T.C.

TRAKYA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

STEREO VİDEO GÖRÜNTÜLERİNİ İŞLEMEYE DAYALI DERİNLİK ANALİZİ

MURAT OLCAY ÖZCAN

DOKTORA TEZİ

BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Deniz Taşkın

EDİRNE-2014

T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü onayı

Prof. Dr. Mustafa ÖZCAN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Bu tezin Doktora tezi olarak gerekli şartları sağladığını onaylarım.

Prof. Dr. Yılmaz KILIÇASLAN
Anabilim Dalı Başkanı

Bu tez tarafımca okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Yrd. Doç. Dr. Deniz TAŞKIN
Tez Danışmanı

Bu tez, tarafımızca okunmuş, kapsam ve niteliği açısından Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalında bir Doktora tezi olarak oy birliği ile kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri	İmza
Prof. Dr. Adnan YAZICI	
Prof. Dr. Ertan ARDA	
Doç. Dr. M. Tolga SAKALLI	
Yrd. Doç. Dr. Deniz TAŞKIN	
Yrd. Doç. Dr. Tarık YERLİKAYA	

Tarih: 19 / 12 / 2014

T.Ü. FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ DOKTORA PROGRAMI
DOĞRULUK BEYANI

İlgili tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin kaynak gösterilerek ilgili tezde yer aldığını beyan ederim.

19/12/2014

Murat Olcay ÖZCAN

Doktora Tezi
Stereo Video Görüntülerini İşlemeye Dayalı Derinlik Analizi
T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü
Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı

ÖZET

3-boyutlu görüntüleme uygulama alanlarının hızla artmasıyla birlikte günümüzün en popüler konularından biri haline gelmiştir. Stereo görüş yöntemi, bilgisayarlarda gerçek dünyanın 3-boyutlu görüntüsünün elde edilmesinde sıklıkla karşımıza çıkmaktadır. İnsan gözünün yerini kameraların aldığı stereo görüş sistemlerinde, derinlik bilgisine ulaşabilmek için kamera görüntülerinin belli işlemlerden geçirilmesi gerekmektedir.

Bu tez çalışmasında, aktif ve pasif 3-boyutlu görüş sistemleri incelenmiş ve pasif yöntem temelli bir stereo görüş sistemi geliştirilmiştir. Geliştirilen sistem iki kameradan aldığı görüntüleri işleyerek derinlik bilgisini elde etmektedir. Sistem kendi içinde birçok parametre ile özelleştirilebilmekte ve parametrelerin sonuca olan etkisi gerçek zamanlı olarak görülebilmektedir. Sistem içerisinde 3-boyutlu sonuçları iyileştirmek üzere tasarlanmış, 2 ve 3-boyutlu uzayda çalışan filtreleme modülleri bulunmaktadır. Sistem çıktıları, 3-boyutlu yazıcı ve gösterim cihazlarında kullanılabilecek şekilde üretilmektedir.

Ayrıca, geliştirilmiş olan sistem diğer aktif ve pasif sistemlerle karşılaştırılmış ve diğer sistemlere göre üstün olduğu yönler vurgulanmıştır.

Yıl : 2014
Sayfa Sayısı : 112
Anahtar Kelimeler : Stereo görüş, derinlik analizi, 3-boyutlu modelleme, nokta bulutu

Doctoral Thesis
Depth Estimation Based On Stereo Video Images
Trakya University Institute of Natural Sciences
Department of Computer Engineering

ABSTRACT

The growing interest in application fields of 3D imaging has made it one of the most popular research fields. Stereo vision method is often encountered while obtaining the 3D image of the real world. Camera images have to be undergone some basic processes in order to obtain depth information in stereo vision systems in which cameras substitute human eyes.

In this thesis study, active and passive 3D vision systems were examined, and a passive method based stereo vision system was developed. Developed system obtain depth information by processing images taken from two cameras. System may be customized by several parameters and the effect of parameters to the result may be seen in real time. Filtering modules, which are designed to improve the 3D results, exist in the system and operate in 2D and 3D space. System outputs are produced so that they can be used with 3D printer and display devices.

Besides, current developed system was compared with other active and passive systems and improved features over the other systems were highlighted.

Year : 2014
Number of Pages : 112
Keywords : Stereo vision, depth analysis, 3D modelling, point cloud

TEŞEKKÜR

Öncelikle doktora öğrenimim boyunca bana destek olan, yönlendiren ve motive eden danışmanım Yrd. Doç. Dr. Deniz TAŞKIN'a çok teşekkür ederim.

Ayrıca beni dinleyen ve yapıcı eleştirileriyle bu tez çalışmasına katkıda bulunan Prof. Dr. Ertan ARDA, Yrd. Doç. Dr. Tarık YERLİKAYA ve Yrd. Doç. Dr. Nurşen TOPÇUBAŞI'na teşekkür ederim. Tez jürimde görev alarak beni onore eden ve tezime yaptıkları bilimsel katkılardan dolayı Prof. Dr. Adnan YAZICI ve Doç. Dr. Tolga SAKALLI'ya teşekkür ederim.

Tezimi proje olarak kabul eden (2011/161) ve sağladığı maddi katkılardan dolayı Trakya Üniversitesi yönetimine ve Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine teşekkür ederim.

Son olarak beni her zaman destekleyen ve yanımda olan sevgili eşim Özge ÖZCAN, annem Ayşe ÖZCAN, babam Tevfik ÖZCAN ve ablalarım Zuhal GÜLTEKİN ve Tülay ÖZCAN'a teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET i
ABSTRACT ii
TEŞEKKÜR iii
İÇİNDEKİLER iv
SİMGELER VE KISALTMALAR viii
ŞEKİLLER DİZİNİ ix
TABLOLAR DİZİNİ xiii
BÖLÜM 1: GİRİŞ 1
BÖLÜM 2: BİLGİSAYARLA GÖRME 3
2.1. İnsan Görüş Sistemi 3
2.1.1. Göz 3
2.1.2. Sinir Sistemi 5
2.1.3. Beyin 6
2.2. Bilgisayarla Görme 8
2.2.1. Görüntü Kaynakları 8
2.2.2. Sayısal Görüntü 9
2.2.3. Bilgisayarla Görme Uygulamaları 10
BÖLÜM 3: STEREO GÖRÜŞ VE DERİNLİK ANALİZİ 13
3.1. İnsanda Derinlik Algısı 13
3.2. Bilgisayarda Derinlik Analizi 14
3.2.1. Pasif Görüş Yöntemi 14
3.2.2. Aktif Görüş Yöntemleri 17
3.2.2.1. Üçgenleme Yöntemi Kullananlar 18
3.2.2.1.1. Tekli/Çoklu-Nokta Kullanımı 18

3.2.2.1.2. Çizgi Kullanımı 19
3.2.2.1.3. Saçak ve Kodlanmış Desen Kullanımı 20
3.2.2.1.4. Moire Efekti Kullanımı 21
3.2.2.2. Uçuş-Zamanı Yöntemi Kullananlar 22
3.2.2.2.1. Lazer Uzaklık Bulucular 22
3.2.2.2.2. İnterferometri Yöntemi 24
BÖLÜM 4: STEREO GÖRÜŞ İLE DERİNLİK ANALİZİ VE 3-BOYUTLU MODELLEME 25
4.1. Giriş 25
4.2. Görüntünün Elde Edilmesi 26
4.2.1. İğne Deliği Kamera Modeli 26
4.2.2. İnce Lens Modeli 29
4.2.3. Lens Bozuklukları 30
4.2.3.1. Radyal Bozukluk 30
4.2.3.2. Teğetsel Bozukluk 31
4.2.4. Lens Bozukluklarının Giderilmesi 31
4.3. Kalibrasyon 34
4.3.1. Kalibrasyon Yöntemleri 35
4.3.1.1. 3-Boyutlu Desenlerle Kalibrasyon 35
4.3.1.2. 2-Boyutlu Desenlerle Kalibrasyon 36
4.3.1.3. 1-Boyutlu Desenlerle Kalibrasyon 37
4.3.1.4. Kendi Kendine Kalibrasyon 38
4.3.2. Stereo Kalibrasyon 38
4.3.2.1. Epipolar Geometri 39
4.4. Stereo Düzeltme 40
4.4.1. Epipolar Düzeltme 42

4.5. Stereo Eşleştirme 45
4.5.1. Eşleştirme Adımının Zorlukları 45
4.5.2. Eşleştirme Algoritmaları 48
4.5.2.1. Özellik Bazlı Eşleştirme 48
4.5.2.2. Yerel Yöntemler 49
4.5.2.2.1. Piksel ya da Bölge Eşleştirme 49
4.5.2.2.2. Global Yöntemler 52
4.6. Yeniden Yansıtma 55
4.6.1. Üçgenleme 55
4.6.2. Derinlik Haritası Oluşturma 57
4.7. 3-Boyutlu Modelleme 58
4.7.1. PLY Dosya Formatı 58
4.8. Nokta Bulutlarında Filtreleme 59
4.8.1. Düzgeçiş Filtreleme 60
4.8.2. İstatistiksel Ayrık Noktalar Çıkarımı Filtrelemesi 61
4.8.2. Yarıçapa Göre Ayrık Noktalar Çıkarımı Filtrelemesi 61
BÖLÜM 5: STEREO GÖRÜŞ SİSTEMİ 63
5.1. Giriş 63
5.2. Kullanılan Donanım ve Yazılımlar 66
5.2.1. Stereo Kamera 66
5.2.2. OpenCV Kütüphanesi 67
5.2.3. OpenCVSharp Kütüphanesi 67
5.2.4. PCL (Nokta Bulutu Kütüphanesi) 68
5.2.5. Kütüphanelerinin Kaynak Kodundan Derlenmesi 68
5.3. Stereo Kalibrasyon 70
5.4. Stereo Düzeltme 75

5.5. Stereo Eşleştirme ve Yeniden Yansıtma 78
5.6. Nokta Bulutunun Filtrelenmesi 85
5.6.1. Düzgeçiş Filtreleme 85
5.6.2. İstatistiksel Ayrık Noktalar Çıkarımı Filtrelemesi 86
5.6.3. Yarıçapa Göre Ayrık Noktalar Çıkarımı Filtrelemesi 86
BÖLÜM 6: DENEYSEL SONUÇLAR 87
6.1. Stereo Kalibrasyon ve Stereo Düzeltme Sonuçları 87
6.2. Farklı Stereo Eşleştirme Algoritmaları Sonuçlarının Karşılaştırılması 89
6.3. Stereo Eşleştirme Sonuçları 94
6.4. Yeniden Yansıtma Sonuçları 95
6.5. Nokta Bulutlarında Filtreleme Sonuçları 95
BÖLÜM 7: SONUÇLAR VE TARTIŞMA 102
KAYNAKLAR 107
ÖZGEÇMİŞ 111
BİLİMSEL ÇALIŞMALAR 112

SİMGELER VE KISALTMALAR

3D : Üç-Boyutlu (3-Dimensional)

DSLR : Dijital Tek-Lens Yansımalı (Digital Single-Lens Reflex)

MR : Manyetik Rezonans

OCR : Optik Karakter Tanıma (Optical Character Recognition)

PCL : Nokta Bulutu Kütüphanesi (Point Cloud Library)

PLY : Poligon Dosya Formatı (Polygon File Format)

PYM : Perspektif Yansıtma Matrisi

XML : Genişletilebilir İşaret Dili (Extensible Markup Language)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Gözün yapısı 4
Şekil 2.2. Uzaktaki ve yakındaki cisimlere odaklanma 5
Şekil 2.3. Optik sinir ve beyin bağlantısı 6
Şekil 2.4. İnsanlarda resim algısında köşe kullanımı 7
Şekil 2.5. İnsan gözünün aldatılması 7
Şekil 2.6. Farklı görüntü kaynaklarından alınan görüntüler a) kameradan alınan insan portresi b) ultrason cihazında şahdamarın görüntüsü c) MR cihazında insan kafası d) uydudan alınan yeryüzü görüntüsü 9
Şekil 2.7. Sayısal görüntü, gri-tonlu ve düşük çözünürlüklü bir yüzün (sağ üst) sayı dizisiyle gösterimi (sol) 10
Şekil 2.8. Bazı endüstriyel bilgisayar görüşü uygulamaları: a) optik karakter tanıma b) makine denetimi c) perakende satış d) medikal görüntüleme e) otomobil güvenliği f) gözetleme ve trafik izleme 12
Şekil 3.1. İnsanda 3-boyutlu görme 13
Şekil 3.2. Tek gözle görmede derinlik algısı sorunu 14
Şekil 3.3. Pasif stereo görüş 15
Şekil 3.4. Stereo görüş kameraları a) bumblebee b) minoru 15
Şekil 3.5. Sol ve sağ kameradan alınan Tsukuba resim çifti 16
Şekil 3.6. Tsukuba resim çifti aykırılık haritası 17
Şekil 3.7. Bir lazer cihazı üzerine yerleştirilmiş kamera ve nokta gönderimi 18
Şekil 3.8. Kinect 1.0 a) iç yapısı b) yansıtılan kızılötesi noktalar 19
Şekil 3.9. Çizgi gönderimi kullanan bir lazer-kamera sistemi 20
Şekil 3.10. Desen kullanımı işlem adımları 21
Şekil 3.11. Moire efekti kullanımı a) bir ışık kaynağı ve bir kameradan oluşan sistem b) ızgara ile aydınlatılmış nesne 22
Şekil 3.12. Lazer uzaklık bulucu çalışma sistemi 23
Şekil 3.13. Bir lazer uzaklık bulucu 23
Şekil 3.14. Michelson interferometresi 24
Şekil 4.1. Stereo görüş ile 3-boyutlu modelleme adımları 26

Şekil 4.2. İğne deliği kamera modeli 27
Şekil 4.3. Nesnenin görüntüsünün oluşumu 28
Şekil 4.4. Değiştirilmiş kamera modeli 28
Şekil 4.5. İnce lens modeli 29
Şekil 4.6. Radyal bozukluk oluşumu 30
Şekil 4.7. Radyal bozukluk içeren görüntü (sol) ve düzeltilmiş hali (sağ) 31
Şekil 4.8. Teğetsel bozukluk a) ucuz kamera kaynaklı bozukluk b) bozukluk nedeniyle oluşan görüntü 31
Şekil 4.9. Lens bozuklukları giderilecek kamera modeli 32
Şekil 4.10. 3-boyutlu kalibrasyon deseni 36
Şekil 4.11. 2-boyutlu satranç tahtası deseni 36
Şekil 4.12. Satranç tahtasının farklı açılardan görüntüsünün kaydedilmesi 37
Şekil 4.13. 1-boyutlu desen ile kalibrasyon 37
Şekil 4.14. Sırasıyla sol ve sağ kameradan alınan görüntüler 39
Şekil 4.15. Kameraların standart yerleşimi 39
Şekil 4.16. Stereo düzeltme adımları 40
Şekil 4.17. Epipolar doğru üzerinde eşleştirme 41
Şekil 4.18. Optik eksenlerin paralel olmama durumu 42
Şekil 4.19. Epipolar düzeltme 44
Şekil 4.20. Düzeltme uygulanmamış(üst) ve uygulanmış(alt) kamera görüntüleri 44
Şekil 4.21. Aynı noktanın iki kamera görüntüsünde bulunması 45
Şekil 4.22. Eşleştirme zorlukları a) görüntüde tıkanma b) sınırlı görüş açısı 46
Şekil 4.23. Doku eksikliği problemi 47
Şekil 4.24. Tekrarlayan desenler problemi 47
Şekil 4.25. Özellik eşleştirme yöntemi 49
Şekil 4.26. İçecek kutusu özellik bazlı eşleştirme a) kamera görüntüsü b) kenar çıkarımı c) epipolar kavisler d) 3-boyutlu modellenmiş noktalar 49
Şekil 4.27. Blok eşleme algoritması ve en düşük maliyet fonksiyonu 51
Şekil 4.28. Pencere boyutunun aykırılık haritası üzerindeki etkisi a) sol resim b) sağ resim c) pencere boyutu W=3 d) pencere boyutu W=20 52
Şekil 4.29. Çizge-kesme algoritması hareket sonuçları a) ilk etiketlendirmeler b) α,β değiştirme hareketi sonrası c) α genişletme hareketi sonrası 54

Şekil 4.30. İdeal stereo sisteminde derinlik (Z) 55
Şekil 4.31. Aykırılık ve derinlik ilişkisi 56
Şekil 4.32. PLY dosyası başlık kısmı örneği 59
Şekil 4.33. PLY dosyası içerik kısmı örneği 59
Şekil 4.34. Düzgeçiş filtreleme ile çıkarılan noktalar 60
Şekil 4.35. Düzgeçiş filtreleme sonuçları a) filtreleme öncesi b) z ekseni için 1.0m ile 1.5m arası filtreleme 60
Şekil 4.36. İstatiksel ayrık noktalar çıkarımı filtrelemesi ile filtre öncesi (sol) ve filtre sonrası (sağ) nokta bulutu görünümü 61
Şekil 4.37. Yarıçapa göre ayrık noktalar çıkarımı filtrelemesi nokta çıkarımı 62
Şekil 4.38. Yarıçapa göre ayrık noktalar çıkarımı filtrelemesi sonuçları a) filtreleme öncesi b) filtreleme sonrası 62
Şekil 5.1. Stereo görüş uygulaması akış diyagramı 64
Şekil 5.2. Stereo görüş uygulaması giriş ekranı 65
Şekil 5.3. Kullanılan kameralar a) Nikon D3100 b) Logitech Web-kamera 67
Şekil 5.4. CMake arayüzü kullanımı 69
Şekil 5.5. OpenCV'nin kaynak kodundan derlenmesi 69
Şekil 5.6. Stereo kalibrasyon arayüzü 70
Şekil 5.7. Stereo kalibrasyonun yapılışı 71
Şekil 5.8. Sırasıyla sol ve sağ kamera görüntülerinde köşelerin bulunması 72
Şekil 5.9. Kalibrasyon parametrelerinin XML dosyasında saklanması 73
Şekil 5.10. Stereo kalibrasyon kaba kod gösterimi 73
Şekil 5.11. Stereo kalibrasyon akış diyagramı 74
Şekil 5.12. Stereo düzeltme arayüzü 75
Şekil 5.13. Stereo düzeltme ile satır hizalanmış görüntüler 76
Şekil 5.14. Stereo düzeltme kaba kod gösterimi 76
Şekil 5.15. Stereo düzeltme akış diyagramı 77
Şekil 5.16. Stereo eşleme arayüzü 79
Şekil 5.17. Aykırılık haritasında aynı görüntü için farklı parametre sonuçları 80
Şekil 5.18. Oluşturulan bir PLY dosyası içeriği 81
Şekil 5.19. Stereo eşleştirme ve yeniden yansıtma kaba kod gösterimi 82
Şekil 5.20. Stereo eşleştirme ve yeniden yansıtma akış diyagramı 83

Şekil 5.21. Oluşturulan bir 3-boyutlu nokta bulutu örneği 84
Şekil 5.22. PCL'de düzgeçiş filtreleme 85
Şekil 5.23. PCL'de istatistiksel ayrık noktalar çıkarımı filtrelemesi 86
Şekil 5.24. PCL'de yarıçapa göre ayrık noktalar çıkarımı filtrelemesi 86
Şekil 6.1. Kalibrasyonda kullanılan sol ve sağ kameradan alınan görüntüler 88
Şekil 6.2. Sırasıyla sağ ve sol kameralardan alınan düzeltilmiş resim çiftleri..... 89
Şekil 6.3. Middlebury Midd2 stereo çifti a) sol resim b) sağ resim c) referans aykırılık haritası 90
Şekil 6.4. Midd2 aykırılık haritası sonuçları : blok eşleme(sol üst), çizge kesme(sağ üst), yarı-global(sol alt), birchfield(sağ alt) 91
Şekil 6.5. Tsukuba aykırılık haritaları : blok eşleme (sol üst), çizge kesme (sağ üst), yarı-global (sol alt), birchfield (sağ alt) 92
Şekil 6.6. Uygulama stereo çifti..... 92
Şekil 6.7. Uygulama stereo çifti aykırılık haritaları: blok eşleme (sol üst), çizge kesme (sağ üst), yarı-global (sol alt), birchfield (sağ alt)..... 93
Şekil 6.8. Uygulamada elde edilen aykırılık haritası sonuçları: sağ kamera görüntüsü (sol), aykırılık haritası (sağ) 94
Şekil 6.9. Oluşturulan nokta bulutları 95
Şekil 6.10. Nokta bulutu filtreleme sonuçları 96
Şekil 6.11. Nokta bulutu filtreleme sonuçları 98
Şekil 6.12. Aynı sahnenin farklı eşleştirme parametreleriyle elde edilen nokta bulutu (üst) ve filtreleme sonucu (alt) 100

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 4.1. Kameralar arası uzaklık etkisi 48
Tablo 6.1. Eşleştirme algoritmalarının karşılaştırması 94
Tablo 6.2. Filtreleme sonucu oluşan nokta sayıları ve filtreleme maliyetleri (sn) 97
Tablo 6.3. Filtreleme sonucu oluşan nokta sayıları ve filtreleme maliyetleri (sn) 99
Tablo 6.4. Sistem başarım sonuçları 101
Tablo 7.1. 3-boyutlu modelleme yöntemlerinin sonuçlarının karşılaştırması 104

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Bilgisayarla görme makinelerin görmesini sağlayan bilim ya da teknoloji olarak tanımlanabilir. Görmeyi gerçekleştirmek için genel olarak kameralar kullanılmakta olup, kamera aygıtının 3-boyutlu gerçek dünyayı 2-boyutlu algılaması bilgisayarla görme uygulamaları için sorunlar yaratabilmektedir. Ek bir çaba sarf etmeden dünyayı 3-boyutlu algılayabilen insanlarda bulunan binoküler sistemin incelenmesi ile bilgisayarlar için stereo görüş sistemleri modellenmiştir. İnsanlarda iki gözden gelen görüntünün beyin tarafından işlenerek 3-boyutlu algılamanın gerçekleştirildiği gibi, stereo görüşte de aynı sahnenin iki ya da daha fazla açıdan elde edilmiş görüntüleri kullanılarak derinlik bilgisi elde edilebilmektedir.

Son yıllarda 3-boyutlu derinlik analizinin çok çeşitli uygulamalarda kullanılır olması, stereo görüş alanını çekici bir hale getirmiş ve üzerinde yoğun şekilde çalışılmasının önünü açmıştır. Stereo görüş uygulamalarının kullanım alanları olarak 3-boyutlu modelleme, tersine mühendislik, sanal ve arttırılmış gerçeklik, robot yöngüdümü ve otonom araçlar için engel tespiti örnek olarak verilebilir [1, 2, 3].

Derinlik analizi yöntemleri pasif ve aktif yöntemler olarak ikiye ayrılmaktadır. Stereo görüşü de içeren pasif yöntemler olarak tanımlanan yöntemlerde, görüntüyü elde etmede ortamdaki ışığı kullanan kamera aygıtları kullanılmaktadır. Aktif yöntemlerde ise, kamera kullanımının yanında, 3-boyutlu görüntülenmek istenen sahne ya da nesne üzerine bir ışık kaynağından bir desen yansıtılarak 3-boyut bilgisi elde edilmektedir. Pasif yöntemler hız, fiyat ve kurulum kolaylığı gibi avantajlarla öne çıkarken, aktif yöntemler daha yüksek başarım elde etmeleriyle öne çıkmaktadırlar [4, 5].

Pasif yöntem kullanan bir stereo görüş sistemi ile derinlik bilgisi elde edebilmek için yerine getirilmesi gereken dört temel adım bulunmaktadır. İlk adım olan stereo kalibrasyon işlemi sonucunda, kameraların görüntü bozukluklarının giderilmesinde kullanılacak iç parametreler ile kameralar arasındaki geometrik ilişkiyi ifade eden dış parametreler elde edilir. İkinci adım olan stereo düzeltme işleminde ise elde edilen

parametreler kullanılarak iki kamera görüntüsü düzeltilir ve satır hizalı hale getirilir. Satır hizalı hale getirilmiş görüntüler için, gerçek dünyadaki noktalar iki kameranın resim düzlemlerinde de aynı doğru üzerinde bulunmaktadır ve üçüncü adım olan stereo eşleştirme işlemi için büyük önem arz etmektedir. Stereo eşleştirme işleminde bir kamera görüntüsündeki noktaların diğer kamera görüntüsünde de bulunması hedeflenmektedir. Aynı nokta iki resim düzleminde de bulunduğunda, o noktaya ait aykırılık değeri elde edilebilmekte ve uzaklığı hesaplanabilir olmaktadır. Son adım olan yeniden yansıtma adımında ise eşleşen noktalar için kamera görüntüsü 3-boyutlu hale dönüştürülmektedir.

Derinlik bilgisi elde etme sürecinde stereo eşleştirme adımı en zorlu adım olarak kabul edilmekte olup, eşleştirme zorluklarının sonucu olarak derinlik haritalarında gürültü ve ayrık noktalar ortaya çıkmaktadır.

Geliştirilen stereo görüş sisteminde, stereo eşleştirme için kullanılan blok eşleme algoritmasından en iyi sonucu almak için, eşleştirmede kullanılan parametreler değiştirildiğinde ortaya çıkan sonuçlar gerçek zamanlı olarak aykırılık haritası üzerinde izlenebilmektedir. Bunun yanında geliştirilmiş olan sistem, derinlik haritasında ortaya çıkabilen gürültü ve ayrık noktaların engellenmesi noktasında, geleneksel iki boyutlu filtreleme yöntemlerinin yanında, 3-boyutlu uzayda modeller üzerinde filtreleme de yapabilmektedir. Gürültünün ve ayrık noktaların giderilmesinde yeni bir bakış açısı getirilmiş olup, bu yöntem sonucunda 3-boyutlu modellemenin başarımı arttırılmıştır.

Bu tez çalışmasında bölüm 2'de insan görüş sistemi ve bilgisayar görüş sistemleri, bölüm 3'te stereo görüş ve yöntemleri, bölüm 4'te stereo görüşün gerçekleştirilmesindeki adımlar hakkında bilgi verilmiştir. Bölüm 5'te geliştirilmiş olan pasif stereo görüş sistemi, bölüm 6'da deneysel sonuçlar ve bölüm 7'de ise sonuçlar ve tartışma sunulmaktadır.

BÖLÜM 2

BİLGİSAYARLA GÖRME

2.1. İnsan Görüş Sistemi

İnsan dış dünyayı algılayabilmekte duyularını kullanır. Bu algılamanın oluşmasında belki de en işlevsel ve önemli duyu organımız gözlerimizdir. İnsan görüş sisteminin de temel elemanı gözlerimiz olmakla birlikte, görüntüyü algılayabilmemiz için sinir sistemi ve beynimizin de gözlerimizle birlikte uyum içinde çalışmasına ihtiyaç vardır.

İnsan görüşü görsel uyarıcıları algılayan ve buna göre hareket eden karmaşık bir sistemdir. Görülebilen ışıkta bulunan bilgilerin işlenmesiyle görsel algılama meydana gelir. İnsan görüş sisteminde algılama elemanı olan gözden alınan görüntüler optik sinirler üzerinden işlenmek üzere beyne aktarılır [6]. Beyin tarafından görüntünün işlenmesi hakkında çok fazla bilgi sahibi olunmamakla beraber, beynin arka tarafında bulunan görsel kortekste bir çeşit kenar bulma işlevini yerine getiren hücrelerin bulunduğu ortaya çıkarılmıştır. Beyni kısmi zarar gören ve yüzleri tanıyamama ya da hareket eden nesneleri algılayamama gibi sorunlar yaşayan insanların üzerinde yapılan çalışmalar ile de beynin hangi bölgelerinin bu görevleri yerine getirdiği bilinmektedir [7].

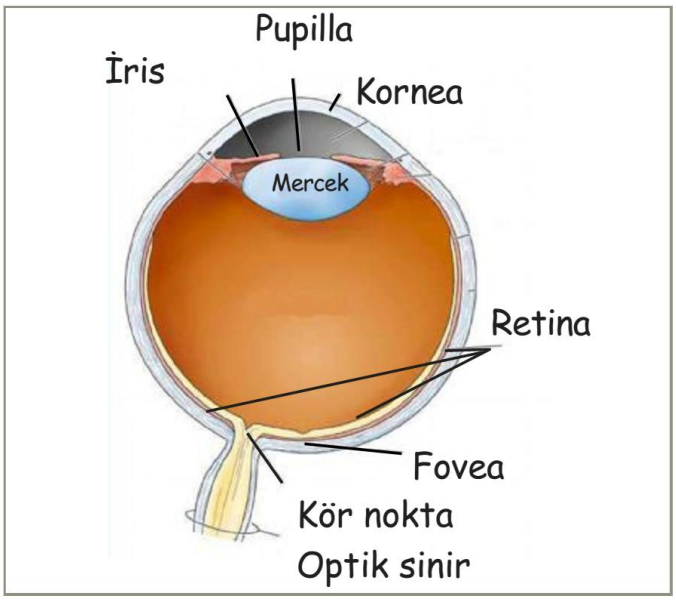
İnsan görme sisteminin çalışmasında 3 önemli kısım bulunmaktadır:

- Göz
- Sinir sistemi
- Beyin

2.1.1. Göz

Göz orbita adı verilen göz çukurunun ortasında bulunan, ortalama 20mm çapında bir küredir. Ön kısmı açıkta bulunduğundan orbita kemik kenarları ve göz kapakları tarafından korunur. Göz küresi üç temel katmandan oluşur. İlk katman şeffaf

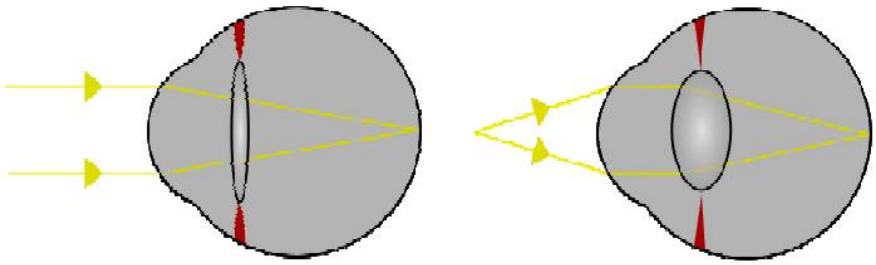
doku kornea ile sklera ve konjonktiva zarından oluşan çevresindeki opak yapıyı ihtiva eden destek katmanıdır. Orta katman damarsal tabaka olup koro idea, silyer cisim ve iristen meydana gelmektedir. İrisin ortasındaki açıklık pupilla olarak adlandırılır. Son ve en içte bulunan katman ise sinir katmanı olup retina tabakasını ihtiva eder [8]. Gözün yapısı Şekil 2.1'de görülebilir.



Şekil 2.1. Gözün yapısı

Cisimlerden yansıyan ışıklar gözün önünde bulunan saydam tabaka kornea ve mercek tarafından kırıldıktan ve odaklanma yapıldıktan sonra pupilla içinden geçerek gözün arkasındaki retina üzerine düşürülür. Bir kameradaki diyafram gibi çalışan iris ise küçülüp büyüyerek göze giren ışık miktarını kontrol eder.

Odaklanma merceğe şekil vererek sağlanır. Merceğin iki yanındaki kontrol kasları uzak mesafeye odaklanmak istediğimizde merceği çekerek inceltir. Yakındaki nesnelere odaklanmak gerektiğinde ise merceği kalınlaştırır. Şekil 2.2'de uzak ve yakın nesnelere odaklanma sırasındaki gözün yapısı görülebilir [8]. Gözdeki merceğin kameralardaki optik lenslerden temel farkı bu şekilde esnek yapıda olmasıdır.



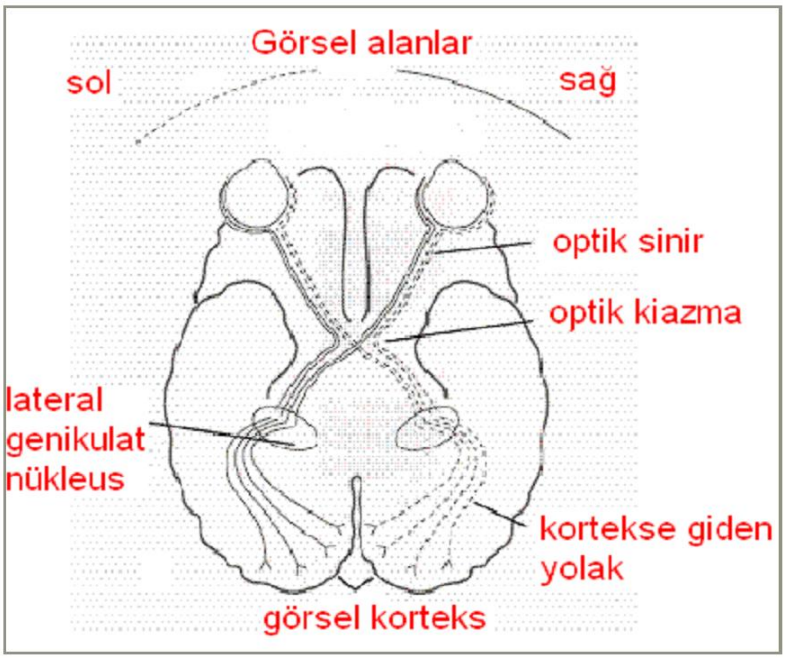
Şekil 2.2. Uzaktaki ve yakındaki cisimlere odaklanma

Işık retina üzerine isabet ettiğinde buradaki alıcılar tarafından küçük elektriksel sinyaller oluşturulur. Retina üzerinde iki çeşit alıcı bulunur. Sayıları 6-7 milyon civarında olan ve koni olarak adlandırılan alıcılar renge karşı duyarlıdır. Kırmızı, mavi ve yeşile karşı duyarlı olan üç çeşit koni bulunur. Sayıları 100 milyon civarında olan ve çubuk olarak adlandırılan çok hassas alıcılar ise siyah-beyaz görüş için kullanılır. Görüş alanının tümünün genel bir resmini verme işini yaparlar.

2.1.2. Sinir Sistemi

Dalga boyuna duyarlı bu koni ve çubuk alıcılardan gelen tepkilerden sinirsel sinyaller oluşturulur. Gelen tepkiler logaritmik bir şekilde toplanır. Konilerden gelen sinyaller renk ve parlaklık bilgisini yansıtacak şekilde birleştirilir. Birleştirilen sinyaller optik sinir boyunca taşınır [7].

Her bir gözün optik siniri beyne gider. Bu optik sinir liflerinin bir yarısı çaprazlanarak beynin karşı tarafına geçer. Her iki gözden gelen lifleri oluşturan bu demetler birlikte optik yolu oluştururlar ve sinaptik aktarmanın ardından görsel kortekse yönelirler. Şekil 2.3'de sinir sistemi ve beyin ilişkisi görülebilir.



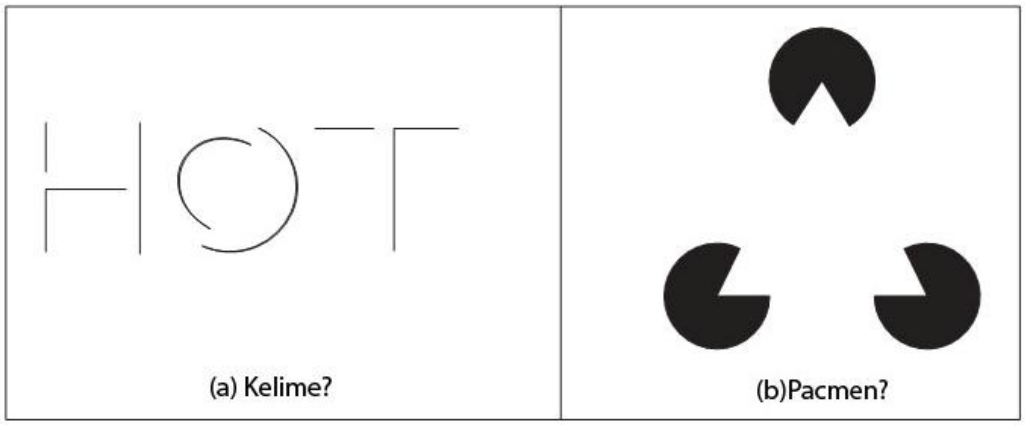
Şekil 2.3. Optik sinir ve beyin bağlantısı

2.1.3. Beyin

Sinyaller görsel kortekse vardığında çevremizdeki görsel uzayın bir temsili oluşturulur. Görsel dünyanın sol tarafı beynin sağ yarımküresinde, sağ tarafı ise sol yarımküresindedir. Gelen sinir sinyalleri nesnelerin arasındaki ilişkinin tanımlandığı bağlantı kurucu kortex (associative kortex) ve örüntülerin işlendiği oksipital korteks olarak adlandırılan beynin iki bölgesinde işlenir. Beynin bu bölgelerinde tam olarak hangi işlemlerin yapıldığı bilinmemektedir ve ancak psikolojik modellerle çalışması açıklanabilmektedir [7].

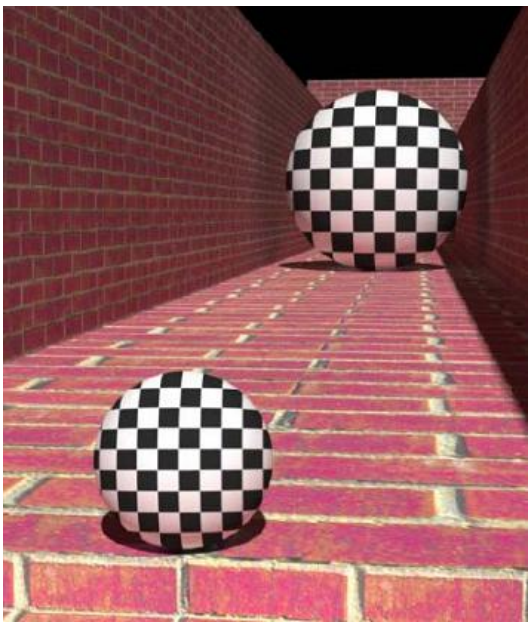
Gözün bir fonksiyonunun nesnelerin kenar ve köşelerini kullanmak olduğu bilinmektedir. Şekil 2.4a'daki kelime kolaylıkla okunabilmektedir. Bu okuma işlemi örüntünün yazılı bir metni ifade ettiğinin bilinmesinden gelen bilgiyle eksik kenarların tamamlanması sonucunda sağlanır. Resim daha detaylı incelendiğinde, aydınlanmamış alanlarda gölgelere sebep olan bir aydınlatma algısı oluştuğunu görürüz. Bunun sebebi genel olarak ışığın çok parlak olduğu durumlarda göz tarafından algılanan resimdeki bazı kenarların kaybolmasından kaynaklanmaktadır. Bu durum görmenin fiziksel bir tepkinin dışında, örneğin katı geometri gibi beyin tarafından önceden öğrenilmiş bilgilerden de yararlanılarak oluştuğunu göstermektedir.

Şekil 2.4b'ye bakıldığında ise karşılaşan üç Pacmen adlı oyun karakteri görülebileceği gibi, üç siyah dairenin üzerine yerleştirilmiş bir üçgen de görülebilmektedir [7]. Farklı insanlar için bu iki farklı görme durumu ortaya çıkabilmektedir.



Şekil 2.4. İnsanlarda resim algısında köşe kullanımı

Başa çıkabileceği şekilde eğitilmediği bir sahne ile gözü aldatmak da mümkündür. Şekil 2.5'de görülen iki kürenin ebatları aynı olmakla birlikte öndeki küçük, arkadaki ise büyük algılanmaktadır [9].



Şekil 2.5. İnsan gözünün aldatılması

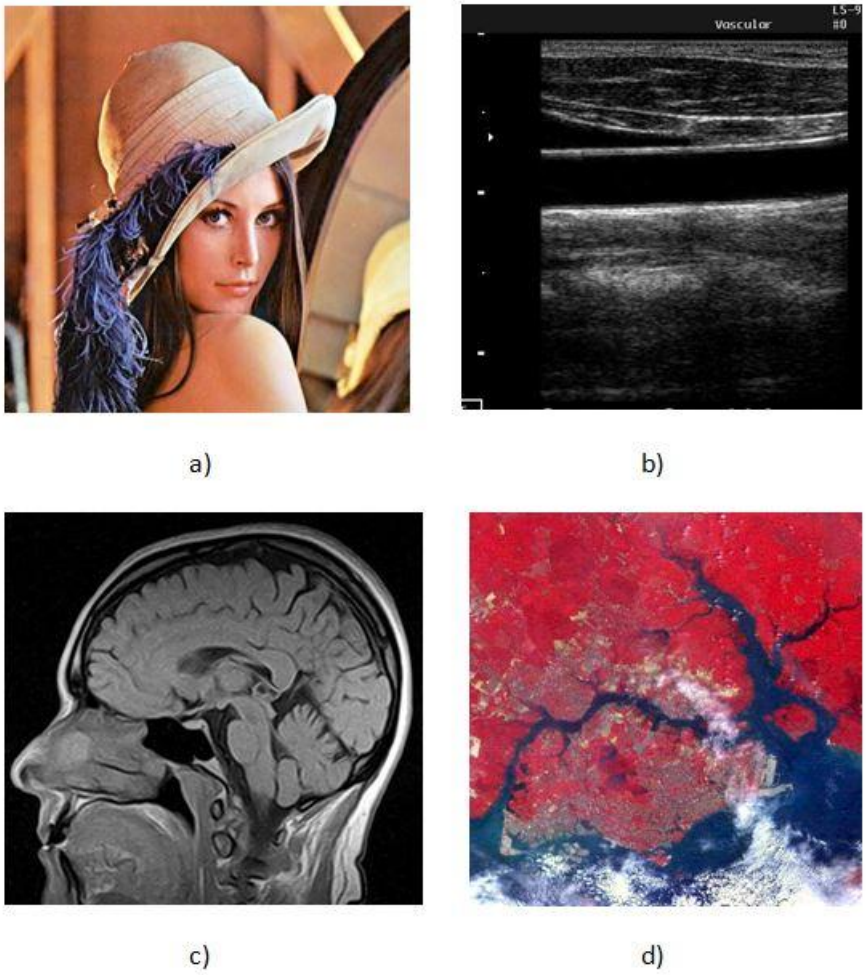
2.2. Bilgisayarla Görme

Bilgisayarla görme gerçek dünyadan resimlerin ve verilerin alınması, işlenmesi, analiz edilmesi ve anlamlandırılması için metotlar içeren bir bilgisayar bilimi alanıdır. İnsanların dış dünyayı görme ve algılama becerilerinin makinelere aktarılması amacıyla ortaya çıkmış ve hala gelişimine devam eden bir alandır. Bilgisayarla görme, insanlarda görme ve dış dünyayı algılamanın ek bir çaba gerektirmeden meydana gelmesinden dolayı kolay gibi görülebilmekle birlikte, bilgisayarlar için zorlu ve karmaşık bir konudur.

Bilgisayarla görme alanındaki çalışmaların 1963 yılında Lawrence Roberts'ın "3-Boyutlu cisimlerin makine algılaması" isimli çalışmasıyla başladığı kabul edilmektedir. İlk zamanlarda basit ve çok fazla çalışma yapılamayacak bir alan olarak görülen bilgisayarla görme, günümüzde çok farklı yöntem ve uygulama alanlarıyla büyük bir bilimsel çalışma alanı halini almıştır [10].

2.2.1. Görüntü Kaynakları

Bilgisayarlar için görüntü elde edilebilecek temel kaynak kameralar olarak düşünülebilir. Fakat kamera dışındaki farklı kaynaklardan da görüntü elde edilip, bilgisayarlar tarafından işlenebilir. Bu diğer kaynaklar arasında ultrason cihazları, uydular ya da manyetik rezonans (MR) cihazları gibi cihazlar bulunmaktadır. Şekil 2.6'da farklı kaynaklardan elde edilerek bilgisayara aktarılmış olan görüntüler görülmektedir.



Şekil 2.6. Farklı görüntü kaynaklarından alınan görüntüler a) kameradan alınan insan portresi b) ultrason cihazında şahdamarın görüntüsü c) MR cihazında insan kafası d) uydudan alınan yeryüzü görüntüsü

2.2.2. Sayısal Görüntü

Farklı kaynaklardan da gelse, bilgisayar tarafından alınan herhangi bir resim hangi tipte olursa olsun 2-boyutlu bir sayı dizisiyle (matris) ifade edilir. Şekil 2.7'de gerçek bir resimden elde edilmiş gri-tonlu bir resmin 18x18 matris şeklinde gösterimi görülmektedir. Görüntüyü oluşturan her bir pikselin gri-düzeyi bilgisi matrisin sayısal verisini oluşturmaktadır. Resmin yapısına göre bu sayı dizisi renk, ışık yoğunluğu ve uzaklık gibi bilgilerden de oluşabilir [11].

67	67	66	68	66	67	64	65	65	63	63	69	61	64	63	66	61	60
69	68	63	68	65	62	65	61	50	26	32	65	61	67	64	65	66	63
72	71	70	87	67	60	28	21	17	18	13	15	20	59	61	65	66	64
75	73	76	78	67	26	20	19	16	18	16	13	18	21	50	61	69	70
74	75	78	74	39	31	31	30	46	37	69	66	64	43	18	63	69	60
73	75	77	64	41	20	18	22	63	92	99	88	78	73	39	40	59	65
74	75	71	42	19	12	14	28	79	102	107	96	87	79	57	29	68	66
75	75	66	43	12	11	16	62	87	84	84	108	83	84	59	39	70	66
76	74	49	42	37	10	34	78	90	99	68	94	97	51	40	69	72	65
76	63	40	57	123	88	60	83	95	88	80	71	67	69	32	67	73	73
78	50	32	33	90	121	66	86	100	116	87	85	80	74	71	56	58	48
80	40	33	16	63	107	57	86	103	113	113	104	94	86	77	48	47	45
88	41	35	10	15	94	67	96	98	91	86	105	81	77	71	35	45	47
87	51	35	15	15	17	51	92	104	101	72	74	87	100	27	31	44	46
86	42	47	11	13	16	71	76	89	95	116	91	67	87	12	25	43	51
96	67	20	12	17	17	86	89	90	101	96	89	62	13	11	19	40	51
99	88	19	15	15	18	32	107	99	86	95	92	26	13	13	16	49	52
99	77	16	14	14	16	35	115	111	109	91	79	17	16	13	46	48	51



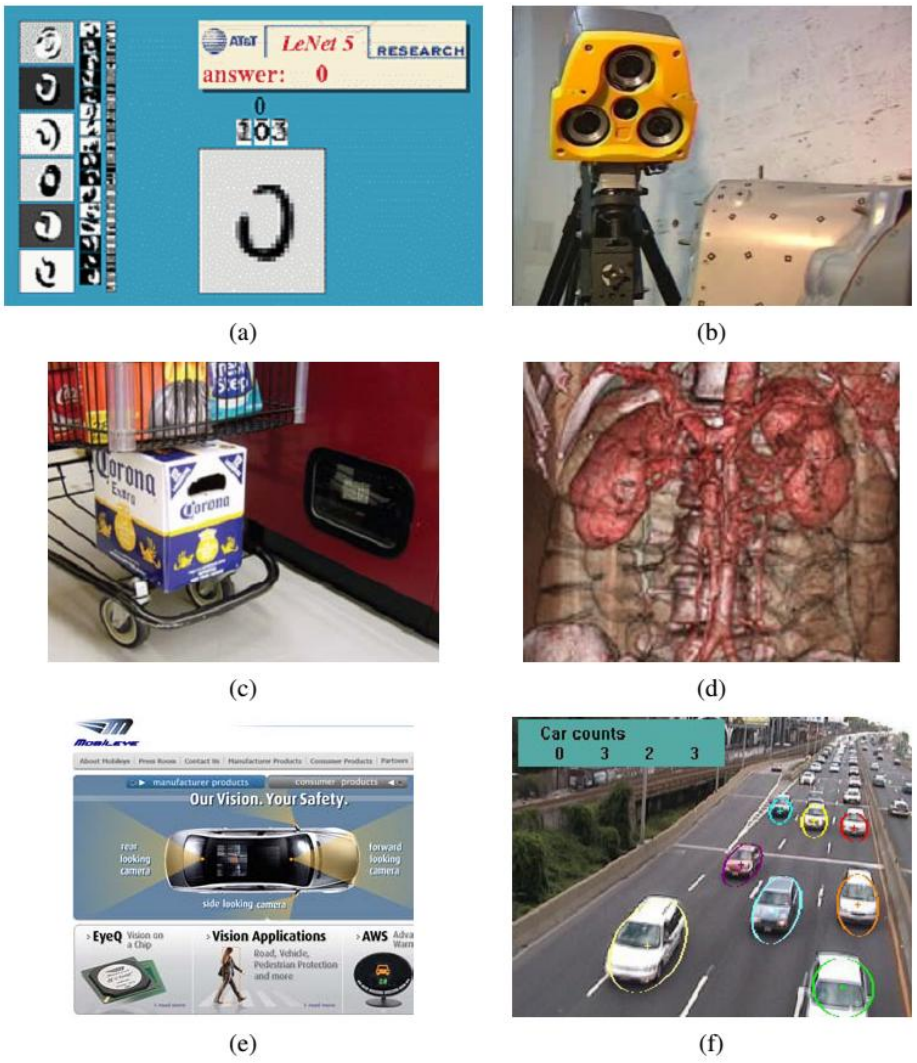
Şekil 2.7. Sayısal görüntü, gri-tonlu ve düşük çözünürlüklü bir yüzün (sağ üst) sayı dizisiyle gösterimi (sol)

2.2.3. Bilgisayarla Görme Uygulamaları

İnsanlar tarafından yapılan işlemlerin otomatik hale getirilip, bilgisayar ya da makineler tarafından yapılması talepleri arttıkça, bilgisayarla görmenin sahip olduğu potansiyel fark edilerek bu alanda birçok çalışma gerçekleştirilmeye başlanmıştır. Bilgisayarla görme günümüzde çok çeşitli uygulamalar tarafından kullanılmaktadır. Belli başlı uygulama alanları şunlardır [12]:

- **Optik karakter tanıma (OCR):** Mektuplarda elle yazılmış posta kodlarının okunması (Şekil 2.8a) ve plaka tanıma.
- **Makine denetimi:** Uçak kanatları ya da otomobil parçaları gibi ürünlerin kalite kontrol amaçlı toleranslara uygunluğunun ölçülmesi (Şekil 2.8b) ya da çelik dökümlerde kusurların X-ray yöntemiyle bulunması.
- **Perakende satış:** Otomatikleştirilmiş kontrol hatlarında nesne tanımlama (Şekil 2.8c).
- **3-boyutlu model inşası:** Bing haritalar sistemi gibi sistemlerde kullanılan, hava fotoğraflarından 3-boyutlu modellerin tamamen otomatik inşası.

- **Medikal görüntüleme:** Ameliyat öncesi ve ameliyat esnasında görüntüleme ya da yaşlandıkça değişen insan morfolojisinin incelenmesi.
- **Otomobil güvenliği:** Yayalar ya da yolda beklenmeyen diğer nesnelerin tanınması, tamamen otomatikleştirilmiş araç yolculuğu.
- **Görüntü birleştirme:** Bilgisayarda oluşturulan görüntülerle gerçek video görüntülerinin birleştirilmesi. Özellikle film endüstrisinde kullanılmakta olup, kaynak videodaki özellik noktalarının 3-boyutlu kamera hareketi ve çerceve yapısının tahmin edilmesiyle gerçekleştirilmektedir. Ön plandaki ve arka plandaki nesnelerin arasına yeni nesneler eklenmesi işlemi yapılmaktadır.
- **Hareket yakalama:** Çoklu kamera ya da diğer görüntü temelli teknikler kullanarak, üzerlerinde izlenebilir işaretler taşıyan insanların hareketlerinin bilgisayar animasyonlarına aktarılması.
- **Gözetleme:** İzinsiz giriş yapan kişilerin izlenmesi, karayolu trafiğinin analizi (Şekil 2.8d), boğulma durumları için havuzların takibi.
- **Parmak izi tanıma ve biyometrik yöntemler:** Otomatik kimlik denetimi ve adli uygulamalar.



(a) (b) (c) (d) (e) (f)

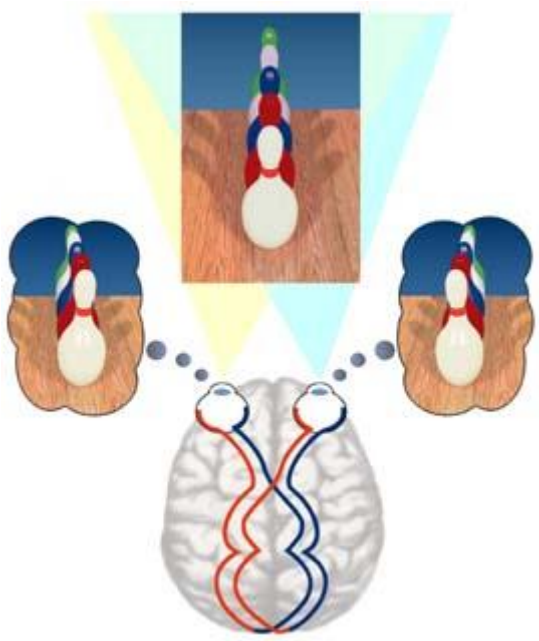
Şekil 2.8. Bazı endüstriyel bilgisayar görüşü uygulamaları: a) optik karakter tanıma b) makine denetimi c) perakende satış d) medikal görüntüleme e) otomobil güvenliği f) gözetleme ve trafik izleme

BÖLÜM 3

STEREO GÖRÜŞ VE DERİNLİK ANALİZİ

3.1. İnsanda Derinlik Algısı

İnsanlar dış dünyayı ekstra bir çaba harcamadan 3-boyutlu olarak görebilmektedirler. Bunu sağlayan en önemli etken, insanların sahip olduğu yan yana ve birbirlerinden yaklaşık 6,5 cm uzaklıkta bulunan iki adet gözdür. Her iki göz de aynı alanın farklı açılardan görüntüsünü elde etmektedir. Şekil 3.1'de görüldüğü gibi, bu iki görüntü beyinde işlenirken benzerlikler eşleştirilerek ve küçük farklılıklar eklenerek 3-boyutlu tek bir görüntüde birleştirilmekte ve böylece dış dünya 3-boyutlu olarak algılanmış olmaktadır [13].



Şekil 3.1. İnsanda 3-boyutlu görme

İnsanlarda olduğu gibi, bir sahnenin iki ya da daha fazla görüntüsünün kullanılması ile derinlik ve 3-boyut bilgisinin çıkarılması stereo görüş olarak

adlandırılmaktadır [14]. Tek gözü görmeyen kişiler değerlendirildiğinde, insan beyninin tek gözden farklı zamanlarda ve farklı açılarda aldığı görüntülerden de 3-boyutlu algı oluşturabildiği bilinmektedir. Beynin bu yeteneği yine de yeterli olmayıp, bu kişilerde uzaklık hesaplamada Şekil 3.2'de olduğu gibi sorunlar ortaya çıkabilmektedir.



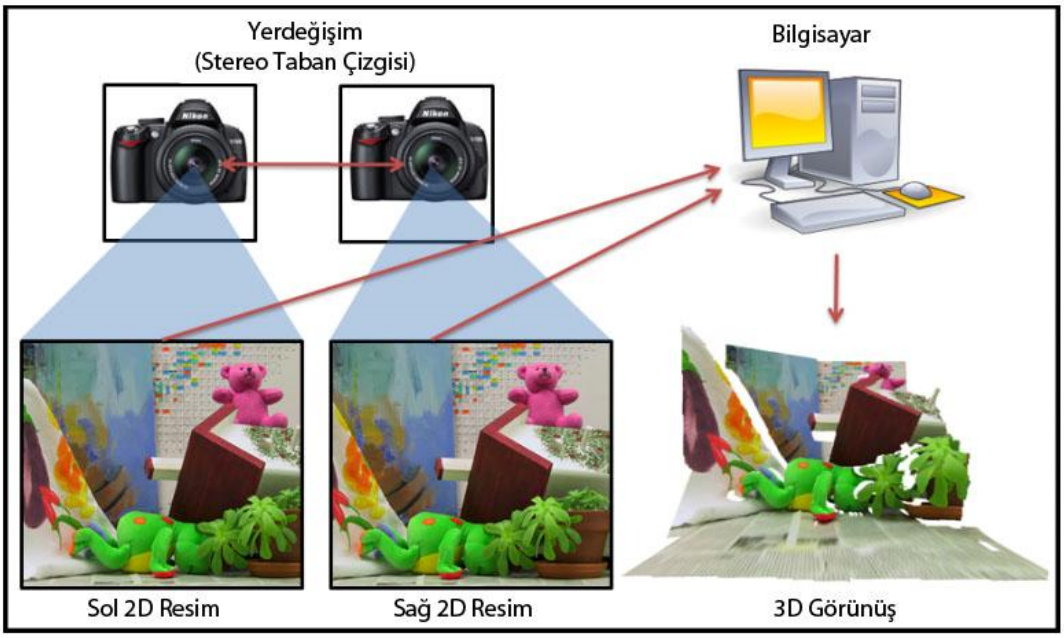
Şekil 3.2. Tek gözle görmede derinlik algısı sorunu

3.2. Bilgisayarda Derinlik Analizi

Bilgisayarlar tarafından bir sahnenin derinlik bilgisine ve 3-boyutlu görünüşüne ulaşmak için iki farklı yöntem bulunmaktadır. Bunlardan birincisi insanlarda bulunan görüş sisteminin bilgisayarlara kopyalanmasıyla oluşturulan pasif yöntemler, diğeri ise pasif yöntemin zorluklarını aşabilmek için ortaya çıkarılmış olan aktif yöntemlerdir [15].

3.2.1. Pasif Görüş Yöntemi

Bu yöntemde, bilgisayarlar tarafından gerçek dünyanın 3-boyutlu algılanması için insanlardaki algılama yönteminden yola çıkılmaktadır. İnsanda bulunan gözlerin yerini bilgisayarda kameralar almaktadır. İki kameradan farklı açılardan alınan iki görüntü bilgisayar tarafından işlenerek, Şekil 3.3'de görüldüğü gibi 3-boyutlu görüntü elde edilebilmektedir. Bu yönteme pasif stereo görüş yöntemi adı verilmektedir.



Şekil 3.3. Pasif stereo görüş

İki farklı perspektiften görüntüyü elde ederken, iki kamera kullanımını daha kolay hale getirmek için yapısında iki kameraya sahip olan stereo görüş için özelleştirilmiş kameralar da bulunmaktadır. Şekil 3.4'te bu yapıdaki bazı stereo görüş kameraları görülmektedir.



a) b)

Şekil 3.4. Stereo görüş kameraları a) bumblebee b) minoru

Bilgisayarda iki kamerayla üç boyutlu görme işlemini gerçekleştirmek için, şu dört temel adımın gerçekleştirilmesi gerekir [16]:

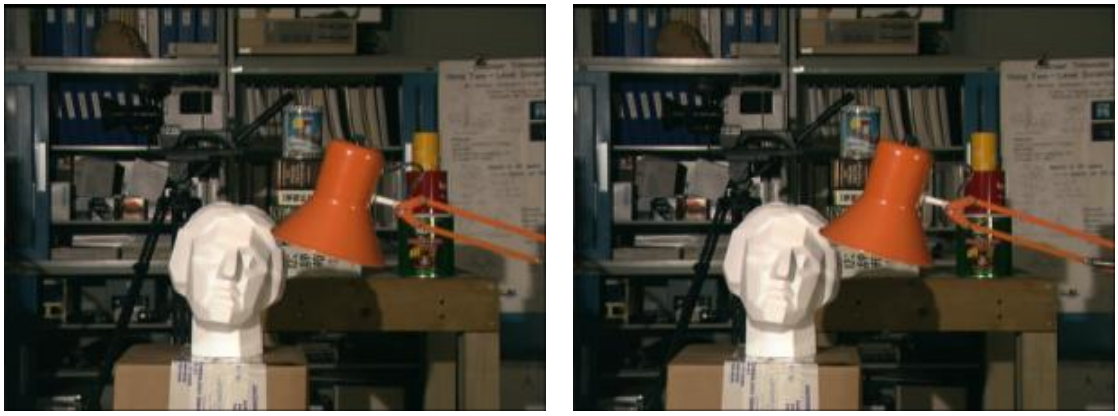
- **Stereo kalibrasyon ve lens bozukluklarının giderilmesi:** Kalibrasyon sonucunda elde edilen kamera parametreleri kullanılarak, kamera görüntülerinde

lens yapısından kaynaklanan görüntü bozulmalarının giderilmesi gerekmektedir. Bu işlemin sonucunda bozukluğu giderilmiş resimler elde edilmektedir.

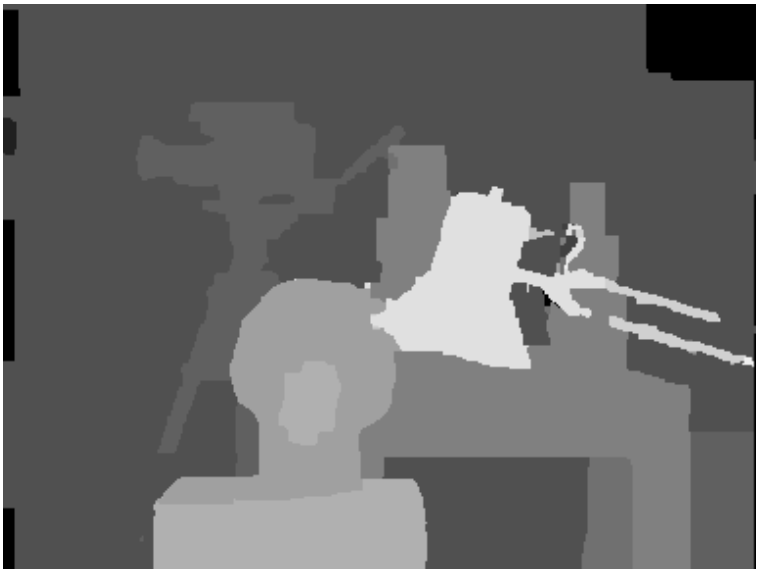
- **Stereo Düzeltme:** Kameraların arasındaki açıların ve mesafelerin ayarlanması adımıdır. Bu işlemin sonucunda satır-hizalanmış ve düzeltilmiş resimler elde edilir.
- **Stereo Eşleştirme:** Aynı özelliklerin sol ve sağ kameralarda bulunması adımıdır. Bu işlemin sonucunda aykırılık haritası elde edilmektedir. Aykırılıklar bulunmuş olan aynı özelliğin, sağ ve sol kameraların resim düzlemlerindeki x-koordinatları arasındaki farktır: x^l-x^r
- **Yeniden Yansıtma:** Eğer kameraların geometrik yerleşimi biliniyorsa, üçgenleme yöntemi kullanılarak aykırılık haritası uzaklıklara dönüştürülebilmektedir. Bu işlem yeniden yansıtma olarak adlandırılmakta ve sonucunda derinlik haritası elde edilmektedir.

Bu temel adımların dışında, daha iyi 3-boyutlu algılama için ham görüntüler ve derinlik haritası üzerinde bazı filtreleme ve düzgünleştirme işlemleri de yapılabilmektedir. Derinlik haritasından 3-boyutlu modeller oluşturulmak isteniyorsa modelleme adımı da gerçekleştirilmelidir.

Şekil 3.5'de stereo eşleştirme çalışmalarında sıklıkla kullanılan Tsukuba resim çifti görülmektedir [17]. Tsukuba Üniversitesi tarafından sağlanan bu resim çifti kalibre edilmiş ve düzeltilmiş görüntülerden oluşmaktadır. Şekil 3.6'da ise bu görüntülerden elde edilmiş olan aykırılık haritası görülmektedir [18].



Şekil 3.5. Sol ve sağ kameradan alınan Tsukuba resim çifti



Şekil 3.6. Tsukuba resim çifti aykırılık haritası

Stereo eşleştirme sonucu elde edilen aykırılık haritasında, kameralara yakın olan nesneler daha açık renklerle, uzaktaki nesneler ise daha koyu renklerle ifade edilmektedir.

3.2.2. Aktif Görüş Yöntemleri

3-boyutlu algılamada pasif yöntemin eşleştirme zorluklarını yenebilmek için yapılan çalışmalar sonucu aktif görüş yöntemleri ortaya çıkarılmıştır. Aktif yöntemlerde pasif yöntemlerden farklı olarak, sahneye ışık gönderen bir yansıtıcı cihaz bulunmaktadır. Lazer ya da LCD/DLP projeksiyon cihazı aracılığıyla yayılan ışık desenleri sahne ya da nesne üzerine yansıtıldıktan sonra, bir kamera tarafından derinlik hesaplamada kullanılmaktadır. Pasif yöntemlere göre, aktif yöntemlerin daha isabetli ve güvenilir sonuçlar verdiği kabul edilmektedir [19, 20].

Pasif sistemlerde karşılaşılan eşleştirme zorlukları aktif sistemlerde bulunmadığından, yeterli doku ya da özelliğe sahip olmayan sahneler için aktif sistemler daha avantajlıdır. Ancak ışık kullanımı gerektiğinden dış mekanlardan çok, iç mekanlarda kullanımı tercih edilmektedir. Ayrıca hem kamera, hem de projeksiyon cihazının önceden kalibre edilmesi gerekliliği bulunmaktadır. Işık kaynağı olarak lazer kullanan sistemlerde, lazer ışınının göze temas etmesi halinde, gözde kalıcı hasarlar ortaya çıkabilmektedir.

Aktif görüş yöntemleri, derinlik bilgisini hesaplarken, üçgenleme ve uçuş-zamanı olmak üzere iki farklı yöntem kullanabilmektedirler. Üçgenleme tabanlı yöntemler tekli/çoklu-nokta gönderimi, çizgi gönderimi, saçak ve kodlanmış desen gönderimi ve moire efekti yöntemleridir. Uçuş-zamanı yöntemleri ise lazer uzaklık bulucular kullanımı ve interferometre yöntemleridir.

3.2.2.1. Üçgenleme Yöntemi Kullananlar

Pasif stereo görüş yönteminde olduğu gibi, üçgenleme yönteminde ışık yayan cihaz, kamera ve taranan nesne bir üçgen oluşturmakta ve derinlik hesaplanırken trigonometrik yöntemlerle noktaların x, y ve z koordinatları hesaplanabilmektedir. Üçgenleme yöntemi hakkında ayrıntılı bilgi bölüm 4'de verilmiştir.

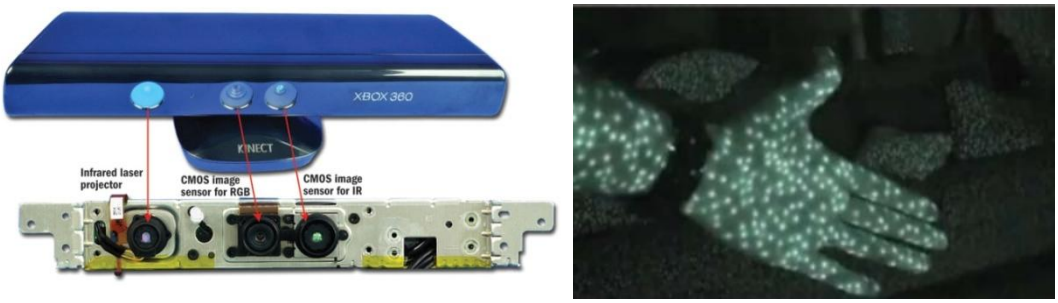
3.2.2.1.1. Tekli/Çoklu-Nokta Kullanımı

Bu yöntemde bir lazer cihazı tarafından sahneye çok sayıda noktasal ışık gönderilir ve kamera ile birlikte üçgenleme gerçekleştirilerek derinlik bilgisi elde edilir. Şekil 3.7'de bir lazer cihazı üzerine yerleştirilmiş kamera ile yansıtılmış noktalar görülmektedir [21].



Şekil 3.7. Bir lazer cihazı üzerine yerleştirilmiş kamera ve nokta gönderimi

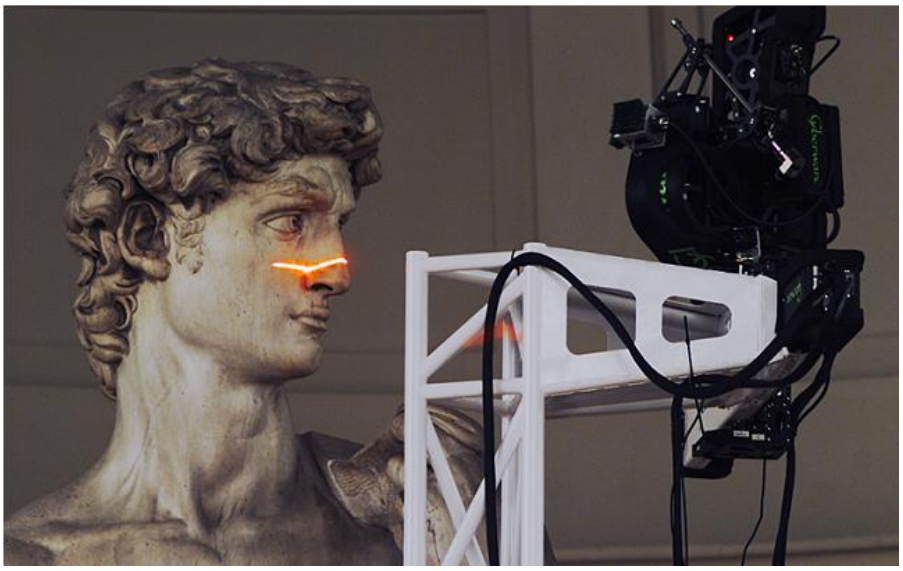
Lazer cihazların boyutu, maliyeti ve insan sağlığı için tehlike oluşturmasından dolayı daha zararsız olan kızılötesi lazer dalgaları kullanımı da son zamanda önem kazanmaya başlamıştır. Bu yöntemi kullanan cihazlara örnek olarak Microsoft firmasının bir oyun konsolu için çıkardığı Kinect 1.0 adlı cihazı verilebilir. Bu cihaz oyun konsolunda kullanıldığından ve insanlarla etkileşim içinde çalıştığından sistemde lazer ışığının farklı dalga boyutunda olan ve insan sağlığı için tehlike oluşturmayan kızılötesi hali kullanılmıştır. Şekil 3.8'de Kinect cihazı ve yansıtılan çoklu noktalar görülmektedir [22]. Bu yöntem gerçek zamanlı kullanılabilmesi ile diğer üçgenleme yöntemlerine göre öne çıkmaktadır.



Şekil 3.8. Kinect 1.0 a) iç yapısı b) yansıtılan kızılötesi noktalar

3.2.2.1.2. Çizgi Kullanımı

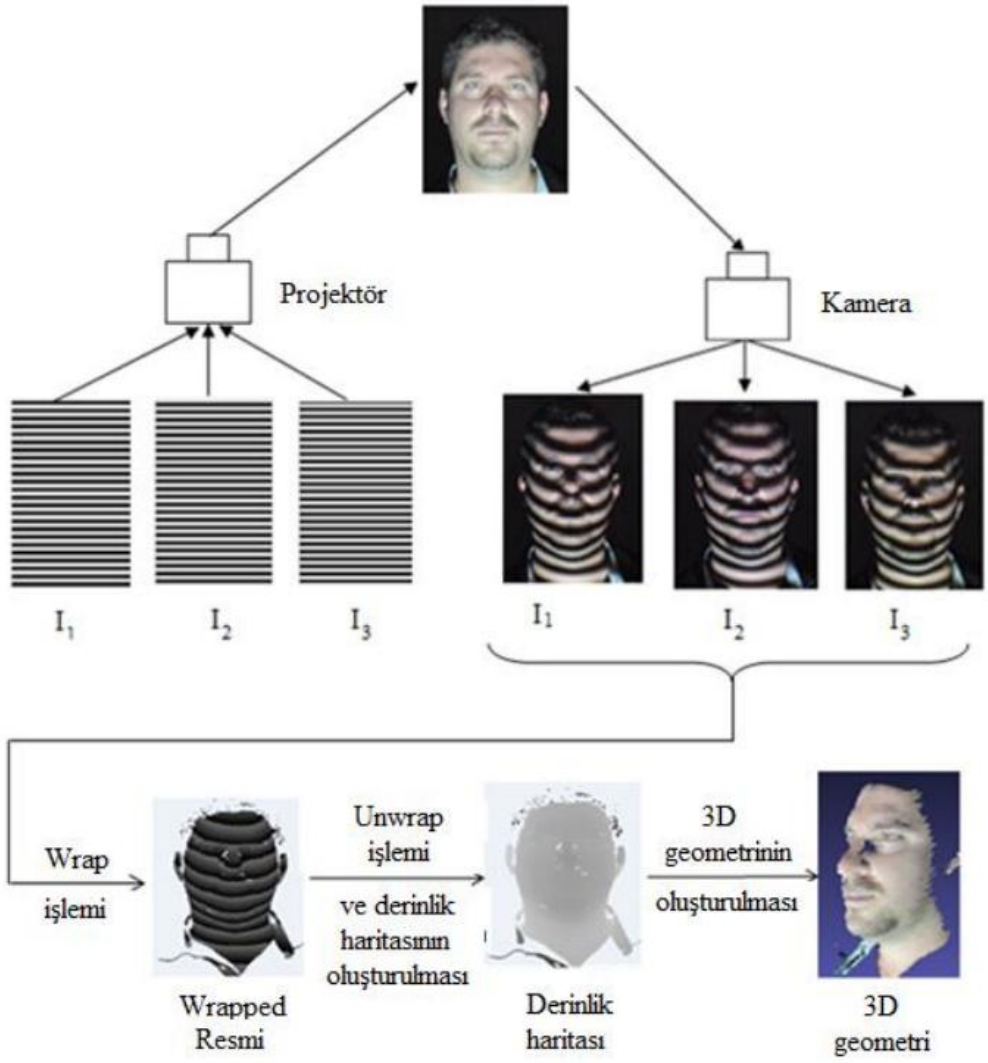
Bu yöntemde tek bir çizgi halinde lazer ışığı yansıtılarak tüm nesnenin taraması yapılmaktadır. Bu yöntemi kullanarak çok isabetli ve hassas sonuçlara ulaşılabilmektedir. Yöntemin diğer yöntemlere göre yavaş çalışması ve geç sonuç vermesi yanında, insan sağlığına zararlı olabilecek lazer ışığı kullanması dezavantajlarıdır. Şekil 3.9'da çizgi gönderimi yöntemi ile çalışan bir sistem görülmektedir.



Şekil 3.9. Çizgi gönderimi kullanan bir lazer-kamera sistemi

3.2.2.1.3. Saçak ve Kodlanmış Desen Kullanımı

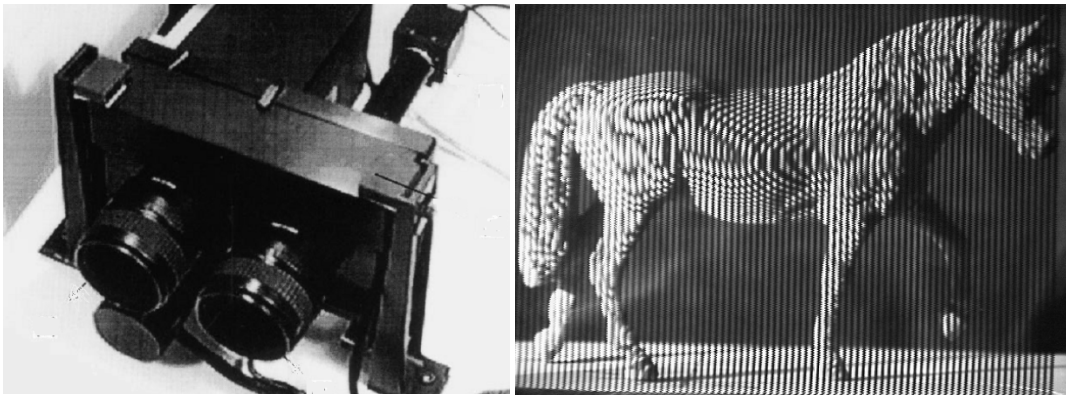
Kodlanmış desen yönteminde bir projeksiyon cihazı ve bir kamera kullanılarak derinlik bilgisi elde edilmektedir. Faz desenleri projeksiyon makinesi ile modelleme yapılacak nesne üzerine yansıtıldıktan sonra kamera ile resimler kaydedilmektedir [23]. Desenlerdeki bozulmalardan yola çıkılarak derinlik bilgisi elde edilmektedir. Kamera ve projeksiyon cihazının bu yöntemde de kalibre edilmesi gereklidir. Bu yöntem gerçek zamanlı kullanıma uygun olmayan ve sadece iç mekanlarda kullanılabilecek bir yöntem olsa da hızlı ve ucuz bir sistem kurulumu yapılabilmektedir [24]. Şekil 3.10'da sistemin çalışma prensibi görülmektedir [23].



Şekil 3.10. Desen kullanımı işlem adımları

3.2.2.1.4. Moire Efekti Kullanımı

Bir ışık kaynağı ve bir kamera kullanılarak modelleme yapabilen bir yöntemdir. Modelleme yapılacak nesnenin önüne bir ızgara yerleştirilerek farklı açılardan aydınlatma yapılmaktadır. Izgaranın model üzerinde oluşturduğu gölgeler bir kamera tarafından işlenerek derinlik bilgisi elde edilmektedir. Şekil 3.11'de kullanılan sistem ve nesne üzerinde oluşan görüntü görülebilir [25, 26].



a) b)

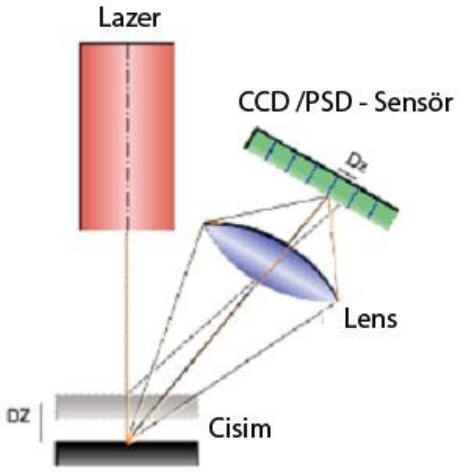
Şekil 3.11. Moire efekti kullanımı a) bir ışık kaynağı ve bir kameradan oluşan sistem b) ızgara ile aydınlatılmış nesne

3.2.2.2. Uçuş-Zamanı Yöntemi Kullananlar

Uçuş zamanı yönteminde, bir lazer cihazından çıkan lazer ışınının çıkış zamanı ile nesneye çarpma süresi ölçülerek nesnenin uzaklığı hesaplanmaktadır [27]. Bu yöntemde lazer uzaklık bulucular kullanımı ve interferometre yöntemi kullanımı olmak üzere iki farklı yöntem bulunmaktadır.

3.2.2.2.1. Lazer Uzaklık Bulucular

Lazer uzaklık bulucular yakın çevredeki bir nesneye olan uzaklığı, yayınlanmış olan bir lazer ışınının uçuş zamanını ölçerek hesaplayan bir sensöre sahip cihazlardır. Bir lazer kaynağından çıkan lazer ışınları kaynağın önündeki nesneden sekerken, lazer kaynağına göre küçük bir farklı açıyla konumlandırılmış bir optik sensör ise ölçüm yapmaktadır. Şekil 3.12'de görülebileceği üzere, beklenen çarpışma noktası ile ölçülen nokta arasındaki farktan derinlik bilgisi elde edilmektedir [28].



Şekil 3.12. Lazer uzaklık bulucu çalışma sistemi

Işığın hızı *c* bilinmekte olup, ışığın hareket süresi de *t* ise; ışığın hareket süresi tarayıcı ile zemin arasındaki mesafenin iki katına eşit olduğundan uzaklık $d = c.t/2$ formülünden hesaplanabilir. Işık 1 mm mesafeyi 3,3 picosaniyede almakta olduğundan, lazer uzaklık bulucunun başarısı *t* süresini ölçüm başarısına bağlı olmaktadır.

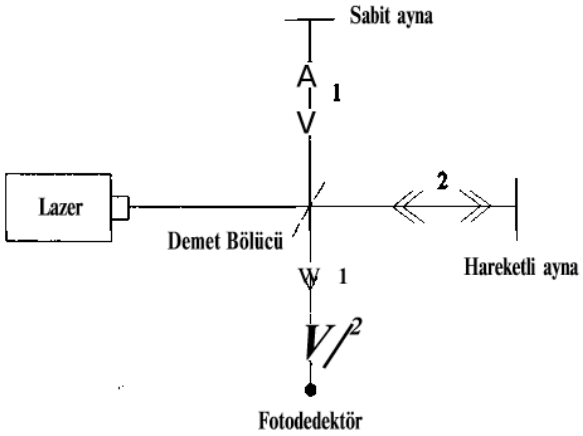
Binaların ya da kaya oluşumları gibi geniş alanların 3-boyutlu modellemesini yapabilen bir lazer tarayıcı Şekil 3.13'te görülmektedir. Tarayıcının baş kısmı yatay ve dikeyde hareket edebildiği için çok geniş bir alanda tarama yapabilmektedir.



Şekil 3.13. Bir lazer uzaklık bulucu

3.2.2.2.2. İnterferometri Yöntemi

İnterferometri yöntemi dalga boylarındaki değişim üzerinden bilgi çıkarımı yapmaktadır. Genel olarak ışık ya da elektromanyetik dalgalar kullanılmaktadır. Michelson interferometresinin yapısını gösteren Şekil 3.14'de görüldüğü üzere, lazer kaynağından çıkan ışın demeti, demet bölücü tarafından iki demete ayrıldıktan sonra yansıtıcı aynalar tarafından fotodedektör üzerinde birleştirilmektedir [29]. Her ışık demeti birleştirilmeden önce farklı rotalar izlemektedir. Rota farklılıkları ve her ışık demetinin aldığı mesafenin fazla olması aralarında bir faz farkı yaratmaktadır. Hareketli aynanın açıları değiştirilerek farklı mesafeler için faz farkları elde edilmekte ve bu faz farkları üzerinden ölçüm yapılmaktadır [30].



Şekil 3.14. Michelson interferometresi

Bu yöntem ile oldukça hassas ölçümler yapılabilmektedir. Modellenen modellerin yüksek çözünürlükte elde edilebilmesi sayesinde yüzey kalite kontrolünde sıklıkla kullanılmaktadır. Ayrıca bu tür sistemler koordinat ölçüm makinelerinin kalibrasyonunda da kullanılmaktadır [31].

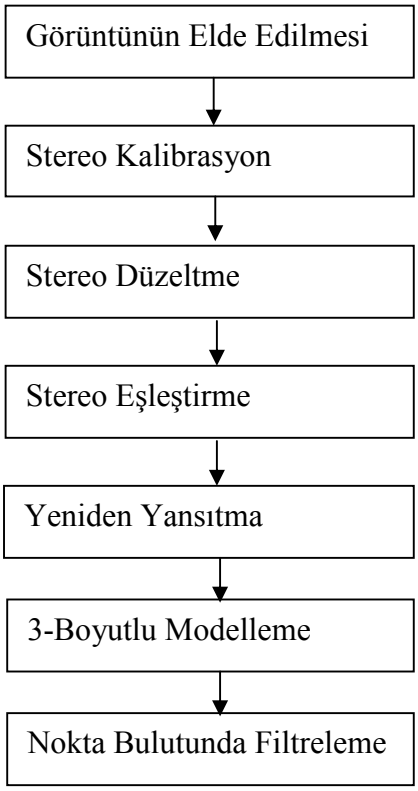
BÖLÜM 4

STEREO GÖRÜŞ İLE DERİNLİK ANALİZİ VE 3-BOYUTLU MODELLEME

4.1. Giriş

İnsanların dış dünyayı 3-boyutlu görmesinden yola çıkarak geliştirilen stereo görüş ile derinlik analizi yapılırken, gerçekleştirilmesi gereken dört temel adım bölüm 3'te kısaca açıklanmıştı. Bu dört temel adımın öncesinde, görüntünün elde edilmesini de bir işlem adımı olarak kabul edebiliriz. Derinlik analizi sonrası sahnenin gerçek görüntüsü kullanılarak 3-boyutlu modelleme yapabilmek amacıyla kalibrasyon, düzeltme, eşleştirme adımlarından sonra yeniden yansıtma adımına modelleme özelliği de eklenmiştir. Daha doğru sonuçlar elde edebilmek için, modelleme sonucunda nokta bulutu şeklinde elde edilen 3-boyutlu model üzerinde matematiksel filtreleme yöntemleri ile hatalı ölçülen noktaların filtrelenerek modelden çıkarılması da bu adımlara eklenmiştir.

Geliştirilen stereo görüş sistemi ile derinlik analizindeki temel adımlar Şekil 4.1'de görülmektedir.



Şekil 4.1. Stereo görüş ile 3-boyutlu modelleme adımları

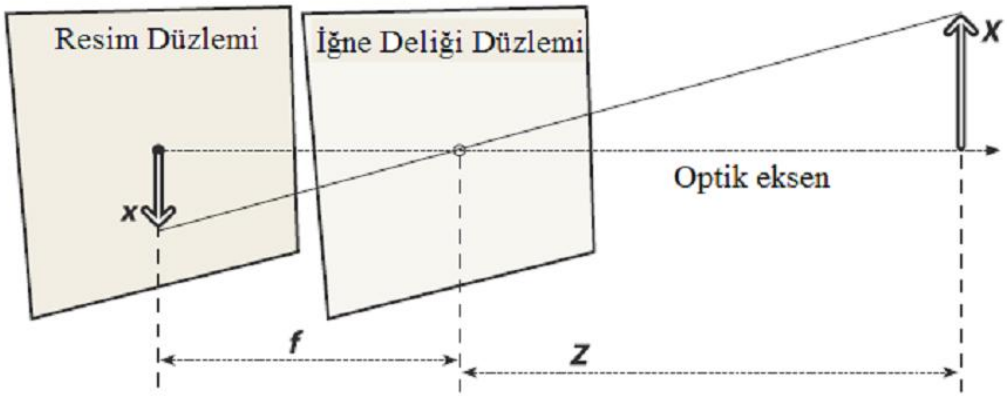
4.2. Görüntünün Elde Edilmesi

İnsan gözü ya da kamera kullanıldığında, görme işlevi dünyadan gelen ışığın algılanmasıyla başlamaktadır. Güneş ya da başka bir ışık kaynağından yayılan ışık bir nesneye çarpana kadar uzayda hareket etmektedir. Işık nesneye çarptığında büyük bir kısmı emilmekte, geri kalan ışık ise gözdeki retinada ya da kameradaki resim düzleminde toplanmaktadır. Bu oluşan geometrinin bilgisayarlı görüşte çok önemli bir yeri vardır ve iğne deliği kamera modeli olarak adlandırılmaktadır [16].

4.2.1. İğne Deliği Kamera Modeli

Görüntü elde etme modeli fotoğrafçılığın başlangıcından beri temel olarak hiç değişmemiştir. Bir nesneden gelen ışık kameranın önünde bulunan bir açıklık ya da delik tarafından yakalandıktan sonra bu ışık huzmeleri kameranın arka tarafında bulunan bir resim düzlemine çarpmaktadır [32]. Kamera modeli, ışığın geldiği noktanın 3-boyutlu koordinatları ile resim düzlemine yansımış halinin 2-boyutlu koordinatları arasındaki matematiksel ilişkiyi ifade eder [10, 33].

İğne deliği kamera yapısı Şekil 4.2'de görülmektedir. Bu modelde resim düzlemi ile iğne deliği düzlemi arasındaki uzaklığa odak uzaklığı denmekte ve *f* ile gösterilmektedir. Nesnenin iğne deliğine uzaklığı Z, nesnenin uzunluğu X, resim düzlemi üzerinde nesnenin görüntüsü ise x ile ifade edilir.



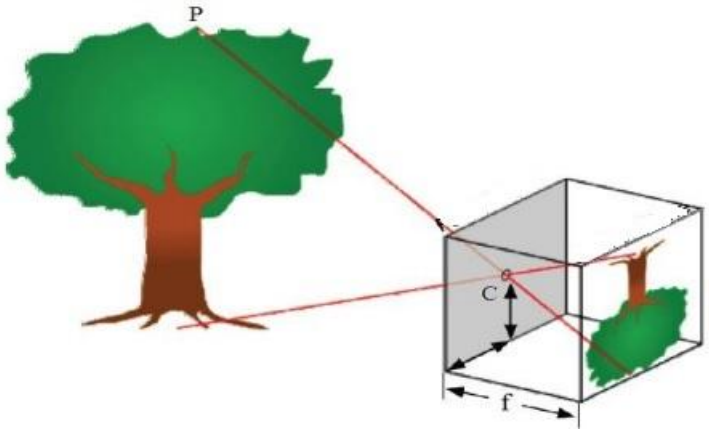
Şekil 4.2. İğne deliği kamera modeli

Üçgenlerin benzerliği kuralını uygulandığında denklem 4.1 elde edilmektedir. Buradan da denklem 4.2'de görüldüğü üzere –x değeri kolaylıkla elde edilmektedir.

$$-x / f = X / Z \tag{4.1}$$

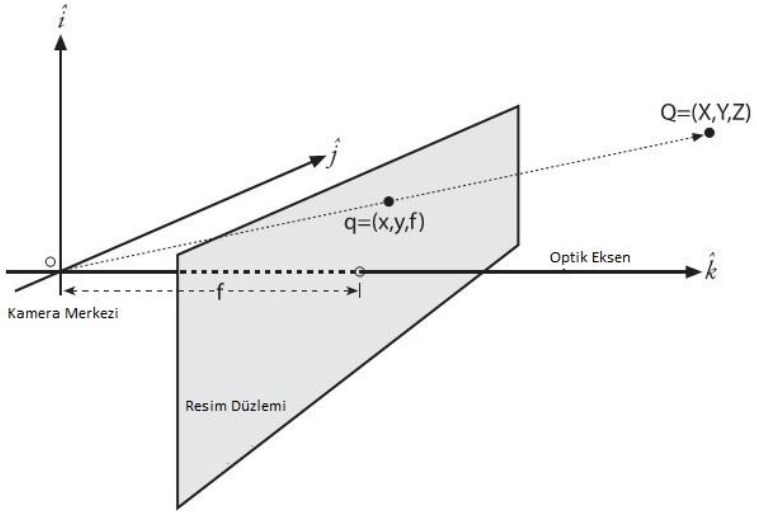
$$-x = f \frac{X}{Z} \tag{4.2}$$

Şekil 4.3'de görülebileceği üzere nesnenin görüntüsü resim düzlemi üzerinde ters şekilde oluşmaktadır [28].



Şekil 4.3. Nesnenin görüntüsünün oluşumu

Nesnenin görüntüsünün düz bir şekilde oluşması ve matematiksel işlemlerde kolaylık sağlamak amacıyla iğne deliği kamera modeli üzerinde değişiklik yapmak gerekmektedir. Bu fiziksel olarak kamera üzerinde yapılan bir değişiklik değildir, çizimi ve matematiksel hesaplamaları daha kolay hale getirmektedir. Şekil 4.4'de görülebileceği gibi nesnedeki her bir noktadan çıkan ışık kamera merkezine doğru yol almaktadır. Üçgenlerin benzerliği kuralı uygulandığında yeni resim düzlemi üzerinde oluşan x değerinin Şekil 4.2'deki modeldeki ile birebir aynı olduğu görülmektedir. Üstelik artık nesne görüntüsü ters oluşmadığından denklem 4.2'deki x'in negatif olma durumu da ortadan kalkmaktadır.



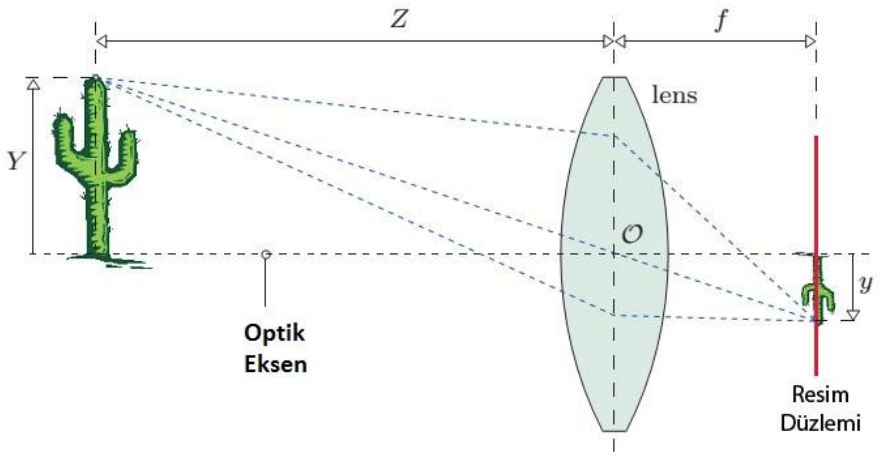
Şekil 4.4. Değiştirilmiş kamera modeli

Resim düzlemi ile optik eksenin kesiştiği noktaya esas nokta adı verilir. Model üzerinde bu nokta tam resim düzleminin ortasında bulunmakta birlikte, gerçek bir kamera üretiminde bunu sağlamak mümkün değildir. Bu yüzden denklem 4.2'ye esas noktanın sapma uzaklığını belirten c_x ve c_y olarak iki parametre daha eklenmesi gerekir. Q, koordinatları (X, Y, Z) olan gerçek dünyadaki bir nokta ise ekran olarak tanımlayabileceğimiz resim düzlemi üzerindeki (x_{ekran}, y_{ekran}) pikselinin yeri denklem 4.3 kullanılarak bulunabilir [16].

$$x_{\text{ekran}} = f_{\text{x}}\left(\frac{X}{Z}\right) + C_{\text{X}} \quad , \quad y_{\text{ekran}} = f_{\text{y}}\left(\frac{Y}{Z}\right) + C_{\text{y}} \tag{4.3}$$

4.2.2. İnce Lens Modeli

İğne deliği kamera modeli kamerada görüntü oluşumunun temelinin ve geometrisinin anlaşılmasında büyük kolaylık sağlasa da pratikte asla kullanılmamıştır. İğne deliği modelinin keskin bir görüntü oluşturabilmesi için çok küçük bir açıklığa sahip olması gerekir. Bu durum kameraya giren ışık miktarını azalttığından, çok uzun pozlama süresi gerektirmektedir. Gerçek hayatta ise optik olarak çok başarılı ve karmaşık bir yapıya sahip olan lens sistemleri kullanılmaktadır. Şekil 4.5'de iğne deliği yerine ince lens yerleştirilmiş bir model görülebilir. Sonuç olarak iğne deliği modelinin resim geometrisinde bir değişiklik olmamaktadır [34].



Şekil 4.5. İnce lens modeli

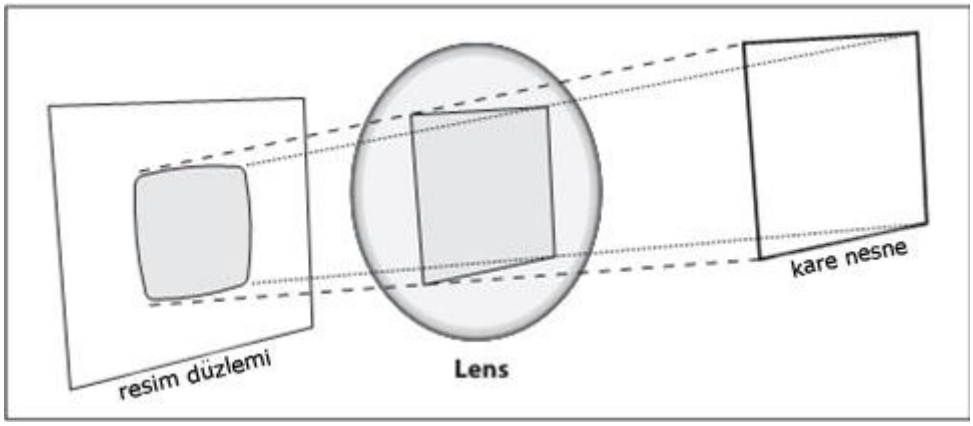
4.2.3. Lens Bozuklukları

Teoride görüntüde hiçbir bozukluk oluşturmayan bir lens tanımlamak mümkün gibi gözükse de, gerçekte mükemmel lens yoktur. Bu daha çok üretim kaynaklı bir durumdur. Küresel bir lens üretmek, matematiksel olarak daha uygun olan parabolik lens üretmeye göre çok daha kolaydır. Lensin şeklinden kaynaklanan radyal bozukluk ve kameranın birleştirilme işleminden kaynaklanan teğetsel bozukluk en çok görülen iki ana bozukluk çeşididir.

4.2.3.1. Radyal Bozukluk

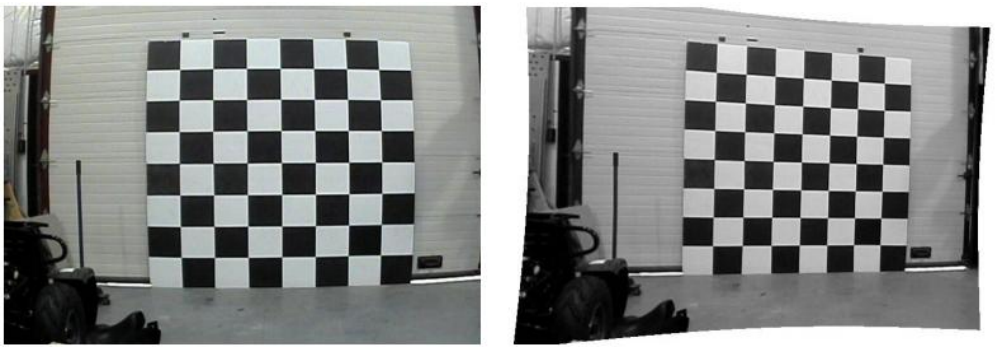
Radyal bozukluk kamerada kullanılan lensin küresel biçimde olmasından kaynaklanan bozukluktur. Kameranın kalitesi ve sahip olduğu odak uzaklığı düştükçe görüntüdeki bozukluk da daha kolay bir şekilde fark edilebilmektedir [35].

Şekil 4.6'da görüldüğü üzere, lensin kenarlarından geçen ışınlar merkezden geçenlere göre daha çok eğrilmektedir [16]. Resim düzlemi merkezinde bozulma görülmezken, kenarlara doğru gidildiğinde bozulma artmaktadır. Bu yüzden kare şeklindeki nesnenin resim düzlemi üzerinde oluşan görüntüsünde kenarlarında dışa doğru bir bombe oluşmaktadır.



Şekil 4.6. Radyal bozukluk oluşumu

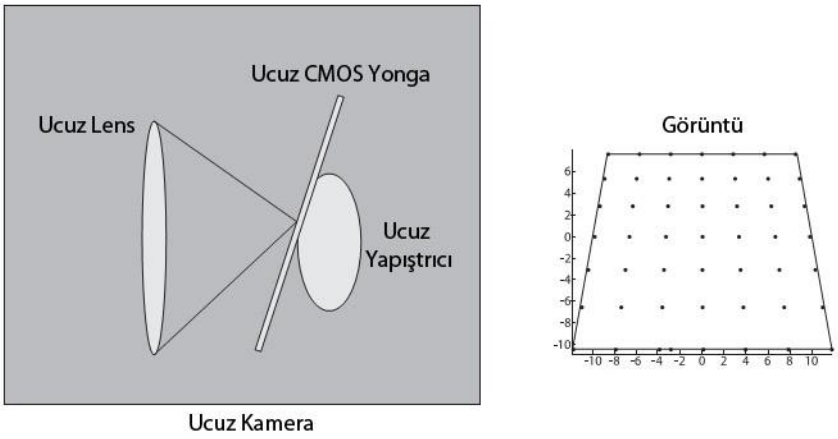
Resim düzlemi üzerinde radyal bozukluk sonucu yanlış yerde oluşmuş bir noktanın bozukluğunun giderilmesi gereklidir. Şekil 4.7'de radyal bozukluğa sahip bir görüntü ile düzeltilmiş hali görülebilir [36].



Şekil 4.7. Radyal bozukluk içeren görüntü (sol) ve düzeltilmiş hali (sağ)

4.2.3.2. Teğetsel Bozukluk

Teğetsel bozukluk resim düzlemi ile lensin tam olarak paralel olmadığı zaman oluşan bir bozukluktur. Bu paralellik üretim aşamasında gerçekleşebileceği gibi, kötü kullanım ya da düşme gibi sebeplerle kamerada daha sonra da ortaya çıkabilmektedir. Şekil 4.8a'da görüldüğü üzere özellikle ucuz kameralarda, resim düzlemini içeren parça kameranın arka bölümüne yapıştırıcı ile sabitliğinde bu bozukluk ortaya çıkmaktadır. Şekil 4.8b'de resimde oluşan bozulma görülmektedir.



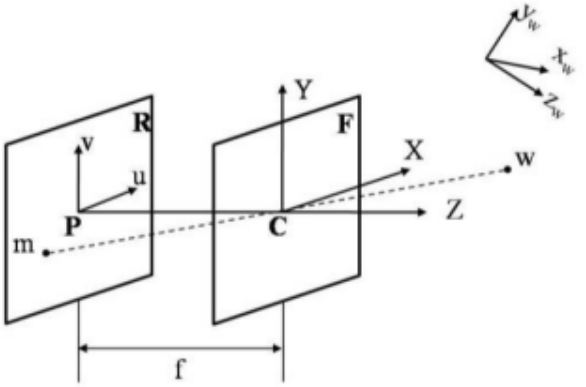
a) b)

Şekil 4.8. Teğetsel bozukluk a) ucuz kamera kaynaklı bozukluk b) bozukluk nedeniyle oluşan görüntü

4.2.4. Lens Bozukluklarının Giderilmesi

Lens bozukluklarının giderilmesinde kullanılacak matematiksel modeli anlatabilmek için, 3-boyutlu dünya koordinatları ile resim düzlemi koordinatları

arasındaki matematiksel ilişkiyi tanımlayan kamera modeli Şekil 4.9'da gösterilmektedir [37].



Şekil 4.9. Lens bozuklukları giderilecek kamera modeli

R resim düzlemi P esas noktasında, F odak düzlemi de C optik merkezinde ortalanmıştır. İki düzlem de odak uzaklığı *f*'ye göre paraleldir. Esas nokta P ve optik merkez C boyunca geçen düz çizgi ise optik eksen olarak adlandırılır.

$w=[x\ y\ z\ 1]^T$ 3-boyutlu noktası dünya referans çerçevesi $\{x_w\ y_w\ z_w\}$ içinde homojen koordinatlar olarak tanımlanır. $\tilde{m} = [u\ v\ s]^T$ ise s ölçek faktörüne sahip resim çerçevesi $\{u\ v\}$ içindeki homojen koordinatlar olarak tanımlanır. Homojen bir dönüşüm matrisi *P*'nin bulunduğunu ve denklem 4.4'deki şekilde verildiğini varsayalım, *P* matrisi dünya referans çerçevesi ile resim çerçevesini eşleştirme ilişkisini göstermekte olsun.

$$\tilde{P} = \left[\begin{array}{c|c} q_1^T & q_{14} \\ q_2^T & q_{24} \\ q_3^T & q_{34} \end{array}\right] = [Q \quad |\tilde{q}] \qquad 4.4$$

Bu durumda, ilişki şu şekilde formülleştirilir:

$$\tilde{m}=\tilde{P}\tilde{w} \qquad 4.5$$

Denklem 4.4'deki homojen dönüşüm matrisi P aynı zamanda perpektif yansıtma matrisi (PYM) olarak adlandırılır. Aynı zamanda dış parametreler T_d ve iç parametreler T_i dönüşümlerinin bir birleşimi olarak yorumlanabilir. Dolayısıyla resim çerçevesi *m*'deki homojen koordinatlar şu şekilde yazılabilir:

$$\widetilde{m}=\tilde{P}\widetilde{w}=T_iT_e\widetilde{w},\begin{bmatrix}u\\v\\s\end{bmatrix}=T_iT_e\begin{bmatrix}x_w\\y_w\\z_w\\1\end{bmatrix} \quad 4.6$$

T_d dış parametreleri R döndürme ve t ötelemeyi kullanarak kamera referans çerçevesinin dünya referans çerçevesine göre yerleşimini ve yönelimini tanımlar:

$$\begin{bmatrix}X\\Y\\Z\end{bmatrix}=T_e\begin{bmatrix}x_w\\y_w\\z_w\\1\end{bmatrix},\ T_e=[R\mathrm{It}]=\begin{bmatrix}r_{11}\ r_{12}\ r_{13}\ t_1\\r_{21}\ r_{22}\ r_{23}\ t_2\\r_{31}\ r_{32}\ r_{33}\ t_3\end{bmatrix} \quad 4.7$$

T_i iç parametreleri ise kameranın optik niteliklerini ve iç geometrisini göstermekte olup, resim düzleminin piksel koordinatlarını kamera referans düzlemindeki koordinatlara göre tanımlar:

$$\begin{bmatrix}u\\v\\s\end{bmatrix}=T_i\begin{bmatrix}X\\Y\\Z\end{bmatrix},\ T_i=\begin{bmatrix}\alpha & \gamma & u_0\\0 & \beta & v_0\\0 & 0 & 1\end{bmatrix} \quad 4.8$$

Denklem 4.8'de $\alpha = f / k_0$ ve $\beta = f / k_1$ sırasıyla yatay ve dikey piksellerdeki odak uzaklıkları (f milimetre olarak odak uzaklığı ve (k_0, k_1) milimetre olarak piksel büyüklüğü), (u_0, v_0) esas noktanın koordinatları ve γ ise dik olmayan *u*-*v* eksenlerini modelleyen eğim faktörüdür. *(u, v, s)* homojen olduğundan, *u'* ve *v'* piksel koordinatları *s* ölçek faktörüne bölünerek elde edilebilir.

Yukarıda elde edilmiş kamera modeli basit iğne deliği kamera modeli üzerine inşa edilmiş olup, lens bozukluğu hesaba katılmamıştır. Resim radyal bozukluğunu düzeltmek için Devernay tarafından tanımlanmış lens bozukluk modeli kamera modeline eklenir [37]. Denklem 4.9 ve 4.10'da görüldüğü üzere radyal bozukluğu modellemek için sonsuz bir polinom serisi kullanılır. K_1 ve K_2 birinci ve ikinci sıra radyal bozukluk parametreleri, r_d ise bozulmaya uğramış yarıçaptır. x_d ve y_d bozulmaya

uğramış kamera koordinatlarını; x_u ve y_u ise düzeltilmiş kamera koordinatlarını göstermektedir.

$$x_u = x_d\,(1 + K_1\,r_d^2\ +\ K_2 r_d^4\ + \cdots) \quad 4.9$$

$$y_u = y_d\,(1 + K_1\,r_d^2\ +\ K_2 r_d^4\ + \cdots) \quad 4.10$$

$$r_d = \sqrt{x_d^2 + y_d^2} \quad 4.11$$

Denklem 4.9 ve 4.10'u, sırasıyla denklem 4.12 ve 4.13'te olduğu gibi basitleştirebiliriz:

$$x_u = x_d\,(1 + K_1\,r_d^2\ +\ K_2 r_d^4) \quad 4.12$$

$$y_u = y_d\,(1 + K_1\,r_d^2\ +\ K_2 r_d^4) \quad 4.13$$

Eğer kamera kalibre edildiyse iç parametreler bilinmektedir ve böylece radyal bozukluk parametreleri ve bozulmaya uğramış kamera koordinatları denklem 4.14 ile hesaplanabilir; denklem 4.15 ve 4.16 kullanılarak da radyal bozukluğun düzeltilmesi yapılabilir.

$$\begin{bmatrix} x_d \\ y_d \\ 1 \end{bmatrix} = T_{\text{i}}^{-1} \begin{bmatrix} u_d \\ v_d \\ 1 \end{bmatrix} \quad 4.14$$

$$u_u = u_d(u_d\ = u_o)(K_1 r_d^2 + K_1 r_d^4) \quad 4.15$$

$$v_u = v_d(v_d\ = v_o)(K_1 r_d^2 + K_1 r_d^4) \quad 4.16$$

4.3. Kalibrasyon

Stereo görüş kullanarak resimlerden metrik ölçüm yapılmasında, hareket ya da derinlik bilgisi elde edilmesinde kalibrasyon işlemi çok önemli bir adımdır [38]. Kalibrasyonun doğruluğu bilgisayarla görme sisteminin performansına direkt etki etmektedir [39].

Kalibrasyon işlemi, kameranın optik özelliklerini belirten iç (intrinsic) parametreleri ile geometrik özelliklerini belirten dış (extrinsic) parametrelerinin bulunması işlemi olarak tanımlanmaktadır [25].

İç parametreler radyal bozukluktan kaynaklanan, gerçek dünya koordinatlarındaki bir birimin kamera koordinatlarında bir birime denk gelmediği durumda gerekli eşitlemenin sağlanması için kullanılan parametrelerdir. K matrisi ile gösterilir ve toplam beş adet parametreden oluşmaktadır. Bu beş parametre şunlardır:

- odak uzaklığı f
- x ve y eksenleri üzerindeki piksel uzunluğunu gösteren s_x ve s_y
- temel nokta o_x ve o_y

Dış parametreler ise teğetsel bozukluktan kaynaklanan, kamera düzleminin merkezde olmadığı durumda bozukluğun giderilmesi için kullanılan parametrelerdir. R döndürme matrisi ve t öteleme vektörünün oluşturduğu dış parametreler [R| t] şeklinde gösterilmektedir.

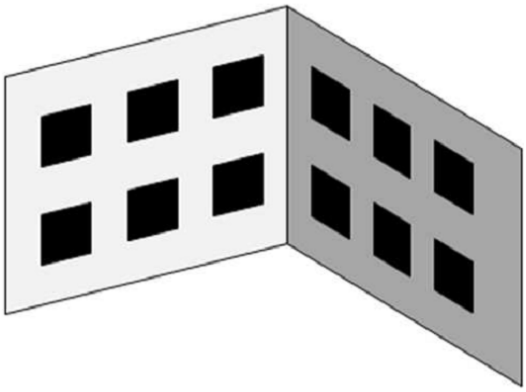
4.3.1. Kalibrasyon Yöntemleri

Kameralar ölçüleri bilinen bir kalibrasyon nesnesinin farklı açılardan alınmış görüntüleri kullanılarak kalibre edilmektedir. Noktaların bilinen ölçüleri ile kamerada oluşan görüntüdeki ölçüler karşılaştırılarak kameranın iç ve dış parametreleri hesaplanmaktadır. Kalibrasyon yöntemleri kalibrasyon deseninin yapısına göre dört farklı kategoride incelenmektedir [40]:

- 3-boyutlu desenlerle kalibrasyon
- 2-boyutlu desenlerle kalibrasyon
- 1-boyutlu desenlerle kalibrasyon
- kendi kendine kalibrasyon

4.3.1.1. 3-Boyutlu Desenlerle Kalibrasyon

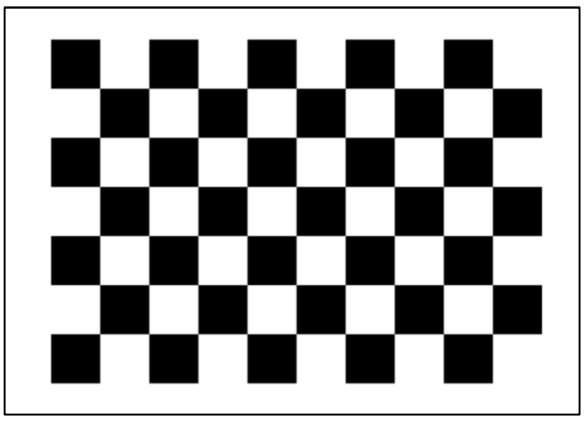
Bu yöntemde Şekil 4.10'da bir örneği verilmiş olan, yapısı yüksek hassaslıkla bilinen 3-boyutlu bir desen kullanılmaktadır [41, 42]. Desen 3-boyutlu olduğundan hem iç, hem de dış parametreler tek seferde hesaplanabilmektedir.



Şekil 4.10. 3-boyutlu kalibrasyon deseni

4.3.1.2. 2-Boyutlu Desenlerle Kalibrasyon

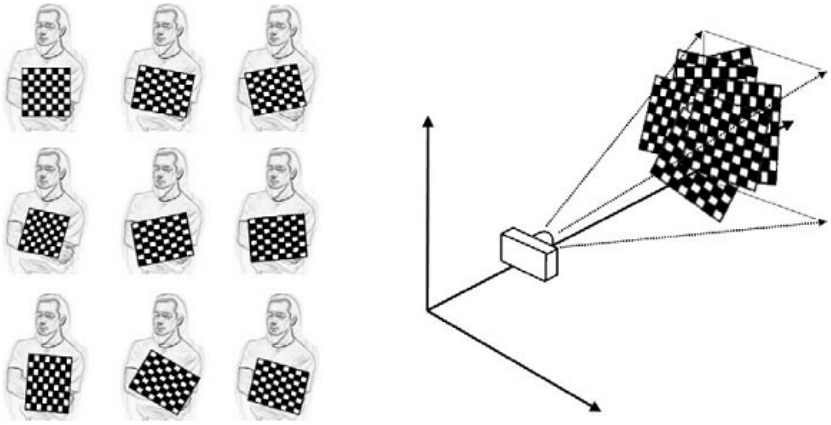
Kalibrasyon deseni olarak kullanımı en pratik olan yöntemdir. 3-boyutlu kalibrasyon desenleri gibi yüksek hassaslık gerektirmediği ve kolaylıkla oluşturulabildiği için sıklıkla tercih edilmektedir. En çok kullanılan 2-boyutlu kalibrasyon deseni Şekil 4.11'de görülebilen satranç tahtası desenidir.



Şekil 4.11. 2-boyutlu satranç tahtası deseni

2-boyutlu desenler kullanılarak kalibrasyon işlemini gerçekleştirmek için Şekil 4.12'de görüldüğü üzere kalibrasyon nesnesi hareket ettirilerek, farklı açılardan kamera tarafından görüntünün kaydedilmesi gerekmektedir. Nesnenin genel koordinat sisteminin model düzlemine hizalanmış olduğu kabul edilmektedir. Bu varsayıma göre kalibrasyon nesnesi için z = 0 olmakta ve nesne x ve y eksenlerine paralel olmaktadır.

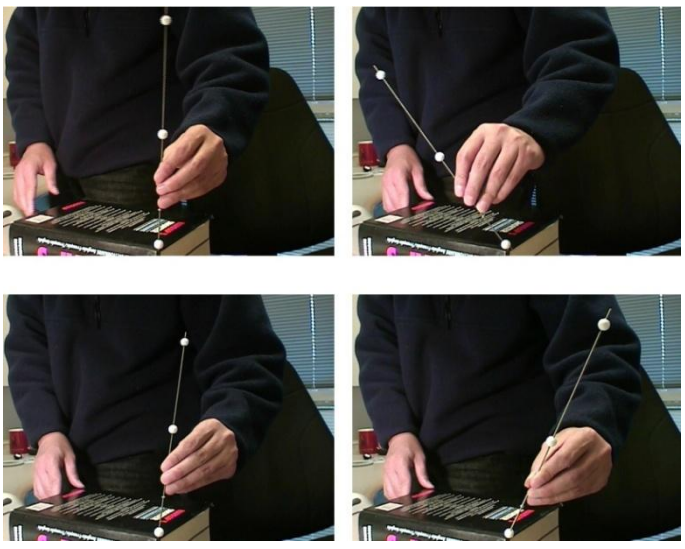
Öznitelik noktaları çıkarılıp, farklı açıdan çekilmiş görüntülerde bulunan aynı nitelikler karşılaştırılarak, kalibrasyon için gerekli parametreler hesaplanır.



Şekil 4.12. Satranç tahtasının farklı açılardan görüntüsünün kaydedilmesi

4.3.1.3. 1-Boyutlu Desenlerle Kalibrasyon

Diğer kalibrasyon yöntemlerine göre daha az üzerinde çalışılmış olan 1-boyutlu desenlerle kalibrasyon yönteminde iki ucunda sonlandırıcı iki 3-boyutlu nokta bulunan bir çubuk kullanılmaktadır. Şekil 4.13'de görüldüğü üzere bu çubuk serbestçe sallandırılır. İki 3-boyutlu nokta arasındaki mesafe bilinmekte olup, kamera tarafından kaydedilen bir çok resim üzerinde hesaplamalar yapılarak kalibrasyon parametreleri elde edilmektedir [40].



Şekil 4.13. 1-boyutlu desen ile kalibrasyon

4.3.1.4. Kendi Kendine Kalibrasyon

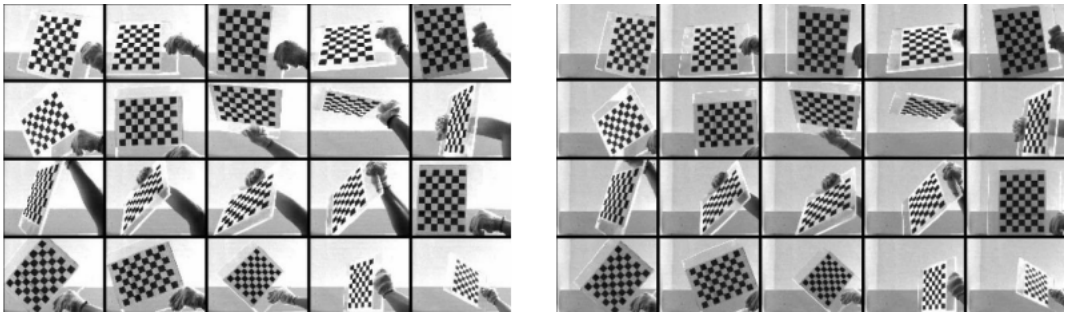
Bu kategorideki yöntemler bir kalibrasyon nesnesi kullanmadıkları için 0-boyutlu kalibrasyon olarak da adlandırılmaktadırlar. Sabit bir sahnenin görüntüleri hareket ettirilen bir kamera ile kaydedilir. İç parametreleri sabit olan bu kameradan elde edilen görüntüler üzerinde nokta eşleştirmesi yapılarak kalibrasyon parametreleri elde edilebilir. Çok fazla hesaplama yapılması gerektiğinden matematiksel olarak zor bir yöntemdir [40].

4.3.2. Stereo Kalibrasyon

Stereo görüşte bir yerine en az iki kamera kullanıldığından iki kameranın kalibrasyon işlemi birlikte yapılmalıdır. Stereo görüşteki en önemli noktalardan biri sol kameranın sağ kameraya göre ilişkisinin bilinmesi gerekliliğidir. Bu yüzden stereo kalibrasyonda iki kameranın geometrik ilişkisini belirten sisteme ait dış parametreler de bulunmaktadır. Bir stereo sistemi konumlandırma ve iç özellikleri çıkarıldıktan sonra kalibre edilmiş stereo sistem olarak tanımlanabilir. Stereo sistemin çalışması sırasında bu kalibre edilmiş durumdan bir sapma meydana gelirse hatalı sonuçlar elde edilir [43].

Stereo kalibrasyon aynı sahne için özellikleri bilinen kalibrasyon nesnelerinin iki kamera ile görüntülerinin alınması ve elde edilen görüntülerin işlenmesi ile gerçekleştirilir. En pratik ve çok kullanılan yöntem olan satranç tahtası deseninde, tahtanın köşe uzaklıkları bilindiğinden ve sabit olduğundan bu değerler üzerindeki bozulmalar incelenerek iç parametreler elde edilebilmektedir. Dış parametrelerin elde edilmesi için ise iki kameradan aynı sahnede elde edilen görüntülerin incelenmesi gerekir. Aynı sahneden elde edilmiş görüntüler üzerinden sol kameranın sağ kameraya göre geometrik modeli ortaya çıkartılmaktadır [10].

Stereo kalibrasyon işlemini gerçekleştirmek için satranç tahtasının farklı açılardan görüntüsü iki kamera tarafından da alınmalıdır. Şekil 4.14'de bir stereo görüş sisteminde sağ ve sol kamera için alınan görüntüler görülmektedir. Kalibrasyonun başarısı için en az on farklı satranç tahtası görüntüsünün kullanılması tavsiye edilmektedir [44].

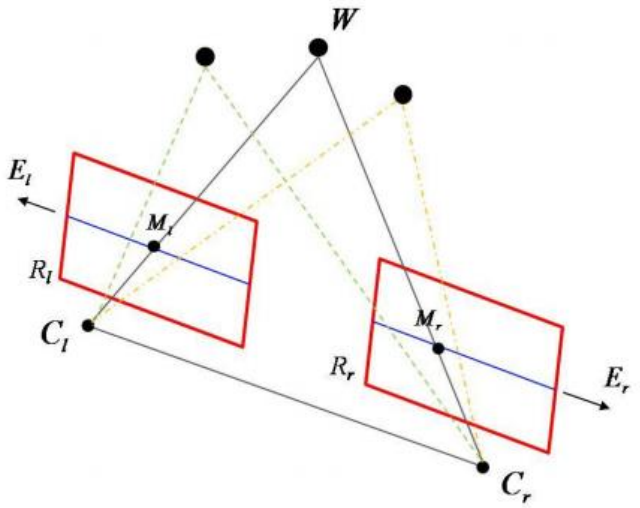


Şekil 4.14. Sırasıyla sol ve sağ kameradan alınan görüntüler

4.3.2.1. Epipolar Geometri

İzdüşüm geometrisinden yararlanarak iki perspektif resim arasındaki geometriyi inceleyen çalışmadır [45]. Şekil 4.15'de görüldüğü üzere iki kamera merkezi ve 3-boyutlu nokta arasında oluşan düzleme epipolar düzlem adı verilmektedir. Gerçek dünyadaki farklı 3-boyutlu noktalar için birden çok epipolar düzlem bulunmakla beraber, tüm bu düzlemler kamera merkezleri C_l ve C_r arasında oluşan çizgiden geçmektedir. Bu çizgiye taban çizgisi adı verilmektedir [46].

Standart model olarak adlandırılan bu modelde taban çizgisi iki odak düzleminde de bulunmakta ve iki resim düzlemi de (R_l ve R_r) taban çizgisine paralel durumda olmaktadır. E_l ve E_r epipolleri sonsuzda olup, epipolar doğrular iki resim düzleminde yatay durumda bulunmaktadır.

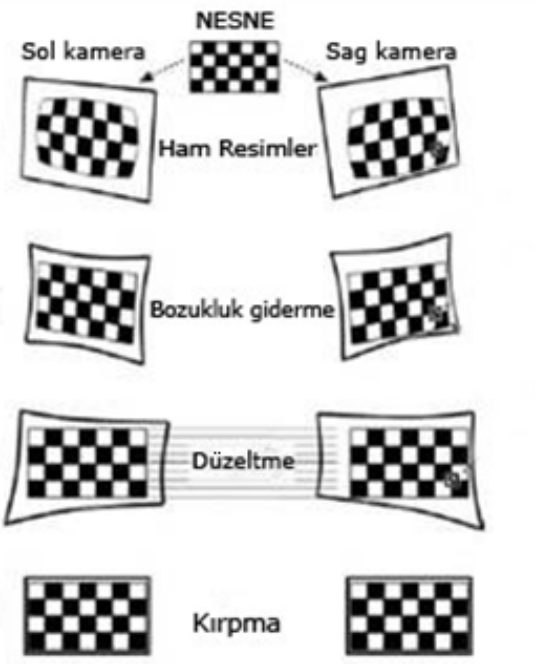


Şekil 4.15. Kameraların standart yerleşimi

Standart yerleşim eşleşme adımını kolaylaştırma konusunda büyük bir avantaj sağlasa da, bu yerleşim gerçek kameralar tarafından sağlanamamaktadır. İki kamerayı mükemmel bir şekilde aynı taban çizgisine oturtup, resim düzlemlerini paralel haline getirmek mikron seviyesinde bir işlem gerektirir ki, bu da neredeyse imkansızdır. Bu durumun üstesinden gelmek için, stereo kalibrasyondan alınan parametre bilgileri kullanılmakta ve kamera geometrileri üzerinde düzeltme işlemi yapılmaktadır.

4.4. Stereo Düzeltme

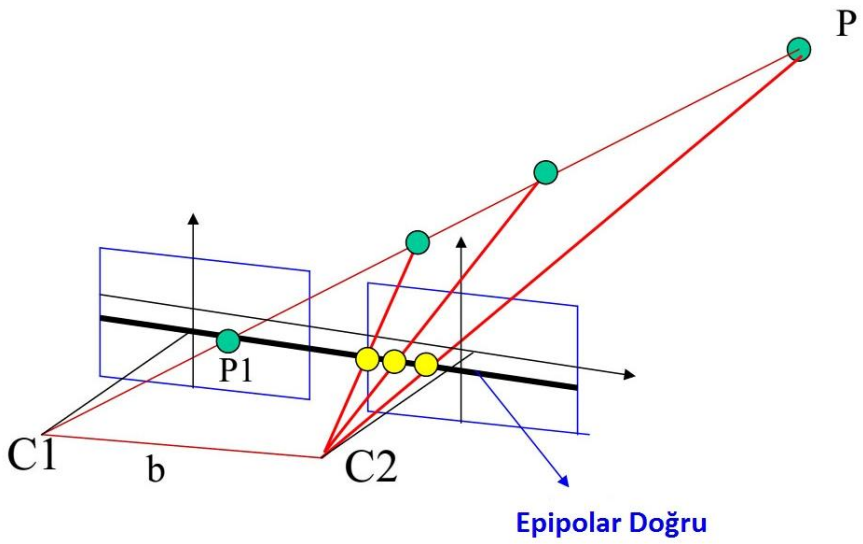
Stereo düzeltme resim çiftlerindeki eşleşen noktaların resimler üzerinde aynı satırda bulunmasını sağlayan iki resmin dönüştürme işlemi olarak tanımlanmaktadır [36]. Bu işlemin sonucunda kamera görüntüleri satır hizalanmış hale gelmektedirler. Düzeltme adımında resimler üzerinde yapılan işlemler sırasıyla Şekil 4.16'da görülmektedir. Düzeltme işleminden sonra genellikle resimlerin kenarlarında fazlalık olarak bazı kısımlar bulunabilmektedir. Bunlar görünüm ya da daha performanslı çalışma adına istenirse kırpılarak resimlerden atılabilir.



Şekil 4.16. Stereo düzeltme adımları

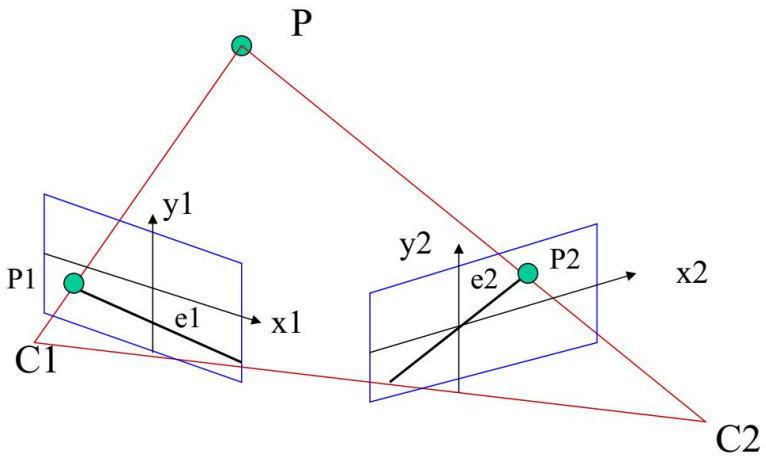
Stereo görüşte derinlik bilgisine ulaşabilmek için bir resimdeki noktanın diğer resimdeki karşılığının bulunması gerekmektedir. Düzeltilmiş ve satır hizalanmış görüntülerde eşleştirme işlemi 2-boyutlu bir aramadan 1-boyutlu bir arama haline dönüşmektedir. Bu durum da eşleştirme işleminin hız ve başarımını arttırmaktadır.

Epipolar geometrinin stardart yerleşimini göz önüne aldığımızda, Şekil 4.17'de görülebileceği üzere gerçek dünyadaki P noktasının soldaki resim düzlemindeki izdüşümü P1 noktası, sağdaki resim düzleminde yine epipolar doğru üzerinde bulunmaktadır. Eşleştirme işlemi için sadece bu doğru üzerindeki noktalarda arama yapmak yeterlidir.



Şekil 4.17. Epipolar doğru üzerinde eşleştirme

İki kameranın optik eksenleri ve resim düzlemleri paralel olmadığı durum ise Şekil 4.18'de görülebilir. P noktasının resim düzlemlerindeki karşılığını içeren P1 ve P2 noktalarının bulunduğu e_1 ve e_2 epipolar doğruları artık yatay durumda bulunmamaktadır. Bu durumda eşleştirme tek boyutta arama özelliğini kaybetmiş olmaktadır.



Şekil 4.18. Optik eksenlerin paralel olmama durumu

4.4.1. Epipolar Düzeltme

Denklem 4.4'den sol kamera PYM P_{ol} ve sağ kamera PYM P_{or} şu şekilde yazılabilir:

$$\widetilde{P}_{ol} = [Q_{ol} \mid q_{ol}] \,,\ \widetilde{P}_{or} = [Q_{or} \mid q_{or}] \qquad 4.17$$

ve sol optik merkezi c_l ve sağ optik merkezi c_r koordinatları şu şekilde belirlenebilir:

$$c_1 = -Q_{ol}^{-1} q_{ol} \ ,\ c_r = -Q_{or}^{-1} q_{or} \qquad 4.18$$

Yeni PPY'ler P_{nl} ve P_{nr}'yi şu şekilde tanımladığımızda:

$$\breve{P}_{nl} = T_{ni}[R \mid -Rc_l],\ \breve{P}_{nr} = T_{ni}[R \mid -Rc_r] \qquad 4.19$$

yeni iç parametreler T_{ni} iki yeni PPY için de aynı olup isteğe göre seçilebilir. Optik merkezler c_l ve c_r ise denklem 4.18 ile hesaplanır. Dönüşüm matrisi R her iki yeni PPY için aynı olup, satır vektörleri aracılığıyla belirtilir:

$$R = \begin{bmatrix} \hat{x}^T \\ \hat{y}^T \\ \hat{z}^T \end{bmatrix} \qquad 4.20$$

R'nin satır vektörleri, kamera referans düzleminin dünya koordinatları içinde ifade edilen X, Y ve Z eksenleridir.

Sol ve sağ resimleri düzeltmek için, sol ve sağ resimlerin eski PPY ve yeni PPY'leri arasındaki eşleştirme ilişkilerinin bilinmesi gerekmektedir. Sol resmi örnek alırsak; sol ve sağ kameralarda görülen 3-boyutlu bir nokta için, eski sol perspektif yansıtma m_{ol} ve yeni sol perspektif yansıtma m_{nl} şöyle ifade edilebilir:

$$\check{m}_{ol} \cong \check{P}_{ol}\, \tilde{w}\,, \qquad \check{m}_{nl} \cong \check{P}_{nl} \tilde{w} \tag{4.21}$$

Optik merkez düzeltmeden etkilenmediği için, denklem 4.21 parametrik olarak şu şekilde ifade edilebilir:

$$\begin{cases} w = c_l + \lambda_O\, Q_{ol}^{-1}\, \check{m}_{ol} & \lambda_o \in R \\ w = c_l + \lambda_n\, Q_{nl}^{-1} \check{m}_{nl} & \lambda_n \in R \end{cases} \tag{4.22}$$

Buna bağlı olarak:

$$\check{m}_{nl} = \frac{\lambda_o}{\lambda_n}\, Q_{nl} Q_{ol}^{-1}\, \check{m}_{ol} = \lambda Q_{nl}\, Q_{ol}^{-1} \check{m}_{ol} \qquad \lambda \in R \tag{4.23}$$

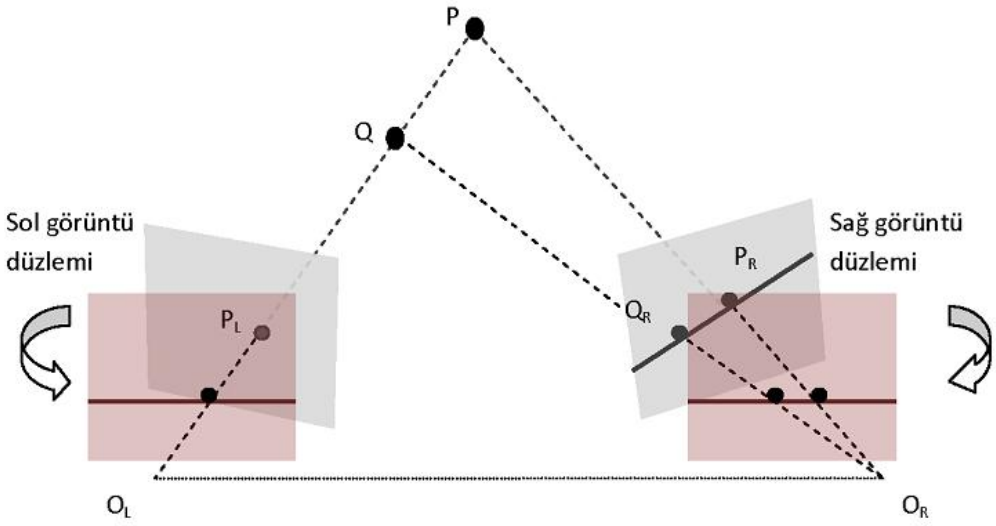
denklem 4.22'den, eski sol resimden, yeni sol resime dönüşüm eşleştirmesi şu şekilde elde edilir:

$$T_1 = Q_{nl}\, Q_{ol}^{-1} \tag{4.24}$$

ve sağ resim dönüşümü de yine benzer şekilde olur:

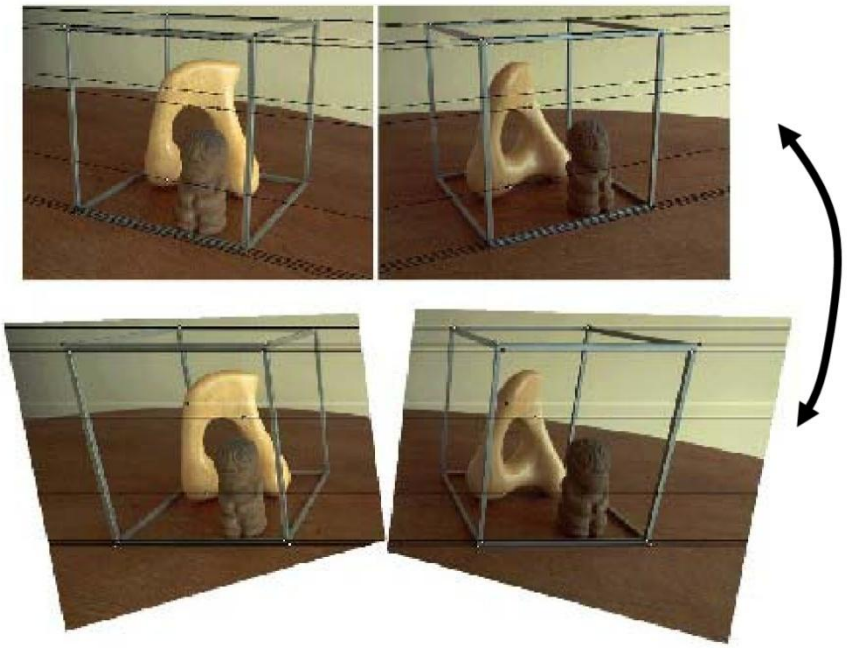
$$T_r = Q_{nr}\, Q_{or}^{-1} \tag{4.25}$$

Düzeltme dönüşümleri T_l ve T_r elde edildiğine göre, düzeltilmiş resimleri elde etmek için esas sol ve sağ resimlere uygulanabilir. Şekil 4.19'da düzeltme dönüşümünün bir modeli görülebilir [37].



Şekil 4.19. Epipolar düzeltme

Epipolar düzeltme sonrası Şekil 4.20'de görüldüğü üzere satır hizalanmış resimler elde edilmektedir. Sol resimdeki noktalar sağ resimde aynı epipolar doğru üzerinde aranarak eşleştirme işlemi daha hızlı bir hale getirilmiş olmaktadır.



Şekil 4.20. Düzeltme uygulanmamış(üst) ve uygulanmış(alt) kamera görüntüleri

4.5. Stereo Eşleştirme

Bir sahnenin 3 boyutlu yapısını elde edebilmek için farklı bakış açılarından çekilmiş stereo görüntülerinde görülen her noktanın uzaydaki koordinatlarının elde edilmesi gerekir. Stereo eşleme problemi aslında bir arama problemi olarak düşünülebilir.

Stereo eşleştirme algoritmalarının büyük bölümümün amacı genel olarak sol görüntüyü referans görüntü olarak belirleyerek, her bir piksel için bir aykırılık kestirimi yapmaktır. Bu aykırılıklar sağ ve sol kameralarda görülen özelliklerin resim düzlemindeki koordinatları arasındaki farktır. Aykırılık kestirimleri gözlemlenen nesnelerin ters çevrilmiş uzaklıkları olarak yorumlanmaktadır.

4.5.1. Eşleştirme Adımının Zorlukları

Bu adımları kullanarak stereo görüşün oluşturulmasında en büyük zorluk eşleştirme adımında ortaya çıkmaktadır. Eşleştirme adımı aslında bir arama problemidir. Sol resimdeki bir eleman için, bu elemana sağ resimde karşılık gelen eleman bulunmalıdır [47].

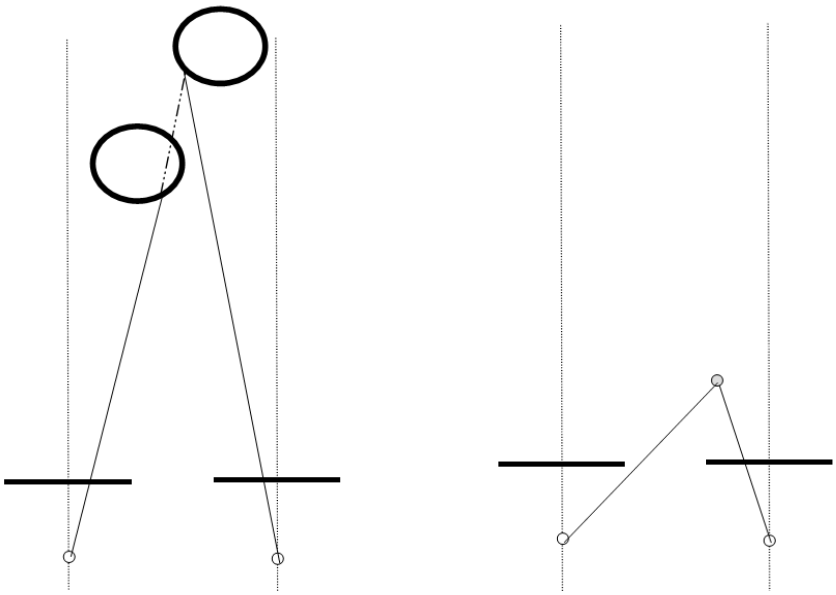
Şekil 4.21'de görüldüğü gibi sol resimdeki bir x noktası için sağ resimde ona karşılık gelen x' noktası bulunmalıdır. Sol resimde yuvarlak içine alınan kısım incelendiğinde, görüntülerin farklı perspektiflerden alınmasından dolayı soldaki her noktanın sağdaki resimde bulunmadığı da kolaylıkla fark edilebilmektedir.



Şekil 4.21. Aynı noktanın iki kamera görüntüsünde bulunması

Sol resimdeki bir noktanın karşılığının sağ resimde bulunması zaten zor bir işlemken, bu durumu daha da zorlaştıran etmenler vardır. Bunlar:

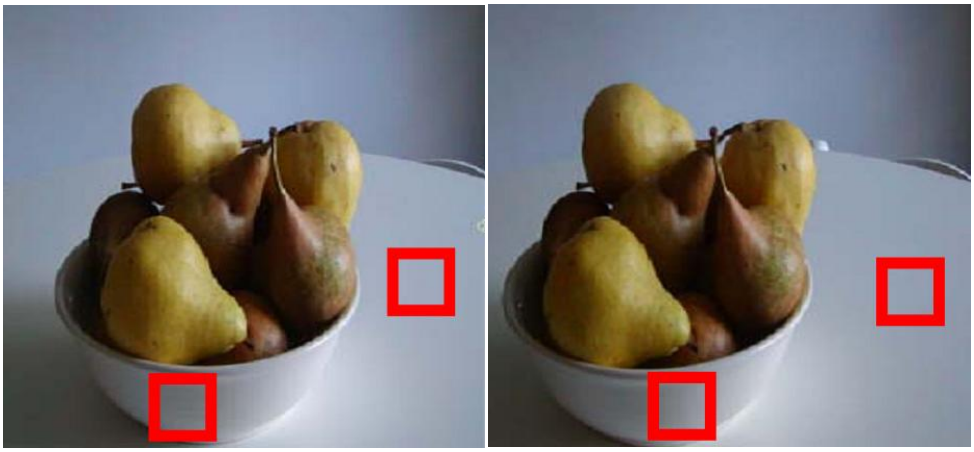
- **Tıkama:** Görüntüdeki bir nesnenin başka bir nesnenin önünü tıkayarak kameralardan bir tanesi için görüntülenememesi durumudur. Şekil 4.22a'da görüldüğü üzere soldaki kamerada belirtilen noktanın görüntüsüne ulaşılamamaktadır.
- **Sınırlı görüş açısı:** Özellikle kameraya yaklaştıkça bir kameranın görüş açısındaki bazı noktalar diğer kameranın görüş açısında bulunmayabilir. Şekil 4.22b'de görüldüğü üzere belirtilen nokta soldaki kameranın görüş açısına girmemektedir [48].



a) b)

Şekil 4.22. Eşleştirme zorlukları a) görüntüde tıkanma b) sınırlı görüş açısı

- **Doku Eksikliği:** Resimler üzerinde fazla doku bulunmayan homojen bölgelerde bir noktanın karşılığını bulmak zorlaşmaktadır. Şekil 4.23'de iki resim üzerinde eşleştirmesi zor olan homojen bölgeler görülebilir [43].



Şekil 4.23. Doku eksikliği problemi

- **Tekrarlayan desenler:** Aynı deseninin resim içinde belli bir alanda tekrarlandığı durumlarda eşleştirme işlemi yapmak zordur. Şekil 4.24'de görüldüğü üzere işaretli alanda aynı desen tekrarlanmaktadır.



Şekil 4.24. Tekrarlayan desenler problemi

- **Kameralar arası uzaklık:** Kameralar arası uzaklığın az ya da çok olmasına göre eşleştirmenin zorluğu ve başarımı etkilenmektir. Uzaklık az ya da çok olduğu durumların karşılaşması Tablo 4.1'de görülmektedir [12].

Tablo 4.1. Kameralar arası uzaklık etkisi

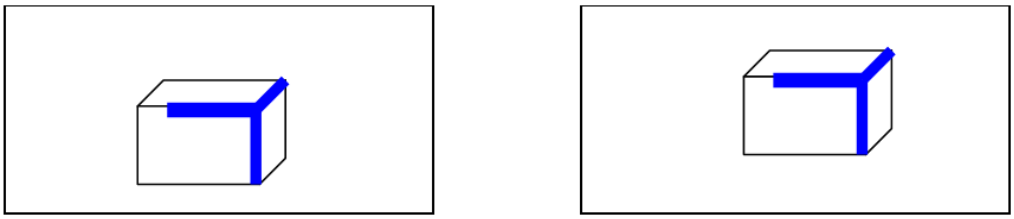
Kameralar arası uzaklık az	**Kameralar arası uzaklık çok**
Küçük aykırılık değerleri (Daha kötü derinlik haritası)	Büyük aykırılık değerleri (Daha iyi derinlik haritası)
Gürültüye karşı yüksek hassaslık	Gürültüye karşı düşük hassaslık
Daha kolay eşleştirme (daha fazla eşleşen noktalar)	Daha zor eşleştirme (tıkama artışı ve daha az eşleşen noktalar)

4.5.2. Eşleştirme Algoritmaları

Stereo algoritmaları sol ve sağ resimler üzerindeki noktaları, iki resim arasında benzerlikler bularak eşleştirmeyi hedefleyen algoritmalardır. Bu algoritmalar verdikleri sonuçlara göre, seyrek sonuç veren ve yoğun sonuç veren yöntemler olarak ikiye ayrılmaktadır. Özellik bazlı eşleştirme yapan algoritmalar seyrek sonuç vermekte, nokta ya da alan eşleştirmesi yapan algoritmalar ise yoğun sonuç vermektedirler. Yoğun sonuç veren yöntemler de, en iyi eşleşen noktanın karar verilmesinde kullandıkları yönteme göre yerel ya da global yöntemler olarak ikiye ayrılmaktadırlar.

4.5.2.1. Özellik Bazlı Eşleştirme

Özellik bazlı eşleştirme algoritmaları iki resim üzerinde özellik çıkarımı yaparak bunları eşleştirmeyi hedefleyen algoritmalardır. Köşeler, kenarlar, açılar ve kavisler gibi özellikler anahtar noktalar olarak tanımlanmakta ve eşleştirilmektedir [49]. Şekil 4.25'de özellik eşleştirme yönteminin temel hali görülmektedir.



Şekil 4.25. Özellik eşleştirme yöntemi

Yöntemin başarısı özellik çıkarmadaki başarısına bağlıdır. Özellikler eksik ya da hatalı belirlenmişse, eşleme sonucunda da hatalı sonuçlar ortaya çıkmaktadır [50]. Yöntemin bir diğer dezavantajı da, eşleştirmeden başka özellik çıkarımı aşamasının da bulunması sebebiyle işlemsel maliyetleri arttırıyor olmasıdır [51].

Şekil 4.26'da bir döner masa üzerinde bulunan içecek kutusunun özellik çıkarma yöntemiyle 3-boyutlu modelinin çıkarılması aşamaları ve sonuçları görülmektedir [52].



a) b) c) d)

Şekil 4.26. İçecek kutusu özellik bazlı eşleştirme a) kamera görüntüsü b) kenar çıkarımı c) epipolar kavisler d) 3-boyutlu modellenmiş noktalar

4.5.2.2. Yerel Yöntemler

Stereo düzeltme sonrası iki resim satır hizalı hale geldikten sonra, bir resimdeki pikselin karşılığı diğer resimde yine aynı satır üzerinde bulunmaktadır. Alan bazlı eşleştirme algoritmaları referans aldıkları resimdeki piksellere karşılık gelen pikselleri arama yapılan resimdeki satırdaki pikseller ile eşleştirmeyi hedeflemektedirler.

4.5.2.2.1. Piksel ya da Bölge Eşleştirme

Uzun yıllar boyunca çok çeşitli stereo eşleştirme algoritmaları geliştirilmiştir. İlk geliştirilen algoritmalar referans resimdeki pikselin ikinci resimdeki karşılığını piksel bazında arama yöntemini tercih etmişlerdir. Hangi pikselin aranan pikselin karşılığı

olduğu konusunda karar vermede yönteme göre tanımlanan maliyet fonksiyonundan yararlanmışlardır. Bu algoritmalara göre, karşılaştırılan iki pikselin benzerliği arttıkça maliyet fonksiyonu sonucu ulaşılan değer düşmektedir [53].

Maliyet fonksiyonunu ifade etmek için referans resimdeki koordinat ve aykırılık değerlerine bağlı bir C(x, y, d) fonksiyonu kullanılmaktadır. Maliyet fonksiyonu (x, y, d) koordinatının aykırılık uzayındaki benzeşmezlik değerini vermektedir. Eşleşmenin mümkün olabileceği piksel koordinatları ve aykırılık arama alanı aykırılık uzayını oluşturmaktadır.

Piksel eşleştirmede kullanılan genel yöntemler şunlardır:

- mutlak fark (AD)
- karesi alınmış fark (SD)
- mutlak gradyant farkı (GRAD)

Piksel eşleştirmede kullanılan bu üç yöntemin maliyet fonksiyonları ise aşağıdaki denklemlerle ifade edilir:

$$C_{\mathrm{AD}}(x,y,d) = \left| I_{\mathrm{L}}(x,y) - I_{\mathrm{R}}(x-d,y) \right| \tag{4.26}$$

$$C_{\mathrm{SD}}(x,y,d) = \left| I_{\mathrm{L}}(x,y) - I_{\mathrm{R}}(x-d,y) \right|^{2} \tag{4.27}$$

$$C_{\mathrm{GRAD}}(x,y,d) = \left| \nabla_{\mathrm{x}} I_{\mathrm{L}}(x,y) - \nabla_{\mathrm{x}} I_{\mathrm{R}}(x-d,y) \right| + \left| \nabla_{\mathrm{y}} I_{\mathrm{L}}(x,y) - \nabla_{\mathrm{y}} I_{\mathrm{R}}(x-d,y) \right| \tag{4.28}$$

Daha sonraları piksel eşleştirme algoritmalarının performansını arttırmak için aranan pikselin komşu pikselleri de arama işlemine dahil edilmeye başlanmıştır. Blok eşleştirme algoritmaları olarak ifade edilen bu algoritmalar maliyet fonksiyonu değerini verirken hesaplama yapılan pikselin komşu piksellerini de hesaba katmaktadırlar.

Piksel eşleştirmede daha önce bahsedilen fonksiyonlar şu blok eşleme algoritmalarına dönüşmektedirler:

- mutlak farkların toplamı (SAD)
- karesi alınmış farkların toplamı (SSD)
- mutlak gradyant farkların toplamı (SGRAD)

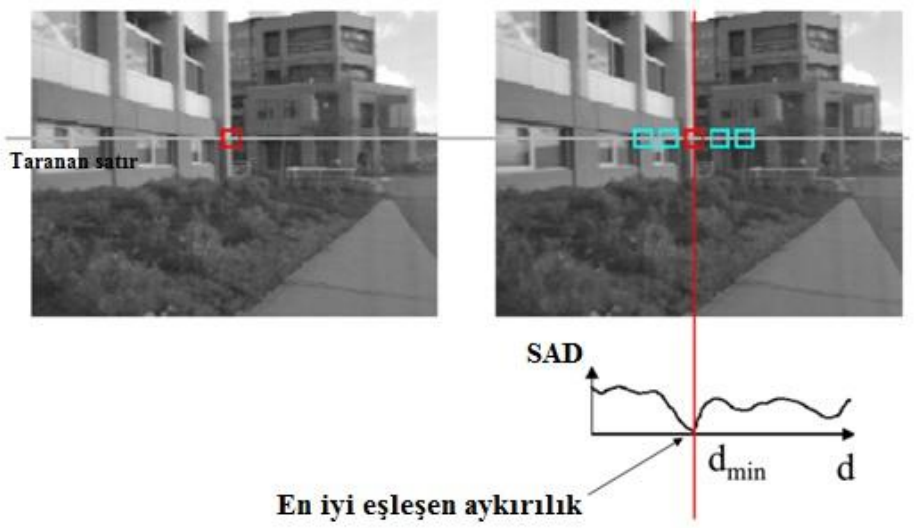
Maliyet fonksiyonları da şu şekilde olmaktadır:

$$C_{SAD}(x,y,d) = \sum_{(u,v)\in W(x,y)} |I_L\ (u,v) - I_R(u-d,v)| \quad 4.29$$

$$C_{SSD}(x,y,d) = \sum_{(u,v)\in W(x,y)} |I_L\ (u,v) - I_R(u-d,v)|^2 \quad 4.30$$

$$C_{SGRAD}(x,y,d) = \sum_{(u,v)\in W(x,y)} |\nabla_x I_L(u,v) - \nabla_x I_R(u,v)| + \sum_{(u,v)\in W(x,y)} |\nabla_y I_L(u,v) - \nabla_y I_R(u,v)| \quad 4.31$$

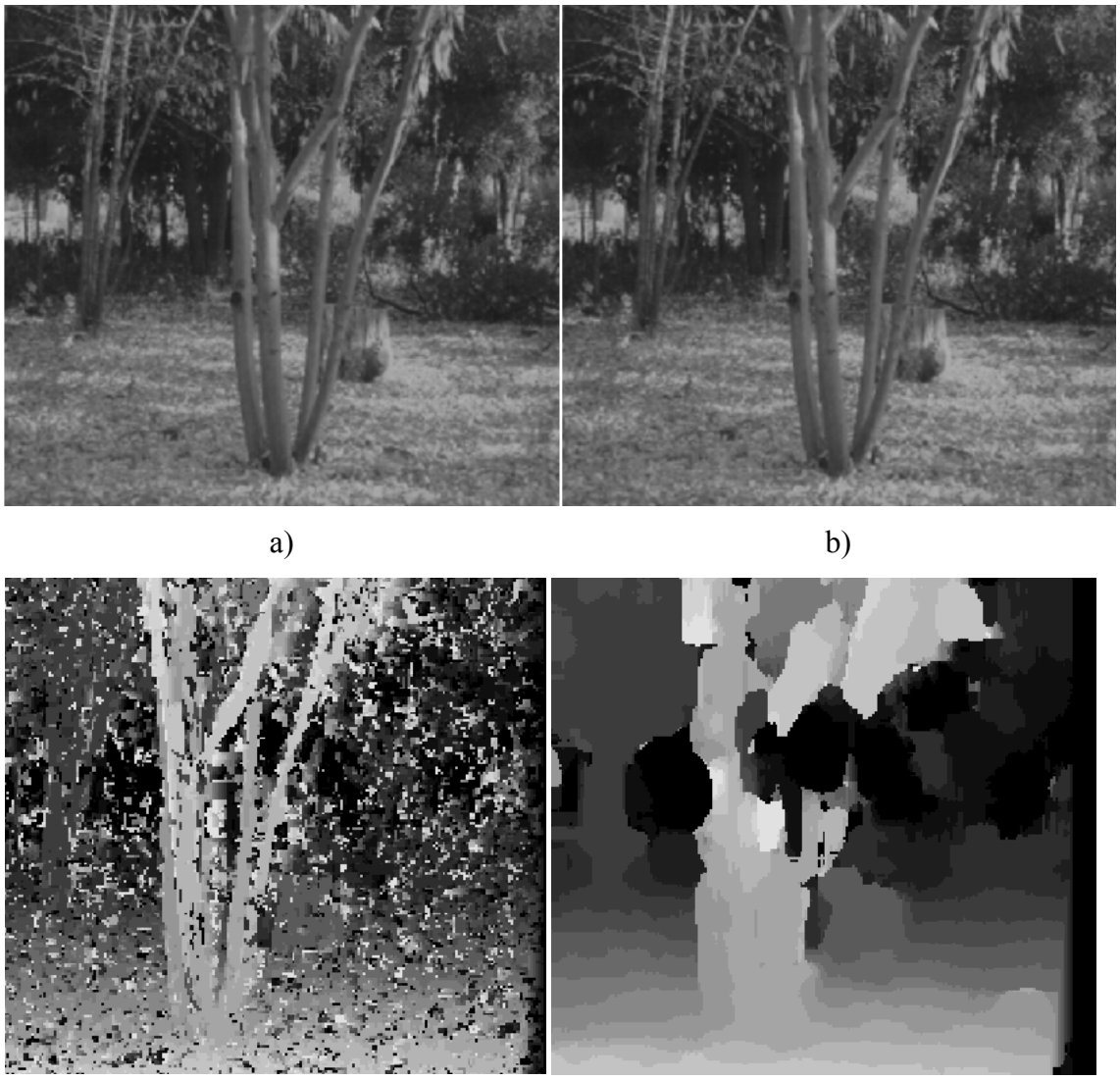
Şekil 4.27'de görüldüğü üzere sol resimde kırmızı kare ile gösterilen alan için ikinci resimde aynı satır çizgisi üzerinde, aynı büyüklükteki bloklar için maliyet fonksiyonu hesaplanmaktadır. Maliyet fonksiyonu için en düşük değeri veren blok aykırılığın hesaplanması için seçilmektedir.



Şekil 4.27. Blok eşleme algoritması ve en düşük maliyet fonksiyonu

Blok eşleme algoritmalarının gürültü duyarlılığı piksel eşleştirme algoritmalarına göre daha az olmakla birlikte, daha az ayrıntılı sonuçlar elde etmektedirler. Bir piksel için ne kadar sayıda komşunun hesaba katılacağı pencere boyutu ile karar verilir ve pencere boyutuna göre gürültü ve ayrıntı düzeyi arasında

seçim yapmak gerekir. Şekil 4.28'de seçilen pencere boyutunun aykırılık haritası üzerindeki etkisi görülebilir.



a) b)

c) d)

Şekil 4.28. Pencere boyutunun aykırılık haritası üzerindeki etkisi a) sol resim b) sağ resim c) pencere boyutu W=3 d) pencere boyutu W=20

4.5.2.2.2. Global Yöntemler

Yerel yöntemlerle karşılaştırıldığında, global yöntemler referans resimdeki tüm pikseller için aykırılık değerlerini bir seferde belirlemeyi hedeflerler. Bazı optimizasyon teknikleri kullanarak bir enerji fonksiyonunun minimize edilmesi ile aykırılık

belirlemesi yapılır. Enerji fonksiyonu genellikle bir eşleşme veri terimi, bir de düzgünlük terimi içermektedir [53, 54]:

$$E(d) = E_{data}(d) + \lambda . E_{smooth}(d) \quad 4.32$$

Veri terimi aykırılık fonksiyonu *d*'nin resim çiftiyle uyumunu ölçerken, λ ise sonucun düzgünlüğünü değiştiren parametredir. *C* aykırılık uzay resmindeki eşleşme maliyeti olacak şekilde, veri terimi şu şekilde ifade edilir:

$$E_{data}(d) = \sum_{(x,y)} C(x, y, d(x, y)) \quad 4.33$$

Düzgünlük terimi ise algoritma tarafından yapılan düzgünlük varsayımlarını kodlar. Optimizasyon hesabını izlenebilir yapmak için, düzgünlük terimi genellikle komşu piksellerin aykırılık farklarını ölçmekle sınırlandırılır. *p* aykırılık farkının bir tekdüze artış fonksiyonu olmak üzere, düzgünlük terimi şu şekilde ifade edilir:

$$E_{smooth}(d) = \sum_{(x,y)} p(d(x, y) - d(x + 1, y)) + \ p(d(x, y) - d(x, y + 1)) \quad 4.34$$

Global enerji tanımlandıktan sonra çeşitli algoritmalar kullanılarak minimum değeri elde edilebilir. Regülarizasyon ve Markov Rastgele Alanları gibi geleneksel yöntemleri kullanan algoritmalar yanında, maksimum-akış ve çizge-kesme yöntemini kullanan algoritmalar da ortaya çıkmıştır.

Çizge-kesme Yöntemi

Çizge-kesme enerji minimizasyon algoritması ilk olarak 2001 yılında yayınlanmış ve hala popülerliğini korumaktadır. Yayınlanan makalede, denklem 4.32'de görülen enerji fonksiyonunu minimize etmek için iki çizge kesme formülasyonu algoritma açıklamaları ile birlikte önerilmiştir. Önerilen algoritma *α,β* değiştirme hareketleri ve α genişletme hareketlerine dayanmaktadır [44].

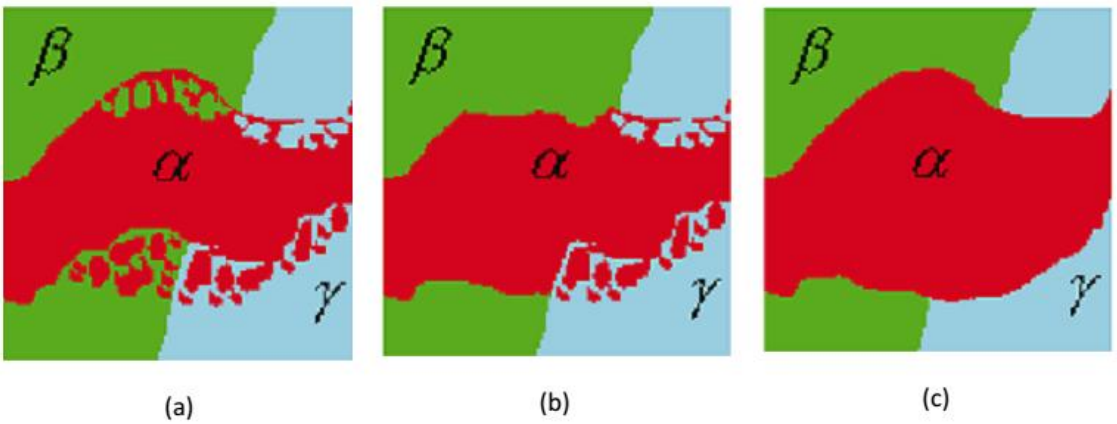
Bir *α,β* değiştirme hareketi uygulandıktan sonra sonuç olarak, hareketten önce α yada β olarak etiketlenmiş piksellerin en uygun tekrar etiketlenmesi yapılır. Yeni piksel etiketlemesinde üç farklı işlem yapılabilir:

- Etiketler değiştirilmeden bırakılabilir
- α etiketleri β etiketlerine dönüştürebilir
- β etiketleri α etiketlerine dönüştürebilir

α genişletme hareketi ise α olarak etiketlenmiş piksel kümelerini sonucunda enerji minimizasyonu sağlayacak şekilde, en uygun olarak genişletir.

Bu hareketler tüm etiketler için bir döngü içinde uygulanır ve enerji düşmesi durana kadar devam eder. Ziyaret edilecek pikseller önceden belirlenmiş olabileceği gibi, rastgele de belirlenebilir.

Çizge-kesme algoritmasındaki hareketlerin sonuçları Şekil 4.29'da görülmektedir. Şekil 4.29a'da üç farklı etiketin bulunduğu ilk piksel etiketleri, 4.29b'de ise bir *α, β* değiştirme hareketi sonrası ortaya çıkabilecek sonuç görülmektedir. Görüldüğü üzere, bu hareketin sonucunda sadece α ve β olarak etiketlenmiş pikseller hareketten etkilenmişlerdir. 4.29c'de ise bir α genişletme hareketi sonrası ortaya çıkabilecek sonuç görülmektedir. Bu hareket sonucunda ilk etiketleme durumundaki hallerine göre, tüm pikseller α olarak etiketlenebilirler.



Şekil 4.29. Çizge-kesme algoritması hareket sonuçları a) ilk etiketlendirmeler b) *α,β* değiştirme hareketi sonrası c) α genişletme hareketi sonrası

Bir hareketi gerçekleştirmek için enerji fonksiyonu, değerlendirilen etiketlere göre bir çizge problemi olarak formülleştirilir. Hareket sonrasındaki etiketleme, çizge-kesme olarak adlandırılan, tanımlı çizgenin minimum kesmesinin hesaplanması ile bulunur.

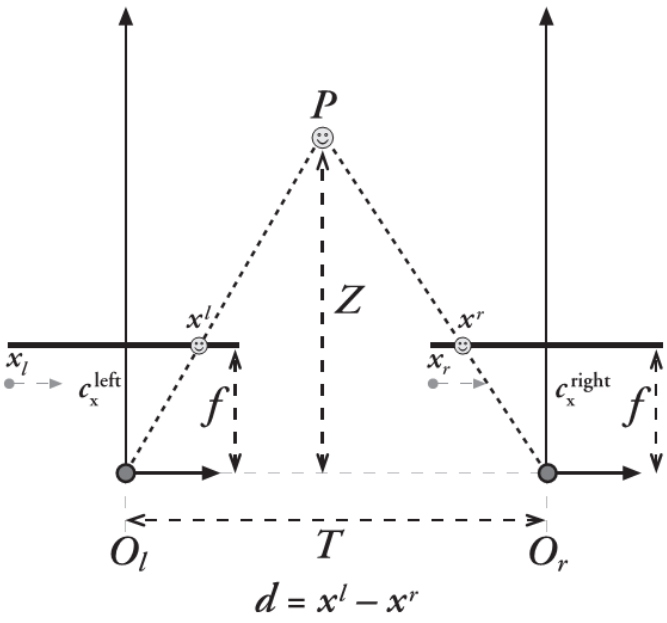
İki hareketin stereo algoritmaları arasındaki kullanımı incelendiğinde α genişletme hareketinin daha sıklıkla tercih edildiği görülmektedir [55].

4.6. Yeniden Yansıtma

Aykırılık haritası sahnedeki nesnelerin kameraya olan uzaklıkları hakkında göreceli olarak bilgi vermektedir. Birçok çalışmada aykırılık haritası sonuçları derinlik sonucu olarak kullanılabilmektedir. Ancak 3-boyutlu modelleme, robot tutuşu ve navigasyonu gibi amaçlar için derinlik bilgisi gerektiğinde aykırılık haritasından derinlik haritasının oluşturulması gereklidir. Derinlik haritası oluşturmada üçgenleme yöntemi kullanılmaktadır.

4.6.1. Üçgenleme

Kalibrasyon ve düzeltme adımları sonrasında, Şekil 4.30'da görülebilecek stereo sisteminin görüntü bozuklukları giderilmiş, hizalanmış ve ölçülmüş bir stereo sistemi olduğu varsayılmaktadır [16]. Bu işlemlerin sonucunda, kameraların resim düzlemleri düzlemdeş, aralarındaki uzaklık bilinen optik eksenleri paralel ve odak uzaklıkları $f_l = f_r$ olmaktadır. Aynı zamanda kameraların merkez noktaları c_x^{sol} ve $c_x^{sağ}$ sağ ve sol resimlerde aynı koordinatlara karşılık gelecek şekilde kalibre edilmiş durumdadır.



Şekil 4.30. İdeal stereo sisteminde derinlik (Z)

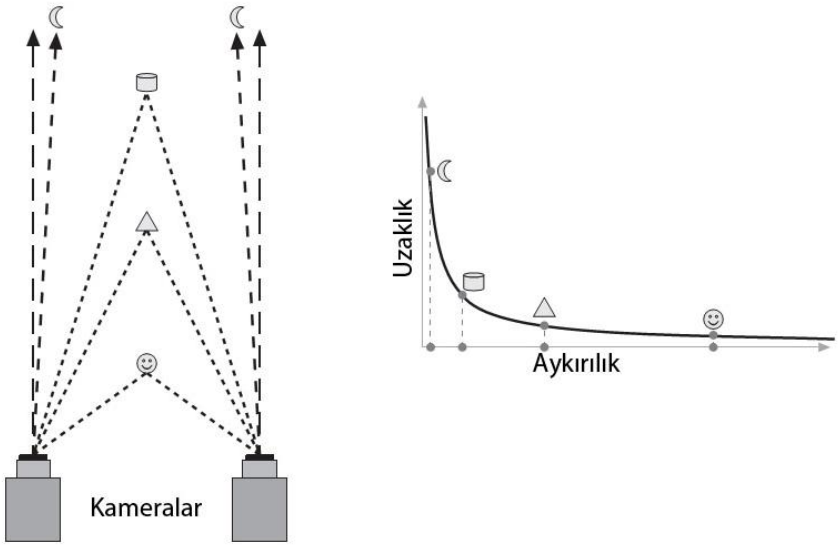
P gerçek dünyada bir nokta olmak üzere, bu noktanın sol ve sağ resimdeki karşılığı sırasıyla p^l ve p^r ve yatay koordinatlarının da x^l ve x^r olduğu varsayılmaktadır.

x^l ve x^r'nin noktanın iki resim düzlemindeki yatay pozisyonları olduğu bilindiğinde aykırılık basit şekilde $d = x^l - x^r$ olarak tanımlanabilir, bu durumda derinliğin ise aykırılık ile ters orantılı olduğu görülmektedir. Şekil 4.31'de gösterilen bu duruma göre, üçgenlerde benzerlik kuralından yola çıkarak Z derinlik değeri denklem 4.35 ve 4.36'da görüldüğü gibi hesaplanabilmektedir:

$$\frac{T - (x^l - x^r)}{Z - f} = \frac{T}{Z} \tag{4.35}$$

$$Z = \frac{f\,T}{x^l - x^r} \tag{4.36}$$

Aykırılık ile derinlik arasında ters orantı olduğundan aralarında doğrusal olmayan bir ilişki vardır. Aykırılık sıfıra yaklaştıkça, küçük aykırılık farkları büyük derinlik farklarına sebep olur. Aykırılık yüksek olduğunda ise, küçük aykırılık farkları derinlik üzerinde kayda değer bir değişim yaratmazlar. Bunun sonucu olarak, stereo görüş sistemleri sadece kamera yakınındaki nesneler için yüksek derinlik çözünürlüğü sağlayabilir. Bu durum Şekil 4.31'de görülmektedir [16].



Şekil 4.31. Aykırılık ve derinlik ilişkisi

4.6.2. Derinlik Haritası Oluşturma

Stereo düzeltme sonrasında, homojen koordinatlardaki 3-boyutlu bir noktanın homojen koordinatlardaki 2-boyutlu bir nokta olarak ifade edilmesini sağlayan yeniden yansıtma matrisi şu şekilde ifade edilebilir:

$$P\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ w \end{bmatrix} \tag{4.37}$$

ve ekran koordinatları (x/w, y/w) şeklinde hesaplanabilir. Ekran koordinatları ve kamera iç parametreleri verilen bir 2-boyutlu nokta da aynı şekilde 3-boyuta dönüştürebilir. Bu dönüşümü yapan yeniden yansıtma matrisi şu şekilde ifade edilir:

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -c_x \\ 0 & 1 & 0 & -c_y \\ 0 & 0 & 0 & f \\ 0 & 0 & -1/T_x & (c_x - c'_x)/T_x \end{bmatrix} \tag{4.38}$$

Q yeniden yansıtma matrisinde sağ resimdeki esas noktanın x koordinatını gösteren c'_x hariç tüm parametreler sol resme aittir. Eğer esas doğrular sonsuzlukta çakışıyorsa $c_x = c_x'$ olduğundan matrisin sağ alt köşesindeki değer 0 olacaktır. Aykırılık değeri d olarak belirlenmiş bir 2-boyutlu homojen nokta verildiğinde, noktayı 3-boyuta şu denklemi kullanarak çevirebiliriz:

$$Q\begin{bmatrix} x \\ y \\ d \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ W \end{bmatrix} \tag{4.39}$$

Denkleme göre, aykırılığı d olan bir *(x,y)* noktasının 3-boyutlu koordinatları *(X/W, Y/W, Z/W)* olarak hesaplanır.

4.7. 3-Boyutlu Modelleme

Nokta bulutu bir koordinat sistemindeki veri noktalarının kümesini ifade eder. Üç-boyutlu koordinat sisteminde bu noktalar genel olarak X, Y ve Z koordinatlarıyla tanımlanır ve bir nesnenin dış yüzeyininin görüntülenmesinde kullanılır.

Yeniden yansıtma sonucunda sol resme göre bütün noktaların Z derinlik bilgisi elde edilmiş ve sahnenin 3-boyutlu gösterimini içeren XYZ formatında bir nokta bulutu elde edilmiş olur. Eğer 3-boyutlu modelleme yapılmak isteniyorsa, bu noktalara ait renk bilgileri de referans alınan sol resimden alınarak nokta bulutuna eklenir. Renk bilgisi alınırken genel olarak RGB renk uzayı tercih edilmekte ve noktanın kırmızı, yeşil ve mavi renk düzeyleri ayrı ayrı alınmaktadır. Bu üç rengin birleşiminden noktanın gerçek rengi oluşturabilir.

3-boyutlu veriyi ifade etmekte kullanılan çok sayıda farklı dosya formatı ve program bulunmaktadır. 2008'deki bir araştırmaya göre bu amaçla kullanılan 100'den fazla dosya formatı bulunmaktadır [56]. Stereo görüş uygulamalarında 3-boyutlu modeli ifade etmede en çok kullanılan dosya formatlarından biri PLY dosya formatıdır.

4.7.1. PLY Dosya Formatı

Poligon dosya formatı ya da Stanford üçgen formatı olarak bilinen PLY dosya formatı kolay ve esnek bir 3-boyut veri formatı olarak tasarlanmıştır. Akademik araştırmalarda oldukça tercih edilen bir dosya türüdür. PLY nesneyi, 3-boyutlu noktalar, poligonlar gibi elemanlardan oluşan bir dizi şeklinde tanımlar. Format kullanıcılara kendi istedikleri tipte veriyi tanımlama imkanı da sağladığından değişimlere uyum sağlayabilen, gelecekte de kullanılabilecek bir dosya formatı ortaya çıkmıştır [56].

PLY dosyası başlık ve veri kısmı olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Başlık kısmının yapısı Şekil 4.32'de görülmektedir.

```
ply format ascii 1.0
comment author: John Smith
element vertex 3
property float x
property float y
property float z
element face 1
property list uchar int vertex_index
end_header
```

Şekil 4.32. PLY dosyası başlık kısmı örneği

Başlık kısmında ilk satırda dosya formatının yapısı belirtildikten sonra, isteğe bağlı olarak yorum satırı eklenmiştir. Daha sonra dosyada eleman olarak 3 adet 3-boyutlu nokta bulunduğu ve bu noktaların x, y, z olarak kesirli sayı şeklinde tanımlandığı belirtilmiştir. Nesnenin sahip olduğu yüz sayısı belirtildikten sonra liste özelliği tanımlanmış ve son satırda başlık kısmının sonuna gelindiği belirtilmiştir.

Şekil 4.32'de tanımlanan başlık kısmına göre oluşturulacak içerik kısmı ise Şekil 4.33'de görülmektedir. Başlık kısmında tanımlanan sayıda 3-boyutlu nokta bilgisinden sonra tanımlanan nokta indeksi ile içerik kısmı sonlanmaktadır.

```
0.0 0.0 0.0
0.0 1.0 0.0
1.0 0.0 0.0
3 0 1 2
```

Şekil 4.33. PLY dosyası içerik kısmı örneği

4.8. Nokta Bulutlarında Filtreleme

Stereo görüş sistemi kullanılarak bir sahne ya da nesnenin 3-boyutlu modellemesi yapıldıktan sonra, nokta bulutunda ayrık noktalar ya da gürültü bulunabilmektedir [57]. Genel olarak eşleştirme hatalarından kaynaklanan yanlış uzaklık hesaplamaları görülebilir. Nokta bulutlarındaki ayrık noktalar ve gürültüyü yok etmek için çeşitli filtreleme yöntemleri kullanılmaktadır.

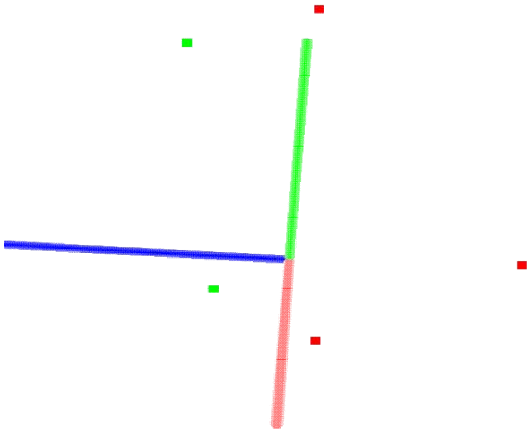
Nokta bulutları üzerinde gerçekleştirilebilecek, matematiksel modeller kullanan temel filtreleme yöntemleri şunlardır:

- Düzgeçiş (passthrough)

- İstatiksel ayrık noktalar çıkarımı (statistical outlier removal)
- Yarıçapa göre ayrık noktalar çıkarımı (radius outlier removal)

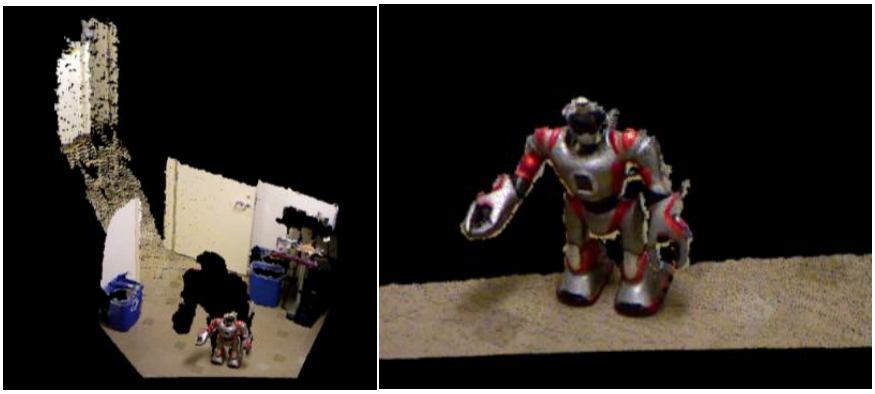
4.8.1. Düzgeçiş Filtreleme

Belirlenmiş bir boyut dışındaki noktaların nokta bulutundan çıkarılması için kullanılan bir filtreleme çeşididir. Şekil 4.34'de görüldüğü üzere kırmızı (x), yeşil (y), mavi (z) ekseni olmak üzere; belirlenen boyut dışında kalmış kırmızı noktalar filtreleme sonucunda nokta bulutundan çıkarılmaktadır [58].



Şekil 4.34. Düzgeçiş filtreleme ile çıkarılan noktalar

Şekil 4.35'de gerçek bir görüntüden oluşturulmuş bir nokta bulutu üzerinde düzgeçiş filtrelemenin sonucu görülmektedir [56].

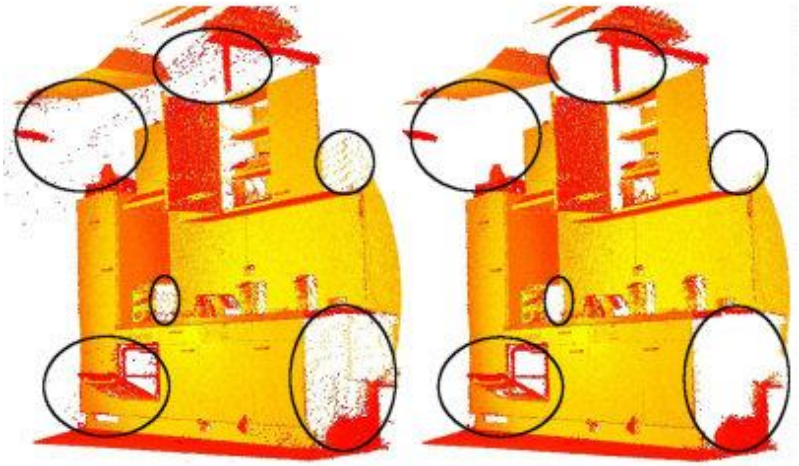


a) b)

Şekil 4.35. Düzgeçiş filtreleme sonuçları a) filtreleme öncesi b) z ekseni için 1.0m ile 1.5m arası filtreleme

4.8.2. İstatistiksel Ayrık Noktalar Çıkarımı Filtrelemesi

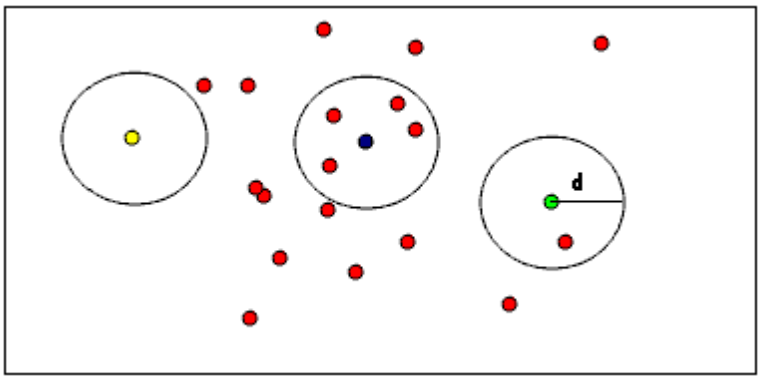
Nokta bulutunda bulunan gürültülerin ve ayrık noktaların istatistiksel analiz teknikleriyle çıkarıldığı bir filtreleme yöntemidir. Her nokta için, belirlenen sayıda komşu noktasına olan uzaklıklar hesaplanır, daha sonra ortalama uzaklık ve standart sapma değerleri kullanılarak oluşturulan değeri sağlamayan noktalar ayrık noktalar olarak değerlendirilerek nokta bulutundan çıkartılır. Şekil 4.36'da bir nokta bulutu üzerinde filtreleme sonuçları görülmektedir [58].



Şekil 4.36. İstatiksel ayrık noktalar çıkarımı filtrelemesi ile filtre öncesi (sol) ve filtre sonrası (sağ) nokta bulutu görünümü

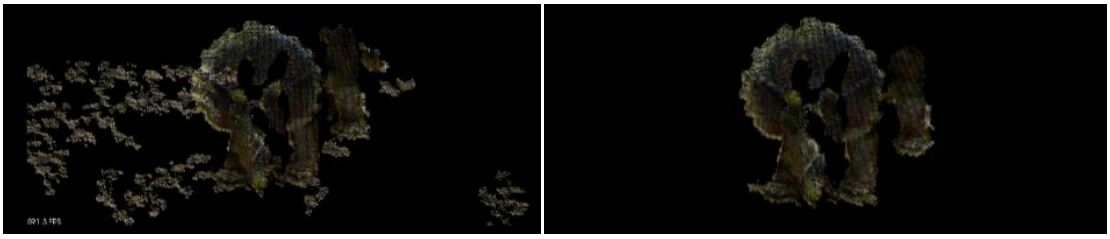
4.8.2. Yarıçapa Göre Ayrık Noktalar Çıkarımı Filtrelemesi

Nokta bulutunda bulunan noktaların önceden belirlenmiş bir uzaklığa kadar olan komşu sayılarını bularak, belirli sayıdan daha az komşusu olan noktaların nokta bulutundan çıkarılması yöntemi ile çalışan bir filtreleme yöntemidir. Şekil 4.37'de görüldüğü üzere *d* yarıçapı belirlenmiş olarak filtreleme yapıldığında, eğer bir minimum komşu sayısı belirlendiyse soldaki dairede bulunan nokta buluttan çıkarılacaktır [58]. Minimum komşu sayısı iki olarak belirlendiğinde ise en sağ dairedeki nokta da buluttan çıkarılacaktır.



Şekil 4.37. Yarıçapa göre ayrık noktalar çıkarımı filtrelemesi nokta çıkarımı

Şekil 4.38'de gerçek bir görüntüden oluşturulmuş bir nokta bulutu üzerinde yarıçapa göre ayrık noktalar çıkarımı filtrelemesi kullanılmış ve nesnenin dışında oluşmuş olan istenmeyen noktalar nokta bulutundan çıkarılmıştır [56].



a) b)

Şekil 4.38. Yarıçapa göre ayrık noktalar çıkarımı filtrelemesi sonuçları a) filtreleme öncesi b) filtreleme sonrası

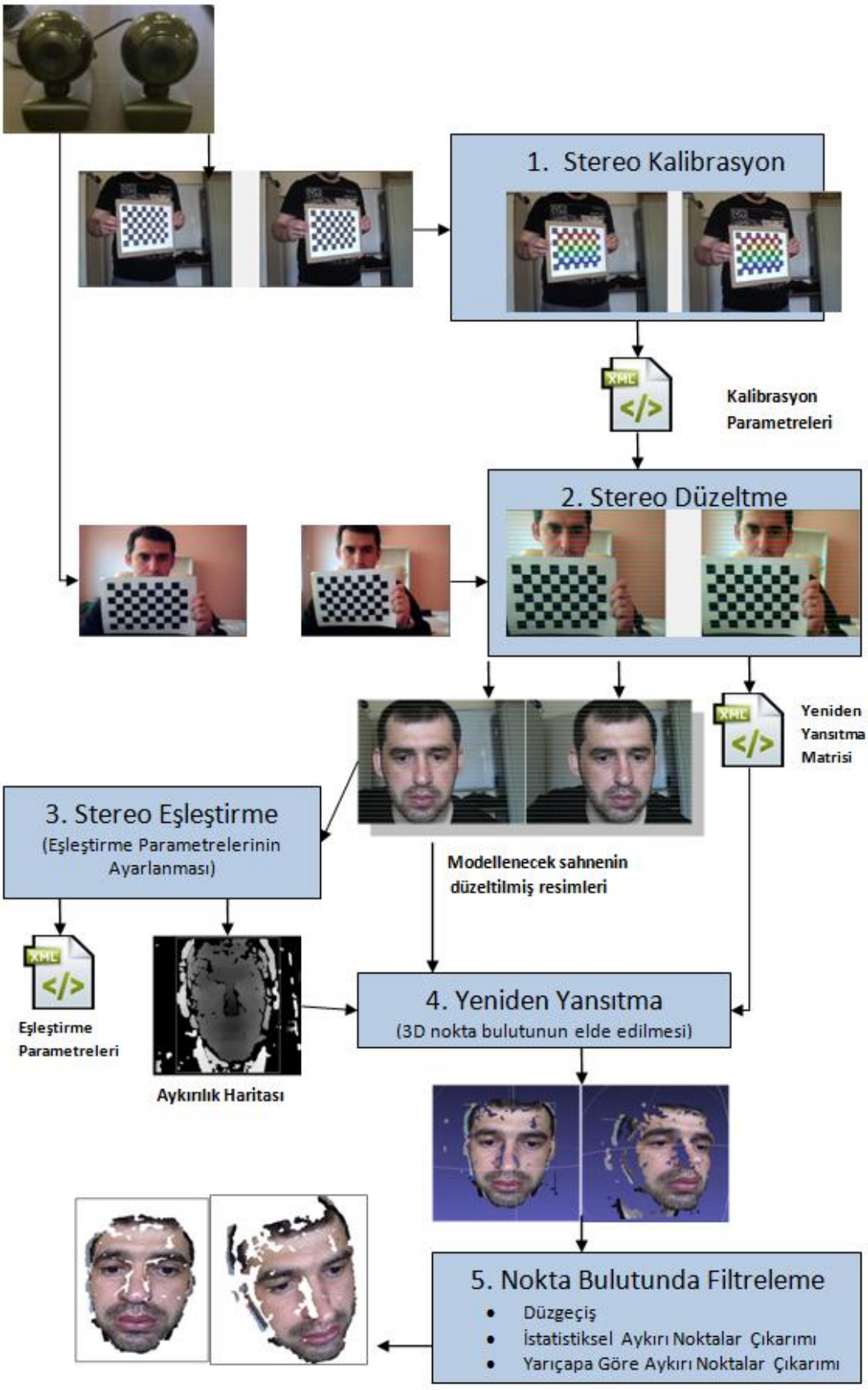
BÖLÜM 5

STEREO GÖRÜŞ SİSTEMİ

5.1. Giriş

Gerçek dünyadaki sahnelerin ve nesnelerin derinlik bilgisini elde edebilmek ve 3-boyutlu modelini oluşturabilmek için bir stereo görüş sistemi geliştirilmiştir. Geliştirilmiş olan sistem, iki farklı perspektiften sahneyi gören iki kameradan aldığı görüntüleri işleyip, gerekli kalibrasyon ve düzeltme işlemlerini uyguladıktan sonra, stereo eşleştirme ve üçgenleme yöntemini kullanarak derinlik analizini gerçekleştirmektedir.

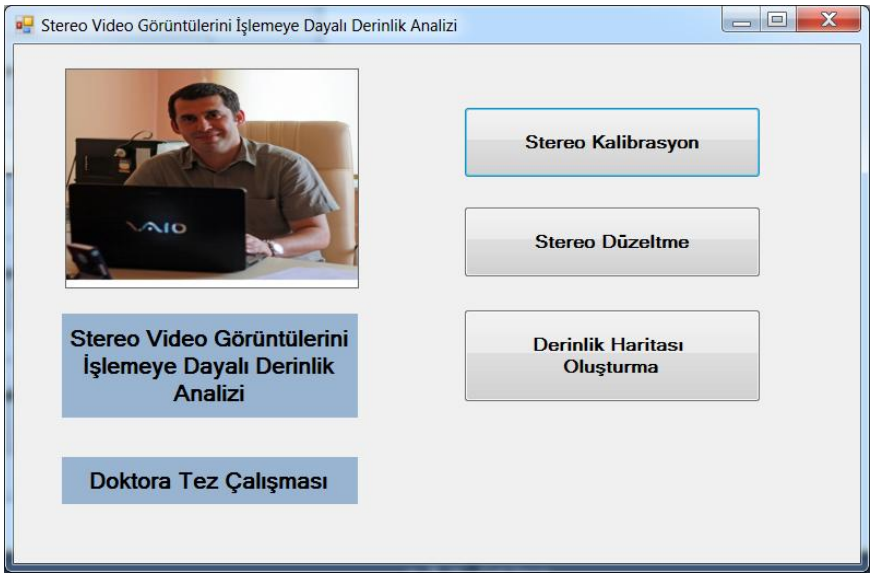
Geliştirilen sistemde stereo eşleştirme için kullanılan blok eşleme algoritmasından en iyi sonucu almak için, eşleştirmede kullanılan parametrelerin değişiminin sonuçları gerçek zamanlı olarak aykırılık haritası üzerinde izlenebilmektedir. Bunun yanında geliştirilmiş olan stereo görüş sistemi, derinlik haritasında ortaya çıkabilen gürültü ve ayrık noktaların engellenmesi noktasında, geleneksel iki boyutlu filtreleme yöntemlerinin ötesine geçerek 3-boyutlu modeller üzerinde filtreleme yöntemi kullanmaktadır. Bu yöntem sonucunda 3-boyutlu modellemenin başarımı arttırılmıştır. Şekil 5.1'de stereo görüş sisteminin tüm adımlarını içeren akış diyagramı görülmektedir.



Şekil 5.1. Stereo görüş sistemi akış diyagramı

Stereo görüş sisteminde derinlik haritası elde edilmesi ve 3-boyutlu modelleme yapılabilmesi için C# dili kullanılarak bir uygulama geliştirilmiştir. Filtreleme işlemleri için ise, her bir filtreleme için farklı uygulamalar C++ dili kullanılarak geliştirilmiştir.

Resimlerin kameralardan alınmasından 3-boyutlu nokta bulutlarının oluşturulmasına kadar kullanılan ve C# programlama dili kullanılarak geliştirilmiş uygulamanın giriş arayüzü Şekil 5.2'de görülmektedir. Daha önceden elde edilen verilerin kullanılmaması durumunda sırasıyla stereo kalibrasyon, stereo düzeltme ve derinlik haritası oluşturma adımları kullanılarak 3-boyutlu modelleme gerçekleştirilebilmektedir.



Şekil 5.2. Stereo görüş uygulaması giriş ekranı

Nokta Bulutu Kütüphanesi (PCL) sadece C++ diliyle kullanılabildiği için 3-boyutlu nokta bulutlarının filtrelenmesi işlemi ana programdan ayrı şekilde yapılmaktadır. Nokta bulutları ana uygulama tarafından oluşturulduktan sonra, PCL ile yapılacak üç farklı filtreleme için grafik arayüze sahip olmayan, komut satırında çalışan uygulamalar geliştirilmiştir. Filtreleme parametreleri ve filtrelenecek dosya isimleri argümanlar yardımıyla filtreleme uygulamasına aktarılmaktadır.

5.2. Kullanılan Donanım ve Yazılımlar

Uygulama geliştirmede kullanılan donanımlar bir dizüstü bilgisayar ve stereo kamera sistemidir. Yazılım geliştirmede ve uygulamanın çalıştırılmasında kullanılan bilgisayar özellikleri şu şekildedir:

- Intel core i7 2670QM işlemci
- 6 GB Ram
- Nvidia Geforce GT 540M ekran kartı

Uygulama geliştirmede ve sonuçları elde etme ve göstermede kullanılan yazılımlar ise şunlardır:

- Microsoft Windows 7 işletim sistemi
- Microsoft Visual Studio 2010
- MeshLab
- OpenCV (Açık kaynak bilgisayarla görme kütüphanesi)
- OpenCVSharp (.NET sistemi için OpenCV ara kütüphanesi)
- PCL (Nokta bulutu kütüphanesi)

5.2.1. Stereo Kamera

Geliştirilen uygulama sürücülerin desteklemesi şartıyla herhangi iki kamera ile çalışabilmektedir. Uygulamada kolaylıkla ulaşılabilen web-kameralar kullanılabileceği gibi, DSLR kameralar da görüntü elde etmede kullanılabilir. Ancak kullanılan DSLR kameralarda bilgisayara gerçek zamanlı görüntü aktarımı desteklenmediğinden kalibrasyon işlemi daha uzun sürede yapılabilmektedir. Bu uygulamada Şekil 5.3'de görülmekte olan kameralardan iki DSLR ve iki web-kamera çifti oluşturularak, bu çiftler görüntü elde etmede kullanılmıştır.



a) b)

Şekil 5.3. Kullanılan kameralar a) Nikon D3100 b) Logitech Web-kamera

5.2.2. OpenCV Kütüphanesi

Intel şirketi tarafından geliştirilmesine 1999 yılında başlanılan OpenCV kütüphanesi 2000 yılında duyurulmuş ve 2006 yılında 1.0 sürümü çıkarılmıştır. Kütüphanenin geliştirilme amacı görme altyapısında kullanılabilecek, açık ve optimize kodlardan oluşan bir ortak altyapı oluşturmaktır. Daha sonraları Willow Garage ve Itseez şirketleri de kütüphane gelişimine destek vermeye başlamışlardır. OpenCV günümüzde hızla gelişen, kullanımı artan popüler bir bilgisayarla görme kütüphanesi haline gelmiştir.

OpenCV C++ dili ile geliştirilmiş olup, birçok bilgisayar görüşü algoritmasına sahip olan açık kaynak kodlu bir kütüphanedir. İçerdiği algoritmalar arasında resim işleme, kalibrasyon, özellik tanıma ve takibi, şekil analizi, hareket analizi, 3-boyutlu modelleme, nesne bölütleme ve tanıma algoritmaları sayılabilir [59].

BSD lisansı ile yayınlanmakta olan OpenCV kütüphanesi akademik ve ticari amaçla ücretsiz olarak kullanılabilir. C++ dili dışında Python, Java ve Matlab arayüzleri de bulunmaktadır. OpenCV kütüphanesini kullanarak geliştirilen ara kütüphaneler yardımıyla C#, Perl, Ruby gibi programlama dilleri ile de kullanılabilir. OpenCV Windows, Linux, BSD, Android ve Ios gibi çok farklı işletim sistemlerinde çalışabilmektedir.

5.2.3. OpenCVSharp Kütüphanesi

OpenCV kütüphanesini .Net yapısı üzerinde kullanabilmek için ara kütüphaneler geliştirilmekte olup, bunlardan en popüler olanlarından biri de OpenCVSharp

kütüphanesidir. OpenCV kütüphanesi fonksiyonları kullanıldığı için, bu ara kütüphanenin çalışması için sistemde OpenCV kütüphanesinin de kurulu olması gerekmektedir [60].

OpenCV kütüphanesinin bir sürümü çıkarıldıktan sonra, aynı sürüm numarası ile OpenCVSharp kütüphanesi de çıkarılmaktadır. Uyum sorunları yaşanmaması için iki kütüphanenin aynı sürümleri sistemde yüklü olmalıdır.

5.2.4. PCL (Nokta Bulutu Kütüphanesi)

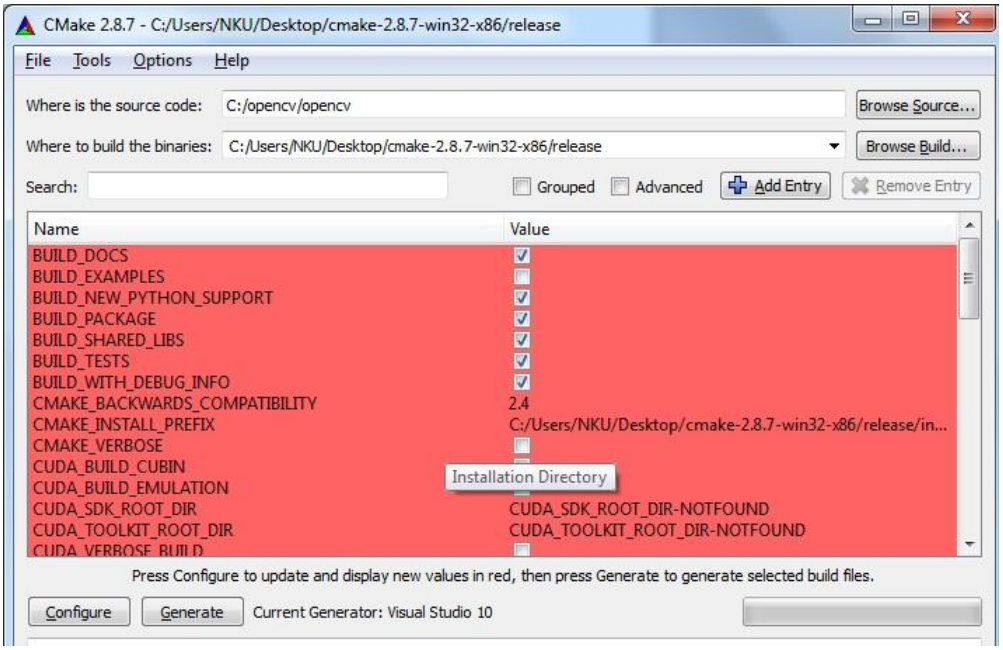
PCL nokta bulutları üzerinde işlemler gerçekleştirmek için geliştirilmiş çeşitli algoritmalardan oluşan, açık kaynaklı bir kütüphanedir. PCL nokta bulutları üzerinde görüntüleme ve analiz işlemlerinde kullanılabilmekte ve özellik çıkarma, yüzey modelleme, filtreleme, bölütleme algoritmaları gibi birçok algoritmayı içerisinde bulundurmaktadır [58, 61].

C++ programlama dili ile yazılmış olan PCL, BSD lisansı ile dağıtılmaktadır. Geliştirilmesine Willow Garage tarafından 2010 yılında başlanılan PCL'in 1.0 sürümü Mayıs 2011'de çıkarılmıştır. Günümüzde birçok farklı organizasyondan çok sayıda kişinin katılımıyla hızla gelişmektedir.

5.2.5. Kütüphanelerinin Kaynak Kodundan Derlenmesi

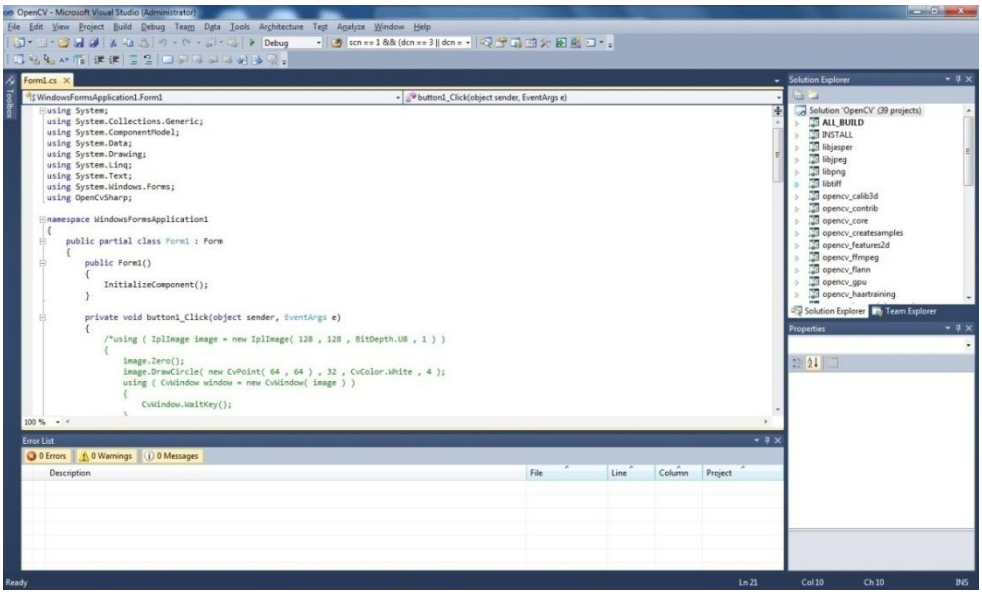
OpenCV, OpenCVSharp ve PCL kütüphaneleri derlenmiş ve yayınlanmış haliyle kullanılabileceği gibi, açık kaynak kodlu kütüphaneler olduklarından kaynak kodundan da derlenebilir. Açık kaynak kodlu yazılımların en büyük avantajlarından biri, kaynak kodu değiştirilebilmesi ve isteklere uygun hale getirilebilmesidir. Bunun dışında geniş kaynak kodunda kararlı sürüme henüz alınmamış algoritmalar ya da özellikler de bulunabilir. Özellikle PCL'de günümüz itibariyle kaynak kodunda bulunup, kararlı sürümün içine eklenmemiş çok sayıda algoritma bulunmaktadır.

Açık kaynak kodlu bu kütüphaneleri derlemek için C*Make* yazılımına ihtiyaç vardır. Bu yazılımın indirilmesinden sonra komut satırından ya da programın grafik arayüzü kullanılarak derleme ayarları yapılır ve istenilen Visual Studio sürümü için bir proje dosyası oluşturulur. OpenCV kütüphanesi için Visual Studio 2010'e göre ayarlamaların yapıldığı CMake arayüzü Şekil 5.4'de görülmektedir.



Şekil 5.4. CMake arayüzü kullanımı

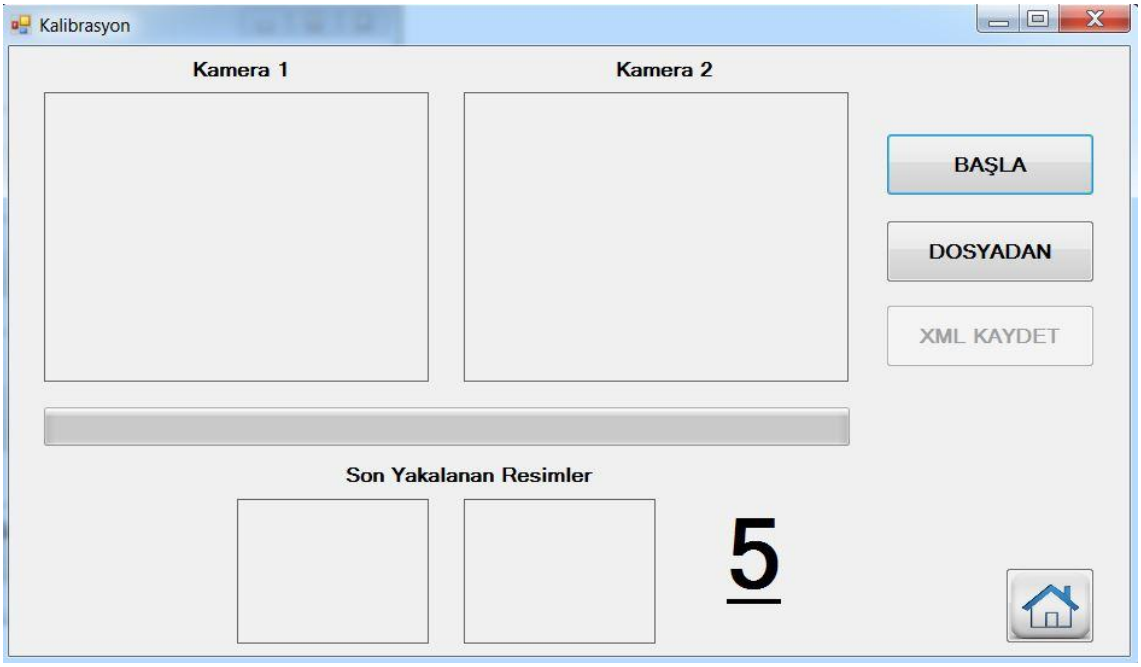
Şekil 5.5'de görüldüğü üzere, oluşturulan proje dosyası Visual Studio ile açıldıktan sonra proje derlenir. Derleme sonucunda uygulama geliştirmede kullanabileceğimiz "dll" formatındaki kütüphane dosyaları elde edilmektedir.



Şekil 5.5. OpenCV'nin kaynak kodundan derlenmesi

5.3. Stereo Kalibrasyon

Stereo kalibrasyon işlemi bir satranç tahtası deseni kullanılarak gerçek zamanlı olarak yapılmaktadır. Ancak istendiği takdirde, sağ ve sol kamera için önceden kaydedilmiş olan görüntüler kullanılarak da işlem gerçekleştirilebilmektedir. Kalibrasyon modülü açıldıktan sonra Şekil 5.6'daki arayüz ile karşılaşılmaktadır.



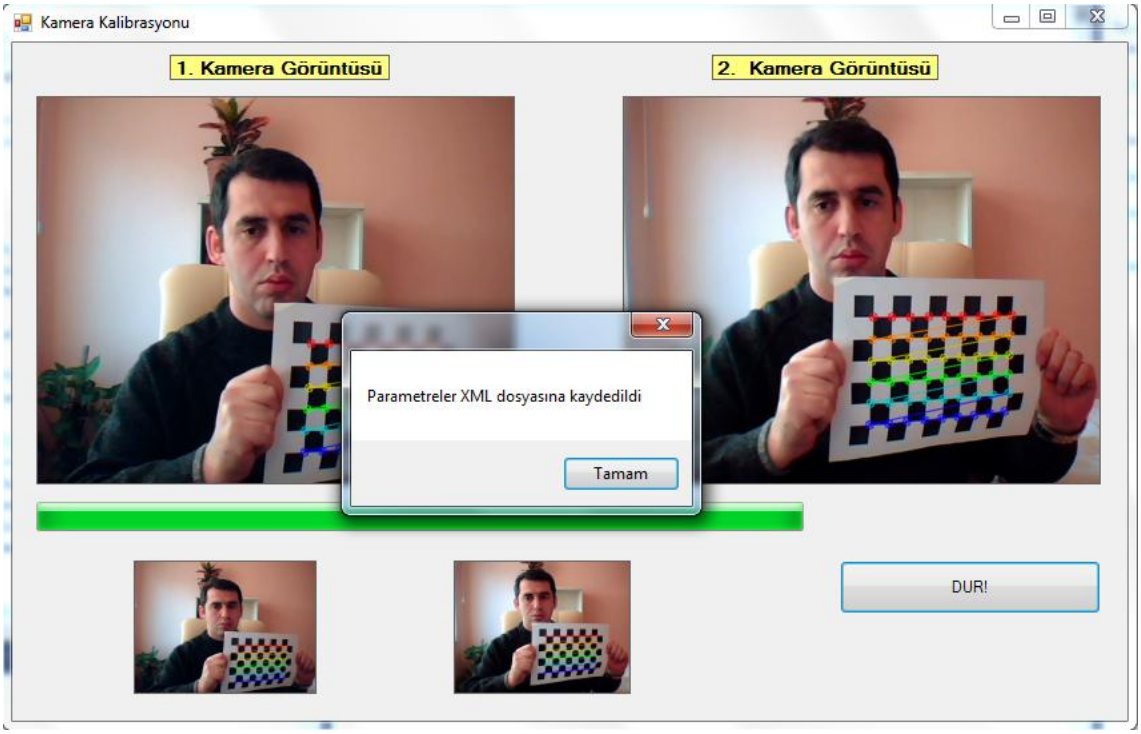
Şekil 5.6. Stereo kalibrasyon arayüzü

Kalibrasyon arayüzündeki görülen üç düğme ve görevlerini şu şekilde açıklayabiliriz:

- **Başla:** Bu düğme ile gerçek zamanlı stereo kalibrasyon işlemine başlanılabilmektedir. Düğmeye basıldıktan sonra, düğme üzerindeki yazı "Dur" olarak değişmekte ve kalibrasyon işlemini durdurmakta kullanılabilmektedir.
- **Dosyadan:** Sol ve sağ kameraya ait görüntüler daha önceden kaydedilmişse, varolan resimlerden kalibrasyon işleminin yapılması için kullanılmaktadır.
- **XML Kaydet:** İlk açılışta aktif olmayan bu düğme ile, başarılı bir kalibrasyon işlemi sonrasında oluşturulan stereo görüş sistemine ait iç ve dış parametreler bir XML dosyasına kaydedilir.

Kalibrasyon parametrelerinin XML dosyasına kaydedilmesi sonucunda, program kapatılıp tekrar açılsa da, stereo düzeltme işlemi için kalibrasyon yapılmasına ihtiyaç duyulmamaktadır. Kameraların geometrik yerleşiminde bir değişiklik olmaması halinde XML dosyasına kaydedilen kalibrasyon parametreleri tekrardan kullanılabilir.

Stereo kalibrasyon işlemi sırasındaki arayüz görüntüsü Şekil 5.7'de görülmektedir. Sol ve sağ kamera görüntüleri üst kısımda bulunmakta ve bu görüntüler üzerinde kalibrasyon nesnesi olarak kullanılan desen aranmaktadır. İki görüntü üzerinde de desen bulunduktan sonra köşeler resim üzerinde işaretlenmekte ve kontrol amaçlı olarak bulunan köşeler birleştirilmektedir. Kalibrasyon deseninin bulunduğu bu görüntüler daha sonra tekrar kullanılabilecek şekilde kaydedilmekte olup, son kaydedilen görüntüler aynı zamanda arayüzün alt kısmında gösterilmektedir.

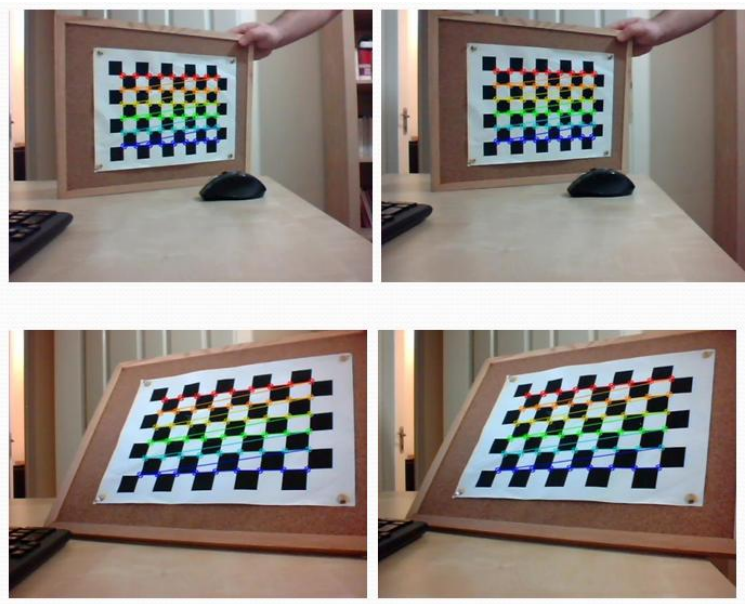


Şekil 5.7. Stereo kalibrasyonun yapılışı

Kalibrasyon nesnesinin farklı açılarda resimlerinin elde edilmesi gerektiğinden ve bu işlemin gerçek zamanlı yapılmasından dolayı, kalibrasyon nesnesinin hareket ettirilmesine imkan sağlamak amacıyla beş saniyelik bir bekleme süresi bulunmaktadır. İki kamera görüntüsü üzerinde gerçekleşen başarılı bir bulma işleminin ardından beş

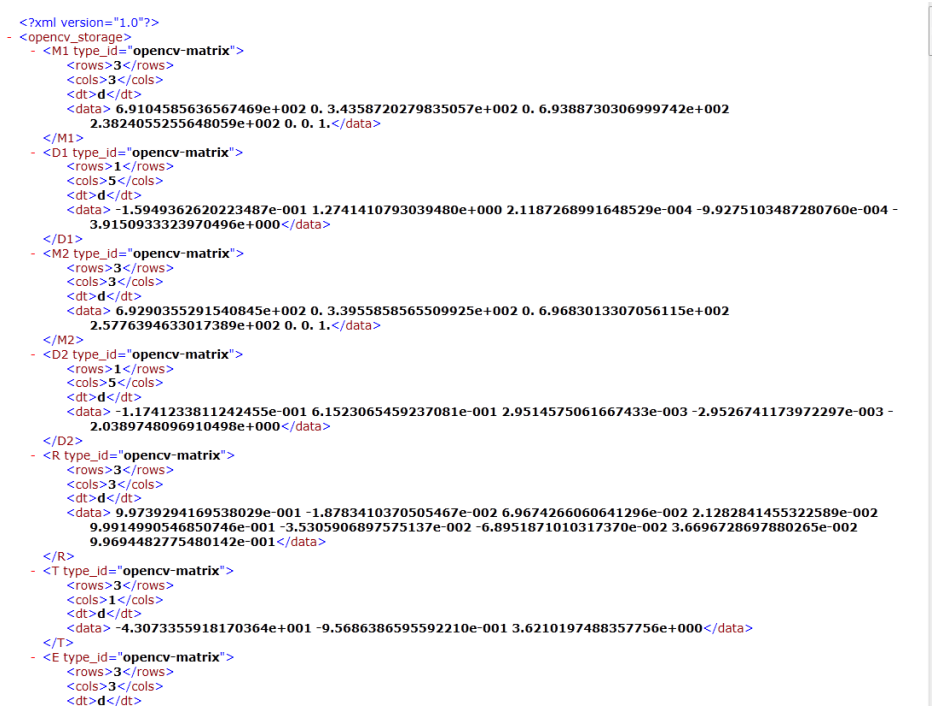
saniyeden geriye doğru sayan bir sayaç yardımıyla kalibrasyon nesnesinin konumunun değişimi için süre verilmektedir. Aynı zamanda bu sayaç yardımıyla kalibrasyon nesnesinin hareketli ve net olmayan bir resim üzerinde yakalanmasının da önüne geçilmiştir.

Kalibrasyon nesnesinin tanınmış olduğu, köşelerin bulunup çizgilerle birleştirildiği sol ve sağ görüntü örnekleri Şekil 5.8'de görülmektedir. Köşeler bulunduktan sonra, bu köşelere ait 3-boyut koordinatları kaydedilir ve önceden belirlenmiş görüntü sayısına ulaşıldıktan sonra köşe koordinatları kullanılarak kalibrasyon gerçekleştirilir.



Şekil 5.8. Sırasıyla sol ve sağ kamera görüntülerinde köşelerin bulunması

Kalibrasyon parametrelerinin saklandığı XML dosyasının içeriğinden bir bölüm Şekil 5.9'da görülmektedir.

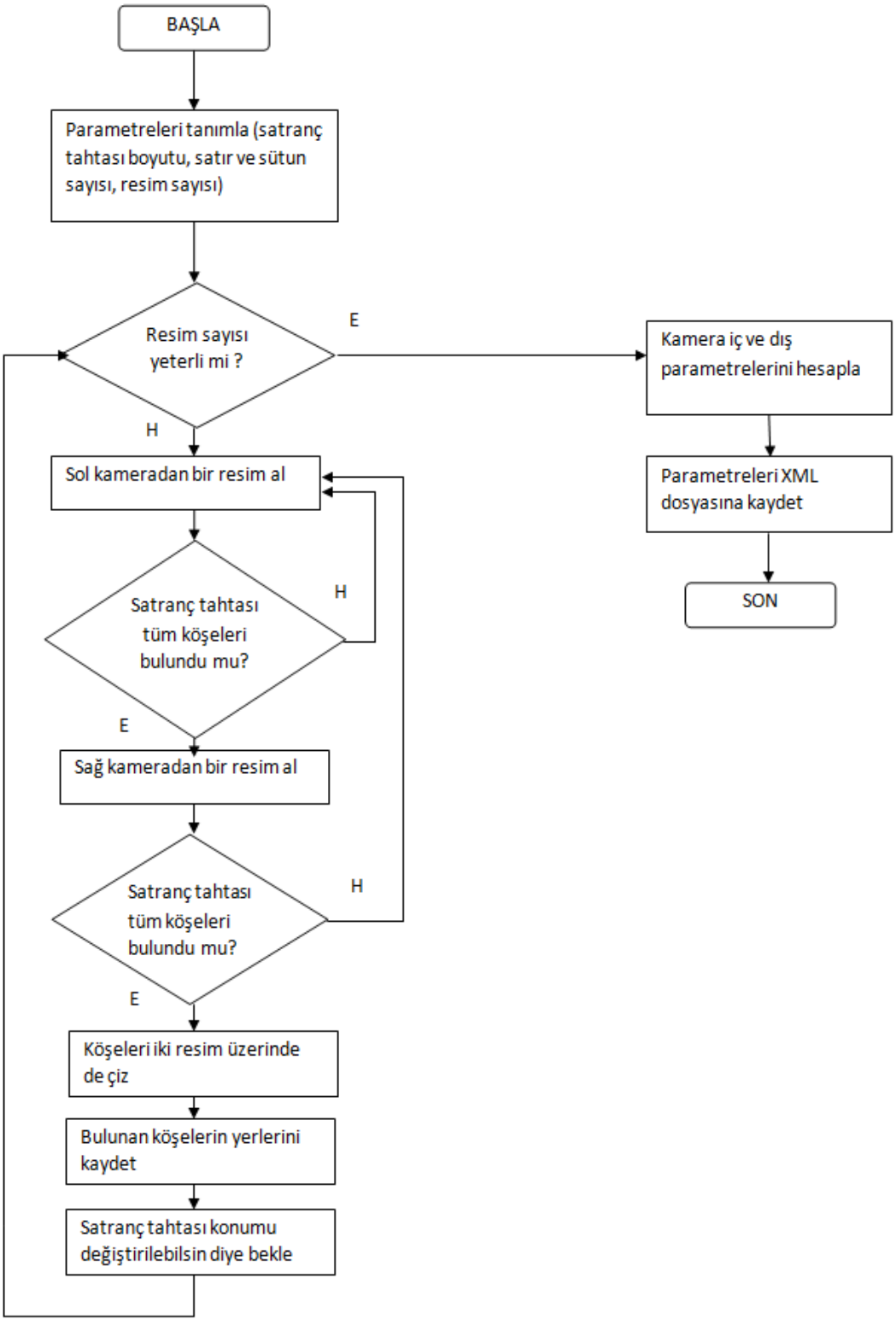


Şekil 5.9. Kalibrasyon parametrelerinin XML dosyasında saklanması

Stereo kalibrasyon işlemine ait kaba kod (pseudo code) Şekil 5.10'da, akış diyagramı ise Şekil 5.11'de görülmektedir.

```
1   SET satrançTahtasıBoyutu, satırSayısı, sütunSayısı, resimSayısı
2   WHILE   istenen resim sayısı elde edilene kadar
3       Sol kameradan bir resim al
4       IF   sol resim üzerinde tüm köşeler bulundu   THEN
5           Sağ kameradan bir resim al
6           IF   sağ resim üzerinde tüm köşeler bulundu   THEN
7               Köşeleri resimler üzerinde birleştir
8               Bulunan köşelerin koordinatlarını kaydet
9               Satranç tahtası konum değişikliği için bekle
10          ENDIF
11      ENDIF
12  ENDWHILE
13  Kamera iç ve dış parametrelerini hesapla
14  Parametreleri XML dosyasına kaydet
```

Şekil 5.10. Stereo kalibrasyon kaba kod gösterimi



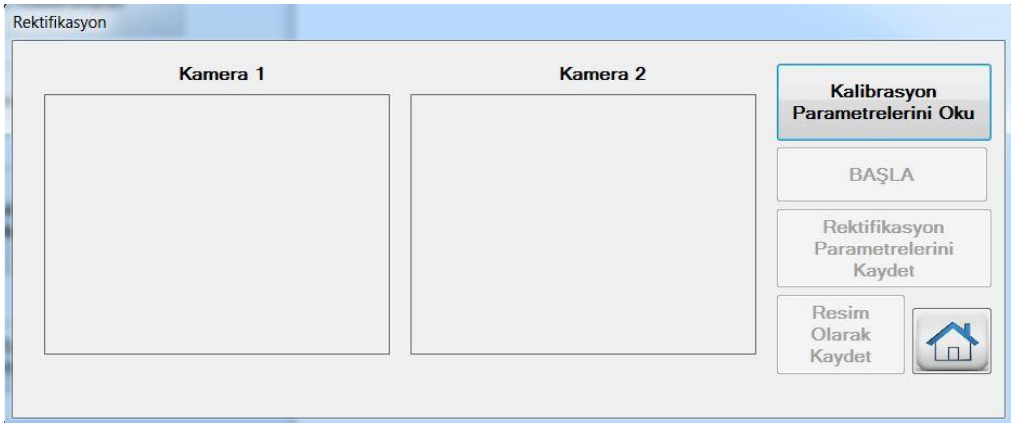
Şekil 5.11. Stereo kalibrasyon akış diyagramı

Akış diyagramında da görüldüğü üzere stereo kalibrasyon işlemindeki önemli adımlar ve bu adımları gerçekleştirmede kullanılan OpenCV fonksiyonları ise şunlardır:

- **Satranç tahtası köşelerinin resim üzerinde bulunması:** Kalibrasyon parametrelerinin hesaplanabilmesi için iki kamera görüntüsünde de tam bir satranç tahtasının belirtilen köşe sayısının görünür durumda olması gerekmektedir. Resim üzerinde bu kontrolü yapmak ve tüm köşeler bulunduğunda koordinatlarını çıktı olarak elde etmede *findChessboardCorners()* fonksiyonu kullanılmaktadır.
- **İç ve dış parametrelerin hesaplanması:** Kalibrasyon deseni üzerinde bulunan köşelerin koordinatları kullanılarak kameraların iç ve dış parametrelerinin hesaplanmasında *stereoCalibrate()* fonksiyonu kullanılmaktadır.

5.4. Stereo Düzeltme

Stereo düzeltme adımında kalibrasyon sırasında elde edilen parametreler okunduktan sonra iki kamera görüntüsü düzeltilmiş ve satır hizalanmış hale getirilerek gösterilmektedir. Hizalanmanın kolay kontrol edilebilmesi amacıyla belli aralıklarla resimler üzerine düz çizgiler çizilmektedir. İlk açıldığındaki stereo düzeltme modülü ekran görüntüsü Şekil 5.12'de görülmektedir.

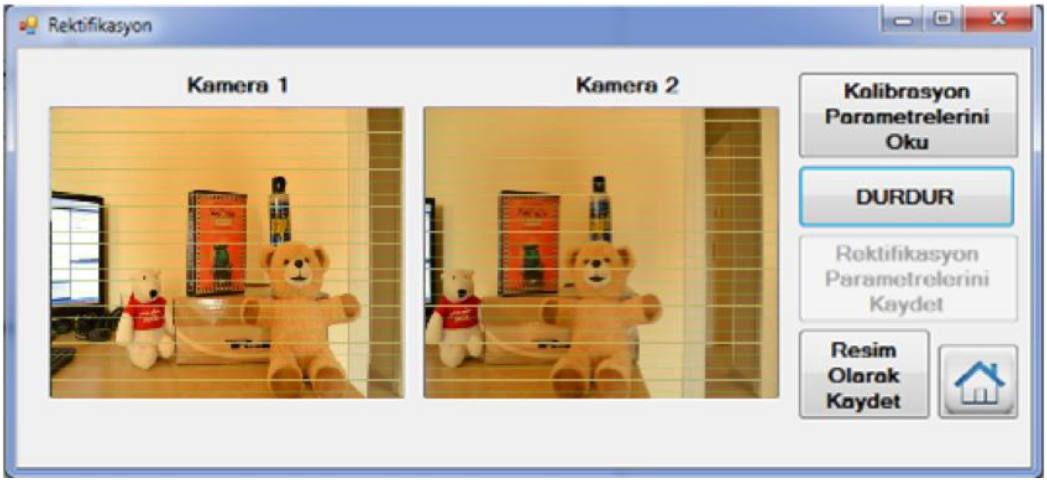


Şekil 5.12. Stereo düzeltme arayüzü

Kamera görüntüleri üzerinde stereo düzeltme işlemi başlatılarak, derinlik analizi ve 3-boyutlu modelleme yapılacak sahne yada nesnelerin görüntüleri bu modül aracılığıyla kaydedilir. Görüntüler kaydedilirken iki kamera görüntüsü gerçek zamanlı

olarak düzeltilmiş şekliyle ekranda gösterilmektedir. Birden fazla sayıda nesnenin görüntüsü bu sayede hızlı bir şekilde düzeltilmiş olarak kaydedilebilmektedir. Düzeltilmiş görüntülerinin bulunduğu modül arayüzü Şekil 5.13'de görülmektedir.

Stereo düzeltme sonucunda, derinlik analizinde kullanılacak olan Q yeniden yansıtma matrisi elde edilmekte olup, bu matris bir XML dosyasına kaydedilmektedir.

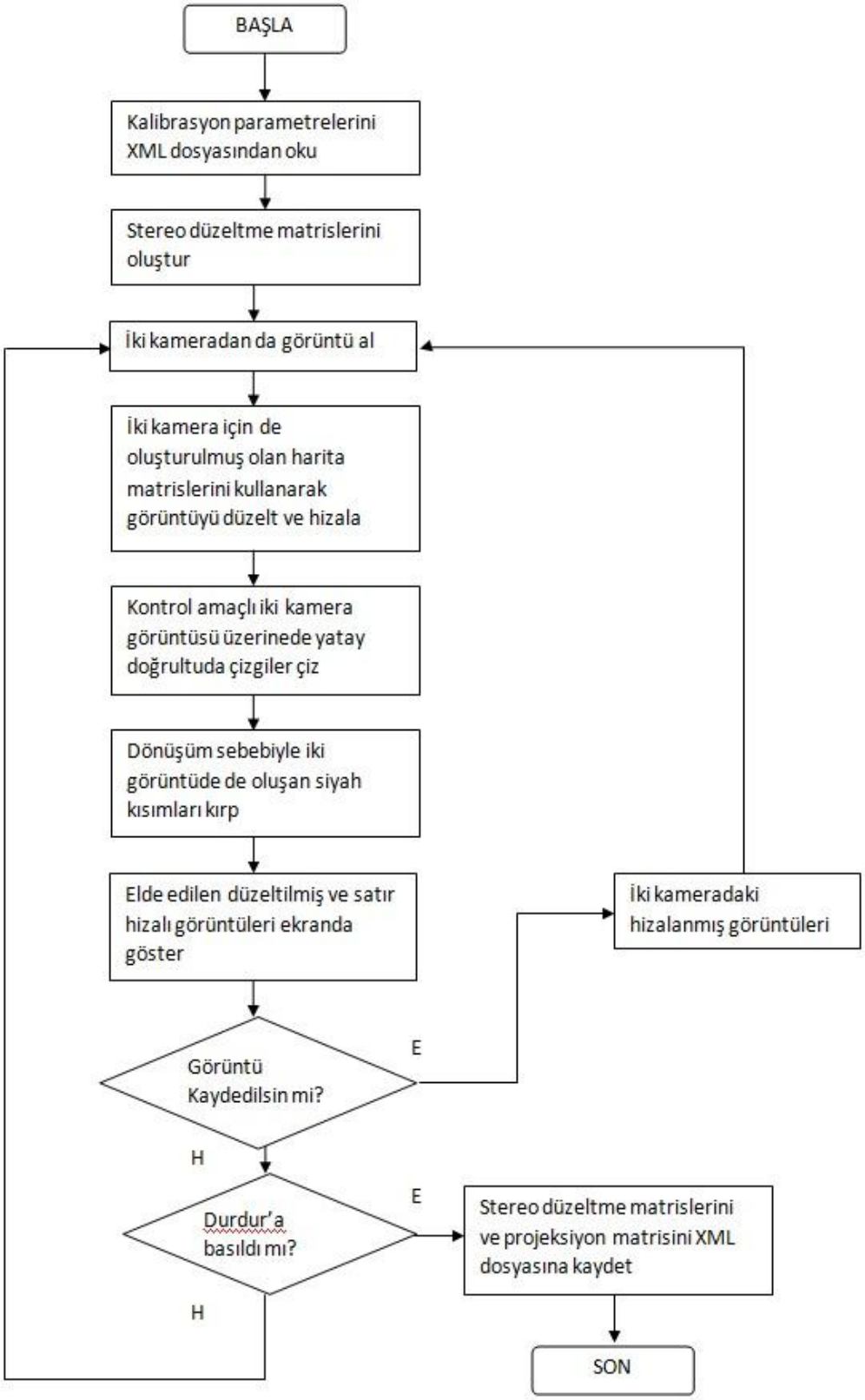


Şekil 5.13. Stereo düzeltme ile satır hizalanmış görüntüler

Stereo düzeltme işlemine ait kaba kod (pseudo code) Şekil 5.14'de, akış diyagramı Şekil 5.15'de görülmektedir.

```
1   Kalibrasyon parametrelerini XML dosyasından oku
2   Stereo düzeltme matrislerini oluştur
3   WHILE   istenilen kadar düzeltilmiş resim çifti kaydedilene kadar
4       İki kameradan görüntü al
5       İki kamera görüntüsünü de düzelt ve hizala
6       Kontrol amaçlı olarak görüntüler üzerine yatay çizgiler çiz
7       Görüntü kenarlarında düzeltme sonucunda oluşan siyah kısımları kırp
8       Elde edilen düzeltilmiş ve satır hizalı görüntüleri ekranda göster
9       IF   görüntü çifti kaydedilmek isteniyorsa   THEN
10          Görüntü çiftini kaydet
11      ENDIF
12  ENDWHILE
13  Stereo düzeltme matrislerini ve yeniden yansıtma matrisini kaydet
```

Şekil 5.14. Stereo düzeltme kaba kod gösterimi



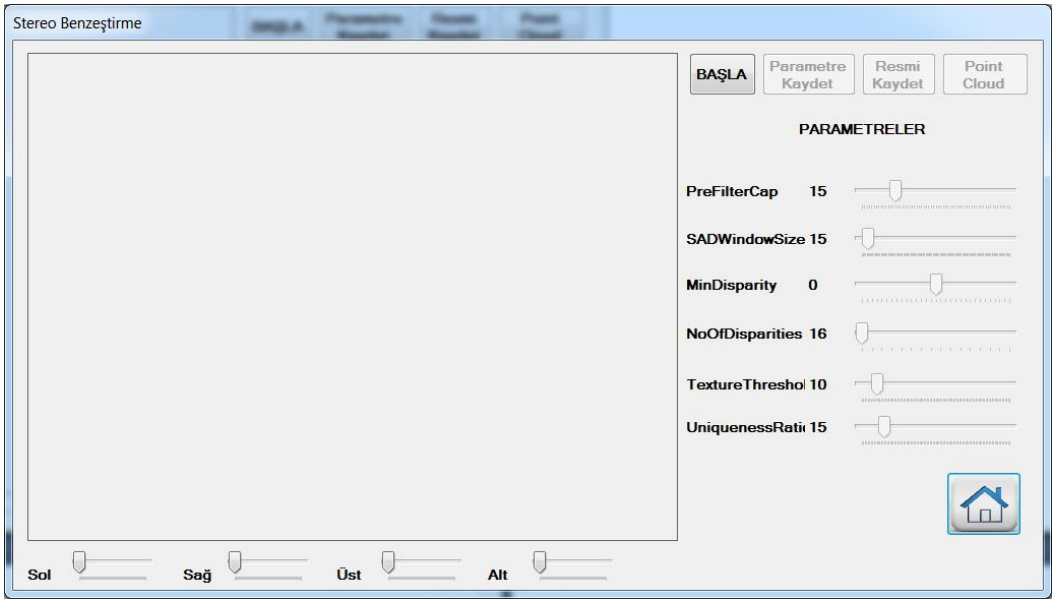
Şekil 5.15. Stereo düzeltme akış diyagramı

Stereo düzeltme işlemindeki önemli adımlar ve bu adımları gerçekleştirmede kullanılan OpenCV fonksiyonları ise şunlardır:

- **Stereo düzeltme işlemindeki kullanılacak matrislerin hesaplanması:** Görüntüler üzerinde bozukluk giderme ve hizalama işlemlerinin yapılabilmesi için her iki kamera için de harita matrisleri oluşturulmalıdır. Kalibrasyondan elde edilen iç ve dış parametreleri girdi olarak alıp, düzeltme matrislerini çıktı olarak elde etmek için *stereoRectify()*fonksiyonu kullanılmaktadır. Bu fonksiyon aynı zamanda derinlik bilgisini oluşturmakta kullandığımız yeniden yansıtma matrisini de çıktı olarak vermektedir.
- **Görüntülerin bozukluklarının giderilmesi ve hizalanması:** Her iki kamera için de harita matrisleri oluşturulduktan sonra bu matrisleri kullanarak iki kamera görüntüsünün bozukluklarını gidermede ve birbirlerine göre hizalı duruma getirmede *initUndistortRectifyMap()* fonksiyonu kullanılmaktadır.

5.5. Stereo Eşleştirme ve Yeniden Yansıtma

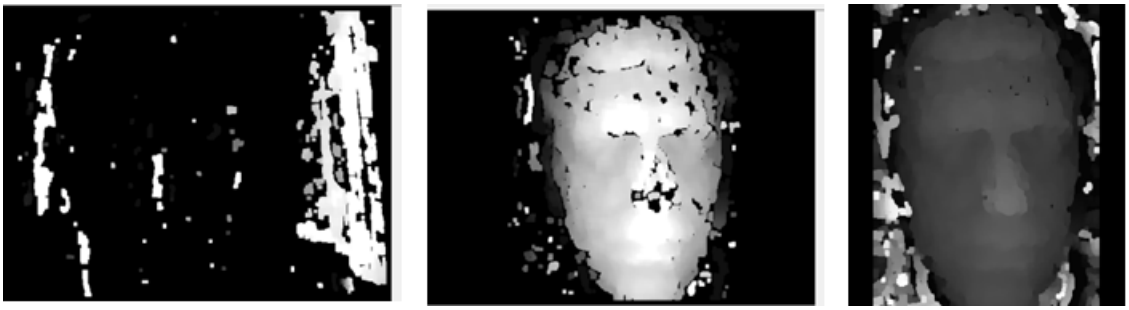
Stereo düzeltme modülü ile lens bozuklukları giderildikten ve iki kamera görüntüsü satır hizalı hale getirildikten sonra eşleştirme problemi artık tek boyutlu bir arama problemi haline gelmektedir. Stereo düzeltme adımında kaydedilmiş resimler için stereo eşleştirme modülü kullanılarak aykırılık haritaları oluşturulur, en iyi sonucu almak için parametre ayarları belirlendikten sonra da derinlik haritası oluşturulur. Stereo eşleştirme arayüzü açılışta Şekil 5.16'da olduğu gibi görülmektedir.



Şekil 5.16. Stereo eşleme arayüzü

Başla düğmesine basıldığında, stereo düzeltme adımında kaydedilmiş olan görüntülerden ilk kaydedilen sol ve sağ kamera görüntüleri üzerinde eşleştirme yapılmaktadır. Eşleştirme için SAD tabanlı blok eşleştirme algoritması kullanılmaktadır. Eşleştirme sonucunda oluşturulan aykırılık haritası görüntülendikten sonra, eşleştirme algoritması parametreleri değiştirilerek aykırılık haritası için en iyi sonucu veren parametreler bulunur. Şekil 5.17'de varsayılan parametre ayarlarıyla oluşturulmuş aykırılık haritası ve parametreler kullanılarak daha iyi sonuca ulaşılmış aykırılık haritası görülebilir. Şekilde de görüldüğü üzere, parametrelerin doğru ayarlanması blok eşleme algoritması başarımında oldukça etkilidir. Eşleştirmede kullanılan parametreler şunlardır:

- **PreFilterCap:** Resim pikselleri kırpma değeri
- **SADWindowSize:** Eşleştirme blok büyüklüğü. Tek sayı olmalıdır.
- **MinDisparity:** Kabul edilen en küçük aykırılık değeri
- **NumberOfDisparities:** Maksimum aykırılık değerinden minumum aykırılık değerinin çıkarılması ile oluşan aykırılık sayısı. 16'ya bölünebilir olmalıdır.
- **TextureThreshold:** Yeterli doku olmamasından kaynaklanan gürültüyü azaltmak kullanılan eşik değeridir.
- **UniquenessRatio:** Yüzdesel olarak en iyi eşleşme maliyeti ile ikinci en iyi eşleşme maliyeti arasındaki farkın oranına göre eşleşmenin doğruluğunu belirtir.



Şekil 5.17. Aykırılık haritasında aynı görüntü için farklı parametre sonuçları

En iyi sonucu veren parametreler seçildikten sonra parametreler kaydedildiğinde, modül bir sonraki açılışında kayıtlı parametreler ile açılmaktadır. İstendiği takdirde oluşturulan aykırılık haritası resim olarak kaydedilebilmektedir. Nokta bulutu oluşturma seçeneği aykırılık haritası kaydedildikten sonra aktif hale gelmekte olup, bu seçenek ile derinlik haritası nokta bulutu şeklinde oluşturularak PLY formatında kaydedilmektedir.

Aykırılık haritasından nokta bulutuna dönüştürme aşamasında, aykırılık haritasında bulunan gürültülerin nokta bulutuna aktarımını azaltmak amacıyla, sadece istenilen bölgenin nokta bulutuna çevrilmesini sağlayacak bir pencere uygulama üzerinde ayarlanabilmektedir. Aykırılık haritasının hemen altında bulunan sol, sağ, üst ve alt kaydırıcıları ile dikdörtgen şeklindeki bir alan seçilerek, sadece seçilen alanın derinlik haritasının oluşturulması sağlanmaktadır.

Nokta bulutuna doku da eklenmesi ve 3-boyutlu modellemenin gerçekleştirilmesi amacıyla noktaların derinlik bilgisi yanında, sol resimden alınan renk bilgisi de PLY dosyasına yazılmaktadır. Şekil 5.18'de uygulama ile oluşturulmuş olan bir PLY dosyasının içeriğinin bir kısmı görülmektedir.

```
ply
format ascii 1.0
element vertex 87072
property float x
property float y
property float z
property uchar red
property uchar green
property uchar blue
end_header
0.02206 0.8143 0.2696 134 134 126
0.02206 0.8125 0.2696 134 134 126
0.02206 0.8107 0.2696 134 134 126
0.02206 0.8088 0.2652 134 134 126
0.02206 0.807 0.2652 133 133 125
0.02206 0.8051 0.2652 131 131 123
0.02206 0.8033 0.2652 134 134 126
0.02206 0.8015 0.2652 132 132 124
0.02206 0.7996 0.2696 122 121 116
0.02206 0.7978 0.2696 115 114 109
0.02206 0.796 0.2696 112 111 106
0.02206 0.7941 0.2696 91 90 86
0.02206 0.7923 0.2696 67 68 63
0.02206 0.7904 0.2696 48 47 43
```

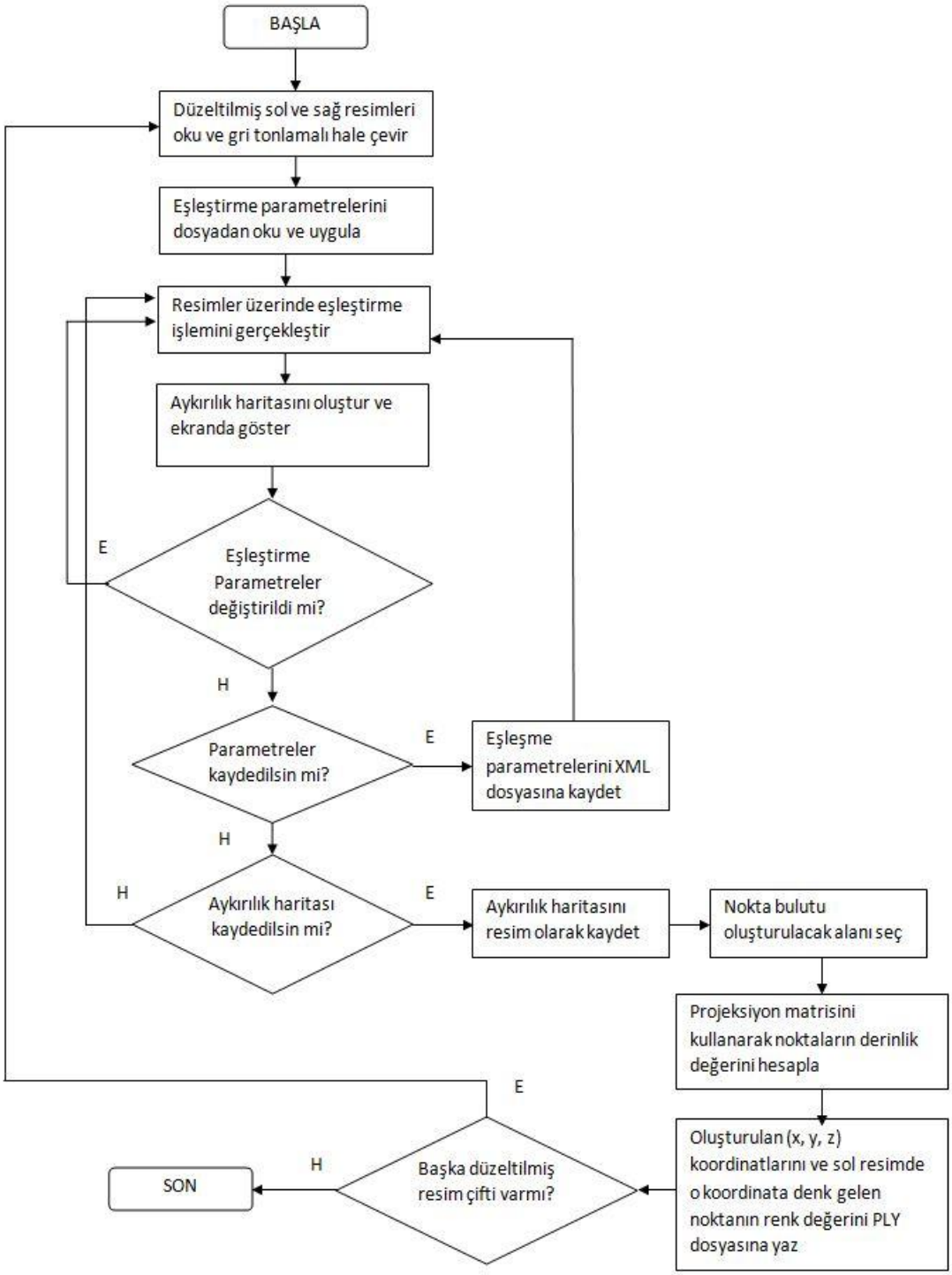
Şekil 5.18. Oluşturulan bir PLY dosyası içeriği

PLY dosya biçimi ilk olarak nokta bulutu hakkında bilgi veren bir başlık bilgisi ile başlamaktadır. Başlık bilgisinden sonra noktaların x, y ve z eksenindeki koordinat bilgileri ile düzeltilmiş sol kamera resminden alınan RGB renk değerleri aynı satır içinde boşluk karakteri ile ayrılmış şekilde bulunmaktadır. Her noktanın bilgileri ayrı bir satırda olacak şekilde dosya tüm noktaların bilgileri yazıldıktan sonra dosya sonlandırılmaktadır.

Nokta bulutu kaydedildikten sonra, uygulama eğer düzeltme adımında kaydedilmiş başka resimler varsa sırasıyla o resimlerle işlem yapmaya devam etmektedir. Stereo eşleştirme ve yeniden yansıtma işlemine ait kaba kod (pseudo code) gösterimi Şekil 5.19'da, akış diyagramı ise Şekil 5.20'de görülmektedir.

```
1   WHILE   Düzeltme adımında kaydedilmiş tüm resimler işlenene kadar
2       Düzeltilmiş resimleri oku ve gri tonlamalı hale getir
3       Eşleştirme parametrelerini XML dosyasından oku
4       WHILE   Eşleştirme sonucu kaydedilene kadar
5           Resimler üzerinde eşleştirme işlemi gerçekleştir
6           Aykırılık haritası oluştur ve göster
7           IF  parametreler değiştirildi  THEN
8               SET yeni parametreler
9           ENDIF
10          IF  aykırılık haritası kaydedilmek isteniyorsa  THEN
11              Aykırılık haritası kaydet
12          ENDIF
13      ENDWHILE
14      Noktaların derinlik değerini hesapla
15      (x, y, z) değerleri ile renk değerlerini birleştirerek PLY dosyasına yaz
16  ENDWHILE
```

Şekil 5.19. Stereo eşleştirme ve yeniden yansıtma kaba kod gösterimi



Şekil 5.20. Stereo eşleştirme ve yeniden yansıtma akış diyagramı

Stereo eşleştirme ve yeniden yansıtma işlemlerindeki önemli adımlar ve bu adımları gerçekleştirmede kullanılan OpenCV fonksiyonları ise şunlardır:

- **Stereo eşleştirmenin gerçekleştirilmesi:** kameralardan alınarak, bozukluklukları giderilmiş ve hizalanmış ve daha sonra kaydedilmiş olan resimler kullanılarak stereo eşleştirme işlemi gerçekleştirilirken SAD tabanlı bir blok eşleme algoritması kullanılmıştır. Blok eşleme parametreleri belirlendikten sonra *cvFindStereoCorrespondenceBM()* fonksiyonu ile eşleştirme yapılmakta ve fonksiyon çıktısı olarak aykırılık haritası elde edilmektedir.
- **Derinlik haritasının elde edilmesi:** Yeniden yansıtma işlemi olarak da adlandırılan derinlik haritasının elde edilmesi için, aykırılık haritası ve yeniden yansıtma matrisini girdi olarak alan ve tüm (x,y) noktaları için z derinlik değerini de hesaplayarak (x,y,z) şeklindeki bir derinlik haritasını çıktı olarak veren cvReprojectImageTo3D() fonksiyonu kullanılmıştır. PLY dosyasına yazılırken sol resimden renk bilgisi ayrıca alınarak, fonksiyonun çıktısı ile birleştirilmektedir.

Oluşturulan PLY dosyası ücretsiz bir uygulama olan Meshlab ile görüntülenebilmektedir. Şekil 5.21'de oluşturulan 3-boyutlu nokta bulutu görülmektedir.



Şekil 5.21. Oluşturulan bir 3-boyutlu nokta bulutu örneği

5.6. Nokta Bulutunun Filtrelenmesi

Oluşturulan nokta bulutunda gürültü ve istenmeyen alanlar bulunabilir. Şekil 5.21'de de 3-boyutlu yüz modelinin dışında farklı alanlarda bulunan noktaların varlığı görülmektedir. İstenmeyen bu alanlardan kurtulmak için ilk olarak derinlik haritası üzerinde nokta bulutuna çevrilmek istenen alan seçilerek, istenmeyen uzak bölgelerin oluşturduğu gürültünün bir kısmının engellenmesi mümkündür. Kalan gürültü ve ayrık noktalar için ise nokta bulutu filtreleme yöntemleri ardı ardına kullanılarak gürültülerin azaltılması sağlanmaktadır.

Nokta bulutları üzerinde işlem yaparken bu amaçla geliştirilmekte olan, BSD lisansı ile açık kaynak kodlu olarak dağıtılan PCL (The Point Cloud Library) kütüphanesinden yararlanılmıştır. Uygulama yazılımından elde edilen nokta bulutuna üç farklı filtre uygulanarak iyileştirme işlemi yapılmıştır.

Python programlama dili için kısıtlı bir kullanım olanağı olmakla birlikte, PCL'i tüm fonksiyonlarıyla kullanabilmek için C++ programlama dilini kullanmak gerekmektedir. Belli fonksiyonlar adapte edilmiş olsa da, güncel Python-pcl 1.0 sürümü ile sadece XYZ tipindeki nokta bulutları üzerinde işlem yapılabilmektedir [62].

5.6.1. Düzgeçiş Filtreleme

Düzgeçiş filtrelemenin PCL'de gerçekleştirilmesi Şekil 5.22'de görülmektedir. Şekilde görüldüğü üzere, filtre çeşidi ve nokta bulutunun türü belirtildikten sonra üzerinde işlem yapılacak nokta bulutu belirlenmiştir. Filtre uygulanacak koordinat *z* olarak belirlendikten sonra, geçerli kabul edilecek olan noktaların limit değerleri belirlenmiş ve filtre uygulanarak başka bir nokta bulutu çıktı olarak alınmıştır.

```
pcl::PassThrough<pcl::PointXYZRGB> pass;
pass.setInputCloud (cloud);
pass.setFilterFieldName ("z");
pass.setFilterLimits (0.0, 1.0);
pass.filter (*cloud_filtered);
```

Şekil 5.22. PCL'de düzgeçiş filtreleme

5.6.2. İstatistiksel Ayrık Noktalar Çıkarımı Filtrelemesi

İstatistiksel ayrık noktalar çıkarımı filtrelemesinin PCL'de gerçekleştirilmesi Şekil 5.23'de görülmektedir. Şekilde görüldüğü üzere filtre çeşidi ve nokta bulutunun türü belirtildikten sonra üzerinde işlem yapılacak nokta bulutu belirlenmiştir. Her nokta için incelenecek komşu sayısı belirlendikten sonra, standart sapma çarpanı da belirlenmiştir. Örneğe göre ortalama uzaklığın 0,8 standart sapması kadar uzakta olan noktalar ayrık noktalar olarak belirlenip nokta bulutundan çıkarılmaktadır. Son olarak filtre uygulanarak başka bir nokta bulutu çıktı olarak alınmıştır.

```
pcl::StatisticalOutlierRemoval<pcl::PointXYZRGB> sor;
sor.setInputCloud (cloud);
sor.setMeanK (20);
sor.setStddevMulThresh (0.8);
sor.filter (*cloud_filtered);
```

Şekil 5.23. PCL'de istatistiksel ayrık noktalar çıkarımı filtrelemesi

5.6.3. Yarıçapa Göre Ayrık Noktalar Çıkarımı Filtrelemesi

Yarıçapa göre ayrık noktalar çıkarımı filtrelemesinin PCL'de gerçekleştirilmesi Şekil 5.24'de görülmektedir. Şekilde görüldüğü üzere filtre çeşidi ve nokta bulutunun türü belirtildikten sonra üzerinde işlem yapılacak nokta bulutu belirlenmiştir. Her nokta için arama yapılacak uzaklık yarıçapı belirlendikten sonra, noktanın bulut içinde kalabilmesi için bu yarıçap içinde sahip olması gereken komşu sayısı belirlenmiştir. Son olarak filtre uygulanarak başka bir nokta bulutu çıktı olarak alınmıştır.

```
pcl::RadiusOutlierRemoval<pcl::PointXYZRGB> outrem;
outrem.setInputCloud(cloud);
outrem.setRadiusSearch(0.05);
outrem.setMinNeighborsInRadius (80);
outrem.filter (*cloud_filtered);
```

Şekil 5.24. PCL'de yarıçapa göre ayrık noktalar çıkarımı filtrelemesi

BÖLÜM 6

DENEYSEL SONUÇLAR

Bu bölümde uygulamada elde edilen sonuçlar paylaşılmıştır. İlk olarak kamera görüntülerinde ki bozuklukların giderilmesi ve kameraların geometrik ilişkilerinin belirlenmesi işlemlerini içeren stereo kalibrasyon ve stereo düzeltme sonuçları paylaşılmıştır.

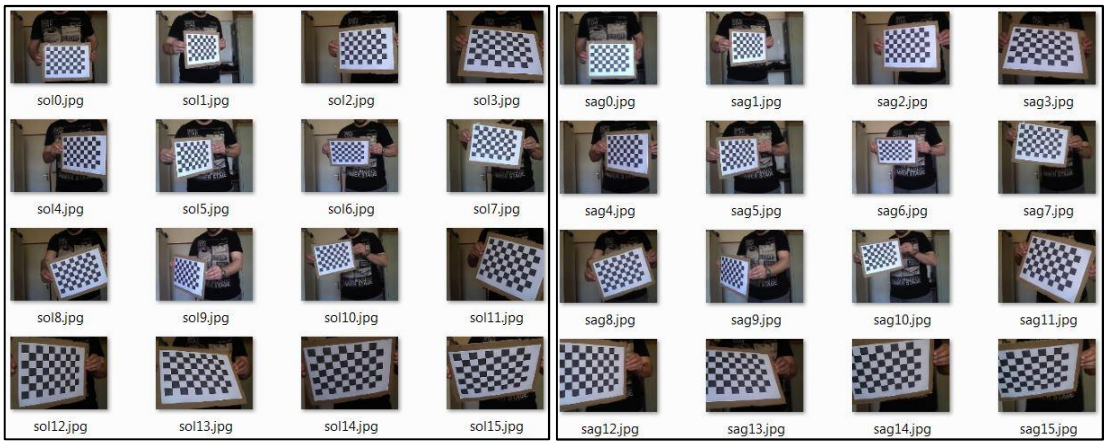
Stereo düzeltmenin başarılı bir şekilde gerçekleştiği görüldükten sonra, derinlik haritası oluşturmada en önemli adım olan stereo eşleştirme için OpenCV kütüphanesinde bulunan stereo eşleştirme algoritmaları resim çiftleri üzerinde denenerek kullanılacak eşleştirme algoritması seçilmiştir.

Eşleştirme algoritmasının seçimi sonrasında, düzeltilmiş resim çiftleri kullanılarak aykırılık haritası oluşturulmuş ve harita üzerinde farklı eşleme parametrelerinin etkisi test edilmiştir. En iyi sonucu veren parametrelerin belirlenmesi sonrasında derinlik haritası 3-boyutlu bir nokta bulutu olarak kaydedilmiştir.

Nokta bulutundaki gürültü ve ayrık noktaların çıkarılması için filtreleme işlemi yapılmıştır. Filtreleme işlemi modele ait noktaları da nokta bulutundan çıkarabildiğinden, yanlış filtrelenen noktalar hesaplanarak, filtreleme sonrası sistemin başarısı ölçülmüştür.

6.1. Stereo Kalibrasyon ve Stereo Düzeltme Sonuçları

Kalibrasyon nesnesi olarak bir satranç tahtasının kullanıldığı kalibrasyon işlemi gerçek zamanlı olarak yapılmıştır. İki kameradan da satranç tahtasının iç köşelerinin görünür durumda olduğu 16 görüntü alınmış ve kaydedilmiştir. Şekil 6.1'de bir kalibrasyon işlemi sonucu kaydedilmiş olan görüntüler görülmektedir.



Şekil 6.1. Kalibrasyonda kullanılan sol ve sağ kameradan alınan görüntüler

Resimler üzerindeki köşe noktaları bilgileri kullanılarak kameraların iç ve dış parametreleri hesaplandıktan sonra, bozuklukları giderilerek, satır hizalı görüntüler elde edilmektedir. İki kamera için düzeltilen görüntüler gerçek zamanlı olarak ekrana getirilirken, istenilen görüntüler daha sonra derinlik haritası çıkarılmak üzere kaydedilmektedir. Şekil 6.2'de uygulama tarafından düzeltilmiş ve kaydedilmiş resim çiftleri görülmektedir. Resim çiftleri üzerine kontrolü kolaylaştırmak amacıyla yeşil çizgiler çizilmiş olup, çizilen çizgiler iki resim üzerinde de aynı noktaların üzerinden geçmektedir.



Şekil 6.2. Sırasıyla sağ ve sol kameralardan alınan düzeltilmiş resim çiftleri

6.2. Farklı Stereo Eşleştirme Algoritmaları Sonuçlarının Karşılaştırılması

OpenCV'de stereo eşleştirme yapabilmek için tanımlanmış dört farklı algoritma bulunmaktadır:

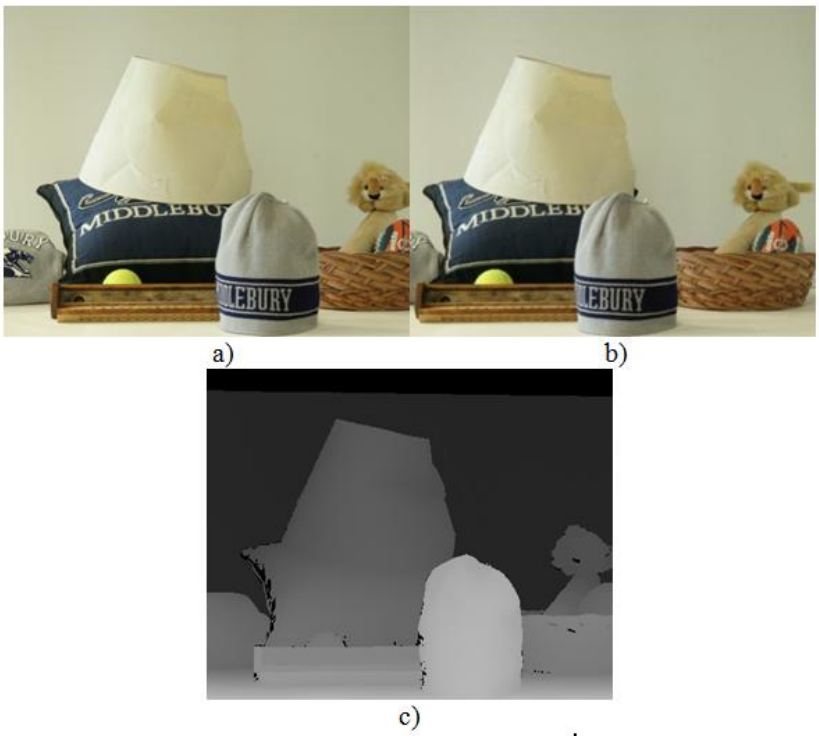
- **Blok Eşleme Algoritması:** SAD tabanlı bir blok eşleme algoritmasıdır. *FindStereoCorrespondenceBM()* fonksiyonu çağrılarak kullanılır. Parametrelerin ayrıca belirtilmesi gerekmekte olup, parametrelerin eşleştirme sonuçlarına büyük etkisi bulunmaktadır.
- **Çizge Kesme Algoritması:** Stereo eşleme problemini global kısıtları kapsayacak şekilde çözmek için kullanılmaktadır. Algoritmanın amacı enerji minimizasyonunu sağlamaktır. Eşleme problemi için minimizasyon özel bir çizgedeki optimum kesmeyi bularak elde edilir [55]. *FindStereoCorrespondenceGC()* fonksiyonu çağrılarak kullanılır.
- **Yarı-Global Blok Eşleme Algoritması:** Bu algoritma H. Hirschmüller tarafından tanımlanmış olan yarı global eşleme algoritması temel alınarak geliştirilmiştir [63]. Blok eşleme algoritmasında ki bazı iyileştirme işlemleri

algoritmaya dahil edilmiştir. *StereoSGBM()* sınıfının gerekli metodu çağrılarak kullanılır. Blok eşleme algoritması gibi parametrelerin belirtilmesi gereklidir.

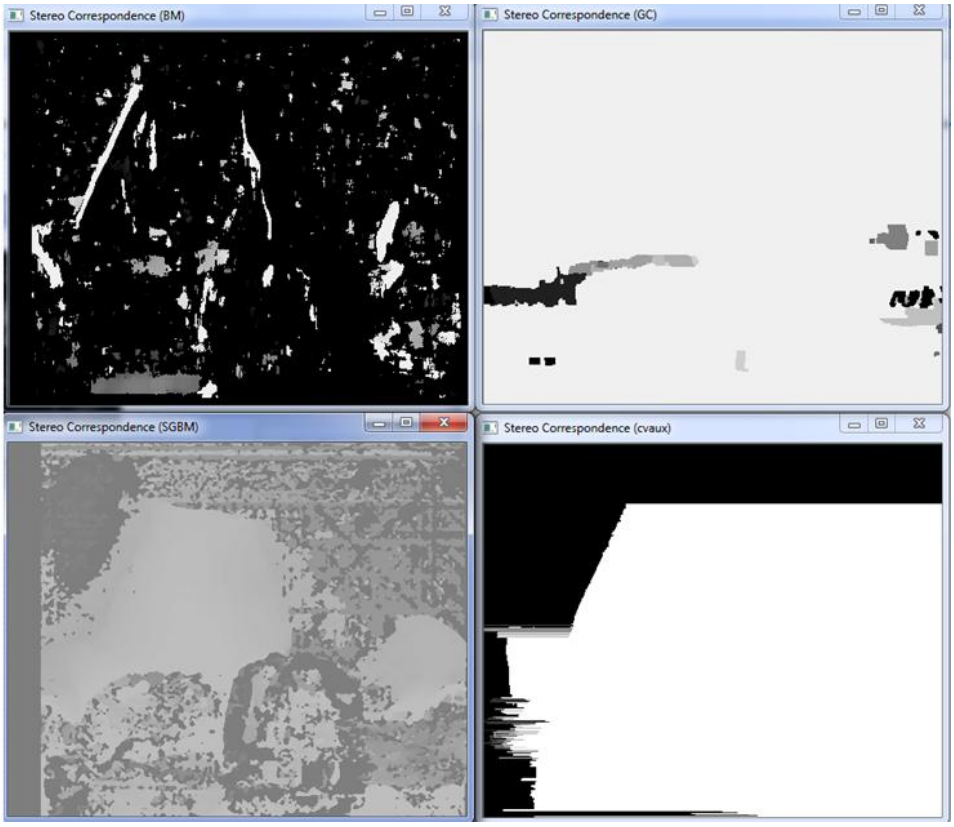
- **Birchfield Algoritması:** Stan Birchfield ve Carlo Tomasi tarafından 1998 yılında ortaya atılmış olan olan stereo eşleme algoritmasıdır. *FindStereoCorrespondence()*fonksiyonu ile çağrılarak kullanılır.

Stereo eşleştirme algoritmaları öncelikle Tsukuba ve Middlebury veri setleri üzerinde, daha sonra ise uygulama tarafından elde edilmiş olan düzeltilmiş resim çiftleri üzerinde denenmiştir. Derinlik kestirimi sonuçları yanında algoritmaların performansı ölçülerek saniye bazında çalışma maliyetleri hesaplanmıştır.

Şekil 6.3'de Middlebury 2006 veri setinden Midd2 stereo çifti ve referans aykırılık haritası görülmektedir [64]. Şekil 6.4'de ise stereo çifti üzerinde çalıştırılan algoritmaların aykırılık haritası sonuçları görülmektedir.

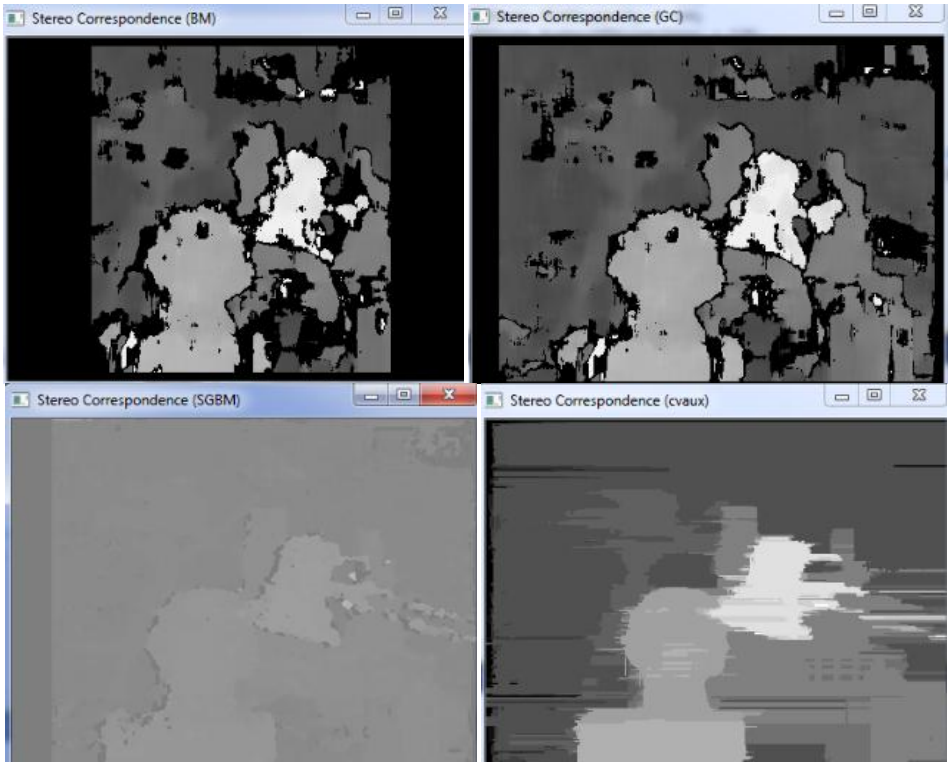


Şekil 6.3. Middlebury Midd2 stereo çifti a) sol resim b) sağ resim c) referans aykırılık haritası



Şekil 6.4. Midd2 aykırılık haritası sonuçları : blok eşleme(sol üst), çizge kesme(sağ üst), yarı-global(sol alt), birchfield(sağ alt)

Daha önce Şekil 3.5'de verilen Tsukuba stereo çifti için elde edilen sonuçlar Şekil 6.5'de görülmektedir.

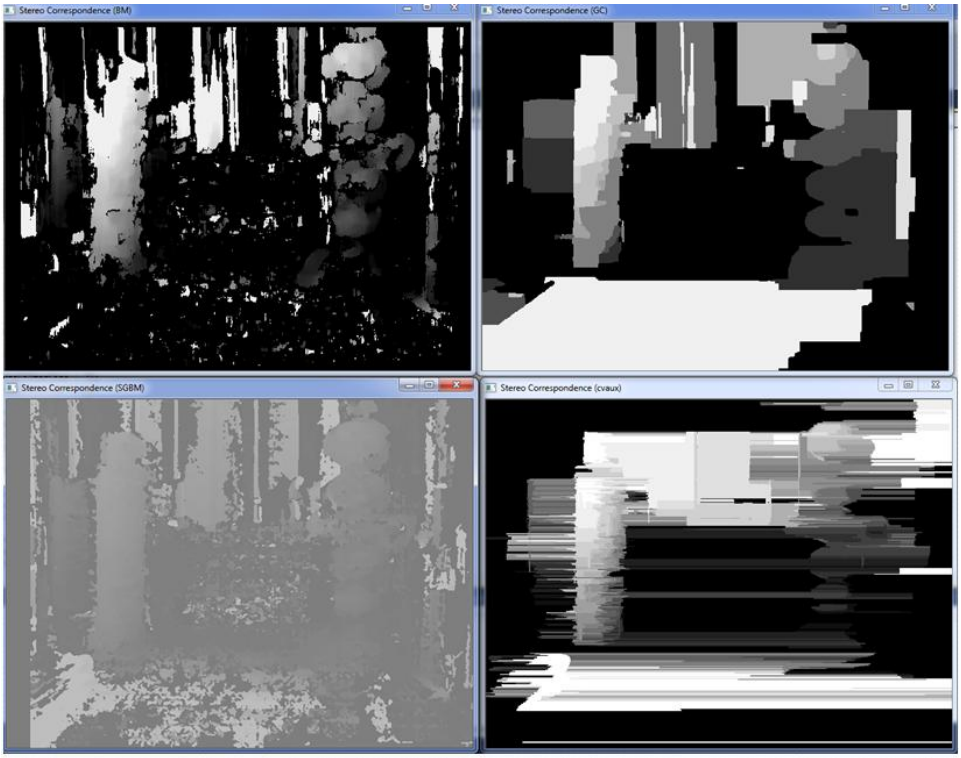


Şekil 6.5. Tsukuba aykırılık haritaları : blok eşleme (sol üst), çizge kesme (sağ üst), yarı-global (sol alt), birchfield (sağ alt)

Şekil 6.6'da geliştirilmiş uygulamadan alınan düzeltilmiş stereo çifti ve Şekil 6.7'de ise algoritmaların kullanılmasıyla elde edilen aykırılık haritaları görülmektedir.



Şekil 6.6. Uygulama stereo çifti



Şekil 6.7. Uygulama stereo çifti aykırılık haritaları: blok eşleme (sol üst), çizge kesme (sağ üst), yarı-global (sol alt), birchfield (sağ alt)

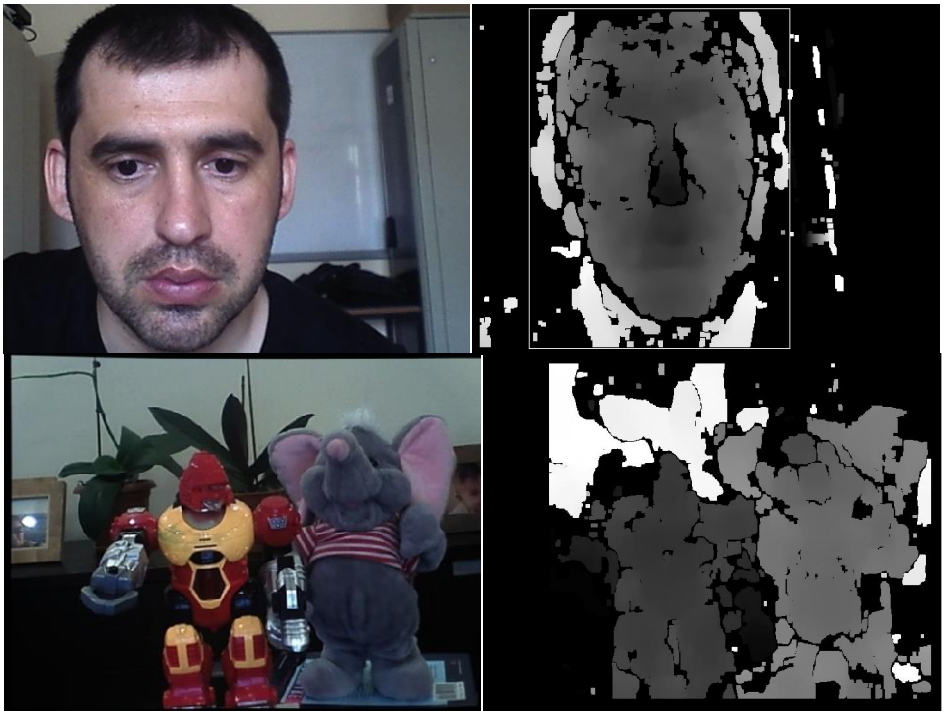
Üç farklı veri seti üzerinde çalıştırılan algoritmalar için algoritma karmaşıklığı hesaplandığında, N resimdeki piksel sayısı ve D aykırılık araması yapılan alan piksel sayısı olmak üzere, blok eşleme için O (ND), çizge kesme için O ($N^2D^2\log(ND)$), yarı-global blok eşleme için O (ND), Birchfield için O (NDlog(D)) bulunmaktadır [63, 65]. Bu algoritmalar farklı resim çiftleri üzerinde çalıştırıldığında gerçekleşen çalışma zamanı maliyetleri ise Tablo 6.1'de gösterilmektedir.

Tablo 6.1. Eşleştirme algoritmalarının karşılaştırması

Eşleştirme Algoritmaları	Blok Eşleme	Çizge Kesme	Yarı-Global Blok Eşleme	Birchfield
Algoritma Karmaşıklığı	O (ND)	O ($N^2D^2\log(ND)$)	O (ND)	O (NDlog(D))
Kaynak	Çalışma maliyetleri (saniye)			
Tsukuba	0.031	6.321	0.244	0.227
Middlebury	0.031	9.937	0.241	0.173
Uygulama	0.033	30.534	0.242	0.186

6.3. Stereo Eşleştirme Sonuçları

Sekil 6.2'de gösterilmiş olan düzeltilmiş resimler üzerinde blok eşleme algoritması uygulanması ve en iyi sonuç veren parametrelerin seçilmesi ile Şekil 6.8'de görülmekte olan sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 6.8. Uygulamada elde edilen aykırılık haritası sonuçları: sağ kamera görüntüsü (sol), aykırılık haritası (sağ)

6.4. Yeniden Yansıtma Sonuçları

Aykırılık haritalarında yeniden yansıtma işleminin uygulanması sonucunda elde edilen 3-boyutlu nokta bulutlarının iki farklı açıdan görüntüsü Şekil 6.9'da görülmektedir.

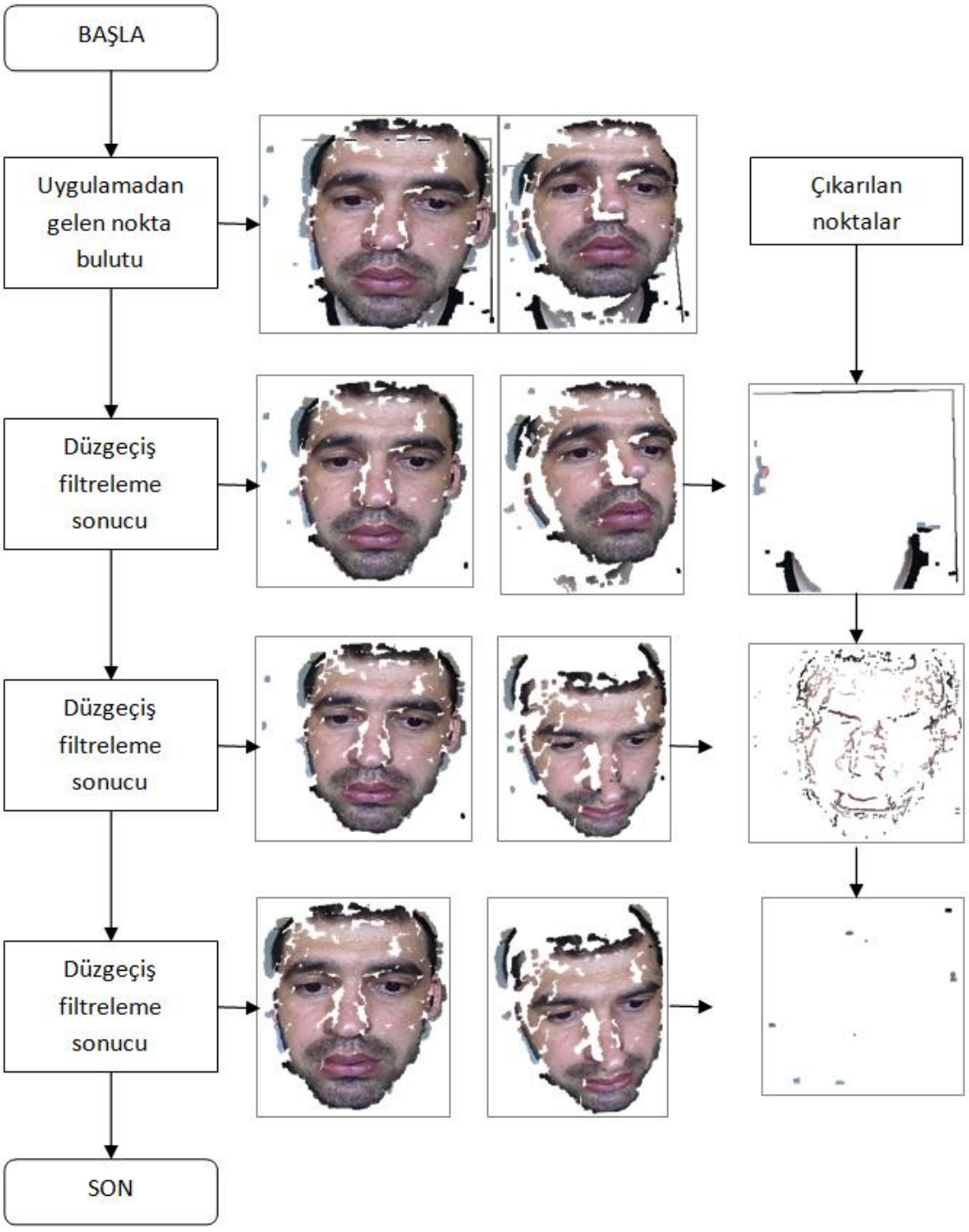


Şekil 6.9. Oluşturulan nokta bulutları

6.5. Nokta Bulutlarında Filtreleme Sonuçları

Nokta bulutlarında oluşan gürültü ve ayrık noktaların çıkarılması için üç farklı filtreleme algoritması kullanılmıştır. Üç filtreleme algoritmasının aynı nokta bulutu üzerinde çalıştırılması sonucunda, uygun parametreler kullanılması ile birlikte gürültü ve ayrık noktalar nokta bulutundan temizlenebilmektedir.

Şekil 6.9'daki ilk sahne için elde edilen filtreleme sonuçları ve çıkarılan noktaların görüntüsü Şekil 6.10'da görülmektedir.



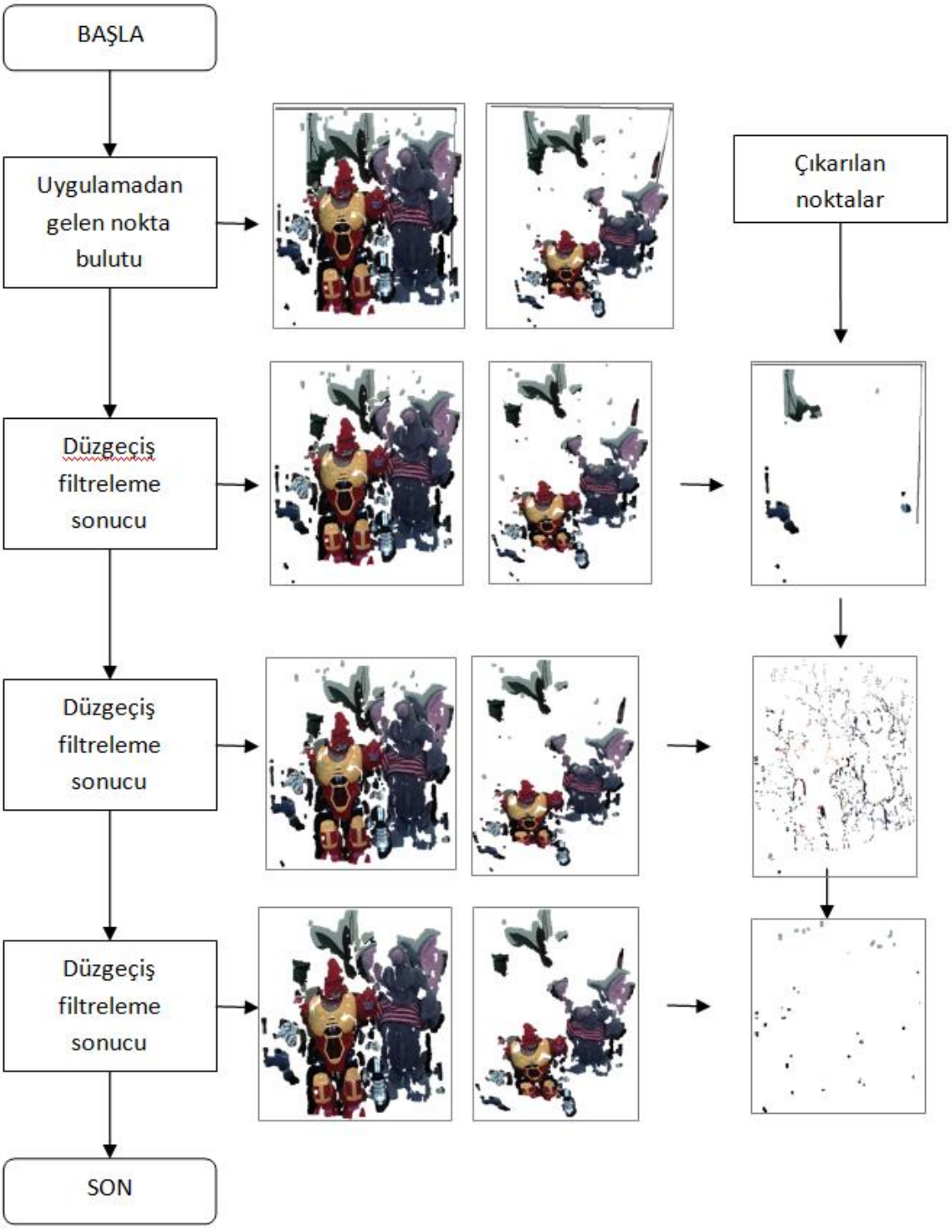
Şekil 6.10. Nokta bulutu filtreleme sonuçları

Tablo 6.2'de her filtreleme sonucunda elde edilen nokta bulutunun sahip olduğu nokta sayısı ile filtreleme sonucu çıkarılan nokta sayısı ve saniye bazında filtreleme çalışma maliyetleri görülmektedir.

Tablo 6.2. Filtreleme sonucu oluşan nokta sayıları ve filtreleme maliyetleri (sn)

Filtreleme türü	**Parametre değerleri**	**Nokta bulutundaki nokta sayısı**	**Çıkarılan nokta sayısı**	**Dosya okuma maliyeti**	**Filtre çalışma maliyeti**	**Dosya kayıt maliyeti**
Nokta bulutu ilk hali	-	78425	-	-	-	-
Düzgeçiş	FL (Filtre Limiti): (0.02, 1.0)	71498	6927	13.23	0.22	9.46
İstatiksel ayrık noktalar çıkarımı	KS (Komşu sayısı): 40 SSÇ (Standart sapma çarpanı): 1.8	68695	2803	12.78	26.10	9.03
Yarıçapa göre ayrık noktalar çıkarımı	AY (Arama yarıçapı): 0.05 MKS (Minimum komşu sayısı): 80	68388	307	12.29	51.73	8.48

Şekil 6.9'daki ikinci sahne için elde edilen filtreleme sonuçları ve çıkarılan noktaların görüntüsü Şekil 6.11'de görülmektedir.



Şekil 6.11. Nokta bulutu filtreleme sonuçları

Tablo 6.3'de her filtreleme sonucunda elde edilen nokta bulutunun sahip olduğu nokta sayısı ile filtreleme sonucu çıkarılan nokta sayısı ve saniye bazında filtreleme çalışma maliyetleri görülmektedir.

Tablo 6.3. Filtreleme sonucu oluşan nokta sayıları ve filtreleme maliyetleri (sn)

Filtreleme türü	**Parametre değerleri**	**Nokta bulutundaki nokta sayısı**	**Çıkarılan nokta sayısı**	**Dosya okuma maliyeti**	**Filtre çalışma maliyeti**	**Dosya kayıt maliyeti**
Nokta bulutu ilk hali	-	151633	-	-	-	-
Düzgeçiş	FL (Filtre Limiti): (0.16, 0.99)	140763	13776	25.44	0.40	18.48
İstatiksel ayrık noktalar çıkarımı	KS (Komşu sayısı): 30 SSÇ (Standart sapma çarpanı): 1.5	135981	4782	25.39	34.27	18.35
Yarıçapa göre ayrık noktalar çıkarımı	AY (Arama yarıçapı): 0.03 MKS (Minimum komşu sayısı): 120	134650	1331	24.64	112.56	17.16

Şekil 6.9'daki ilk sahne üzerinde farklı eşleştirme parametreleri uygulandığında, modeldeki eksik dokudan kaynaklanan sorunlar düzeltilebilmekte, ancak bununla paralel olarak gürültü ve ayrık nokta sayısının da arttığı görülmektedir. Gürültü ve ayrık noktaların fazla olduğu durumlarda, en iyi sonucu elde edebilmek için, filtrelemenin birden kez tekrarlanması da gerekebilir. Şekil 6.12'de farklı parametreler ile oluşturulmuş nokta bulutu ve filtreleme sonucu görülmektedir.

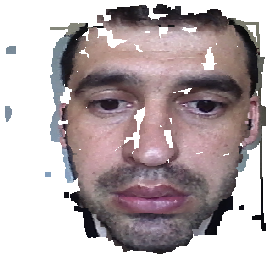
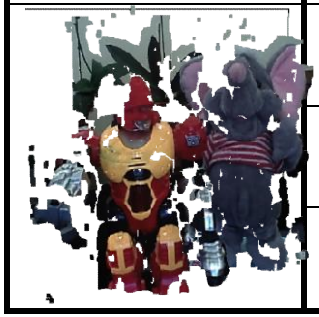


Şekil 6.12. Aynı sahnenin farklı eşleştirme parametreleriyle elde edilen nokta bulutu (üst) ve filtreleme sonucu (alt)

Gürültü ve ayrık noktaların temizlenmesinde, parametrelerin doğru seçilmesi büyük önem taşımaktadır. En iyi sonucu alabilmek için, farklı parametrelerin sonuçlarının model üzerinde incelenmesi gerekmektedir. Farklı parametrelerin farklı modeller üzerinde uygulanması sonucunda, atılan noktaların ne kadarının ayrık noktalara, ne kadarının ise modele ait olduğu Tablo 6.4'de görülmektedir.

Tabloda görüldüğü üzere uygulanan filtreler sonucunda, sadece gürültü ve ayrık noktalar değil, filtre şartlarını sağlamakta olan modellenecek nesneye ait noktalar da dışarı atabilmektedir. Filtreleme sonrası nokta bulutunu oluşturan noktaların, modelde olması gereken noktalara oranı ise sistemin başarı yüzdesini vermektedir. Bu sonuçlar incelendiğinde sistemin başarı yüzdesinin yüksek olduğu görülmektedir.

Tablo 6.4. Sistem başarım sonuçları

Filtresiz model	Filtreleme parametreleri	Modeldeki toplam nokta sayısı	Filtrelenen nokta sayısı	Doğru filtrelenen nokta sayısı / yüzdesi	Yanlış filtrelenen nokta sayısı / yüzdesi	Sistemin Başarımı	Filtre uygulanmış model
	FL: z (0.02, 1.0) KS : 40 SSÇ : 1.8 AY : 0.05 MKS : 80	78425	11798	9656 / % 81,84	2142 / % 18,16	% 96,89	
	FL: y (0.22,0.71) - z (0.5,0.96) KS : 30 SSÇ : 1.5 AY : 0.04 MKS : 150	114654	34664	32353 / % 93,33	2311 / % 6,67	% 97,19	
	FL: z (0.16, 0.99) KS : 30 SSÇ : 1.5 AY : 0.03 MKS : 120	151633	16893	12918 / % 76,06	4065 / % 23,94	% 97,07	

BÖLÜM 7

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında stereo görüş yöntemi kullanılarak, bir 3-boyutlu görme sistemi geliştirilmiştir. Geliştirilen uygulama gerçek dünyadaki sahnelerin derinlik analizinde ve nesnelerin 3-boyutlu modellenmesinde kullanılabilmektedir.

Stereo görüş uygulamasında gerçekleştirilen ilk adım olan stereo kalibrasyonda, kolay ulaşılabilen ve başarılı sonuçlar veren satranç tahtası nesnesi kullanılmıştır. Kalibrasyon işlemini gerçekleştirmek için gerekli olan, iki kamera için de bir kalibrasyon nesnesinin görüntülerini içeren görüntüler gerçek zamanlı olarak elde edilmektedir. Kalibrasyon işlemi başlatıldıktan sonra programa müdahale edilmesi gerekmemektedir. Tek kişi tarafından kolaylıkla kalibrasyon işlemi tamamlanabilmektedir. Kalibrasyon sonucu elde edilen, iç ve dış parametrelerin kaydedilerek daha sonra tekrar kullanılabilir olması sonucunda, geliştirilen sistem farklı nesnelerin modelleme işlemine çok hızlı bir şekilde geçebilmektedir. Kameraların geometrik yerleşimlerinde bir değişiklik olmadıkça kalibrasyon gerekmediğinden, sistem ayar gerektirmeden uzun bir süre boyunca kullanılabilmekte ve sonuçlar hızlı bir şekilde elde edilebilmektedir.

Stereo düzeltme adımı sonucunda, stereo kameraların görüntülerindeki bozukluklar giderilmekte ve iki kamera görüntüsü satır hizalı hale getirilmektedir. Böylece stereo eşleştirme adımı 1-boyutlu bir arama işlemine dönüşmektedir. Uygulama üzerinde stereo düzeltme işleminin sonucunda elde edilen düzeltilmiş kamera görüntüleri yine gerçek zamanlı olarak gösterilmektedir. Bu gösterim sırasında derinlik analizi yapılacak sahne ya da nesnelerin görüntüleri hızlı bir şekilde kaydedilerek, bir sonraki sahne ya da nesneye hızlıca geçiş yapılabilmektedir.

Stereo eşleştirme için kullanabilecek çok farklı algoritmalar bulunmaktadır. Kullanılan kütüphanede tanımlanmış olan tüm yerel ve global eşleştirme algoritmaları bu çalışma süresince farklı sahnelere uygulanmış ve sonuçları karşılaştırılmıştır. Algoritmalar stereo eşleştirmede sıklıkla kullanılan hazır stereo çiftleri üzerinde

çalıştırıldığı gibi, geliştirilen stereo görüş sistemi kullanılarak elde edilen düzeltilmiş resim çiftleri üzerinde de çalıştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında, gerekli parametrelerin doğru şekilde ayarlanması şartıyla blok eşleme algoritmasının yarı-global blok eşleme, çizge kesme ve Birchfield algoritmasına göre daha hızlı ve daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Blok eşleme algoritması parametrelerinin değiştirilmesi uygulama üzerinde gerçekleştirilmekte olup, sonuçları gerçek zamanlı olarak aykırılık haritası üzerinde görüntülendiğinden hızlı ve kolay bir şekilde parametreler ayarlanabilmektedir.

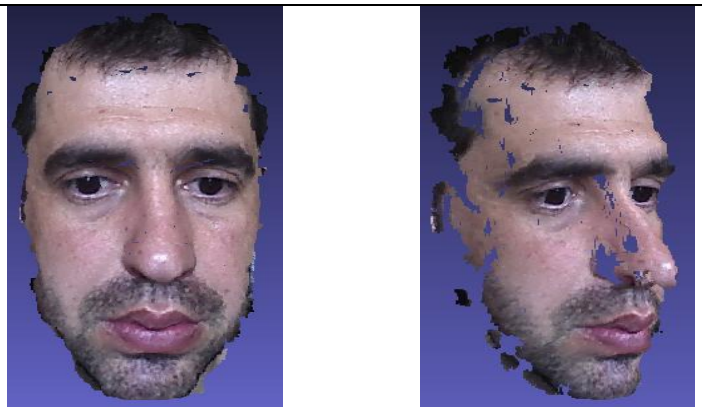
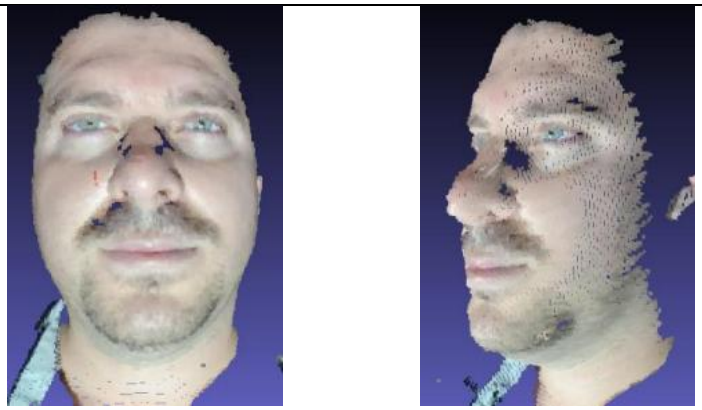
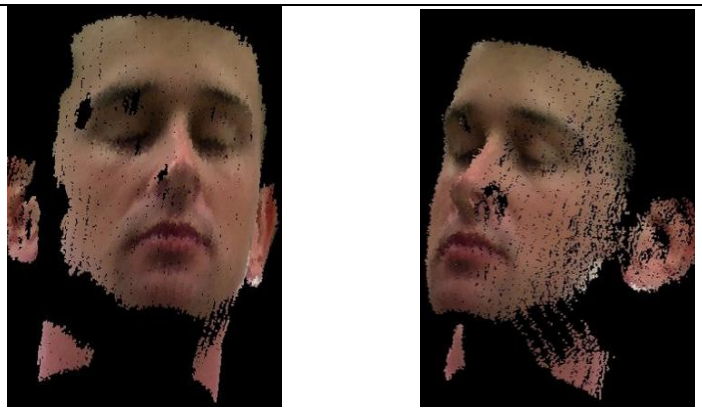
Kalibrasyon sonucunda elde edilen yeniden yansıtma matrisi kullanılarak, sahnedeki derinlik bilgisi başarılı bir şekilde uygulama tarafından elde edilmiştir. Sahnenin 3-boyutlu modellemesinin yapılabilmesi amacıyla resimdeki doku (renk) bilgisi elde edilen derinlik bilgisi ile birleştirilerek, PLY dosya formatında 3-boyutlu bir nokta bulutu olarak kaydedilmiştir. Eşleşen noktaların derinlik bilgisinin bulunmasının dışında üzerinde filtreleme yapılabilecek 3-boyutlu bir model olarak kaydedilmesi ile yönteme katkıda bulunulmuştur. Elde edilen nokta bulutundaki gürültü ve ayrık noktaların giderilmesinde kullanılabilecek üç farklı filtreleme yöntemi önerilmiş olup, bu filtreleme algoritmaları elde edilen nokta bulutları üzerinde uygulanmıştır.

Düzgeçiş filtreleme, istatistiksel ayrık noktalar çıkarımı ve yarıçapa göre ayrık noktalar çıkarımı filtrelerinin her biri nokta bulutundaki gürültü ve ayrık noktaların temizlenmesinde etkili olsa da, tek bir filtreleme yönteminin yeterli olmadığı görülmüştür. Bu üç filtreleme algoritmasının da aynı nokta bulutu üzerinde ardı ardına doğru parametrelerle çalıştırılması sonucunda, nokta bulutu üzerinde istenmeyen gürültü ve ayrık noktaların başarılı bir şekilde temizlendiği görülmüştür.

Pasif stereo sistemlerinin en büyük sorunu olarak görülen ve eşleştirme zorluklarından kaynaklanan gürültü ve ayrık noktaların temizlenmesi için önerilen filtreleme algoritmalarının nokta bulutları üzerinde uygulanması ile başarılı sonuçlar elde edilmiş ve yönteme katkıda bulunulmuştur. Filtreleme işlemlerinin ayrıca aktif görüş yöntemlerinin sonuçlarının iyileştirilmesinde de kullanılabileceği değerlendirilmektedir.

Geliştirilen stereo görüş sistemi kullanılarak elde edilmiş sonuçların, 3-boyutlu modellemede sıklıkla kullanılan aktif yöntemlere ait sonuçlarla karşılaştırması Tablo 7.1'de görülmektedir.

Tablo 7.1. 3-boyutlu modelleme yöntemlerinin sonuçlarının karşılaştırması

Yöntem	3-boyutlu modelleme sonuçları
Geliştirilen stereo görüş sistemi	
Üç faz kaydırma metodu temelli yapılandırılmış ışık sistemi	
Lazer tarama sistemi	
Kızılötesi nokta tarama sistemi (Kinect, fusion özelliği aktif)	

Tablo 7.1'de sonuçları görülen yöntemlerin incelenmesi sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda belirtilmiştir:

- 3 faz kaydırma metodu temelli yapılandırılmış ışık sisteminin geliştirmiş olduğumuz sisteme en yakın 3-boyutlu modeli verebildiği görülmektedir. Fakat kullanılan sistem bu modeli elde etmek için 3 farklı deseni nesneye projeksiyon cihazı ile yansıtması gerekmektedir. Ayrıca algoritmanın gerçek zamanlı olarak çalışma imkanı olmadığı belirtilmektedir [23].
- Lazer tarama sisteminin ise görece daha düşük kalitede 3-boyutlu model verebildiği görülmektedir. Ayrıca bu sistemin de gerçek zamanlı olarak çalışma imkanı yoktur. Sistemin nesnenin tamamını lazer taramasından geçirmesi gerekmekte olup, bu işlem karşılaştırma yapılan sistemde 15 sn sürmektedir [66, 67]. Bunun yanında, lazer ışını göze zarar verebildiği için, tarama esnasında gözlerin kapalı olması gerekmektedir.
- Kızılötesi tarama sistemi (Kinect) ise aslında oyun amacıyla tasarlandığı için düşük çözünürlüklü sonuçları gerçek zamanlı olarak üretebilmektedir. Ancak bu sistemin üretmiş olduğu nokta bulutundaki noktalar arası mesafe 5 mm olup, nesneleri detaylı bir şekilde modellemek için uygun değildir [68]. Bu sistemde kullanılmak üzere, çözünürlüğü arttırmak için fusion kütüphanesi geliştirilmiştir. Bu kütüphane 3 faz kaydırma metoduna benzer biçimde, farklı konumlardan çekilmiş birden fazla 3-boyutlu modeli birleştirerek çözünürlüğü yükseltmektedir. Tabloda görülen sonuç, fusion kütüphanesi kullanılarak 10 farklı konumdan çekilerek oluşturulmuş modelin birleşimidir. Fusion kütüphanesi kullanıldığında dahi, bu sistemin geliştirilen sisteme göre daha düşük kalitede sonuçlar verdiği görülmektedir.

Sonuçlar değerlendirildiğinde; geliştirilen sistemin üstün yönünün çok daha kaliteli 3-boyutlu model üretebilmesi olduğu görülmektedir. Ancak nokta bulutu filtreleme işlemleri çalışma maliyetleri yüksek olduğundan ve aynı zamanda uygun parametrelerin belirlenmesi de zaman aldığından, filtrelemenin gerçek zamanlı kullanımı şu an için mümkün gözükmemektedir. Bununla birlikte, bilgisayarların işlem güçlerinin hızla arttığı düşünüldüğünde, ileriki zamanlarda sistemin gerçek zamanlı olarak kullanılabilir olacağı öngörülmektedir.

Ayrıca geliştirilen sistemin, derinlik analizini hızlı bir şekilde gerçekleştirdiğinden robot yöngüdümü ve otonom araçların geliştirilmesinde kullanılabileceği değerlendirilmektedir.

Geliştirilen sistem ortam ışığı, kullanılan kamera tipi, eşleştirme ve filtreleme parametreleri gibi birçok argümandan etkilenmekte olup, en uygun değerlerin tespiti zaman almaktadır. Gelecekte, makine öğrenmesi, yapay zeka veya yapay sinir ağları gibi alanlarda yapılacak çalışmalar ile bu argümanların tespitinin otomatik olarak sağlanabileceği öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

[1] Ambrosch K., Kubinger W., ***Accurate Hardware-based Stereo Vision,*** Computer Vision and Image Understanding, 114, 11, 1303-1316, (2010).

[2] Wang Z., ***3D Reconstruction Using a Stereo Vision System with Simplified Inter-Camera Geometry***, Yüksek Lisans Tezi, University of Windsor, (2010).

[3] Lipnickas A., Knyš A., ***A Stereovision System for 3–D Perception***, Electronics and Electrical Engineering.–Kaunas: Technologija, 3, 91, (2009).

[4] Dipanda A., Woo S., Marzani F., Bilbault J. M., ***3-D Shape Reconstruction in an Active Stereo Vision System Using Genetic Algorithms***, Pattern recognition, 36, 9, 2143-2159, (2003).

[5] Lee H., Cho H., ***Stereo Moiré Technique: A Novel 3-D Measurement Method Using a Stereo Camera and a Digital Pattern Projector***, International Journal of Optomechatronics, 1, 2, 209-230, (2007).

[6] Carlson N. R., ***Physiology of Behavior 11th Edition***, (Pearson, 2012).

[7] Nixon M., ***Feature Extraction & Image Processing***, (Academic Press, 2008).

[8] Gürcan E., ***Endüstriyel Otomasyonda Bilgisayarla Görme***, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, (2008).

[9] Murray S.O., Boyaci H., Kersten D., ***The Representation of Perceived Angular Size in Human Primary Visual Cortex***, Nature Neuroscience, 9, 429-434, (2006).

[10] Ikeuchi K., ***Computer Vision: A Reference Guide***, (Springer Publishing Company, 2014).

[11] Dawson-Howe K., ***A Practical Introduction to Computer Vision with OpenCV***, (John Wiley & Sons, 2014).

[12] Szeliski R., ***Computer Vision: Algorithms and Applications***, (Springer Publishing Company, 2010).

[13] Dattagupta, A., ***Stereo Matching - Improving Image Quality***. Yüksek Lisans Tezi, The University Of Texas, (2012).

[14] Trucco E., Alessandro V., ***Introductory Techniques for 3-D Computer Vision,*** (Prentice Hall, 1998).

[15] May S., Pervoelz K., Surmann H., ***Vision Systems - Applications***, I-Tech Education and Publ., Chapter 11: 3D Cameras: 3D Computer Vision of Wide Scope, 181-202, (2007).

[16] Bradski G, Adrian K., ***Learning OpenCV: Computer Vision with the OpenCV Library,*** (O'Reilly Media Inc., 2008).

[17] Nakamura Y., Matsuura T., Satoh K., Ohta Y. ***Occlusion Detectable Stereo-Occlusion Patterns in Camera Matrix***, Computer Vision and Pattern Recognition, Proceedings CVPR'96, 371-378, (1996).

[18] Martull S., Peris M., Fukui K., ***Realistic CG Stereo Image Dataset with Ground Truth Disparity Maps,*** ICPR Workshop TrakMark 2012, 111, 430, (2012).

[19] Xu J., Yi Q., Fu C., Yin H., Zhao Z., Chen K. ***Advances in Stereo Vision,*** InTech, chapter Active Stereo Vision for 3D Profile Measurement, 1-16, (2011).

[20] Diebel J., Reutersward K., Thrun S., Davis J., Gupta, R., ***Simultaneous Localization and Mapping with Active Stereo Vision***, Intelligent Robots and Systems, IROS 2004 Proceedings, 4, 3436-3443, (2004).

[21] Altuntaş C., ***Yersel Lazer Tarayıcı Nokta Bulutlarının Fotogrametrik Verilerle Birlikte Değerlendirilmesi Üzerine Bir Çalışma***, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, (2011).
[22] Computer Vision Lecture Notes, http://www.cs.virginia.edu/~jfw3x/cs4501/ (Erişim Tarihi: 01.11.2014).
[23] Sert Eser., ***Üç Faz Kaydırma Metodu Temelli Yapılandırılmış Işık Sistemi***, Doktora Tezi, Trakya Üniversitesi, (2013).
[24] Dikmen Mehmet., ***3D Face Reconstruction Using Stereo Vision***, Yüksek Lisans Tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi, (2006).
[25] Tsai R.Y., ***A Versatile Camera Calibration Technique for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using of the Shelf TV Cameras and Lenses***, IEEE Journal of Robotics and Automation, 3, 4, 323-344, (1987).
[26] Kim S. W., Choi Y. B., Oh J. T., ***Reverse Engineering: High Speed Digitization of Free-Form Surfaces by Phase-Shifting Grating Projection Moire Topography,*** International Journal of Machine Tools and Manufacture, 39, 3, 389-401, (1999).
[27] Yang Y., Gao M., Zhang J., Zha Z., Wang, Z. ***Depth Map Super-Resolution Using Stereo-Vision-Assisted Model,*** Neurocomputing, (2014).
[28] Kılıç A. ***Navigation Of A Mobile Robot Using Stereo Vision***, Yüksek Lisans Tezi, Gaziantep Üniversitesi, (2010).
[29] Orhan H., Coşar C., Sadikhov E., ***Interferometre ve Optik Girişim Saçak Sayıcı Sistemi İle Yer Değiştirme Ölçümü***, I. Ulusal Ölçümbilim Kongresi Bildiriler Kitabı, Eskişehir, (1995).
[30] Hariharan P., ***Basics of Interferometry***, (Academic Press, 2010).
[31] Sansoni G., Trebeschi M., Docchio F., ***State-of-The-Art and Applications of 3D Imaging Sensors in Industry, Cultural Heritage, Medicine, and Criminal Investigation***, Sensors, 9, 1, 568-601, (2009).
[32] Laganière R., ***OpenCV 2 Computer Vision Application Programming Cookbook: Over 50 Recipes to Master This Library of Programming Functions for Real-Time Computer Vision,*** (Packt Publishing Ltd, 2011).
[33] Aydın T., ***Çifte Ağ Metoduyla Stereo, Odak Ve Bulanıklık Bilgisini Kullanarak Derinlik Çıkarımı,*** Doktora Tezi, Gebze İleri teknoloji Enstitüsü, (2011).
[34] Burger W., Burge M. J., ***Principles of Digital Image Processing***, (Springer Publishing Company, 2009).
[35] Hartley R., Zisserman A., ***Multiple View Geometry in Computer Vision***, (Cambridge University Press, 2003).
[36] Short N. J., ***3-D Point Cloud Generation from Rigid and Flexible Stereo Vision Systems***, Doktora Tezi, Virginia Polytechnic Institute and State University, (2009).
[37] Devernay F., Faugeras O., ***Straight Lines have to be Straight: Automatic Calibration and Removal of Distortion from Scenes of Structured Environments***. Machine Vision and Applications, 13, 1, 14-24, (2001).
[38] Beşdok E., ***3D Vision by using calibration pattern with inertial sensor and RBF Neural Networks***, Sensors, 9, 6, 4572-4585, (2009).
[39] Memon Q., Sohaib K. ***Camera Calibration and Three-Dimensional World Reconstruction of Stereo-Vision Using Neural Networks***, International Journal of Systems Science 32, 9, 1155-1159, (2001).
[40] Zhang Z., ***Camera Calibration with One-Dimensional Objects***, IEEE Transactions On Pattern Analysis and Machine Intelligence, 26, 7, (2004).

[41] Rotter P., Byrski W., Dajda M., Łojek G., ***Improving the Performance of Double-Plane Stereo Vision System Calibration, Using a Virtual Plane***, Paladyn, 1, 2, 141-146, (2010).
[42] Park S. Y., Subbarao M., ***A Multiview 3D Modeling System Based on Stereo Vision Techniques,*** Machine Vision and Applications, 16, 3, 148-156, (2005).
[43] Savarese Silvio, Computer Vision Lecture Notes, Lecture 7, http://web.eecs.umich.edu/~silvio/teaching/lectures/lecture7.pdf , (Erişim Tarihi: 01.11.2014)
[44] Boykov Y., Veksler O., Zabih R., ***Fast Approximate Energy Minimization via Graph Cuts***, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 23, 11, 1222-1239, (2001).
[45] Fisher R. B., Breckon T. P., Dawson-Howe K., Fitzgibbon A., Robertson C., Trucco E., Williams C. K., ***Dictionary of Computer Vision and Image Processing***. (John Wiley & Sons, 2013).
[46] Buğdaycıoğlu E., ***Video Görüntülerinden 3 Boyutlu Yapının Elde Edilmesi***, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, (2008).
[47] Treiber M. A., ***Optimization for Computer Vision: An Introduction to Core Concepts and Methods***, (Springer Publishing Company, 2013).
[48] Hager, Gregory D. Computer Vision Lecture Notes 11-12-13, http://www.cs.jhu.edu/~hager/Public/teaching/cs461/StereoNotes.pdf , (Erişim Tarihi: 01.11.2014)
[49] Hu Y., ***Research on a Three-Dimensional Reconstruction Method Based on the Feature Matching Algorithm of a Scale-Invariant Feature Transform,*** Mathematical and Computer Modelling, 54, 3, 919-923, (2011).
[50] Candemir S., ***İstatistiksel Anlam Tabanlı Bilgisayarla Görme Uygulamaları***, Doktora Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, (2011).
[51] Møller K. H., ***3D Object Modelling via Registration of Stereo Range Data***, Yüksek Lisans Tezi, Technical University of Denmark, (2006).
[52] Szeliski R., Weiss R., ***Robust Shape Recovery from Occluding Contours Using a Linear Smoother,*** International Journal of Computer Vision, 28, 1, 27-44, (1998).
[53] Lazaros N., Sirakoulis G. C., Gasteratos A., ***Review of Stereo Vision Algorithms: From Software to Hardware***. International Journal of Optomechatronics, 2, 4, 435-462, (2008).
[54] Scharstein D., Richard S., ***A Taxonomy and Evaluation of Dense Two-Frame Stereo Correspondence Algorithms***, International Journal of Computer Vision, 47, 1, 7-42, (2002).
[55] Szeliski R., Zabih R., Scharstein D., Veksler O., Kolmogorov V., Agarwala A., Tappen M., Rother C., ***A Comparative Study of Energy Minimization Methods for Markov Random Fields with Smoothness-Based Priors,*** Pattern Analysis and Machine Intelligence, 30, 6, 1068-1080, (2008).
[56] Gedikli S., ***PCL Workshop: Filtering***, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), (2011).
[57] Salman N., Yvinec M., ***Surface Reconstruction from Multi-View Stereo of Large-Scale Outdoor Scenes***. International Journal of Virtual Reality, 9, 1, 19-26, (2010).
[58] PCL API Documentation 1.7.1, http://docs.pointclouds.org/1.7.1/, (Erişim Tarihi: 01.11.2014)
[59] The OpenCV Reference Manual 2.4.9, http://docs.opencv.org/opencv2refman.pdf , (Erişim Tarihi: 01.11.2014)

[60] OpenCVSharp 2.4.10, https://github.com/shimat/opencvsharp, (Erişim Tarihi: 01.11.2014)
[61] Baggio D. L., ***Mastering OpenCV with Practical Computer Vision Projects,*** (Packt Publishing Ltd., 2012).
[62] Python-Pcl, http://strawlab.github.io/python-pcl/ , (Erişim Tarihi: 01.11.2014)
[63] Hirschmuller H., ***Stereo Processing by Semiglobal Matching and Mutual Information,*** Pattern Analysis and Machine Intelligence, 30, 2, 328-341, (2008).
[64] Scharstein D., Pal C., ***Learning Conditional Random Fields for Stereo***, IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Minneapolis, (2007).
[65] Brown M. Z., Burschka D., Hager G. D. ***Advances in Computational Stereo***, Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions, 25, 8, 993-1008, (2003).
[66] Recovering Non-Rigid 3-D Structures from Stereo and Structured Light, http://cecs.wright.edu/~agoshtas/stereorange.html, (Erişim Tarihi: 01.11.2014)
[67] Zagorchev L., Goshtasby A., ***A Paintbrush Laser Range Scanner.*** Computer Vision and Image Understanding, 101, 2, 65-86, (2006).
[68] Khoshelham K., Elberink S. O., ***Accuracy and Resolution of Kinect Depth Data for Indoor Mapping Applications***. Sensors, 12, 2, 1437-1454. (2012).

ÖZGEÇMİŞ

07.01.1979'da Babaeski'de doğdum. 2001 yılında Dokuz Eylül Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği bölümünden mezun oldum. 2001 – 2007 yılları arasında Balıkesir Üniversitesi'nde Araştırma Görevlisi olarak çalıştım. 2006 yılında Balıkesir Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisansımı tamamladım. 2007 – 2009 yılları arasında Ziraat Bankası A.Ş.'de Bilgi Teknolojileri Müfettiş Yardımcısı olarak çalıştım. 2009 Eylül ayından beri Namık Kemal Üniversitesi, Hayrabolu Meslek Yüksekokulu'nda Öğretim Görevlisi olarak çalışmaktayım. 2009 yılından bu yana Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı'nda doktora öğrenimimi sürdürmekteyim.

BİLİMSEL ÇALIŞMALAR

1. Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitabında (Proceedings) basılan bildiriler.

OZCAN M. O., SERT E., TAŞKIN D., TAŞKIN C., ***Real-Time Stereo Camera Calibration Using OpenCV***, International Scientific Conference Unitech‟12, Gabrovo, (2012).

SERT E., OZCAN M. O., TASKIN D., TASKIN C., ***Sequential Reflection Models Methods Using To 3D Modeling and Hybrid (Phase Shifting + Gray) Method***, International Scientific Conference Unitech‟12, Gabrovo, (2012).

BAYSAL K. TAŞKIN D., OZCAN M. O., SERT E., ***High Capacity Adder & Subtractor Circuit Design Using FPGA***, International Scientific Conference Unitech‟12, Gabrovo, (2012).

2. Ulusal hakemli dergilerde yayımlanan makaleler

SERT E., TAŞKIN D., ÖZCAN M. O., TAŞKIN C., BAYSAL K., ***3D Modellemede Kullanılan Ardışık Yansıtmalı Yapısal Işık Yöntemleri***, Journal of Engineering Sciences, Trakya Üniversitesi, Edirne, (2013).

TAŞKIN D., BAYSAL K., SERT E., TAŞKIN C., ÖZCAN M. O., ***VHDL Kullanılarak FPGA ile Yüksek Kapasiteli Toplayıcı Ünite Tasarımı***, Journal of Engineering Sciences, Trakya Üniversitesi, Edirne, (2013).

3. Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitabında basılan bildiriler

SERT E., TAŞKIN D., TOPÇUBAŞI N, ÖZCAN M. O., ***Görüntü İşleme Teknikleri İle Elma Tanıma***, İnönü Üniversitesi, Akademik Bilişim-2011, Malatya, (2011).

ÖZCAN M. O., SERT E., TAŞKIN D., TAŞKIN C., ***OpenCV ile Stereo Görüntülerden Derinlik Kestirimi***, Akademik Bilişim-2013, Antalya, (2013).