

**T.C.
TRAKYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÜÇ FAZ KAYDIRMA METODU
TEMELLİ YAPILANDIRILMIŞ IŞIK SİSTEMİ**

**ESER SERT
DOKTORA TEZİ
BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
DANIŞMAN: YRD. DOÇ. DR. DENİZ TAŞKIN
EDİRNE, 2013**

**ÜÇ FAZ KAYDIRMA METODU
TEMELLİ YAPILANDIRILMIŞ IŞIK SİSTEMİ**

ESER SERT

**DOKTORA TEZİ
BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

2013

**TRAKYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü onayı

Prof. Dr. Mustafa ÖZCAN
Fen Bilimleri Enstitüsü
Müdürü

Bu tezin Doktora tezi olarak gerekli şartları sağladığını onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Tolga SAKALLI
Anabilim Dalı Başkanı

Bu tez tarafımca (tarafımızca) okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans/ 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/oy çokluğu ile kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri :

İmza

.....
.....
.....
.....
.....
.....

.....
.....
.....
.....
.....
.....

Tarih:

...../...../.....

T.Ü.FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ 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.

31 / 05 / 2013

Eser SERT

Doktora Tezi
Üç Faz Kaydırma Metodu
Temelli Yapılandırılmış Işık Sistemi
T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü
Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı

ÖZET

Yapılandırılmış ışık tekniği nesnelerin 3D modellemesini gerçekleştirmede en güvenilir temassız ölçüm yöntemlerinden birisidir. Bu teknikte kalibre edilmiş kamera-projeeksiyon çifti ve bilgisayar kullanılmaktadır. Projeksiyon, sahneye belirli kodlama yöntemleri aracılığı ile kodlanmış desenleri yansıtmaktadır. Ardından kamera aracılığı ile bu desenlerin fotoğrafları alınmaktadır. Yansıtılan ve kameradan alınan desenler arasındaki ilişki yorumlanarak 3D derinlik bilgisine ulaşılmaktadır. Yapılandırılmış ışık sisteminde kullanılan kodlama yöntemi, ortam aydınlatması, kullanılan cihazların konfigürasyon ve konumları elde edilecek 3D görüntünün kalitesini yakından etkilemektedir. 3D modelleme sisteminin gerçek dünyaya en yakın şekilde ölçüm yapabilmesi için tüm bu parametrelerin kalibre edilmesi gerekmektedir.

Bu tez çalışmasında 3D modelleme yöntemleri ve kullanım alanları incelenmiş, 3D ölçüm için kullanılan yapılandırılmış ışık tekniklerinden üç faz kaydırma algoritmasına dayalı bir 3D ölçüm sistemi geliştirilmiştir. Ayrıca, geliştirilen sistemin hassasiyetini yükseltmek amacıyla sistemin kalibrasyonuna yönelik bir yöntem önerilmektedir.

Yıl : 2013

Sayfa Sayısı : 112

Anahtar Kelimeler : Yapılandırılmış ışık, 3D Modelleme, Üç Faz Kaydırma Algoritması, Kalibrasyon

Doctorate Thesis
Three Phase Shifting Method-Based
Structured Light System
Trakya University Institute of Natural Sciences
Computer Engineering of Department

ABSTRACT

Structured light technique is one of the most reliable noncontact methods for realizing 3D modeling of object. In this technique, a pair of calibrated camera-projector and a computer is used. Projector is used for reflecting the structured light patterns which is coded by particular methods. Then, the photographs of these patterns are taken by the camera. 3D depth information is obtained by evaluating the relationship between the patterns which are reflected and taken from the camera. The encoding method used for structured light system, ambient lighting, the positions and configuration of the used devices directly affects the quality of 3D image which will be obtained. All these parameters must be calibrated in order to make a measurement that is closest to the real world by using the 3D modeling system.

In this thesis study, 3D modeling methods and its fields of usage has been investigated and 3D measurement system based on three phase shifting algorithm of which is a kind of structured-light-technique being used for 3D measurement has been developed. In addition, a method for system calibration is also suggested in order to increase the sensitivity of the developed system.

Year : 2013

Number of Pages : 112

Keywords : Structured Light, 3D Modeling, Three Phase Shifting Algorithm,
Calibration

TEŐEKKÖR

Öncelikle yüksek lisans ve doktora öğrenimim sırasında yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Deniz TAŞKIN'a teşekkür ederim.

Yaptıkları yapıcı eleştiriler ile destek olan Yrd. Doç. Dr. Nurşen TOPÇUBAŞI ve Yrd. Doç. Dr. Tarık YERLİKAYA'ya, çalışmalarımnda bana sürekli destek olan aileme teşekkürlerimi sunarım.

İçindekiler

TEŞEKKÜR.....	VII
SİMGELER DİZİNİ.....	XI
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XII
TABLOLAR DİZİNİ	XVI
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	3
3D YÜZEY GÖRÜNTÜLEME TEKNOLOJİSİ.....	3
2.1. 3D Görüntüleme Sistemlerinin Uygulama Alanları.....	3
2.1.1. Malzeme İşleme ve Üretimi Alanı	4
2.1.2. Tıp Alanı.....	6
2.1.3. Eğitim Alanı	11
2.1.4. Harita Kadastro Alanı.....	12
2.1.5. Otomotiv Sektörü	14
2.1.6. Kazaların Araştırılması.....	16
2.1.7. Eğlence Sektörü.....	17
2.1.8. Tersine Mühendislik	18
2.1.9. Kültürel Mirasların Analizi	20
2.2. 3D GÖRÜNTÜLEME METOTLARI	21
2.2.1. Temaslı Ölçüm Metotları	22
2.2.2. Temassız Ölçüm Metotları	23
2.2.2.1. Akustik Ölçüm Metodu	24
2.2.2.2. Manyetik Ölçüm Metodu.....	25
2.2.2.3. Optik Ölçüm Metotları	26
2.2.2.3.1. Uçuş Zamanı Metodu	26
2.2.2.3.2. Üçgenleme Metodu	28
2.2.2.3.3. Yapılandırılmış Işık Metodu.....	29
2.2.2.3.4. Stereo Analiz Metodu	30
2.2.2.3.5. Interferometri Metodu	32
BÖLÜM 3	35
YAPILANDIRILMIŞ IŞIK.....	35

3.1. Ardışık Yansıtma.....	36
3.1.1. İkili Kod.....	37
3.1.2. Gray Kod	39
3.1.3. Üç Faz Kaydırma.....	42
3.2. Çerçeve İçinde Değişen Desenler	44
3.2.1. Gökkuşığı 3D Kamera	44
3.2.2. Sürekli Değişen Renk Kodları	45
3.3. Şerit İndeksleme	46
3.3.1. Renkli Kodlanmış Şeritler	46
3.3.2. Dilimli Şeritler.....	47
3.3.3. Gri Seviye Kodlanmış Şeritler.....	48
3.3.4. De Bruijn Dizileri	49
3.4. Izgara İndeksleme	50
3.4.1. Sözde Rastlantısal İkili Noktalar	50
3.4.2. Kod Kelimelerine Benzer Mini Desenler	51
3.4.3. Renkli Kodlanmış Izgara	52
3.4.4. 2D Renkli Kodlanmış Nokta Dizisi.....	52
3.5. Hibrit Metotları	54
BÖLÜM 4	57
ÜÇ FAZ KAYDIRMA METODU TEMELLİ YAPILANDIRILMIŞ IŞIK SİSTEMİ..	57
4.1. Kamera Kalibrasyonu.....	61
4.1.1. Kamera Modeli	61
4.1.2. Lens Bozulmaları.....	63
4.1.3. Kalibrasyon Süreci	65
4.2. Projeksiyon-Kamera Eksen Kalibrasyonu	72
4.3. Projeksiyon Kalibrasyonu	73
4.4. Gamma Kalibrasyonu.....	75
4.5. Derinlik Kalibrasyonu	76
4.6. Kalibre Edilmiş Yapısal Işık Sisteminin Çalışması	77
4.6.1. Faz Resimlerinin Nesne Üzerine Yansıtılıp Görüntüsünün Alınması.....	77
4.6.2. Wrapped Resminin Oluşturulması	79
4.6.3. Unwrap İşlemi ve Derinlik Haritasının Oluşturulması.....	84

4.6.4. 3D Geometriyi Elde Etme	90
BÖLÜM 5	93
DENEYSEL SONUÇLAR	93
5.1. Tasarlanan Üç Faz Kaydırma Metodu Temelli Yapılandırılmış Işık Sisteminin Farklı Sistemler İle Karşılaştırılması.....	93
5.2. Kalibrasyon İşleminin Sistem Üzerindeki Etkileri.....	97
5.3. Sistem Parametrelerinin Analizi.....	101
5.3.1. Eşik Parametresinin Analizi	101
5.3.2. Eğim Parametresinin Analizi.....	103
BÖLÜM 6	105
TARTIŞMA	105
KAYNAKLAR	107
ÖZGEÇMİŞ	110
BİLİMSEL FAALİYETLER	111

SİMGELER DİZİNİ

Kısaltmalar

ARGE: Araştırma Geliştirme

CAD: Bilgisayar Destekli Model (Computer Aided Model)

CT: Bilgisayarlı Tomografi (Computerized Tomography)

CMM: Koordinat Ölçme Makineleri (Coordinate-Measuring Machines)

MR: Manyetik Rezonans (Magnetic Resonance)

PRBA: Söзде Rastsal Diziler (Pseudo Random Binary Array)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. 3D modelleme.....	4
Şekil 2.2. Karıştırıcının 3D modeli	5
Şekil 2.3. Bir motorun dış kasasının 3D yazıcıdan elde edilişi.....	5
Şekil 2.4. 3D ortamına aktarılmış nesnelere	6
Şekil 2.5. Tıpta 3D teknolojisinin uygulanması.....	7
Şekil 2.6. Hastanın isteklerine göre hekimin buruna şekil verme süreci	8
Şekil 2.7. Dişlerin 3D modelleri	8
Şekil 2.8. Kemiklerin 3D modelleri	9
Şekil 2.9. Kafatası tümörünü görüntüleyen bilgisayarlı tomografi sonucu	9
Şekil 2.10. MRI tekniği ile vücudun üst bölgesinin görüntülenmesi.....	10
Şekil 2.11. Anne karnındaki fetüsün 3D yazıcıdan alınmış çıktısı	11
Şekil 2.12. Beyin ve kulağa ait 3D görüntüler	12
Şekil 2.13. 3D modelleme işlemi	13
Şekil 2.14. 3D modelleme işlemi	14
Şekil 2.15. Modellenen otomobil ve çeşitli açılardan aracın modelleme sonuçları	15
Şekil 2.16. Hava yastığının modellenmesi için yüksek hızlı 3D görüntüleme teknolojilerinin kullanımı.....	16
Şekil 2.17. Kazalı kapının 3D modellenmiş görüntüleri.....	17
Şekil 2.18. Oyun tasarım aşaması	18
Şekil 2.19. Tersine mühendislikte 3D modelleme	19
Şekil 2.20. Arkeolojik alan ve bu alanın görüntülenmesi için gerekli düzenek.....	20
Şekil 2.21. Toprak üzerinde gösterilen bölgelerin 3D görüntüleme sonuçları	21
Şekil 2.22. 3D modelleme ve ölçüm metotları.....	22
Şekil 2.23. Temaslı ölçüm tekniğiyle ölçüm.....	23
Şekil 2.24. Temassız ölçüm sistemleri.....	24
Şekil 2.25. Ultrasonik mesafe ölçer devresi.....	25
Şekil 2.26. Akıllı araç park asistanı	25
Şekil 2.27. MR tekniği ile beyin görüntüleme	26
Şekil 2.28. Uçuş zamanı ölçüm sistemi	27
Şekil 2.29. Üçgenleme prensibinin şeması	28

Şekil 2.30. Yapılandırılmış ışık tekniği için gerekli düzenek	29
Şekil 2.31. Stereo analiz sistemi	30
Şekil 2.32. İki kameralı sisteme ait eksen yapılandırması	30
Şekil 2.33. Derinlik ve fark arasındaki ilişki.....	31
Şekil 2.34. Stereo analiz sistemiyle elde edilen derinlik haritası	32
Şekil 2.35. İnterferometri metodunun şeması	33
Şekil 3.1. Yapılandırılmış ışık temelli 3D görüntüleme tekniklerinin sınıflandırılması.36	
Şekil 3.2. 3D görüntüleme için ikili kodlanmış desen yapısı.....	37
Şekil 3.3. Eşikleme metotlarıyla pikselleri sınıflandırma	38
Şekil 3.4 İkili kod değerlerinin zamana göre sıralanması	39
Şekil 3.5. 3D görüntüleme için gray seviye kodlama (A=3, B=3).....	40
Şekil 3.6. Gray kod değerlerinin zamana göre sıralanması.....	41
Şekil 3.7. Yatay tarama ve eğri uygunlaştırma	42
Şekil 3.8. Sinüsoidal sinyallere karşılık oluşan saçak resimleri	43
Şekil 3.9. Gökkuşağı 3D kamera sisteminin düzeneği.....	45
Şekil 3.10. Sürekli değişen renk kodlarının oluşturulma süreci	46
Şekil 3.11. Şerit indekslenmiş desenin modellenecek kişi üzerine yansıtılması.....	47
Şekil 3.12. Dilimli şeritler	48
Şekil 3.13. Tekrarlanan gri ölçekli desen kullanarak şerit indeksleme.....	48
Şekil 3.14. De bruijn dizisiyle oluşan desenler	49
Şekil 3.15. De Bruijn dizisiyle 3D modelleme	50
Şekil 3.16. Bir sözde rastlantısal ikili diziler örneği	51
Şekil 3.17. Mini desenler kullanımı	51
Şekil 3.18. Renkli kodlanmış ızgara	52
Şekil 3.19. Renkli kodlanmış noktaların örneği.....	53
Şekil 3.20. 2D renkli kodlanmış desenlerle elde edilen 3D modelleme sonuçları.....	54
Şekil 3.21. Hibrit metotta kullanılan bazı desenler	54
Şekil 3.22. Faz kaydırma ve gray kod metotlarının ardışık biçimde uygulanması	55
Şekil 3.23. Hibrit metodunun akış diyagramı	56
Şekil 4.1. Üç faz kaydırma algoritması işlem adımları.....	58
Şekil 4.2.a. Geliştirilen sistemin akış diyagramı.....	59
Şekil 4.3. İğne delikli kamera modeli	62

Şekil 4.4. Resim düzlemi, eksen merkezi ilişkisi.....	62
Şekil 4.5. Radyal bozulma	64
Şekil 4.6. Kamerada teğetsel bozulma	65
Şekil 4.7. Kalibrasyon parametrelerinin elde edilmesi ve düzeltilmiş resmin görüntülenmesi için akış diyagramı	66
Şekil 4.8. Satranç tahtasının fotoğrafının çekilmesi	67
Şekil 4.9. cvFindChessboardCorners fonksiyonu	68
Şekil 4.10. cvDrawChessboardCorners fonksiyonu.....	69
Şekil 4.11. Satranç tahtası resmine cvDrawChessboardCorners() fonksiyonunun uygulaması	70
Şekil 4.12. cvCalibrateCamera2 fonksiyonu.....	71
Şekil 4.13. Program sonuç görüntüleri.....	71
Şekil 4.14. Kamera ve projeksiyonun koordinat eksenini.....	72
Şekil 4.15. Eksen kalibrasyonunun adımları.....	73
Şekil 4.16. Projeksiyonun kalibrasyon desenlerini yansıtma süreci	74
Şekil 4.17. İdeal gamma eğrisi	75
Şekil 4.18. Sorunlu gamma eğrisi	75
Şekil 4.19. Sorunlu gamma eğrisi	76
Şekil 4.20. Nesne boyutlarının incelenmesi.....	77
Şekil 4.21. Çekim prosedürünün akış diyagramı	78
Şekil 4.22. Saçak resimleri ve nesne üzerine yansıtılmış saçak resimleri	79
Şekil 4.23. Saçak resimleri ve wrapped faz resmi	80
Şekil 4.24. Faz değerinin elde edilmesi	81
Şekil 4.25. Wrap işlemi akış diyagramı	82
Şekil 4.26. Nesnelere ve wrapped resimleri.....	83
Şekil 4.27. Derinlik analizi yapan pencerenin görüntüsü	84
Şekil 4.28. Unwrap işlemi akış diyagramı	86
Şekil 4.29. isle fonksiyonu akış diyagramı	87
Şekil 4.30. Derinlik oluşturma fonksiyonuna ait akış diyagramı.....	88
Şekil 4.31. Nesnelere ve derinlik haritası resimleri	89
Şekil 4.32. 3D görüntüleme ekranı	90
Şekil 4.33. 3D modeli gösterme fonksiyonu akış diyagramı	91

Şekil 4.34. 3D modelleme sonuçları	92
Şekil 5.1. Hatalı eşik parametresi ile elde edilen 3D modelleme sonuçları.....	102
Şekil 5.2. Hatalı eşik parametresi ile elde edilen 3D modelleme sonuçları.....	104

TABLULAR DİZİNİ

Tablo 5.1. 3D modelleme sistemlerinin karşılaştırılması.....	94
Tablo 5.2. 3D modelleme sistemlerinin karşılaştırılması.....	96
Tablo 5.3.a. Deneysel 3D sonuçları – test no: 1.....	98
Tablo 5.3.b. Deneysel 3D sonuçları – test no: 2	99
Tablo 5.3.c. Deneysel 3D sonuçları – test no: 3.....	100

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Klasik kameralarla alınan görüntüler 2 boyutlu olduğundan derinlik bilgisi içermezler. Bu durum sayısal görüntü sistemlerinde gerçek dünyayı algılamayla ilgili sorunlar yaratabilmektedir. 3D teknolojisinin 2 boyutlu teknolojiden farklı olarak sunmuş olduğu derinlik bilgisi, nesnelerin sayısal sistemler tarafından daha doğru yorumlanmalarına olanak sağlamaktadır. Bu avantajlardan dolayı 3D görüntüleme teknolojileri savunma sanayi, tıp, eğitim ve sanayi alanlarında yaygınlıkla kullanılmaktadır.

Son yıllarda 3D modelleme ve görüntüleme teknolojilerinde hızlı gelişmeler yaşanmaktadır. Nesne ya da nesnelerin 3D modelini çıkarmak için kullanılan en etkili çözümlerden birisi yapılandırılmış ışıkla modellemedir. Bir yapılandırılmış ışık sistemi, 3D şekil ölçümü için kamera ve projeksiyon ikilisinden oluşan bir platformu kullanmaktadır. Belirli yöntemler ile kodlanan yapılandırılmış ışık desenlerini yansıtmak için projeksiyon makinesi kullanılır. Kamera ise sahnenin fotoğrafını bilgisayara aktarmaktadır. Sahne görüntüleri bilgisayar tarafından işlenerek 3D bilgisine ulaşılmaktadır.

Bu görüntüler işlenirken, sahnede bulunan nesnenin yansıtılan yapılandırılmış ışıkta meydana getirdiği bozulma miktarı dikkate alınmaktadır. Sahnede bulunan nesnenin derinlik miktarına paralel olarak yapılandırılmış ışık deseninde bozulmalar meydana gelmektedir. Bununla birlikte nesnenin derinliği sıfıra yaklaştığında, yapılandırılmış ışık desenindeki bozulma da azalmaktadır.

Yapılandırılmış ışıkla üç boyutlu modelleme tekniğinde sahneye yansıtılan desenler değişik kodlama türlerine sahip olabilmektedirler. Bu türlere örnek olarak ardışık yansıtma, sürekli değişen, şerit indeksleme, ızgara indeksleme ve hibrit metotlar

verilebilir. Kullanılan kodlama metodu 3D modellemenin performansını yakından etkilemektedir.

Bu tez çalışmasında bölüm 2’de 3D yüzey görüntüleme teknolojisi, bölüm 3’te yapılandırılmış ışık, bölüm 4’te üç faz kaydırma metodu temelli yapılandırılmış ışık sistemi, bölüm 5’te deneysel sonuçlar ve bölüm 6’da ise tartışma sunulmaktadır.

Geliştirilen 3D modelleme sisteminin performansını test etmek için çeşitli nesnelerin 3D modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Yapılan ölçüm sonuçları çalışmanın sonunda sunulmaktadır.

BÖLÜM 2

3D YÜZEY GÖRÜNTÜLEME TEKNOLOJİSİ

3D modelleme, bilgisayar ortamında bir nesnenin matematiksel olarak vektörel bir formatta oluşturulmasıdır [1]. Elde edilen matematiksel model, nesneyi geometrik olarak temsil etmektedir. Bu matematiksel modelin çeşitli yazılımlarla görselleştirilmesi sonucunda nesnenin yüzeyinin 3D olarak görüntülenmesi sağlanmaktadır.

2.1. 3D Görüntüleme Sistemlerinin Uygulama Alanları

3D görüntülemenin potansiyel kullanım alanları mimarlık, otomotiv, kuyumculuk, eğitim, malzeme işleme ve üretim, medikal uygulamalar, nesne modelleme, tersine mühendislik olarak sıralanabilmektedir [2].

1970'li yıllarda çeşitli ülkelerin tersine mühendisliği kullanarak teknolojik yeteneklerini yükseltmeleri bu mühendislik dalının ileriki yıllarda ön plana çıkmasını sağlamıştır. Tersine mühendislik sanayileşme yolunda ilerleyen ülkelerde birçok sektörde ARGE çalışmalarına katkı sağlamaktadır.

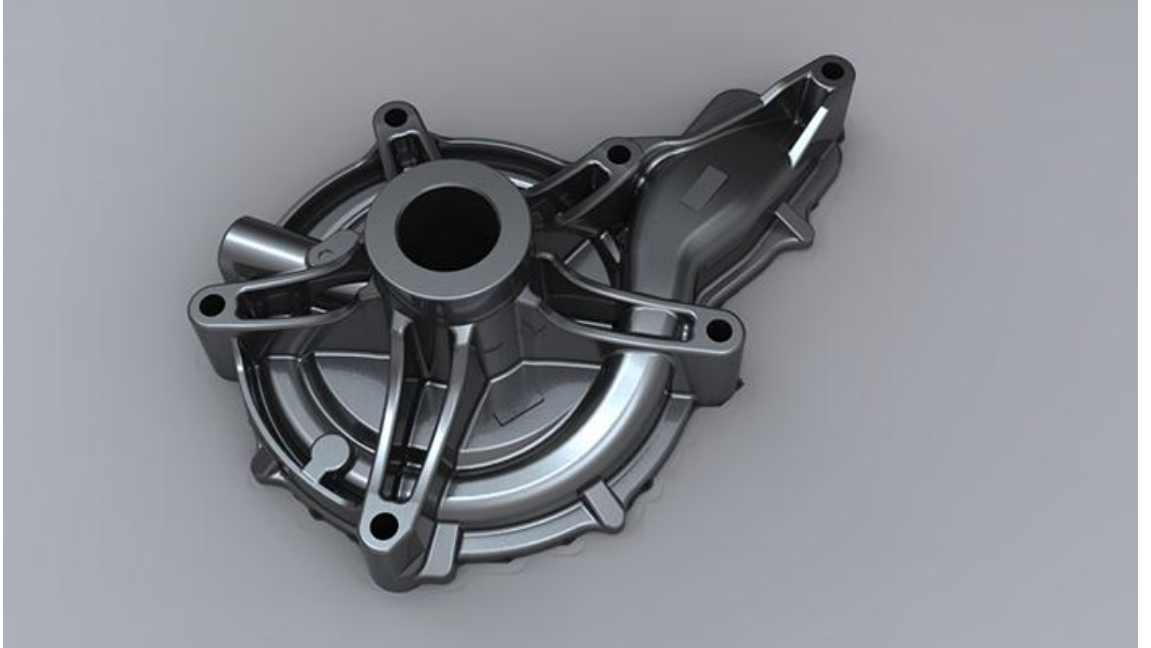
Üniversite ya da işletmelerin ARGE bölümlerinde sistematik faaliyetler sonucu orijinal çalışmalar yapılabilmektedir. Bu tip çalışmaların ortaya çıkmasında tersine mühendisliğin kullanılması kalite ve rekabetin artırmasına neden olmaktadır. Bu sebeple birçok sektörde tersine mühendislik ve hızlı 3D modelleme yaygın olarak kullanılmaktadır. Hızlı 3D modellemenin kullanıldığı sektörler bu bölümde ayrıntılı olarak anlatılmaktadır.

2.1.1. Malzeme İşleme ve Üretimi Alanı

3D modelleme ve tarama teknolojilerindeki gelişmelere paralel olarak malzeme işleme ve üretim sektöründe yoğun biçimde kullanılmaktadır. Bu ve benzeri süreçleri kullanan firmalar ürünlerini daha kaliteli ve seri olarak üretme imkânına elde etmektedirler. Dolayısıyla bu teknolojiyi kullanan firmalar rakiplerine karşı üstünlük sağlayabilmektedirler.

Şekil 2.1’de bir pompa gövdesinin 3D modellemesi görülmektedir [3]. Bu model üzerinde incelemeler yapılarak daha iyi bir pompa gövdesinin yapımı gerçekleştirilebilmektedir.

Şekil 2.2’de 3D modellemesi yapılmış olan bir karıştırıcının şekli görülmektedir [3]. Bu model üzerinde gerekli değişiklikler yapıp üretim sürecine daha iyi bir ürün ortaya çıkarılabilmektedir.



Şekil 2.1. 3D modelleme

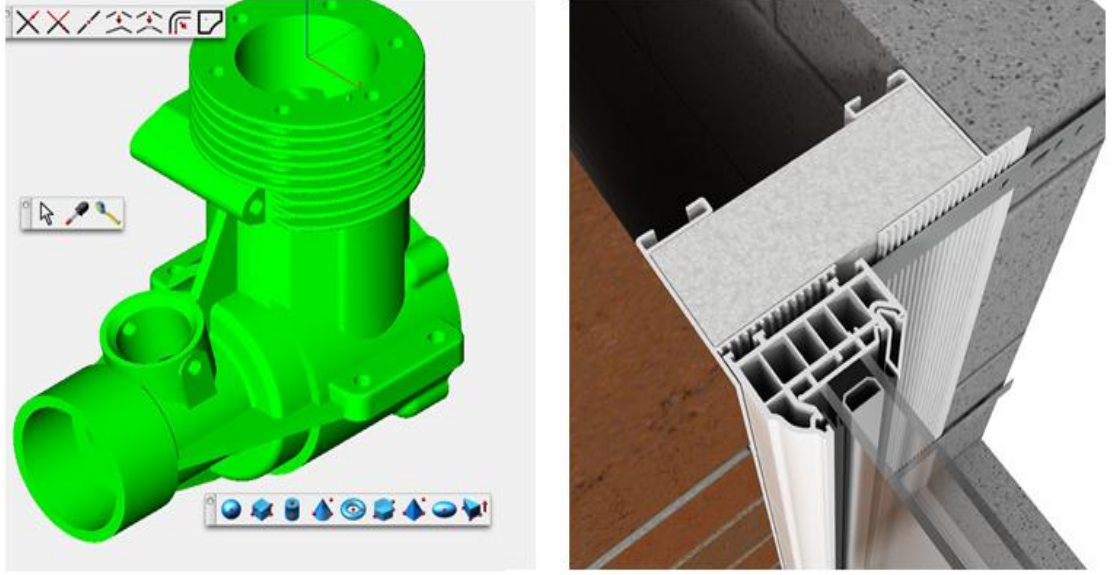


Şekil 2.2. Karıştırıcının 3D modeli

3D yazıcı teknolojisi ile nesnelerin 3D modellerinin çıktısı alınabilmektedir. 3D yazıcılar nesnelerin birebir kopyasını yâda maketlerini elde etmek için üretim sektöründe kullanılabilmektedirler. Bir motorun dış kasasının 3D printer ile elde edilişi Şekil 2.3'te görülmektedir [4].



Şekil 2.3. Bir motorun dış kasasının 3D yazıcıdan elde edilişi



Şekil 2.4. 3D ortamına aktarılmış nesnelere

Bu teknoloji sayesinde nesnelerin, üretimine geçilmeden önce fiziksel olarak incelenmesi mümkün olmaktadır. Böylece olası değişiklikler ve hatalar üretime geçilmeden önce fark edilmektedir. Şekil 2.4'te 3D ortamına aktarılmış nesnelere görülmektedir [5,6]. Bu modeller üzerinde gerekli değişiklikler yapıldıktan sonra nesnelere üretime hazır hale gelmektedir.

2.1.2. Tıp Alanı

3D teknolojisi tıp alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Hekim 3D teknolojisini kullanarak organları ve/veya uzuvları daha ayrıntılı olarak görüntülediği için bu durum hastalıkların teşhisinde büyük avantajlar doğurmaktadır. Tıpta kullanım alanlarına ultrasonografi, MR teknolojisi, bilgisayarlı tomografi, yapılandırılmış ışıkla görüntüleme, doppler, 3D CT, mamografi, robotik cerrahi, 3D görüntüleme destekli ameliyatlara gibi örnekler verilebilmektedir.

Son zamanlarda teknolojik gelişmelere paralel olarak 3D teknolojisinin yaygın halde kullanılmaya başladığı görülmektedir. Bu alandaki kullanım şekillerine örnek olarak estetik ve plastik cerrahi, fizyoloji, dermatoloji, onkoloji verilebilir. Şekil 2.5'te plastik cerrahi alanında 3D modelleme kullanımı görülmektedir [7]. İlk adımda

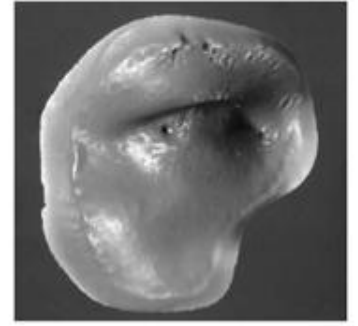
hastanın 3D yüz modeli bu teknikle çıkarılarak şekil 2.5.b'deki görüntü elde edilmiştir. Ardından hastaya takılacak gözün hızlı 3D modellenmesi yapılarak şekil 2.5.c oluşturulmuştur. Şekil 2.5.e'de ise göz prototipi ile yüz birleştirilerek oluşacak yüz modeli gösterilmiştir. Yapılan operasyon sonucu hastanın yüzü ise şekil 2.5.f'de görülmektedir.



a) Hastanın fotoğrafı



b) Hastanın CAD modeli



c) Eklenecek gözün dokusuz 3D modeli



d) Eklenecek gözün doku eklenmiş 3D modeli



e) Hastanın CAD modeli ile gözün birleştirilmiş 3D modeli



f) Operasyon sonrası hastanın son hali

Şekil 2.5. Tıpta 3D teknolojisinin uygulanması



Şekil 2.6. Hastanın isteklerine göre hekimin buruna şekil verme süreci

3D teknolojisi estetik cerrahi alanında da yaygın olarak kullanılmaktadır. Hekimler burun, çene, alın, yanak gibi bölgelerde estetik operasyon yapmadan önce 3D görüntülerden hastalığı daha iyi analiz etme şansını yakalamaktadır. Ayrıca hekim operasyon yapacağı bölgeyi hastasıyla birlikte 3D olarak görebilir ve alınması gereken muhtemel sonuçları ayrıntılı olarak görüntüleyebilir. Şekil 2.6'da hastanın isteklerine göre hekimin buruna şekil verme süreci görülmektedir [8].

3D modelleme diş hekimlerinin teşhis ve müdahaledeki başarı oranlarını da yükseltmektedir. Şekil 2.7'de 3D modeli çıkarılan dişler görülmektedir [9].



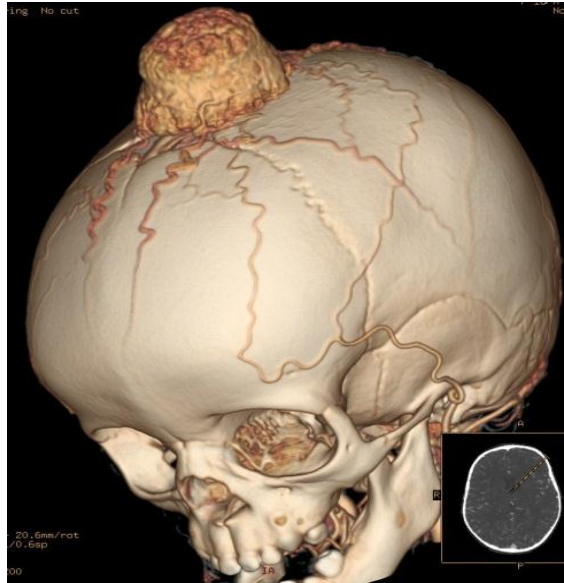
Şekil 2.7. Dişlerin 3D modelleri



Şekil 2.8. Kemiklerin 3D modelleri

3D modelleme kemik yapılarının ayrıntılı şekilde incelenmesine olanak sağlamaktadır. Şekil 2.8’de fizyoloji alanında 3D modellemenin kullanımı görülmektedir.

Tomografi görüntülerinin işlenerek uzvun 3 boyutlu modelleri elde edilebilmektedir. Şekil 2.9’da kafatasında oluşan bir tümörü görüntülemiş bir 3D bilgisayarlı tomografi görüntüsü görülmektedir [10].



Şekil 2.9. Kafatası tümörünü görüntüleyen bilgisayarlı tomografi sonucu



Şekil 2.10. MRI tekniği ile vücudun üst bölgesinin görüntülenmesi

Benzer biçimde MR görüntülerinin de 3 boyutlu modelleri oluşturulabilmektedir. Şekil 2.10'da MR tekniği ile vücudun üst bölgesinin görüntüleme sonucu görülmektedir [11].

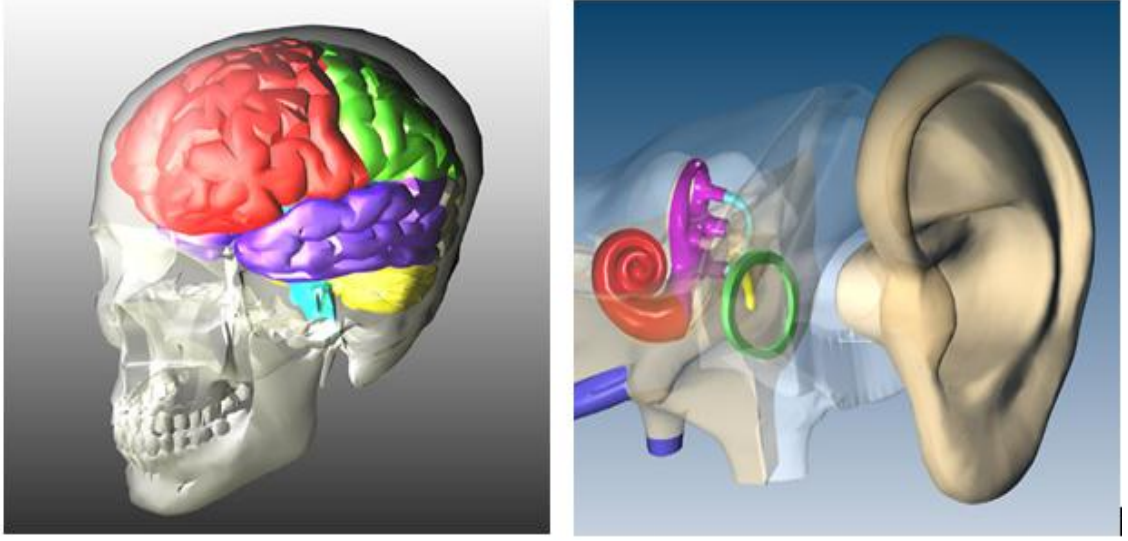
2012 yılı temmuz ayında Japonyada Pasotec mühendislik şirketi ve Hiroo kadın doğum kliniğinin ortak çalışmasıyla anne karnındaki bebeğin 3D modellemesi yapılmıştır. Görüntü 3 boyutlu bir şemaya çevrilmekte ve bir 3D yazıcıya aktarıldıktan sonra, fetüsün üç boyutlu ve plastik bir çıktısı elde edebilmektedir. Şekil 2.11'de bu metotla elde edilen 3D yazıcı çıktısı verilmiştir [12]. Elde edilen çıktı aileler tarafından anı olarak saklanmaktadır.



Şekil 2.11. Anne karnındaki fetüsün 3D yazıcıdan alınmış çıktısı

2.1.3. Eğitim Alanı

3D teknolojisinin sunmuş olduğu derinlik bilgisi, öğretimi sağlanacak nesnelere gerçek dünyadakine en yakın şekilde sunulmalarını sağlamaktadır. Böylece eğitimin verimi artırılmaktadır. Eğitimde bazı konuların öğretiminde 3D teknolojisinin kullanımı zorunludur. Bu tip konularda fotoğrafla öğretim yapılmaya çalışılması verimi düşürmektedir. Şekil 2.12’de eğitimde kullanılan 3D görüntüler verilmiştir [13].



Şekil 2.12. Beyin ve kulağa ait 3D görüntüler

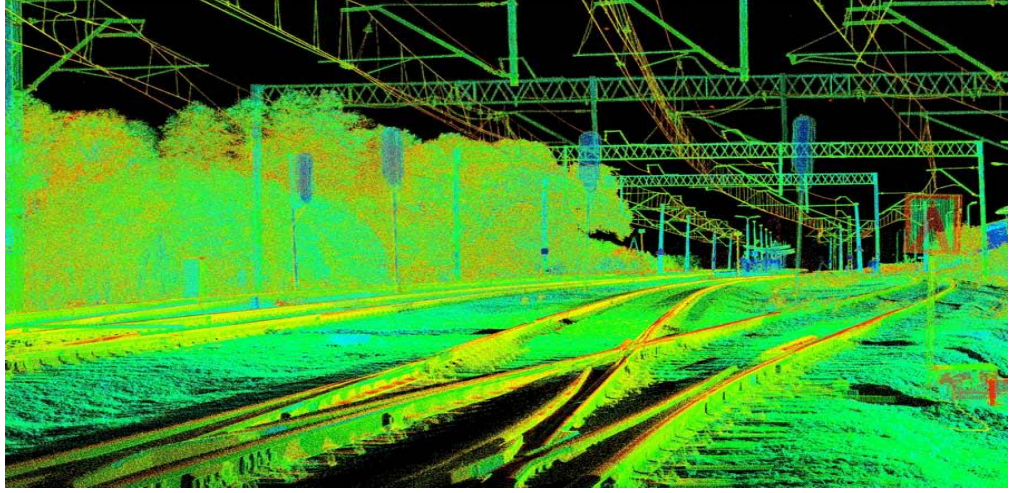
İç organların çeşitli tekniklerle görüntülenmesinin ardından 3D yazıcılarla prototipleri elde edilmektedir. Elde edilen bu prototipler eğitim amacıyla sıklıkla kullanılmaktadır.

2.1.4. Harita Kadastro Alanı

Son zamanlarda harita kadastro alanında 3D görüntüleme tekniklerine yoğun bir şekilde başvurulmaktadır. Farklı 3D görüntüleme teknikleriyle bina, yol, köprü gibi yerlerin modellenmesi sağlanır. Şekil 2.13.a'da tren rayları, şekil 2.13.b'de ise 3D modeli çıkarılan tren rayları görülmektedir [14].



a) 3D modeli çıkarılacak tren rayları



b) 3D modeli çıkarılmış tren raylarının nokta kümesi
Şekil 2.13. 3D modelleme işlemi

Şekil 2.14.a'da bir binanın 3D modellemesi için kullanılan lazer tarama düzeneği, şekil 2.14.b'de ise binanın 3D modellenmiş hali görülmektedir [14].



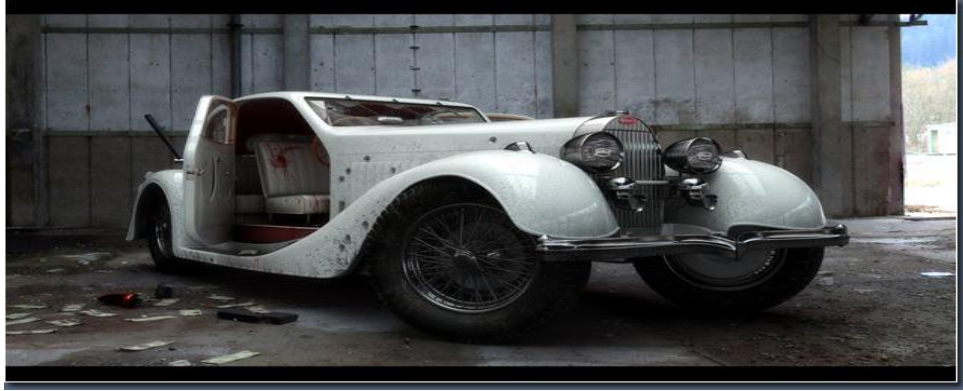
a) 3D modelleme düzeneği

b) 3D modeli çıkarılmış bina

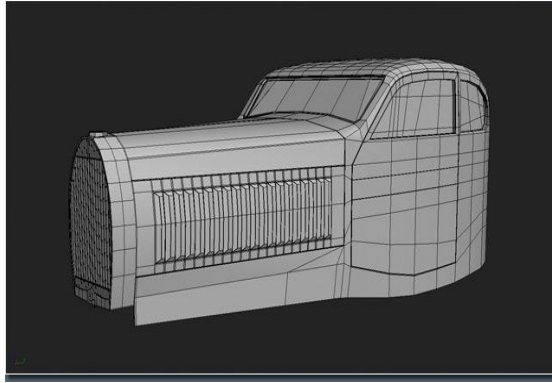
şekil 2.14. 3D modelleme işlemi

2.1.5. Otomotiv Sektörü

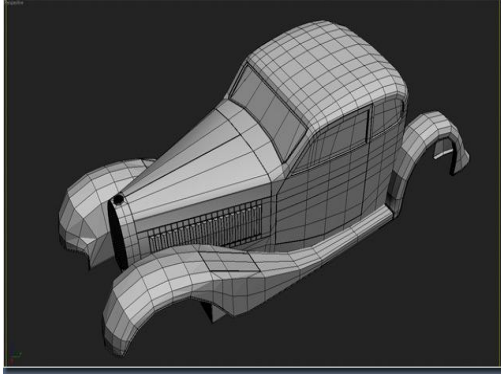
Otomotiv sektöründe hizmet veren firmalar otomobil tasarımında 3D görüntüleme tekniklerini sıklıkla kullanmaktadır. Var olan bir otomobil modelini yenilemek için aracın 3D modeli bilgisayar sistemlerine aktarılır ve üzerinde değişiklikler yapılır. şekil 2.15.a’da görülen otomobilin çeşitli profillerden görüntüleri şekil 2.15.b, şekil 2.15.c ve şekil 2.15.d’de verilmiştir [15].



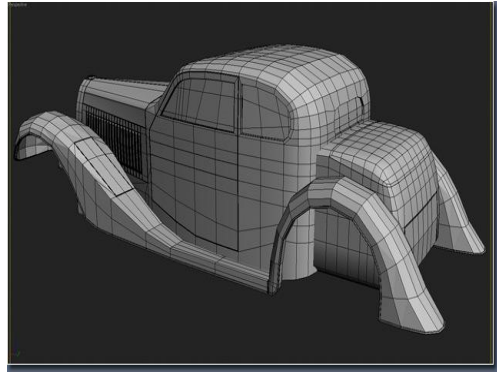
a) Modellenek otomobil



b) Otomobilin 3D görüntüsü 1



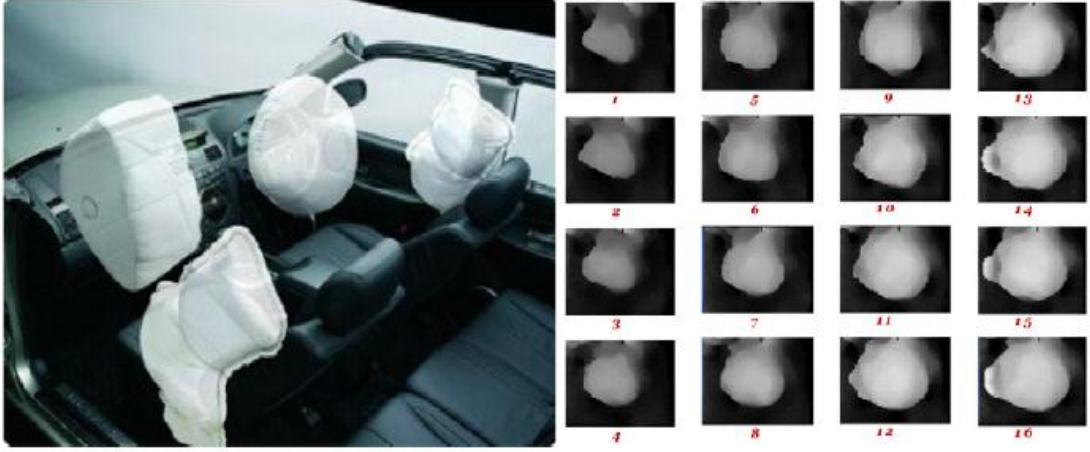
c) Otomobilin 3D görüntüsü 2



d) Otomobilin 3D görüntüsü 3

Şekil 2.15. Modellenek otomobil ve çeşitli açılardan aracın modelleme sonuçları

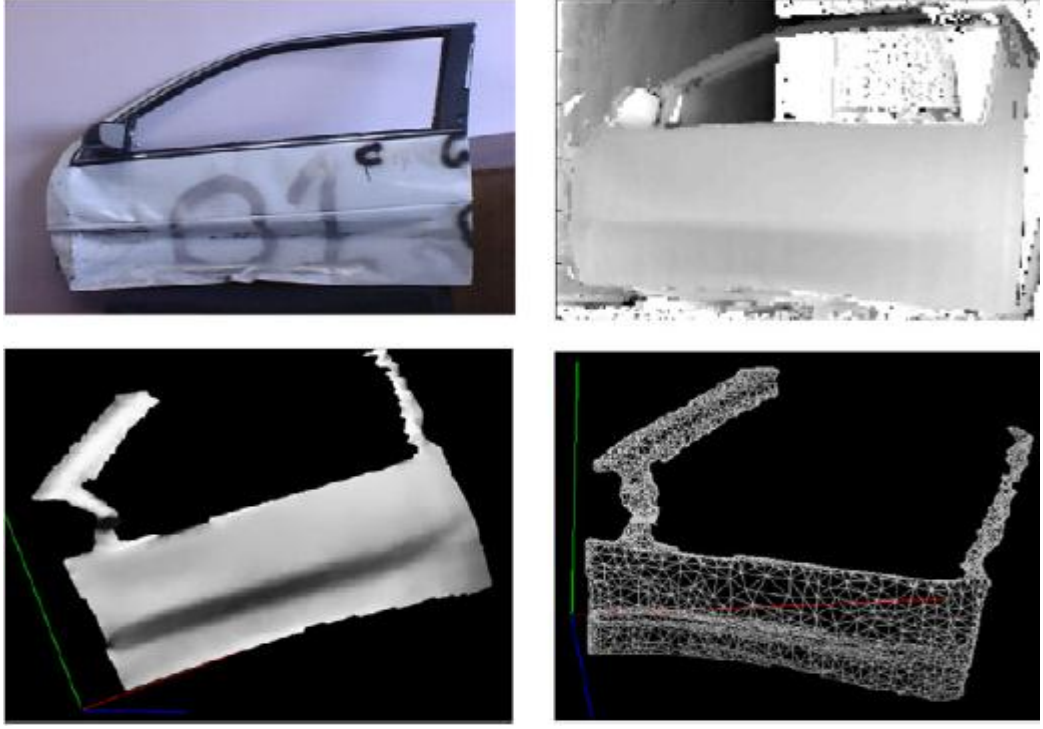
Yüksek hızlı 3D görüntüleme teknolojileriyle, sürücü ve yolcu güvenliğini üst noktaya çıkarabilmek için hava yastığının davranışı analiz edilmektedir. Hava yastığının ne kadar sürede açıldığı ve hangi pozisyonda ne kadarlık hacimde olacağı gibi önemli bilgiler 3D görüntüleme sistemleri ile elde edilmektedir. Şekil 2.16’da kaza yapmış bir aracın hava yastıklarının çeşitli açılardan 3D modelleri verilmiştir [9].



Şekil 2.16. Hava yastığının modellenmesi için yüksek hızlı 3D görüntüleme teknolojilerinin kullanımı

2.1.6. Kazaların Araştırılması

Trafik kazaları karmaşıktır ve kaza sonrasında taraflar ihtilafa düşebilmektedirler. Kazaların daha iyi anlaşılabilmesi için bilirkişilerce kaza görüntüleri ayrıntılı olarak incelenmelidir. 3D modelleme teknikleri ile kaza görüntüleri 3D modellerinin çıkarılması ihtilafların yok edilmesi için büyük avantajlar sağlamaktadır. Kasko firmaları tarafından da kazanın 3D model görüntülerinin incelenmesi daha objektif karar verilmesi sağlanabilmektedir. Şekil 2.17’de kazalı bir araba kapısı ve 3D modellenmiş görüntüleri verilmiştir [9].



Şekil 2.17. Kazalı kapının 3D modellenmiş görüntüleri

2.1.7. Eğlence Sektörü

3D tarayıcı cihazlar oyun ve sinema sektörlerinde sayısal 3D modeller oluşturmak için eğlence endüstrisi tarafından sıklıkla kullanılır. Bir modelin gerçek dünyada eşdeğeri mevcut ise 3 boyutlu modelleme yazılımı ile taranarak 3D modeli elde edilebilmektedir [16]. Bu durum çalışmalarda hız ve kaliteyi arttırmaktadır.

Şekil 2.18’de oyun tasarım aşaması görülmektedir [17]. Şekilde masa üzerinde bulunan oyun karakterlerinin 3D modellemesi gerçekleştirildikten sonra oyun ortamına aktarılıp oyun tasarımı yapılmaktadır.



Şekil 2.18. Oyun tasarım aşaması

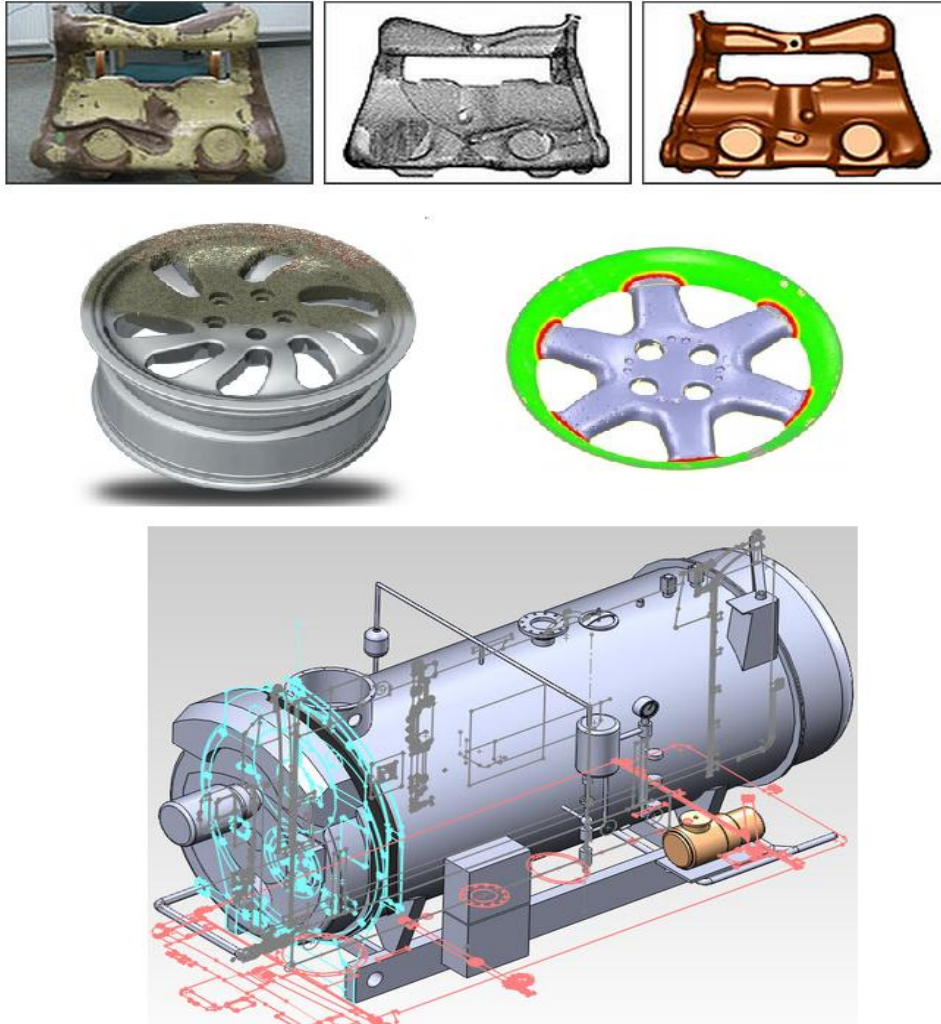
2.1.8. Tersine Mühendislik

İşletmelerin, teknolojiyi kendi bünyelerinde en ideal şekilde kullanmaları üretim süreçlerindeki verimi üst noktaya çıkaracaktır. Böylece müşteriler için daha kaliteli ürünler daha kısa sürede üretilmiş olacak ve rakip işletmelere karşı üstünlük sağlanacaktır. Bu durum, günümüzde artan müşteri taleplerindeki değişim ve çeşitlilik karşısında zorunluluk olarak ortaya çıkmaktadır. İşletmelerde çeşitli süreçlerde kullanılan yeni teknolojilerden birisi de tersine mühendisliktir. Tersine mühendisliğe tıp, savunma sanayi, eğitim gibi sektörlerde yaygın olarak başvurulmaktadır.

3D modelleme alanında tersine mühendislik, var olan bir nesnenin tasarım bilgilerinin bulunmadığı durumlarda, nesneyi yeniden üretebilmek veya geliştirebilmek amacıyla, ürünün üç boyutlu uzayda sayısal tasarım bilgilerinin elde edilmesidir [16]. Tersine mühendislik uygulamalarının en önemli elemanları sayısallaştırıcı / tarayıcılar, hızlı 3D modelleme makineleri, tersine mühendislik yazılımları olmak üzeredir.

Tersine mühendislik uygulanırken ilk aşamada, temaslı ya da temassız ölçüm metodlarından birisi kullanılarak nesneye ait nokta bulutu elde edilmektedir. Nokta bulutu verisi işlenerek nesnenin üç boyutlu modelini elde etmek için kullanılmaktadır. Elde edilecek modelin kalitesi, nesnenin ölçülen nokta sayısına, ölçüm tipine, doğruluğuna ve ölçüm için kullanılan cihazın cinsine bağlı olarak değişmektedir [18]. Bu model aynı zamanda CAD sistemleri tarafından desteklenmektedir. Böylece üzerinde değişiklik yapmak mümkün olmaktadır.

Ürünlerin tasarım süreçlerinde yapılan analizler ile hatalı ürün üretilmesinin önlenmesi amaçlanmaktadır. Tersine mühendislik teknolojisi bu analiz sürecinde etkili bir şekilde kullanılmaktadır. Tersine mühendisliğin sunmuş olduğu görsel çalışma ortamından dolayı ürünün tasarımında yapılan hatalar kolayca fark edilebilmektedir. Tersine mühendislik ile mevcut nesnenin çoğaltılması, zarar görmüş ya da tahrip olmuş parçaların kurtarılması, düzeltilmesi ve yeniden tasarlanması, nesnenin istenen ölçütlere çıkarılması, gerekli 3D modelin ve modele ait sayısal verilerin elde edilmesi ve denetlenmesi işlemleri gerçekleştirilebilmektedir. Şekil 2.19’da tersine mühendislik alanında modelleme örnekleri görülmektedir [19,20,21].



Şekil 2.19. Tersine mühendislikte 3D modelleme

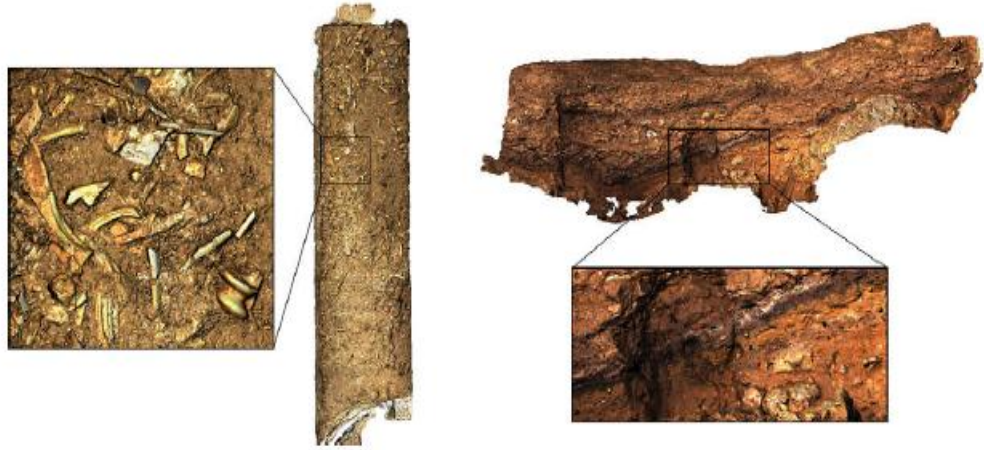
2.1.9. Kültürel Mirasların Analizi

Son yıllarda arkeologlar tarafından arkeolojik araştırmalarda bilgisayarlı görüntüleme tekniklerine sıklıkla başvurmaktadır. 3D görüntüleme teknikleri ile tarihi meknların ve eserlerin yüksek znrlkte incelemesi sağlanmaktadır. Şekil 2.20’de arkeolojik alan ve bu alanın görüntülenmesi için gerekli düzenek görülmektedir [22].

Şekil 2.21’de toprak üzerinde gösterilen bölgelerin 3D görüntüleme sonuçları verilmiştir [22].



Şekil 2.20. Arkeolojik alan ve bu alanın görüntülenmesi için gerekli düzenek



Şekil 2.21. Toprak üzerinde gösterilen bölgelerin 3D görüntüleme sonuçları

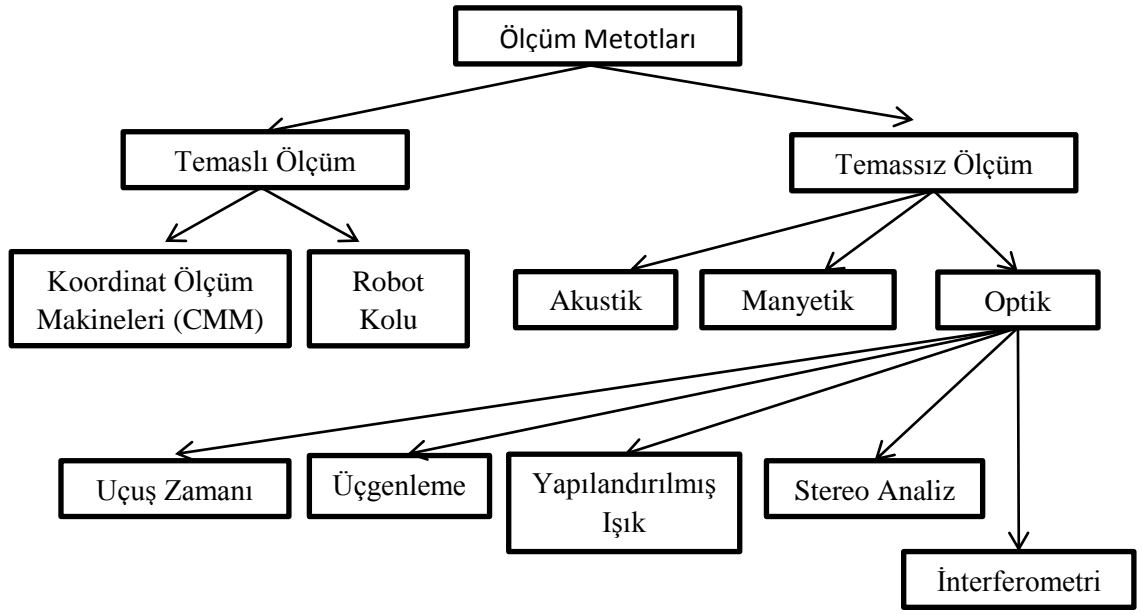
2.2. 3D Görüntüleme Metotları

Nesnelerin bilgisayar ortamında üç boyutlu olarak modellenebilmeleri için 3D yüzey görüntüleme teknolojileri çeşitli ölçüm metotlarına başvurmaktadır. Ölçüm metotları sayesinde nesnenin ya da nesnelerin üç boyutlu modellemeleri için gerekli nokta bulutu oluşturmaktadır. Elde edilen nokta bulutu yazılımlarla işlenerek nesnenin üç boyutlu görünümü elde edilmektedir [23]. Ölçüm metotları:

- Temas ederek ölçüm yapan cihazlar
- Temas etmeden ölçüm yapan cihazlar

olmak üzere temel iki gruba ayrılmaktadır.

Temaslı ölçüm metotları koordinat ölçme makineleri ve robot kolu olmak üzere ikiye, temassız ölçüm ise manyetik, akustik ve optik olmak üzere üçe ayrılmaktadır. Optik metotlar ise lazer üçgenleme, uçuş zamanı, interferometri, yapılandırılmış ışık, stereo analiz olmak üzeredir. Şekil 2.22’de bu ölçüm metotları görülmektedir [2,7].



Şekil 2.22. 3D modelleme ve ölçüm metotları

2.2.1. Temaslı Ölçüm Metotları

Temaslı ölçüm tekniğinde nesne fiziksel temas ile taranarak modellenmektedir. Bu teknikte, ölçüm kolu üzerinde bir algılayıcı bulunmaktadır. Algılayıcı parça modellenecek nesne yüzeyinde gezdirilerek üç boyutlu uzaydaki koordinat bilgilerine (x,y,z) ulaşılır. Elde edilen koordinatlara bağlı olarak nesnenin üç boyutlu modelleme işlemi gerçekleştirilmiş olmaktadır.

Simetrik nesnelere temaslı ölçümün kullanımı avantajlar doğurabilmektedir. Örneğin bir kutunun simetrik olarak sağ ve sol kısımlarına yapılacak olan işlem süreci aynı olduğu için bu metod avantaj içermektedir. Kutunun bir yarısı için yazılmış kontrol programı birkaç saniye içinde diğer yarısı için adapte edilebilir.

Koordinat ölçme makineleri bir ölçüm probunu hareket ettirerek bir nesnenin yüzeyinin koordinat ölçümünü yapmaktadır. Koordinat ölçme tezgâhları tezgâh, ölçüm sensörü, kontrol kısmı, ölçüm yazılımı olmak üzere dört ana bileşenden oluşmaktadır. Koordinat ölçüm tezgâhları, nesnelerin ebatlarının ölçümü, açısal ölçüm, derinlik ölçümü, görüntüleme gibi amaçlarla kullanılabilir. Koordinat ölçme tezgâhları elle, bilgisayarla ya da CNC cihazlarıyla kontrol edilebilir [16]. Şekil 2.23'te temaslı ölçüm tekniğiyle ilgili örnek bir şekil görülmektedir [24].



Şekil 2.23. Temaslı ölçüm tekniğiyle ölçüm

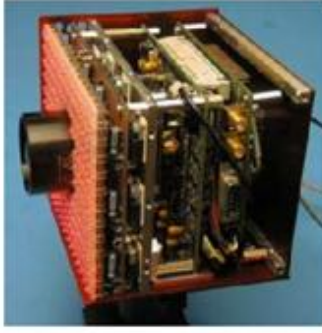
Temaslı ölçüm sisteminin dezavantajlarına örnek olarak ölçüm yapılabilmesi için konum algılayıcı sensörün modellenecek nesneye temas etme zorunluluğu, nesnelerin temas sırasında yıpranması, hassas nesnelerin kırılması gösterilebilir. Ayrıca kompleks yüzeyli nesnelerin tüm yüzeyinde sensörün gezdirilmesi mümkün olmadığı durumlarda modellemede problemler ortaya çıkabilmektedir.

2.2.2. Temasız Ölçüm Metotları

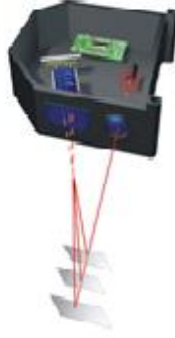
Ölçüm sisteminin nesneye temas etmeksizin üç boyutlu modelleme yapılabildiği tekniktir. Temasız ölçümlerde özel algoritmalar kullanılarak üç boyutlu modeller elde edilebilmektedir. Bu metot ile karmaşık yüzeyli ve hareketli nesnelerin 3D modelini yapmak mümkündür. Temaslı ölçüme göre daha kısa sürede ve daha yüksek performansta sonuçlar elde edilebilmektedir.

Temasız metotlar Şekil 2.22'de de görüldüğü gibi optik, manyetik ve akustik olarak gruplandırılabilir. Optik metotlar ise lazer üçgenleme, uçuş zamanı, interferometri, yapılandırılmış ışık ve stereo analiz teknikleri olmak üzere 5'e ayrılmaktadır. Şekil 2.24'te temassız ölçüm prensibine dayanan ölçüm sistemleri görülmektedir [24, 25, 26, 27, 28, 29,30].

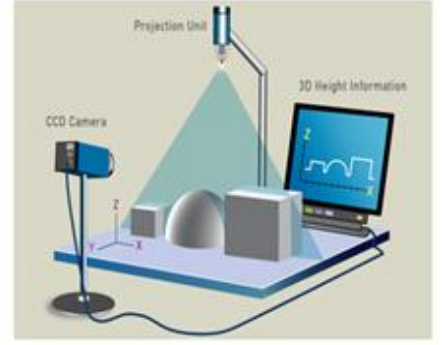
Manyetik ve akustik temassız ölçüm tekniklerinde derinlik bilgisi temas edilmeden ölçülmesine rağmen tüm modelin mekanik olarak taranması gerektirdiğinden temassız ölçüm tekniklerine de yakındırlar.



a) Uçuş zamanı



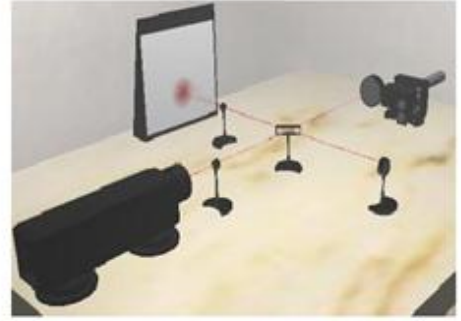
b) Üçgenleme



c) Yapılandırılmış ışık



d) Stereo Analiz

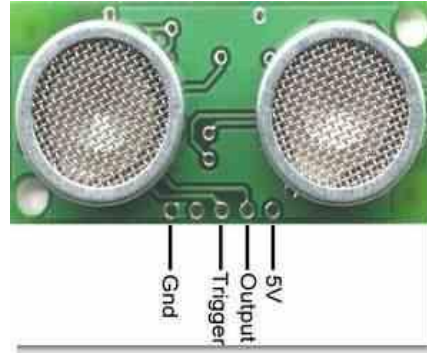


e) İnterferometre

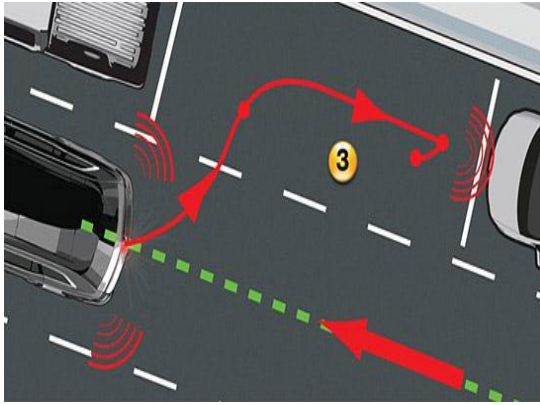
Şekil 2.24. Temassız ölçüm sistemleri

2.2.2.1. Akustik Ölçüm Metodu

Temassız ölçüm tekniklerinden akustik metot, mesafe ölçümü için ses dalgasını kullanmaktadır. Yüzyıllardır bu ölçüm metodu kullanılarak mesafe tayini yapılmaktadır [2,16]. Akustik metotta ses kaynağı bir nesne yüzeyinden yansıtılır ve sesin hızı bilindiğinden kaynak ile nesne yüzeyi arasındaki mesafe tespit edilmektedir. Bu metodun temel dezavantajı akustik karışma ve parazittir. Şekil 2.25'te ultrasonik mesafe ölçer görülmektedir [31].



Şekil 2.25. Ultrasonik mesafe ölçer devresi



a) Park asistanının çalışması



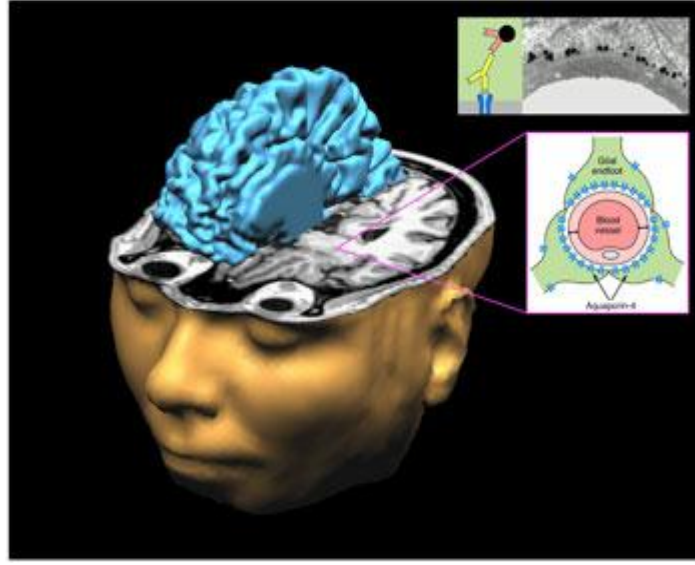
b) Bilgi ekranı

Şekil 2.26. Akıllı araç park asistanı

Ultrasonik mesafe ölçerler otomotiv sektöründe yaygın şekilde kullanılmaktadır. Araçlarda kullanılan ultrasonik park asistanı, park edilecek alanda mesafe ölçümü yaparak aracın otomatik olarak park etmesini sağlamaktadır. Ultrasonik park asistanının çalışmasını anlatan resim şekil 2.26.a'da, çevre görüş sistem ekranı ise şekil 2.26.b'de verilmiştir [32].

2.2.2.2. Manyetik Ölçüm Metodu

Manyetik ölçüm metodunda manyetik alanın nesne yüzeyine temas etmesi sonucunda hesaplamalar yapılarak mesafe ölçümü gerçekleştirilmektedir. Manyetik alan ölçümü, kaynağından çıkan manyetik bir alanın alıcılar kullanılarak algılanması ile bağlantılı bir tekniktir. Manyetik alan algılayıcıları mesafe ve nesne yönelimi hakkında bilgi vermektedir.



Şekil 2.27. MR tekniği ile beyin görüntüleme

Manyetik ölçüm sistemlerinden olan MR cihazı manyetizmaya esasına dayalı olarak çalışmaktadır. Bu metotta nesne üzerine radyo dalgaları gönderilir ve belirli bir frekansta alınan bu radyo dalgaları çaptığı yüzey tarafından geri yansıtılmaktadır. MR cihazı yansıyan bu dalgaları işleyerek 3D görüntüyü oluşturur. Şekil 2.27 'de 3D MR görüntüleme teknolojisi ile elde edilen görüntü görülmektedir [33].

2.2.2.3. Optik Ölçüm Metotları

Nesnelerin yüksek hassasiyette 3D modellemesini gerçekleştirmede kullanılan metotlar ailesidir. Bu metotlar uçuş zamanı, üçgenleme, yapılandırılmış ışık, stereo analiz ve interferometre şeklindedir.

2.2.2.3.1. Uçuş Zamanı Metodu

3D modelleme sistemlerinde kullanılan uçuş zamanı tekniğinde kaynak, hedef yüzeye çarpan bir lazer darbesi üretmektedir. Alıcı birim ise yansıtılan bu darbeyi denetlemekte ve uygun bir elektronik devre ile geri dönen sinyalin seyahat zamanını ve yoğunluğunu bulmaktadır. Lazer, ışın darbesi yaymak için kullanılır ve yansıtılan ışının algılayıcı tarafından görülmesinden önce geçen süre hesaplanır. Işık hızı bilinen bir

değer olduğu için tur zamanı hesaplanarak tarayıcı ile yüzey arasındaki uzaklık belirlenmektedir. Şekil 2.28'de uçuş zamanı ölçüm sisteminin çalışma prensibi görülmektedir [34,35].

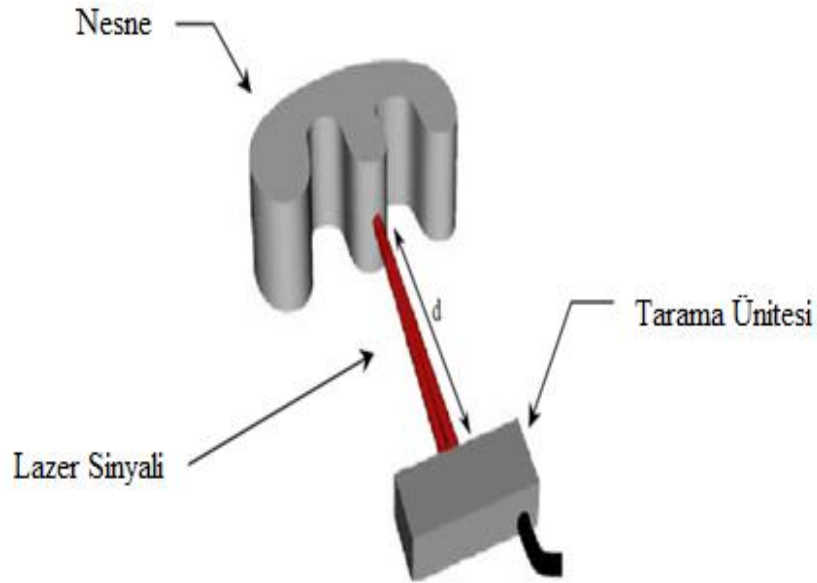
Denklem (2.1)'e bağlı olarak hız bulunabilmektedir.

$$Hız \left(\frac{m}{s} \right) = \frac{mesafe (m)}{zaman(s)} \quad (2.1)$$

Nesne yüzeyine olan mesafe ışık darbesinin seyahat mesafesinin $\frac{1}{2}$ 'sidir, mesafeyi bulabilmek için denklem (2.2) kullanılabilir [34].

$$Mesafe (metre) = 1.5 \times 10^8 (m/s) \times zaman (s) \quad (2.2)$$

Yüksek hızlarda gerçekleşen ışık seyahatlerinin dönüş zamanının hesaplanmasında yüksek hassasiyet gerektiren gelişmiş devreler kullanılmaktadır.



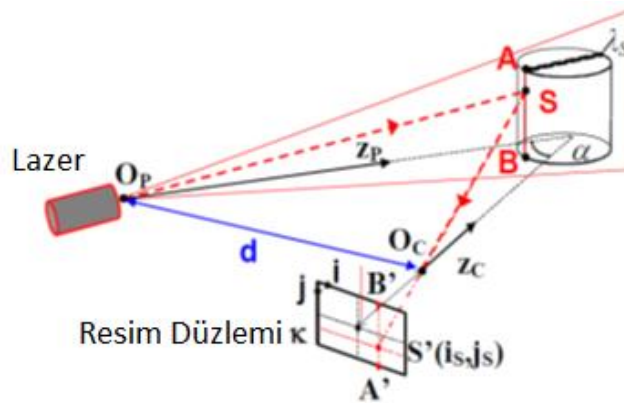
Şekil 2.28. Uçuş zamanı ölçüm sistemi

2.2.2.3.2. Üçgenleme Metodu

Üçgenleme tekniğinde lazer ışınından faydalanarak nesne taramaktadır. Lazer kaynağı nesnenin üzerine lazer ışını göndermekte ve nesne üzerine düşen lazerin pozisyon tespiti için bir kamera kullanılmaktadır. Kamera, lazer kaynağı ve lazerin nesne yüzeyine çarptığı nokta bir üçgen şeklini oluşturduğundan bu tekniğe üçgenleme tekniği denilmektedir. Şekil 2.29'da üçgenleme tekniğinin çalışma prensibi görülmektedir. Kameradan alınan görüntü şekil 2.29'da resim düzlemi K olarak belirtilmiştir [35]. O_p ve O_c , lazer ve kameranın çıkış lenslerinin giriş/çıkış noktalarıdır. Kamera ve resim düzlemi arasındaki mesafe d olarak ifade edilmiştir. Optik eksenler olan z_p ve z_c 'ye göre α açısı sistemin kurulumu neticesinde sabittir.

Lazer kaynağından yola çıkan sinyal, S noktasında nesneye çarpmaktadır. Yansıyan ışın resim düzleminde S' noktasına karşılık gelmektedir. Üçgenleme tekniğinde uygun geometrik dönüşümler kullanılarak S'nin pozisyonu bulunmaktadır. Lazer kaynağından gönderilen dik şerit nesne üzerinde yatay olarak hareket ederek yüzeyin tamamının ölçümü yapılmaktadır [35].

Lazer şeritleri şekil 2.29'da görülen sistem ile nesneyi taramaktadır. Lazer bir yön boyunca ışık ışını yayan silindirik bir lense sahiptir. Böylece bir ışık düzlemi üretilmekte ve nesnenin çok sayıda noktası aynı anda aydınlatılmaktadır. Şekil 2.29'da ışık düzlemi λ_s aracılığıyla belirtilmiştir. Böylece düzlem ile bilinmeyen obje arasında kesişim noktaları aydınlatılmaktadır. Resim düzleminde görülen A'den B'ye tüm resim noktalarının konumlarının ölçümü, aydınlatılmış noktalar ile haberleşme gerçekleştirilerek nesnenin 3D modelin belirlenmesini sağlanmaktadır.

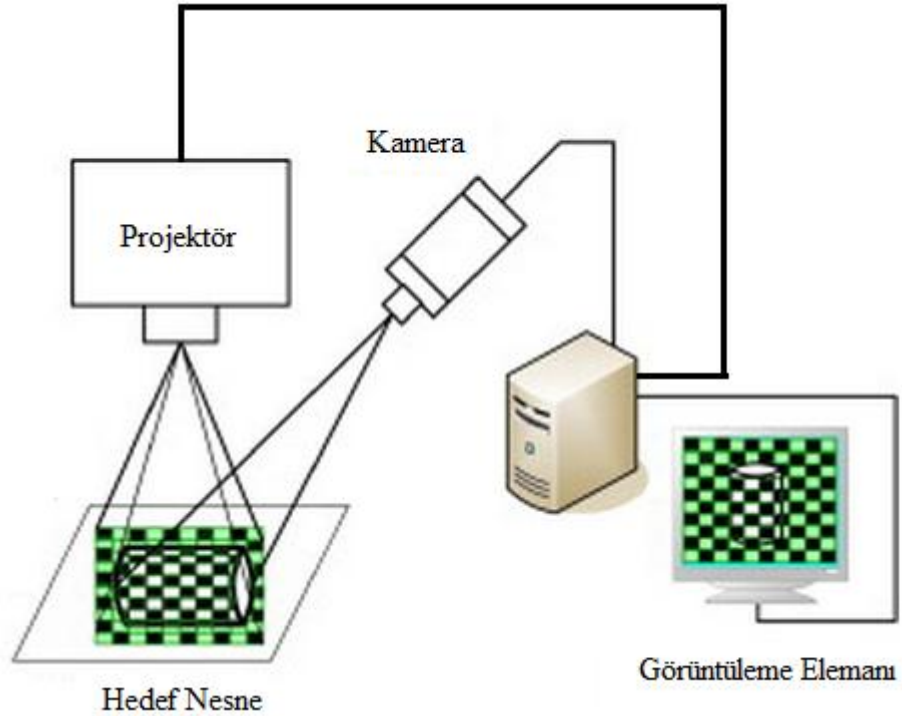


Şekil 2.29. Üçgenleme prensibinin şeması

Lazer üçgenleme metotları, verimlerinin yüksek olması ve yüzey doku etkileri ile aydınlatma koşullarından daha az etkileniyor olmaları sayesinde diğer metotlardan ayrılmaktadır. Tekil nokta üçgenlemeleri yüzey kalite kontrolünün yanı sıra çap, kalınlık, mesafe ölçümü için endüstride yaygın şekilde kullanılmaktadır. Lazer şeritleri kalite kontrol, tersine mühendislik ve kültürel mirasların modellenmesi alanlarında sıklıkla kullanılmaktadır.

2.2.2.3.3. Yapılandırılmış Işık Metodu

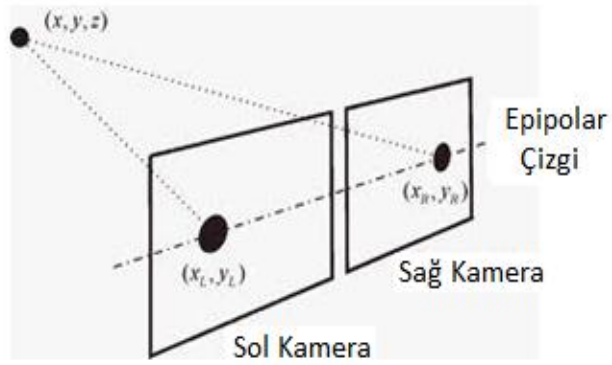
Yapılandırılmış ışık projeksiyon makinesi, kamera ve bilgisayar kullanılarak nesne ya da nesnelerin üç boyutlu modellemesini gerçekleştirebilen bir optik ölçüm metodudur. Yapılandırılmış ışık metodu 3D şekil ölçümü için şekil 2.30'da görülmekte olan sisteme benzer bir kurulumu kullanmaktadır [36]. Belirli metotlar ile kodlanan yapılandırılmış ışık desenlerini yansıtmak için projeksiyon makinesi kullanılmaktadır. Kamera ise sahnenin fotoğrafını bilgisayara aktarmak için kullanılır. Sahne görüntüleri bilgisayar tarafından işlenerek 3D bilgisine ulaşılmaktadır. Yapılandırılmış ışık metodu daha ayrıntılı olarak 4. bölümde ele alınacaktır.



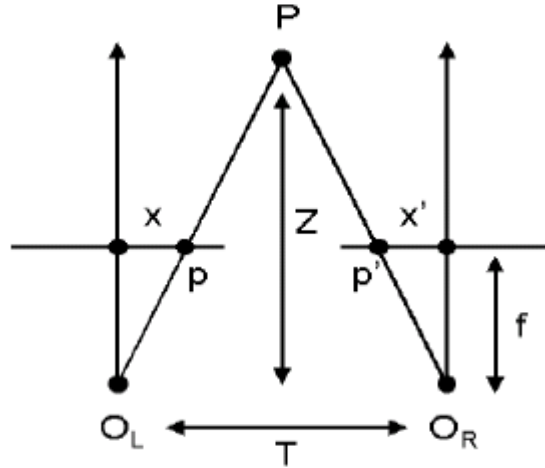
Şekil 2.30. Yapılandırılmış ışık tekniği için gerekli düzenek

2.2.2.3.4. Stereo Analiz Metodu

Gerçek zamanlı olarak 3D modelleme yapabilen Stereo Analiz, önemli bir temassız ölçüm tekniğidir. Stereo Analiz sisteminde farklı pozisyonlara yerleştirilmiş iki kameradan gerçek zamanlı olarak görüntüler alınmaktadır. Stereo Analiz sisteminin kurulumu şekil 2.31’de görülmektedir.



Şekil 2.31. Stereo analiz sistemi



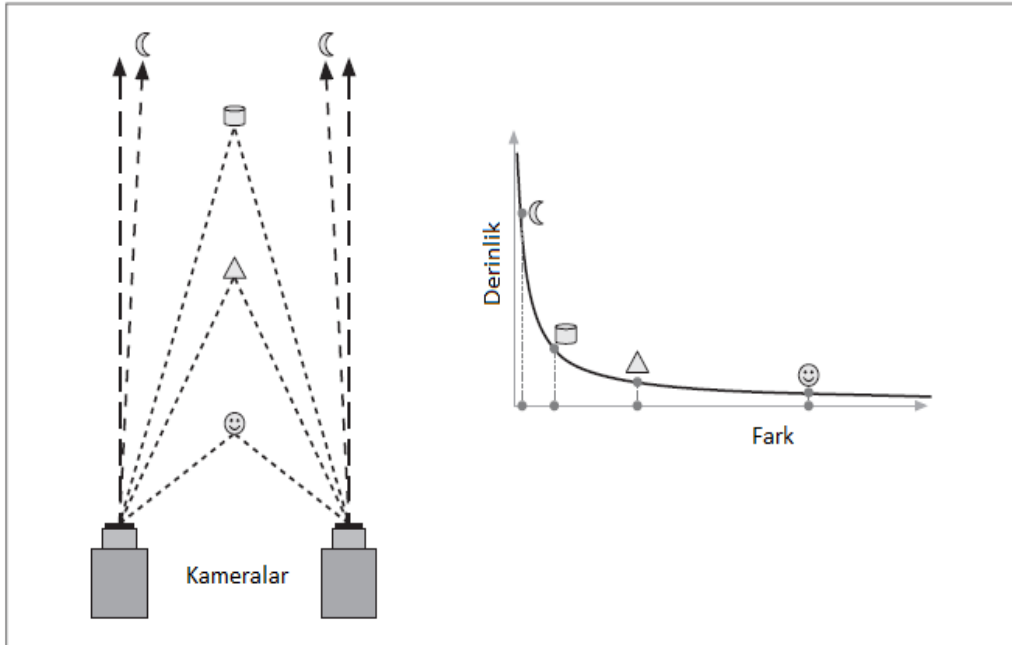
Şekil 2.32. İki kameralı sisteme ait eksen yapılandırması

Stereo analiz sisteminde kameralar ve ölçüm noktası arasındaki geometrik ilişki şekil 2.32’de gösterilmiştir [37]. İlgili şekilde görülen T kameraların arasındaki

uzaklığı, Z nesnenin derinliğini, f odak uzaklığı ve d ise her iki resimde aynı noktalar arasındaki farktır. Buna karşılık derinlik denklem (2.3)'e bağlı olarak elde edilebilmektedir. Sağ ve sol görüntüleyicilerin yatay pozisyonu olan x ve x' , kamera görüşleri arasında fark ile ters orantılıdır. Burada fark $d=x-x'$ yardımıyla tanımlanabilmektedir.

$$Z = f \frac{T}{d} \quad (2.3)$$

Derinlik, d parametresiyle ters orantılıdır ve iki terim arasında lineer olmayan bir ilişki bulunmaktadır. Fark 0'a eşit olduğu zaman, modellenecek nesnenin küçük miktardaki hareketi büyük derinlik farklılıklarına yol açacaktır. Çünkü, farkın 0'a eşit olması nesnenin uzak konumda olduğunu göstermektedir. Fark büyük olduğunda nesne yakındadır ve nesne hareketliliği problem oluşturmaz. Şekil 2.33'te kamera ve odaklanılan nokta arasındaki mesafeye bağlı olarak fark değişimi grafiksel olarak gösterilmektedir [38].



Şekil 2.33. Derinlik ve fark arasındaki ilişki

Stereo analiz metoduyla iki kameradan alınan görüntü çifti işlendikten sonra şekil 2.34'te görülen derinlik haritası oluşturulmaktadır [39,40]. Derinlik haritası aracılığıyla 3D geometrisi elde edilir.



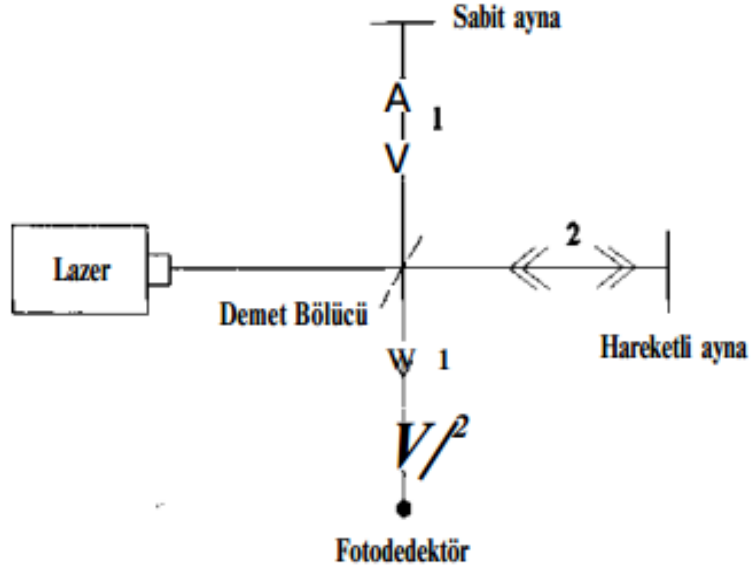
Şekil 2.34. Stereo analiz sistemiyle elde edilen derinlik haritası.

Stereo görüş tekniği bir takım dezavantajlar içermektedir. Bunlardan ilki derinlik bilgisine ulaşılabilecek noktaların farklı resimler üzerinde hangi pozisyonlara karşılık geldiğinin bulunmasıdır. Buna eşleme problemi denilmektedir. Stereo analiz sistemlerinde eşleme aşamasında çoğu zaman problemler yaşanmaktadır [41]. Bu problemi aşabilmek için çeşitli algoritmalar geliştirilmiştir. Bunun dışında stereo görüş ile gerçek zamanlı olarak 3D bilgisine ulaşılabilmemesine karşın, sunmuş olduğu derinlik bilgisi yapılandırılmış ışık tekniğine göre daha az detay bilgisine sahiptir.

2.2.2.3.5. Interferometri Metodu

Interferometri metodu girişim modelleri aracılığıyla dalga boyu cinsinden mesafeyi ölçmektedir. Bu metotla mesafe ölçümü yaparken ışık kaynağı, ayna ve detektör kullanılarak şekil 2.35'te görüldüğü gibi konumlandırılır [42]. Girişimölçer ya da interferometre ışığın girişim özelliğinden faydalanılarak çok küçük mesafelerin ve

maddelerinin kırılma indislerinin ölçümünde ve saydam cisimlerin yüzeylerinin düzgünlüğünün kontrolünde kullanılan bir ölçü aletidir.



Şekil 2.35. İnterferometri metodunun şeması

Şekil 2.35 'te görülen lazerden çıkan ışın demeti, demet bölücü ışını ikiye ayırır. Işın demeti sabit ve hareketli aynadan yansıyıp ayrı bir yol üzerinden yansıtılarak foto algılayıcı üzerine düşürülmektedir. Foto algılayıcıda gelen bu ışık ışınları arasında girişim olayı meydana gelmektedir. Şekil 2.35'te görülen hareketli aynanın pozisyon değişimi sayesinde iki dalga arasındaki yol farkı da değiştirilebilmektedir. Hareketli aynanın pozisyon değişimi gerçekleştirildiğinde lazer iki ışınının izlemiş olduğu yolda değişecektir. Örneğin hareketli aynanın pozisyonu a birim kadar değiştirilecek olursa, 2 numaralı ışının giderken ve aynadan döndüğünden optik yol farkı, $2a$ olacaktır. Hareketli aynanın pozisyonuna bağlı olarak foto algılayıcıya gelen bu iki ışının oluşturacağı girişim olayı da farklılaşacaktır. Elektronik sayıcı devre aracılığıyla foto algılayıcıda oluşan girişim saçaklarının sayılmasıyla dalga boyu cinsinden mesafe bulunmaktadır [42, 43].

Yüzlerce nanometrelik dalga boyu genişliği sayesinde diğer temassız ölçüm metotlarına göre daha hassas ölçümler yapılabilmektedir [2]. Yüksek çözünürlükte

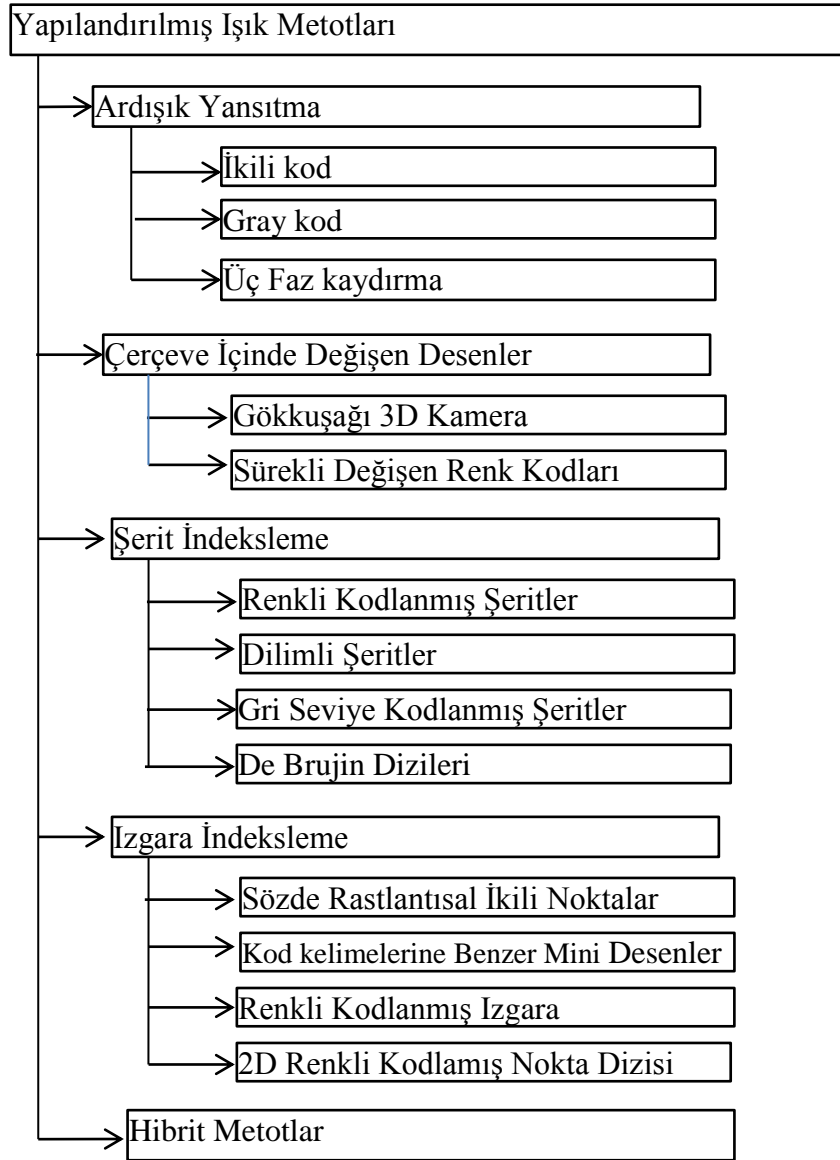
modelleme yapılabilðiinden yüzey kalite kontrolünde sıklıkla başvurulan tekniktir. Bu prensibe bağı olarak çalışan sistemler koordinat ölçüm makinelerini kalibre etmek için kullanılmaktadırlar [35].

BÖLÜM 3

YAPILANDIRILMIŞ IŞIK

Bu metot kamera ve projeksiyon ikilisi kullanmaktadır. Projeksiyon, sahneye belirli kodlama metotları aracılığıyla kodlanmış desen ya da desenler yansıtılmaktadır. Yansıtılan desenler belirli bir algoritmaya göre üretildiklerinden dolayı bu metot yapılandırılmış ışık olarak adlandırılmaktadır. Nesne üzerine yansıtılan bu desenler kamera aracılığıyla kaydedilmektedir. Yansıtılan ve kameradan alınan bu görüntüler arasındaki ilişki yorumlanarak 3D derinlik bilgisine ulaşılmaktadır.

Yapılandırılmış ışık ile 3D modellemede çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler temelde tekli çekim ve çoklu çekim olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadırlar. Çoklu çekim tekniklerinde birden fazla desen sahneye yansıtılıp fotoğrafları alınmaktadır. Tekil çekimde ise sadece tek bir desen sahneye yansıtılıp fotoğrafı alınır. Bu bölümde, şekil 3.1’de görülmekte olan ardışık yansıtımalı 3D yüzey görüntüleme teknikleri incelenmektedir [9]. Yapılandırılmış ışık ile 3D yüzey görüntüleme işleminde kullanılan teknik sistemin performansını, özellikle de 3D modelin gerçeklik düzeyini doğrudan etkilemektedir.

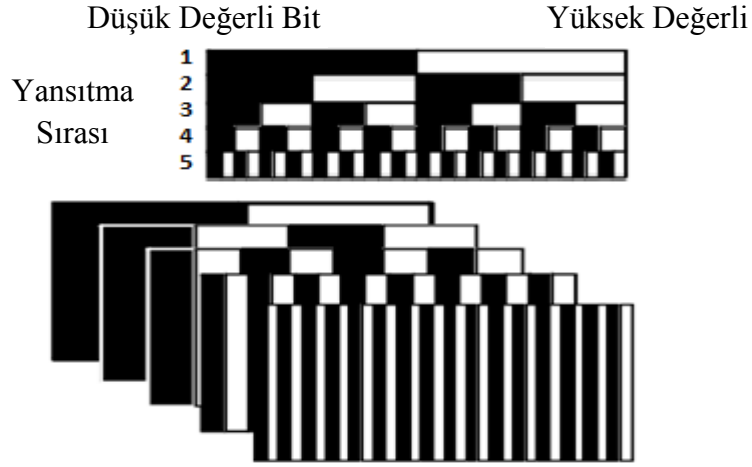


Şekil 3.1. Yapılandırılmış ışık temelli 3D görüntüleme tekniklerinin sınıflandırılması

3.1. Ardışık Yansıtma

Bu teknikler birden fazla kodlanmış desen nesne üzerine yansıtılıp bu çoklu desenler kamera aracılığıyla alındığından, ardışık yansıtma yöntemleri olarak adlandırılmaktadır. Ardışık yansıtma teknikleri kendi arasında ikili kod, gray kod, faz kaydırma olmak üzere üçe ayrılmaktadır. Ayrıca hibrit metodu birden fazla metodu bünyesinde barındırdığından, ardışık yansıtma tekniğini de kullanmaktadır.

3.1.1. İkili Kod



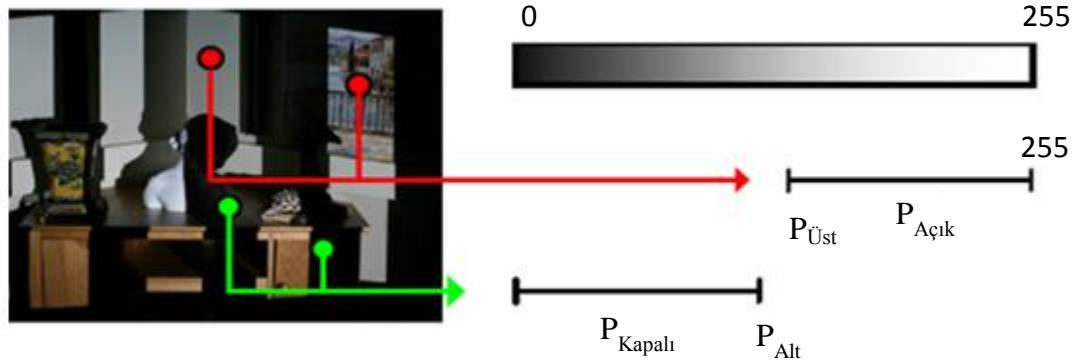
Şekil 3.2. 3D görüntüleme için ikili kodlanmış desen yapısı

Bu teknikte 0 ve 1 olarak kodlanmış yalnızca iki aydınlatma düzeyi kullanılmaktadır. 0 ve 1, desende siyah ve beyaza karşılık gelmektedir. İkili desenin her pikseline karşılık gelen kendi kodu mevcuttur. Bu kod kelimeleri 0 ve 1'lerin sırasıyla belirlenmiştir. Bir kod kelimesi yalnızca sıra tamamlandığı zaman elde edilmektedir. Nesnenin yüzeyindeki her bir nokta, diğer noktadaki kodlamadan farklı benzersiz bir koda sahiptir. 1981'de ilk defa Posdamer ve Altschuler tarafından m desenin 2^m şerit kodlayabildiği ortaya konmuştur. Şekil 3.2'de 5-bit'lik yansıtılan desen modelleri gösterilmektedir. Öncelikle bu desenler sırayla sahneye yansıtılmaktadır. Böylece benzersiz şeritlerle 32 (2⁵) adet farklı alan kodu oluşturulur [9, 44].

a) İkili Desenin Yansıtıldığı Resimde Piksel Yoğunluklarını Elde Etme

8 bit kapasiteli bir kameranın çıkış değer aralığı [0 255] arasındadır. Bu değer aralığı ise $P_{\text{kapalı}}$ ve $P_{\text{açık}}$ olarak sınıflandırılabilir. Piksel sınıflandırma metotları bu iki aralığın üst ve alt sınırına göre belirlenmektedir.

Şekil 3.3'te ikili desen yansıtılan bir sahneden alınan görüntü bulunmaktadır. Şekilde, ikili desenin beyaz (aydınlık) kısımlarına karşılık gelen bölgelerin yoğunluk değeri [$p_{\text{üst}}$ 255] arasında; siyah (karanlık) kısımlarına karşılık gelen bölgelerin yoğunluk değeri [0 p_{alt}] arasındadır. Şekil 3.3'te bu aralıklar kırmızı ve yeşil çizgiyle işaretlenmiştir [45].



Şekil 3.3. Eşikleme metotlarıyla pikselleri sınıflandırma

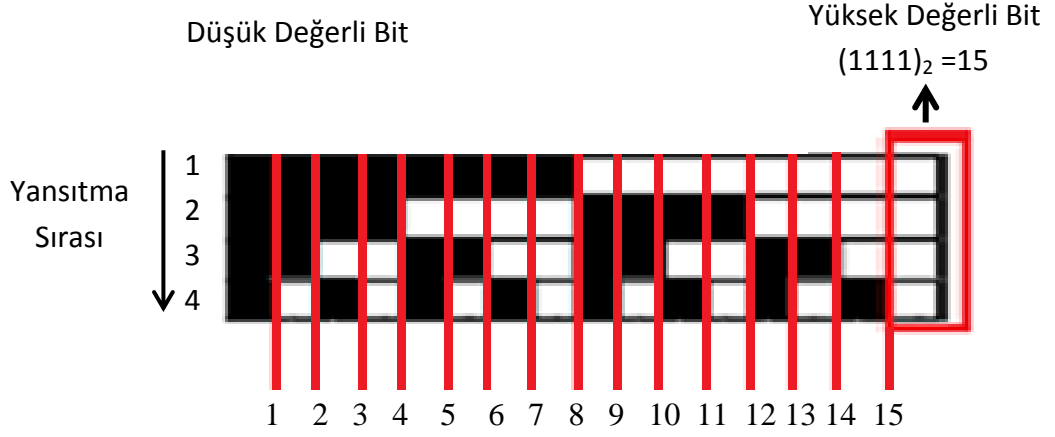
Temel eşikleme metodunda bir p değeri $[0, p_{alt}]$ aralığında bir yoğunluğa sahipse $P_{kapalı}$, $[p_{üst}, 255]$ aralığında bir değere sahipse $P_{açık}$ değerini almaktadır. Bu şekilde sahnedeki tüm pikseller sınıflandırılmaktadır. İkili şeridin bir periyodunu temsil eden piksellerin sayısı P_n 'dir [45,46].

Sahnede bulunan nesnelere oluşturduğu gölgeler ya da nesne veya zemin geometrisinden kaynaklanan sorunlar gibi faktörlerden dolayı piksel sınıflandırmada hatalar olabilmektedir. Bu sorunları azaltmak için farklı sınıflandırma algoritmaları kullanılmaktadır.

b) İkili Kod temelli Kodlama ve Kod çözme

İkili desenin yansıtıldığı sahne görüntüsü kamera tarafından alınır. Alınan bu desenlerin kesitlerinin aynı hizada paralel sıralanması sonucunda şekil 3.4'teki görüntü elde edilebilmektedir. Dört bitlik ikili sayı için 2^4-1 bağıntısına bağlı olarak 15 kenar oluşmaktadır.

Kod çözme sürecinin başlangıcında, kamera görüntülerinin pikselleri sınıflandırılarak sayısallaştırılır. Ardından dört adet desenden alınan örnekleme noktalarına karşılık gelen ikili değerler birleştirilerek kod kelimelerine ulaşılır. Örneğin Sıra numarası 15 olan kesitin örnekleme noktaları birleştirildiğinde ikilik tabanda 1111 sayısı elde edilmektedir. İkili tabanda 1111'in onluk tabandaki kod karşılığı ise 15'tir. Bu şekilde ilgili kodun sıra numarasına ve onluk tabandaki karşılıklarına ulaşılmaktadır. Elde edilen ikili kodlar derinlik bilgisine ulaşmak için kullanılmaktadır.



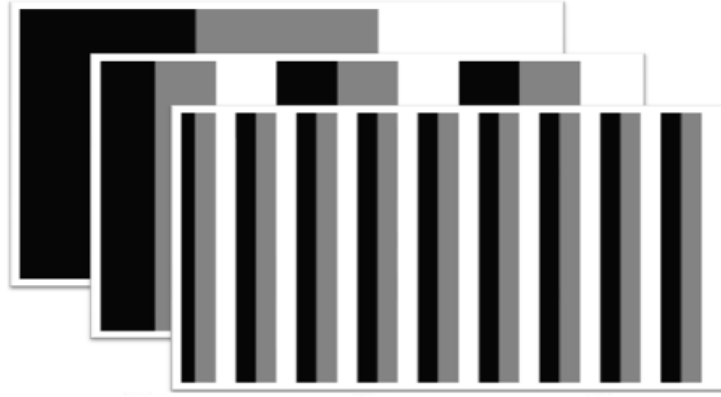
Şekil 3.4 İkili kod değerlerinin zamana göre sıralanması

c) 3D Modeli Elde Etme

Bu adım, ikili kodlama tekniğiyle taranmış olan nesnenin 3D modelini çıkarmak için gerekli süreci içermektedir. Bu süreç sırasında elde edilen derinlik haritası ile nesne ve arka plana ait doku 3 Boyutlu modeli oluşturacak biçimde birleştirilmektedir.

3.1.2. Gray Kod

İkili kodlamada ihtiyaç duyulan desen sayısını azaltmak için geliştirilmiş olan görüntüleme tekniğidir. Desenlerde A farklı düzeyde yoğunluk değişimi sağlanarak ikili koda göre daha fazla şerit elde edilmektedir. Bu durumda, B desen A^B şerit kodlayabilir. Örneğin B=3 ve A=8 ise, benzersiz kodlu şeritlerin sayısı 512 ($=8^3$) olarak bulunabilmektedir. Karşılaştırıldığında, ikili kodla 512 şerit için oluşturmak için 9 desene ihtiyaç duyulurken, gray kodlamada aynı şerit sayısını 8 desenle oluşturmak mümkündür. Şekil 3.5'te örnek bir gray seviyeli desen dizisi göstermektedir. Şekilde A=3, B=3 olduğu için benzersiz şerit sayısı $27(3^3)$ olarak bulunabilmektedir [9].

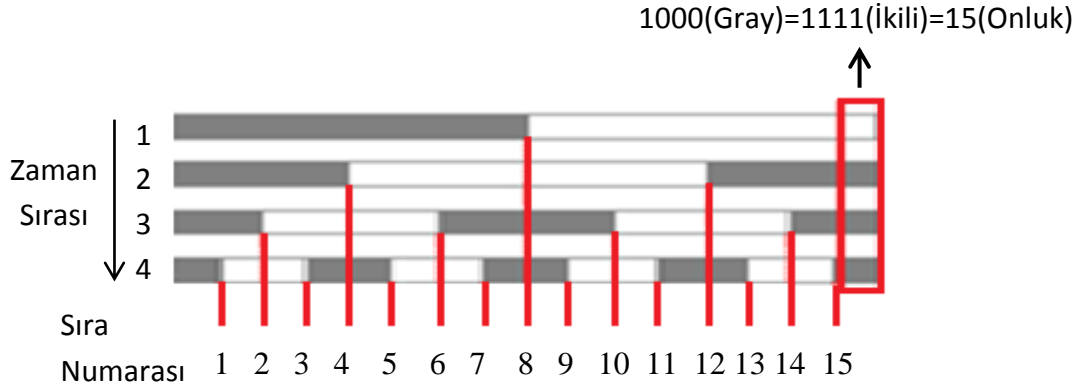


Şekil 3.5. 3D görüntüleme için gray seviye kodlama (A=3, B=3)

a) Gray Kod Temelli Kodlama ve Kod çözme

Gray desenin yansıtıldığı sahne görüntüsü kamera tarafından alınır. Alınan bu desenlerin kesitlerinin aynı hizada paralel sıralanması sonucunda şekil 3.6'daki görüntü elde edilebilmektedir. Dört bitlik ikili sayı için 2^4-1 bağıntısına bağlı olarak 15 kenar oluşmaktadır.

Kod çözme sürecinin başlangıcında, kamera görüntülerinin pikselleri sınıflandırılarak sayısallaştırılır. Ardından dört adet desenden alınan örnekleme noktalarına karşılık gelen ikili değerler birleştirilerek gray kod kelimelerine ulaşılır. Örneğin, sıra numarası 15 olan kesitin gray kod karşılığı 1000, ikili kod karşılığı 1111 ve onluk tabanda kod karşılığı 15'tir. Bu şekilde ilgili kodun sıra numarasına ve onluk tabandaki karşılıklarına ulaşılmaktadır. Elde edilen ikili kodlar derinlik bilgisine ulaşmak için kullanılmaktadır. Şekil 3.6'da gray kodlu desenlerin iç kenarları birbirleriyle kesişmemektedir. Bu nedenle kodların değerlendirilmesinde hata yapma olasılığı düşmektedir.



Şekil 3.6. Gray kod değerlerinin zamana göre sıralanması

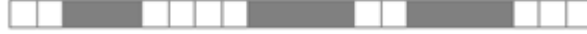
b) 3D Modeli Elde Etme

Bu adım, ikili kodlama tekniğiyle taranmış olan nesnenin 3D modelini çıkarmak için gerekli süreci içermektedir. Bu süreç sırasında elde edilen derinlik haritası ile nesne ve arka plana ait doku 3 boyutlu modeli oluşturacak biçimde birleştirilmektedir.

Şekil 3.7’de yatay tarama ve eğri uygunlaştırma işlemine ait şekil verilmiştir. Modelleneyecek nesne üzerine gray desen yansıtılmıştır [46]. Şekilde i. hat taranmış ve her bir pikselin değeri şekil 3.7.b’de gösterilmiştir. Desenin filtrelenmesinden sonra gray seviyesinin sinyal değişimi şekil 3.7.c’de görülmektedir. Bu sinyalin üst ve alt limitlerine bağlı olarak ortalaması bulunarak, şekil 3.7.c’de bu sonuç işaretlenmiştir. [47].

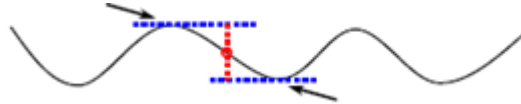


a) i. hattı taranan resim



b) Her pikselin değeri

Maksimum değer



Minimum değer

c) Filrelenmiş görüntünün uygunlaştırma eğrisi

Şekil 3.7. Yatay tarama ve eğri uygunlaştırma

3.1.3. Üç Faz Kaydırma

Üç faz kaydırma yöntemi ile yüksek performansta 3D modelleme yapılabilmektedir. En büyük avantajlarından birisi diğer metotlara göre daha yüksek çözünürlük sunmasıdır. Bundan dolayı birçok sektörde yaygın şekilde kullanılmaktadır. Zhang, Sansoi Srinivasan vd. tarafından faz kaydırma tekniği konusunda çalışmalar yapılmıştır. Çalışmamızda, üç faz kaydırma yöntemi ile çalışan 3D modelleme sisteminin tasarımı yapılmıştır.

a) Üç Faz Kaydırma Algoritmasının Çalışması

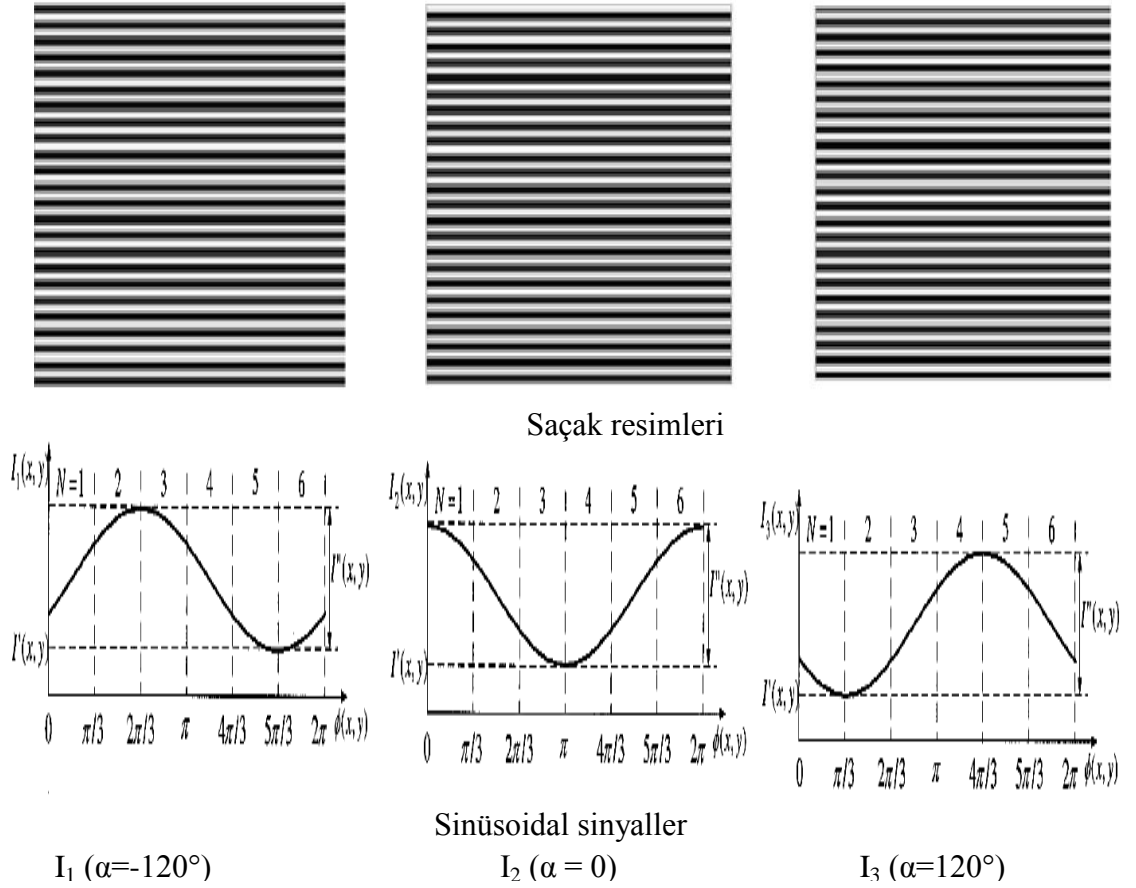
3D modellemesi gerçekleştirilerek nesne üzerine yansıtılacak saçak desenlerinin parlaklıkları denklem (3.1), (3.2) ve (3.3)'te verilmiştir [48]. Saçak desenleri arasında $2\pi/3$ kadar faz farkı bulunmaktadır.

$$I_1(x,y) = I'(x,y) + I''(x,y) \cos [\Phi(x,y) - 2\pi/3], \quad (3.1)$$

$$I_2(x,y) = I'(x,y) + I''(x,y) \cos [\Phi(x,y)], \quad (3.2)$$

$$I_3(x,y) = I'(x,y) + I''(x,y) \cos [\Phi(x,y) + 2\pi/3], \quad (3.3)$$

Burada $I'(x,y)$ ortalama yoğunluk, $I''(x,y)$ yoğunluk mod¼lasyonudur. Denklem (3.1), (3.2), (3.3)'teki sin¼zoidal sinyallere karşılık oluşan saçak resimleri şekil 3.8'de g¼r¼lmektedir.



şekil 3.8. Sin¼soidal sinyallere karşılık oluşan saçak resimleri

b) 3D Modeli Elde Etme

3D modeli elde etme sürecinin başında I_1 fazı nesne üzerine yansıtılıp kamera tarafından nesnenin görüntüsü alınır. Aynı süreç I_2 ve I_3 fazı içinde gerçekleştirilmektedir .

I_1 , I_2 ve I_3 , denklem (3.4)'te kullanılarak faz matrisi elde edilmektedir [49, 50, 51].

Faz :

$$\Phi(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{3}(I_1 - I_3)}{2I_2 - I_2 - I_3} \right) \quad (3.4)$$

0 - 2π aralığındaki saçak desenlerinin faz değerleri kullanılarak wrapped faz haritası elde edilmektedir. Daha sonra bu matris üzerine unwrap işlemi uygulanarak unwrapped faz haritası elde edilmektedir. Son adımda nesnenin 3D modeline ulaşılmaktadır.

3.2. Çerçeve İçinde Değişen Desenler

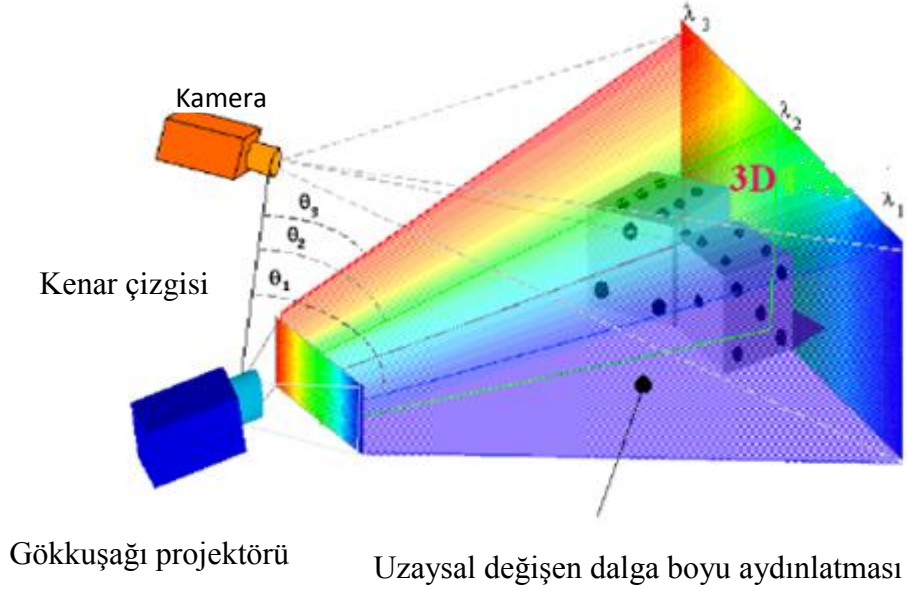
Çerçeve içinde değişen desenler metodu diğer metotlardan farklı olarak sahne üzerine tek bir desen yansıtmaktadır ve tekli çekim tekniklerindedir. Bu yöntemin en büyük avantajı, hareketli nesnelerin 3D modellemesini gerçekleştirebilmesidir. Bu teknik, gökkuşağı 3D kamera ve sürekli değişen renk kodları olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Bu teknikler renk ve yansıtılan desende benzersiz kodlama avantajlarını kullanmaktadırlar. Metodun sayılan bu özellikleri sayesinde nesnenin yalnızca tek resminin alınarak 3D modelinin elde edilmesi sağlanmaktadır.

3.2.1. Gökkuşağı 3D Kamera

Gökkuşağı 3D kamera tekniğinde derinlik bilgisini hesaplamak için modellenecek nesne, değişen dalga boyunda aydınlatılmaktadır. Bu tekniğin kurulumu ve dalga boyu değişimi şekil 3.9'da görülmektedir.

Gökkuşağı ışık projektörünün sabit geometrisi sayesinde özel tayf dalga boyu λ ve ışık düzleminin θ açısı arasında bire bir benzerlik kurulmaktadır. Böylece her bir yüzey noktası kolayca tanınmaktadır. Bilinen bir sınır çizgisi B ve bilinen görüş açısı α

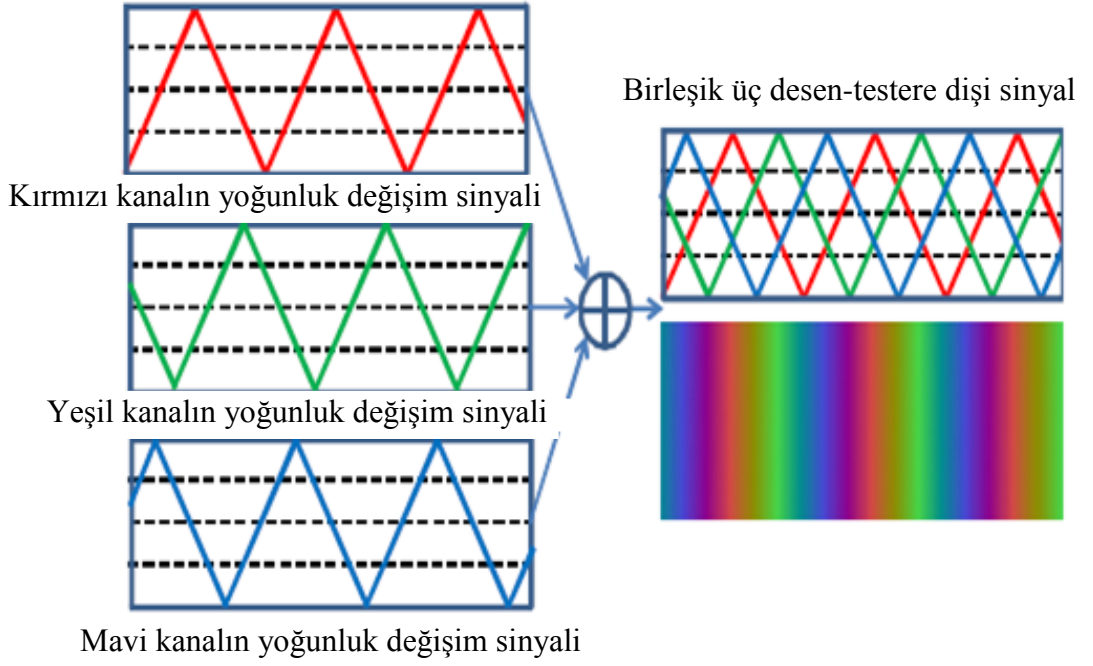
değerine bağlı olarak her bir piksele karşılık gelen derinlik bilgisi üçgenleme prensibine bağlı olarak saptanmaktadır [9].



Şekil 3.9. Gökkuşaağı 3D kamera sisteminin düzeneği

3.2.2. Sürekli Değişen Renk Kodları

Konum bilgisini kodlamak için sürekli değişen çeşitli renk desenlerini üretmek mümkündür. Bu işlemde projektörün her bir renk kanalı için yoğunluğu değişen desen üretilmektedir. Ardından bu desenler toplanarak sürekli değişen renk deseni elde edilir. Şekil 3.10'da kırmızı, yeşil ve mavi renk kanalları için yoğunluk değişimleri ve yoğunluk toplamı görülmektedir [9]. Yoğunluk toplama işlemi ile gökkuşaağına benzer desen elde edilmektedir. Bu metotta, her bir kanalın birleşik sinyale katkı oranına bağlı olarak kod çözme süreci gerçekleştirilmektedir.



Şekil 3.10. Sürekli değişen renk kodlarının oluşturulma süreci

3.3. Şerit İndeksleme

Şerit indeksleme metodunda nesneyi taramak için ince çizgi şeklinde şeritler kullanılmaktadır. Şeritlerin yansıtılmadan önceki düzeni ile yansıtıldıktan sonraki durumlarında farklılıklar oluşmaktadır. Bu farklılıkların değerlendirilmesi sonucunda nesnenin derinlik bilgisine ulaşılmaktadır. Şerit indeksleme metoduna renkli kodlanmış şeritler, dilimli şeritler, gri seviye kodlanmış şeritler ve de brujin dizilerine bağlı şerit indeksleme örnek olarak verilebilir.

3.3.1. Renkli Kodlanmış Şeritler

Renkli resim algılayıcıları üç kanala sahiptir. Bu özellikleri sayesinde geniş bir aralıkta renk üretebilmektedirler. Üç adet 8 bit kanal, 2^{24} farklı renkle temsil edilmektedir. Böyle zengin renk bilgisi 3D görüntülemenin kalitesini arttırmakta ve kazanım süresini düşürmektedir.

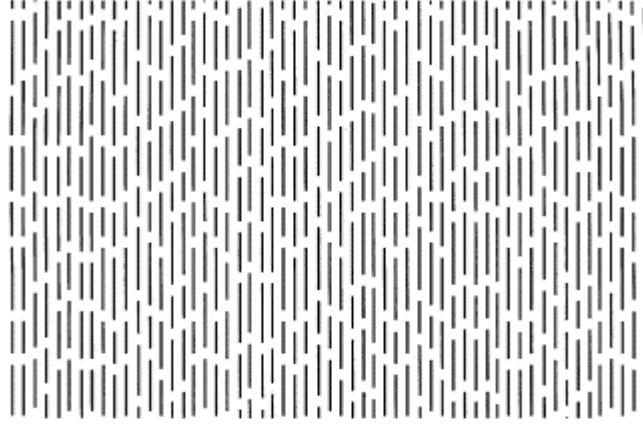
Şekil 3.11’de şerit indekslenmiş bir yapısal ışık deseninin nesne modellenecek kişi üzerine yansıtılmış şekli görülmektedir. [52]. Bu teknikte, renk uzayına bağlı kalınarak renkli desenlerle çoklu şeritler kodlanmaktadır. Dizi içinde maksimum sayıda renkli şerit kullanılarak 3D modellemenin performansı artırılmaktadır.



Şekil 3.11. Şerit indekslenmiş desenin modellenecek kişi üzerine yansıtılması

3.3.2. Dilimli Şeritler

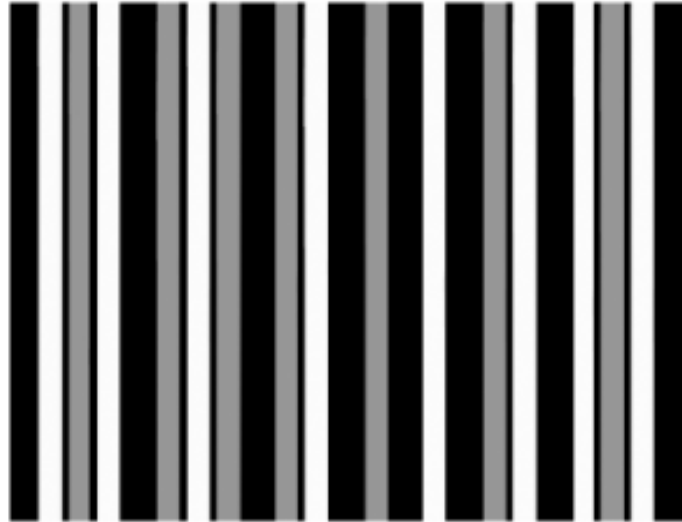
Bu metotta, her bir şerit birbirinden farklı olacak şekilde tasarlanmıştır. Şekil 3.12’de bu metotta kullanılan desen yapısı görülmektedir. 3D modelleme için hazırlanan algoritma, şeritleri ayırt etmek için her bir şeridin benzersizlik özelliğini kullanmaktadır. Önerilen bu indeksleme yüzey şekline bağlı olarak ortaya çıkan bozulma büyük olmadığına ayrıca düz ve sürekli zeminde kullanılmaktadır. Metodun dezavantajı, desen deformasyonu ya da nesne yüzeyinin kopmalar varsa bölümlenmiş deseni elde etmede zorluklar yaşanmasıdır [53].



Şekil 3.12. Dilimli şeritler

3.3.3. Gri Seviye Kodlanmış Şeritler

Şeritlerde siyah beyaz ve gri renkleri kullanılarak ilgili şerit gruplarında yoğunluk seviyelerini ayarlamak mümkün olabilmektedir. Böylece her şerit grubu, bir periyotluk süreç içinde benzersiz yoğunluk desenine sahip olmaktadır. Örneğin, üç gri seviye kullanılmış (siyah, gri ve beyaz) bir desen şekil 3.13’de görüldüğü gibi tasarlanabilmektedir [9].



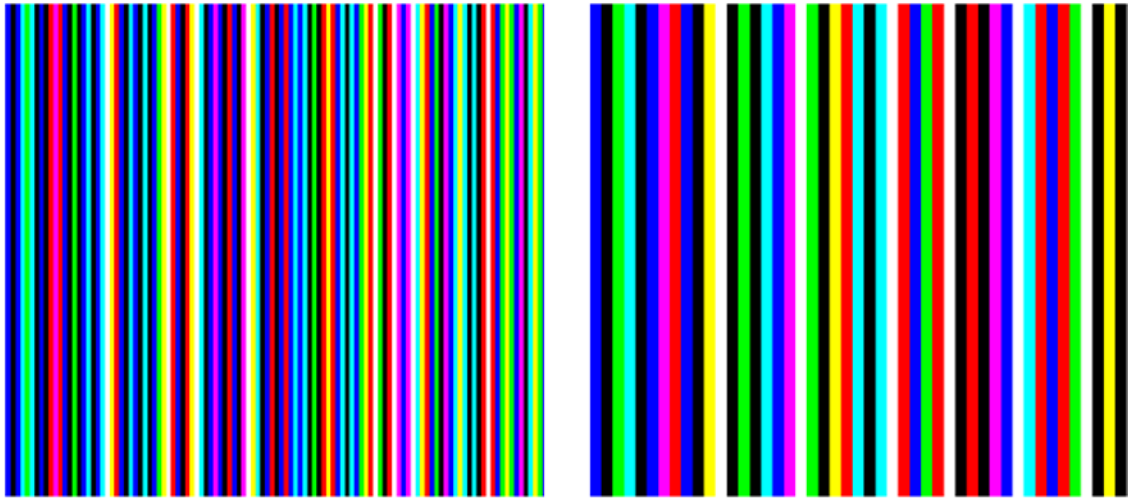
Şekil 3.13. Tekrarlanan gri ölçekli desen kullanarak şerit indeksleme

Desen eşleme sürecine yansıtılan yoğunluk deseniyle fotoğraflanan resim yoğunluğu arasındaki ilişkiyle başlanır. Öncelikle eşleme ve ardından arama yapılır. Arama işlemi ise BGS, GBS gibi üç harfli yoğunluk dizilerine bağlı olarak gerçekleştirilmektedir.

3.3.4. De Bruijn Dizileri

De Bruijn tekniği ile komşu şeritlerin birbirinden farklı olduğu desenler elde edilmektedir. Teknik, sahip olduğu algoritma sayesinde kendini tekrar etmeyen benzersiz bir şerit deseninin elde edilmesine olanak sağlamaktadır [54]. Şekil 3.14'te. De bruijn dizisiyle oluşan desenler görülmektedir.

Şekil 3.15.a'da modellenecek nesne, şekil 3.15.b'de 125 şeritli bir De Bruijn dizisinin modellenecek nesne üzerine yansıtılmış görüntüsü ve şekil 3.15.c'de ise nesnenin 3D modelleme sonucu görülmektedir [55].



Şekil 3.14. De bruijn dizisiyle oluşan desenler



a) Nesne

b) Nesne üzerine
yansıtılan de bruijn dizisi

c) Elde edilen 3D
model

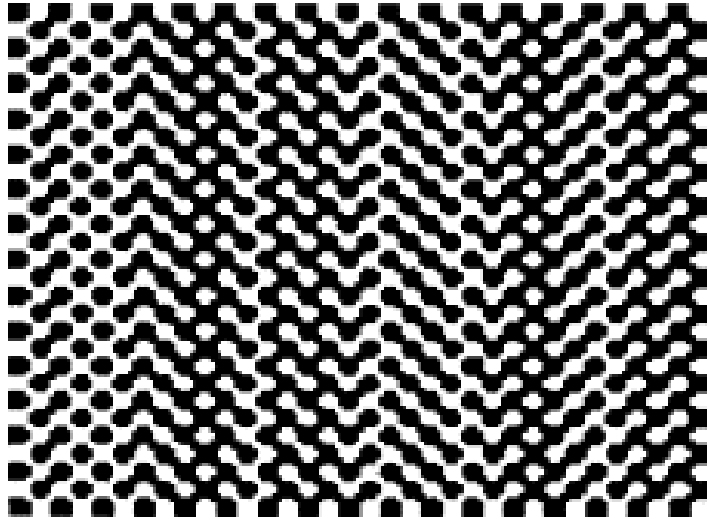
Şekil 3.15. De Bruijn dizisiyle 3D modelleme

3.4. Izgara İndeksleme

Izgara indeksleme metodunda farklı kodlama teknikleriyle ızgaraya benzer desen yapısı oluşturulmaktadır. Oluşturulan desende bulunan alt pencereler benzersizdir ve 3D modellemede nesne pozisyonun tam olarak belirlenmesini sağlamaktadır.

3.4.1. Sözde Rastlantısal İkili Noktalar

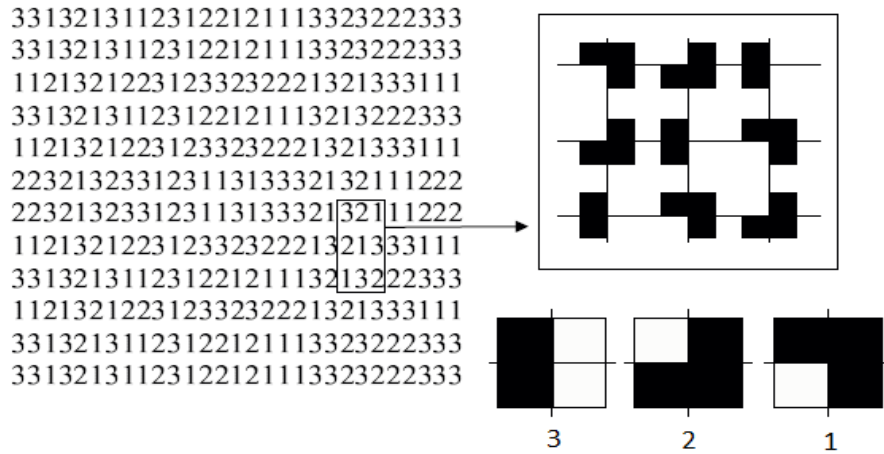
Bu metotta ızgara üzerindeki noktalar ya da diğer desenlerin konumlarını belirlemek için sözde rastlantısal ikili dizi kullanılmaktadır. Bu şekilde alt pencerelerin desenlerle kodlanması sağlanmaktadır. Bu kodlama metoduyla tüm dizi boyunca benzersizlik sağlanmakta ve dizi içinde alt pencerenin koordinatları belirlenmektedir. İkili dizinin kodlanmış deseni, basit polinomal mod'lu olarak 2^n metodu kullanılarak bir sözde rastlantısal ikili diziye bağlı olarak üretilmektedir. Şekil 3.16'da oluşturulan sözde rastlantısal ikili dizi örneğini göstermektedir [56].



Şekil 3.16. Bir sözde rastlantısal ikili diziler örneği

3.4.2. Kod Kelimelerine Benzer Mini Desenler

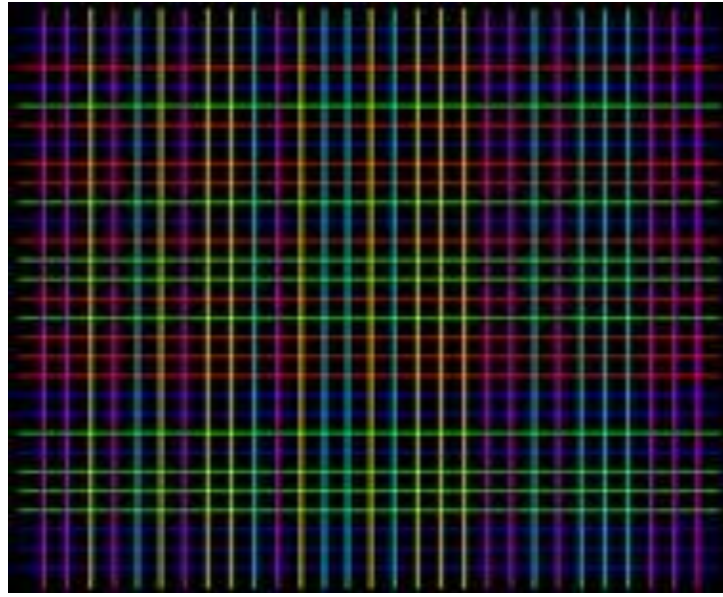
İkili değere sahip bir sözde rastlantısal dizi kullanmak yerine, kod kelimelerine benzer mini desenler de kullanılabilir. Bu metotta yansıtılacak desen ızgara indekslenmiş yapıya sahip olup, mini desenler ile özel kod kelimeleri temsil edilmektedir [57]. Şekil 3.17’de mini desenli kod kelimeleri görülmektedir [44].



Şekil 3.17. Mini desenler kullanımı

3.4.3. Renkli Kodlanmış Izgara

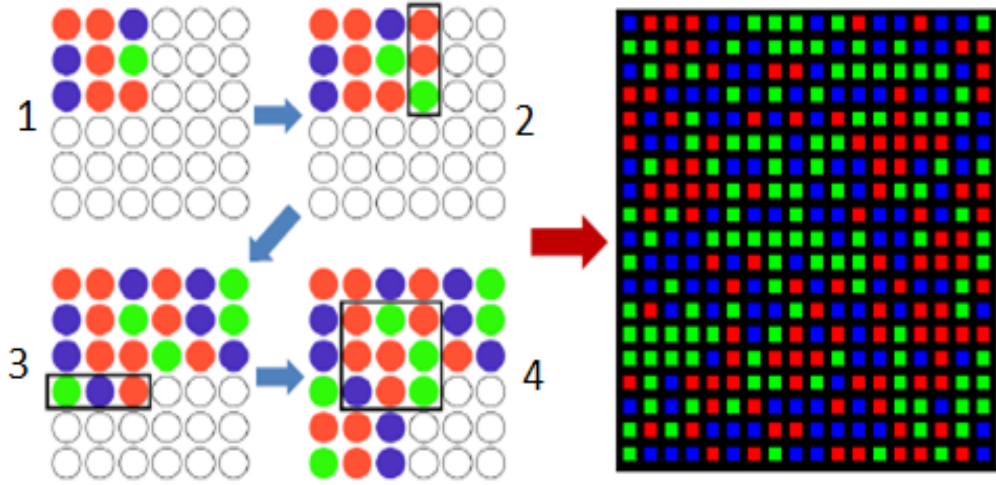
Yatay ve dikey şeritleri renklerle kodlanmış 2 boyutlu ızgara yapısıdır. şekil 3.18’de renkli kodlanmış ızgara yapısı gör÷lmektedir. Izgara yapısında alt pencereler ile benzerlik bulunmamaktadır. Desen nesne üzerine yansıtıldığında renkli ızgara yapısı 3D model için gerekli 3D modelleme bilgilerinin elde edilmesini sağlamaktadır. Bu kodlama metodunun dezavantajı, ızgara yapısındaki çizgi kalınlığından 3D modelin çabuk etkilenmesi ve sorunlar yaşanabilmesidir.



şekil 3.18. Renkli kodlanmış ızgara

3.4.4. 2D Renkli Kodlanmış Nokta Dizisi

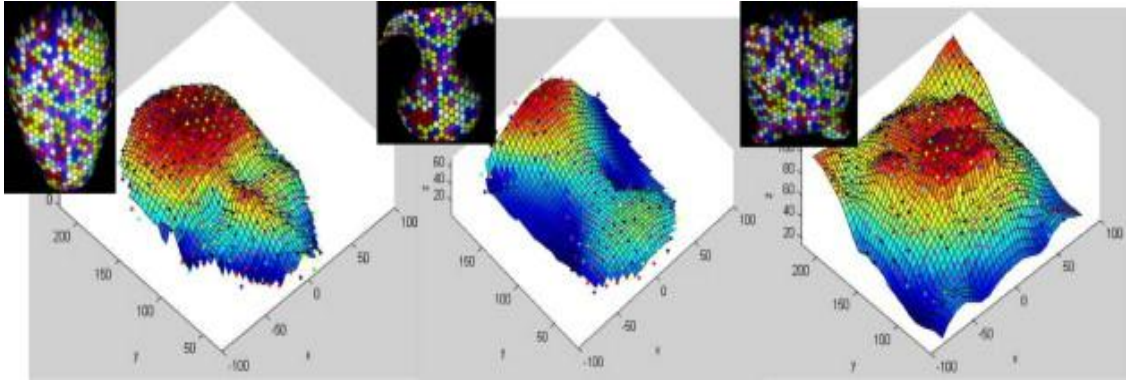
Rastlantısal kod kelimeleri kullanılarak üretilmiş renkli kodlanmış nokta dizileridir. Bu kodlama tekniğinde alt pencerenin benzersizliğini koruyan bir dizi üretme sistemi geliştirilmiştir.



Şekil 3.19. Renkli kodlanmış noktaların örneği

Şekil 3.19’da renkli kodlanmış nokta belirlenme süreci resimlerle açıklanmıştır [9, 44]. İşlem süreci aşağıdaki adımlardan oluşmaktadır:

- Şekil 3.19’da 1 numaralı şekilde 6x6’lık nokta kapasiteli desenin sol üst köşesindeki 3x3’lük kısmı rastlantısal kodlama kullanılarak renkli noktalarla doldurulmuştur.
- Sonra, 3x3’lük renkle doldurulmuş kısmın sol tarafına rastlantısal kodlama kullanılarak 3x1’lik sütun eklenir. Bu durum şekil 3.19’da 2 numaralı kısımda gösterilmektedir. Sütun ekmeden önce sütunların benzer olmaması sağlanmaktadır.
- Ardından oluşan 3x4’lük renkli kısmın sağına iki sütun benzer şekilde eklenmektedir.
- 3x6’lık renkli nokta kümesinin aşağı kısmına rastlantısal kodlama kullanılarak 1x3’lük bir satır eklenir. Oluşan yeni nokta kümesi şekil 3.19’da 3 numaralı kısımda verilmiştir.
- Oluşan şeklin sol alt kısmına aynı algoritmayla 1x3 ölçüsünde iki satır daha eklenir. Ardından, şekil 3.19’da 4 numaralı kısımda görülen 3x3’lük alt çerçevede rastlantısal kodlama kullanılarak alt köşedeki yeşil nokta belirlenmiştir.
- 3x3’lük alt pencere hareket ettirilerek benzer şekilde geri kalan noktaların renklerinin belirlenmesi sağlanmaktadır.

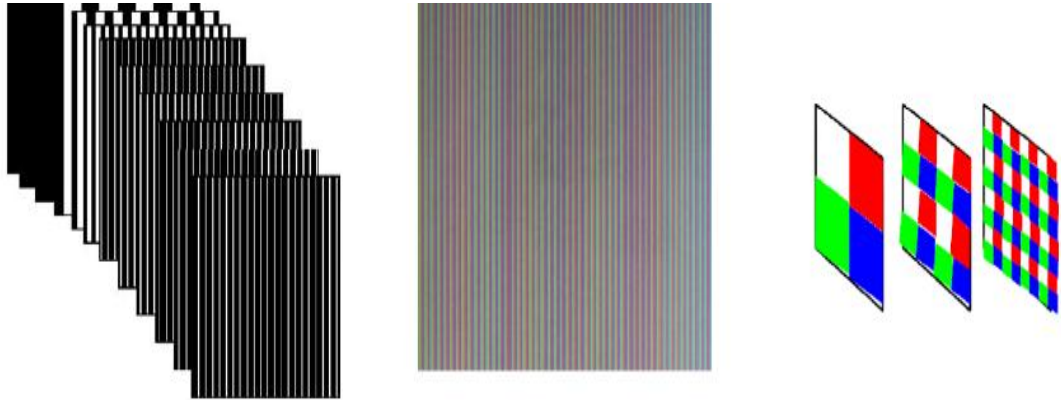


Şekil 3.20. 2D renkli kodlanmış desenlerle elde edilen 3D modelleme sonuçları

Şekil 3.20’de 2D renkli kodlanmış desenlerle elde edilen 3D modelleme sonuçları görülmektedir [58].

3.5. Hibrit Metotları

Hibrit metotları birden farklı metot ile elde edilmiş 3D görüntüleri çok daha yüksek çözünürlükte sonuçlar elde etmek ve sonuçları iyileştirme amacıyla kullanılmaktadır. Şekil 3.21’de hibrit kodlamada kullanılan bazı desen dizileri görülmektedir [9, 44].



Şekil 3.21. Hibrit metotta kullanılan bazı desenler

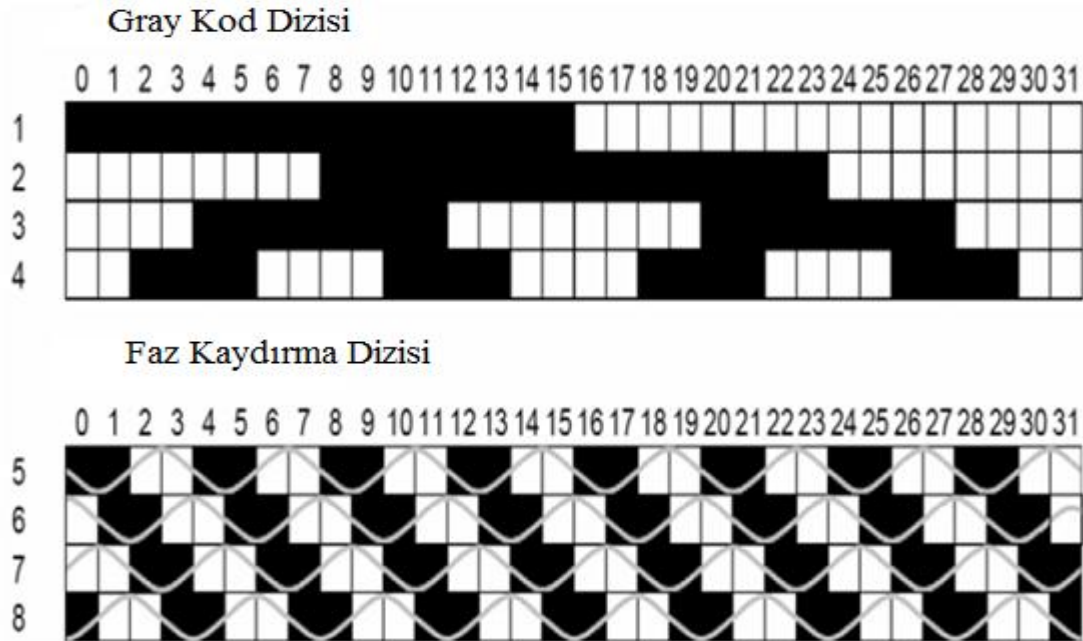
Bergmann, Sansoi, Wiora Gühring tarafından hibrit (faz kaydırma + gray kod) görüntüleme tekniği üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Geliştirilmiş olan bu teknikte, gray kodlar, piksel kodlamada zamanlama avantajı sağlamaktadır ancak desen aralıkları sınırlıdır. Faz kaydırma metodunda ise periyodik olarak birkaç desen yansıtılıp yüksek çözünürlüğe ulaşılabilmektedir. Her iki metodun avantajlarından yararlanabilmek için birleştirilmeleriyle oluşturulmuş bir tekniktir. Böylece, yüksek çözünürlükte 3D modellemeler yapılabilmektedir.

Şekil 3.22’de görüldüğü gibi, gray ve faz kaydırma kod dizileri 32 şeritli kodlama sırasıyla kombine edilerek hibrit desenleri elde edilmektedir [59].

3D modeli elde etme sürecinde başta her bir piksel için denklem (3.5) ve denklem (3.6)’dan maksimum yoğunluk (I_{\max}) ve minimum yoğunluk (I_{\min}) değerleri hesaplanmaktadır [46, 60].

$$I_{\min}(x,y) = I'(x,y) - I''(x,y) \quad (3.5)$$

$$I_{\max}(x,y) = I'(x,y) + I''(x,y) \quad (3.6)$$



Şekil 3.22. Faz kaydırma ve gray kod metodlarının ardışık biçimde uygulanması

I_{\min} , I_{\max} ve $B_k^n(x, y)$ kullanılarak normalizasyon işlemi denklem (3.7)'de görüldüğü gibi gerçekleştirilmektedir.

$$B_k^n(x, y) = \frac{B_k(x, y) - I_{\min}(x, y)}{I_{\max}(x, y) - I_{\min}(x, y)} \quad (3.7)$$

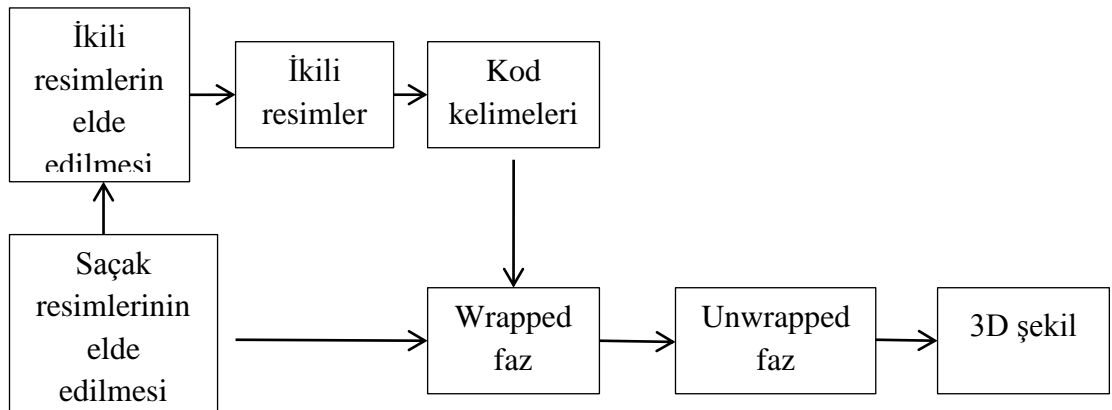
Ardından kod kelimesi denklem (3.8)'e bağlı olarak bulunmaktadır.

$$CD(x, y) = \sum_{k=1}^n [2^{N-k-1} B_k^n(x, y)] \quad (3.8)$$

Kod kelimesi kullanılarak Faz değeri denklem (3.9)'da bulunur [46, 60].

$$\Phi(x, y) = \Phi(x, y) + CDx2\pi \quad (3.9)$$

Hibrit metodunun akış diyagramı şekil 3.23'te verilmiştir [46]. Başta desenler sahneye yansıtılıp fotoğrafları çekilmektedir. Ardından bu resimler işlenerek kod kelimeleri üretilir. Faz kaydırma algoritmasından elde edilen faz değeri ve kod kelimesi kullanılarak faz elde edilmektedir. Faz değeri kullanılarak wrapped faz değeri bulunur. Sonra, unwrapped faz işlemi yapılır. Son adımda ise, elde edilen uzaysal koordinatlara bağlı olarak 3D modelleme işlemi gerçekleştirilir.



Şekil 3.23. Hibrit metodunun akış diyagramı

BÖLÜM 4

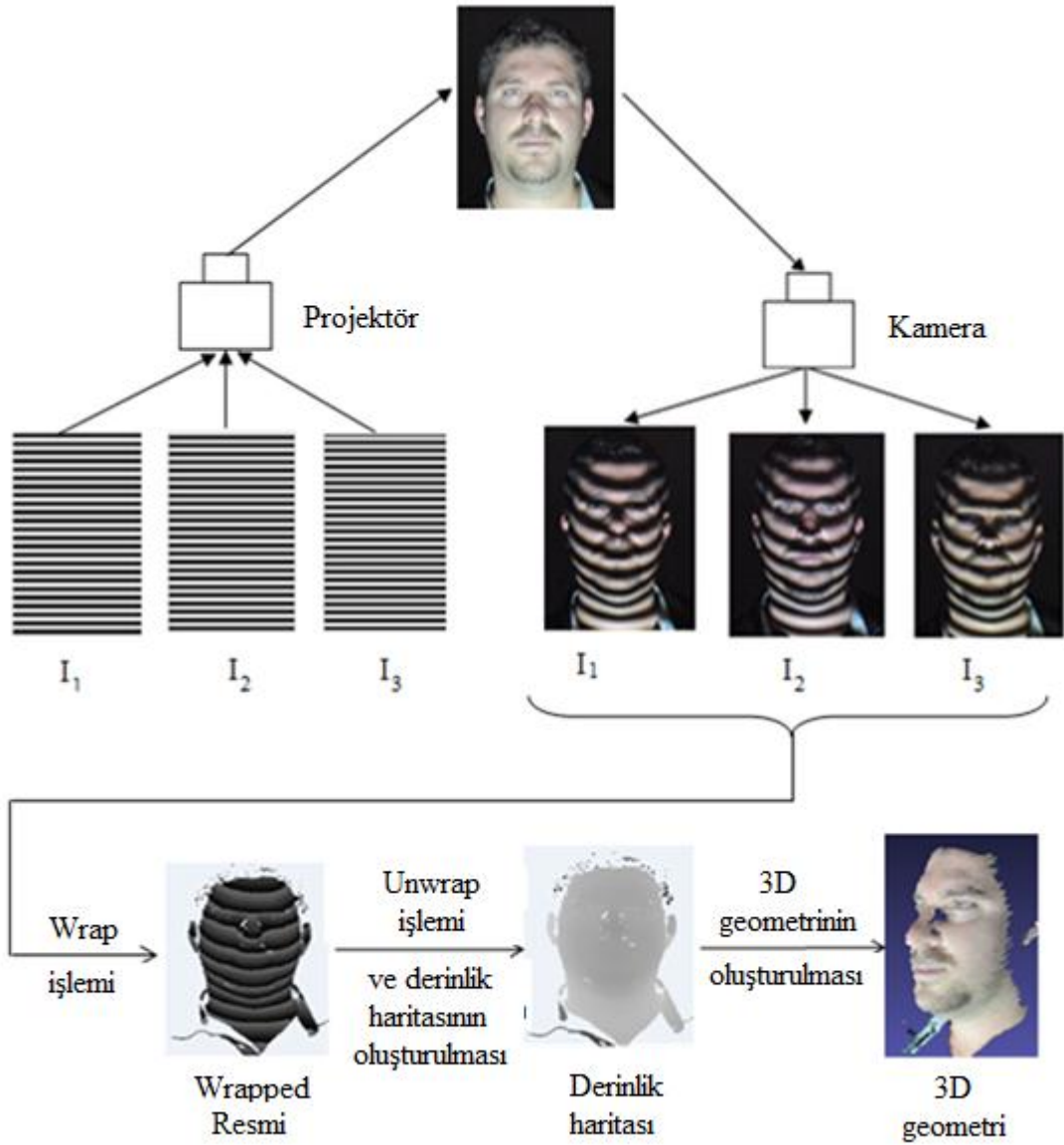
ÜÇ FAZ KAYDIRMA METODU TEMELLİ YAPILANDIRILMIŞ IŞIK SİSTEMİ

Bu bölümde, tez kapsamında incelenen 3 boyutlu görüntüleme metotlarından yapılandırılmış ışık temelli bir uygulamanın geliştirilme aşamaları ve kalibrasyonu anlatılmaktadır. Geliştirilmiş olan sistemde üç faz kaydırma algoritması kullanılmaktadır.

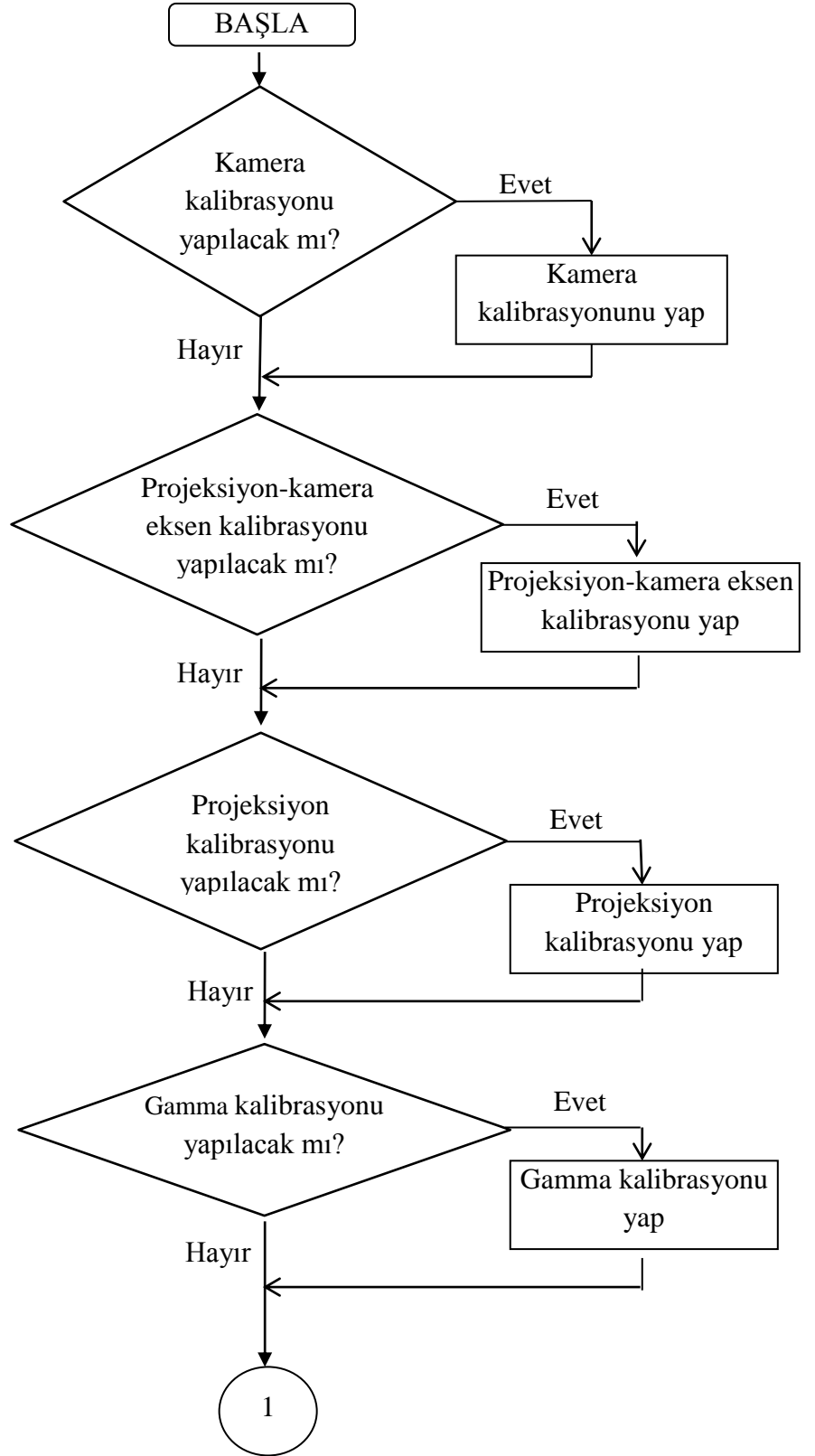
Üç faz kaydırma algoritmasında, sahneye yalnızca üç adet desen yansıtılmaktadır. Bu nedenle ardışık yansıtma metotları içerisinde en az desene gereksinim duyulan tekniktir. Buna yanında, en yüksek 3D modelleme performansı sunan temassız ölçüm metotlarından birisidir. Bu algoritmanın diğer avantajlarından bazıları, sahne zeminine daha az duyarlılık göstermesi ve ölçüm sonuçlarının ortamın ışık miktarının değişiminden çok daha az etkilemesidir. Bu ve benzeri üstünlüklerinden dolayı üç faz kaydırma algoritması tercih edilmiştir.

Sistemin gerçek dünyaya en yakın 3D modelleme işlemini gerçekleştirebilmesi için ölçüm işlemine başlanmadan önce kalibre edilmesi gerekmektedir. Kalibrasyon işleminin başlangıcında, kameranın lens parametreleri elde edilerek bu parametreler uygun şekilde kaydedilir. İkinci adımda, projeksiyon ve kameranın koordinat düzleminin birbiri ile uyumlu olması için projeksiyon kamera eksen kalibrasyonu yapılmaktadır. Üçüncü adımda projektörün lens parametreleri elde edilir. Bu parametreler uygun şekilde ayarlanması ile projeksiyon kalibrasyonu tamamlanmış olur. Dördüncü adımda kameradan alınan görüntülerdeki parlaklık sorunlarının giderilebilmesi için gamma kalibrasyonu yapılmaktadır. Son adımda ise derinlik kalibrasyonu yapılarak derinlik parametresi elde edilir. Böylece, gerçek dünyaya en yakın modellemenin yapılması sağlanmaktadır.

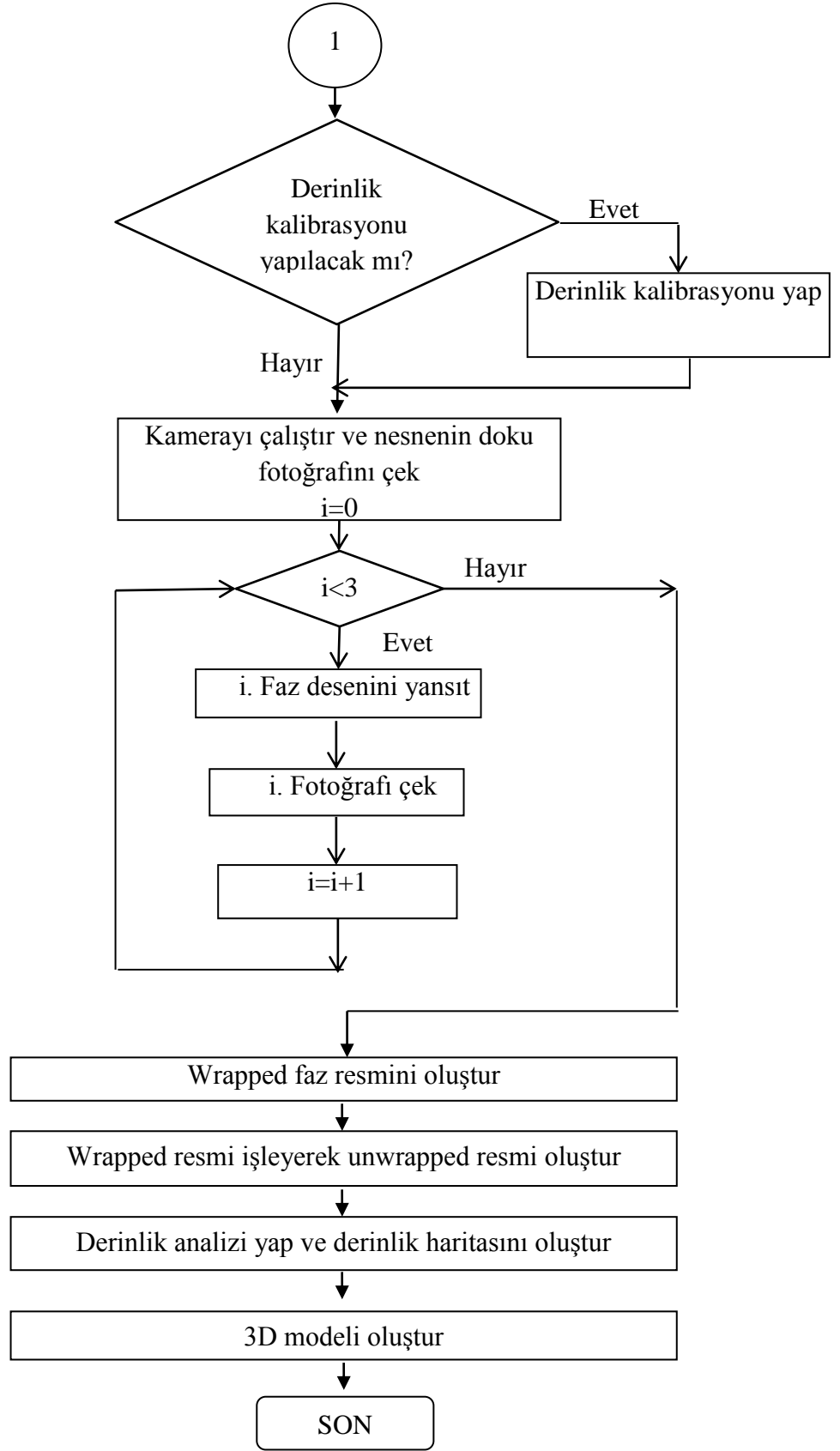
Modellemenin başlangıcında sıralı olarak 1. 2. ve 3. faz desenleri projeksiyon makinesi ile nesne üzerine yansıtılıp; kamera ile bu desenlerin fotoğraflarının çekilmesi sağlanır. Ardından, alınan faz resimleri üzerinde faz wrap işlemi yapılarak wrapped faz değerleri elde edilmektedir. Sonra, unwrap işlemi yapılarak nesneye ait derinlik haritası elde edilmektedir. Son adımda ise elde edilen tüm bu bilgiler kullanılarak nesnenin 3D modeli elde edilmektedir. Şekil 4.1’de üç faz kaydırma sisteminin işlem adımları ve şekil 4.2’de akış diyagramı görülmektedir.



Şekil 4.1. Üç faz kaydırma algoritması işlem adımları



Şekil 4.2.a. Geliştirilen sistemin akış diyagramı



Şekil 4.2.b Geliştirilen sistemin akış diyagramı

4.1. Kamera Kalibrasyonu

Kamera kalibrasyonu, dış faktörler dolayısı ile bozulmaya uğramış olan görüntünün düzeltilerek görüntü işlemeye hazır hale getirilmesi işlemidir. Kalibre edilmemiş bir kamera ile gerçekleştirilen görüntü işleme ve görüntü analiz aşamaları hata içermektedir.

Işınları yansıtmanın basit geometrisini incelemek için iğne delikli kamera modelini ele alınacaktır. Kamerada tek bir noktada ışınları toplamak için lens kullanılmaktadır. Lensin ışık toplamadaki problemleri kamera görüntülerinde hatalara sebebiyet vermektedir.

Kameralarda kullanılan lens problemleri ve iğne delikli kamera modelinden kaynaklanan sapma gibi faktörlerden dolayı kamera kalibrasyonu yapılmalıdır. Böylece kameradan elde edilen görüntü gerçek dünyadakine en yakın seviyede olacaktır.

Kameranın davranışlarını anlayabilmek ve lens bozukluklarının analiz etmek için matematiksel araçlarla inceleme gerçekleştirilmektedir. Dolayısıyla, kameranın öğeleri (piksel) ve fiziksel dünyanın öğeleri (metre) modellemek için görüntü matris ve vektörlerinden yararlanılmaktadır. Bu sayede kamera tarafından çekilen görüntü, gerçek görüntüyü daha tutarlı bir biçimde ifade etmeye başlamaktadır.

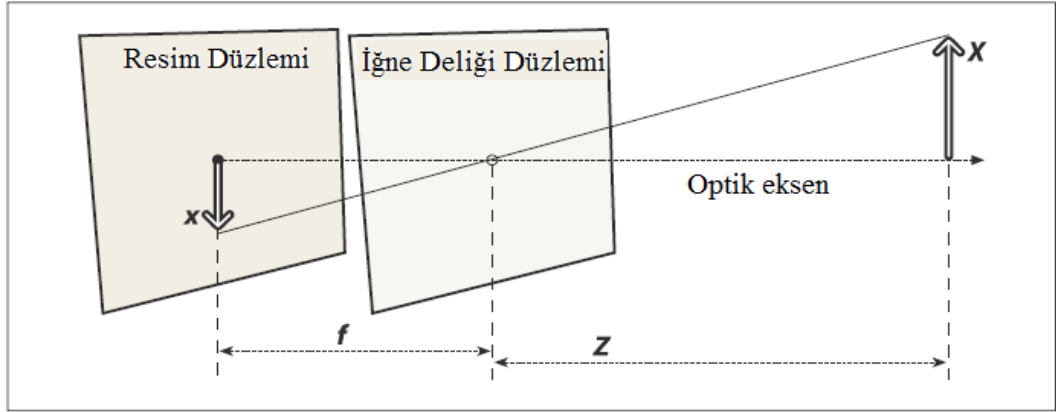
4.1.1. Kamera Modeli

Kameraların çalışma prensipleri optik kurallara bağlı bir modelle ifade edilmektedir. Kalibrasyon işlemlerinde bu modelin dikkate alınarak işlem yapılması elde edilecek görüntünün kalitesini arttıracaktır.

Şekil 4.3'te iğne delikli kamera modeli verilmiştir [38]. Bu modelde f kameranın odak uzaklığını, Z nesnenin kameraya olan uzaklığını, X nesnenin uzunluğunu ve x görüntü düzlemi üzerindeki nesnenin görüntüsünü ifade etmektedir. Kamera modelinde geometrik benzerlik kuralları kullanılarak $-x/f = X/Z$ olarak ifade edilmektedir. Buradan, $-X$ ifadesi denklem (4.1)'deki gibi bulunmaktadır.

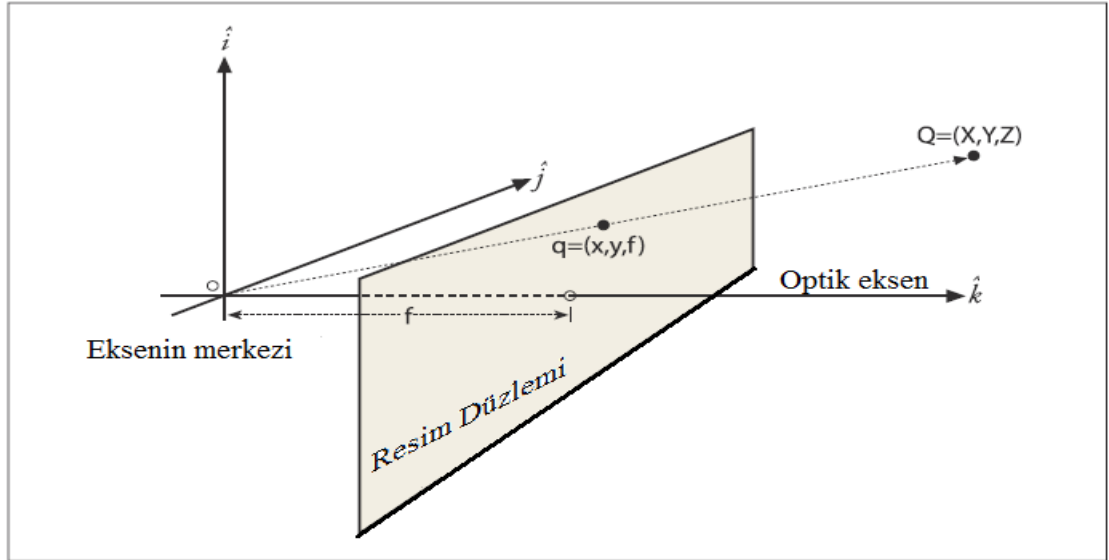
$$-x = f \frac{x}{Z} \quad (4.1)$$

Optik eksen mesafelerine göre X , x değişmektedir.



Şekil 4.3. İğne delikli kamera modeli

Resim düzlemi ve optik eksenin kesişimi şekil 4.4'te görülmektedir. Uzak nesnelerin resim boyutları gerekli hesaplamalar yapıldıktan sonra bulunabilmektedir. Bu hesaplamalarda $x/f=X/Z$ ilişkisi kullanılmaktadır [38].



Şekil 4.4. Resim düzlemi, eksen merkezi ilişkisi

$Q=(X,Y,Z)$ noktası izdüşüm merkezinden geçen ışın aracılığıyla resim düzlemine yansıtılmaktadır ve sonuçta resim üzerinde nokta $q=(x,y,f)$ 'dir. Resim düzlemi iğne deliğinin önünde yansıtma yüzeyi olarak görülmektedir.

Denklem (4.2)'de formüllerde geçen c_x ve c_y parametreleri yansıtma yüzeyi üzerinde merkezin dışında (optik eksenenden uzakta) kalan noktaları göstermektedir. Fiziksel dünyada koordinatı (X,Y,Z) olan Q noktası ekran üzerinde Q ($x_{\text{ekran}}, y_{\text{ekran}}$) noktası biçiminde aşağıdaki formül ile bağlantılı olarak gösterilmektedir [38].

$$x_{\text{screen}} = f_x \left(\frac{X}{Z} \right) + c_x, \quad y_{\text{screen}} = f_y \left(\frac{Y}{Z} \right) + c_y \quad (4.2)$$

(x_i, y_i) koordinatları, projeksiyon ekranı üzerinde (x_i, y_i, z_i) koordinatlarına bağlı olarak fiziksel dünyadan çıkarılmaktadır. Böyle dönüşümler incelendiğinde, homojen koordinatlar kullanmak daha uygun olacaktır. N Boyutlu yansıtılmalı bir uzayın içinde bir noktayla ilişkili homojen koordinatlar $n+1$ boyutlu vektör olacak şekilde tanımlanmaktadır. Fiziksel dünyadaki görüntülerin dönüşümü için gerekli hesaplama aşağıda verilmiştir [38].

$$q = MQ, \quad q = \begin{bmatrix} x \\ y \\ w \end{bmatrix}, \quad M = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad Q = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$

$$q = MQ = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x \cdot X + 0 \cdot Y + c_x \cdot Z \\ 0 \cdot X + f_y \cdot Y + c_y \cdot Z \\ 0 \cdot X + 0 \cdot Y + 1 \cdot Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x \cdot X + c_x \cdot Z \\ f_y \cdot Y + c_y \cdot Z \\ Z \end{bmatrix}$$

olarak bulunabilmektedir

İşlem sonucunda $w = Z$ olarak bulunmaktadır.

4.1.2. Lens Bozulmaları

Teoride bir lens hatasız olarak tanımlanmaktadır. Pratikte ise hiçbir lens mükemmel değildir. Bunun nedeni imalat süreçlerinden ileri gelmektedir. Matematiksel olarak, küresel lens yapmak, ideal parabolik bir lens yapmaktan çok daha kolaydır. Bunun yanında mercek ve kamera uyumunun mekanik olarak gerçekleştirilmesi de zor bir işlemdir.

Gerçek kamera lensleri kamera kenarlarına yakın piksellerin yerlerini çoğunlukla fark edilebilir şekilde bozulmaya uğratmaktadır. Bu bozulma, merceğin şişkin yapı (barrel) ya da balıkgözü (fish eye) etkisinden kaynaklanmaktadır. Şekil

4.5'te bu etkilerin sonucu oluşan radyal bozulma gösterilmektedir [38]. Bazı lenslerde, lensin merkezinden uzağa doğru gidildikçe, resim düzlemi üzerine düşen şekilde daha fazla bükülme olduğu görülmektedir. Ucuz lenslerin en büyük dezavantajı, lens merkezinden uzaktaki nesnelerin görüntülerini alırken oluşan bozulmalardır.

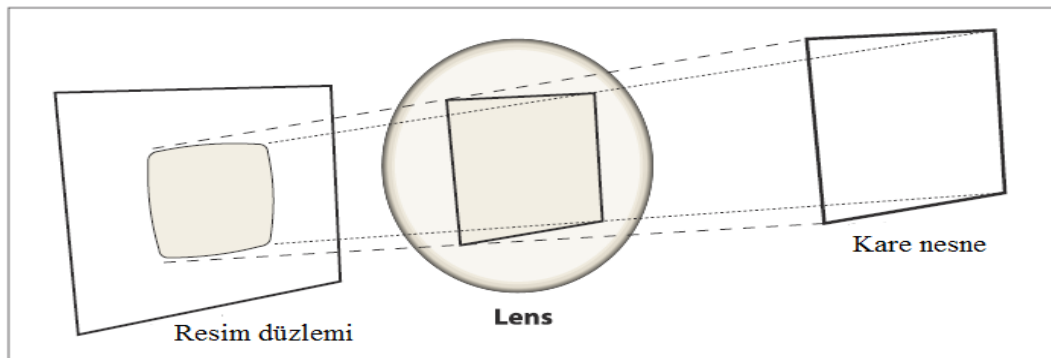
Radyal bozulma merkezde sıfır olmakta ve lensten uzaklaştıkça artmaktadır. PC kameralarında Taylor serisi ile görüntünün düzeltilmesinde k_1 ve k_2 kalibrasyon parametreleri kullanılmaktadır. Balıkgözü etkili yüksek bozulmalı görüntüye sahip bir kamerada ise üçüncü kalibrasyon katsayısı olan k_3 kullanılmaktadır [38].

$$x_{\text{düzeltilmiş}} = x(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \quad (4.3)$$

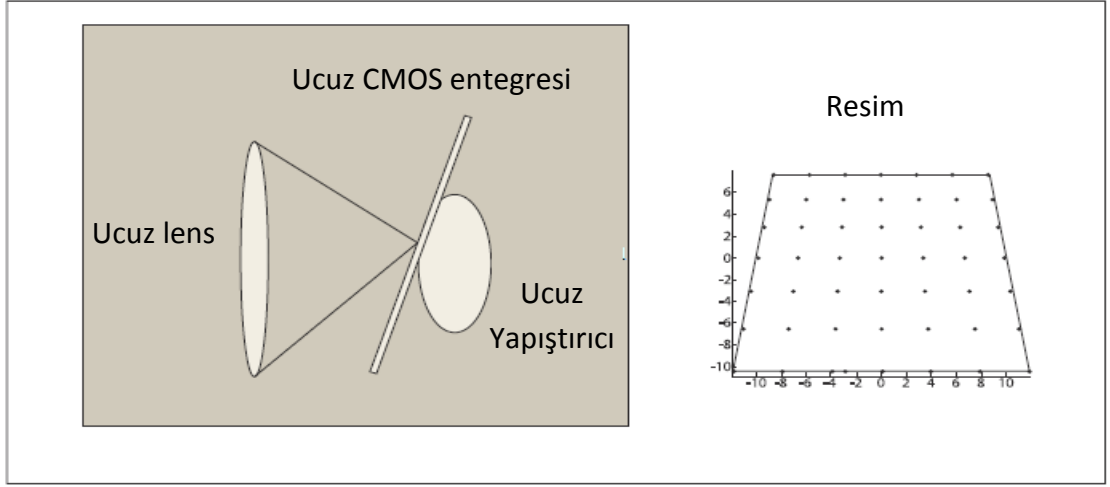
$$y_{\text{düzeltilmiş}} = y(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \quad (4.4)$$

Burada (x,y) bozuk noktaların orijinal konumu ve $(x_{\text{düzeltilmiş}}, y_{\text{düzeltilmiş}})$ düzeltmeler sonucunda elde edilen yeni konumudur. Şekil 4.5'te görüldüğü gibi, kare nesne radyal bozulma nedeniyle resim düzlemi üzerinde değişime uğramaktadır.

Kameralar tasarımları ve üretim teknikleri nedeni ile hiçbir zaman ideal ortamı sağlayamazlar. Kamera lensi ve CMOS algılayıcıların montajı yüksek hassasiyet ile yapılmamaktadır. Bu durumda lens ve algılayıcıyı resim düzlemine tam paralel olmaması nedeni ile teğetsel bozulma durumu ortaya çıkmaktadır. Bu etkiden dolayı alınan nesneler geometrik olarak bozulmaya uğramaktadır. Şekil 4.6'da bu etki görülmektedir.

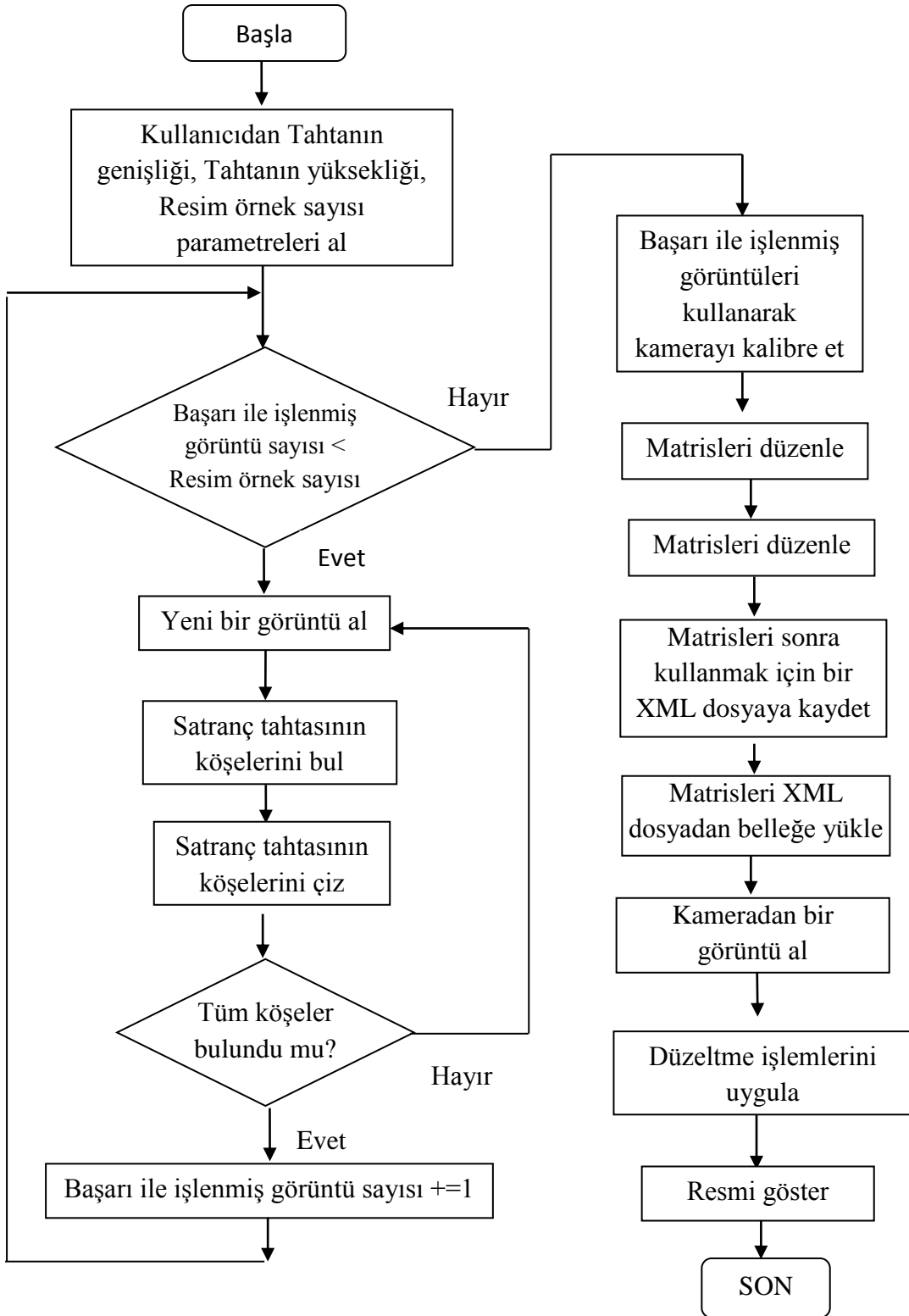


Şekil 4.5. Radyal bozulma



4.1.3. Kalibrasyon Süreci

Kalibrasyon işlemi için ölçüleri bilinen bir nesne seçilmelidir. Kalibrasyon yazılımları bu işlem için düzlemsel zeminli nesnelere kullanılmaktadır. Satranç tahtası bu işlem için idealdir bir nesnedir. Literatürde bazı kalibrasyon metotları üç boyutlu nesnelere kullanılmaktadır. Fakat iki boyutlu bir satranç tahtası da bu işlemi yapmak için yeterlidir. Bu çalışmada kamera kalibrasyon işlemi OpenCV Kütüphanesi ile yapılmıştır. Kalibrasyon işlemine ait akış diyagramı şekil 4.7'de görülmektedir [38].



Şekil 4.7. Kalibrasyon parametrelerinin elde edilmesi ve düzeltilmiş resmin görüntülenmesi için akış diyagramı

Kalibrasyon süreci ayrıntılı olarak incelendiğinde aşağıdaki 6 temel işlemin olduğu görülmektedir.

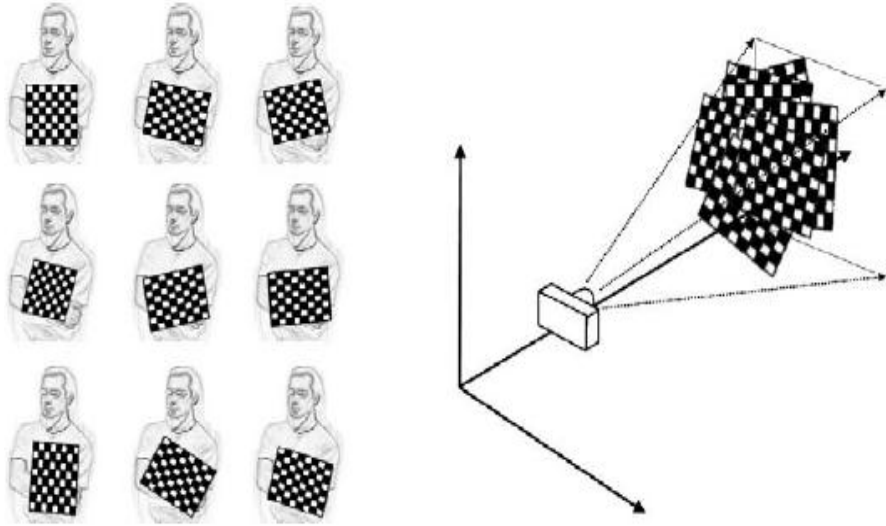
- Satranç tahtası resmi al
- Satranç tahtası kesişim noktalarını bul
- Kesişim noktalarını say
- Kesişim noktalarını göster
- Kamerayı kalibre et
- Düzeltilmiş görüntüyü göster

Bu işlemlerin aşamaları ayrıntılı olarak incelenmiştir.

a) Satranç Tahtası Resmini Al

`CvCapture* capture = cvCreateCameraCapture(0)` komutu kullanılarak kameradan satranç tahtası resmi alınır.

Kalibrasyon sürecinde şekil 4.8’de görüldüğü gibi satranç tahtasının farklı açılardan 10 adet fotoğrafı alınır [38]. Alınacak resimlerin sayısı lens bozukluğunu giderecek sayıda olacak şekilde seçilmiştir.



Şekil 4.8. Satranç tahtasının fotoğrafının çekilmesi

b) Satranç Tahtası Kesişim Noktalarını Bul

Verilen bir satranç tahtasının görüntüsünde, satranç tahtasının köşelerinin konumları için `cvFindChessboardCorners()` OpenCV fonksiyonu kullanılmaktadır. Şekil 4.9'da `cvFindChessboardCorners` fonksiyonu verilmiştir.

```
int cvFindChessboardCorners(  
const void* image,  
CvSize pattern_size,  
CvPoint2D32f* corners,  
int* corner_count = NULL,  
int flags = CV_CALIB_CB_ADAPTIVE_THRESH  
);
```

Şekil 4.9. `cvFindChessboardCorners` fonksiyonu

c) Kesişim Noktalarını Say

Kesişim noktalarının sayılması işleminde kullanılan `pattern_size` argümanı tahtanın her bir satır ve her bir sütunda kaç köşe olduğunu göstermektedir. Fonksiyon dahili köşelerin sayısını göstermektedir; bu yüzden standart bir oyun tahtası için değerleri `cvSize(7,7)` belirlemektedir.

Sonraki argüman, `corners`, köşe konumlarını kaydedebilen bir diziye bir işaretçidir. Bu dizi ön tahsisli olmalıdır ve elbette tahtanın üzerinde tüm köşeler için yeterince büyük olmak zorundadır.

`Corner_count` argümanı seçime bağlıdır; *non_NULL* ise, köşelerin sayısı kaydedilebildiyse integer bir işaretçidir. Fonksiyon hatalıysa, 0 geri dönecektir. Bitiş `flags` argümanı satranç tahtası üzerinde köşe bulmaya yardım için ek filtre işlemi yapmaktadır. Argümanların herhangi birini veya tümünü birleştirmek için *OR* işlemi kullanılmaktadır.

d) Satranç Tahtası Köşelerinin Çizimi

Satranç tahtası üzerindeki köşelerin çizdirilmesi çoğu zaman istenmektedir; bu yolla gözlenmiş olan köşelerle bilgisayar tarafından belirlenmiş olan köşelerin eşleşip

eşlenmediği belirlenebilmektedir. OpenCV yazılımı ile uygun rutinlerle bu işlem gerçekleştirilebilmektedir.

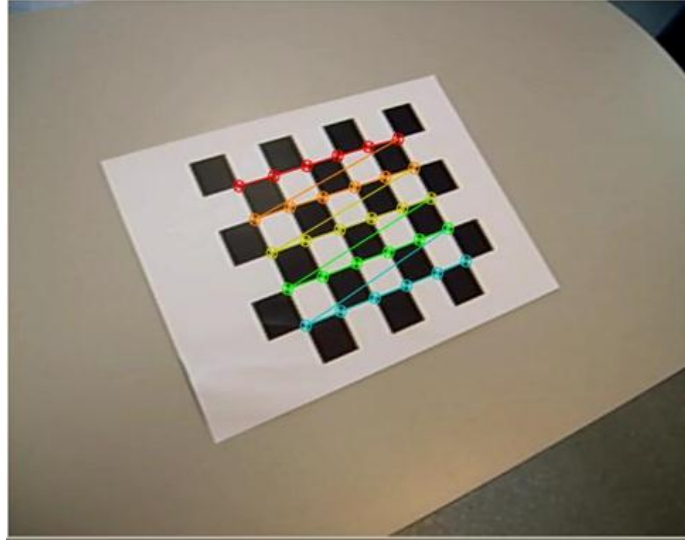
`cvDrawChessboardCorners()` fonksiyonu resim üzerinde `cvFindChessboardCorners()` aracılığıyla bulunan köşeleri çizer. Şekil 4.10'da `cvDrawChessboardCorners` fonksiyonu verilmiştir. Köşelerin tümü bulunamazsa mevcut köşeler küçük kırmızı hatlarla temsil edilmektedir. Tüm desen bulunduğunda köşeler farklı renklerle gösterilmektedir [38].

`cvDrawChessboardCorners()` fonksiyonuna gönderilen ilk argüman çizimi yapılacak olan resimdir. Köşeler renkli halkalarla temsil edilmektedir [61].

Sonraki iki argüman `pattern_size` ve `corners`, `cvFindChessboardCorners()` fonksiyonu için tanımlanan argümanlardır. Argüman `count` köşelerin sayısına eşit bir tamsayıdır. `pattern_was_found` argüman'ı tüm satranç tahtası deseninin başarıyla bulunup bulunmadığını göstermektedir. Şekil 4.11'de `cvDrawChessboardCorners()` fonksiyonunun bir satranç tahtasına uygulandıktan sonra elde edilen sonuç görülmektedir.

```
void cvDrawChessboardCorners(  
    CvArr* image,  
    CvSize pattern_size,  
    CvPoint2D32f* corners,  
    int count,  
    int pattern_was_found  
);
```

Şekil 4.10. `cvDrawChessboardCorners` fonksiyonu



Şekil 4.11. Satranç tahtası resmine cvDrawChessboardCorners() fonksiyonunun uygulanişı

e) Kamerayı Kalibre Et

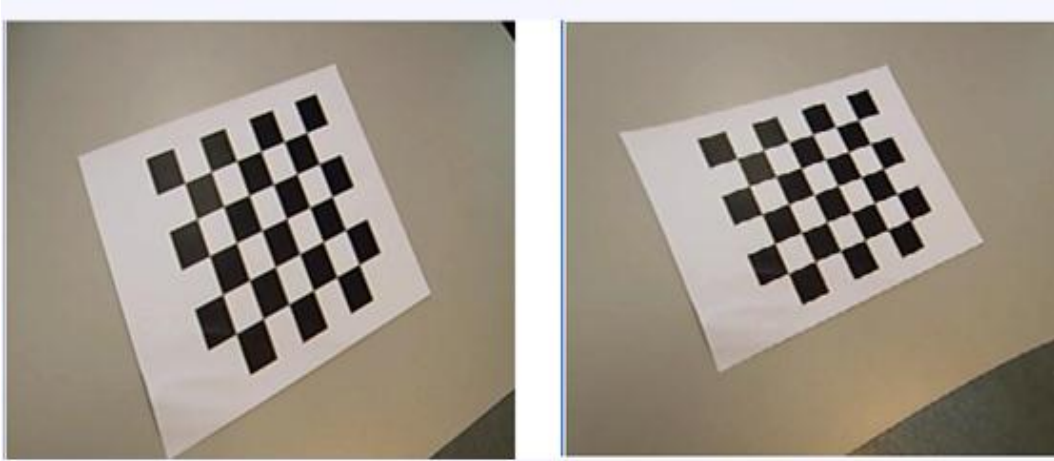
Kalibrasyon işlemleri yapılacak nesnenin birden çok kalibrasyon noktasına sahip olduğu durumlarda cvCalibrateCamera2() fonksiyonu kullanılmaktadır. Kalibrasyon fonksiyonlarının yürütülmesi aşamasında satranç tahtasının görüntüsü üzerinde gerekli parametrik hesaplamalar yürütülmektedir. Şekil 4.12'de cvCalibrateCamera2 fonksiyonu sunulmuştur. OpenCV'nin cvCalibrateCamera2 fonksiyonu gerekli işlemleri gerçekleştirerek kalibrasyonda kullanılacak parametreleri çıktı olarak sunmaktadır. Süreç sonunda kameranın gerçek matris değerleri, bozulma katsayısı, dönüş ve çevrim vektörleri üretmektedir. Bozulma katsayıları (k_1 , k_2 , p_1 , p_2 ve k_3) radyal ve teğetsel bozulma eşitliklerinde kullanılan katsayılardır. Kameranın gerçek parametreleri sürecin en sonunda elde edilmektedir [38].

```
void cvCalibrateCamera2(  
    CvMat* object_points,  
    CvMat* image_points,  
    int* point_counts,  
    CvSize image_size,  
    CvMat* intrinsic_matrix,  
    CvMat* distortion_coeffs,  
    CvMat* rotation_vectors = NULL,  
    CvMat* translation_vectors = NULL,  
    int flags = 0  
);
```

Şekil 4.12. cvCalibrateCamera2 fonksiyonu

f) Düzeltilmiş Görüntüyü Göster

Kalibrasyon sonucunda düzeltilmiş olan görüntünün gösterilmesi bu aşamada gerçekleştirilmektedir. Operatör bu sayede kalibrasyonun başarısını görsel olarak değerlendirme olanağı bulmaktadır. Bu aşamada kullanılan *cvShowImage* ("*Ham resim*", *image*) komut satırı ile işlenmemiş görüntüyü gösterilmektedir. *cvShowImage* ("*Düzeltilmiş*", *image*) komut satırı ile de düzeltilmiş görüntü gösterilmektedir. Bu fonksiyonların çalışması sonucunda şekil 4.13'teki sonuçlar elde edilmektedir.



a) Ham görüntü

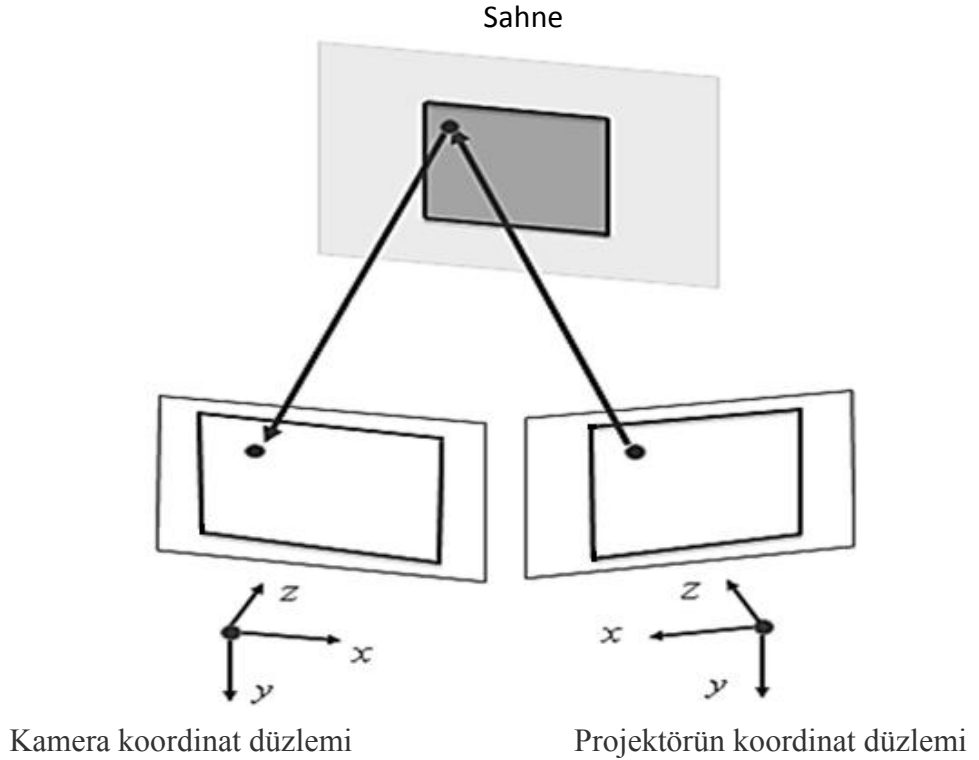
b) Düzeltilmiş görüntü

Şekil 4.13. Program sonuç görüntüleri

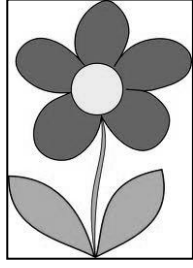
4.2. Projeksiyon-Kamera Eksen Kalibrasyonu

Tutarlı ve doğru ölçüm için projeksiyon ve kamera koordinat düzlemlerinin birbirleri ile uyumlu olma zorunluluğu bulunmaktadır. Projeksiyon ve kamera koordinat düzlemleri şekil 4.14'te görülmektedir [62,63,64]. Kalibrasyonun bu aşamasında, projektörün yansıttığı resmin kamera aracılığıyla tam ve doğru olarak alınabilmesi için gerekli dönüşümler yapılmaktadır.

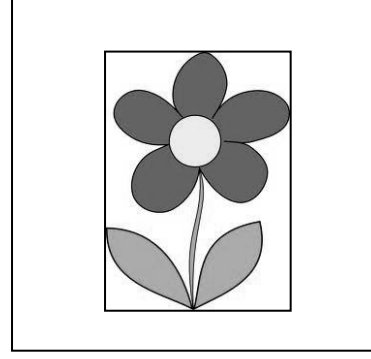
Şekil 4.15.a'da görünen kaynak resim, projektör tarafından yansıtıldığında sahne üzerinde şekil 4.15.b'deki biçimde gözlemlenmektedir. Kamera aracılığıyla bu resim alındığında, şekil 4.15.c'deki sonuç elde edilmektedir. Kamera yansıtılan nesneye sıkı sıkıya odaklansa dahi, bu sonuç her zaman belli bir düzeyde eksen sapması içermektedir.



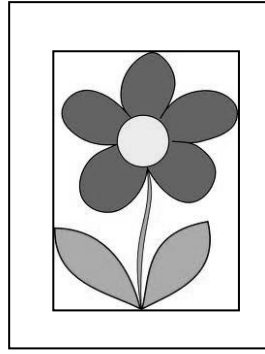
Şekil 4.14. Kamera ve projeksiyonun koordinat eksenleri



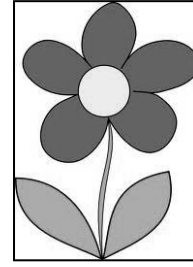
a) Yansıtmadan önce kaynak resim



b) Yansıtılan sahne



c) Eksen kalibrasyonundan önce çekilen resim



d) Eksen kalibrasyonundan sonra çekilen resim

Şekil 4.15. Eksen kalibrasyonunun adımları

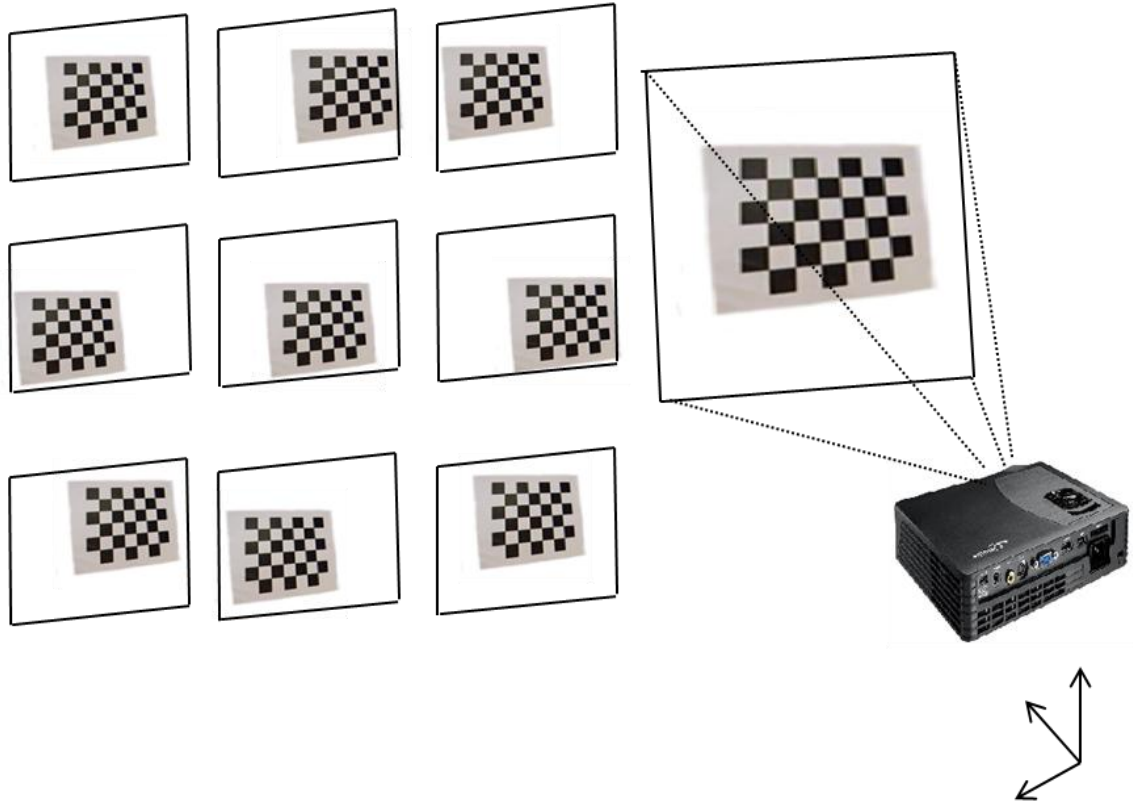
Eksen kalibrasyonu sürecinde, hedef nesneye ait olmayan yabancı alanlar kamera görüntüsünden çıkarılmalıdır. Bu işlemden sonra, şekil 4.15.d'de görülen sonuç elde edilmektedir. Bu süreç sonunda yansıtılan kaynak resmin (şekil 4.15.a) kayıpsız olarak şekil 4.15.d'de görüldüğü gibi kameradan alınması sağlanmaktadır. Bu sürecin sonunda, ölçüm sisteminde kullanılacak olan eksen kalibrasyon parametreleri elde edilmektedir.

4.3. Projeksiyon Kalibrasyonu

Projektör kalibrasyonu ile projektörün lens parametreleri elde edilmekte ve bu parametreler uygun şekilde saklanmaktadır. Kamera kalibrasyonuna benzer süreçler projeksiyon kalibrasyonu için gerçekleştirilmektedir [51]. Kalibrasyonun ilk aşamasında, 27 x 21cm ebatlarında satranç tahtası deseni projektör yardımı ile perdeye

yansıtılmaktadır. Ardından yansıtılan resmin görüntüsü kamera aracılığıyla alınmaktadır. Kamera, bu resimleri yakalarken kamera ve koordinat eksen kalibrasyon parametrelerini kullanmaktadır. Alınan görüntü üzerinde öncelikle satranç tahtasında bulunan karelerin kesiştiği noktalar işaretlenir. Bu noktaların koordinatları ve sayısı daha sonra kullanılmak üzere kaydedilmektedir. Projektör tarafından şekil 4.16'da görüldüğü gibi farklı pozisyonlarda satranç tahtası desenleri yansıtılmakta ve her birinin fotoğrafları çekilerek benzer işlem uygulanmaktadır.

Son adımda alınan görüntülerin gerçek koordinat değerleri ile önceki süreçlerden elde edilen koordinat değerleri karşılaştırılarak projektörün kalibrasyon parametreleri hesaplanmaktadır. Bu değerler daha sonra kullanılmak üzere saklanmaktadır.



a) Satranç tahtası desenlerini yansıtma süreci

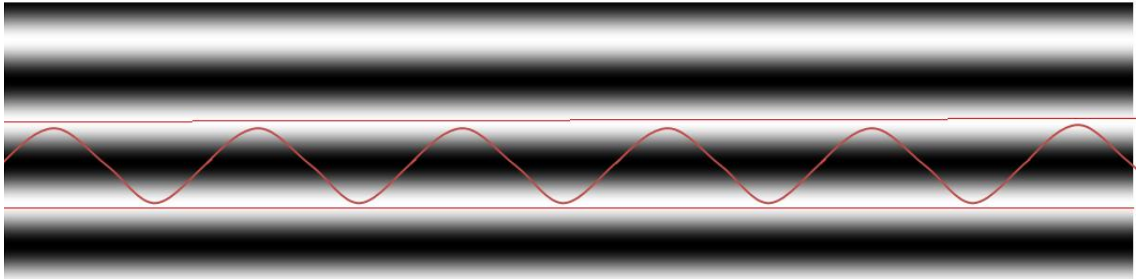
b) Perde üzerine yansıtma örneği

Şekil 4.16. Projeksiyonun kalibrasyon desenlerini yansıtma süreci

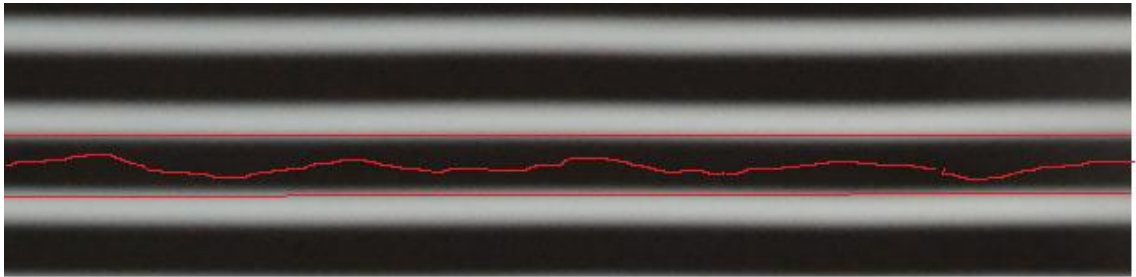
4.4. Gamma Kalibrasyonu

Fiziksel bir cihaz tarafından üretilen ışığın yoğunluğu genellikle girişinden uygulanan sinyalin lineer bir fonksiyonu değildir [65]. Bu duruma monitör ekranındaki görüntünün ya da projeksiyon makinesinin yansıttığı ışığın parlaklık düzeyindeki bozulma gibi etkiler örnek olarak verilebilmektedir. Yapısal ışık sisteminde kullanılan projeksiyon makinesinin bu olumsuz etkiden kurtulabilmesi için gamma kalibrasyonu aşamasından geçmesi gerekmektedir. Tez çalışması kapsamında geliştirilen gamma kalibrasyon yazılımı ile yansıtılan faz resimlerinin gamma değeri grafiksel olarak incelenip olası sorunlar giderilmektedir. Gamma kalibrasyonu yapılmış bir sistemde elde edilmesi gereken eğri şekil 4.17’de görülmektedir. Kalibre edilmiş bir sistemden elde edilen sinüs grafiği ideal sınırlar içerisinde salınım yapmalıdır.

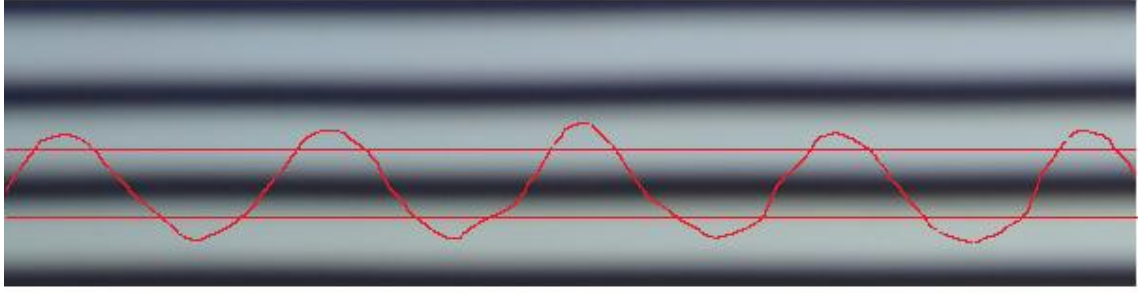
Projeksiyon makinesinin karışıklık ve parlaklık oranlarının düşük seviyede olması durumunda tasarlanan yazılımın elde ettiği gamma eğrisi şekil 4.18’de görülmektedir. İlgili şekilden de görülebildiği gibi elde edilen gamma eğrisi sınır değerlerinin uzaklaşmış bir biçimde iç bölgede salınım yapmaktadır.



Şekil 4.17. İdeal gamma eğrisi



Şekil 4.18. Sorunlu gamma eğrisi

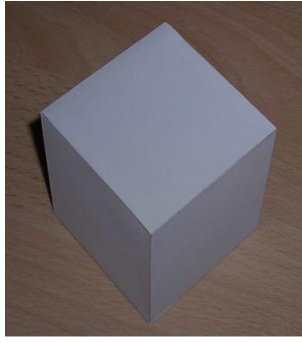


Şekil 4.19. Sorunlu gamma eğrisi

Projeksiyon makinesinin karşıtlık ve parlaklık oranlarının yüksek seviyede olması durumunda tasarlanan yazılımın elde ettiği gamma eğrisi şekil 4.19’da verilmiştir. İlgili şekilden de görülebildiği gibi elde edilen gamma eğrisi belirlenen sınır değerlerini aşarak salınım yapmaktadır.

4.5. Derinlik Kalibrasyonu

Nesnelerin gerçek dünyaya en yakın 3D modellerini elde etme amacıyla derinlik kalibrasyonu yapılmaktadır. Bu kalibrasyon aşaması kamera, eksen ve projeksiyon kalibrasyonu parametrelerini kullanmaktadır. Bu aşamada kalibrasyon işlemi için kalibrasyon küpü kullanılmaktadır. Kalibrasyon küpü öncelikle 3D ölçüm sistemi tarafından analiz edilir. Elde edilen bu modelin derinlik değeri, gerçek derinlik değeri ile karşılaştırılarak derinlik parametresi elde edilmektedir. 3D ölçüm programında elde edilen derinlik kalibrasyon parametresi kullanılarak, gerçek dünyaya en yakın modellemenin yapılması sağlanmaktadır. Kalibrasyon sürecinden önce ve sonra nesne boyutları şekil 4.20’de görülmektedir.



a) Nesne



b) Kalibrasyondan önce
nesnenin 3D geometrisi



c) Kalibrasyondan sonra
nesnenin 3D geometrisi

Şekil 4.20. Nesne boyutlarının incelenmesi

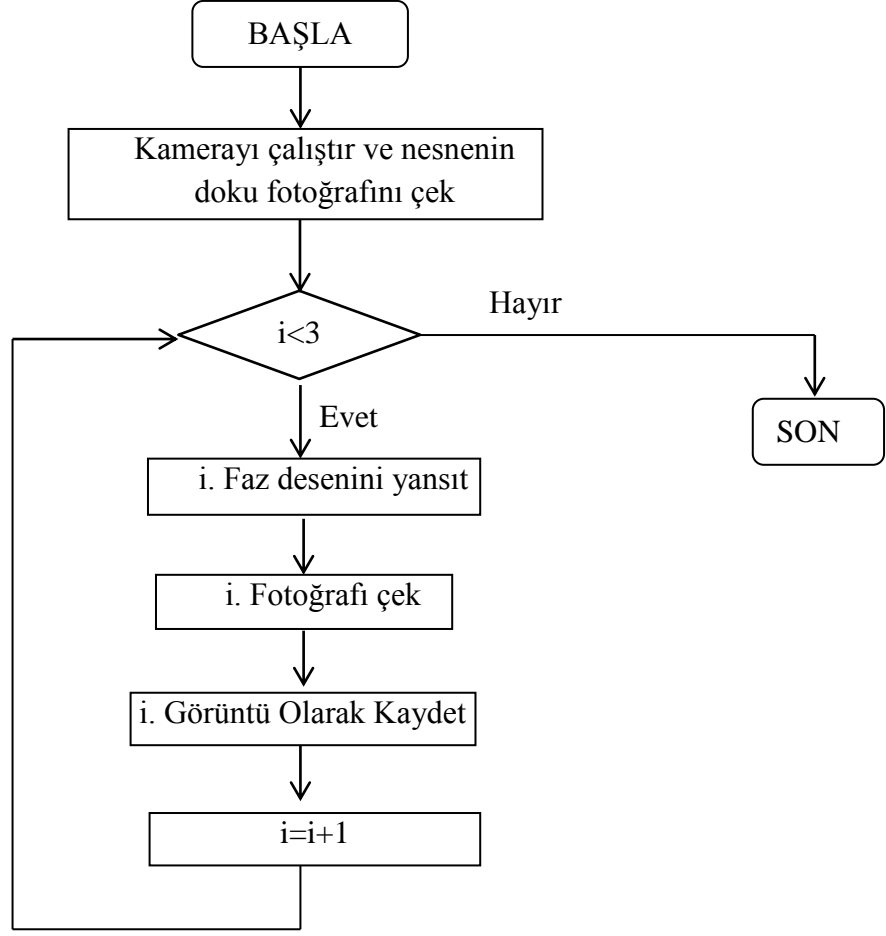
4.6. Kalibre Edilmiş Yapısal Işık Sisteminin Çalışması

Bu bölümde kalibre edilmiş üç faz kaydırma algoritma temelli yapısal ışık sisteminin çalışma prensipleri anlatılmaktadır.

4.6.1. Faz Resimlerinin Nesne Üzerine Yansıtılıp Görüntüsünün Alınması

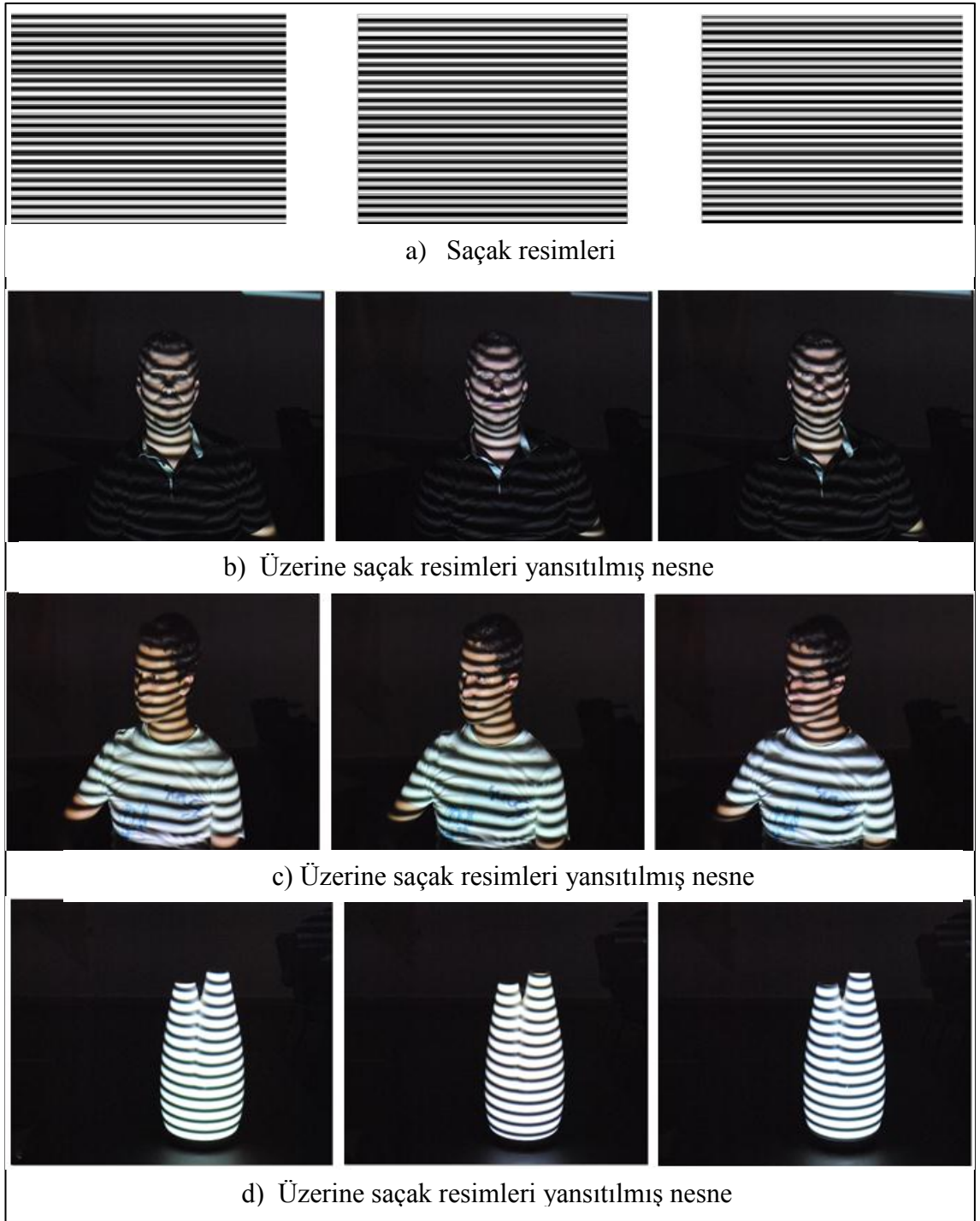
Bu adım, modellenecek nesnenin görüntüsünün alınması, birbiriyle 120° lik faz farkı olan üç desenin belirlenmiş olan zaman aralığında nesne üzerine yansıtılması ve yansıtılan bu desenlerin görüntüsünün kamera ile alınması süreçlerini içermektedir.

Belirtilen işlem süreçlerini gerçekleştirmek için C# programlama dili kullanılmıştır. Şekil 4.21'de fotoğraf çekimini gerçekleştiren prosedürün akış diyagramı görülmektedir. Çekim prosedürü, nesnenin orijinal ve üzerine faz-1, faz-2, faz-3 desenleri yansıtılmış biçimlerine ait fotoğrafların çekilmesini ve kaydedilmesini sağlamaktadır.



Şekil 4.21. Çekim prosedürünün akış diyagramı

Hazırlanan yazılımın çalıştırılması sonucunda üzerlerine saçak resmi yansıtılmış nesnelerin görüntüleri ve saçak resimleri şekil 4.22’de görülmektedir.



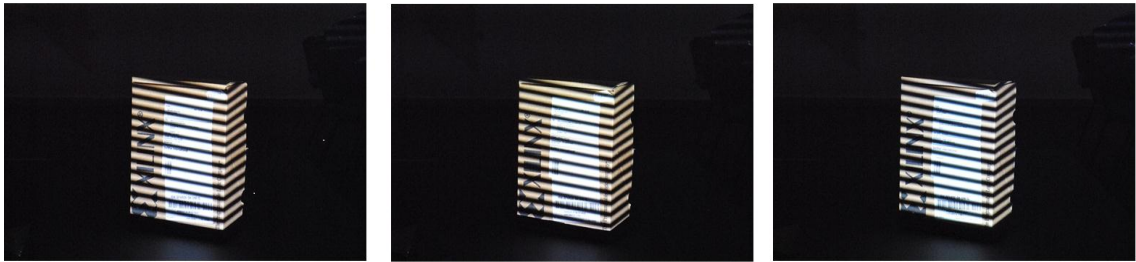
Şekil 4.22. Saçak resimleri ve nesne üzerine yansıtılmış saçak resimleri

4.6.2. Wrapped Resminin Oluşturulması

0 - 2π aralığındaki saçak desenleri yüksek çözünürlükte 3 boyutlu model oluşturulması için yeterli incelikte değildir. Ayrıca yakalanan resimlerde 3 boyut bilgisi

sunmayan tamamen aydınlanmış bölgeler de bulunmaktadır. 3'lü faz kaydırma algoritması, 3 faz değerini işleyerek çok daha yüksek çözünürlükte tek bir kaynak resme dönüştürecek süreçler içermektedir. Bu süreçler sonucunda yüksek çözünürlüklü wrapped resmi elde edilmektedir. Kullanılan saçak desenlerinin düşük 3 boyutlu model çözünürlüğüne sahip olmasına karşın, elde edilen wrapped resmi derinlik açısından çok daha değerlidir. Wrap işlemi ile sanal bir çözünürlük sağlanmakta ve derinlik bilgisi için daha değerli veriler elde edilmektedir. Saçak resimlerindeki çizgiler siyah beyaz olarak görünse de aslında sinüzoidal formdadır. Wrap metodu ile elde edilen resimde bulunan çizgilerin yoğunluğu 0-255 aralığında olacak şekilde ayarlanmakta ve grinin yoğun tonları biçiminde görülebilmektedir. Bu çizgilerin çeşitliliğindeki artış sayesinde, elde edilecek 3D görüntünün çözünürlüğü de yükselmektedir. Şekil 4.23.a'da faz resimleri ve bu resimler kullanılarak elde edilen wrapped resmi gösterilmektedir.

Wrap sürecinin başlangıcında, üç faz resminin parlaklık değerlerine bağlı olarak maske değeri elde edilmektedir. Maske, nesneyle zemini birbirinden ayırmak için kullanılan boolean tipinde bir değişkendir. Bu açıdan değerlendirildiğinde 3D modellemede çok önemli bir yere sahip olduğu görülmektedir. Maske değişkeni sayesinde arka planda bulunan alanların üç boyutlu analizine izin verilmez. Maske değişkeninin hatalı bulunması 3D modellemede ciddi sorunlara yol açmaktadır. Bu sorunlar bölüm 5'te tartışılmaktadır.

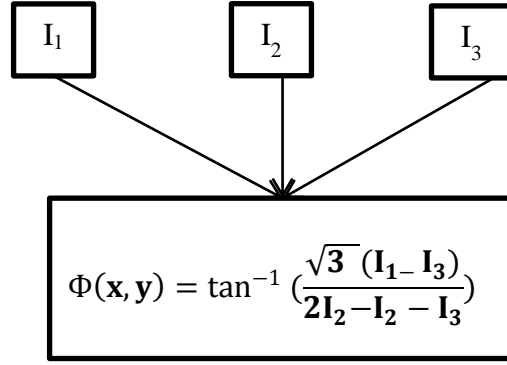


a) Üzerine saçak resimleri yansıtılmış nesne



b) Wrapped faz resmi

Şekil 4.23. Saçak resimleri ve wrapped faz resmi

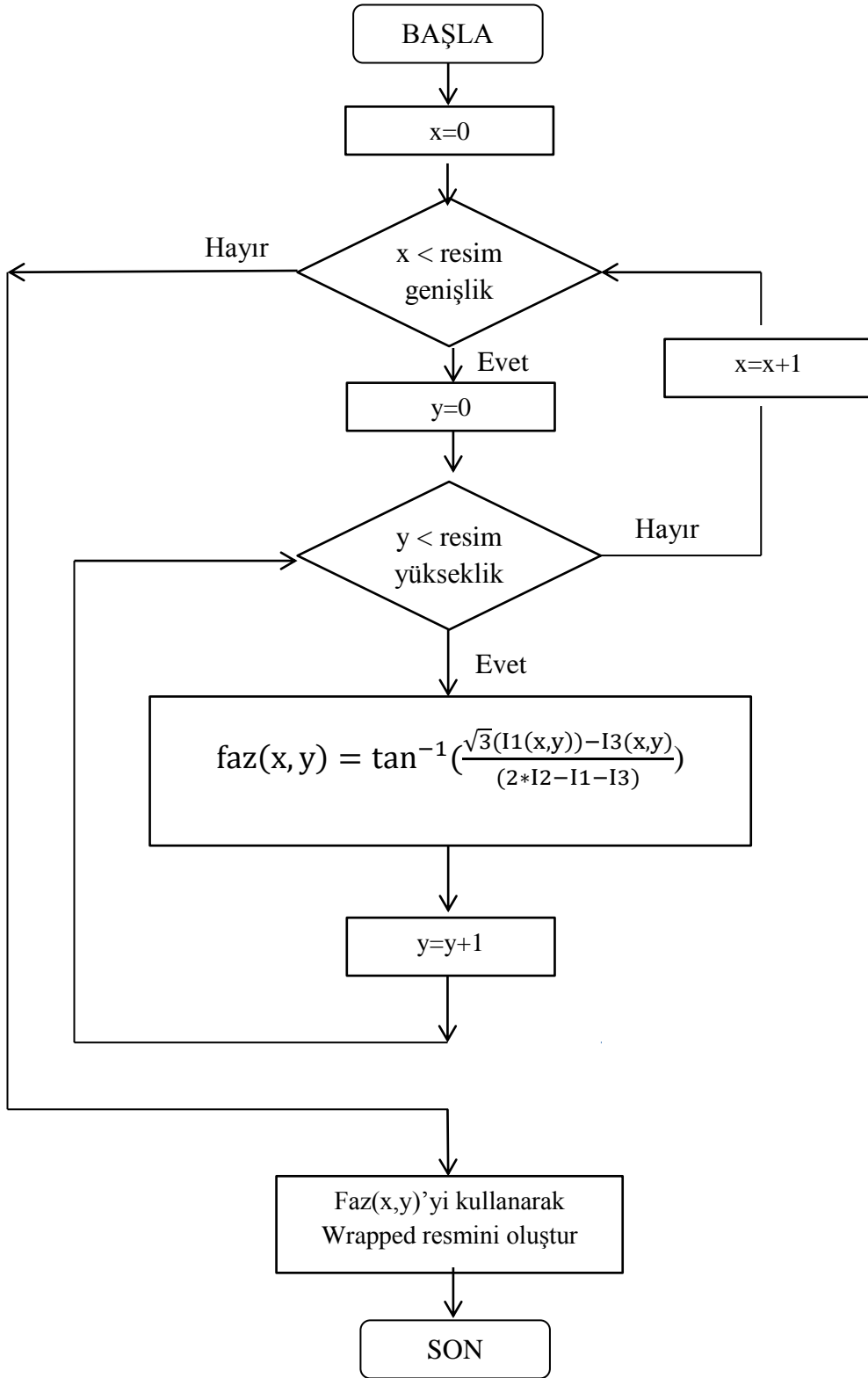


Şekil 4.24. Faz değerinin elde edilmesi

Faz resimlerinin parlaklıkları olan I_1 , I_2 ve I_3 , denklem (4.5)'te görülen işleme tabi tutularak faz değeri bulunmaktadır. Bu denklem kullanılarak üç resme ait parlaklık değeri ile derinlik bilgisine ulaşılmaktadır. Bu işlem süreci şekil 4.24'te görülmektedir.

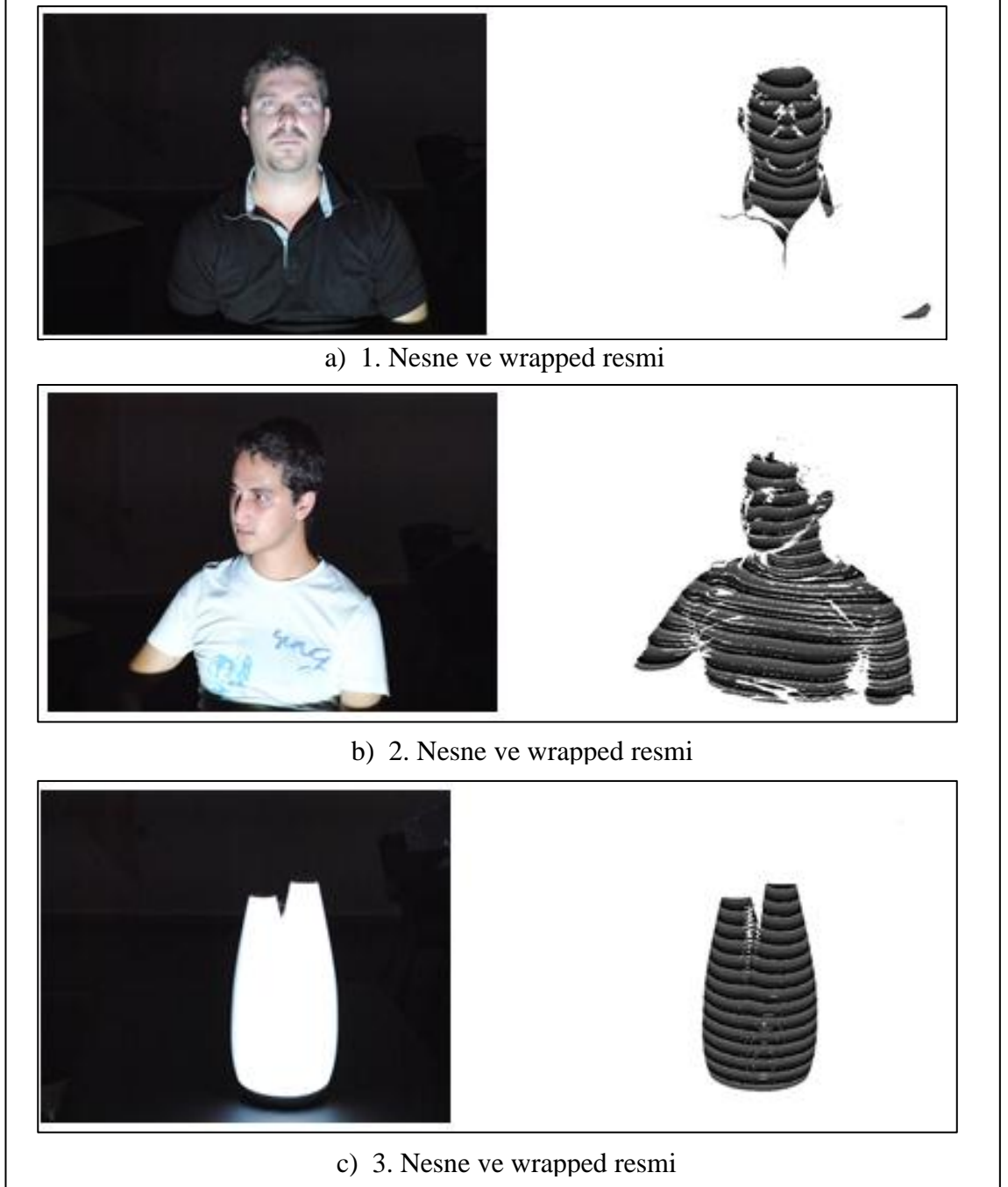
$$\Phi(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{3} (I_1 - I_3)}{2I_2 - I_2 - I_3} \right) \quad (4.5)$$

Bu denklem, resmin tüm x, y koordinatlarında bulunan piksel değerlerine ayrı ayrı uygulanmalıdır. Şekil 4.25'te bu işlemi gerçekleştiren fonksiyonun akış diyagramı sunulmuştur. İşlem sonunda wrapped resim elde edilmektedir.



Şekil 4.25. Wrap işlemi akış diyagramı

Yazılım, saçak desenlerinin faz değerlerini wrapped sürecinden geçirmesi sonrasında elde edilen wrapped resimleri şekil 4.26’da sunulmuştur.

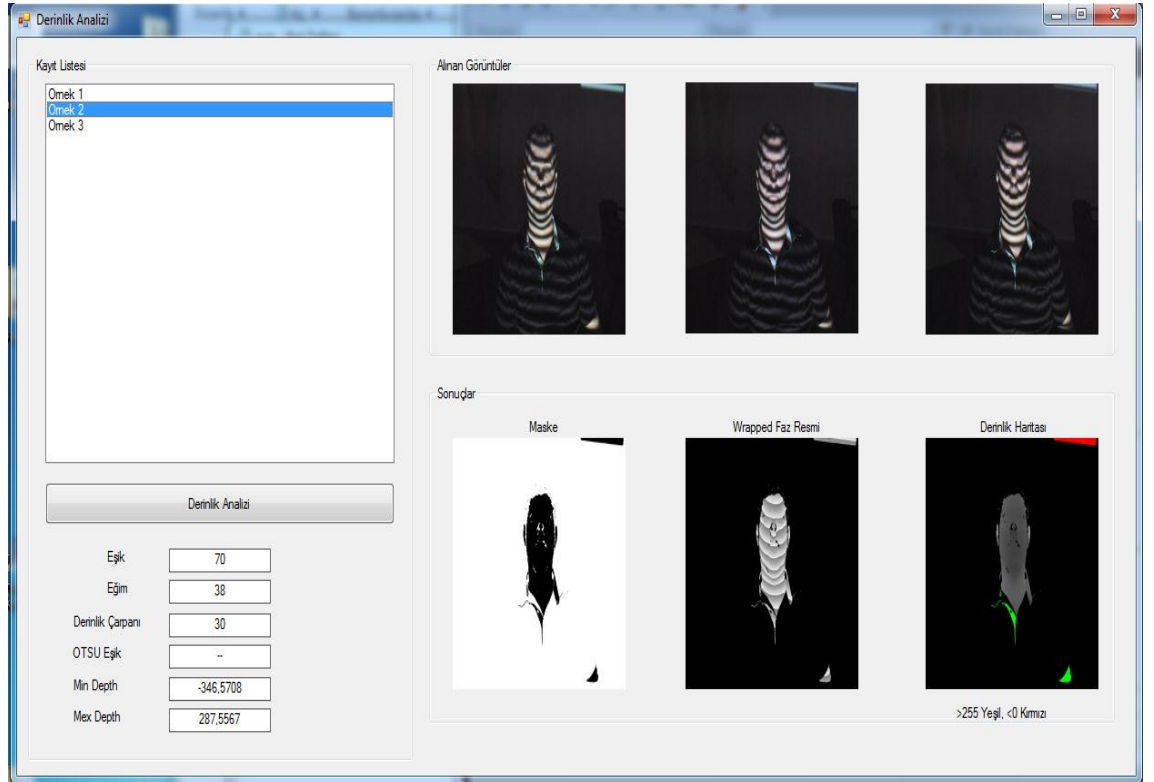


Şekil 4.26. Nesnelere ve wrapped resimleri

4.6.3. Unwrap İşlemi ve Derinlik Haritasının Oluşturulması

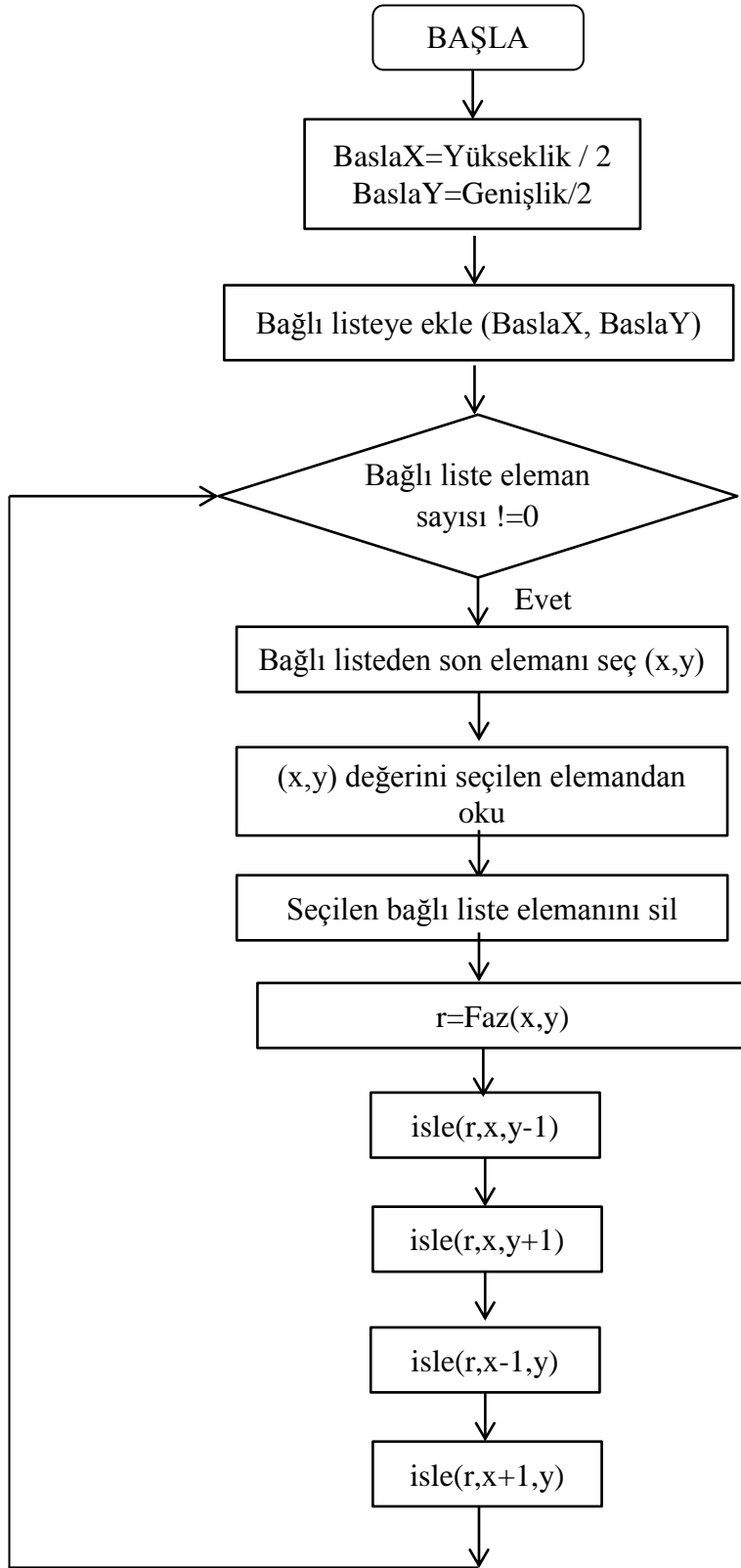
Unwrap işlemi ile wrap sürecinde elde edilmiş bilgiler kullanılarak derinlik haritası için gerekli olan derinlik matrisi elde edilmektedir. Sürecin başlangıcında wrapped resminin merkez konumundan çevresine doğru ilerlenerek tüm piksellerin unwrap sürecinden geçirilmesi sağlanır. Unwrap süreciyle, derinlik bilgisine ulaşmak için kullanılacak olan yeni derinlik matrisine dönüşümler yapılmaktadır. Elde edilen yeni derinlik matrisi üzerinde derinlik çarpanı ve eğim parametreleri kullanılarak derinlik bilgisi elde edilmektedir. Böylece 3D modellenen nesnenin uygun eğim ve derinlikte olması sağlanmaktadır. Son adımda ise, derinlik bilgisi kullanılarak 3D model oluşturulmaktadır.

Şekil 4.27’de derinlik analizini gerçekleştiren uygulamaya ait ekran görüntüsü görülmektedir. İlgili pencerede kayıt listesinden analizi yapılacak nesne seçildiğinde ‘Alınan Görüntüler’ kısmında nesnenin kayıtlı faz resimleri görüntülenir. ‘Derinlik Analizi’ butonu tıklanması durumunda analiz işlemi yapılarak ‘Maske’, ‘Wrapped Faz Resmi’ ve ‘Derinlik Haritası’ resimleri görüntülenmektedir.

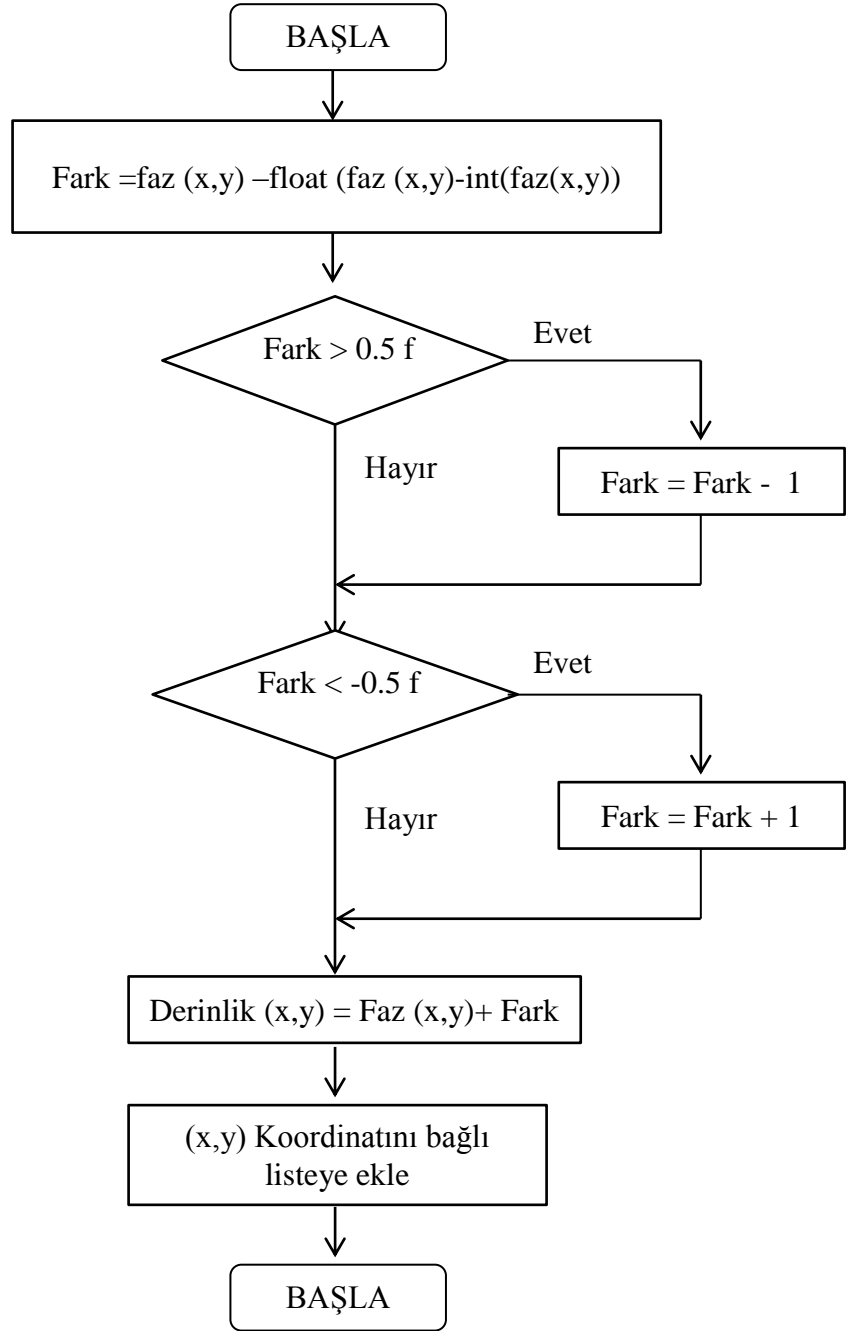


Şekil 4.27. Derinlik analizi yapan pencerenin görüntüsü

Unwrap işlemine ait akış diyagramı şekil 4.28'de görülmektedir. Şekil 4.29'da koordinat bilgilerinin hesaplanmasını sağlayan *isle* fonksiyonunun akış diyagramı görülmektedir. x ve y olarak ifade edilen koordinat değerleriyle wrap süreci ile elde edilen faz değerlerine ulaşılmaktadır. Ardından, x ve y koordinat bilgilerinin değerlerine bağlı olarak *isle* fonksiyonuna yönlendirme işlemi gerçekleştirilmektedir. Şekil 4.29'da görülen *isle* fonksiyonu yürütülerek yeni derinlik değeri elde edilmektedir. Bu süreçle wrapped resminin merkez noktasından (x,y) başlanarak resmin tüm pikselleri *isle* fonksiyonundan geçmektedir.



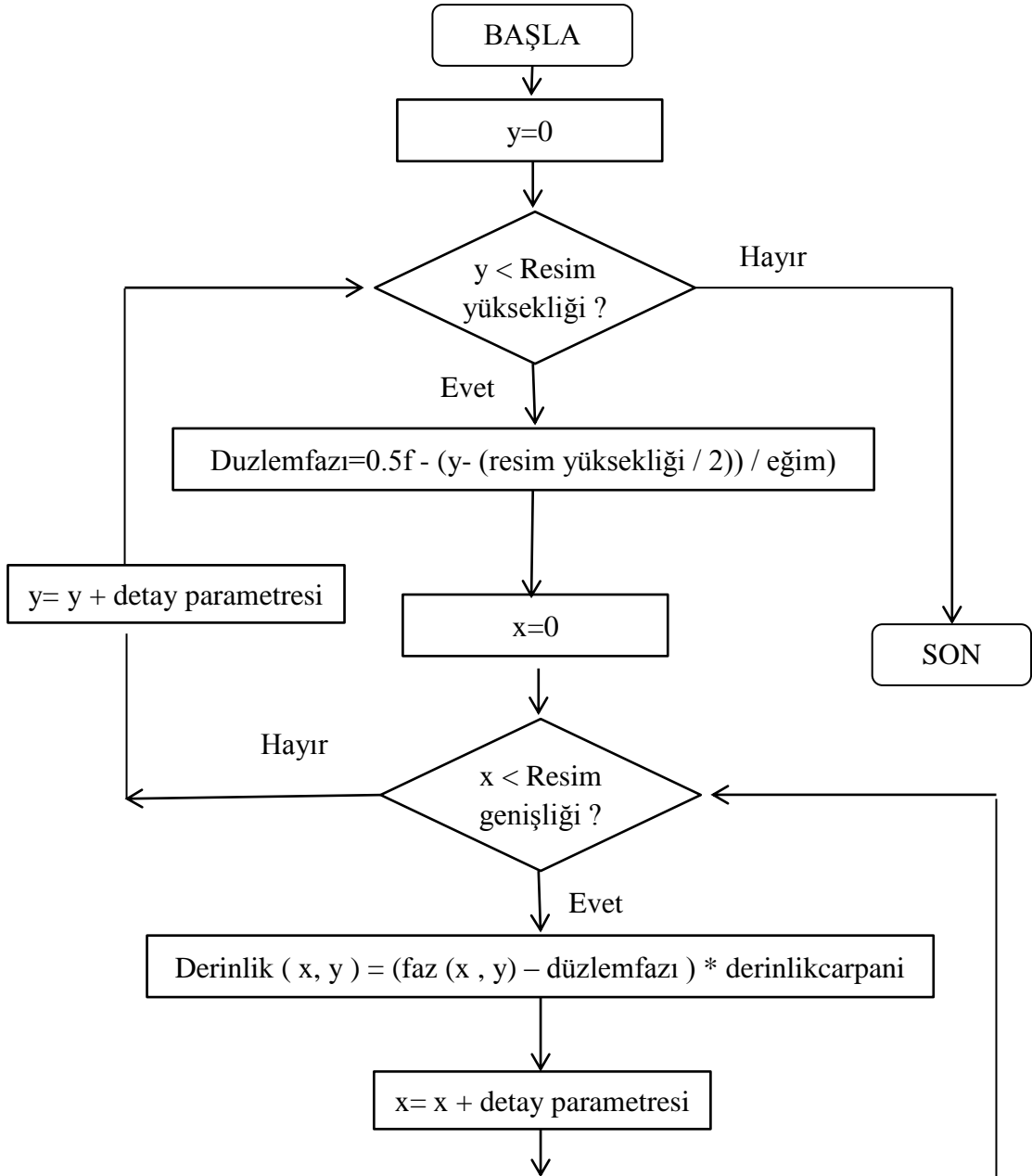
Şekil 4.28. Unwrap işlemi akış diyagramı



Şekil 4.29. isle fonksiyonu akış diyagramı

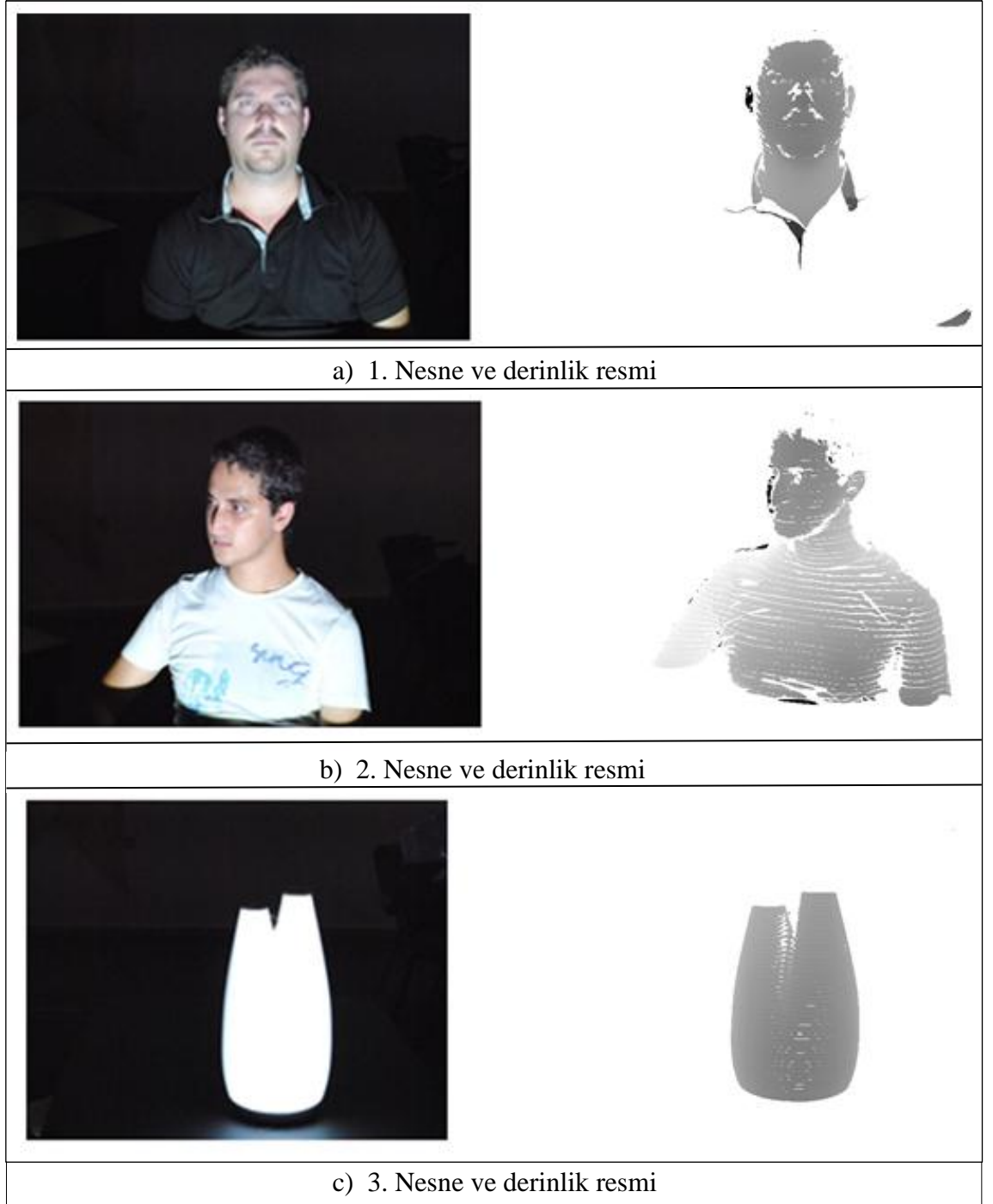
Derinlik oluşturma adımı ile, unwrap işleminden elde edilen derinlik değerleri derinlik çarpanı ve eğim parametreleriyle uygunlaştırılmaktadır. Böylece 3D

modellenecek nesnenin uygun eğim ve derinlikte olması sağlanmaktadır. Uygun derinlik ve eğim parametrelerinin kullanılmaması sonucunda 3D modelde bozulmalar oluşmaktadır. Bu parametrelerin 3D modele olan etkisi bölüm 5’te tartışılmaktadır. Şekil 4.30’de derinlik oluşturma fonksiyonuna ait akış diyagramı görülmektedir.



Şekil 4.30. Derinlik oluşturma fonksiyonuna ait akış diyagramı

Elde edilen derinlik bilgisi resim olarak kaydedilerek kullanıcıya sunulmaktadır. Şekil 4.31’de bu resimler görülmektedir.

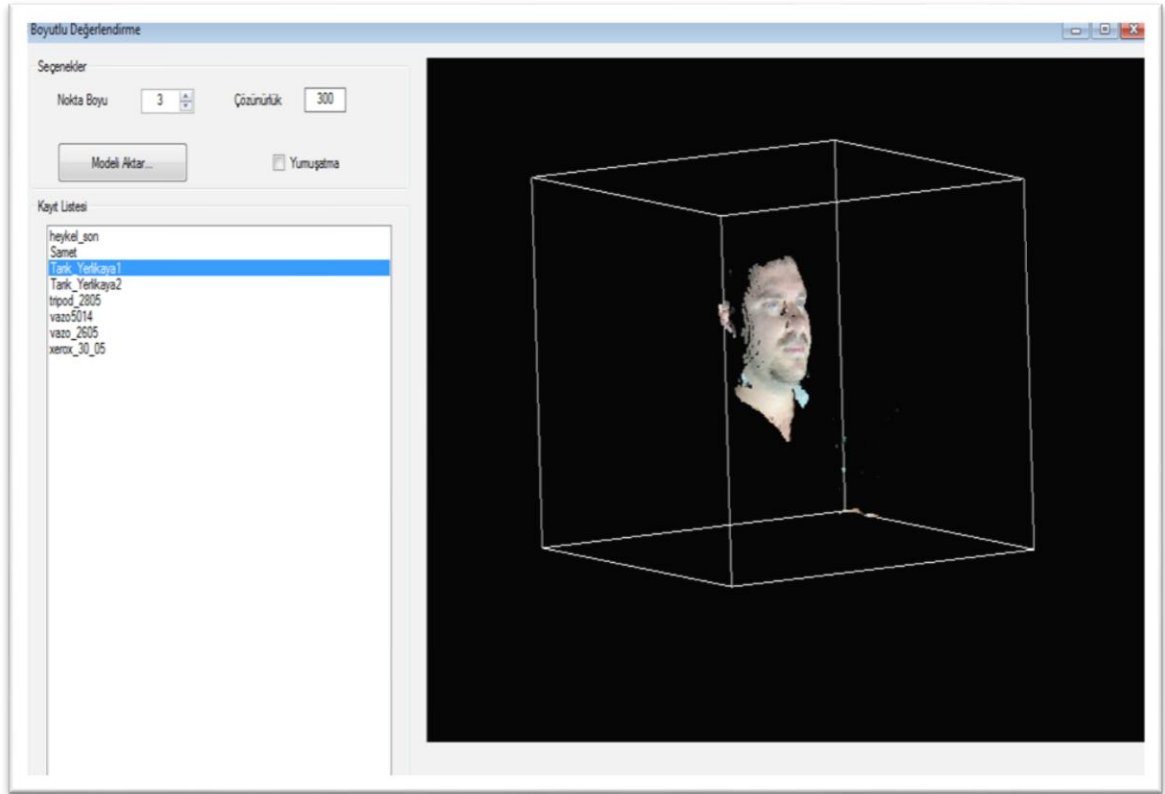


Şekil 4.31. Nesnelere ve derinlik haritası resimleri

4.6.4. 3D Geometriyi Elde Etme

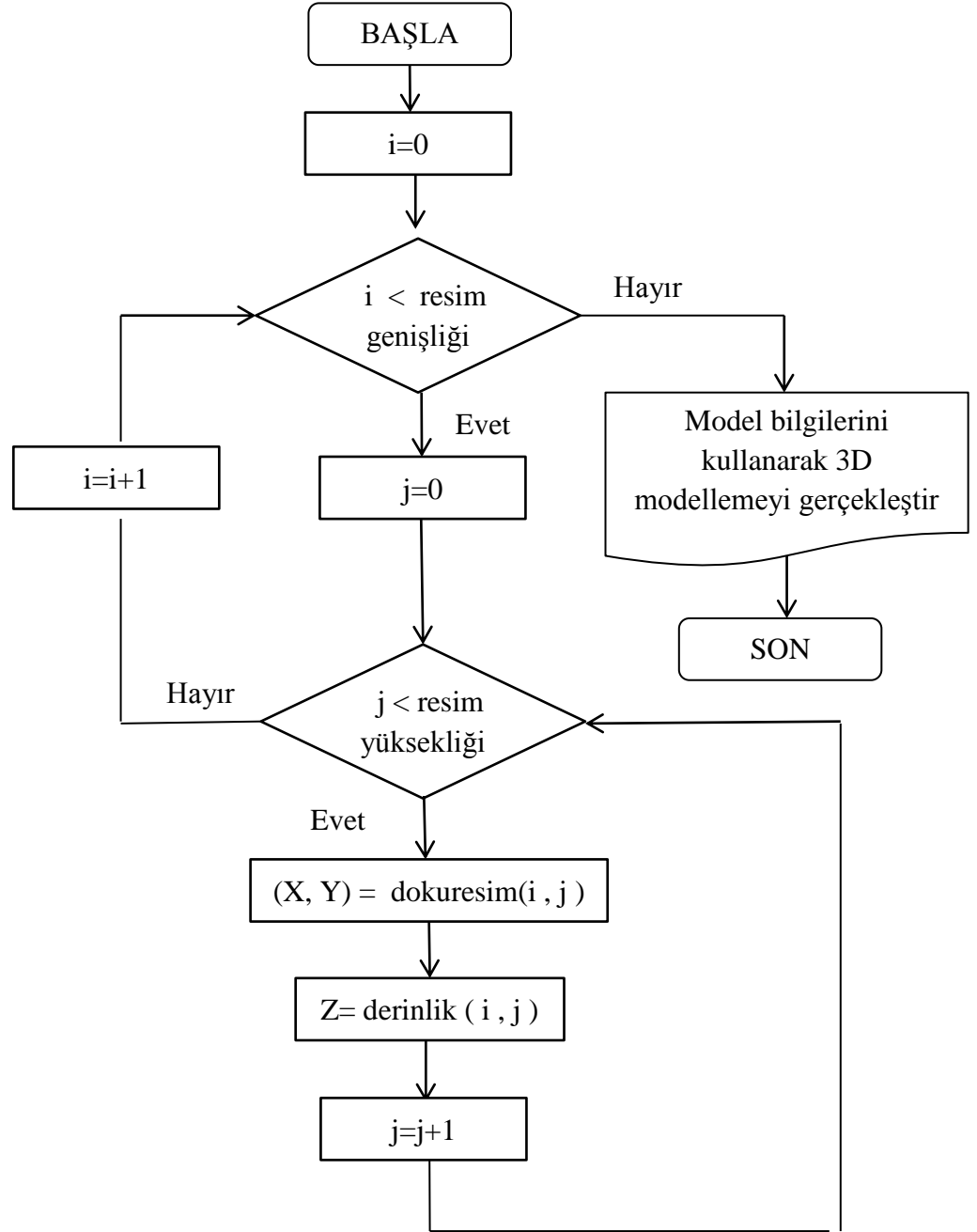
Bu aşamada nesnenin 3D modeli elde edilmektedir. Derinlik analizinin yapılmasının ardından elde edilen bilgiler kullanılarak nesne OpenGL desteği ile 3D olarak görüntülenmektedir. OpenGL, grafik donanımına ara yüz olma rolünü üstlenen bir kütüphanedir. OpenGL çok sayıda fonksiyona sahiptir. Bu fonksiyonlar kullanılarak etkileşimli 3D uygulamalar üretilebilmektedir [66].

3D değerlendirme işlemini gerçekleştirmek için şekil 4.32’de görülen uygulamanın tasarımı tez çalışması kapsamında gerçekleştirilmiştir. Bu ekranda bulunan listeden seçilen nesnenin 3D modelleme sonucu görülebilmektedir. Ayrıca seçilen nesnenin farklı açılardan görüntüleri alınabilmekte ve “model aktar” özelliği sayesinde üçüncü parti programların kullanabilmesi için model dışarı aktarılabilmektedir.



Şekil 4.32. 3D görüntüleme ekranı

3D görüntüleme ekranında seçilen nesnenin 3D modelini ekrana getiren prosedürün akış diyagramı şekil 4.33'te görülmektedir. Prosedür, listeden seçilen nesnenin model bilgilerini çağırır ve modellenecek nesnenin noktaları OpenGLControl ekranında görüntüler.



Şekil 4.33. 3D modeli gösterme fonksiyonu akış diyagramı

Sistemin performansını test etmek için çeşitli nesnelerin 3D modelleme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen 3D modelleme sonuçları şekil 4.34’te sunulmaktadır.



a) 1. Kişi ve 3D modelleme sonucu



b) 2. Kişi ve 3D modelleme sonucu



c) Vazo ve 3D modelleme sonucu

Şekil 4.34. 3D modelleme sonuçları

BÖLÜM 5


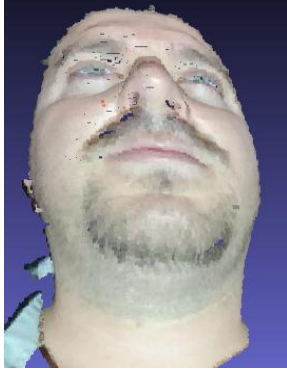
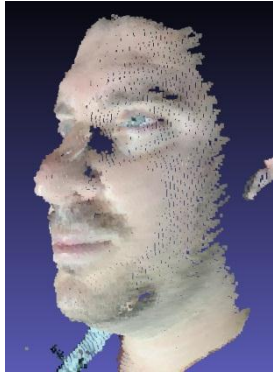
DENEYSEL SONUÇLAR

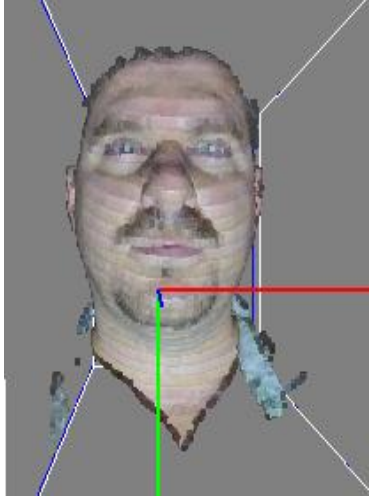
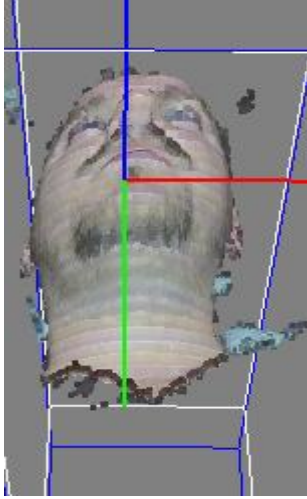
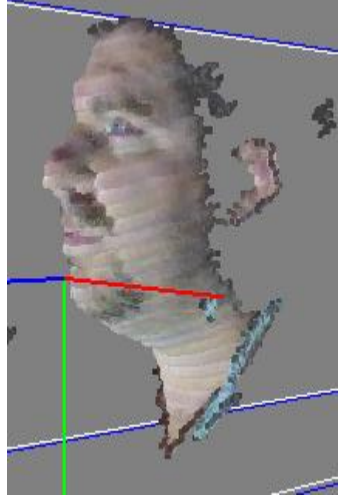
Bu bölümde tasarlanan üç faz kaydırma metodu temelli yapılandırılmış ışık sisteminin farklı sistemler ile karşılaştırması yapılmış, kalibrasyon işleminin sistem üzerindeki etkileri incelenmiş ve sistem parametrelerinin analizi gerçekleştirilmiştir.

5.1. Tasarlanan Üç Faz Kaydırma Metodu Temelli Yapılandırılmış Işık Sisteminin Farklı Sistemler İle Karşılaştırılması

Çalışma kapsamında tasarlanan üç faz kaydırma metodu temelli yapılandırılmış ışık sistemi ile Kyle Mcdonald tarafından tasarlanan ve benzer metodu kullanan bir sistem karşılaştırılmıştır [67]. Her iki sistemin aynı nesne üzerine uygulanması sonucunda elde edilen 3D modelleme sonuçları tablo 5.1’de sunulmuştur. İlgili tablodan görülebildiği gibi tasarlanmış olan sistem daha net çözünürlükte 3D modelleme yapmaktadır.

Tablo 5.1. 3D modelleme sistemlerinin karşılaştırılması

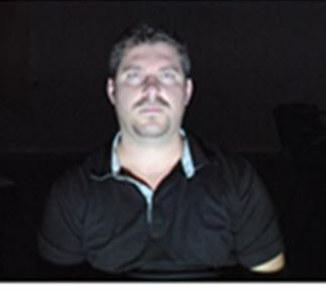

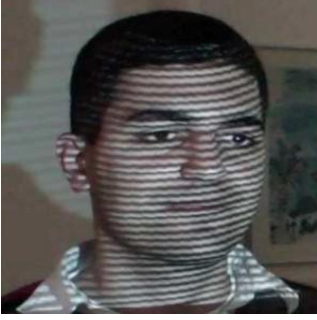





Çalışma kapsamında tasarlanmış üç faz kaydırma metodu temelli yapılandırılmış ışık sisteminin 3D modelleme sonuçları		
3D görünüş 1	3D görünüş 2	3D görünüş 3
		

Kyle Mcdonald tarafından tasarlanmış olan üç faz kaydırma metodu temelli yapılandırılmış ışık sisteminin 3D modelleme sonuçları		
3D görünüş 1	3D görünüş 2	3D görünüş 3
		

Tasarlanmış olan yapılandırılmış ışık sistemi ile farklı yapılandırılmış ışık sistemlerinin karşılaştırma sonuçları tablo 5.2’de sunulmuştur. Tablo 5.2’de sunulan

ikili kodlama temelli 3D modelleme işlemi Giryes vd. tarafından, gray kodlama temelli 3D modelleme işlemi Lanman ve Taubin tarafından, hibrit tekniği temelli 3D modelleme işlemi ise Reitemeier vd. tarafından gerçekleştirilmiştir [68, 69, 7]. İlgili tabloda görülebildiği gibi en iyi 3D modelleme çözünürlüğüne, tasarlanmış olan üç faz kaydırma metodu temelli yapılandırılmış ışık sistemi ve hibrit tekniği ile tasarlanmış olan sistem kullanılarak ulaşılmaktadır. Ancak üç faz kaydırma algoritmasının diğer yöntemden daha az desen kullanıyor olması bu metodu en avantajlı konuma getirmektedir.







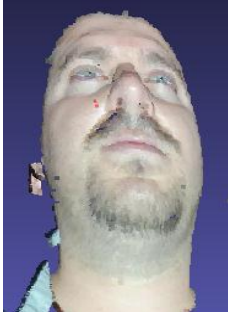
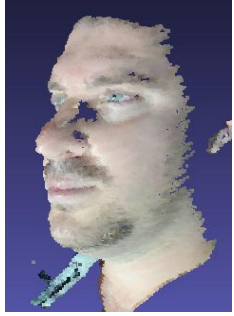
Tablo 5.2. 3D modelleme sistemlerinin karşılaştırılması

Kodlama Yöntemi	Nesne	3D Modeli
Üç faz kaydırma metodu temelli yapılandırılmış ışık sistemi		
İkili kodlama tekniği [68]		
Gray kodlama tekniği [69]		
Hibrit tekniği [7]		



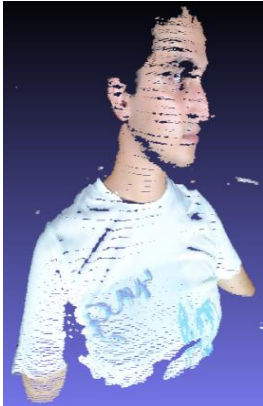





5.2. Kalibrasyon İşleminin Sistem Üzerindeki Etkileri

Kalibrasyon işleminin sistem performansı üzerindeki etkisini analiz etmek için test işlemleri yapılmıştır. Test sonuçları Tablo 5.3.a, 5.3.b ve 5.3.c'de sunulmaktadır. İlgili tablolarda, test edilen nesnenin wrapped faz resmi, derinlik haritası, kalibre edilmiş ve kalibre edilmemiş sistemin 3D modelleme sonuçları verilmiştir. Tablolardan da görüldüğü gibi, kalibrasyon sonrasında elde edilen 3D modellerin gerçek boyutlarına daha yakın hale gelmesi, 3D modellerde kopmaların olmaması ve en ideal eğimle modellenmeleri sağlanmaktadır. Böylece kalibrasyon sonrasında sistemin daha yüksek performansta 3D modelleme işlemini gerçekleştirdiği tespit edilmiştir.




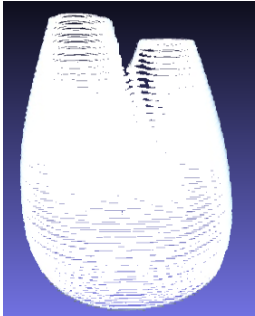
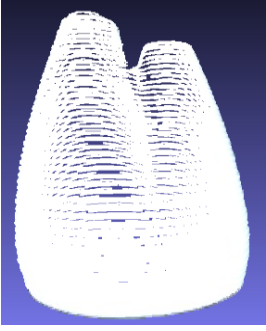
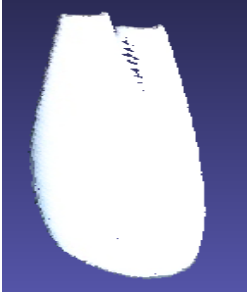

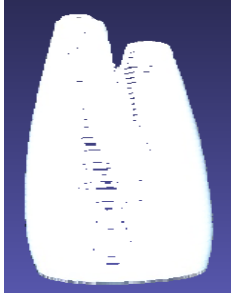
Tablo 5.3.a. Deneysel 3D modelleme sonuçları – test no: 1

Test no	Wrapped faz	Derinlik haritası	
1			
	Kalibre edilmemiş sistemin 3D modelleme sonuçları		
	3D görünüş 1	3D görünüş 2	3D görünüş 3
			
	Kalibre edilmiş sistemin 3D modelleme sonuçları		
	3D görünüş 1	3D görünüş 2	3D görünüş 3
			

Tablo 5.3.b. Deneysel 3D modelleme sonuçları – test no: 2

Test no	Wrapped faz	Derinlik haritası	
			
Kalibre edilmemiş sistemin 3D modelleme sonuçları			
	3D görünüş 1	3D görünüş 2	3D görünüş 3
2			
Kalibre edilmiş sistemin 3D modelleme sonuçları			
	3D görünüş 1	3D görünüş 2	3D görünüş 3
			

Tablo 5.3.c. Deneysel 3D modelleme sonuçları – test no: 3

Test no	Wrapped faz	Derinlik haritası	
3			
	Kalibre edilmemiş sistemin 3D modelleme sonuçları		
	3D görünüş 1	3D görünüş 2	3D görünüş 3
			
	Kalibre edilmiş sistemin 3D modelleme sonuçları		
	3D görünüş 1	3D görünüş 2	3D görünüş 3
			


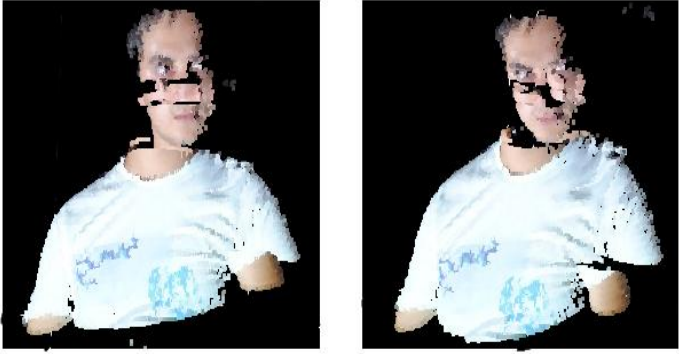




5.3. Sistem Parametrelerinin Analizi

Tasarlanan sistemin başarı ile modelleme gerçekleştirebilmesi için bazı parametrelerin el ile ayarlanması gerekmektedir. Sistem bir kez kalibre edildikten sonra bu parametrelerin değiştirilmesine gereksinim duyulmamaktadır. Bu bölüm, bu parametrelerin hatalı seçilmeleri durumunda ortaya çıkacak olan olası hataları göstererek parametrelerin doğru biçimde ve kolaylıkla tespit edilmelerini sağlamayı amaçlamaktadır.

5.3.1. Eşik Parametresinin Analizi

Eşik parametresi 3D modellemede çok önemli bir yere sahiptir. Düzgün bir 3D model elde etmek için eşik değeri en ideal seviyeye ayarlanmalıdır. Bu değer yanlış seçilmesi arka planın hatalı biçimde tespit edilmesine, dolayısı ile hatalı bir 3D modelin elde edilmesine neden olacaktır.

Şekil 5.1.a, şekil 5.1.c ve şekil 5.1.e’de görülen nesnelerin hatalı eşik değeri ile 3D modellenmeleri sonucunda elde edilen 3D görüntüleri şekil 5.1.b, şekil 5.1.d ve şekil 5.1.f’de sunulmuştur. İlgili şekiller incelendiğinde hatalı eşik değerinin seçilmesi sonucunda 3D modellerin çeşitli noktalarında kopmaların meydana geldiği gözlenmektedir.


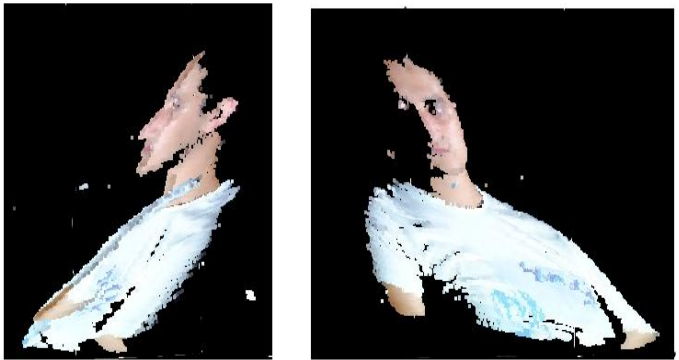

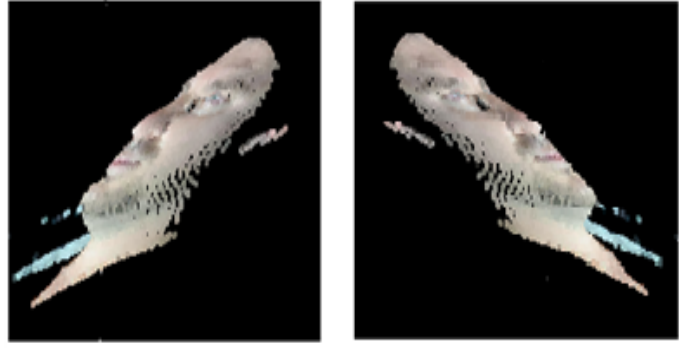


		
a) Modellenek nesne	b) 3D modelleme sonucu	
		
c) Modellenek nesne	d) 3D modelleme sonucu	
		
e) Modellenek nesne	f) 3D modelleme sonucu	

Şekil 5.1. Hatalı eşik parametresi ile elde edilen 3D modelleme sonuçları

5.3.2. Eğim Parametresinin Analizi

Üç faz kaydırma algoritması temelli 3D modelleme sistemi ile elde edilen 3D görüntülerde eğim hatasına sıklıkla rastlanılmaktadır. Nesnenin gerçek dünyadakine en yakın eğime sahip olacak şekilde 3D modelinin çıkarılabilmesi için eğim parametresi uygun biçimde ayarlanması gerekmektedir. Hatalı eğim parametresi nesnenin yanlış açıyla modellenmesine neden olmaktadır.

Şekil 5.2.a, şekil 5.2.c ve şekil 5.2.e’de görülen nesnelerin hatalı eğim parametresi ile 3D modellenmeleri sonucunda elde edilen 3D görüntüleri şekil 5.2.b, şekil 5.2.d ve şekil 5.2.f’de sunulmaktadır. İlgili şekiller incelendiğinde nesnenin yanlış eğimle modellendiği görülebilmektedir.

		
a) Modellenecek nesne	b) 3D modelleme sonucu	
		
c) Modellenecek nesne	d) 3D modelleme sonucu	
		
e) Modellenecek nesne	f) 3D modelleme sonucu	

Şekil 5.2. Hatalı eğim parametresi ile elde edilen 3D modelleme sonuçları

BÖLÜM 6

TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında, üç faz kaydırma algoritması ile çalışan 3D modelleme sistemi geliştirilmiştir. Geliştirilen 3D modelleme sisteminin kalibrasyon işlemi yapılmıştır.

Araştırmalar sonucunda, temassız ölçüm tekniklerine avantajlarından dolayı sıklıkla başvurulduğu görülmüştür. Temassız ölçüm metotlarından birisi olan yapılandırılmış ışık tekniği ile yüksek çözünürlüğe sahip 3D modelleme gerçekleştirilmektedir. Yapısal ışık modelleme ailesinden üç faz kaydırma algoritması ile diğer metotlara göre daha yüksek performansa sahip 3D modelleme yapılabildiği tespit edilmiştir. Dolayısıyla, tez çalışmasında bu metot kullanılmıştır. Tasarlanan 3D modelleme sistemi üzerinde iyileştirmeler yapılarak 3D modelin kalitesini artırılmıştır. Böylece metoda katkı sağlanmıştır.

Yapılandırılmış ışık metotlarından ikili kod ve gray kodlama, 3D modellemeyi gerçekleştirmek için üç faz kaydırma algoritmasına nazaran daha fazla desene gereksinim duyulmaktadır. Ayrıca üç faz kaydırma algoritmasında kullanılan desenlerin özelliklerinden dolayı diğer metotlara göre daha yüksek çözünürlükte 3D modellemeler yapılabilmektedir. Üç faz kaydırma algoritmasında sahneye yalnızca üç adet desen yansıtılmaktadır. Bundan dolayı üç faz kaydırma algoritmasıyla diğer ardışık yansıtma yöntemlerine göre daha kısa sürede 3D modelleme gerçekleştirilebilmektedir. Faz kaydırma algoritmasının diğer avantajları, sahne zeminine daha az duyarlılık göstermeleri ve ölçüm sonuçlarının ortamın ışık miktarının değişiminden az etkilemesidir. Avantajlarından dolayı üç faz kaydırma algoritması diğer ardışık yansıtma yöntemlerinde göre daha sıklıkla kullanılmaktadır. Yapılan araştırmalar sonucunda üç faz kaydırma algoritmasının çerçeve içinde değişen renk kodları, şerit

indeksleme ve ızgara indekslemeye göre daha üstün performansta 3D modelleme yaptığı tespit edilmiştir.

Hibrit yöntemi, faz kaydırma algoritması ve gray kodlamanın özelliklerini birleştirdiğinden dolayı yüksek çözünürlükte 3D görüntüler elde edilebilmektedir. Buna karşın, modellenecek nesne üzerine çok sayıda desen yansıtmaya gereksinim duymaktadır. Desenler yansıtılırken nesnenin uzun süre hareketsiz kalması gerektiğinden hareketli görüntülerde uygulamak elverişli değildir. Ayrıca çok sayıda desenin bilgisayar tarafından işlenmesine ihtiyaç duyulduğundan 3D görüntüyü elde etme süreci uzundur.

3D modelleme sisteminin en ideal seviyede görevini yerine getirmesi için kalibre edilmesi gerekmektedir. Geliştirilen kalibrasyon metodunun sisteme uygulanması ile gerçeğe en yakın 3D modellemenin yapıldığı görülmüştür.

Sistemin dezavantajı olarak hareket eden nesnelerin 3 boyutlu modellerini gerçek zamanlı olarak yapamaması gösterilebilir. Projeksiyon ve kamera ikilisinin zaman senkronizasyonunun sağlanması durumunda hareketli nesnelerin de modellenmesi mümkündür. Ayrıca sisteme iki adet kamera ve projeksiyon ikilisinin daha eklenmesi durumunda nesnenin 360 derece modellenmesi mümkün olacaktır. Gelecek çalışmaların bu konuları kapsamaları düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] <http://www.3dmimarimodelleme.com> (Erişim Tarihi: 10.05.2013)
- [2] N. S. Ali, “**Reverse Engineering of Automotive Parts Applying Laser Scanning and Structured Light Techniques**”, Yüksek Lisans Tezi, The University of Tennessee, Knoxville, 2005.
- [3] <http://www.orsaproje.com/3dtarama-3dmodelleme-projeler/> (Erişim Tarihi: 10.05.2013)
- [4] <http://www.realwire.com/> (Erişim Tarihi: 10.05.2013)
- [5] <http://oceania.digitalmedianet.com> (Erişim Tarihi: 10.07.2012)
- [6] <http://www.archdaily.com> (Erişim Tarihi: 10.07.2013)
- [7] B. Reitemeier, G. Nothi, M. Heinze, C. Schöne, A. Schmidt, D. Fichtner, “**The Journal of Prosthetic Dentistry. Optical Modeling of Extraoral Defects**”, Cilt 91, Sayı 1, Sayfa 80-84, 2004.
- [8] <http://www.mirhaber.com> (Erişim Tarihi:18.07.2012)
- [9] J. Geng, “Structured-Light 3D Surface Imaging A Tutorial”, Advances In Optics And Photonics”, Cilt 3, Sayı 2, sayfa 128-160, 2011.
- [10] <http://www.radpod.org> (Erişim Tarihi: 10.06.2012)
- [11] <http://www.sciencephoto.com> (Erişim Tarihi: 11.07.2012)
- [12] <http://www.mynet.com> (Erişim Tarihi: 11.08.2012)
- [13] <http://jasonkey.home.mindspring.com> (Erişim Tarihi: 07.07.2012)
- [14] <http://www.3deling.com> (Erişim Tarihi: 12.08.2012)
- [15] <http://www.3dtotal.com> (Erişim Tarihi: 14.08.2012)
- [16] G. Berbercuma, “**Üç Boyutlu Tarayıcılar İle Veri Toplanması ve CAD Ortamına Değişik Formatlarda Aktarılması**”, Yüksek Lisans Tezi, Gebze İleri Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Doğa Bilimleri, Gebze, 2006.
- [17] <http://www.designsourceone.com> (Erişim Tarihi: 11.07.2012)
- [18] A. Kusiak, “**Concurrent Engineering: Automation, Tools, And Techniques**”, Wiley Interscience, USA, 1993.
- [19] <http://www.creaform3d.com> (Erişim Tarihi: 25.06.2012)
- [20] <http://www.engineerlive.com> (Erişim Tarihi: 25.06.2012)
- [21] <http://www.indiamart.com> (Erişim Tarihi: 25.06.2012)
- [22] S. P. Mcpherron, T. Gernat, J. J. Hublin, **Structured Light Scanning For High-Resolution Documentation Of In Situ Archaeological Finds**, Journal of Archaeological Science, Cilt 36, Sayı 1, Sayfa 19–24, 2009.
- [23] B. Sobota., M. Rovňák, C. Szabó, **3D Scanner Data Processing**, Journal of Information, Control and Management Systems., Cilt. 7, Sayı. 2, 2009
- [24] <http://www.faro.com> (Erişim Tarihi: 27.06.2012)
- [25] <http://nikon.com> (Erişim Tarihi: 27.06.2012)
- [26] <http://www.webexhibits.org> (Erişim Tarihi: 27.06.2012)
- [27] <http://dokumentix.ub.uni-siegen.de> (Erişim Tarihi: 27.06.2012)
- [28] <http://def.fe.up.pt> (Erişim Tarihi: 27.06.2012)
- [29] <http://www.micro-epsilon.com> (Erişim Tarihi: 27.06.2012)
- [30] <http://www.eeweb.com/> (Erişim Tarihi: 27.06.2012)

- [31] <http://320volt.com> (Erişim Tarihi: 01.07.2012)
- [32] <http://www.ford.com.tr> (Erişim Tarihi: 01.07.2012)
- [33] <http://www.cmbn.no> (Erişim Tarihi: 01.09.2012)
- [34] G. Bradshaw, *Non-Contact Surface Geometry Measurement Techniques*, Trinity College Dublin, Enterprise Ireland, Department of Computer Science, 1999.
- [35] G. Sansoni, M. Trebeschi, F. Docchio, *State-of-The-Art and Applications of 3D Imaging Sensors in Industry*, Cultural Heritage, Medicine, and Criminal Investigation”, Sensors 2009, Cilt 9. Sayı 1, Sayfa 568-601, 2009.
- [36] H. Chen, S. Ma, *Feature Points Matching For Face Reconstruction Based On The Window Unique Property Of Pseudo-Random Coded Image*, Mechatronics, Cilt 22, Sayı 6, sayfa 688-695, 2010
- [37] E. Trucco, A. Verri, *Introductory Techniques for 3-D Computer Vision*, Prentice Hall, New Jersey, 1998.
- [38] G. Bradski, A. Kaehler, *Learning OpenCV: Computer Vision with the OpenCV Library*, O'Reilly Media, USA, 2008.
- [39] K. Sokolova, B. Shilo, “Experiments in Stereo Vision”, available at <http://disparity.wikidot.com/>.
- [40] M. O. Ozcan, E. Sert, D. Taskin, C. Taskin, “*Real-Time Stereo Camera Calibration Using OpenCV*”, *Unitech'12, 2012*.
- [41] U. Vural, *3-B Yapının Form Alan Dış Hatlar Kullanılarak Elde Edilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, GEBZE, 2006.
- [42] H. Orhan, C. Coşar, E. Sadikhov, *Interferometre ve Optik Girişim Saçak Sayıcı Sistemi İle Yer Değiştirme Ölçümü*, I. Ulusal Ölçümbilim Kongresi Bildiriler Kitabı, Eskişehir, 1995.
- [43] S. Spang, *Calibration: Philosophy in Practice*, FLUKE, 1994.
- [44] J. Salvi, J. Pages, J. Battle, *Pattern Codification Strategies In Structured Light Systems*, Pattern Recognition, Cilt 37, Sayı 4, Sayfa 827-849, 2004.
- [45] Y. Xu, D.G. Aliaga, *Robust Pixel Classification for 3D Modeling with Structured Light*, Appeared in Proceeding of 33rg Graphics Interface Conference, Cilt 234, Sayfa 233-240, 2007.
- [46] Song vd., *Hybrit Method For 3D Shape Measurement*, Patent Application Publication, Pub. No.: US 2011/0080471 A1, 2011.
- [47] H.B. Wu, Y. Chen, M.Y. Wu, C.R. Guan, C.Y. Yu, *3D Measurement Technology by Structured Light Using Stripe-Edge-Based Gray Code*, Journal of Physics: Conference Series 48, Cilt 48, Sayfa 537-541, 2006.
- [48] S. Zhang, *High-Resolution, High-Speed 3-D Dynamically Deformable Shape Measurement Using Digital Fringe Projection Techniques*, Advances in Measurement Systems, 2010 [Editor: Milind Kr Sharma].
- [49] N. Karpinsky, S. Zhang, *High-Resolution, Real-Time 3D Imaging With Fringe Analysis*, Zhang Journal of Real-Time Image Processing, Cilt 7, Sayı 1, Sayfa 55-66, 2012.
- [50] S., *Recent Progresses On Real-Time 3d Shape Measurement Using Digital Fringe Projection Techniques*, Optics And Lasers In Engineering. Cilt 48, Sayfa 149–158, 2010.

- [51] S. Zhang, P.S.Huang, *Novel Method for Structured Light System Calibration*. Optical Engineering, Instrumentation, Measurement, and Metrology, Cilt 45, Sayı 8, Sayfa 1-8, 2006.
- [52] http://www.siemens.com/innovation/en/publikationen/publications_pof/pof_fall_2006/sustainable_city_development/3d_object_recognition.htm (Erişim Tarihi: 02.09.2012)
- [53] J. Batlle, e. Mouaddib, j. Salvi, *Recent Progress In Coded Structured Light As A Technique To Solve The Correspondence Problem: A Survey*, Pattern Recognition, Sayı 34, No 7, 1998.
- [54] http://feed-back.be/nick/?page_id=310 (Erişim Tarihi: 10.09.2012)
- [55] <http://grail.cs.washington.edu/projects/moscan/> (Erişim Tarihi: 10.09.2012)
- [56] G. Y. Tiana, R. S. Lub, D. Gledhill, *Surface Measurement Using Active Vision And Light Scattering*, Optics and Lasers in Engineering, cilt 45, sayı 1, sayfa 131–139, 2007
- [57] P. M. Grin, L. S. Narasimhan, and S. R. Yee, *Generation Of Uniquely Encoded Light Patterns For Range Data Acquisition*, Pattern Recognition, Sayı 25, No 6, Sayfa 609–616 , 1992.
- [58] A. A. Andrés, S. Vázquez, , C. Cerrada, S. Salamanca, *Moving Surface Extraction Based On Unordered Hexagonal Perfect Submaps Projection: Applications To 3D Feature Tracking*, Image and Vision Computing, Sayı 27, No 8, Sayfa1083–1096, 2009.
- [59] J. Gühring, C. Brenner, J. Böhm, D. Fritsch, *Data Processing And Calibration Of A Cross-Pattern Stripe Projector*, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Cilt 33, Sayı 5, Sayfa 1-12, 2000
- [60] J. Gühring, *Dense 3-D Surface Acquisition By Structured Light Using Off-The-Shelf Components*, Videometrics and Optical Methods for 3D Shape Measurement, Cilt 4309, Sayfa 220-231, 2011, USA
- [61] http://opencv.jp/opencv-1.0.0_org/docs/
- [62] X. Chen, J. Xi, Y. Jin, J. Sun, *Accurate Calibration For A Camera–Projector Measurement System Based On Structured Light Projection*, Optics and Lasers in Engineering, Sayı. 47, Sayı 3-4, Sayfa. 310–319, 2009.
- [63] C. H. Chen, A. C. Kak, *Modeling And Calibration Of A Structured Light Scanner For 3-D Robot Vision*, IEEE International Conference on Robotics and Automation Proceedings, Cilt 4, Sayfa. 807-815, 1987.
- [64] F. Zhu, W. Liu, H. Shi, X. He, *Accurate 3D Measurement System And Calibration For Speckle Projection Method*, Optics and Lasers in Engineering, Sayı. 48, Sayı 11, Sayfa. 1132–1139, 2010.
- [65] <http://www.poynton.com/PDFs/GammaFAQ.pdf> (Erişim Tarihi: 10.03.2013)
- [66] <http://www.csharpnedit.com> (Erişim Tarihi: 21.06.2013)
- [67] <https://code.google.com/p/structured-light/downloads/list> (Erişim Tarihi: 21.05.2013)
- [68] R. Giryas, A. M. Bronstein, Y. Moshe, M. M. Bronstein, *Embedded System for 3D Shape Reconstruction*, Proc. of the 3rd European DSP Education and Research Symposium (EDERS 2008), Sayfa 265-272, 2008, Telaviv.
- [69] D. Lanman, G. Taubin, *Build Your Own 3D Scanner: 3D Photography for Beginner*, SIGGRAPH 2009 Course Notes, Sayfa 1-87, 2009

ÖZGEÇMİŞ

27.04.1980 yılında Elazığ'da doğdum. İlk ve orta öğrenimimi Elazığ'da tamamladım. 1997-2001 yılları arasında Fırat Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Elektronik - Bilgisayar Eğitimi Bölümü'nde öğrenim gördüm. 2008-2010 yılları arasında Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimi gördüm. 2010 yılından bu yana Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı'nda doktora öğrenimi görmekteyim. Aynı zamanda, 2007 yılından bu yana Trakya Üniversitesi, Edirne Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulunda öğretim görevlisi olarak görev yapmaktayım.

BİLİMSEL FAALİYETLER

1. Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler

SERT, E., TAŞKIN, D., TOPCUBASI, N., PINAR, Y., TAŞKIN, C., “Comparison of Computerized Object Recognition Systems”, AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America (Kabul Edildi)

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

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

TASKIN, D., SERT E., BAYSAL, K., TOPCUBASI, N., “3D Measurement Methods Used In Reverse Engineering”, International Scientific Conference Unitech’12, Gabrovo, 2012

OZCAN, M.O., SERT, E., TAŞKIN, D., TAŞKIN, C., “Real-Time Stereo Camera Calibration Using OpenCV”, 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

3. Ulusal hakemli dergilerde yayımlanan makaleler

SERT, E., TAŞKIN, D., ÖZCAN, M.O.,TAŞKIN, C., BAYSAL, K., “3D Modellemede Kullanılan Ardışık Yansıtımlı Yapısal Işık Yöntemleri”, Journal of Engineering Sciences, Trakya University, Edirne , 2013

TAŞKIN, D., BAYSAL, K., SERT, E., TAŞKIN, C., ÖZCAN, M.O., “VHDL Kullanılarak FPGA İle Yüksek Kapasiteli Toplayıcı Ünite Tasarımı”, Journal of Engineering Sciences, Trakya University, Edirne , 2013

4. 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

TAŞKIN D., TAŞKIN C., SERT E., “Buildroot Kullanarak Etkin Gömülü Sistem Tasarımı”, İnönü Üniversitesi, Akademik Bilişim-2011, Malatya, 2011

SERT E., TAŞKIN D., TAŞKIN C., TOPÇUBAŞI N., KÖPRÜCÜ İ., “OPENCV İle Kamera Kalibrasyonu”, Akademik Bilişim-2012, Uşak, 2012

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

DOĞAN, T., SERT, E., TAŞKIN, D., Araç Destek Sistemleri İçin Kuş Bakışı Görüntü Dönüşümü, Akademik Bilişim-2013, Antalya, 2013

BAYSAL, K., TAŞKIN, D., SERT E., TOPÇUBAŞI, N. , “VHDL Kullanarak FPGA ile Yüksek Kapasiteli Tam Çıkarıcı Devre Tasarımı”, Akademik Bilişim-2013, Antalya, 2013

5. Projeler

“Open Dialog Net” adlı Avrupa Birliği Sınır Ötesi İşbirliği Projesinde Denetleme Kurulu Üyeliği, 2012