mevcut sistem arayüz tasarımına entegre edilmiştir. Sistem tümleştirme çalışmalarında yoğun test işlemleri yapılmış ve tam bir sistem elde edilmeye çalışılmıştır. Bu noktada yapılan çalışmalar büyük bir titizlikle yürütülmüş olup, bütünsel bir kalite kontrol sistemi elde edilmiştir. Temel olarak sayısal kamera prototipi, switch, ana işlem birimi, kalite kontrol yazılımı ve arayüz'ün entegrasyonunun sağlandığı bu aşamada kurulan deneysel ortama ait bir görüntü Şekil 4.59'da sunulmaktadır.



Şekil 4.59. Sistem tümleştirme çalışmaları

Şekil 4.59'dan da görülebileceği üzere sistemde temel olarak yer alan ekipmanlar sırasıyla switch programlayıcı, multimetre, switch, sayısal kamera prototipi, FPGA programlayıcı ve ana işlem birimidir. Bu ekipmanlar ve detayları maddeler halinde aşağıda sunulduğu gibidir;

- **Switch Programlayıcı:** Switch programlayıcı olarak bir adet dizüstü bilgisayar kullanılmıştır. Switch üzerindeki portları açmaya ve bu portların ip adreslerini düzenlemeye yarayan bu araç temel olarak sadece ilk aşamada sistemi kurarken kullanılmaktadır.
- **Multimetre:** Gerilim, akım, direnç gibi değerleri ölçmeye yarayan bu alet ile kamera modülünden gelen sinyallerin durumu gözlemlenmiştir.
- **Switch:** Sistemde kullanılan temel araçlardan birisidir. Gerek birden fazla kameranın bağlanacağı gerekse ana işlem biriminin bağlı olacağı bu aygıt 10/100/1000 mbit haberleşme hızına sahiptir.

- **Sayısal Kamera Prototipi:** Önceki bölümlerde de bahsedildiği üzere yüksek çözünürlük ve frame hızında görüntü alabilmeye yarayan araçtır. Tez çalışması çerçevesinde geliştirilen sayısal kamera prototipi ethernet portu üzerinden UDP haberleşme protokolünü kullanarak paket gönderip almaktadır.
- **FPGA Programlayıcı:** FPGA programlayıcı sayısal kamera modülünde yer alan ve gerek haberleşme protokolleri gerekse görüntü sinyalizasyon işlemlerini bünyesinde barındıran Altera Cyclone IV serisi işlemciyi programlamak için kullanılmaktadır.
- **Ana İşlem Birimi:** Çalışma süresince kullanılan ve ilerleyen süreçlerde de aktif olarak kullanılacak olan araçlardan birisi ana işlem birimidir. Ana işlem birimi bünyesinde görüntü işleme ve görüntü tanıma algoritmalarını çalıştıran, bu işlemleri bir arayüz çerçevesinde gerçekleştiren ve kullanıcılarına bir monitör aracılığıyla görüntüleme imkânı sunan bir aygıttır. Bu çalışmada da aktif olarak kullanılan bu birimde Windows 10 işletim sistemi kullanılmaktadır. Ayrıca tez süresince geliştirilen algoritmaların sorunsuz bir şekilde yürütülebilmesi için gerekli framework'ler kurulmuş durumdadır.

Tez çalışması kapsamında geliştirilen FPGA tabanlı sayısal kamera prototipi laboratuvar ortamında test edilmiştir. Test işlemlerinin ardından gerekli tümleştirme çalışmaları yapılarak başarılı bir şekilde kameradan görüntüler alınmıştır. Böylece FPGA tabanlı sayısal kamera için çalışan bir prototip oluşturulmuştur.

Tez çalışması süresince gerçekleştirilen bütünsel kalite kontrol sisteminin kullanılabilirliğini incelemek amacıyla çeşitli saha çalışmaları yapılmıştır. Saha çalışmaları sırasında yapılan gözlemler sonucunda, örnek bir fabrika alt yapısının sistem odası, ağ alt yapısı ve gözlem odası bölümleri olmak üzere üç ana bölümden meydana geldiği belirlenmiştir. Sistem odasında storage, endüstriyel bilgisayarlar, omurga, sunucu ve güvenlik duvarı bulunmaktadır. Konveyörler üzerine sabitlenen FPGA tabanlı sayısal kameralardan alınan görüntüler ağ alt yapısı kullanılarak sistem odasındaki endüstriyel bilgisayarlara aktarılmaktadır. Endüstriyel bilgisayarlara gelen görüntüler ise öncelikli olarak storagelar üzerinde depolanmaktadır. Aynı zamanda gelen bu görüntüler üzerinde kalite kontrol algoritmaları yürütülmekte ve ürünler izlenmektedir. Endüstriyel bilgisayarlarda elde edilen sonuçlar ve diğer görüntüler gözlem odasında bulunan

bilgisayarlarda görüntülenmektedir. Böylece oluşabilecek arıza durumları ve görüntü işleme sonuçları gözlem odasında izlenmektedir. Sistem odası ve gözlem odası arasındaki bağlantı fabrikada bulunan ağ alt yapısı ile sağlanmaktadır. Kameralar switch'lere CAT 6 veya CAT 7 kablolar aracılığıyla bağlanarak görüntüleri sistem odasına aktarmaktadır. Sistem odasında bulunan ana omurga ise fabrika içerisindeki tüm switchler ile single mod fiber kablolar üzerinden bağlanmaktadır. Böylece fabrika içerisinde bulunan tüm cihazlar birbirleri ile ağ üzerinden haberleşebilmekte ve kontrol edilebilmektedir. Saha çalışmaları sürecinde yapılan gözlemler sonucunda elde edilen örnek bir fabrika ağ alt yapısı ve kalite kontrol mimarisi Ek Şekil 4.1'de verilmiştir. Ayrıca Ek Şekil 4.1'de verilen örnek bir fabrikanın ağ alt yapısı ve kalite kontrol sisteminde kullanılan cihazların özellikleri ise Ek Tablo 4.1'de sunulduğu gibidir.

Sistem tümleştirme çalışmalarının son aşaması yazılım tümleştirme işleminin gerçekleştirilmesidir. Önceki bölümlerde de bahsedildiği üzere tez çalışması çerçevesinde çeşitli özgün görüntü işleme ve görüntü tanıma algoritmaları geliştirilmiş olup, bu algoritmalar yine tez çerçevesinde hazırlanan bir arayüze entegre edilmiş durumdadır. Hazırlanan bu arayüzün ve arayüze gömülü programların son kullanıcıya dağıtılabilmesi için yazılım geliştirme platformundan bağımsız olarak bu yazılımın nihai kullanıcıların bilgisayarlarına kurulabilmesi gerekmektedir. Yazılım tümleştirme sürecinde de bu işlemler gerçekleştirilmiş ve gerçekleştirilen algoritmalar ile tasarımlar bir kurulum dosyası haline getirilmiştir. Bu sayede kolaylıkla kullanıcıların bilgisayarlarına kurulabilmekte ve kullanıcılar bilgisayarlarına herhangi bir geliştirme platformu kurmadan kalite kontrol yazılımını kullanabilmektedirler.

Yazılım tümleştirme sürecinde hazırlanan kurulum dosyası Framework 4.5 çatısı altında çalışmaktadır ve yine programın çalışması esnasında kullanıcıların bilgisayarına otomatik olarak yüklenebilmektedir. Gerçekleştirilen bu işlem Visual Studio platformu için sağlanan ek paketler ile elde edilmiştir. Hem ek paket hem de kurulum projesine ait ekran görüntüleri sırasıyla Ek Şekil 4.2, 4.3, 4.4 ve 4.5'de sunulmuştur.

4.8. Kalite Kontrol Yazılımı için Performans Analizi

Kalite kontrol algoritmalarının geliştirildiği bu bölümde görüntü işleme ve görüntü tanıma algoritmaları gerçekleştirilmiş olup yine tez süresince tasarlanan bir arayüze bu uygulamalar gömülmüş durumdadır. Gerçekleştirilen bu görüntü işleme ve görüntü tanıma algoritmaları

öncelikli olarak CPU için çalışabilecek şekilde gerçekleştirilmiş ve test edilmiştir. Bu işlemin ardından aynı algoritmalar CPU ve GPU beraber çalışacak şekilde yeniden tasarlanmış ve ölçüm işlemleri yapılmıştır. Gerçekleştirilen algoritmalarda CPU kullanımı durumunda işlemler tek çekirdek üzerinden yapılmış olup, herhangi bir paralel programlama işlemi gerçekleştirilmemiştir. CPU ve GPU'nun bir arada kullanıldığı aynı uygulamada ise özellikle CPU'nun zamansal açıdan kötü performans gösterdiği fonksiyonlar GPU'da çalışabilecek forma getirilmiş ve ölçüm işlemleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen bu test işlemleri farklı görüntü çözünürlükleri için yapılmış olup, bu testlere ait detaylı performans ve analiz sonuçları Tablo 4.10'da verildiği gibidir.

Tablo 4.10. Kalite kontrol yazılımı için performans analizi

Görüntü Çözünürlüğü	Fonksiyonlar	Piksel Sayısı	CPU için			CPU+GPU için		
			TF	İF	Kayıp (%)	TF	İF	Kayıp (%)
640x480	Hafızaya Yükleme	307200	100	82	18	101	97	2.97
	Renk Dönüşümü							
	Gauss Filtresi							
	Kenar Çıkarımı							
	Erozyon ve Dilasyon							
	Otsu							
	Hough Dönüşümü							
800x600	Hafızaya Yükleme	480000	65	56	13.8	65	64	1.54
	Renk Dönüşümü							
	Gauss Filtresi							
	Kenar Çıkarımı							
	Erozyon ve Dilasyon							
	Otsu							
	Hough Dönüşümü							
1280x720	Hafızaya Yükleme	921600	33	26	21.2	34	34	0
	Renk Dönüşümü							
	Gauss Filtresi							
	Kenar Çıkarımı							
	Erozyon ve Dilasyon							
	Otsu							
	Hough Dönüşümü							

Tablo 4.10'un devamı

Görüntü Çözünürlüğü	Fonksiyonlar	Piksel Sayısı	CPU için			CPU+GPU için		
			TF	İF	Kayıp (%)	TF	İF	Kayıp (%)
1600x1200	Hafızaya Yükleme	1920000	16	12	25	16	15	6.25
	Renk Dönüşümü							
	Gauss Filtresi							
	Kenar Çıkarımı							
	Erozyon ve Dilasyon							
	Otsu							
2592x1944	Hafızaya Yükleme	5038848	6	4	33.3	6	6	0
	Renk Dönüşümü							
	Gauss Filtresi							
	Kenar Çıkarımı							
	Erozyon ve Dilasyon							
	Otsu							
	Hough Dönüşümü							

Tablo 4.10'dan da görülebileceği üzere TF ile belirtilen alan toplam gelen frame sayısını gösterirken, İF ile gösterilen alan işlenen frame miktarını belirtmektedir. Yine tablodan da görülebileceği üzere CPU ve GPU işlemcilerin bir arada kullanıldığı uygulamalar aynı kod için sadece CPU kullanılarak yazılan uygulamalara kıyasla oldukça performanslı olmaktadır. Gerçekleştirilen test işlemlerinde her iki taraf için de aynı fonksiyonlar çalıştırılmış ve test edilmiştir.

5. SONUÇLAR

Günümüzde kalite kontrol sistemleri birçok endüstriyel alanda sıklıkla kullanılan ve üretim sürecini doğrudan etkileyen sistemlerdir. Ürün tanıma, sayma, kusur tespiti, barkod okuma ve ölçüm yapma gibi çok farklı ve çeşitli alanlarda kullanılan bu sistemler çok kısa sürelerde hesaplamalar yapabilmekte ve kullanıcılarına kusursuz sonuçlar sunabilmektedir. Tahmin edilebileceği üzere ürünlerin özelliklerinin belirlenebilmesi amacıyla iki farklı yöntem kullanılmaktadır. Bunların ilki genellikle bir uzman görüşüne dayanan ve yakın izleme yoluyla yapılan kontrollerdir. Bu kontrol yaklaşımının en önemli problemi insan gözünün görebilme kabiliyetinin belli kısıtlara sahip olmasıdır. Ayrıca aynı anda birden fazla ürünün çok hızlı bir şekilde bant üzerinden geçebileceği göz önüne alındığında bu kez de gözün anlık algılayabilme kapasitesi ile ilgili bir problem ortaya çıkmaktadır. Tüm bu durumlar göz önüne alındığında bir uzman kontrolüne dayanan ve temaslı yapılan bu ölçümlerin yetersiz kaldığı net bir şekilde görülecektir. Ürün ölçümüne yönelik bir diğer yaklaşımda ise kalite kontrol sistemleri kullanılmaktadır. Kalite kontrol sistemlerinde temel amaç ürün veya ürünleri gözlemleyebilecek bir veya birden fazla kamera ile istenen ölçümleri uzaktan temassız bir şekilde gerçekleştirebilecek bir platform oluşturmaktır. Bu sistemler ile herhangi bir uzman görüşüne gereksinim duyulmadan ölçümler oldukça hızlı ve kusursuz bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Ayrıca insan gözü ile kıyaslanacak olursa örneğin kamera üzerinde kullanılacak lensin türüne göre görüş açısı artırılıp azaltılabilmektedir. Yine ürünlere bilgisayarlı kontrol ile yakınlaştırma veya uzaklaştırma yapılabilmekte ve buna bağlı olarak ürünlerdeki detaylar net bir şekilde görüntülenebilmektedir. İnsan gözünün görüş açısı düşünüldüğünde bu sistemlerin esnekliği önemli avantajlar sağlamaktadır. Ayrıca gözün anlık algılayabilme kapasitesi ile karşılaştırma yapılacak olursa, kalite kontrol sistemlerinde kullanılan kamera sistemlerinin oldukça hızlı olduğu görülecektir. Tüm bu durumlar göz önüne alındığında yenilikten uzak insan görüşüne dayalı temaslı ölçüm sistemlerinin yerine, bu şekilde inovatif, çağa ayak uyduran, istenildiği takdirde genişletilebilen sistemlerin kullanılması oldukça yerinde olacaktır.

Gerçekleştirilen bu doktora tezi çalışmasında sayısal kamera, ana işlem birimi ve kalite kontrol yazılımından meydana gelen bir akıllı kalite kontrol sistemi oluşturulmuştur. Geliştirilen bu sistemin çeşitli yönlerden değerlendirilmesi ve sunmuş olduğu katkılar alt bölümler halinde detaylı bir şekilde sunulmaktadır.

5.1. Maliyet Analizi

Kalite kontrol yaklaşımlarında insan ve makine gücünün fiyat değerlendirmesi yapıldığında bu sistemlerin çok kısa süreler içerisinde kendisini amorti edebileceği görülmektedir. Bunun temel sebebi bu sistemlere sadece bir kereliğine mahsus olarak yatırım yapılması ve uzun süreler boyunca bu sistemlerin kullanılabilmesidir. Kalite kontrol sistemleri genel olarak 3 ana bölümden meydana gelmektedir. Bunlar sırasıyla aşağıda verildiği gibidir:

- ➔ Sayısal kamera
- ➔ Ana işlem birimi
- ➔ Kalite kontrol yazılımı

Kalite kontrol sistemlerinde kullanılan sayısal kameralar sistemin en önemli parçasıdır. Piyasada genellikle çok yüksek fiyatlar ile satılan bu kameralar oldukça uygun maliyetlere mal edilmektedir. Gerçekleştirilen bu tez çalışmasında önerilen kalite kontrol sistemi temel olarak bir adet görüntü sensör kartı, bir adet görüntü sensör kartı ile haberleşmeye imkan tanıyan işlemci kartı ve ana işlem biriminden meydana gelmektedir. Tablo 5.1’de doktora tezi kapsamında geliştirilen bu kalite kontrol sisteminin maliyet analizi sunulmaktadır.

Tablo 5.1. Geliştirilen kalite kontrol sisteminin maliyet analizi

No	Çalışma alanı	Özellikler	Maliyet (\$)
1	Görüntü sensör kartı	5 Megapiksel (2592x19545) 1/2.5" CMOS Aptina MT9PX serisi	31.5
2	İşlemci kartı	Altera Cyclone IV İşlemci, DDR Ram, 10/100/1000 Mbit	333.2
3	Ana işlem birimi	Intel i7 İşlemci 16 GB Ram, 1 TB Harddisk, 4 GB Ekran Kartı, Frame Grabber	2128.5
Toplam			2493.2

*Kalite kontrol yazılımı değerlendirmeye alınmamıştır.

**Ana işlem birimi fiyatlandırması kullanıcı isteğine bağlı değişebilmektedir.

Tablo 5.1’den de görülebileceği üzere tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen bu sistem yaklaşık 2500 dolara mal olmaktadır. Ayrıca sistemin en önemli bölümü olan sayısal kamera ise 350 dolar bir maliyetle elde edilebilmektedir.

5.2. Bilimsel Katkılar

Gerçekleştirilen bu tez çalışmasında bütün bir kalite kontrol sistemi elde edilmiştir. Bu çerçevede bir adet sayısal kamera, bir adet ana işlem birimi ve bu modüller ile uyumlu çalışabilecek bir kalite kontrol yazılımı gerçekleştirilmiştir. Tamamen özgün bir şekilde gerçekleştirilen bu çalışmada kullanıcı dostu ve kullanımı kolay bir arayüz oluşturulmuş olup, elde edilen sonuçlar bu arayüz üzerinden gösterilmektedir. Gerçekleştirilen bu tez çalışması ile bilimsel yönden çeşitli katkılar sunulmuştur. Bu kapsamda sağlanan katkılar maddeler halinde aşağıda verildiği gibidir:

- Tezin başlangıç sürecinden son aşamasına kadar literatür ve saha araştırmaları yapılmıştır. Yapılan bu araştırmalar neticesinde kalite kontrol sistemlerine yönelik detaylı bir analiz elde edilmiştir.
- Çok çeşitli işlemci kartları kullanılmış olup, bu kartların avantaj ve dezavantajları detaylı bir şekilde incelenmiştir.
- Literatürde sıklıkla kullanılan fakat genellikle detayları paylaşılmayan veri aktarım protokolleri incelenmiş ve gerçek bir uygulama üzerinde test edilmesi sağlanmıştır.
- Günümüzde Ethernet tabanlı haberleşme protokollerinin sağlamış olduğu teorik hız olan 1 gbps hıza geliştirilen uygulama sayesinde ulaşılmış ve görüntü veri paketleri kayıpsız bir şekilde ana makineye iletilmiştir.
- Veri aktarım protokolü gerçekleştirilirken OSI referans modelinin tüm katmanları geliştirilmiş ve aktif bir şekilde uygulamada kullanılmıştır.
- Tez çalışması kapsamında geliştirilen sayısal kamera prototipi kullanılarak çeşitli akıllı kalite kontrol algoritmaları gerçekleştirilmiştir.
- Önerilen kalite kontrol algoritmaları tamamen özgün olarak geliştirilmiş ve birçok farklı endüstriyel alanda kullanılabilecek şekilde adaptif olarak hazırlanmıştır.
- Genellikle hazır sistemlerin kullanıldığı ve bu sistemlere uygun olarak algoritmaların geliştirildiği literatürdeki çalışmalardan farklı olarak, geliştirilen kamera prototipi ürün sayma, tanıma ve kusur bulma işlemlerinde aktif olarak kullanılmıştır.
- Geliştirilen bu özgün algoritmalar çeşitli bilimsel toplantılarda yayınlanmış, sunulmuş ve akademik yayınlara dönüştürülmüştür.

5.3. Toplam Sistem

Gerçekleştirilen bu doktora tez çalışması kapsamında kalite kontrol sistemlerinde oldukça önemli bir yere sahip olan örnek bir sayısal kamera prototipi geliştirilmiştir. Sayısal kamera prototipi temel olarak konveyörler üzerinden geçen ürünleri izleyen, bunların görüntülerini alan ve hesaplamasının yapılabilmesi amacıyla ana işlem birimine gönderen bölümdür. Bu bölüm kalite kontrol sistemlerinin kalbi olarak nitelendirilebilecek bir birimdir. Bant üzerinden geçen ürünlerin görüntülerinin kusursuz bir şekilde alınabilmesi ve gönderilebilmesi sistem performansını doğrudan etkileyen en önemli kriterdir. Ayrıca bünyesinde barındırdığı lens ile ürünlerin çeşitli özelliklerini gözlemleyebilmektedir. Bu sayede insan gözünün algılayamadığı ölçekte görüntüler alabilmekte ve ana işlem birimine iletebilmektedir. Yine tez çalışması sürecinde geliştirilen ve kalite kontrol sistemlerinde kullanılan ana işlem birimi sayısal kamera ile çift yönlü iletişim kurabilen bir bölümdür. Kameradan gelen görüntüyü işleyebilmek amacıyla yazılıma gönderen veya kamerayı yönetebilmek amacıyla kalite kontrol yazılımından gelen bilgiyi sayısal kameraya ileten bölümdür. Başka bir deyişle sayısal kamera ve kalite kontrol yazılımı arasında köprü görevi görmektedir.

Kalite kontrol sistemlerinin son bölümü ise ürün kontrolü ve kusur tespiti gibi işlemler için gerçekleştirilmiş olan kalite kontrol yazılımlarıdır. Bu yazılım ile kalite kontrol sistemini kullanan kullanıcılar, sisteme bağlı olan sayısal kameraları kontrol edebilmekte, gerçekleştirilen işlemleri izleyebilmekte, sonuçları analiz edebilmekte ve raporlayabilmektedir. Ayrıca bünyesinde barındırdığı çeşitli görüntü işleme ve görüntü tanıma algoritmaları ile de bu hesaplama işlemlerini gerçekleştirebilmektedir. Temel olarak tez çalışması kapsamında hazırlanan bir arayüz arkasında çalışan bu algoritmalar ile konveyör üzerinden geçen çeşitli ürünlere ait teknik özellikler çok hızlı ve detaylı bir şekilde belirlenebilmektedir.

Bu kapsamda tez süresince elde edilen toplam sistem ve bu sistemin elde edilebilmesi için gerçekleştirilen tüm çalışmalar maddeler halinde aşağıda özetlendiği gibidir:

- Tez çerçevesinde gerçekleştirilecek kameraya ait teknik detaylar tespit edilmiş ve sayısal kamera prototipi için ilk çalışmalar başlatılmıştır.

- Bu amaçla ARM tabanlı bir kart olan STM32F serisi kartlar üzerinde kamera modülü için yazılım geliştirme yapılmış olup, ardından Cyclone IV serisi FPGA işlemci kullanılarak geliştirme sürecine devam edilmiştir.
- FPGA üzerinde kameradan görüntü verisinin okunmasının ardından veri aktarım protokolleri incelenmiş ve görüntünün UDP formatında aktarılması gerektiğine karar verilmiştir.
- FPGA ve bilgisayar arasında iletişim sağlayabilmek amacıyla UDP veri aktarım protokolüne göre yazılım geliştirilmiş ve kameradan elde edilen piksel verileri bu UDP paketinin içerisine gömülerek ana bilgisayara aktarılmıştır.
- Bu aktarım neticesinde yaklaşık 960 MBit üzeri hızlara erişilmiş ve yapılan hesaplama göre saniyede 115-125 MB veri aktarılabilirdiği görülmüştür.
- Gerçekleştirilen bu çalışmalar neticesinde kamera modülü için yazılımlar tamamlanmış ve çalışmalar görüntü işleme ile görüntü tanıma algoritmalarına kaydırılmıştır.
- Görüntü işleme ve görüntü tanıma algoritmaları kapsamında nesne tespiti, nesne sayma, kusur tespiti, ölçüm yapma gibi çeşitli alanlarda geliştirmeler yapılmıştır.
- Kalite kontrol yazılımı çerçevesinde bir arayüz tasarımı yapılmış ve bir önceki maddede gerçekleştirilen algoritmalar arayüzün arkasında çalışabilecek hale getirilmiştir.
- Her iki modülün tamamlanmasının ardından ana işlem birimi için gerekli ön tasarımlar yapılmış ve sistem performansı ölçülmüştür.
- Yapılan ölçümlere göre ana işlem biriminde gerekli yükseltmeler yapılmış olup, ek donanımlar ile sistemin aynı anda birden fazla kamera ile çalışabilmesi sağlanmıştır.
- Bu amaçla sisteme iki adet 4 kanallı frame grabber kartı eklenmiş ve kameraların aynı anda çalışabilmesine olanak sağlanmıştır.
- Yine 4 kameradan daha fazla sistemi test etmek için ana işlem biriminin yanına bir adet switch eklenmiş ve bu switchin konfigürasyonu yapılarak kamerayla olan iletişimi incelenmiştir.
- Gerçekleştirilen tüm bu çalışmalar neticesinde elde edilen donanımsal ve yazılımsal alt modüller sistem tümleştirme çalışmaları ile birleştirilmiş ve tek bir çalışan sistem elde edilmiştir.

5.4. Önerilen Kontrol Algoritmalarının Karşılaştırılması

Doktora tez çalışması kapsamında geliştirilen sayısal kamera prototipi ile entegre bir şekilde çalışabilen çeşitli akıllı kalite kontrol algoritmaları geliştirilmiştir. Temel olarak ürün sayma, boyut ölçme ve kusur tespiti amacıyla çalışan bu algoritmalar farklı endüstriyel ürünlere yönelik olarak geliştirilmiş olup, yine birçok farklı endüstriyel alanda kullanılabilecek niteliktedir. Tez süresince geliştirilen bu özgün algoritmaların detayları ve özellikleri Tablo 5.2’de sunulduğu gibidir.

Tablo 5.2. Önerilen kalite kontrol algoritmalarının özellikleri

No	Önerilen Yöntem	Özellikler	Kullanılan Alan
1	Nesne Sayma-1	Yüksek hızda dönen bant üzerinde yer alan etiketlerin tespit edilmesi ve saydırılması	Ambalaj endüstrisi
2	Nesne Sayma-2	Yüksek hızda dönen bant üzerinde yer alan etiketlerin tespit edilmesi ve sayılması	Ambalaj endüstrisi
3	Nesne Sayma-3	Bant üzerinden geçen yumurta ve soda şişesi paketlerinin tespit edilmesi ve saydırılması	Paketleme endüstrisi, Gıda endüstrisi
4	Boyut Ölçüm	Bant üzerinden geçen su ve soda şişelerinin tespit edilmesi ve boyutlarının ölçülmesi	Şişeleme endüstrisi, Gıda endüstrisi
5	Kusur Tespiti	Bant üzerinden geçen PCB kartlarında yer alan kusurların tespit edilmesi	Baskı devre endüstrisi
6	Çözünürlük Arttırma	Düşük özelliklere sahip birden fazla kamera kullanılarak yüksek çözünürlüklü görüntü elde edilmesi	Ambalaj endüstrisi

Tablo 5.2’den de görülebileceği üzere tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen yöntemler çeşitli endüstriyel alanlar için geliştirilmiştir. Temel olarak ambalaj, gıda ve baskı devre endüstrisine yönelik olarak geliştirilen bu uygulamalar birçok farklı alanda da kullanılabilecek niteliktedir.

Ürün sayma, boyut ölçüm ve kusur tespitine yönelik çeşitli özgün uygulamaların geliştirilmesinin temel nedeni bu uygulamaların birçok endüstriyel alanda aktif olarak kullanılmasından ve ihtiyaç duyulmasından dolayıdır. Bu çerçevede doktora tezi çalışması kapsamında geliştirilen bu algoritmalar çok küçük düzeyde yapılacak değişiklikler ile ilaç, otomotiv, tekstil ve tarım gibi çeşitli endüstriyel alanlarda kullanılabilecek niteliktedir.

5.5. Gelecek Çalışmalar

Bölüm başında da belirtildiği üzere tamamen özgün ve piyasa ihtiyaçları göz önünde bulundurularak gerçekleştirilen bu tez çalışması neticesinde elde edilen başta sayısal kamera olmak üzere kalite kontrol yazılımı ve Türkçe arayüze sahip bu kalite kontrol sisteminin piyasada yer alan birçok firmanın ihtiyacını karşılayacağı düşünülmektedir. Bu amaçla gelecekte hedeflenen bazı çalışmalar ve çıktılar maddeler halinde aşağıda verildiği gibidir:

- Gerçekleştirilen sayısal kamera prototipinin paket bir ürün haline getirilerek özellikle yerli üreticinin kullanımına sunulması hedeflenmektedir.
- Tez çalışması süresince geliştirilen akıllı kalite kontrol algoritmalarının daha farklı endüstriyel alanlarda kullanılabilir hale getirilmesi ve piyasada yer alan üreticilerin problemlerini çözebilmesi hedeflenmektedir.
- Geliştirilen tüm sistem, yazılım ve algoritmaların bir paket haline getirilerek kullanıma hazır hale getirilmesi planlanmaktadır.
- Daha farklı endüstriyel alanlar için yeni çözümlerin geliştirilmesi ve üreticilerin farklı problemlerine farklı çözüm önerilerinin getirilmesi amaçlanmaktadır.
- Geliştirilecek tüm yöntem ve algoritmaların bilimsel olarak dökümanite edilmesi ve kalite kontrol alanında yapılan bilimsel çalışmalara katkı sağlanması gelecek temel hedefler arasında yer almaktadır.

Gerçekleştirilen bu doktora tez çalışması 0743.STZ.2014 no'lu SAN-TEZ projeleri kapsamında yapılmıştır. Özellikle endüstride sanayi 4.0'a geçişin başladığı günümüzde böylesi sistemlerin kullanımının yaygınlaştırılacağını ve doktora tezi kapsamında gerçekleştirilen bu proje çalışmasının ülkemiz istihdamına ve yüksek teknoloji ürün ihracatına katkı sağlayacağını ümit ederim.

KAYNAKLAR

- [1] **Lee, K. H. and Park T. H.**, 2010. Image segmentation of UV pattern for automatic paper-money inspection, *11th International Conference on Control Automation Robotics and Vision (ICARCV)*, Singapore, December 7-10, 1175-1180.
- [2] **Lee, J. H., Lee, J. M., Kim, H. J. and Moon Y. S.**, 2008. Machine vision system for automatic inspection of bridges, *Congress on Image and Signal Processing (CISP)*, Hainan, China, May 27-30, 363-366.
- [3] **Yoshino, K., Miwa, Kanamaru, M., A. and Kanai, N.**, 2010. An automatic through-hole inspection system by analyzing laser diffraction pattern, *Proceedings of Annual Conference (SICE)*, Taipei, Taiwan, August 18-21, 2155-2160.
- [4] **Ge, X.**, 2012. The design of a global shutter CMOS image sensor in 110 nm technology, *Master of Science Thesis*, Delft University of Technology.
- [5] **Lim, S. H.**, 2003. Video-processing applications of high speed cmos image sensors, *The Degree of Doctor of Philosophy*, Stanford University.
- [6] **Palakodety, A.**, 2007. CMOS active pixel sensors for digital cameras: current state of the art, *The Degree of Master of Science*, University of North Texas.
- [7] **Bravo, I., Balinas, J., Gardel, A., Lazaro, J. L., Espinosa, F. and Garcia, J.**, 2011. Efficient smart CMOS camera based on FPGAs oriented to embedded image processing, *Sensors*, **11**, 2281-2302.
- [8] **Kim, Y. S., Kim, H. S., Lee, R. and Kang, S.**, 2009. FPGA based verification methodology of SoC-type CMOS image signal processor, *IEEE International SOC Conference (SOCC)*, Belfast, United Kingdom, September 9-11, 231-234.
- [9] **URL-1**, <https://www.sonyalpharumors.com/sony-will-no-more-make-ccd-sensors-future-is-cmos-only/>. CCD and CMOS. 01 Mart 2018.
- [10] **URL-2**,
https://www.globalspec.com/learnmore/video_imaging_equipment/video_cameras_accessories/cmos_cameras. CMOS Cameras Information. 01 Mart 2018.
- [11] **Mosqueron, R., Dubois, J. and Paindavoine M.**, 2007. High-speed camera with high resolution, *EURASIP Journal on Embedded Systems*, **2007**, 23-23.
- [12] **Krymski A. I., Bock N. E., Nianrong T. and Blerkom D. V.**, 2003. A high-speed, 240 frame/s, 4.1-mpixel CMOS sensor, *IEEE Transactions on Electron Devices*, **50**, 130-135.

- [13] **Mosqueron, R., Dubois J. and Paindavoine M.,** 2006. Embedded image processing/compression for high speed cmos sensor, *14th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*, Florance, Italy, September 4-8, 1-5.
- [14] **Norouznezhad, E., Bigdeli, A., Postula, A. and Lovell, B. C.,** 2008. A high resolution smart camera with GigE Vision extension for surveillance applications, *Second ACM/IEEE International Conference on Distributed Smart Cameras (ICDSC)*, Stanford, CA, USA, September 7-11, 1-8.
- [15] **Said, Y., Saidani, T., Smach, F., Atri, M. and Snoussi, H.,** 2013. An FPGA based smart camera system, *Third International IEEE Conference (IPWIS)*,1-6.
- [16] **Köhler, T., Röchter, F., Lindemann, J. P. and Möller, R.,** 2009. Bio-inspired motion detection in an FPGA based smart camera module, *Bioinspiration and Biomimetics*, **4**, 1-15.
- [17] **Hiraiwa, E. V. and Toral, S.,** 2010. An FPGA based embedded vision system for real-time motion segmentation, *17th International Conference on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP)*, Rio de Janeiro, Brazil, June 17-19, 360-363.
- [18] **Ishii, I., Tatebe, T., Gu, Q., Moriue, Y., Takaki, T. and Tajima K.,** 2010. 2000 fps real-time vision system with high-frame-rate video recording, *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Anchorage, AK, USA, May 3-7, 1536-1541.
- [19] **Xia, H., Su, X., Liu, P. and Liu, B.,** 2014. A Design of Mosaic Line-scan Camera Based on FPGA, *IEEE/ACIS 13th International Conference on Computer and Information Science (ICIS)*, Taiyuan, China, June 4-6, 455-458.
- [20] **Pei, Z., Zhang, Y., Yang, T. and Chen, X.,** 2012. A novel method for detecting occluded object by multiple camera arrays. *9th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD)*, Sichuan, China, May 29-31, 1673-1677.
- [21] **Yingen, X. and Pulli, K.,** 2010. Color matching for high-quality panoramic images on mobile phones, *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, **56**, 4, 2592-2600.
- [22] **Qureshi, H. S., Khan, M. M., Hafiz, R., Cho, Y. and Cha, J.,** 2012. Quantitative quality assessment of stitched panoramic images, *IET Image Processing*, **6**, 9, 1348-158.
- [23] **Yingen, X. and Pulli, K.,** 2010. Fast panorama stitching for high-quality panoramic images on mobile phones, *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, **56**, 2, 298-306.

- [24] **Karakose, M. and Baygin, M.**, 2014. Image processing based analysis of moving shadow effects for reconfiguration in pv arrays, in *IEEE International Energy Conference (ENERGYCON)*, Dubrovnik, Croatia, May 13-16, 724-728.
- [25] **Szeliski, R.**, 2006. Image alignment and stitching: A tutorial, *Foundations and Trends® in Computer Graphics and Vision*, **2**, 1, 1-104.
- [26] **Zhen, H., Yewei, L. and Jinjiang, L.**, 2010. Image stitch algorithm based on SIFT and MVSC, *Seventh International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD)*, Yantai, Shandong, August 10-12, 2628-2632.
- [27] **Kanade, T., Rander, P. and Narayanan, P. J.**, 1997. Virtualized reality: constructing virtual worlds from real scenes, *IEEE Multimedia*, **4**, 1, 34-37.
- [28] **Wilburn, B., Joshi, N., Vaish, V., Talvala, E. V., Antunez, E., Barth, A., Adams, A., Horowitz, M., and Levoy, M.**, 2005. High performance imaging using large camera arrays, in *Proc. ACM Siggraph*, Los Angeles, California, USA, August 1-4, 765–776.
- [29] **Zhang, C. and Chen, T.**, 2004. A self-reconfigurable camera array, in *Proc. 15th Eurographics Symposium on Rendering*, Los Angeles, California, August 8-12, 243–254.
- [30] **Lei, C. and Yang, Y. H.**, 2009. Efficient geometric, photometric, and temporal calibration of an array of unsynchronized video cameras, *Computer and Robot Vision*, Kelowna, BC, Canada, May 25-27, 162-169.
- [31] **Joshi, N., Matusik, W. and Avidan, S.**, 2006. Natural video matting using camera arrays, in *Proc. ACM Siggraph*, Boston, MA, USA, August 1-3, **25**, 779-786.
- [32] **Taguchi, Y., Takahashi, K. and Naemura, T.**, 2008. Real-time all-in-focus video-based rendering using a network camera array, *3DTV Conference: The True Vision - Capture, Transmission and Display of 3D Video*, Istanbul, Turkey, May 28-30, 241-244.
- [33] **Vaish, V., Wilburn, B., Joshi, N. and Levoy, M.**, 2004. Using plane + parallax to calibrate dense camera arrays, in *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Washington, DC, USA, July 1-2, 2-9.
- [34] **Wilburn, B., Joshi, N., Vaish, V., Levoy, M., and Horowitz, M.**, 2004. High-speed videography using a dense camera array, in *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Washington, DC, USA, July 1-2, 2-9.

- [35] **Wilburn, B., Smulski, M., Kelin Lee, H. and Horowitz, M.,** 2002. The light field video camera” in *Proc. SPIE Electronic Imaging*, San Jose, CA.
- [36] **Mettripun, N. and Amornraksa, T.,** 2014. Image Gradient Index for Classifying Digital Camera and Scanned Images, *14th International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT)*, Incheon, South Korea, September 24-26, 474-478.
- [37] **Nguyen, T., Le, N. T. and Jang, Y. M.,** 2015. Practical Design of Screen-to-Camera based Optical Camera Communication, *International Conference on Information Networking (ICOIN)*, Cambodia, January 12-14, 369-374.
- [38] **Hu, R., Zhang, J., Yu, H. and Liu, Y.,** 2014. Design and implementation of a surveillance camera system with face recognition functionality, *IEEE International Conference on Electron Devices and Solid-State Circuits (EDSSC)*, Chengdu, China, June 18-20, 1-2.
- [39] **Bae, K. and Park, B. K.,** 2015. Compact Approach for High Dynamic Range Imaging in Mobile Digital Camera, *IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*, Las Vegas, NV, USA, January 9-12, 339-342.
- [40] **Nguyen, T., Hong, C. H., Le, N. T. and Jang, Y. M.,** 2015. High-Speed Asynchronous Optical Camera Communication using LED and Rolling Shutter Camera, *Seventh International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*, Sapporo, Japan, July 7-10, 214-219.
- [41] **Khalifat, J., Ebrahim, A., Adetomi, A. and Arslan, T.,** 2015. A Dynamic Partial Reconfiguration Design for Camera Systems, *NASA/ESA Conference on Adaptive Hardware and Systems (AHS)*, Montreal, QC, Canada, June 15-18, 1-7.
- [42] **Kuhajda, B., Martinek, R., Kelnar, M., Vanus, J. and Bilik, P.,** 2015. New Strategies for Frequency Measurement using High-Speed Video Camera System, *International Conference on Applied Electronics (AE)*, Pilsen, Czech Republic, September 8-9, 125-130.
- [43] **Jeong, I. and Finkelstein, J.,** 2015. Introducing Contactless Assesment of Heart Rate Variability Using High Speed Video Camera, *36th IEEE Sarnoff Symposium*, Newark, USA, September 20-22, 7-11.
- [44] **Ayub, M. A., Mohamed, A. B. and Esa, A. H.,** 2014. In-line inspection of roundness using machine vision, *2nd International Conference on System-Integrated Intelligence: Challenges for Product and Production Engineering*, **15**, pp. 807-816.
- [45] **Nashat, S., Abdullah, A. and Abdullah, M. Z.,** 2014. Machine vision for crack inspection of biscuits featuring pyramid detection scheme, *Journal of*

Food Engineering, **120**, 233-247.

- [46] **Yang, Y., Miao, C., Li, X., and Mei, X.**, 2014. On-line conveyor belts inspection based on machine vision, *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, **125**, 19, 5803-5807.
- [47] **Golkar, E. and Prabuwo, A. S.**, 2013. Vision Based Length Measuring System for Ceramic Tile Borders, *Procedia Technology*, **11**, 771-777.
- [48] **Thammasorn, P., Boonchu, S. and Kawewong A.**, 2013. Real-time method for counting unseen stacked objects in mobile, *20th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, Melbourne, VIC, Australia, September 15-18, 4103-4107.
- [49] **Subramanian, S. and Bhadrinarayana, L. V.**, 2009. A Memory Efficient Algorithm for Real Time Object Counting, *IEEE International Advance Computing Conference (IACC)*, Patiala, India, March 6-7, 245-248.
- [50] **Baygin, M. and Karakose, M.**, 2015. A new image stitching approach for resolution enhancement in camera arrays, *9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, Bursa, Turkey, November 26-28, 1186-1190.
- [51] **Raman, M. S. and Sukanya, M.**, 2012. A novel labelling algorithm for object counting, *3th International Conference on Computing Communication & Networking Technologies (ICCCNT)*, Coimbatore, India, July 26-28, 1-7.
- [52] **Yaman, O., Baygin, M. and Karakose, M.**, 2016. A New Approach Based on Image Processing for Detection of Wear of Guide-Rail Surface in Elevator Systems, *International Journal of Applied Mathematics, Electronics and Computers*, **4**, 296-300.
- [53] **Shen, H., Li, S., Gu, D. and Chang, H.**, 2012. Bearing defect inspection based on machine vision, *Measurement*, **45**, 4, 719-733.
- [54] **Razmjoo, N., Mousavi, B. S. and Soleymani, F.**, 2012. A real-time mathematical computer method for potato inspection using machine vision, *Computers & Mathematics with Applications*, **63**, 1, 268-279.
- [55] **Jeliński, T., Du, C. J., Sun, D. W. and Fornal, J.**, 2007. Inspection of the distribution and amount of ingredients in pasteurized cheese by computer vision, *Journal of Food Engineering*, **83**, 1, 3-9.
- [56] **Gadelmawla, E. S.**, 2011, Computer vision algorithms for measurement and inspection of spur gears, *Measurement*, **44**, 9, 1669-1678.
- [57] **Peng, G., Zhang, Z. and Li, W.**, 2016. Computer vision algorithm for measurement and

inspection of O-rings, *Measurement*, **94**, 828-836.

- [58] **Karakose, M., Baygin, M., Aydin, I., Sarimaden, A. and Akin, E.**, 2016. Endüstriyel Sistemlerde Arkaplan Çıkarımı Tabanlı Hareketli Nesne Tespiti ve Sayılması için Yeni Bir Yaklaşım, *Mus Alparslan Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, **4**, 2, 373-381.
- [59] **Khude P. S. and Pawar, S. S.**, 201. Object detection, tracking and counting using enhanced BMA on static background videos, *IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research (ICCIC)*, Enathi, India, December 26-28.
- [60] **O. Küçük**, 2004. “Standardizasyon ve Kalite,” *Seçkin Yayıncılık*, Ankara.
- [61] **A. Öztürk**, 2009. “Kalite yönetimi ve planlaması,” *Ekin Yayıncılık*, Bursa.
- [62] **Patel, N., Jayswal, H., and Thakkar, A.**, 2017. Rice quality analysis based on physical attributes using image processing technique, *2nd IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT)*, Bangalore, India, May 19-20, 42-47.
- [63] **Wang, Y., Wu, Z., Duan, X., Tong, J., Li, P. and Lin, Q.**, 2018. Design of Gear Defect Detection System Based on Machine Vision, *In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **108**, 2.
- [64] **Yang, Y., Lou, Y., Gao, M. and Ma, G.**, 2018. An automatic aperture detection system for LED cup based on machine vision. *Multimedia Tools and Applications*, 1-18.
- [65] **Ozturk, S. and Akdemir, B.**, 2018. Real-time product quality control system using optimized Gabor filter bank, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1-9.
- [66] **Amiryousefi, M. R., Mohebbi, M. and Tehranifar, A.**, 2018. Pomegranate seed clustering by machine vision, *Food Science & Nutrition*, **6**, 1, 18-26.
- [67] **Pacella, M., Grieco, A. and Blaco, M.**, 2017. Machine vision based quality control of free-form profiles in automatic cutting processes, *Computers & Industrial Engineering*, **109**, 221-232.
- [68] **de Oliveira, B. C. F., Flesch, R. C. C., Pacheco, A. L. S. and Demay, M. B.**, 2017. Vision system for detection of defects in the electrical connector of electric motors: test rig and algorithms, *Journal of Applied Instrumentation and Control*, **5**, 1, 34-42.
- [69] **Gorbunova, E. V., Chertov, A. N., Peretyagin, V. S., Korotaev, V. V. and Arbuzova,**

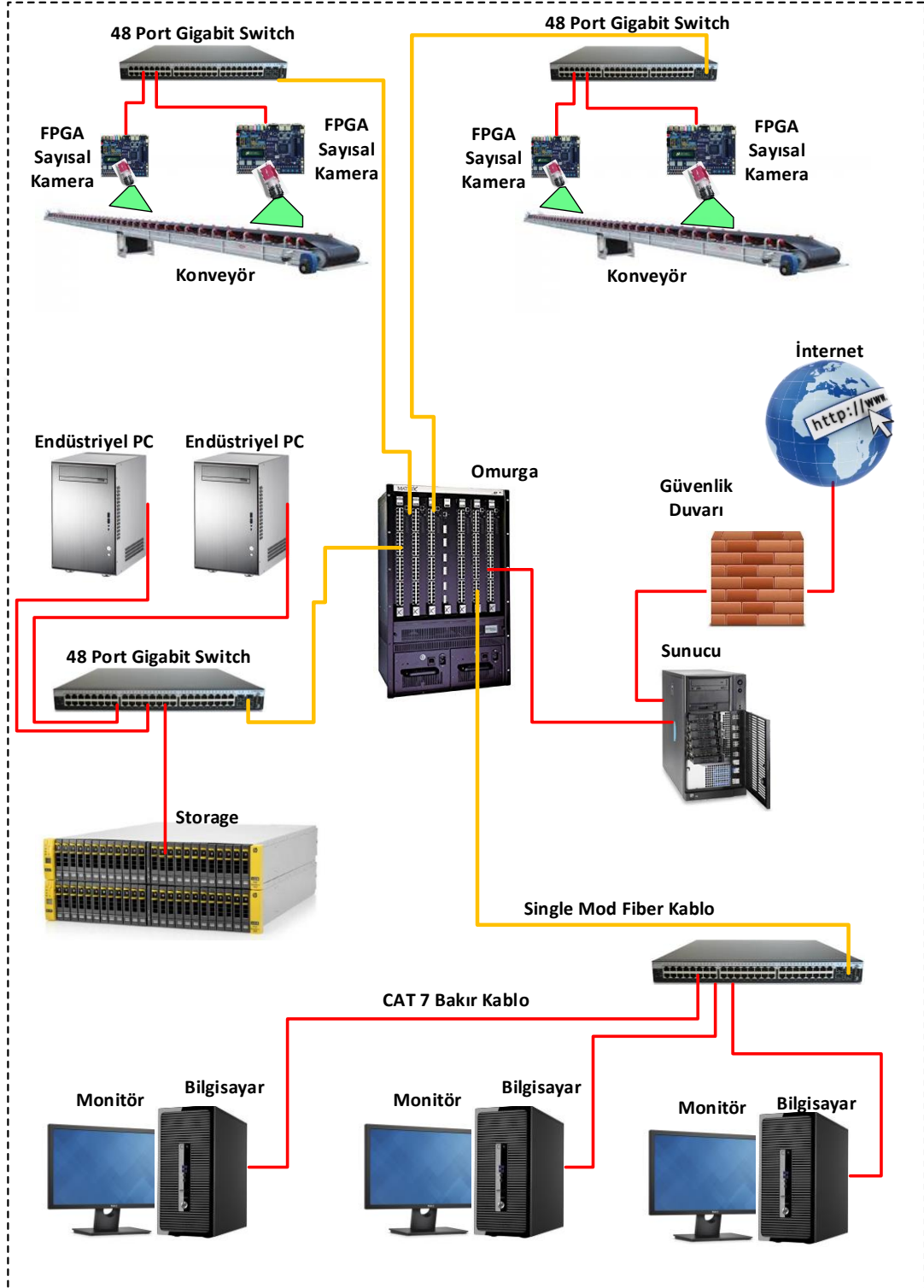
- E. A., 2017. Express quality control of chicken eggs by machine vision, *In Automated Visual Inspection and Machine Vision II*, **10334**.
- [70] **Momin, M. A., Yamamoto, K., Miyamoto, M., Kondo, N. and Grift, T.**, 2017. Machine vision based soybean quality evaluation, *Computers and Electronics in Agriculture*, **140**, 452-460.
- [71] **Pál, M., Novaković, D., Dedijer, S., Koltai, L., Jurič, I., Vladić, G. and Kašiković, N.**, 2017. Image processing based quality control of coated paper folding, *Measurement*, **100**, 99-109.
- [72] **Wang, W. C., Chen, S. L., Chen, L. B. and Chang, W. J.**, 2017. A machine vision based automatic optical inspection system for measuring drilling quality of printed circuit boards, *IEEE Access*, **5**, 10817-10833.
- [73] **Zhang, Z. and Yang, J.**, 2017. Online Analysis of Coal Ash Content on a Moving Conveyor Belt by Machine Vision, *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, **37**, 2, 100-111.
- [74] **Chen, Y. R., Chao, K. and Kim, M. S.**, 2002. Machine vision technology for agricultural applications, *Computers and Electronics in Agriculture*, **36**, 173-191.
- [75] **Brosnan, T. and Sun, D. W.**, 2002. Inspection and grading of agricultural and food products by computer vision systems-a review, *Computers and Electronics in Agriculture*, **36**, 193-213.
- [76] **Torregrosa, A., Albert, F., Aleixos, N., Ortiz, C. and Blasco, J.**, 2014. Analysis of the detachment of citrus fruits by vibration using artificial vision, *Biosystems Engineering*, **119**, 1-12.
- [77] **Zhou, W., Fei, M., Zhou, H. and Li, K.**, 2014. A sparse representation based fast detection method for surface defect detection of bottle caps, *Neurocomputing*, **123**, 406-414.
- [78] **Halfawy, R. and Hengmeechai J.**, 2014. Optical flow techniques for estimation of camera motion parameters in sewer closed circuit television inspection videos, *Automation in Construction*, **38**, 39-45.
- [79] **Stojanovic, R., Mitropulos P., Koulamas C., Karayiannis Y., Koubias, S. and Papadopoulos, G.**, 2001. Real-time vision based system for textile fabric inspection, *Real-Time Imaging*, **7**, 507-518.
- [80] **Cho, C. S., Chung, B. M. and Park, M. J.**, 2005. Development of real-time vision-based fabric inspection system, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **52**, 1073-1079.
- [81] **Kumar, A.**, 2008. Computer vision based fabric defect detection: a survey, *IEEE*

Transactions on Industrial Electronics, **55**, 348-363.

- [82] **Semeniuta, O., Dransfeld, S. and Falkman, P.**, 2016. Vision-based robotic system for picking and inspection of small automotive components, *IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, Fort Worth, TX, USA, August, 21-25, 549-554.
- [83] **Wang, Y.C., Lin, J. C. and Chiu, S. F.**, 2010. Automatic inspection system for dimensional measurements of the saw blade milling cutter, *Journal of Industrial Engineering and Management*, **3**, 2, 370-382.
- [84] **Molleda, J., Usamentiaga, R., Garcia, D. F., Bulnes, F. G. and Ema, L.**, 2011. Shape measurement of steel strips using a laser-based three-dimensional reconstruction technique, *IEEE Transactions on Industry Applications*, **47**, 4, 1536-1544.
- [85] **Hashemi, S. H., Moradpour, M. A., Karimi, E. and Kazemi, M.**, 2013. The use of machine vision inspection for out of roundness measurement in steel pipes, *IEEE in Pattern Recognition and Image Analysis (PRIA)*, Birjand, Iran, March 6-8, 1-5.
- [86] **Huang, Y., Gu, J., Wang, S., Xiao, H. and Yuan K.**, 2016. Vision based embedded tiny spur gear inspection and measurement system, *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, Harbin, China, August 7-10, 1679-1684.
- [87] **Jia, H., Murphey, Y. L., Shi, J. and Chang, T. S.**, 2004. An intelligent real-time vision system for surface defect detection, *Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition (ICPR)*, Cambridge, UK, August 26, 3, 239-242.
- [88] **Yang, S. W., Lin, C. S., Lin, S. K. and Tseng, Y. C.**, 2013. Automatic inspection system for defects of printed art tile based on texture feature analysis, *Instrumentation Science and Technology*, **42**, 59-71.
- [89] **Lin, K. L. and Fang J. L.**, 2013. Applications of computer vision on tile alignment inspection, *Automation in construction*, **35**, 562-567.
- [90] **Wang W. and Li C.**, 2015. A multimodal machine vision system for quality inspection of onions, *Journal of Food Engineering*, **166**, 291-301.
- [91] **Benalia, S., Cubero, S., Prats-Montalbán, J. M., Bernardi, B., Zimbalatti, G. and Blasco J.**, 2016. Computer vision for automatic quality inspection of dried figs (*Ficus carica* L.) in real-time, *Computers and Electronics in Agriculture*, **120**, 17-25.
- [92] **Cubero, S., Aleixos, N., Albert, F., Torregrosa, A., Ortiz, C., Navarrete, O. G. and**

- Blasco, J.**, 2014. Optimised computer vision system for automatic pre-grading of citrus fruit in the field using a mobile platform, *Precision Agriculture*, **15**, 80-94.
- [93] **Cubero, S., Aleixos, N., Molto, E., Sanchiz, J. G. and Blasco, J.**, 2011. Advances in machine vision applications for automatic inspection and quality evaluation of fruits and vegetables, *Food and Bioprocess Technology*, **4**, 487-504.
- [94] **Yazdi, L., Prabuwno, A. S. and Golkar E.**, 2011. Feature extraction algorithm for fill level and cap inspection in bottling machine, *International Conference on Pattern Analysis and Intelligent Robotics (ICPAIR)*, **1**, 47-52.
- [95] **Bera, S.**, 2015. Partially occluded object detection and counting, *Third International Conference on Computer, Communication, Control and Information Technology (C3IT)*, Hooghly, India, February 7-8.
- [96] **Khule, A. A., Nagmode, M. S. and Komati, R. D.**, 2015. Automated object counting for visual inspection applications, *International Conference on Information Processing (ICIP)*, Quebec City, Canada, December 16-19, 801-806.
- [97] **Duan, G., Chen, Y. W. and Sakekawa, T.**, 2008. Automatic optical inspection of micro drill bit in printed circuit board manufacturing based on pattern classification, *Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings (IMTC)*, Victoria, BC, Canada, May 12-15, 279-283.
- [98] **Rooyen, M. V., Luwes, N. and Theron, E.**, 2017. Automated soil classification and identification using machine vision, *Pattern Recognition Association of South Africa and Robotics and Mechatronics (PRASA-RobMech)*, Bloemfontein, South Africa, Nov. 30-1.
- [99] **Qureshi, W. S., Payne, A., Walsh, K. B., Linker, R., Cohen, O., and Dailey, M. N.**, 2017. Machine vision for counting fruit on mango tree canopies, *Precision Agriculture*, **18**, 224-244.
- [100] **Babu, B., Tiwari, M., Kotwaliwale, N., Singh, K. and Hamad, R.**, 2017. Machine vision based classification of rice (*Oryza Sativa* L.) cultivars using morphological, chromatic and textural features of seed images, *Agricultural Engineering*, **2017**, 9-18.
- [101] **Sablatnig, R.**, 1997. A highly adaptable concept for visual inspection, *Phd thesis*, Vienna University of Technology, Austria.

EKLER

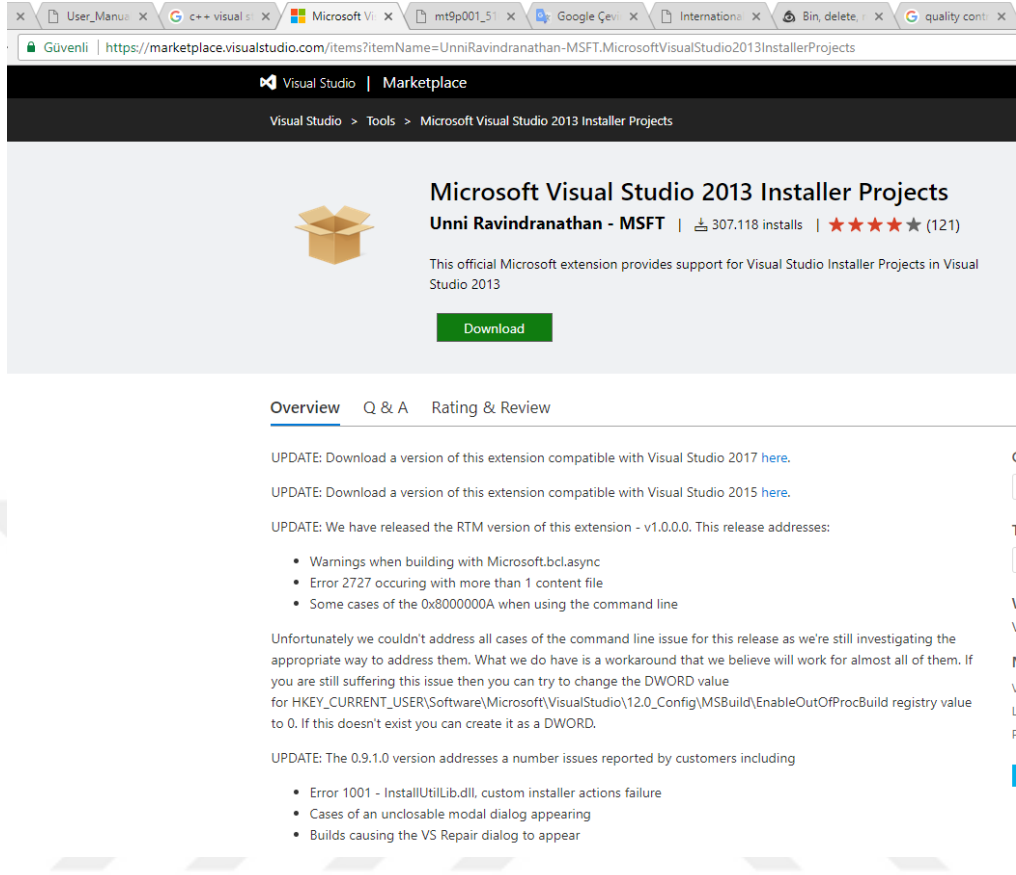


Ek Şekil 4.1. Örnek bir fabrika ağ alt yapısı

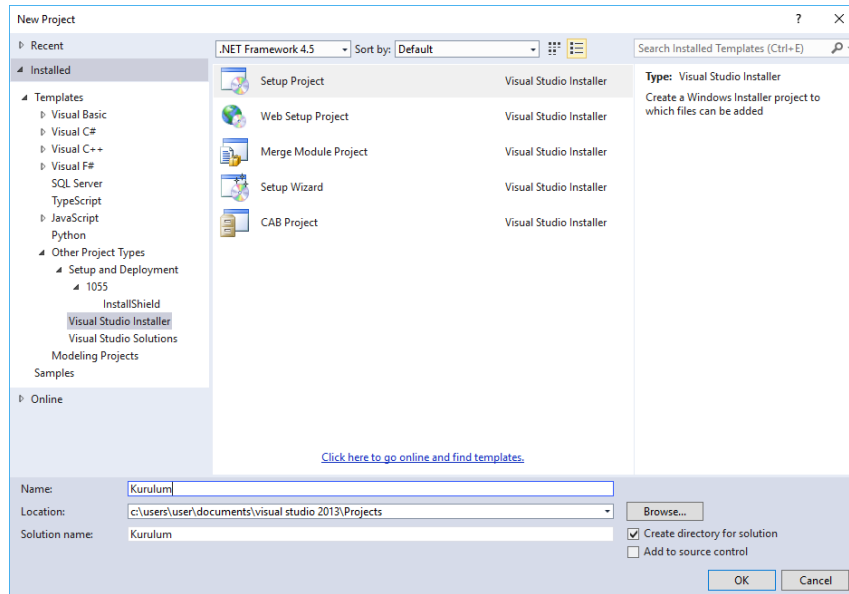
Ek Tablo 4.1. Kalite kontrol sisteminde kullanılan cihazların özellikleri

	Saha Testlerinde Kullanılan Kalite Kontrol Cihazları	Teknik Özellikleri
1	Endüstriyel PC	27-inch slide-in Industrial PC C5102-0030 processor Intel® 3.20 GHz memory extension to 16 GB DDR3RAM, instead of 2048 MB Module to optically link one serial RS232 port of the motherboard, with overload protection, Gigabit Ethernet PC interface card, 1-channel, PCI bus Microsoft Windows and Linux
2	Storage System	Tür: SAN Depolama Boyutu: 2U 3.5inç Yuvası: 12 Disk Yuva Arttırılabilir: Evet Toplam Kapasite 96 TB Maks.Kapasite: 2 PB RAID Desteği: RAID 0/1, RAID 10, RAID 5, RAID 50, RAID 60 Güç Kaynağı 4 Denetleyici Çift
3	Server	2 x Intel® Xeon® E5530 4C/8T 3.20 GHz 32 MB Performance Mode Installation 2 x SP 12GB 3x4 DDR3-1333 PC3-10600 rg d ECC Front-VGA interface HDMI interface DVD-RW supermulti slimline SATA 2 x HD SAS 6G 146GB 10K HOT PLUG 2.5” EP RAID Ctrl SAS 6G 5/6 512MB (D2616) RAID Contr BBU Upgrade for RAID 5/6 V16 FC Ctrl 8Gb/s 1 Chan LPe1250 MMF LC LP RMK-F1_1-2U Server (new) Cable management arm for 3rd party racks Power Supply Module 800W (hot plug) Fan upgrade kit hot-plug redundancy

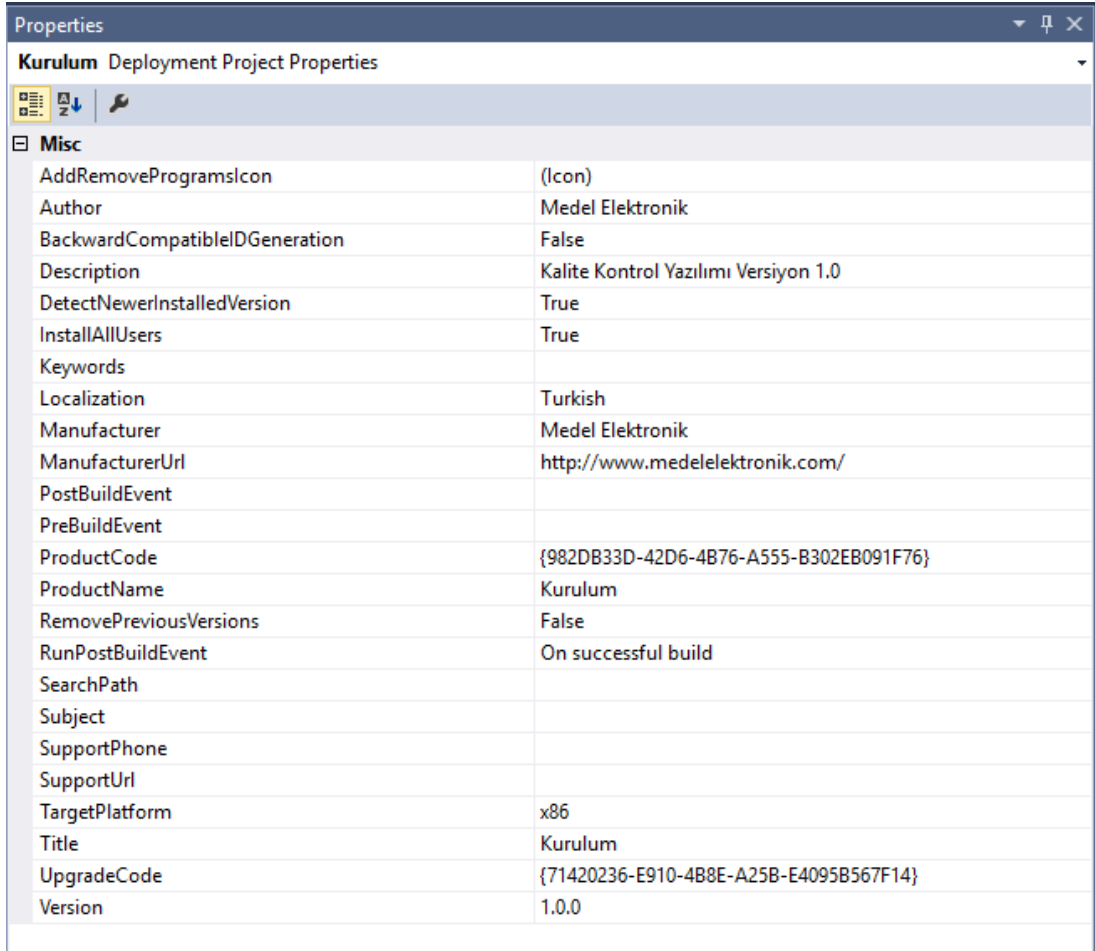
		Microsoft Windows Server 2008 Standart Edition
4	Gigabit Ethernet Swich	10/100/1000 Mbps 48 Port Yönetilebilir Layer 3 switch 4 combo SFP bays
5	FPGA	EPCS64; On-board USB-Blaster;JTAG and AS mode configuration supported 128MB SDRAM; 2MB SRAM; 8MB Flash; EEPROM SPI and 4-bit SD mode; USB 2.0 host & device with Windows driver 2 Gigabit Ethernets; High Speed Mezzanine Card (HSMC) 40-pin Expansion Port; RS232 port VGA out TV decoder line-in & out, and microphone-in jacks
6	Kamera Modülü	Support exposure time controlling - users can adjust the exposure according to the light of the surrounding area Support motion capture mode Software allows users to upload the picture captured into PC and save the picture into bitmap format Equipped with Micron 5 Mega Pixel CMOS sensor Support 2,592H x 1,944V active pixels Output data in RGB Bayer Pattern format Full resolution frame rate up to 15 frame per second(FPS)



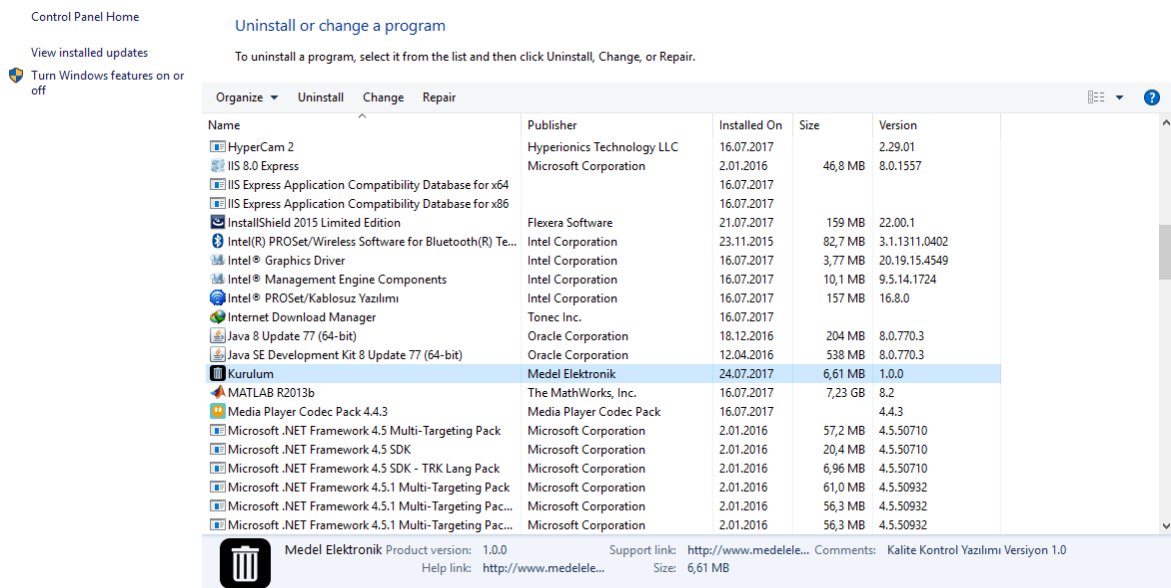
Ek Şekil 4.2. Visual Studio setup extension paketi



Ek Şekil 4.3. Setup projesi oluşturma aşaması



Ek Şekil 4.4. Kurulum projesine ait detayların belirlenmesi



Ek Şekil 4.5. Kurulum işleminin ardından denetim masasına ait bir görüntü

ÖZGEÇMİŞ

Mehmet BAYĞIN, 1988 yılında Elazığ'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Elazığ'da tamamladıktan sonra 2006 yılında Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü eğitimine başladı. Bu bölümü 2010 yılında tamamladı. Aynı yıl Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı ve 2013 yılında mezun oldu. 2013 yılında Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalında doktora eğitimine başladı. Halen Ardahan Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği bölümünde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.