

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DERİNLİK İMGELERİNDEN HATA VE
BOZULMALARIN SEZİMİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Hasan Samet YASLAN**

Anabilim Dalı : ELEKTRONİK VE HABERLEŞME MÜHENDİSLİĞİ

Programı : TELEKOMÜNİKASYON MÜHENDİSLİĞİ

OCAK 2009

**DERİNLİK İMGELERİNDEN HATA VE
BOZULMALARIN SEZİMİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Hasan Samet YASLAN
(504041313)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 26 Aralık 2008
Tezin Savunulduğu Tarih : 19 Ocak 2009

Tez Danışmanı : Prof.Dr. Bilge GÜNSEL
Diğer Jüri Üyeleri : Doç.Dr. Işın ERER
Y.Doç.Dr. Mustafa KAMAŞAK

OCAK 2009

ÖNSÖZ

Yüksek lisans süresi boyunca zamanından ve bilgisinden yararlandığım, danışmanım Prof. Dr. Bilge GÜNSEL'e teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmalarım boyunca geçen sürede, bana yardımcı olan, beni destekleyen herkese çok teşekkür ederim.

Ocak 2009

Hasan Samet YASLAN

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	iii
ÇİZELGE LİSTESİ	iv
ŞEKİL LİSTESİ	v
SEMBOL LİSTESİ	vii
ÖZET	viii
SUMMARY	ix
1. GİRİŞ	1
2. MEVCUT ÇALIŞMALAR	4
2.1. Orijinal Tasarım ile Karşılaştırma	4
2.2. Öngörülen Yüzeylerle Karşılaştırma	4
2.3. Eğimlilik Analizi	5
2.4. Yansıma Simülasyonu Analizi	5
2.5. Yansıma Analizi	6
3. YÜZEYE DÜŞEN IŞIĞIN SİMULE EDİLMESİ	7
3.1. Sistem Hakkında Genel Bilgi	7
3.2. Üç Boyutlu Tarayıcıdan Derinlik Bilgisi Alınması	8
3.3. Ön İşleme	9
3.4. Yüzey Normallerinin Hesaplanması	10
3.5. Yüzey Eğimliliğinin Hesaplanması	12
3.6. Yüzeyden Yansıyan Işığın Simülasyonu	12
3.7. Son İşlemler	13
3.8. Üçgenleme ile Alt Yüzeyler Bazında Hata Sezme	15
3.9. Üçgenleme ile Yüzey Bozukluklarını Sezme	18
4. TESTLER	22
4.1. Sentetik Hata Oluşturulmuş Cisimler ile Tüm İmge Üzerinde Hata Sezme	23
4.1.1. Düzgünleştirme Parametrelerinin Sezme Başarımına Etkileri	23
4.1.2. Süzgeç Kullanımının Hata Sezme Başarımına Etkisi	26
4.1.3. Sistem Limitlerinin Belirlenmesi	28
4.1.4. Farklı Cisimler Üzerinde Hata Sezme Başarımı	30
4.2. Metalik Yüzeyler ile Tüm Yüzeyde Hata Sezme	32
4.2.1. Eşiklemenin Sezme Başarımına Etkisi	32
4.2.2. Öbekleme İşleminin Sezme Başarımına Etkisi	34
4.2.3. Farklı Hata Çeşitleri Üzerinde Yapılan Testler	37
4.3. Delaunay Üçgenleme ile Oluşturulan Alt Yüzeylerde Hata Sezme	40
4.3.1. Üçgen Sayısının Hata Sezme Başarımına Etkisi	41
4.3.2. Farklı Cisimler Üzerinde Üçgenleme ile Hata Sezme Başarımı	43
4.4. Yüzey Bozukluklarının Sezilmesi	46
5. SONUÇLAR VE İLERİYE YÖNELİK ÖNERİLER	51
KAYNAKLAR	53
ÖZGEÇMİŞ	55

KISALTMALAR

ASC	: Non-delimited ASCII
ASCII	: American Standard Code for Information Interchange
BMP	: Bitmap
CAD	: Computer Aided Design
CCD	: Charge-Coupled Device
EKÖA	: En Küçük Örtün Ağaç (Minimum Spanning Tree)
GNU	: GNU's Not Unix – Ücretli Yazılım İçermeyen
GTS	: GNU Triangulated Surface Library
DDÇ	: Düzlemsel Doğru Çizgesi (Planar Straight Line Graph)
2D	: İki Boyutlu
3D	: Üç Boyutlu

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 4.1	Orijinal ve üzerinde farklı boyutlarda hatalar oluşturulmuş cisimlerin derinlik imgeleri, yansıma simülasyonu sonuçları. Bir örnek süzgecin boyutu $n=1$ olarak seçilmiştir..... 24
Çizelge 4.2	Bir örnek süzgecin boyutu $n=2$ olduğu durumda; derinlik imgeleri, yansıma simülasyonu sonuçları..... 25
Çizelge 4.3	Bir örnek süzgecin boyutu $n=4$ olduğu durumda; derinlik imgeleri, yansıma simülasyonu sonuçları..... 26
Çizelge 4.4	Farklı yönlerden gelen ışığa göre yansıma simülasyonu ve süzgeçleme sonuçları ($n=2 / R=4$). Süzgeçleme sonuçları üzerinde seviyelendirme uygulanarak belirginlik artırılmıştır..... 27
Çizelge 4.5	Farklı hata boyutlar ve derinlik farkları için yansıma simülasyonu sonuçları ($n=2, R=2$)..... 29
Çizelge 4.6	Farklı hata boyutlar ve derinlik farkları için yansıma simülasyonu sonuçları ($n=1, R=1$)..... 29
Çizelge 4.7	Farklı eşik değerleri (0,000-0,050) için yansıma simülasyonu ve süzgeçlenmiş yansıma simülasyonu sonuçları ($n=2 / R=4$)..... 33
Çizelge 4.8	Farklı eşik değerleri (0,070-0,300) için yansıma simülasyonu ve süzgeçlenmiş yansıma simülasyonu sonuçları ($n=2 / R=4$)..... 34
Çizelge 4.9	Farklı eşik değerleri (0,000-0,050) için öbeklenmiş yansıma simülasyonu, süzgeçlenmiş ve öbeklenmiş yansıma simülasyonu sonuçları ($n=2 / R=4$)..... 35
Çizelge 4.10	Farklı eşik değerleri (0,070-0,300) için öbeklenmiş yansıma simülasyonu, süzgeçlenmiş ve öbeklenmiş yansıma simülasyonu sonuçları ($n=2 / R=4$)..... 36
Çizelge 4.11	Farklı kenar sayıları için derinlik imgesi üzerine uygulanmış üçgenleme ve buna bağlı yansıma simülasyonu sonuçları..... 42
Çizelge 4.12	Farklı kenar sayıları için Şekil 4.5-a imgesi üzerine uygulanmış üçgenleme ve buna bağlı yansıma simülasyonu sonuçları..... 44
Çizelge 4.13	Farklı kenar sayıları için Şekil 4.5-b imgesi üzerine uygulanmış üçgenleme ve buna bağlı yansıma simülasyonu sonuçları..... 45
Çizelge 4.14	Farklı kenar sayıları için Şekil 4.5-c imgesi üzerine uygulanmış üçgenleme ve buna bağlı yansıma simülasyonu sonuçları..... 46
Çizelge 4.15	Farklı derinlik farkları için Şekil 4.16-a'da bulunan imgeden oluşturulmuş hatalı test imgeleri ve yansıma simülasyonu sonuçları..... 48
Çizelge 4.16	Farklı derinlik farkları için Şekil 4.16-b'de bulunan imgeden oluşturulmuş hatalı test imgeleri ve yansıma simülasyonu sonuçları..... 49
Çizelge 4.17	Farklı derinlik farkları için Şekil 4.16-c'de bulunan imgeden oluşturulmuş hatalı test imgeleri ve yansıma simülasyonu sonuçları..... 50

ŞEKİL LİSTESİ

		Sayfa
Şekil 1.1	Gözle hata arama çalışmalarına örnekler.....	1
Şekil 3.1	Sistemin blok şeması.....	8
Şekil 3.2	a) Yüzeyin CCD kamera ile fotoğraflanmış görünümü. b) Derinlik tarayıcının çıkışındaki veri bulutunun iki boyutlu koordinat düzleminde gösterimi.....	8
Şekil 3.3	Ters duran plastik bir bardağın derinlik taraması sonucu.....	9
Şekil 3.4	İndirgeme işlemi uygulanan derinlik imgesi ve indirgeme işleminin sonucu.....	10
Şekil 3.5	Üçgen yüzeylere ait yüzey normallerinin vektörel gösterimi....	11
Şekil 3.6	a) Denklem 3.13 sonucunda elde edilen simüle edilmiş yüzey görüntüsü. b) Süzgeçlenmiş yüzey görüntüsü.....	13
Şekil 3.7	a) Seviyelendirme işlemi uygulanmış yüzey görüntüsü. b) Yüzey görüntüsünün öbek sayısı 3 olacak şekilde öbeklenmesi.....	14
Şekil 3.8	Üçgenlemede kullanılacak derinlik imgesi.....	15
Şekil 3.9	Yüzey Normalleri.....	16
Şekil 3.10	a) Üçgenleme Örneği b) Delaunay Üçgenleme Örneği.....	16
Şekil 3.11	Boş daire özelliği.....	17
Şekil 3.12	a) En Yakın Çift Özelliği b) En Yakın Çift Özelliğinin Gösterimi	17
Şekil 3.13	a) Tel file alt yüzeyler (kenar sayısı 2000) b) Tel file alt yüzeyler (kenar sayısı 200).....	18
Şekil 3.14	Sistemde üçgenleme kullanımı.....	19
Şekil 3.15	a) Orijinal derinlik imgesine ait örnek yüzey b) Yandaki örnek yüzeyin tel file alt yüzeyleri.....	20
Şekil 3.16	a) Hatalı test objesine ait derinlik imgesi b) Tel file üçgenleme üzerinde yansıma simülasyonu sonucu.....	21
Şekil 4.1	Hata sezme yazılımı kullanıcı ara birimi.....	22
Şekil 4.2	Örnek derinlik imgeleri.....	23
Şekil 4.3	Bir yüzeyinde 10 piksel büyüklüğünde sentetik hata oluşturulmuş çok yüzeyli nesneye ait derinlik imgesi.....	27
Şekil 4.4	%32 derinlik farklı hatalara sahip derinlik imgesi.....	28
Şekil 4.5	10 piksel çapında dairesel yükselti ve çöküntüleri bulunan derinlik imgeleri.....	30
Şekil 4.6	0,1 Eşik değeri için yansıma simülasyonu (a,b,c) ve süzgeçlenmiş yansıma simülasyonu (d,e,f) değerleri.....	31
Şekil 4.7	0,15 Eşik değeri için yansıma simülasyonu (a,b,c) ve süzgeçlenmiş yansıma simülasyonu (d,e,f) değerleri.....	31
Şekil 4.8	İki boyutlu düzleme aktarılmış derinlik imgesi.....	32
Şekil 4.9	Hatalı yüzeylerin CCD kamera ile çekilmiş fotoğrafları.....	37

Şekil 4.10	Birinci yüzey için; a) CCD kamera resmi, b) $n=2$ olacak şekilde derinlik imgesi, c) $R=4$ ve eşik= $0,07$ için yansıma simülasyonu sonuçları d) öbikleme sonuçları.....	38
Şekil 4.11	İkinci yüzey için; a) CCD kamera resmi, b) $n=2$ olacak şekilde derinlik imgesi, c) $R=4$ ve eşik= $0,07$ için yansıma simülasyonu sonuçları d) öbikleme sonuçları.....	39
Şekil 4.12	Üçüncü yüzey için; a) CCD kamera resmi, b) $n=2$ olacak şekilde derinlik imgesi, c) $R=4$ ve eşik= $0,07$ için yansıma simülasyonu sonuçları d) öbikleme sonuçları.....	40
Şekil 4.13	Dördüncü yüzey için; a) CCD kamera resmi, b) $n=2$ olacak şekilde derinlik imgesi, c) $R=4$ ve eşik= $0,07$ için yansıma simülasyonu sonuçları d) öbikleme sonuçları.....	40
Şekil 4.14	Bir yüzeyinde 10 piksel büyüklüğünde sentetik hata olan cismin; a) derinlik imgesi, b) eşik= $0,1$ için yansıma simülasyonu sonuçları c) eşik= $0,15$ için yansıma simülasyonu sonuçları.....	41
Şekil 4.15	Yüzeysel bozulmaları sezmek için gerçekleştirilmiş olan bilgisayar programının kullanıcı arayüzü.....	47
Şekil 4.16	Hatasız derinlik imgeleri.....	47

SEMBOL LİSTESİ

$H_{n \times n}$: $n \times n$ boyutlu bir örnek (<i>uniform</i>) süzgecin frekans cevabı
$X_{r \times c}$: (r, c) noktasındaki derinlik değeri
$\vec{N}_{r \times c}$: (r, c) noktasının ait olduğu yüzeyin normali
R	: Yüzey normalini düzgünleştirme parametresi
C_{r_1, c_1, r_2, c_2}	: (r_1, c_1) noktasının ait olduğu yüzeyin (r_2, c_2) noktasına göre eğimliliği.
$\vec{L}_{r, c}$: Öngörülen yüzeye paralel ışık vektörü
$f_{r, c}$: (r, c) noktasından yansıyan ışık
DT(S)	: S noktalar kümesi için Delaunay Üçgenlemesi

DERİNLİK İMGELERİNDEN HATA VE BOZULMALARIN SEZİMİ

ÖZET

Üretim hatalarının kontrolü günümüzde birçok üreticinin ortak hedefidir. Ürünlerin kozmetik görünüşleri önem kazandıkça, yüzeysel dış görünüşlerin hatalardan, pürüzlerden ve bozulmalardan arındırılması gerekliliği artmaktadır. Yüzeylerdeki hataları tespit ederek düzeltme işlemi, kalite standartlarına pek uymayan küçük işletmelerde, elle ve gözle ürünleri inceleyen kalite kontrol görevlileri tarafından yapılmaktadır. Ancak, üretim kalitesinde belli bir hata sınırının altında kalmayı garantileyen işletmelerde, otomatik hata tespit sistemlerine gereksinim her geçen gün artmaktadır.

Bu çalışmada, nesnelerin yüzeylerindeki hataları derinlik imgeleri kullanarak otomatik olarak bulan bir imge işleme yazılımının geliştirilmesi hedeflenmiştir. Derinlik imgeleri ışıklılık koşullarındaki değişimden ve gürültüden etkilenmeyi en aza indirmek açısından birçok uygulamada tercih edilmektedir. Yüzey hatalarının yakalanmasında temel yaklaşımlardan birisi, hatalı bölgenin uygun ışıklandırılmasıyla yüzey bozukluklarının seziminde performansın artırılmasıdır. Bu amaçla yansıma simülasyonu analizi yöntemi kullanılmaktadır. Çalışma kapsamında yansıma simülasyonu analizi yönteminden faydalanılarak tasarlanan bir hata sezme sistemi, C/C++ programlama dilleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Sistem, eğitici ve nesneye ait CAD bilgisinin elimizde olması durumunda eğitici olmak üzere iki moda çalışmaktadır. Yazılım derinlik imgesinde nokta nokta analiz yapabildiği gibi, Delaunay üçgenleme ile elde edilen yüzey modelleri ile de çalışabilmekte olup noktasal boyuttaki hataları sezme becerisine sahiptir. Hata sezme, aynı yüzey içerisinde bulunan her bir noktanın normalinin ait olunan yüzey normaline eşit olması gerektiği teorisine dayanmaktadır ve hesaplanan yüzey normallerinin öngörü ile bulunan hatasız yüzey normallerinden sapmasının bulunmasını hedeflemektedir. Sapma miktarları öbeklenerek imge noktalarının temsil ettikleri yüzey parçaları hatalı ya da hatasız olarak işaretlenirler. Delaunay üçgenlemesi kullanıldığında, benzer işlemler, derinlik imgesi üçgen tel file alt yüzeylere bölünerek alt yüzeylerde tekrarlanır. Bu sayede çok yüzeyli cisimlerin üzerinde hata sezme performansı artırılmaktadır. Sistem ilgi bölgesi tanımlanmadan çalışmakta ve eldeki derinlik imgesinin tüm noktalarında hata sezimi yapmaktadır. Nesnelere ait CAD bilgisinin elimizde olması durumunda öngörülen yüzey eğimliliklerinin orijinalden sapması analizi edilebilmektedir.

Hatalı metal yüzeyler üzerinde yapılan testlerde, yaklaşık 1mm²'de 30 nokta çözünürlüğe sahip derinlik imgeleri kullanılarak 2mm² büyüklüğünde hataların bulunabildiği, sentetik hataları sezmede performansın daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. USF-IARL'nin (*University of South Florida Image Analysis Research Lab*, "<http://marathon.csee.usf.edu/range/seg-comp/images.html>") web adresinden alınan nesnelere ait derinlik imgeleri üzerinde oluşturulan sentetik hatalar üzerindeki hata yakalama başarımının 2-3 nokta boyutunda olduğu belirlenmiştir. Geliştirilen yazılım istenilen kalite kriterine göre değişik parametrelerle kullanılabilir.

DETECTION OF SURFACE DEFECTS AND CORRUPTIONS BY USING RANGE IMAGES

SUMMARY

A common goal of the manufacturers is reducing surface defects while producing plastic or metal made components. The surface defects have to be detected in order to be fixed in production. Conventionally the detection process has been performed manually by a technician investigating the surface, however producers that aim high quality in production line need an automated defect detection system.

The aim of this study is to design an automatic surface defect detection software that uses 2.5D range images. Range images are commonly preferred in order to prevent false alarms coming from bad lighting conditions. In the context of this work grazing incidence simulation method is used to design a system for visualizing surface defects. The system basically calculates surface normals and surface curvatures in order to simulate grazing incidence of structured light. The surface defect inspection software is designed and developed by using C/C++ programming languages.

The inspection software works in two modes. In the first mode, the defect detection performed in an unsupervised way while the second mode applies a supervised learning scheme by using CAD information of the surface. In first mode defect detection has been achieved by processing the surface either point by point or within triangle surface parts generated by Delaunay triangulation. Under the estimated lighting condition, decision criteria is based on the similarity of surface normals within each surface. Basically the normal vector of a surface including defected points varies significantly compared to the defect free parts of the component. Clustering is used to measure variations of surface normals in labeling the defected regions. Delaunay triangulation is used in order to process components having more than one surface. The system does not require localization of the region of interest. In the second mode surface corruptions are detected by using provided CAD information of the original component. Since the aim of working in this mode is extraction of surface abnormalities, inspection process is performed on triangular surface parts rather than surface points. Decision has been made of quantifying mismatching between the original and estimated surface structure.

Performance of the system is tested on defected metal surfaces and also on synthetically defected range images. Those range images are downloaded from USF – IARL web site (University of South Florida – Image Analysis Research Lab. "<http://marathon.csee.usf.edu/range/seg-comp/images.html>"). Resolution of the range images acquired from metal surfaces is 30 range points per 1mm² and the smallest defect that can be detected have a size of 2mm². Performance achieved on synthetic defects is better compared to real defects and can be quantified as 2-3 points with a small false alarm ratio.

1. GİRİŞ

Sanayinin gelişmesi ve artan rekabet koşullarıyla birlikte ürünlerin hatasızlığı önem kazanmaya başlamıştır. Buna paralel olarak metal, plastik vb. malzemelerden yüzeyleri olan ürünlerin üretildiği fabrikalar, kozmetik görünümlerin mükemmel hale getirilmesini amaçlamaktadırlar [1]. Bunu sağlamanın şartlarından bir tanesi yüzeyleri pürüzsüz olarak üretmek ya da oluşan pürüzleri, bir diğer deyişle hataları, üretim esnasında tespit ederek ortadan kaldırmaktır. Pürüzler üretimin farklı evrelerinde ortaya çıkabilirler. Yüzeyler, üretim esnasında şekil verme, boyama, cilalama gibi çeşitli işlemlerden geçer ve bu işlemler sırasında pürüzler oluşabilir. Bu durumu engellemenin yollarından bir tanesi oluşabilecek hataları önceden öngörerek üretim işlemini hata olasılığını azaltacak şekilde düzenlemektir [2]. Hata oluşumunu öngörme işlemi elektronikten çok malzeme biliminin konuları arasında yer almaktadır [2]. Bir diğer yöntem hataları oluşuktan sonra tespit etmek ve hatalı bölgeleri onarmaktır [3]. Oluşan hatayı tespit etme işleminde insan gücünden de yararlanılabileceği gibi (bkz Şekil 1.1), işlemi otomatikleştirerek bilgisayarlar yardımıyla yapmak da mümkündür [1].



Şekil 1.1: Gözle hata arama çalışmalarına örnekler.

Günümüzde çeşitli sektörlerde yüzey hatalarıyla karşılaşılmaktadır. Otomotiv, elektronik, yassı metal üretimi bu sektörlere örnektir. Hataların, üretim esnasında doğru zamanda tespit edilerek, gereken işlemlerin yapılması üretim maliyetlerini olumlu yönde etkiler. Örneğin otomobillerin üretimi esnasında, dış yüzeylerinde birkaç mikron büyüklüğünde çöküntüler ya da kabartılar oluşabilir. Bu hatalar çoğu

zaman kaporta boyanana kadar fark edilmezler. Halbuki boyama işlemine geçilmeden önce hatalar fark edilebilirse, tamir edilme maliyetleri azaltılabilir [3]. Yüzey hatalarını tespit etmek sadece üretim aşamasında değil üretildikten sonra da ürünlerin sağlamlıklarını kontrol etmek amacıyla gereklidir. Örneğin sıvı depolayan tankların iç yüzeylerinde zamanla aşınmalar bozulmalar oluşur. Yüzey hatalarını bulan elektronik sistemler yardımıyla bu hatalar tespit edilip raporlanır [4]. Raporlama çıktıları doğrultusunda gereken önlemler alınır.

Hata sezme işlemleri temelde iki farklı bilgidен fayda sağlayabilir; yüzeyden yansıyan ışıktan [4][5] ve yüzeyin üç boyutlu derinlik bilgisinden [3][1]. Örneğin fabrikalarda bu işi yapan görevliler bu iki bilgidен birden faydalanırlar. Görevli bir yandan doğru ışık koşullarında, doğru açıdan bakarak hataları tespit etmeye çalışırken bir yandan da eliyle dokunarak yüzeydeki derinlik farklılıklarını anlamaya çalışır. Yüzeyden yansıyan ışıktan faydalanarak hata sezen metotların ortamın ışık koşullarına bağlılığı yüksektir. Yansıyan ışık miktarı az olan mat yüzeylerde kullanmaya elverişli değildir. Bunların yanında yükselti farklılığı oluşturmayan, boyama kusurları gibi hataların da tespit edilebilmesine olanak tanırırlar [4]. Üç boyutlu derinlik bilgisinden faydalanarak hata sezen metotlar ortamın ışıklılığından yüzey yansımalarıyla işlem yapanlar kadar çok etkilenmezler. Bu metotların uygulanması için yüzeyin üç boyutlu derinlik bilgisi gerekmektedir. Derinlik bilgisinin elde edilmesinde üç boyutlu derinlik tarayıcılar kullanılır. Hata sezmede kullanılan metotların küçük boyutlu hataları bulma konusundaki hassasiyetleri tarayıcıların çözünürlüklerine bağlıdır [1]. Buna karşılık derinlik bilgisi kullanarak hata sezen metotlar derinlik farkı oluşturmayan görsel hataları tespit edemezler.

Yüzeylerde derinlik farklılıklarına bağlı olan hatalar ani yükselti ve çöküntüler şeklindedir. Bu çalışma kapsamında yüzeylerdeki yükselti ve çöküntülerin, yüzeyin üç boyutlu derinlik bilgisinden faydalanılarak tespit edilmesi amaçlanmıştır. Derinlik bilgisinin kullanımı sayesinde, yöntem mat yüzeylerde de çalışabilecek, ortamın ışıklılığından etkilenmesi az olacaktır. Yüzeyden yansıyan ışıktan faydalanan sistemlerde ortamın ışıklılığı önemli olduğundan, maliyeti yüksek ışık kaynaklarına ihtiyaç vardır [4]. Hata tespiti, derinlik tarayıcı kullanarak yapıldığında özel bir ışık kaynağına ihtiyaç olmamaktadır.

Bu bilgiler ışığında hata sezme işlemlerinde derinlik bilgisinin kullanılmasına karar verilmiş, hata seziminde yüzey normallerini ve yüzey eğimliliklerini kullanan yansıma simülasyonu analizi yöntemi tercih edilmiştir. Bu yöntem ile üç boyutlu derinlik bilgisi var olan yüzeyler üzerinde, seçilen yönlerden yansıyan ışık simüle edilerek hata

tespiti yapılmaktadır [3]. Yüzeyden yansıyan ışığın simüle edilmesi işlemi yapılırken, tüm yüzeyin yüzey eğimliliği ve yüzeydeki her bir noktanın yüzey normali bilgileri kullanılmaktadır. Bu sayede noktasal hataların tespit edilmesi amaçlanmıştır. Birden fazla yüzeye sahip olan cisimlerde hata tespiti yaparken üçgenleme ile alt yüzeyler bulunmuş, hata tespit işlemleri her bir alt yüzey için ayrı ayrı yapılmıştır. Hata sezimi işlemlerinde, yüzeydeki ani derinlik değişimleri tespit edilerek, hata olarak işaretlenmektedir. Bu sayede yüzeyin hatasız orijinali bilinmediği varsayımı altında test edilen yüzeydeki hatalar sezilir.

Yüzeysel bozulmaların tespiti ise yüzeyin CAD bilgisi kullanılarak yapılmakta, yüzeyin orijinal bozulmamış hali bilinmektedir. Hangi yüzey parçalarının hatalı olduğunu tespit etmek için test edilen yüzey parçasının yüzey normalinin orijinal imge üzerindeki yüzey parçasının yüzey normalinden sapma miktarı ölçülerek yüzeysel bozulmalar sezilir.

2. MEVCUT ÇALIŞMALAR

Hataları tespit etmek amacıyla kullanılan ve literatürde çokça adı geçen beş yöntem sıralanabilir. Orijinal Tasarım ile Karşılaştırma, Öngörülen Yüzeylerle Karşılaştırma, Eğimlilik Analizi, Yansıma Simülasyonu Analizi ve Yansıma Analizi [1][5]. Bu yöntemlerin her biri temelde yüzeyin derinlik bilgisinden ya da yüzeyden yansıyan ışıktan faydalanır.

2.1. Orijinal Tasarım ile Karşılaştırma

Yüzeylerin üç boyutlu derinlik bilgilerini orijinal tasarımlarıyla karşılaştırmak, her ne kadar kolay bir işlem olsa da yüzey hatalarını tespit etme konusunda başarılı değildir. Üretimin doğası gereği üretilen yüzeyler ile tasarım arasında farklar bulunması normaldir [1]. Genel görünümüleri tasarımla benzer olsa da üretilen parçalar hiç bir zaman tasarım ile birebir aynı değildir. Bu farklılık hata sezme amaçlı yapılan karşılaştırmalarda gürültüye yol açar. Üretim kaynaklı oluşan farklar, hataların oluşturduklarından daha büyük olduğundan, oluşan gürültüyü hataları koruyarak süzgeçlemek mümkün olmayacaktır. Buna ek olarak hataları tespit etmek için yüzeyin orijinal halini bilmek şarttır, bu bilgi olmadan orijinal tasarım ile karşılaştırma yöntemi kullanılamaz.

Literatürde üretim kaynaklı oluşacak farklılıkları tahmin etmeye ve engellemeye yönelik çalışmalar mevcut olsa da bu çalışmalar malzeme biliminin konuları içerisinde ele alınmaktadır [2]. Sonuçta, üretim sırasında oluşan bozulmaları dikkate almadan kullanılacak tasarım ile karşılaştırma yöntemi yüzeylerdeki hataları sezme uygulamalarında etkin değildir [1].

2.2. Öngörülen Yüzeylerle Karşılaştırma

Bu metot derinlik verisi üzerine işlemler yaparak yüzeyin hatasız halini öngörmeye çalışır. Öngörülen yüzeyleri gerçek yüzeyler ile karşılaştırarak hataları sezmeyi amaçlar [1]. İşlemler yüzeyin küçük parçaları üzerinde yapılır ve her bir parça için tekrarlanarak devam eder. Her bir parça için hatasız yüzey öngörülür, gerçek yüzey ile karşılaştırılır, sonuçlar analiz edilerek hatalar sezilir.

Uygulama aşamasında analiz edilecek olan yüzeyler operatör tarafından belirlenir. Seçilen yüzey üzerinde yapılan analiz sonucunda hatasız yüzeye yakınsanarak hatalar bulunur [1]. Sonuçta bu metot yüzey trendinin tespit edilerek, olması gereken ile var olanın karşılaştırılması esasına dayanır. İşlemler yapılırken yüzeyin orijinal tasarımına ihtiyaç duyulmaz, fakat ilgi bölgesinin belirtilmesi için operatöre ihtiyaç vardır. Operatörden yüzeyin hatasız bölümlerinin bilgisini elde etmek de mümkündür.

2.3. Eğimlilik Analizi

Bu metot derinlik bilgisinden eğimliliğin tahmin edilmesi ve görüntülenmesi esasına dayanır. Eğimlilik, yüzeyin düzlemden sapma miktarının sayısal göstergesidir. Bu yöntemin başarılı olması için eğimlilik her bir noktada doğru bir biçimde hesaplanmalıdır. Eğimlilikleri doğru hesaplamamanın zorluklarından biri işlemlerin gürültülü derinlik bilgisi üzerinde yapılmasıdır. İkinci bir zorluk ise eğimlilikleri kullanarak hatalı yüzeyleri, hatasız olanlardan ayırmaktır [1].

Magdeburg Üniversitesi'nde yapılan bir çalışmada, derinlik verisi kullanılarak yüzeyin eğimlilik bilgisine bağlı öznitelikleri analiz edilmiştir [6]. Özniteliklerin bulunmasında deneyimli teknisyenlerin hata niteliklerini sözel olarak tanımlamasından faydalanılmıştır. Ardından hata sınıfları belirlenir ve yüzey hataları tespit edilerek sınıflandırılır. Yapılan işlemler bir çeşit eğitici öğrenmedir, sistemin hata tespiti yapabilmesi için önce hatalı ve hatasız örneklerin bulunduğu bir eğitim kümesi kullanılarak eğitilmesi gerekir.

2.4. Yansıma Simülasyonu Analizi

Bu yöntem üç boyutlu derinlik verisi üzerinde işlem yaparak, yüzeyden yansıyan ışığı tahmin etme esasına dayanır [3]. Yüzeyin her noktasındaki yüzey normalleri hesaplanarak, bunlar üzerinden yüzeyin iki boyutta ışıklandırılmış (*rendered*) hali oluşturulur. Yüzeyden yansıyan ışığın simüle edilmesi sayesinde yüzeydeki hatalar (çukurlar, tümsekler vs.) belirginleştirilir.

Bu şekilde yapılan iki boyuta aktarım işleminin başarımı, yüzey normallerinin doğru hesaplanmasına bağlıdır. Yüzey normalleri yanlış bulunduğu takdirde devam eden hesapların doğruluğundan söz edilemez. Bu noktada yaşanan zorluklardan bir tanesi gürültülü derinlik verisinden normallerin doğru şekilde hesaplanamamasıdır [1]. Diğer bir zorluk, yansımaların ve yüzeyin iki boyutlu görüntüsünün minimum hata ile hesaplanmasıdır [1]. Yansıma simülasyonu analizi ile elde edilen derinlik bilgisinin

Çözünürlüğü doğrultusunda noktasal hataların tespit edilmesi mümkündür. Hata sezimi orijinal tasarıma ihtiyaç duyulmadan yapılabilmektedir.

2.5. Yansıma Analizi

Yansıma analizi, bir ışık kaynağı ile yüzeyde oluşturulan görüntünün CCD kamera tarafından bilgisayar ortamına aktarılması ve burada analiz edilmesi esasına dayanır [5]. Yöntemin kullanımındaki en kritik nokta doğru ışık kaynağının seçilmesidir [4]. Ortamın ışıklılığına olan bağımlılık yüksektir.

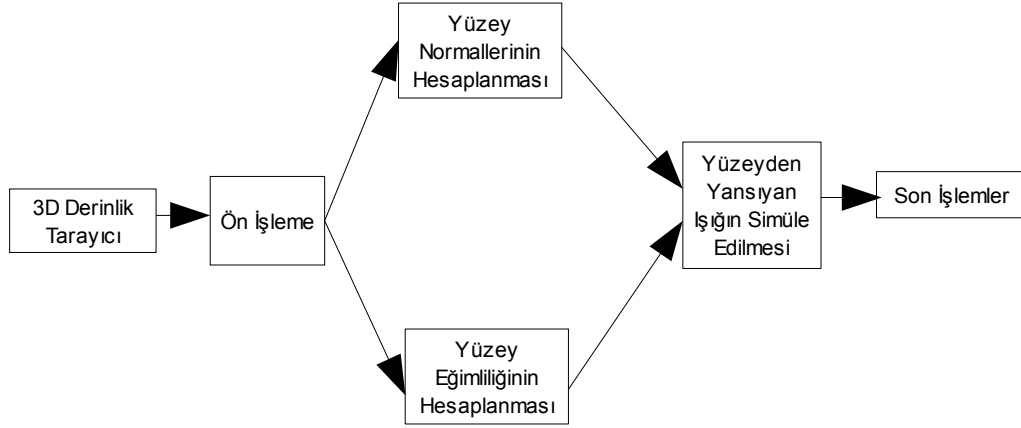
Ashish tarafından yapılan tez çalışmasında yansıma analizi yöntemi incelenmiştir [4]. Çalışmanın amacı gemi tanklarının iç yüzeylerini tarayarak, hatalı kısımları görüntü işleme teknikleri ile otomatik olarak tespit eden bir sistem tasarlamaktır. Yapılan deneylerde yüzeye bir ışık kaynağından gönderilen farklı nitelikteki ışıklar bir kamera tarafından sayısallaştırılmış, elde edilen veriler üzerinde görüntü işleme algoritmaları denenmiştir. Işık frekansı, ışık türü, ışık şiddeti, kamera çözünürlüğü, kamera süzgeçleri gibi parametrelerin farklı durumları için sistem test edilmiştir.

3. YÜZEYE DÜŞEN IŞIĞIN SİMULE EDİLMESİ

3.1. Sistem Hakkında Genel Bilgi

Günümüzde birçok sektörde yüzey hatalarını tespit etmek gerekmektedir [1]. Üretilen ürünlerde çeşitli deformasyonlar oluşabilir. Deformasyonlara örnek olarak çöküntü ve tümsek şeklindeki yüzeysel oluşumlar gösterilebilir. Deformasyonların üretimin erken dönemlerinde tespit edilmesi önemlidir. Bir çok sektörde üretimin son aşamasına gelene kadar yüzeyler mattır ve yansıma olmadığından hataların gözle görülebilmesi zordur. Bu sebeple hataların tespiti için üretimin son aşamaları beklenir. Örneğin üretim bandındaki otomobillerin dış yüzeylerini inceleyen bir teknisyen, ortamdaki ışığın yüzeyde oluşturduğu farklı yansımalarından faydalanarak hataları görmeye çalışır. Yüzeğe düşen ışık ile yüzey arasındaki açı büyüdükçe, ışığın oluşturduğu parlama da artar. Böylece yüzeydeki hatalar belirginleşir [3]. Teknisyenler bu yöntemden faydalanıp hata aramak için yüzeyin bir dizi işlemde geçerek parlatılmasını beklemek durumundadırlar. Derinlik bilgisi kullanılarak üretimin erken evrelerinde mat yüzeydeki hataları tespit etmek mümkündür [3].

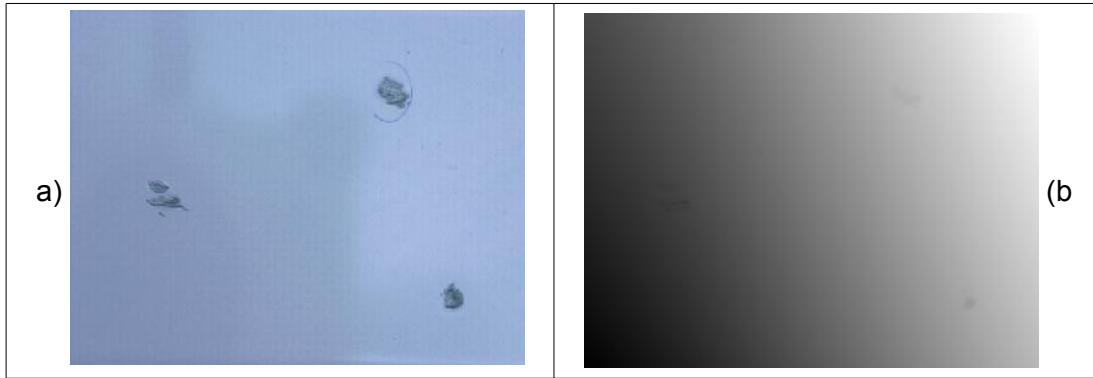
Bu çalışmada, yüzeyden alınan derinlik bilgisi üzerinde işlemler yaparak, yüzey yansımalarını simüle etmek, bu sayede noktasal hataları ve yüzeysel bozulmaları sezme amaçlanmıştır. Derinlik bilgisi kullanıldığından sistem mat yüzeylerde de çalışabilecek, hatalar üretim aşamasında daha erken evrelerde (örneğin boyama işlemine geçilmeden) sezilebilecektir. Hataların otomatik sezimi amacıyla geliştirilen bu yöntem, bilgisayar ortamında, yüzeyin üç boyutlu derinlik verisini kullanarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.1'de blok şeması görülen sistemde ilk olarak üç boyutlu tarayıcıdan alınan derinlik verisi bir dizi ön işlemde geçirilerek işlenmeye hazır hale getirilir. Ardından yüzey normalleri ve yüzey eğimlilikleri hesaplanır, normaller ile eğimliliklerden faydalanarak yüzeyden yansıyan ışık simüle edilir. Son olarak hatalar seviyelendirme ve öbeikleme ile ayrıştırılarak sezilir.



Şekil 3.1: Sistemin blok şeması.

3.2. Üç Boyutlu Tarayıcıdan Derinlik Bilgisi Alınması

Üç Boyutlu derinlik verilerinin bir kısmı internet üzerindeki veri tabanlarından, bir kısmı da Minolta marka Vivid 910 derinlik tarayıcı kullanılarak elde edilmiştir. Vivid 910 ile elde edilen derinlik verilerinin belirli çözünürlük ve hassasiyet değerleri vardır. Cihaz ile taranacak yüzey arasındaki mesafe maksimum doğruluk ile çalıştığı 60cm olarak seçilmiştir [7]. Bu koşullarda cihazın X, Y, Z eksenlerindeki doğrulukları sırasıyla $\pm 0,22\text{mm}$, $\pm 0,16\text{mm}$ ve $\pm 0,10\text{mm}$, hassasiyeti $8\mu\text{m}$ 'dir [7]. Bu şartlarda taratılan $94,08\text{cm}^2$ genişliğindeki bir yüzeyin ham derinlik verisinde 304952 nokta bulunmaktadır ve 1cm^2 'ye yaklaşık 3241 nokta düşmektedir. Vivid 910 ile CCD imgeler de elde edilebilmektedir (bkz Şekil 3.2-a). Veri tabanlarından alınan imgeler ile ilgili bilgiler, bu imgelerle yapılan testler ile birlikte anlatılmıştır (bkz Bölüm 4.1).



Şekil 3.2: a) Yüzeyin CCD kamera ile fotoğraflanmış görünümü. b) Derinlik tarayıcının çıkışındaki veri bulutunun iki boyutlu koordinat düzleminde gösterimi.

Üç boyutlu derinlik tarayıcının çıkışında elde edilen veri, üç boyutlu uzaydaki noktalar kümesidir. Bu noktalar kümesinin işlenebilmesi için noktaların seçilen bir düzlemde iki boyuta indirgenmesi gerekmektedir [8]. Yapılan indirgeme işlemi ön işleme bölümünde ayrıntılı şekilde anlatılmıştır. İşlem sonucunda, Şekil 3.2-a'da CCD görüntüsü bulunan yüzeyin derinlik imgesi elde edilir (bkz Şekil 3.2-b).

3.3. Ön İşleme

Derinlik sensöründen alınan ham üç boyutlu veriler sensör gürültüsünü süzmek ve işlemleri basitleştirmek amacıyla üç ön işlemde geçirilirler. Bu işlemler sırasıyla, düzlemsel bir modele yerleştirme, indirgeme ve düzgünleştirme, boşlukları doldurma ve fazlalıkları silme işlemleridir[9].

Sensör çıkışındaki ham veriler üç boyutlu uzayda pozisyonları belirtilen noktaların tek boyutlu bir vektör içerisinde sıralanmasıyla oluşmuş noktalar kümesidir. Öncelikle bu veriler iki boyutlu düzleme aktarılarak nesnenin iki boyutlu görünümü elde edilir (bkz Şekil 3.3).

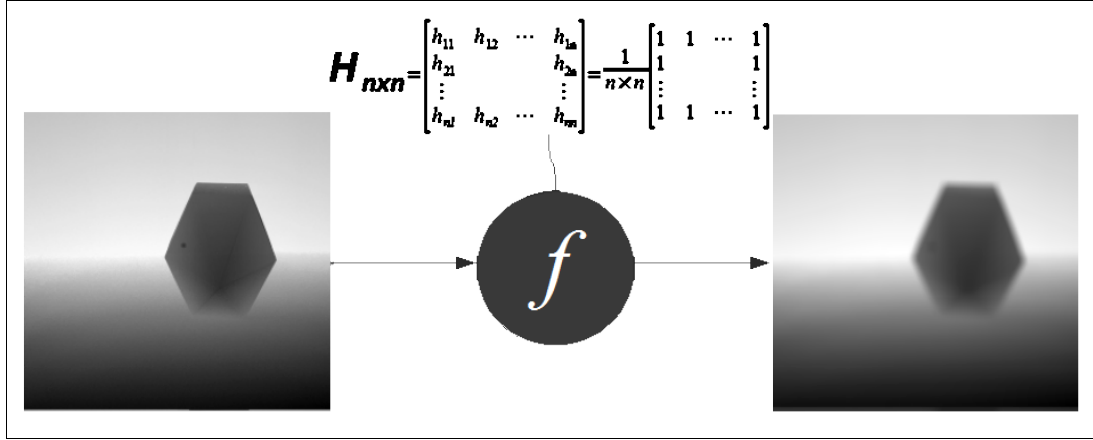


Şekil 3.3: Ters duran plastik bir bardağın derinlik taraması sonucu.

Tarayıcıdan alınan derinlik verisinde cihazlardan kaynaklanan gürültü bulunmaktadır. Bu verilerin gürültülü halde kullanılması durumunda, bu gürültü sonraki adımlarda da artarak ortaya çıkar. Bu durumu engellemek için veriler önce düzgünleştirilerek yüksek frekanslarda bulunan gürültü süzülmalıdır [3]. Bu sebeple iki boyutlu düzlemde elde edilen görüntü, ulaşılmak istenen detay düzeyine göre bir örnek süzgeç kullanılarak süzülür. Boyutları $n \times n$ olan bir örnek süzgecin frekans cevabı aşağıda gösterilmiştir. Farklı n değerleri için alçak geçiren süzgecin kesim frekansı değişmektedir. Denklem 3.1'de $n \times n$ boyutlu bir örnek süzgeç görülmektedir.

$$\mathbf{H}_{n \times n} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \cdots & h_{1n} \\ h_{21} & & & h_{2n} \\ \vdots & & & \vdots \\ h_{n1} & h_{n2} & \cdots & h_{nn} \end{bmatrix} = \frac{1}{n \times n} \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ 1 & & & 1 \\ \vdots & & & \vdots \\ 1 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Bir örnek süzgecin çıkışında elde edilen indirgenmiş görüntü üzerinde gerek görülmeyen, fazlalık kısımlar atılır. Son olarak, boşluklar çevredeki noktaların ara değerlemesi (*interpolation*) ile doldurulur. Yapılan işlem Şekil 3.4'te gösterilmektedir.



Şekil 3.4: İndirgeme işlemi uygulanan derinlik imgesi ve indirgeme işleminin sonucu.

3.4. Yüzey Normallerinin Hesaplanması

Derinlik verisi üzerinde, hataları belirginleştirmek amacıyla ilk yapılacak işlem yüzey normallerini hesaplamaktır. Normallerin hesaplanması konusunda farklı metotlar mevcuttur. Bu metotlardan en bilineni üçgenleme ile alt yüzeyleri bularak yüzey normallerini hesaplamaktır. Ham üç boyutlu verilerden üçgenleme ile yüzey oluşturmak, yüzey normallerine ulaşmak için her zaman efektif sonuç vermez [10]. Geniş kullanım alanı olan üçgenleme yöntemi, derinlik değişiminin az olduğu yerlerde iyi sonuçlar verirken, yükselti değişiminin arttığı bölümlerde başarılı değildir [11]. Bu durum mikrometre mertebesinde, ani derinlik değişimleri oluşturan hataları tespit etmede sorunlara yol açabileceğinden veri işlemede geometrik yöntemler tercih edilmiş ve yüzey normalleri her bir nokta için tek tek hesaplanmıştır.

İki boyutlu düzleme aktarılmış veri üzerinde her bir noktaya belirli uzaklıktaki noktalara ait normallerin ağırlıklı ortalaması alınarak düzgünleştirilmiş normaller hesaplanır. Buna göre her bir (r,c) noktası için yüzey normali $\vec{N}_{r \times c}$, aynı noktadaki ortalama lokal türevlerin vektörel çarpımıdır.

$$\vec{N}_{r \times c} = \frac{d \vec{X}_{rc}}{d \text{ satır}} \times \frac{d \vec{X}_{rc}}{d \text{ sütun}} \quad (3.2)$$

Bir (r,c) noktası için ortalama lokal türevler $d \vec{X}_{rc} / d \text{ satır}$ ve $d \vec{X}_{rc} / d \text{ sütun}$ vektörleri, (r,c) noktasına olan uzaklıkları R'den az olan noktalara ait $d \vec{X}_{ij} / d \text{ satır}$ ve $d \vec{X}_{ij} / d \text{ sütun}$ lokal türev vektörlerinin, ağırlıklı ortalaması

şeklinde hesaplanır. Lokal türev vektörlerinin tanımları denklem 3.3'te ve denklem 3.4'te verilmiştir.

$$\frac{d \vec{X}_{ij}}{d \text{ satır}} = X_{i+1,j} - X_{i,j} \quad (3.3)$$

$$\frac{d \vec{X}_{ij}}{d \text{ sütun}} = X_{i,j+1} - X_{i,j} \quad (3.4)$$

Uygulanacak ağırlıklı ortalama işlemi 3.8'de ve 3.9'da belirtilmiştir.

$$\vec{D}_{r,c_{\text{satır}}} = \sum_{i=r-(R/2)}^{r+(R/2)} \frac{d \vec{X}_{ic}}{d \text{ satır}} \quad (3.5)$$

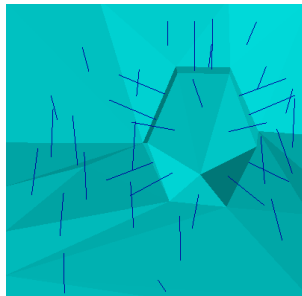
$$\vec{D}_{r,c_{\text{sütun}}} = \sum_{j=c-(R/2)}^{c+(R/2)} \frac{d \vec{X}_{rj}}{d \text{ sütun}} \quad (3.6)$$

Buna göre herhangi bir (r,c) noktası için yatay ve düşey eksendeki ortalama lokal türevler, (r,c) noktasına olan uzaklıkları R'den küçük olan noktaların, lokal türevlerinin ortalamalarının, aynı noktaların (r,c) noktasına olan uzaklığına bağlı olarak ağırlıklandırılarak ortalama işlemine tabi tutulması şeklindedir. Burada R yüzey normalleri için düzgünleştirme parametresidir. Büyüyen R değerleri için yüzeyin ayrıntıları kaybolur. Daha geniş yüzeyleri temsil eden normaller elde edilir. Şekil 3.5'te üçgen yüzeylere ait normallerin vektörel gösterimleri bulunmaktadır.

$$S_{r,c} = \sum_{i=r-(R/2), j=c-(R/2)}^{r+(R/2), c+(R/2)} 1 - \frac{|\vec{X}_{r,c} - \vec{X}_{i,j}|}{R} \quad (3.7)$$

$$\frac{d \vec{X}_{rc}}{d \text{ satır}} = \vec{D}_{r,c_{\text{satır}}} / S_{r,c} \quad (3.8)$$

$$\frac{d \vec{X}_{rc}}{d \text{ sütun}} = \vec{D}_{r,c_{\text{sütun}}} / S_{r,c} \quad (3.9)$$



Şekil 3.5: Üçgen yüzeylere ait yüzey normallerinin vektörel gösterimi.

3.5. Yüzey Eğimliliğinin Hesaplanması

Yüzeyden yansıyan ışığı simüle edebilmek için yüzeyin eğimliliğinin de hesaplanmasına ihtiyaç duyulur. Derinlik tarayıcıdan alınan veriler sıralı dikdörtgen göz (*mesh*) yapıları şeklindedir ve örnekler arasındaki boşluklar yeterince küçük olduğundan bu bölgelerde oluşan kayıplar kabul edilebilir boyuttadır. Bu sebeple yüzeyin eğimliliği, ardışıl örneklenmiş verilerin dairesel bir yay oluşturduğu kabul edilerek kolayca hesaplanabilir [12].

$$C_{r_1c_1, r_2c_2} = \arccos(\vec{N}_{r_1 \times c_1} \cdot \vec{N}_{r_2 \times c_2}) \quad (3.10)$$

Ardışıl (r_1, c_1) ve (r_2, c_2) noktaları arasındaki yayın eğimliliği, yüzey normallerinin vektörel çarpımlarından, denklem 3.10'da gösterilen şekilde hesaplanır. Yüzey eğimliliğinin sıfırdan büyük olduğu yerler konkav, sıfırdan küçük olduğu yerler konveks bölümlerdir. Bir (r_1, c_1) noktasına komşuluğu bulunan tüm noktalar için hesaplanan eğimliliklerin minimumu ($K1_{r_1, c_1}$) ve maksimumu ($K2_{r_1, c_1}$) temel eğimlilik bileşenleri olarak isimlendirilir.

$$K1_{r_1, c_1} = \min[r_2, c_2](C_{r_1c_1, r_2c_2}) \quad (3.11)$$

$$K2_{r_1, c_1} = \max[r_2, c_2](C_{r_1c_1, r_2c_2}) \quad (3.12)$$

3.6. Yüzeyden Yansıyan Işığın Simülasyonu

Yüzeye düşen ışığın simülasyonu ile derinlik bilgisinden yüzeyin görünümü elde edilmek istenmektedir. Öncelikle yüzeyin minimum eğimliliği hesaplanır ve ışıklandırma işleminde kullanılacak ışık bu eğimliliğe sahip olan yüzeye paralel yönde seçilir. Işığın yönü minimum eğimliliğin ortalama yönüdür [3]. Yansıyan ışığın simülasyonu ($f_{r,c}$) minimum eğimlilikten elde edilen vektör ($\vec{L}_{r,c}$) ile yüzeyin her noktasındaki yüzey normalinin ($\vec{N}_{r \times c}$) iç çarpımı sonucu bulunur.

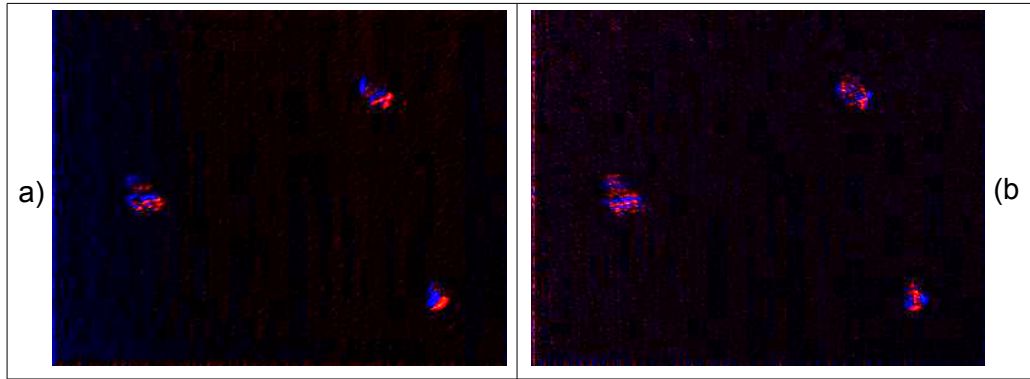
$$f_{r,c} = \vec{L}_{r \times c} \cdot \vec{N}_{r \times c} \quad (3.13)$$

Eğer bir yüzey parçasının eğimliliği, yüzeyin minimum eğimliliğine eşit ise; kendisi de bir alt yüzey sayılabilecek bu yüzey parçasının, yüzey normali ile tüm yüzey için hesaplanmış olan $\vec{L}_{r,c}$ vektörü arasındaki açı 90 derecedir. Bu sebeple bu noktada $f_{r,c}$ fonksiyonunun değeri sıfırdır. Aradaki açının 90 dereceden uzaklaşması ile $f_{r,c}$ fonksiyonunun değeri de sıfırdan uzaklaşarak, pozitif ya da negatif yönde büyür. $f_{r,c}$ fonksiyonunun değerinin pozitif ya da negatif oluşu

yüzey normalinden sapmanın yönünü belirtir. Yansıma simülasyonu sonucunda negatif değerler mavi, pozitif değerler kırmızı tonda renklendirilerek yüzeydeki ani yükseliş ve düşüşler işaretlenir (bkz Şekil 3.6-a).

3.7. Son İşlemler

Her ne kadar denklem 3.13 sonucunda elde edilen kırmızı ve mavi tonlardaki iki boyutlu resim üzerinde hatalar belirginleşmeye başlamış olsa da sonuçları iyileştirmek adına süzgeçleme ve eşikleme işlemleri uygulanır.

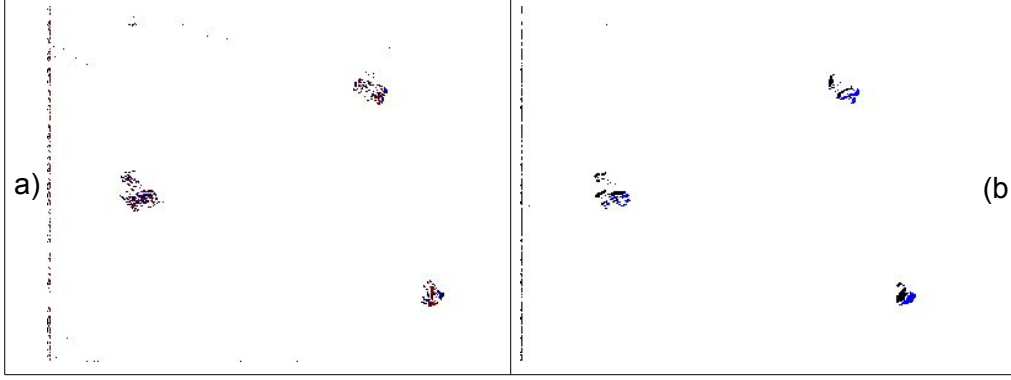


Şekil 3.6: a) Denklem 3.13 sonucunda elde edilen simüle edilmiş yüzey görüntüsü. b) Süzgeçlenmiş yüzey görüntüsü.

Elde edilen görüntünün, x ve y eksenlerinde 2 piksel kaydırılmışı ile farkı alınarak alçak frekanslı bileşenlerin süzülmesi sağlanır. Süzgeçleme sonucunda oluşan görüntü Şekil 3.6-b'de görülmektedir. Süzülen görüntü üzerinde bir eşik değeri seçilerek görüntü üzerindeki her noktada denklem 3.14 uyarınca eşik altında kalan veriler beyaz olacak şekilde eşikleme uygulanır. Sonuçta elde edilen görüntüde farklı seviyelerdeki kırmızı ve mavi pikseller yüzey normalinden pozitif ve negatif yöndeki sapmaları göstermektedir (bkz Şekil 3.7-a).

$$f_{r,c} < eşik \quad (3.14)$$

İdeal eşik değeri seçimi, eldeki derinlik imgesi ile analiz edilen yüzeyin minimum ve maksimum yansıma simülasyonu değerlerine göre farklılık gösterebilmektedir. Bu sebeple eşiklemenin yanı sıra öbikleme ile de hataların belirginleşmesi, hatalı bölgelerin koordinatlarının belirlenmesi sağlanabilir. Bu doğrultuda K-Means öbikleme algoritması Öklit Uzaklığı (*Euclidean Distance*) metriği ile kullanılmaktadır.



Şekil 3.7: a) Seviyelendirme işlemi uygulanmış yüzey görüntüsü. b) Yüzey görüntüsünün öbek sayısı 3 olacak şekilde öbeklenmesi.

K-Means öbeklemesi ile $f_{r,c}$ sonucunda elde edilen değerleri, seçilen sayıda öbeğe ayırmak amaçlanmıştır [13]. Derinlik imgesi üzerindeki her (r,c) noktası için hesaplanan $f_{r,c}$ değerlerinden denklem 3.15'de görüldüğü şekilde tek boyutlu f' vektörü oluşturulur.

$$f_{r,c} = f'_{c \times r_{max} + r} \quad (3.15)$$

Öbek sayısı k seçilir ve bu öbek sayısı kadar öbek merkezi (m_i) başlangıçta rastgele olarak belirlenir. K-Means öbekleme algoritması uyarınca f' vektörü içerisindeki her bir örnek noktasının seçilen öbek merkezlerine olan uzaklıkları hesaplanarak, her bir nokta kendisine en yakın olan öbeğe ait olarak işaretlenir. Bütün örnek noktaları bir öbeğe atandıktan sonra her öbeğin içerdiği örnek noktalarının orta noktası yeni öbek merkezi olarak belirlenir [13]. Sonrasında tüm örneklerin yeni öbek merkezlerine olan uzaklıkları ve buna bağlı ait oldukları öbekler tekrar hesaplanarak öbek merkezlerinin pozisyonları tekrar güncellenir. İşlemler, öbek merkezlerinin değerleri değişmeyinceye kadar devam eder.

$$J = \sum_{i=1}^k \sum_{j \in S_i} |f'_j - m_i| \quad (3.16)$$

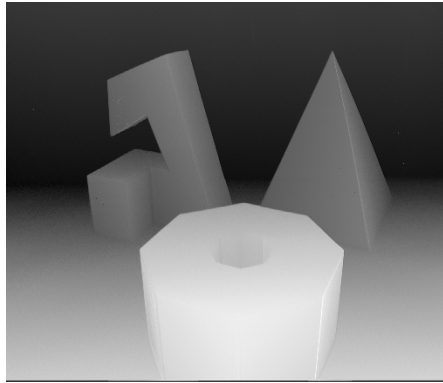
Sonuçta her bir öbek için, o öbeğin noktalarını barındıran, S_i noktalar kümesindeki elemanların, m_i öbek merkezine uzaklıkları toplamının minimum olduğu durum sağlanması amaçlanır [14]. Denklem 3.16'da tüm öbekler için bu uzaklıkların toplamı J ile gösterilmiştir. Burada örnekler arası uzaklığın ölçülmesinde Öklit Uzaklığı kullanılmaktadır.

Yansıma simülasyonu sonucu, yüzey normalinden pozitif veya negatif yönde sapmanın sayısal değeri elde edildikten sonra, öbek sayısı 3 seçilerek yapılan öbekleme işlemiyle derinlik imgesi üzerindeki örnek noktaları, normalden pozitif

yönde sapanlar, normalden negatif yönde sapanlar ve hatasız olanlar şeklinde öbeklenmektedirler. Yansıma simülasyonu sonucunda, kırmızının ve mavinin farklı tonlarında renklendirilen piksellere, öbekleme işleminden sonra buldukları öbeğe göre beyaz, mavi, siyah renkleri atanır (bkz Şekil 3.7-b). Öbek merkezi değeri (m_i) en küçük olan ile en büyük olan iki öbek sırasıyla yüzeydeki ani yükselişleri ve ani düşüşleri temsil eder. Üçüncü öbekteki elemanlar yüzey normalinden sapmanın az olduğu hatasız yüzey noktalarına ait elemanlardır.

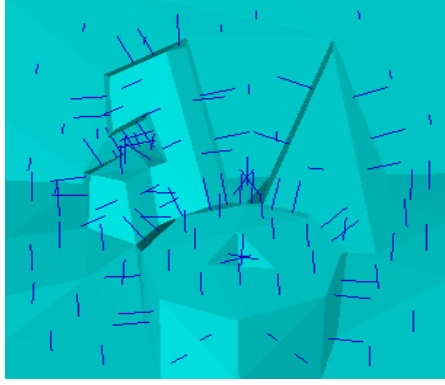
3.8. Üçgenleme ile Alt Yüzeyler Bazında Hata Sezme

Birden fazla yüzeye sahip olan derinlik imgelerinde yüzeyden yansıyan ışığı simüle ederken, tek bir yüzey eğimliliği kullanmak, sistemin performansını olumsuz etkilemektedir. Bunun sebebi birden fazla yüzeye sahip olan cisimlerin alt yüzeylerinin ortalama eğimliliklerinin birbirlerinden farklı olmasıdır. Bu sebeple derinlik imgesi alt yüzeylere bölünmüş ve her bir yüzey için farklı yüzey eğimliliği hesaplanmıştır. Buna bağlı olarak yansıma simülasyonunda kullanılacak ışığın yönü her bir alt yüzey için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Bu sayede sistem performansını arttırmak amaçlanmıştır.



Şekil 3.8: Üçgenlemede kullanılacak derinlik imgesi.

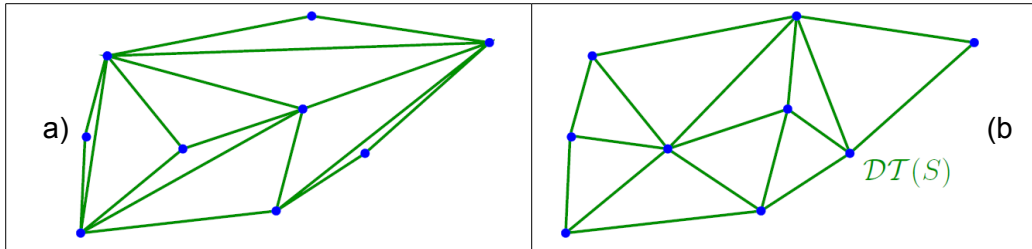
Literatürde yüzey bölütlemeye tel file (wire frame) modelleri sıklıkla kullanılmaktadır [15]. Bu modellerde derinlik imgesinin (bkz Şekil 3.8) yüzeyleri dikdörtgen ya da üçgen alt yüzeylere ayrılarak modellenir. Bölütleme işleminde kullanılacak imgeler DDÇ (Düzlemsel Doğru Çizgesi – *Planar Straight Line Graph*) biçimindedirler (bkz Şekil 3.10). DDÇ üzerinde birbirine bağlı olan iki nokta bir kenar, üç ya da daha fazla kenar bir alt yüzey oluşturur, bu şekilde imge tel file alt yüzeyler ile modellenmiş olur [15]. Modelleme işlemi belirli kısıtlar doğrultusunda indirgenerek, imgenin daha az sayıda alt yüzey ile modellenmesi sağlanabilir. Tel file alt yüzeyler için kendi sınırları içerisinde kalan noktaları temsil eden tek bir yüzey normali hesaplanabilir (bkz Şekil 3.9).



Şekil 3.9: Yüzey Normalleri

Bu çalışmada modelleme başarımı yüksek olduğundan üçgen tel file yapıları kullanılmıştır. Üçgenleme (*triangulation*) işlemi yapılırken Delaunay Üçgenleme Metodu kullanılmıştır. Bu metod sayesinde, elde edilen üçgenlerin büyüklüklerinin ve köşe açılarının belirli sınırlar içerisinde kaldığı matematiksel olarak garanti edilebilmektedir [15].

Üçgenleme esnasında iki nokta birleşerek bir kenar, üç kenar birleşerek bir üçgen oluşturur. En genel durumda m adet noktadan oluşan S noktalar kümesindeki noktaların her birinin iki boyutlu düzlemde oluşturulan üçgenlerin köşelerinde yer almasıyla oluşan gruplamaya üçgenleme denir (bkz Şekil 3.10-a) [16]. Aynı noktalar kümesinin belirli kriterlere göre, belirli özellikler ile gruplanması sonucu oluşan üçgenlemeye ise Delaunay Üçgenlemesi ($DT(S)$) denir (bkz Şekil 3.10-b) [16].

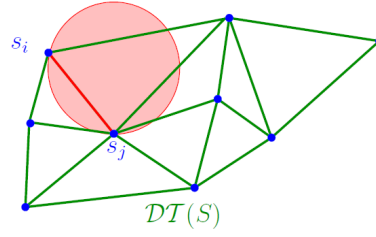


Şekil 3.10: a) Üçgenleme Örneği b) Delaunay Üçgenleme Örneği

Delaunay üçgenlemesinin özelliklerinden ilki dışbükey çokgen olma durumudur. Üçgenleme sonucunda oluşan üçgenlerin en dışta kalan kenarların birleşimi bir dışbükey çokgen meydana getirir ve S kümesindeki noktaların hepsi bu çokgenin içerisinde kalır [17].

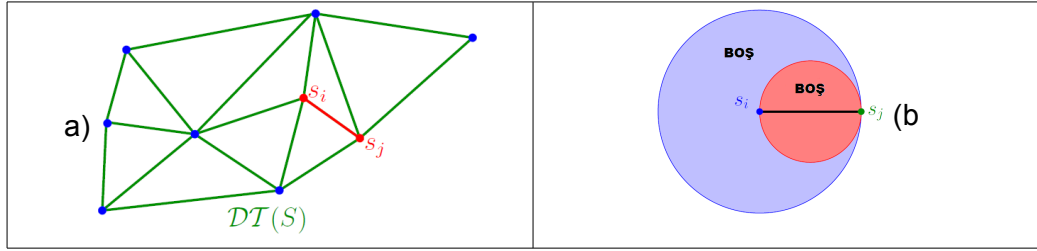
İkinci özellik çevrel çember özelliğidir. Delaunay Üçgenlemesi sonucunda oluşan üçgenlerin çevrel çemberlerinin içinde o üçgeni oluşturan noktalar haricinde bir nokta bulunmaz [17]. Aynı şekilde diğer üçgenlerin hiçbirinin tamamı bu çevrel çemberin içerisinde kalmaz [16].

Delaunay Üçgenleme işlemi gerçekleştirilirken iki nokta ancak ve ancak bu iki noktadan geçen ve başka hiçbir nokta içermeyen bir daire varsa bir kenar oluşturur, buna boş daire özelliği denir [17] (bkz Şekil 3.11).



Şekil 3.11: Boş daire özelliği.

Bir nokta kendisine olan uzaklığı minimum olan diğer nokta ile bir kenar oluşturur, bu duruma en yakın çift özelliği denir [16] (bkz Şekil 3.12-a). Çapı bu iki noktanın oluşturduğu kenar olan dairenin içerisinde, seçilen iki noktadan başka nokta yer alamayacağından, boş daire özelliği de sağlanmış olur [17] (bkz Şekil 3.12-b).



Şekil 3.12: a) En Yakın Çift Özelliği b) En Yakın Çift Özelliğinin Gösterimi

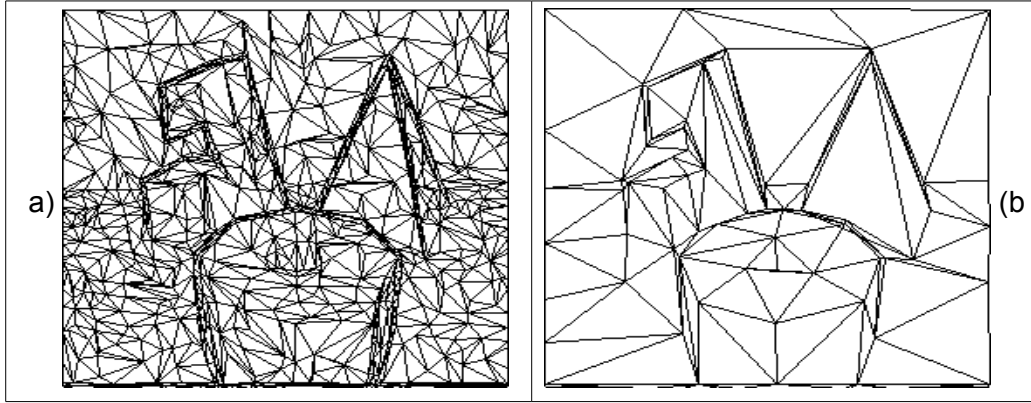
Delaunay üçgenlemesinin ilginç özelliklerinden birisi de En Küçük Örtün Ağaç (MSP: *Minimum Spanning Tree*) özelliğidir. Bir noktalar kümesinde tüm elemanları, en yakın olanları bağlama kriterine uyararak, birbirlerine bağlayan en küçük ağaca “En Küçük Örtün Ağaç” denir. Üçgenleme esnasında ele aldığımız S noktalar kümesinin herhangi bir alt kümesinin EKÖA'sı, Delaunay Üçgenlemesinin bir parçasıdır [17].

Üçgenleme işlemi ile iki boyuta indirgenmiş derinlik imgeleri üzerinde tel file alt yüzeyler bulunur [16]. Bu işlem yapılırken iki boyutlu üçgenleme kullanılmıştır. Sistemin genel amacı hata içeren yüzeyleri ayırt etmek olduğundan, yapılan üçgenleme işlemi belirli kısıtlar doğrultusunda tekrarlanarak imgenin hatasız bölgelerinin ve hatalı bölgelerinin yeterli sayıda üçgen yüzey ile modellenmesi sağlanır. Bu sayede imge alt yüzeyleri ve hatalar istenilen detayda modellenir.

İndirgeme işleminde kullanılacak nokta sayısı, kenar sayısı, üçgen sayısı, iki kenar arasındaki açı gibi kısıtlar mevcuttur. Derinlik imgesi üzerinde oluşturulan kenar sayısı ile üçgen sayısı doğru orantılıdır. Bu durum bilinerek tercihen, üçgenleme işleminde kısıt olarak kenar sayısı kullanılmıştır. Şekil 3.13'te Şekil

3.8'deki derinlik imgesinin farklı kenar sayıları kullanılarak oluşturulmuş üçgenleme sonuçları bulunmaktadır.

Yapılan çalışmada derinlik imgesinin alt yüzeyleri bulunduktan sonra her bir alt yüzey için ayrı ayrı yüzey normali (bkz Şekil 3.9) ve yüzey eğimliliği hesaplanmaktadır. Bu eğimlilik değerleri her bir alt yüzeyin içerisindeki noktalar ile temsil edilen daha küçük yüzeylerin eğimliliklerinin bir araya gelmesiyle hesaplanan ortalama eğimlilik değerleridir. Noktalar ile temsil edilen küçük yüzeyler, içerisinde buldukları alt yüzeyin normalinden sapma miktarlarına göre hata olarak işaretleneceklerdir.



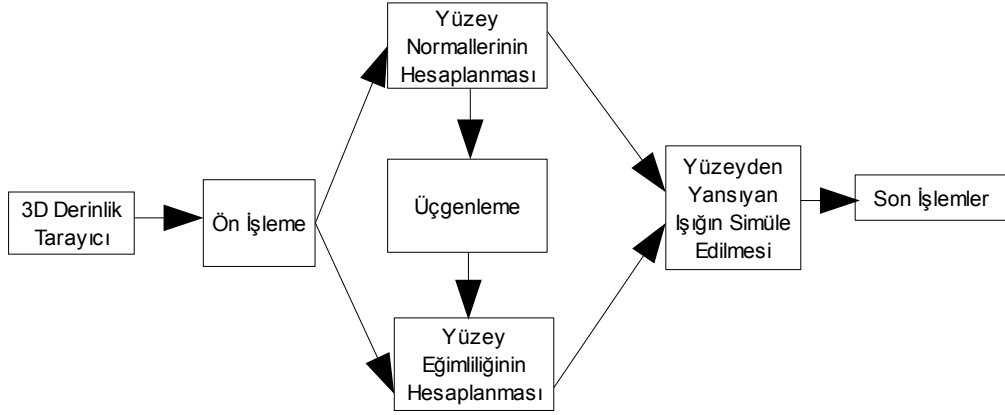
Şekil 3.13: a) Tel file alt yüzeyler (kenar sayısı 2000) b) Tel file alt yüzeyler (kenar sayısı 200)

Sonuçta bölüm 3.6'da anlatılan ve her bir pikseli ayrı bir yüzeye ait olarak kabul edip piksel piksel işlem yapılan modele benzer şekilde, her bir alt yüzeyde, kendi eğimliliklerine uygun ışık kaynakları kullanılarak, yansıma simülasyonu işlemi uygulanır. İşlem sonucunda değerleri negatif olan pikseller mavi tonda, pozitif olan pikseller kırmızı tonda renklendirilirler. Şekil 3.14'te üçgenleme kullanılan sistemin blok diyagramı görülmektedir. Üçgenleme işleminde üçgen sayısı arttıkça üçgenler daha küçük yüzey parçacıklarını modellemeye, yüzeyi daha ayrıntılı kaplamaya başlamaktadır. Bu durumda hataların bulunduğu yüzeyler de alt yüzeylere bölünmekte ve hatalı piksellerin yüzey normallerinde sapma miktarı azalmaktadır. Hatasız imge elimizde olmadan hataları sezmeye çalıştığımızdan ortalama yüzey normalinden sapma miktarı azaldıkça hataları tespit etmemiz zorlaşmaktadır.

3.9. Üçgenleme ile Yüzey Bozukluklarını Sezme

Üç boyutlu tasarımı yapılan cisimlerin üretimi esnasında üretilen ile CAD (*Computer Aided Design*) bilgisi arasında yüzeysel farklar bulunabilir. Bu farklar yüzey bozuklukları olarak adlandırılır. CAD bilgisi kullanarak yapılan üretim sonucunda

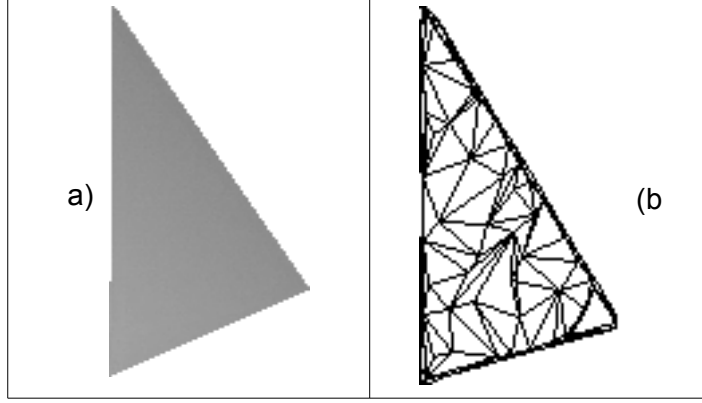
üretile ürünlerin, orijinaline uygunluğunun ölçülmesi gerekir. Üretilemek istenilen ile üretile arasındaaki farkların bulunarak düzeltilmesi ile üretim kalitesi artırılmaktadır. Üretim sonucundaki ürün yüzeylerinin, yapılan CAD tasarımına uygunluğunu test etmek amacıyla, yansıma simülasyonu yöntemini kullanan bir sistem tasarlanmıştır. Sistemde test edilmek istenen objenin CAD bilgisinden ve derinlik taramasıyla elde edilmiş üç boyutlu derinlik imgesinden faydalanılmaktadır.



Şekil 3.14: Sistemde üçgenleme kullanımı.

Tasarıma uygunluğu test ederken CAD bilgisi içerisinde bulunan yüzey bilgileri kullanılır. CAD bilgisi içerisinde objeyi oluşturan yüzeylerin sınırları ve bu yüzeylere ait derinlik bilgileri bulunur. Bu sayede objenin yüzeylerinde bozulma bulunup bulunmadığı her bir yüzey için tek tek test edilebilmektedir. Test aşamasında bir yüzeyin testi yapılırken test edilecek olan yüzey, üçgen tel file alt yüzeylere bölünerek her bir üçgen alt yüzeyin hatalı olup olmadığı test edilmektedir. Önceki bölümlerde derinlik imgesindeki her bir nokta için yansıma simülasyonu yöntemi ile yapılan işlemler bu bölümde üçgen alt yüzeylerde yapılmaktadır.

Test edilmek istenen objenin derinlik imgesi üzerinde, CAD tasarımındaki yüzey sınırları kullanılarak, test edilmek istenilen bölge belirlenir (bkz Şekil 3.15-a). Belirlenen bölgeye ait test objesinin derinlik verileri ve orijinal tasarıma ait derinlik bilgileri kullanılarak bu yüzeyde bir bozulma olup olmadığını bulmak amacıyla, test objesi üzerinde belirlenen bölge tel file üçgen alt yüzeylere ayrılır (bkz Şekil 3.15-b).



Şekil 3.15: a) Orijinal derinlik imgesine ait örnek yüzey b) Yandaki örnek yüzeyin tel file alt yüzeyleri

Test yüzeyi içerisindeki her bir alt yüzey için hesaplanan yüzey normalinin, aynı yüzey bölgesi için orijinal tasarım üzerinde hesaplanan yüzey normalinden sapma miktarına bakılarak bu yüzey parçasının üç boyutlu tasarımdan ne kadar farklı olduğu ölçülür. Alt yüzeylerin normalleri hesaplanırken yüzeyi oluşturan noktalara ait yüzey normalleri kullanılmaktadır. Üç adet nokta ile tanımlı bir üçgen alt yüzeyin normali, üçgeni oluşturan noktadaki yüzey normallerinin ortalamaları şeklinde bulunabilir [18] (bkz denklem 3.17). Burada $\vec{N}_{r \times c}$, (r,c) noktasına ait yüzey normalidir.

$$\vec{N}_y = \frac{\vec{N}_{r1 \times c1} + \vec{N}_{r2 \times c2} + \vec{N}_{r3 \times c3}}{3} \quad (3.17)$$

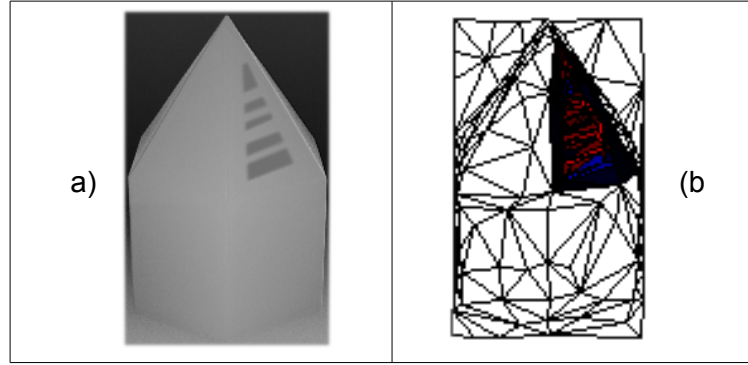
Test edilen cismin üzerinde seçilen bölge üçgen alt yüzeylere ayrılarak her bir alt yüzey için yüzey normali (\vec{N}_y) hesaplandıktan sonra, aynı yüzey parçası için tasarım verileri üzerinde yüzey eğimliliği bulunur ve bu eğimlilik kullanılarak yüzeye paralel olan bir vektör, yansıma simülasyonunda kullanılacak ışık vektörü olarak seçilir (\vec{L}_y). Test edilecek yüzeye ait normal vektörü ile orijinal (bozulmasız) yüzeye ait eğimlilikten yola çıkılarak hesaplanmış olan ışık vektörünün iç çarpımıyla, test edilecek yüzeye ait yansıma simülasyonu sonucu, f_y hesaplanmaktadır (bkz denklem 3.18).

$$f_y = \vec{L}_y \cdot \vec{N}_y \quad (3.18)$$

Hesaplanan f_y değerinin sıfıra yakın olması test edilen alt yüzey parçasının CAD bilgisindeki karşılığına benzer olduğunu gösterir. f_y değerlerinin sıfırdan pozitif ve negatif yönlerde uzaklaşması test edilen yüzey parçasının eğiminin orijinalinden pozitif veya negatif yönde saptması anlamına gelmektedir.

Hesaplanan orijinalden sapma değerlerini derinlik imgesi üzerinde göstermek amacıyla yüzey parçaları yansima simülasyonu sonuçlarına göre renklendirilirler. Negatif değerler mavi renk tonlarında, pozitif değerler kırmızı renk tonlarında renklendirilerek, pozitif yönde en büyük değerin tamamen kırmızı, negatif yönde en küçük değerin tamamen mavi olması sağlanır. Şekil 3.16-a'daki hatalı test imgesine ait yansima simülasyonu sonucu Şekil 3.16-b'de aynı imgeye ait tel file üçgenleme üzerinde gösterilmektedir. Şekil 3.16-b'de görüldüğü gibi hatalı üçgen yüzey parçaları renklendirilmekte, diğer üçgenler beyaz bırakılmaktadır.

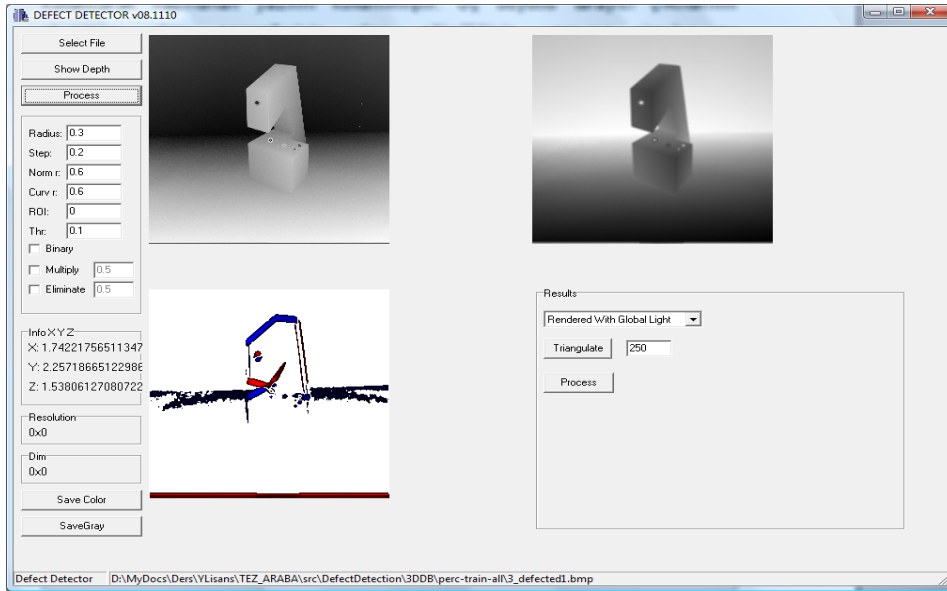
Bozulma saptanan alt yüzeylerin büyüklüğünün CAD bilgisinde belirlenmiŐ ana yüzeyin boyutunun, üretim kalitesine göre belirlenen, belli bir oranına ulaŐması durumunda üretilen parçanın kalite kontrol testini aŐamadıęı sonucuna varılır. Yöntemin yüzeylerdeki bozukluğun tipi hakkında fikir verebilmesi (kme, yükselti, vb.) bir başka avantajıdır.



Şekil 3.16: a) Hatalı test objesine ait derinlik imgesi b) Tel file üçgenleme üzerinde yansima simülasyonu sonucu

4. TESTLER

Bölüm üçte anlatılan yöntemlerin test edilmesi amacıyla, C/C++ programlama dilleri kullanılarak hazırlanan yazılım kullanılmıştır. Üç boyutlu tarayıcı çıktıların okunması, yüzey normallerinin, yüzey eğimliliğinin, yansıma simülasyonu sonuçlarının hesaplanması, üçgenleme, süzgeçleme ve öbeleme işlemleri sonucunda hata sezme işlemleri bu yazılım tarafından gerçekleştirilir. Yazılımın kullanıcı ara birimine ait ekran görüntüsü Şekil 4.1'de bulunmaktadır.

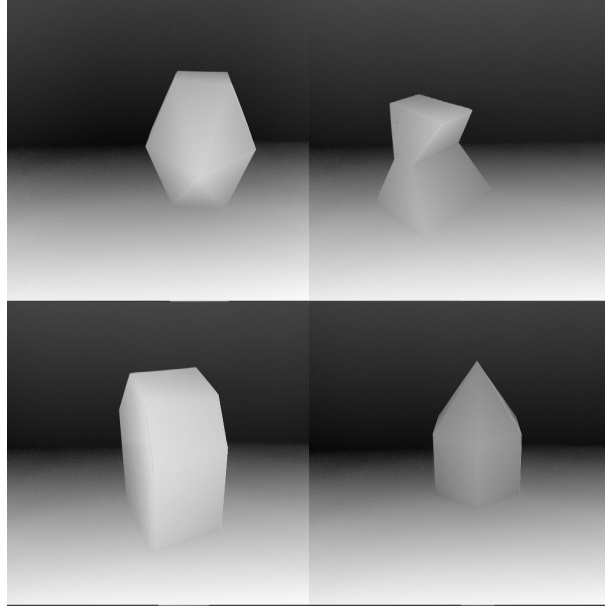


Şekil 4.1: Hata sezme yazılımı kullanıcı ara birimi.

Testler dört başlıkta ele alınmıştır; sentetik hata oluşturulmuş cisimler ile tüm imge üzerinde hata sezme, metalik yüzeyler ile tüm yüzeyde hata sezme, Delaunay üçgenleme ile oluşturulan alt yüzeylerde hata sezme ve yüzey bozukluklarının sezilmesi. İlk bölümde BMP formatında kaydedilmiş derinlik imgeleri üzerinde yapay hatalar oluşturularak bu hataların tespit edilmesine çalışılmakta, ikinci bölümde ise hatalı metal yüzey parçalarının derinlik tarayıcı ile taratılması sonucu elde edilen ASC formatındaki derinlik imgeleri üzerinde testler yapılmaktadır. Üçüncü bölümde üçgenleme ile derinlik imgelerinin alt yüzeyleri bulunarak hata sezme işlemleri bu alt yüzeylerde yapılmaktadır. Üçgenleme işlemlerinde GTS (*GNU Triangulated Surface Library* - "<http://gts.sourceforge.net/>") yazılım kütüphanesi kullanılmıştır. Son olarak analiz edilmekte olan cismin yüzeyleri, üçgenleme ile bölütlenerek, üçgen yüzey parçaları bazında hata sezimi yapılmıştır.

4.1. Sentetik Hata Oluşturulmuş Cisimler ile Tüm İmge Üzerinde Hata Sezme

İlk olarak çok yüzeyli derinlik imgeleri üzerinde sentetik hatalar oluşturulmuş ve bu imgeler üzerinde sistemin performansı test edilmiştir. Derinlik imgeleri USF - IARL web sayfasında bulunan (*University of South Florida – Image Analysis Research Lab*. "<http://marathon.csee.usf.edu/range/seg-comp/images.html>"), Oak Ridge, Tennessee'deki CESAR laboratuvarlarına ait derinlik imgeleridir (bkz Şekil 4.2). Cisimlerin taranmasında Perceptron marka LASAR derinlik tarayıcı kullanılmış, çıkışında 512x512 piksel boyutun BMP formatında kaydedilmiş dosyalar veri tabanından indirilmiştir [19]. İmgeler üzerinde değişiklikler yaparak, boyutları bilinen, sentetik yüzey hataları oluşturulmuştur. Sistemin hataları bulma performansı ve farklı sistem parametrelerinin performansa etkileri sentetik hata oluşturulmuş farklı derinlik imgeleri üzerinde gözlemlenmiştir.



Şekil 4.2: Örnek derinlik imgeleri.

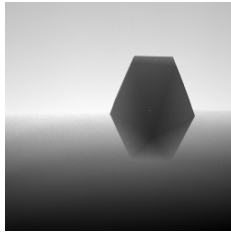
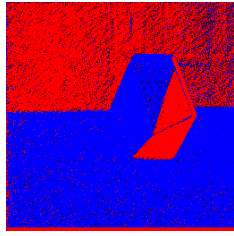
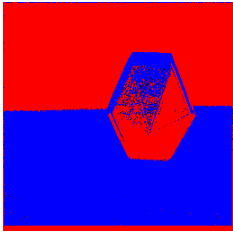
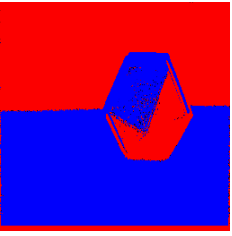
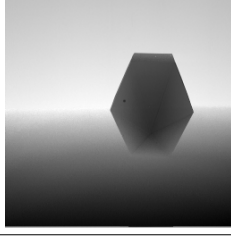
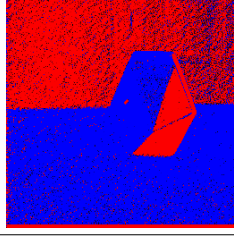
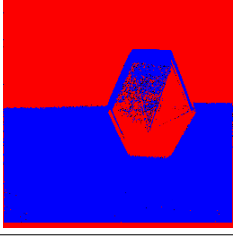
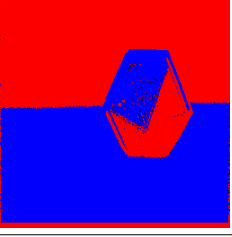
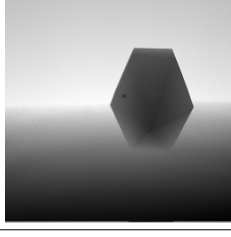
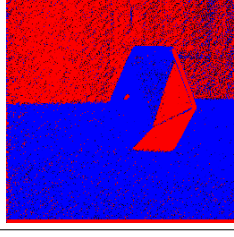
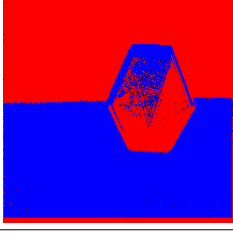
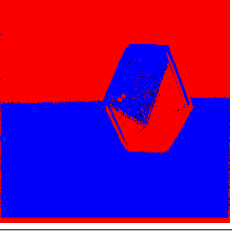
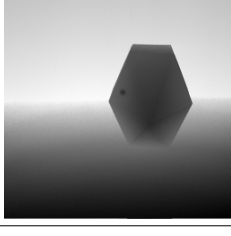
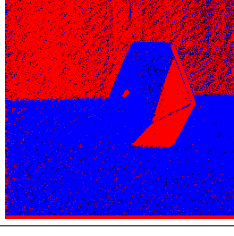
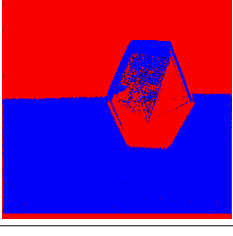
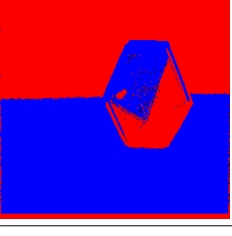
4.1.1. Düzgünleştirme Parametrelerinin Sezme Başarımına Etkileri

Sanal yüzeyler ile yapılan ilk testte hatasız cisim ve üzerinde farklı boyutlarda hatalar oluşturulmuş örnekler kullanılmıştır. Cismin birden fazla yüzeyi olduğundan yansımaya simülasyonu için ışık yönü rastgele seçilmiş ve aynı ışık dört durumda da kullanılmıştır. Cismin aynı yüzeyi üzerinde 6, 10 ve 16 piksel büyüklüğünde hatalar oluşturulmuştur. Sonuçta hatasız cismin yansımaya simülasyonu sonuçları farklı $H_{n \times n}$ (Bir Örnek Süzgeç – *Uniform Filter*) ve R (Yüzey Normali Düzgünleştirme Parametresi) değerleri için incelenmiştir.

$H_{1 \times 1}$ için sonuçlar incelendiğinde, derinlik imgelerinin keskinliklerinin yüksek olduğu

buna rağmen artan R değerleri için yansımaya simülasyonu sonuçlarında yüksek frekanslardaki bileşenlerin kaybolduğu gözlemlenmiştir. R değeri artırılarak yansımaya simülasyonu sonucunda oluşan gürültü süzülebilir fakat bu durum küçük boyutlardaki hatalarda performansı düşürecek, hatanın görülmesini zorlaştıracaktır. Örneğin Çizelge 4.1'e bakıldığında R=4 için hatalar belirginleştirilmiş olsa da beraberinde ortaya çıkan gürültü sebebiyle hataların sezilmesi zordur. Artan R değerleri için ise gürültüyle birlikte hataların da süzülmeye başlanmış olduğu gözlenmektedir.

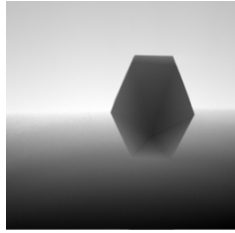
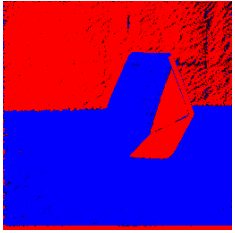
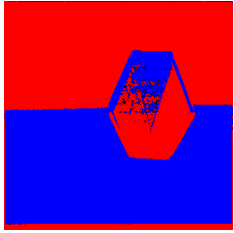
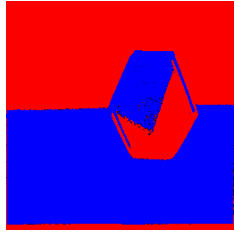
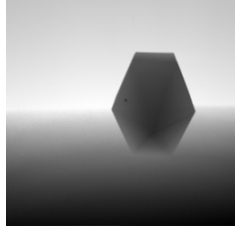
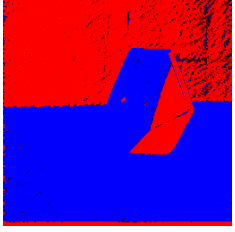
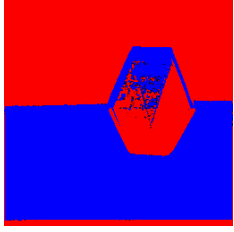
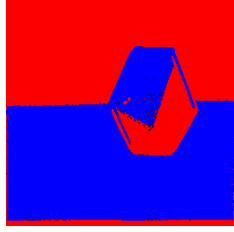
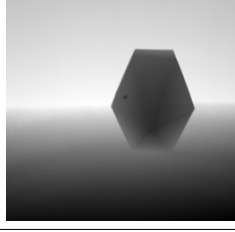
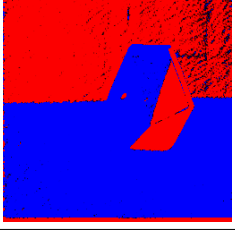
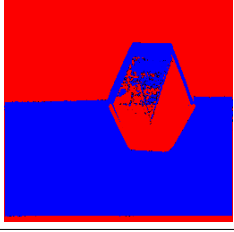
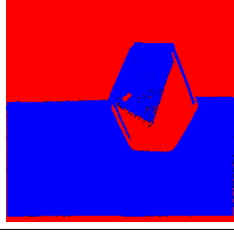
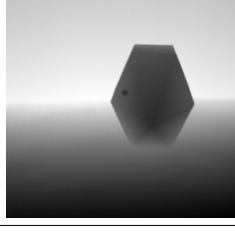
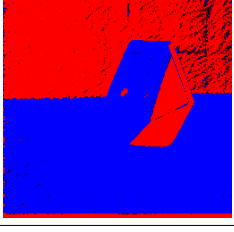
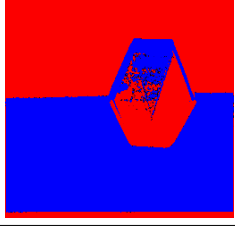
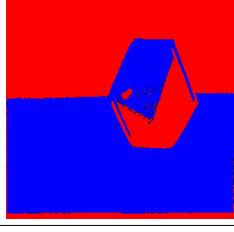
Çizelge 4.1: Orijinal ve üzerinde farklı boyutlarda hatalar oluşturulmuş cisimlerin derinlik imgeleri, yansımaya simülasyonu sonuçları. Bir örnek süzgecin boyutu n=1 olarak seçilmiştir.

Durum	Derinlik	Yansımaya Simülasyonu R=4	Yansımaya Simülasyonu R=6	Yansımaya Simülasyonu R=8
Hata: yok Eşik: 0 $H_{1 \times 1}$				
Hata: 6 piksel Eşik: 0 $H_{1 \times 1}$				
Hata: 10 piksel Eşik: 0 $H_{1 \times 1}$				
Hata: 16 piksel Eşik: 0 $H_{1 \times 1}$				

Gürültüyü azaltırken hataları koruyabilmek amacıyla sistemin ön işlemler bölümünde bulunan bir örnek süzgecin boyutu bir önceki denemeden farklı olarak n=2 olacak şekilde değiştirilmiş, buna göre farklı R değerleri için ortaya çıkan sonuçlar Çizelge 4.2'de gösterilmiştir. Çizelgeye bakıldığında derinlik imgelerinin keskinliklerinin n=1 olan duruma göre azaldığı görülmektedir. Buna rağmen R=4 değeri için yansımaya

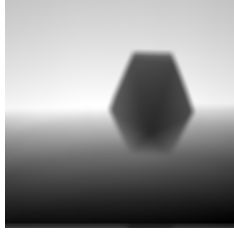
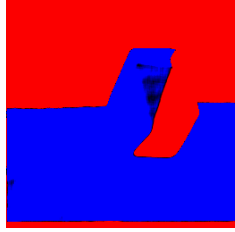
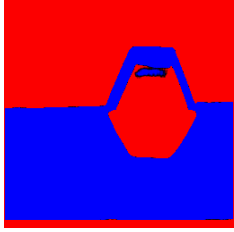
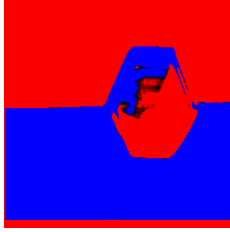
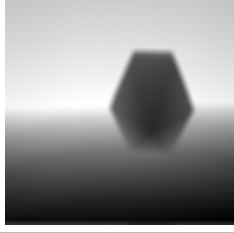
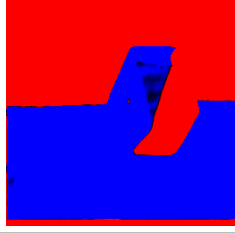
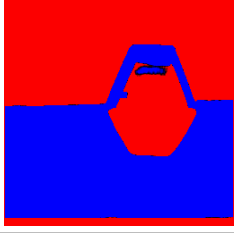
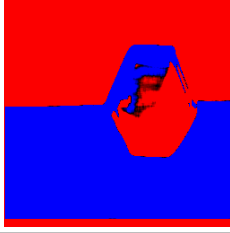
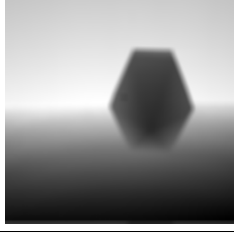
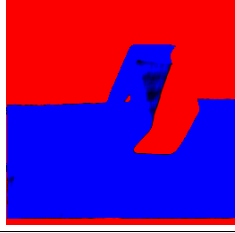
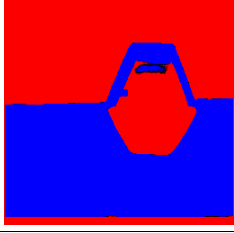
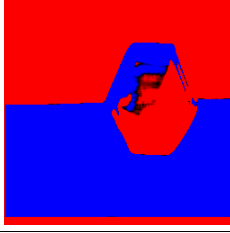
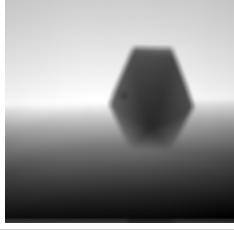
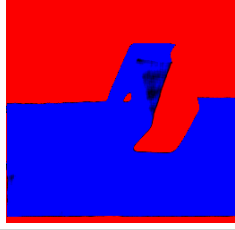
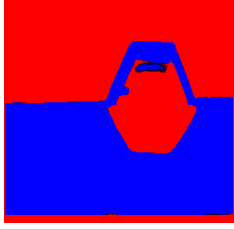
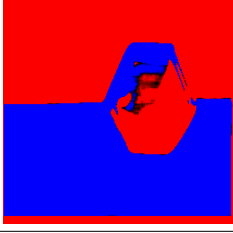
simülasyonu sonuçları incelendiğinde gürültü azalmış olsa da hatalar belirginliklerini korumaktadır. Artan R değerleri için hataların belirginliği azalsa da görünürlüğü sürmektedir.

Çizelge 4.2: Bir örnek süzgecin boyutu $n=2$ olduğu durumda; derinlik imgeleri, yansımaya simülasyonu sonuçları.

Durum	Derinlik	Yansımaya Simülasyonu R=4	Yansımaya Simülasyonu R=6	Yansımaya Simülasyonu R=8
Hata: yok Eşik: 0 $H_{2 \times 2}$				
Hata: 6 piksel Eşik: 0 $H_{2 \times 2}$				
Hata: 10 piksel Eşik: 0 $H_{2 \times 2}$				
Hata: 16 piksel Eşik: 0 $H_{2 \times 2}$				

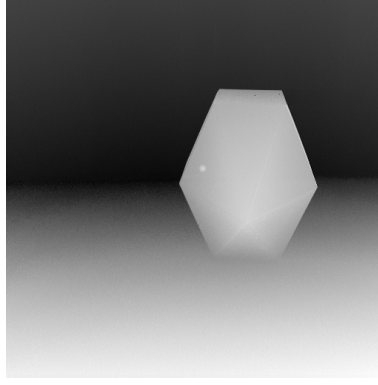
Bir örnek süzgecin boyutlarını daha da artırarak $n=4$ değerine yükselttiğimizde derinlik imgelerinde ayrıntıların büyük ölçüde yok olduğu, yüksek frekanslı bileşenlerin süzüldüğü görülmektedir. Bu durum gürültüyle birlikte hatalarında süzülmesine yol açmaktadır. Çizelge 4.3 yansımaya simülasyonu sonuçlarında gürültü neredeyse %100 oranında yok olurken, hataların görünürlüğü de oldukça azalmıştır. Artan R değerleri için yansımaya simülasyonu sonuçlarında hatalar görülmemektedir.

Çizelge 4.3: Bir örnek süzgecin boyutu $n=4$ olduğu durumda; derinlik imgeleri, yansıma simülasyonu sonuçları.

Durum	Derinlik	Yansıma Simülasyonu R=4	Yansıma Simülasyonu R=6	Yansıma Simülasyonu R=8
Hata: yok Eşik: 0 H_{8x8}				
Hata: 6 piksel Eşik: 0 H_{8x8}				
Hata: 10 piksel Eşik: 0 H_{8x8}				
Hata: 16 piksel Eşik: 0 H_{8x8}				

4.1.2. Süzgeç Kullanımının Hata Sezme Başarımına Etkisi

Süzgeçleme işleminin etkilerini incelemek amacıyla Şekil 4.3'de görülen ve bir yüzeyi üzerinde 10 piksel büyüklüğünde sentetik hata içeren nesneye ait derinlik imgesi kullanılmıştır. $n=2$, $R=4$ için yapılan test ile amaçlanan, Süzgeçlemenin hata sezme başarımının artırılması açısından gerekliliğinin ve yararlarının gözlenebilmesidir. Bu amaçla, diğer parametreler sabit tutularak dört farklı yönden gelen ışık için cismin yansıma simülasyonu ve süzülmesi sonucunda sezilen hatalar Çizelge 4.4'te karşılaştırılmıştır. Sonuçları daha iyi görebilmek amacıyla süzgeçlenmiş imgelerin, eşikleme uygulanmış durumları da çizelgede görülmektedir.



Şekil 4.3: Bir yüzeyinde 10 piksel büyüklüğünde sentetik hata oluşturulmuş çok yüzeyli nesneye ait derinlik imgesi.

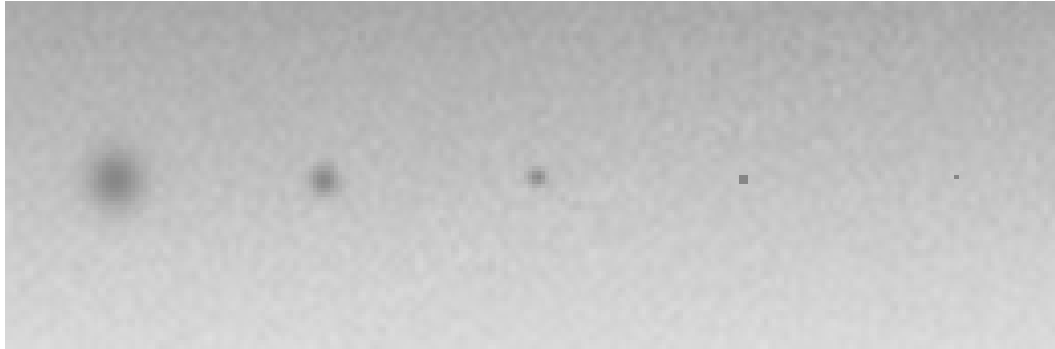
Test sonuçları incelendiğinde farklı yönlerden gelen ışık ile yansımaya simülasyonu sonuçlarının değiştiği gözlenmiştir. Farklı yönlerden gelen ışığa göre, yansımaya simülasyonu sonuçlarında hatanın belirginliği de değişmektedir. Fakat süzgeçlenmiş imgeler incelendiğinde aralarındaki farkın önemsenmeyecek düzeyde olduğu görülmüştür. Bu durum seviyelendirilmiş imgeler incelendiğinde daha iyi anlaşılır. Sonuçta, süzgeçleme işlemi sayesinde, hata bulma başarımlarının ışık yönünden etkilenmediği görülmüştür.

Çizelge 4.4: Farklı yönlerden gelen ışığa göre yansımaya simülasyonu ve süzgeçleme sonuçları ($n=2 / R=4$). Süzgeçleme sonuçları üzerinde seviyelendirme uygulanarak belirginlik artırılmıştır.

	1	2	3	4
YANSIMA SİMÜLASYONU				
SÜZÜLMÜŞ YANSIMA SİMÜLASYONU				
SÜZÜLMÜŞ İMGELERİN SEVİYELENMESİ				

4.1.3. Sistem Limitlerinin Belirlenmesi


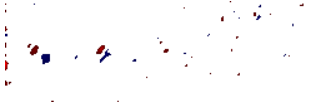
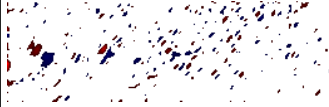

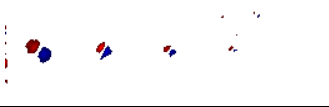

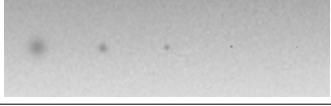
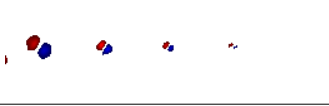


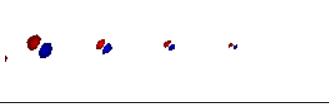
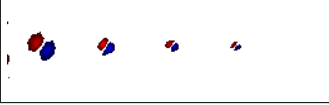
Bu bölümde, sistem limitlerini belirlemek amacıyla sistemin farklı boyutlardaki ve farklı derinliklerdeki hataları sezme performansı test edilmiştir. Yapılan testlerde üzerinde beş farklı boyutta (20 piksel çapında, 10 piksel çapında, 6 piksel çapında, 2 piksel çapında ve 1 piksel çapında) hata oluşturulmuş test imgeleri, hataların maksimum derinlik farkına göre dört farklı şekilde üretilmiştir. Örneğin, Çizelge 4.5'te derinlik hata farkı %32 olan satıra bakıldığında görülen hatalı derinlik imgesi 5 adet farklı boyutta hata içermektedir. Hatalar soldan sağa doğru, büyükten küçüğe (20 piksel çapında olan hatadan 1 piksel çapında olan hataya) sıralanmışlardır. Sol kolonda görülmekte olan hata derinlik farkı, her bir hatanın bulunduğu yüzeyde oluşturduğu maksimum derinlik farkını belirtmektedir. Şekil 4.4'deki %32 derinlik farklı hatalar içeren imge incelendiğinde hataların hepsi görülebilmektedir. Çizelge 4.5'te bir örnek süzgeç boyutu (n) ve düzgünleştirme parametresi (R) değerleri iki seçilerek, Çizelge 4.6'da bir örnek süzgeç boyutu (n) ve düzgünleştirme parametresi (R) değerleri bir seçilerek yapılmış testler bulunmaktadır. Bir örnek süzgecin boyutu bir seçilerek bir pikselden oluşan hataları bulmak ve sistemi farklı durumlarda test etmek amaçlanmıştır.



Şekil 4.4: %32 derinlik farklı hatalara sahip derinlik imgesi.


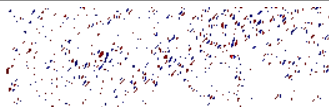
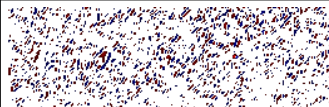


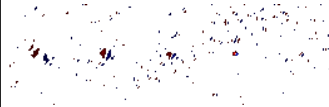
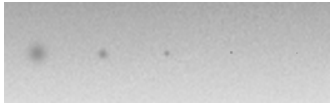

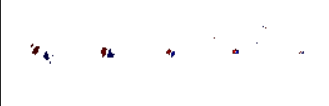



R=2 ve n=2 parametreleriyle yapılan testlerde (bkz Çizelge 4.5), 0,3 eşik değeri için %15, %25 ve %32 hata derinlik farklarında, 20, 10, 6 ve 2 piksel çapındaki hatalar görünür hale getirilmektedir. Bir piksel büyüklüğündeki hata görülememektedir. R=2 ve n=2 parametreleri kullanıldığında, ön işlemlerdeki ve yüzey normalleri hesaplarındaki düzgünleştirme (*smoothing*) etkisi tek piksel büyüklüğündeki bir hata için yüksektir. Bu durumda bir piksellik hatanın yansıma simülasyonu sonuçlarında kaybolması beklenen bir durumdur. Bu sorunu aşmak için n ve R parametreleri bir seçilerek testler tekrarlanmıştır. Çizelge 4.6'daki testler incelendiğinde, düşük düzgünleştirmeler ile yüksek derinlik farkları oluşturan, bir piksellik hataların dahi görünür hale getirildiği görülmektedir.

Çizelge 4.5: Farklı hata boyutlar ve derinlik farkları için yansımaya simülasyonu sonuçları (n=2, R=2).

HATA DERİNLİK FARKI	HATALI DERİNLİK İMGESİ	YANSIMA SİMÜLASYONU EŞİK: 0,3	YANSIMA SİMÜLASYONU EŞİK: 0,2
%8			
%15			
%25			
%32			

Çizelge 4.6'da fark edilen bir başka durum büyük boyutlu hataların görünürlüklerinin azalması, özellikle 0,3 eşik değerini aşamayıp bu değerde görülmemesidir. R parametresi 1 seçildiğinden yüzey normali hesaplarında piksel başına temsil edilen yüzey küçülmüş ve normaller arasındaki komşuluk ilişkisi azalmıştır. Bunun sonucu olarak da derinlik değişimi yavaş gerçekleşen hataların sezilmesi güçleşmiştir. Testler için oluşturulmuş imgelerde, aynı hata derinlik farkına sahip, farklı boyutlu iki hatadan büyük olanın derinlik geçişi daha yavaş gerçekleştiğinden, büyük boyutlu hataların n=1 ve R=1 parametreleriyle sezilmeleri güçleşmiştir.

Çizelge 4.6: Farklı hata boyutlar ve derinlik farkları için yansımaya simülasyonu sonuçları (n=1,R=1)

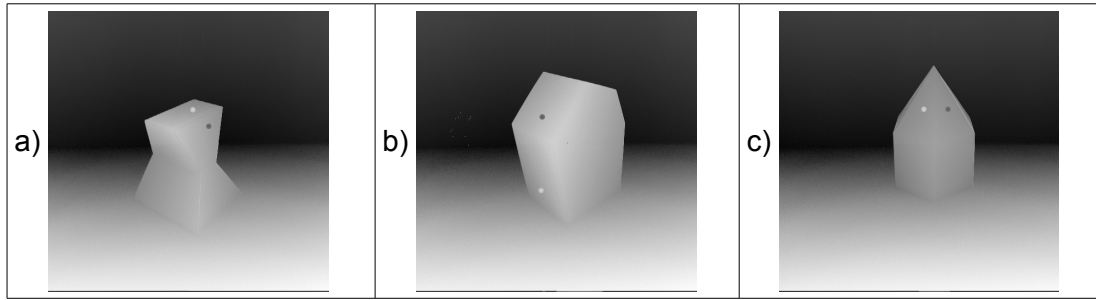
HATA DERİNLİK FARKI	HATALI DERİNLİK İMGESİ	YANSIMA SİMÜLASYONU EŞİK: 0,3	YANSIMA SİMÜLASYONU EŞİK: 0,2
%8			
%15			
%25			
%32			

%8 hata derinlik farkı ile hata oluşturulmuş imgeler incelendiğinde, n=1, R=1 parametreleri için 0,2 ve 0,3 eşik değerlerinde hatalar bulunamamıştır. Bunun sebeplerinden bir tanesi gürültünün yüksek olması bir diğeri de hata derinlik farkı

azaldıkça hatanın oluşturduğu derinlik farkı geçişinin yavaş olmasıdır. $R=2$, $n=2$ parametreleriyle yapılan testler incelendiğine 20 ve 10 piksellik hataların bulunabildiği, daha küçük boyutlarda hataların bulunamadığı görülmektedir. Derinlik farkı az olduğundan, hata olmayan bölümlerde de hata bulunmaktadır, yanlış alarm oranı yüksektir.

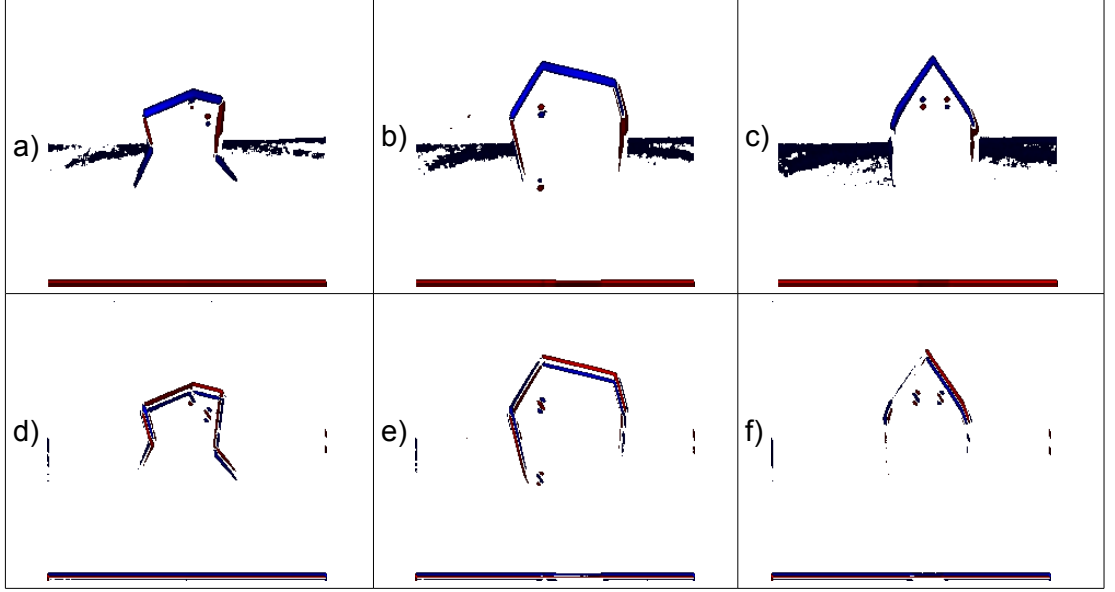
4.1.4. Farklı Cisimler Üzerinde Hata Sezme Başarımı

Sistem parametreleri sabit tutularak farklı cisimler üzerinde testler yapılmıştır. Bu testlerde üç farklı cisme ait derinlik imgesi kullanılmış imgeler üzerinde iki adet sentetik hata oluşturulmuştur. Hatalardan biri 10 piksel çapında dairesel yükselti, diğeri 10 piksel çapında dairesel çöküntüdür. Hataların buldukları yüzeyden derinlik farkları yaklaşık %30'dur. Sentetik hata oluşturulmuş derinlik imgeleri Şekil 4.5'de bulunabilir. Testler iki eşik değeri için tekrarlanmıştır, sonuçlar Şekil 4.6'te ve Şekil 4.7'da görülmektedir.



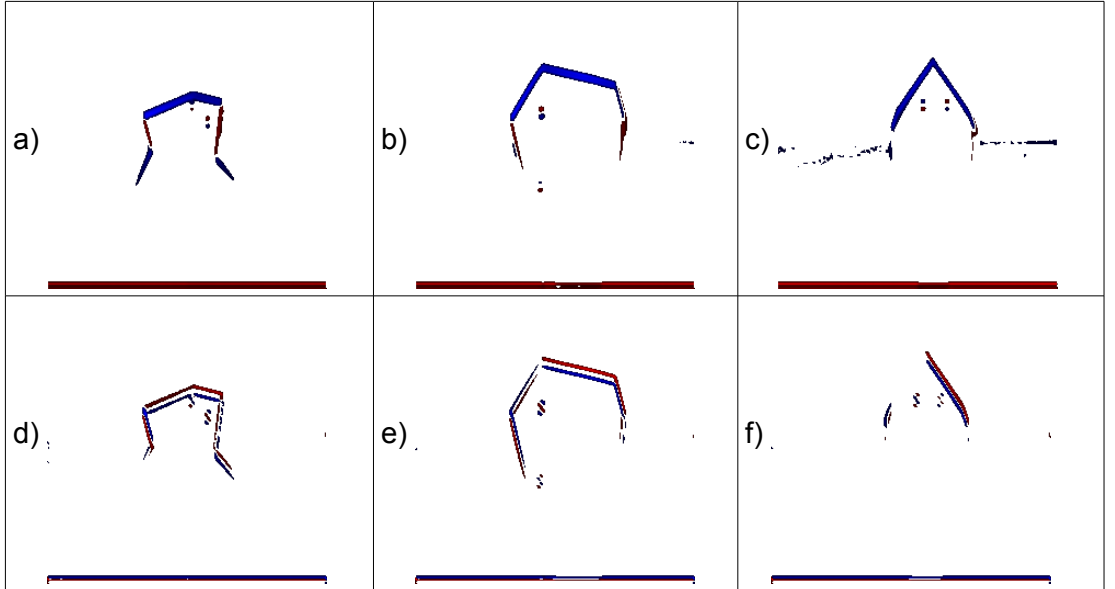
Şekil 4.5: 10 piksel çapında dairesel yükselti ve çöküntüleri bulunan derinlik imgeleri.

Sonuçlar incelendiğinde sistem parametrelerinin farklı cisimler üzerinde benzer sonuçlar verdiği görülmektedir. Birinci şekilde hatalardan bir tanesi cismin köşesine yakın olduğundan yansıma simülasyonu ve süzgeçlenmiş yansıma simülasyonu sonuçlarında (Şekil 4.6 a,d ve Şekil 4.7 a,d) net olarak görülememektedir. Sistemde işlenmek istenen imgenin sınırları ilgi bölgesi olarak belirtilmediğinden ve imgenin orijinal, hatasız biçimi bilinmediğinden sınır bölgelerinde kayıplar yaşanması beklenen bir durumdur. Sistemin ilgi bölgesi belirtecek bir operatöre ya da hatasız imgeye ihtiyaç duymaması, işlenecek olan imgeden bağımsız olarak çalışabilmesine olanak tanır.



Şekil 4.6: 0,1 Eşik değeri için yansima simülasyonu (a,b,c) ve süzgeçlenmiş yansima simülasyonu (d,e,f) değerleri.

Diğer örnekler üzerindeki hataların tümü yansima simülasyonu ve süzgeçlenmiş yansima simülasyonu sonuçlarında tespit edilmiştir. Eşik değerinin 0,1 olduğu durumda yansima simülasyonu sonucunda gürültü olduğu görülmüştür. Bu gürültü üç örnekte de benzer şekilde ve miktarda görüldüğünden kullanılan imgeye bağımlılık göstermez. Sonuçta sistem parametrelerinin kullanılan imgeye bağımlı olmadığı, aynı parametreler ile farklı örnekler üzerinde yapılan testler ile gözlemlenmiştir.



Şekil 4.7: 0,15 Eşik değeri için yansima simülasyonu (a,b,c) ve süzgeçlenmiş yansima simülasyonu (d,e,f) değerleri.

4.2. Metalik Yüzeyler ile Tüm Yüzeyde Hata Sezme

Bu bölümde metal yüzeylerin taratılması ile elde edilmiş derin imgeleri üzerinde testler yapılmıştır. Yaklaşık 90cm² büyüklüğündeki metal yüzeyler üzerindeki boya hataları incelenmiştir (bkz Şekil 4.8). Hataların boyutları yaklaşık olarak 2mm² ile 30mm² arasında değişmektedir. Yüzeylerin taratılmasında Minolta marka Vivid 910 tarayıcı kullanılmıştır. Ölçümler, yüksek kalite elde etmek amacıyla TELE lens kullanılarak ve cihazın kullanıcı kitabında önerildiği üzere 60cm'den yapılmıştır. Bu koşullarda cihazın X, Y, Z eksenlerindeki doğrulukları sırasıyla $\pm 0,22$ mm, $\pm 0,16$ mm ve $\pm 0,10$ mm'dir [7]. Tarayıcı çıkışında ASCII formatında yazılmış veri bulutu dosyası elde edilir. Bu bölümde veri bulutu dosyasının üç boyutlu derinlik işleme teknikleri kullanılarak işlenmesi ve sistemin gerçek veriler üzerindeki performansının incelenmesi amaçlanmaktadır.



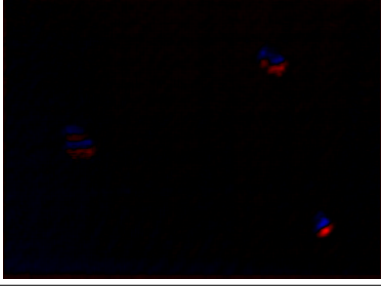
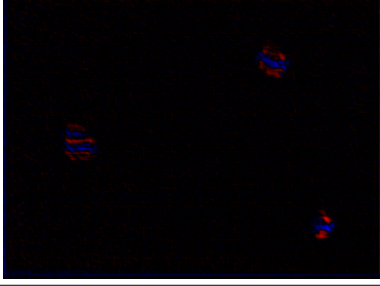
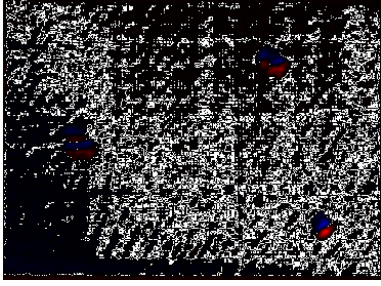
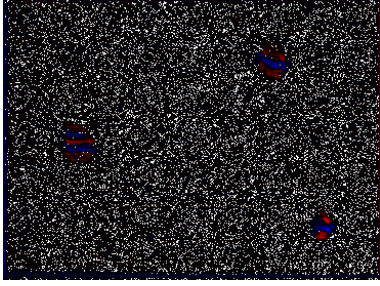
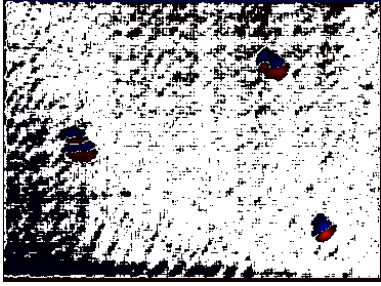
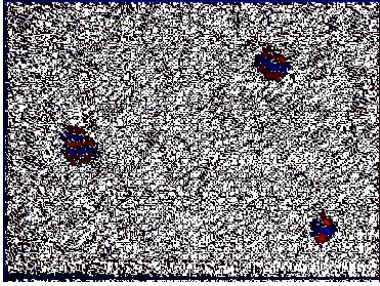
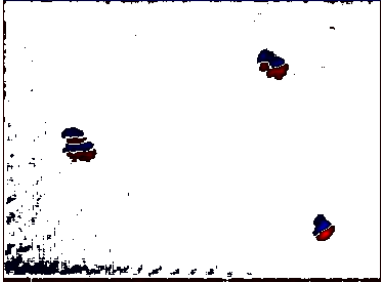
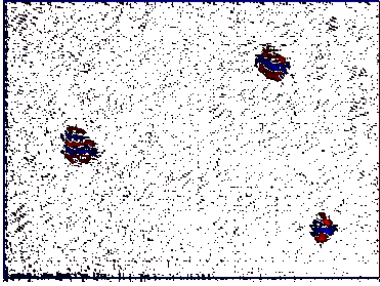
Şekil 4.8: İki boyutlu düzleme aktarılmış derinlik imgesi.

4.2.1. Eşiklemenin Sezme Başarımına Etkisi

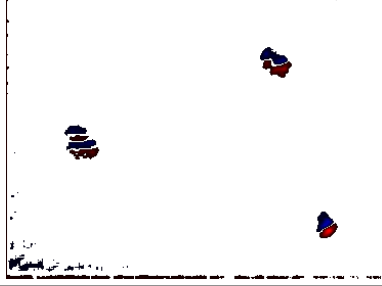
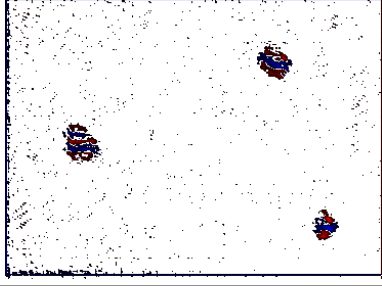
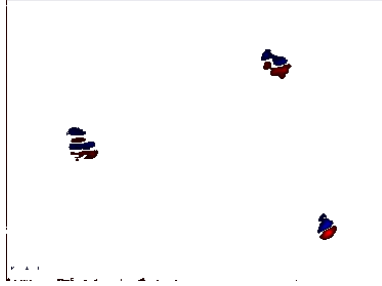

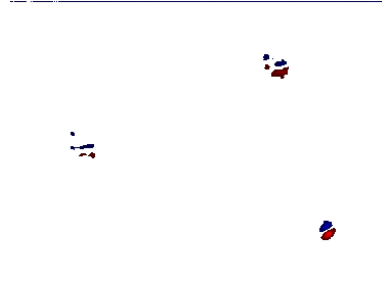

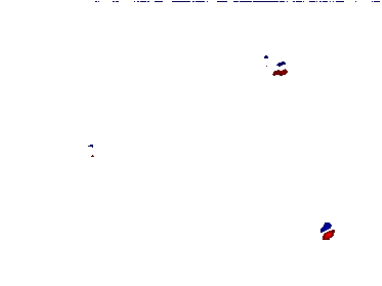
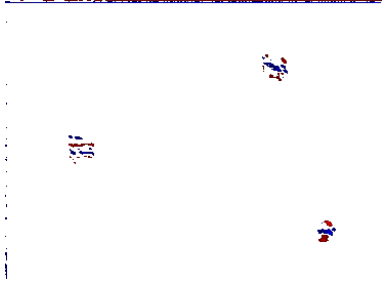
Hataların görünürlüklerini arttırmak amacıyla uygulanan seviyelendirme işlemi, seçilen eşik değerinin pozitif ve negatif değerlerinin arasında kalan noktaların sıfır kabul edilmesi esasına dayanır. Yansıma simülasyonu işlemi sırasında pozitif değerler kırmızı tonda, negatif değerler mavi tonda renklendirilirler. Bu işlem esnasında sıfıra çok yakın olan değerler mavi tonda ve kırmızı tonda parlaklığı az olan renkler olarak görülürler. Bu durum renklerin siyah tonlarında olmasına ve sıfıra uzak değerler alan hatalı bölgelerin ayırt edilmesinin zorlaşmasına neden olur. Seçilen eşik değerinin altındaki bölümlerin beyaz olarak renklendirilmesi ile hataların belirginleştirilmesi hedeflenir.

Çizelge 4.7'de ve Çizelge 4.8'de artan eşik değerleri için yansıma simülasyonu ve süzgeçlenmiş yansıma simülasyonu sonuçları verilmiştir. Hataların görünürlüğünü incelendiğinde eşik değeri arttıkça hataların imge içerisindeki görünürlüklerinin artmaktadır. Bununla birlikte 0,1 eşik değerini aştıktan sonra hataların da yok olmaya başladığı gözlemlenmiştir. Bu doğrultuda eşik değeri seçiminin önemli olduğu ve sistem performansı üzerine etkisinin yüksek olduğu sonucuna varılır.

Çizelge 4.7: Farklı eşik değerleri (0,000-0,050) için yansıma simülasyonu ve süzgeçlenmiş yansıma simülasyonu sonuçları (n=2 / R=4).

Eşik	Yansıma Simülasyonu	Süzgeçlenmiş Yansıma Simülasyonu
0,000		
0,005		
0,020		
0,050		

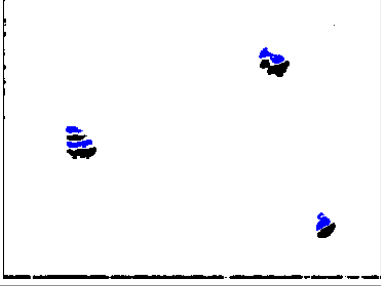
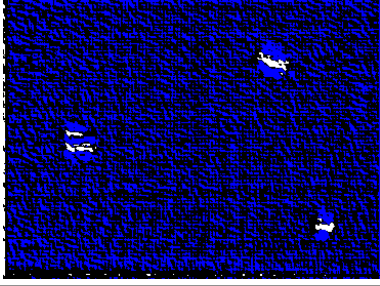
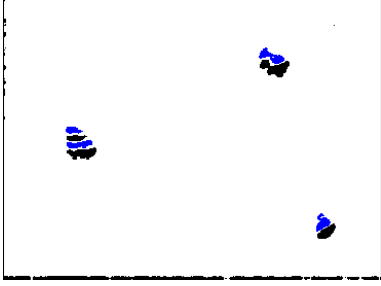

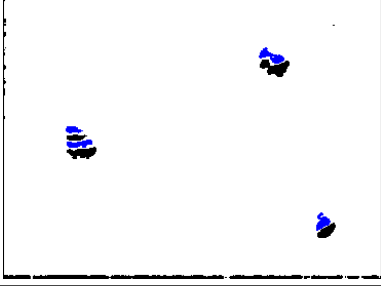
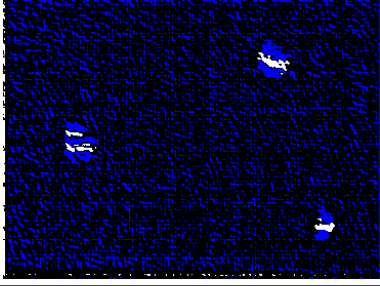
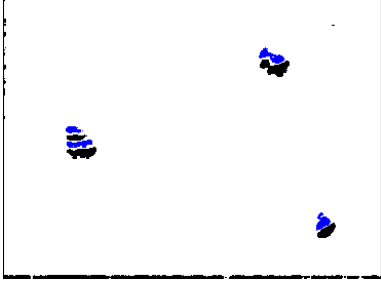

Çizelge 4.8: Farklı eşik değerleri (0,070-0,300) için yansıma simülasyonu ve süzgeçlenmiş yansıma simülasyonu sonuçları (n=2 / R=4).

Eşik	Yansıma Simülasyonu	Süzgeçlenmiş Yansıma Simülasyonu
0,070		
0,100		
0,200		
0,300		

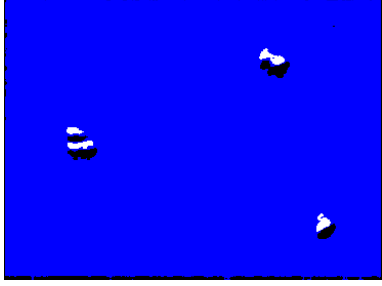
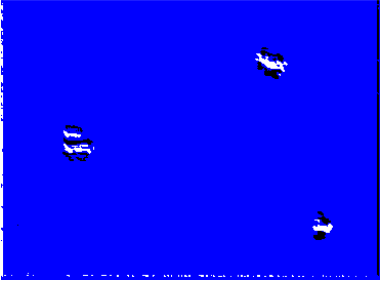

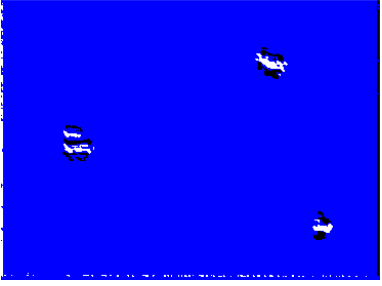
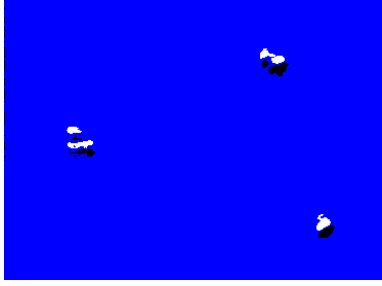
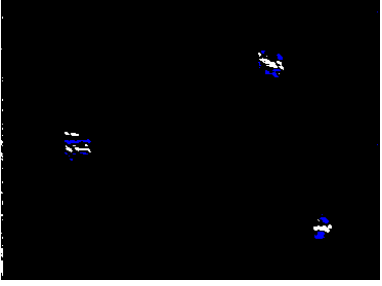
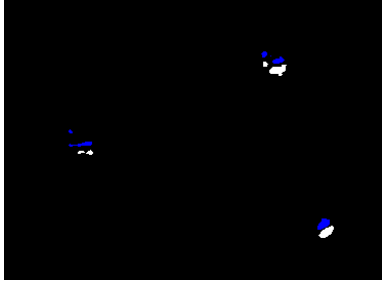
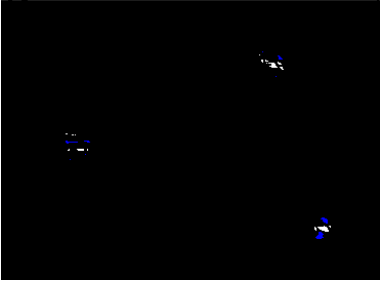
4.2.2. Öbekleme İşleminin Sezme Başarımına Etkisi

Bu bölümde farklı eşik değerlerinin K-Means öbekleme işlemi uygulanmış sonuçlar üzerindeki etkileri incelenmiştir. Şekil 4.8'de görülen derinlik imgesinin farklı eşik değerleri için öbeklenmiş yansıma simülasyonu ve hem süzgeçlenmiş, hem öbeklenmiş yansıma simülasyonu sonuçları Çizelge 4.9'da ve Çizelge 4.10'da gösterilmiştir. Öbekleme işlemi üç öbek kullanılarak yapılmıştır ve öbekler mavi, beyaz ve siyah olarak işaretlenmiştir.

Çizelge 4.9: Farklı eşik değerleri (0,000-0,050) için öbeklenmiş yansıma simülasyonu, süzgeçlenmiş ve öbeklenmiş yansıma simülasyonu sonuçları (n=2 / R=4).

Eşik	Öbeklenmiş Yansıma Simülasyonu	Süzgeçlenmiş ve Öbeklenmiş Yansıma Simülasyonu
0,000		
0,005		
0,020		
0,050		

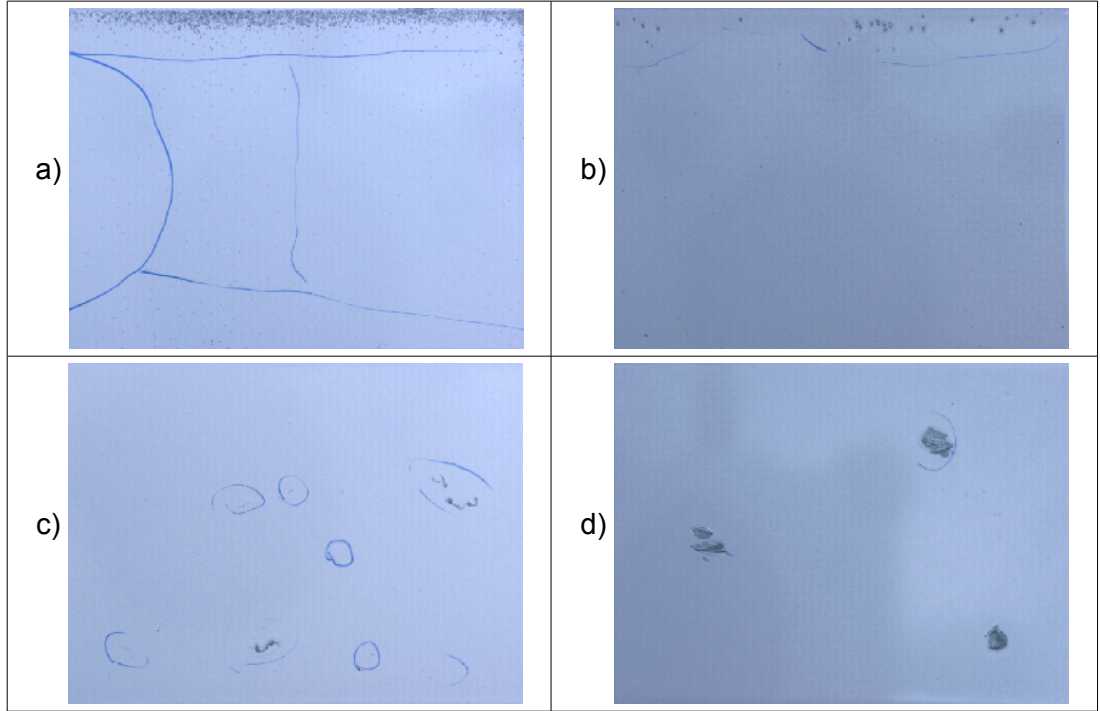
Çizelge 4.10: Farklı eşik değerleri (0,070-0,300) için öbeklenmiş yansıma simülasyonu, süzgeçlenmiş ve öbeklenmiş yansıma simülasyonu sonuçları (n=2 / R=4).

Eşik	Öbeklenmiş Yansıma Simülasyonu	Süzgeçlenmiş ve Öbeklenmiş Yansıma Simülasyonu
0,070		
0,100		
0,200		
0,300		

Sonuçlar incelendiğinde öbeleme işlemi ile düşük eşik değerlerinde de sistem performansının yüksek olduğu, yüzey üzerindeki hataların sezilebildiği görülmüştür. Buradan hareketle öbeleme işleminin, seviyelendirme işlemindeki eşik seçiminin önemini azalttığı söylenebilir. Bu durum farklı yüzeyler, farklı hata tipleri için farklı eşik değerleri arama problemi öbeleme ile çözmeyi sağlar.

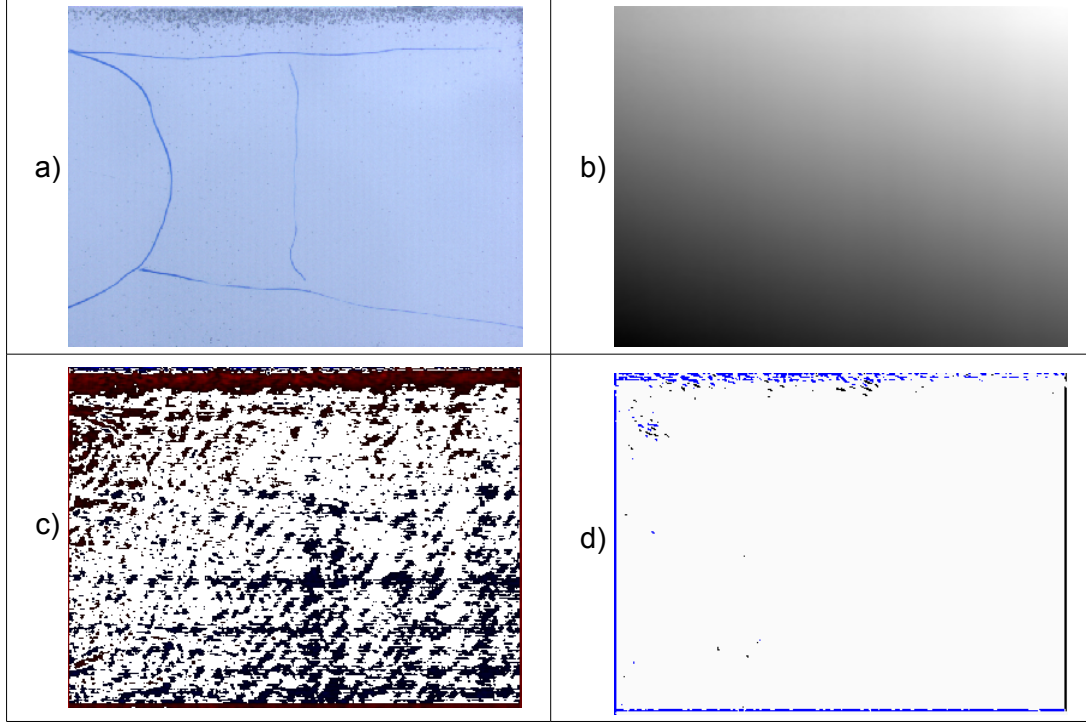
4.2.3. Farklı Hata Çeşitleri Üzerinde Yapılan Testler

Bu bölümde sistemin farklı boyutlardaki hataları bulma performansı incelenmiştir. Testlerde farklı hataları olan dört farklı yüzey parçası kullanılmıştır. İlk yüzey örneğinde, 2mm^2 genişliğinde, yüzey ile yükselti farkı 1mm 'den az olan nokta benzeri yükseltmeler yüzeyin üst kısmında sıralanmışlardır (bkz Şekil 4.9.a). Sıralanan bu noktalar yüzeyin üst kısmında bir şerit oluşturur. İkinci yüzey üzerinde genişlikleri 2mm^2 ile 3mm^2 arasında değişen, boya içerisinde kalmış hava damlacıklarını andıran hatalar bulunmaktadır (bkz Şekil 4.9.b). İkinci yüzeydeki hataların yüzeyin geri kalanı ile olan yükselti farkları yaklaşık 1mm 'dir. Üçüncü yüzey üzerinde yaklaşık 5mm uzunluğunda iplik parçası benzeri kalıntılar bulunmaktadır (bkz Şekil 4.9.c). Yüzeyin geri kalanı ile oluşturdukları yükselti farkı 1mm civarındadır. Son yüzey en büyüğü 30mm^2 genişliğinde olan, maksimum yüksekliği 1mm 'yi aşmayan üç adet yükselti içermektedir (bkz Şekil 4.9.d).



Şekil 4.9: Hatalı yüzeylerin CCD kamera ile çekilmiş fotoğrafları.

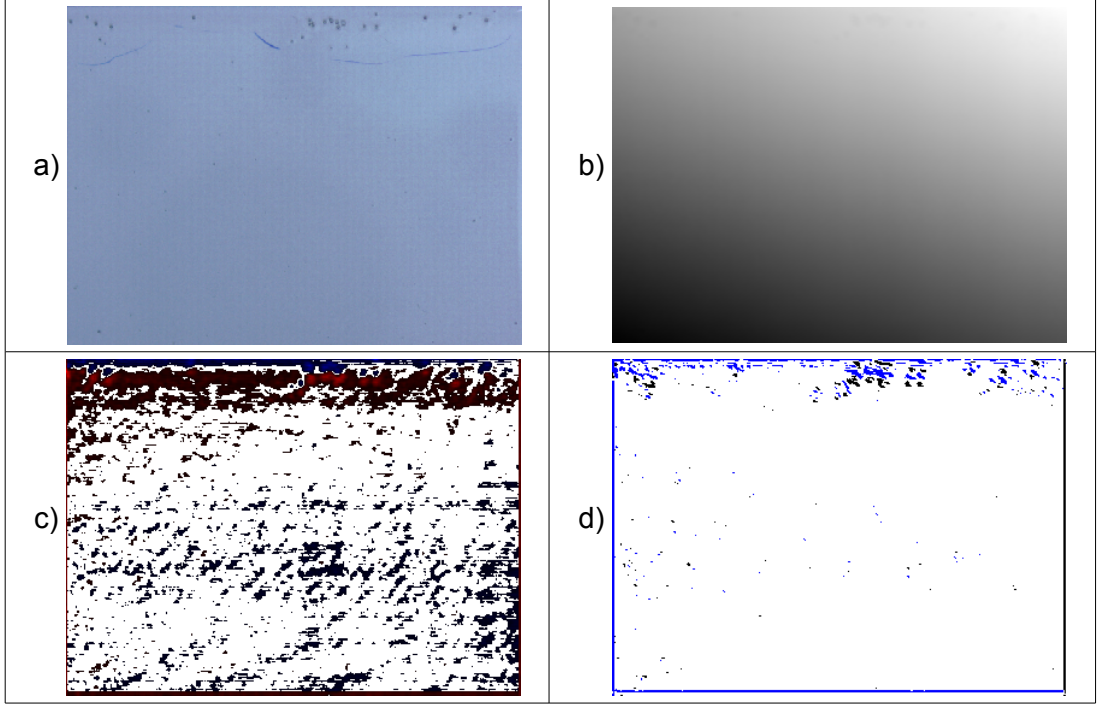
Yapılan testlerde sistem parametreleri sabit tutulmuş ve farklı yüzeylerdeki, farklı hatalar üzerinde sistem performansı incelenmiştir. Buna göre bir örnek süzgecin boyutu $n=2$, yüzey normali düzleştirme parametresi $R=4$, eşik seviyesi eşik=0,07 olarak seçilmiştir.



Şekil 4.10: Birinci yüzey için; a) CCD kamera resmi, b) $n=2$ olacak şekilde derinlik imgesi, c) $R=4$ ve eşik= $0,07$ için yansımaya simülasyonu sonuçları d) öbekleme sonuçları.

İlk yüzey üzerinde yapılan testte yansımaya simülasyonu sonuçlarında (Şekil 4.10.c) hataların belirginleştirilebildiği fakat beraberinde gürültünün de olduğu gözlemlenmiştir. Süzgeçleme ve öbekleme yapıldıktan sonra ortaya çıkan öbekleme sonuçlarında gürültü görülmemektedir (Şekil 4.10.d). Bununla birlikte öbekleme sonuçlarında hatanın da bir bölümünün süzüldüğü görülür. Boyutları küçük olan bu hata tipinde sistem başarımı düşüktür. Süzgeçleme aşamasında gürültüyle birlikte hataların da bir kısmı süzüldüğünden öbekleme sonuçlarında hatalar tam olarak sezilememiştir.

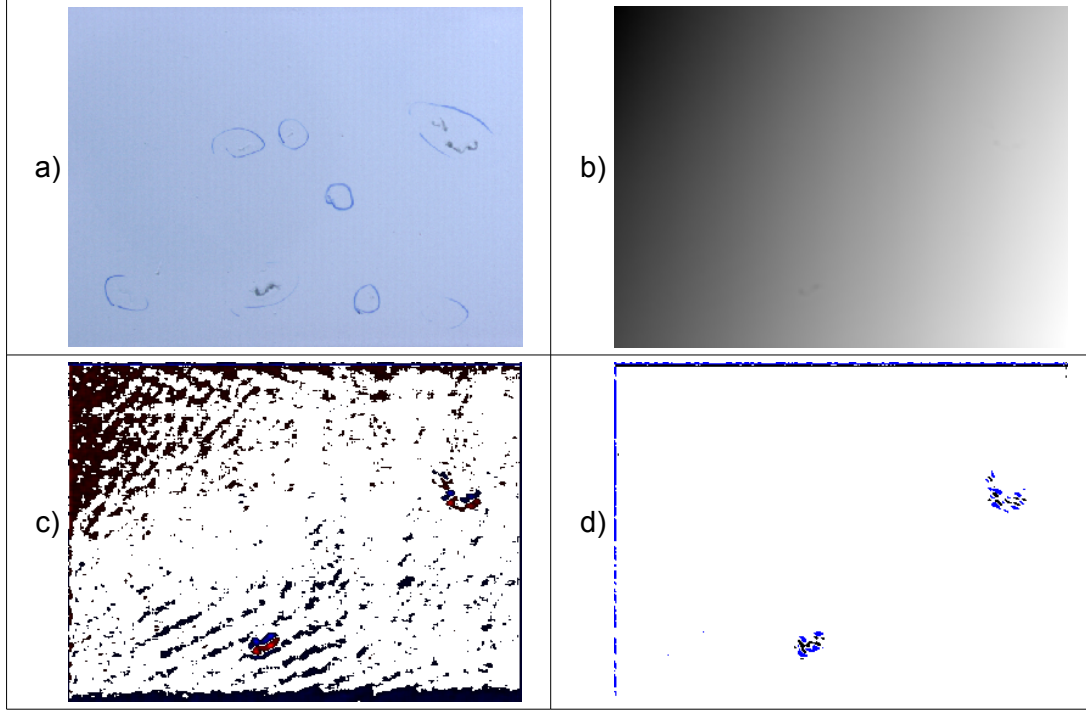
İkinci yüzeydeki hatalar birinciye oranla daha büyüktür ve ayrık konumlandırılmış, daha az sayıda hata bulunmaktadır (Şekil 4.11.a). Yansımaya simülasyonu sonuçları incelendiğinde (Şekil 4.11.c) hataların mavi ve kırmızı renklendiğinin görülür. Siyah renkte gözüken bölümler kırmızı veya mavi tonların parlaklıkları en az olanlar yani $f_{r,c}$ değerleri sıfıra en yakın olanlardır (bkz denklem 3.13). Süzgeçleme ve öbekleme işlemleri uygulandıktan sonra geri sadece hataların kaldığı görülmektedir. Şekil 4.11.d'ye bakıldığında siyah ve mavi noktaların hatalara denk geldiği, beyaz bölümlerin ise hatasız kısımları temsil ettiği görülür. Sistem performansı bir önceki duruma kıyasla daha iyidir fakat yine de hatasız noktalarda da siyah ve mavi noktalar bulunması öbekleme performansının 100% olmadığını gösterir. Hatalar tespit edilse de yanlış alarm oranı da yüksektir.



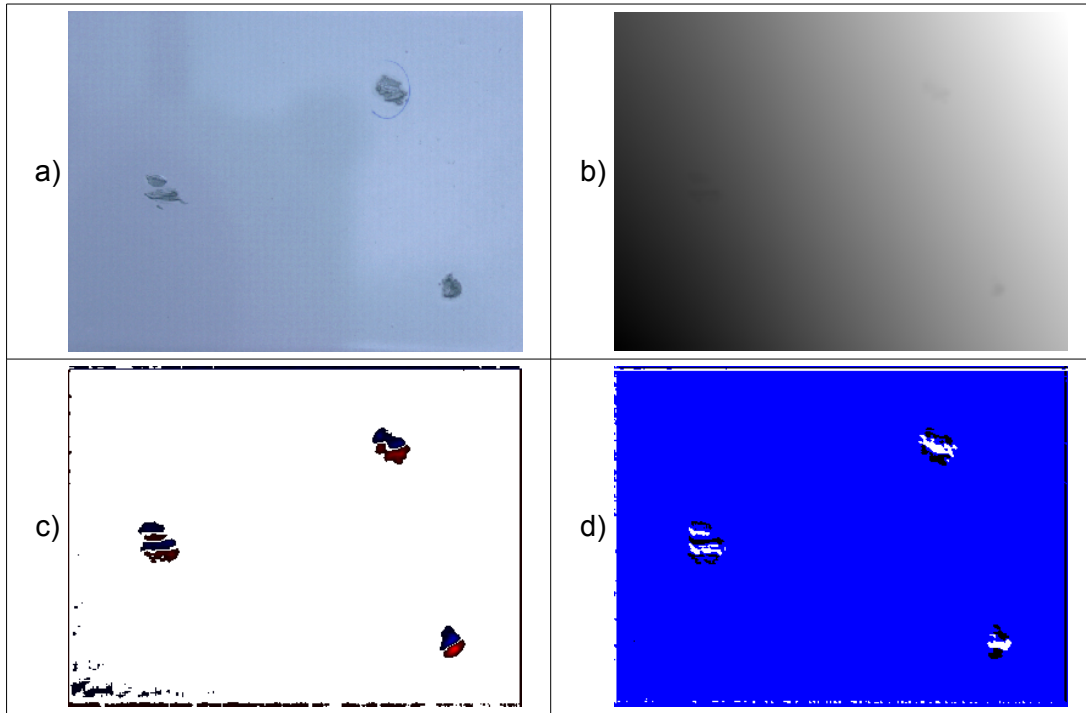
Şekil 4.11: İkinci yüzey için; a) CCD kamera resmi, b) $n=2$ olacak şekilde derinlik imgesi, c) $R=4$ ve eşik=0,07 için yansımaya simülasyonu sonuçları d) öbekleme sonuçları.

Üçüncü yüzey üzerinde yapılan testte yansımaya simülasyonu sonuçlarının ilk iki duruma göre daha iyiye gittiği görülür (Şekil 4.12.c). Bununla birlikte seçilen eşik değeri tüm yüzeyi hatalardan ayırmak için yeterli değildir, ilk iki hatalı yüzeyde de olduğu gibi resimde siyah noktalar bulunmaktadır. Öbekleme sonuçları incelendiğinde ise hataların eksiksiz sezilebildiği görülür. Bu test sonunda hatanın boyutu büyüdükçe öbekleme sonucundaki sezme performansının arttığı tespit edilmiştir.

Dördüncü ve yüzey hatalarının boyutlarının en büyük olduğu yüzey üzerinde yapılan testte yansımaya simülasyonu sonucunda bile hatalar tespit edilebilmiştir (Şekil 4.13.c). Öbekleme sonucunda da üç hatanın üçü de sezilebilmiştir. Sonuçta hataların boyutları büyüdükçe sezme başarımının hem yansımaya simülasyonu sonuçlarında hem de öbekleme sonuçlarında yüksek olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.12: Üçüncü yüzey için; a) CCD kamera resmi, b) $n=2$ olacak şekilde derinlik imgesi, c) $R=4$ ve eşik=0,07 için yansıma simülasyonu sonuçları d) öbikleme sonuçları.

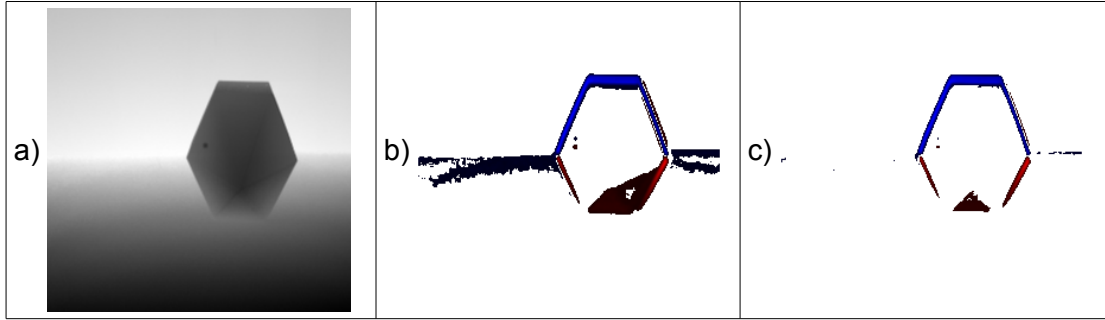


Şekil 4.13: Dördüncü yüzey için; a) CCD kamera resmi, b) $n=2$ olacak şekilde derinlik imgesi, c) $R=4$ ve eşik=0,07 için yansıma simülasyonu sonuçları d) öbikleme sonuçları.

4.3. Delaunay Üçgenleme ile Oluşturulan Alt Yüzeylerde Hata Sezme

Bu bölümde, birden fazla yüzeye sahip cisimlerin derinlik imgeleri üzerine üçgenleme uygulanarak cisimlerin alt yüzeyleri bulunmuştur. Hata sezme işlemleri,

her bir alt yüzeyde ayrı ayrı yapılarak sistemin performansını arttırmak amaçlanmıştır. Yapılan testlerde bölüm 4.1'deki imgelerden Şekil 4.3'te görülen, bir yüzeyinde 10 piksel büyüklüğünde sentetik hata oluşturulmuş nesneye ait derinlik imgesi kullanılmıştır. Sistem parametrelerinden, bir örnek süzgecin boyutu (n) ve yüzey normali düzgünleştirme parametresi (R) sabit tutulmuştur. Şekil 4.14'te testlerde kullanılan imgenin, alt yüzeylere bölünmeden elde edilmiş yansıma simülasyonu sonuçları bulunmaktadır. İmgeyi doğru şekilde alt yüzeylere bölerek sistem performansını arttırmak amaçlanmaktadır.

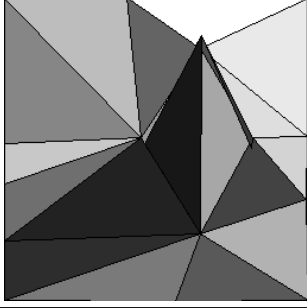
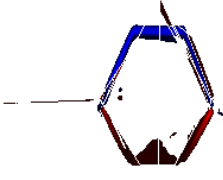
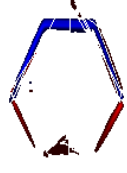
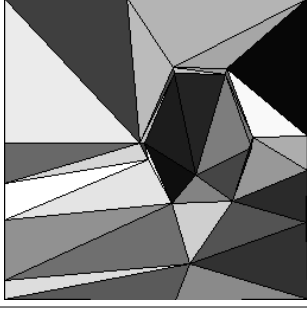
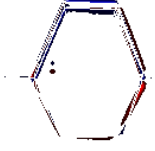
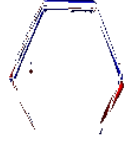
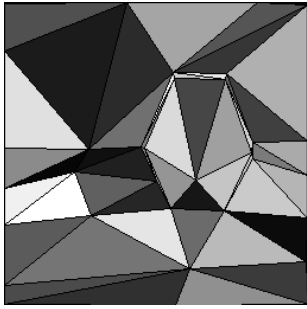
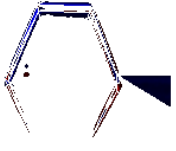
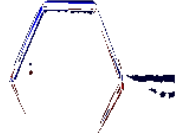
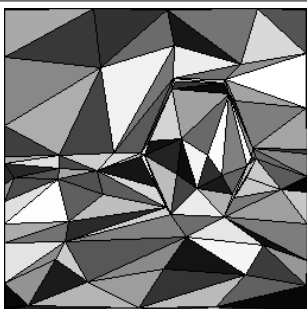
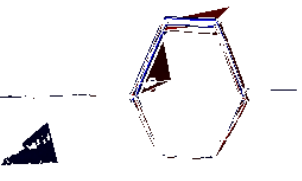
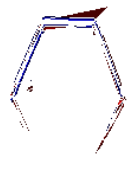
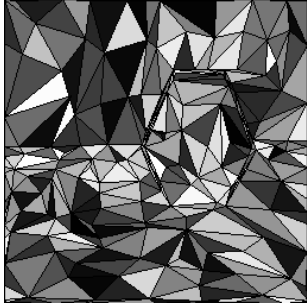

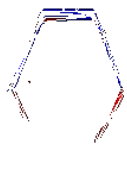


Şekil 4.14: Bir yüzeyinde 10 piksel büyüklüğünde sentetik hata olan cismin; a) derinlik imgesi, b) eşik=0,1 için yansıma simülasyonu sonuçları c) eşik=0,15 için yansıma simülasyonu sonuçları.

4.3.1. Üçgen Sayısının Hata Sezme Başarımına Etkisi

Yapılan testte, üçgenleme işlemi farklı kenar sayıları için yapılmış olup, kenar sayısı arttıkça elde edilen üçgen sayısı da artmakta, her bir üçgen yüzeyin kapladığı alan azalmaktadır. Üçgenleme sonucundaki her bir alt yüzeye ait tek bir yüzey normali, yüzey eğimliliği ve bu eğimliliğe bağlı olarak yansıma simülasyonunda kullanılacak ışık hesaplanır. Her bir nokta için içerisinde bulunduğu üçgen alt yüzey için hesaplanan ışık kullanılarak yansıma simülasyonu sonuçları oluşturulur. Çizelge 4.11'da Şekil 4.14-a'daki derinlik imgesinin farklı kenar sayıları için hesaplanmış üçgenleme ve 0,1, 0,15 eşik değerleri için yansıma simülasyonu sonuçları bulunmaktadır.

Çizelge 4.11: Farklı kenar sayıları için derinlik imgesi üzerine uygulanmış üçgenleme ve buna bağlı yansımaya simülasyonu sonuçları.

Knr. Say.	Üçgenleme	Yansımaya Simülasyonu eşik=0,1	Yansımaya Simülasyonu eşik=0,15
40			
60			
80			
200			
500			

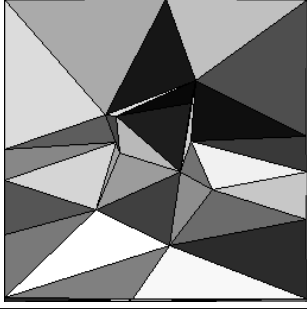
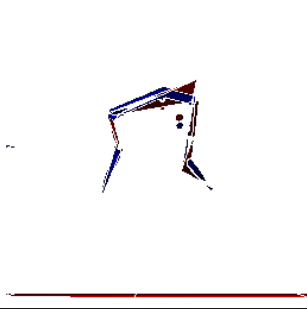
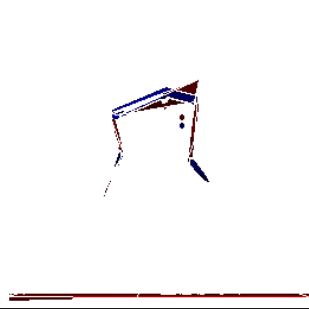
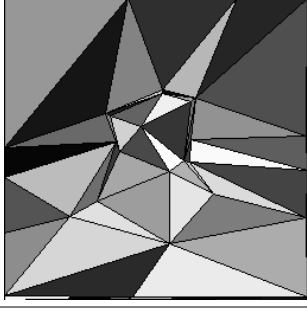

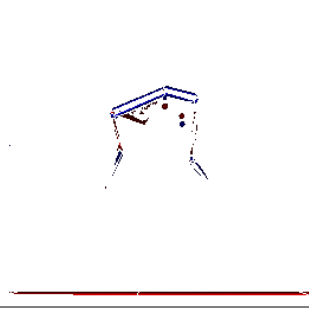
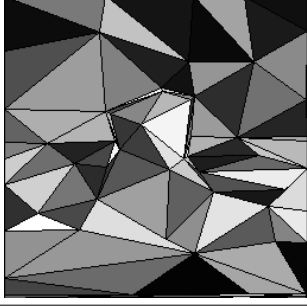
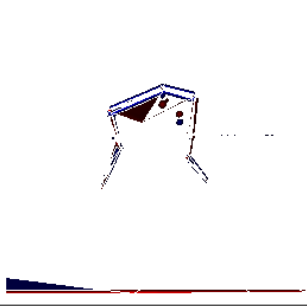
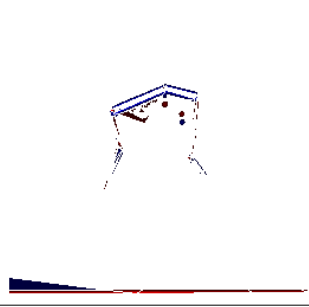
İmgeyi üçgen alt yüzeylere ayırırken, üçgen sayısı arttıkça sistemin performansının kötüleştiği gözlemlenmiştir. Üçgenleme işleminde üçgen sayısı arttıkça üçgenler daha küçük yüzey parçacıklarını modellemeye, yüzeyi daha ayrıntılı kaplamaya başlar. Böylelikle hataların bulunduğu yüzeyler de alt yüzeylere bölünür ve hatalı piksellerin yüzey normalleri ile yansıma simülasyonunda ışığın yönünü hesaplarken kullanılacak alt yüzeyin yüzey normali arasındaki fark azalır. Bu sebeple imgeyi alt yüzeylere ayırmada kullanılan üçgenlerin sayısı arttıkça sistem performansı da kötüleşmektedir. Hatasız imge elimizde olmadan hataları sezmeye çalıştığımızdan ortalama yüzey normalinden sapma miktarı azaldıkça hataları tespit etmemiz zorlaşması beklenen bir durumdur.

Düşük kenar sayılarıyla yapılan üçgenleme ile imgenin alt yüzeyleri bulunurken hatalar modellenmezler, bu sayede yansıma simülasyonu sırasında hatalı pikseller buldukları alt yüzey ile farklı yüzey normallerine sahip olurlar. Fakat kenar sayısı düşmeye devam ettikçe yüzeylerin de iyi modellenmediği Çizelge 4.11'da kenar sayısının 40 olduğu durumda görülmektedir. Bu durumda Çizelge 4.11'daki imge için üçgenlemede kullanılacak optimum kenar sayısının 60 olduğu söylenebilir. Çizelge 4.11'da da görüleceği gibi üçgenleme işlemi kenar sayısı 60 seçilerek yapıldığında, en iyi hata sezme sonuçları elde edilmiştir.

4.3.2. Farklı Cisimler Üzerinde Üçgenleme ile Hata Sezme Başarımı

Üçgenleme işleminin farklı cisimler üzerindeki hata sezme performansını test etmek amacıyla, Şekil 4.5'te görülen cisimler kullanılmıştır. Testlerde üçgenleme sırasında kullanılacak kenar sayısı 60, 80, 150 şeklinde değiştirilmiş, bu kenar sayılarında 0,1 ve 0,15 eşik değerleri için hata sezme performansları incelenmiştir. Testlerde bir önceki bölümde olduğu gibi üçgenleme ile alt yüzeyler bulunmakta, her bir alt yüzeyin normaline uygun ışık kullanılarak yansıma simülasyonu sonuçları hesaplanmaktadır. Bu doğrultuda Şekil 4.5'te görülen üç adet hatalı imge için bulunan yansıma simülasyonu sonuçları sırasıyla Çizelge 4.12'da, Çizelge 4.13'de ve Çizelge 4.14'de görülmektedir.

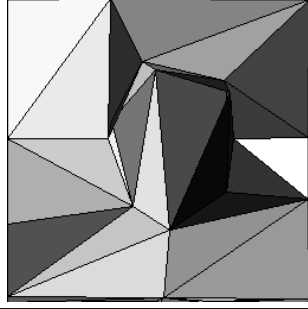
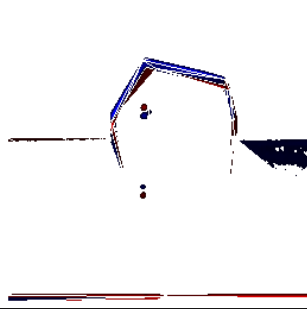
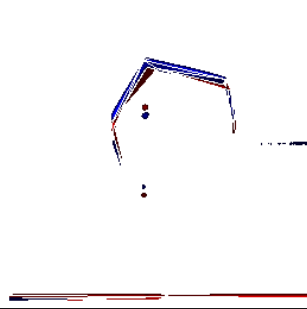
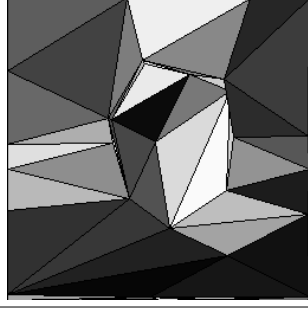
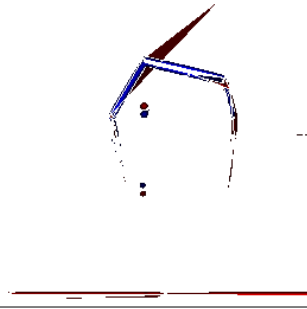
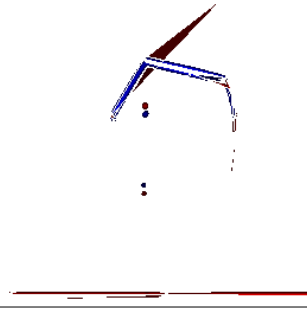
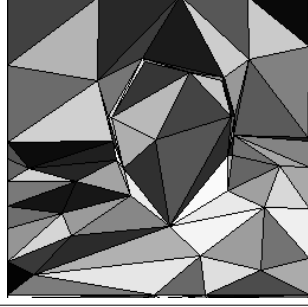
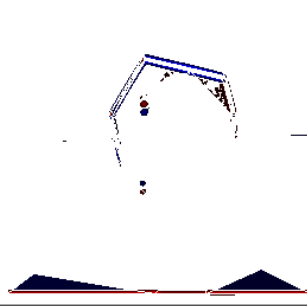
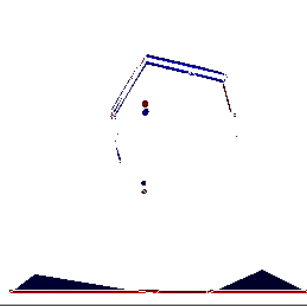
Çizelge 4.12: Farklı kenar sayıları için Şekil 4.5-a imgesi üzerine uygulanmış üçgenleme ve buna bağlı yansımaya simülasyonu sonuçları.

Knr. Say.	Üçgenleme	Yansımaya Simülasyonu eşik=0,1	Yansımaya Simülasyonu eşik=0,15
60			
80			
150			

Şekil 4.5-a imgesi ile yapılan testler incelendiğinde (bkz. Çizelge 4.12), indirgenmiş tel file alt yüzeyler hesaplanırken, indirgeme parametresi olan kenar sayısı 80 seçildiğinde sistem performansının arttığı gözlemlenmiştir. Kenar sayısı olarak 60 seçildiğinde, alt yüzeylerin birinde, kötü üçgen modellemesinden dolayı oluşan gürültü bu yüzeyde bulunan hatanın yansımaya simülasyonu sonuçlarında görüntülenememesine yol açmaktadır.

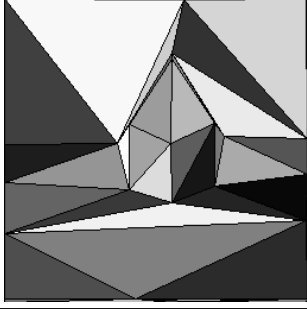
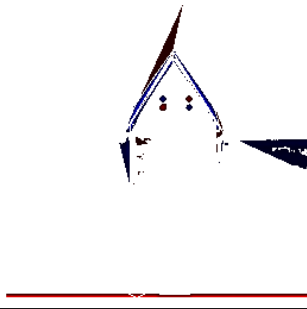
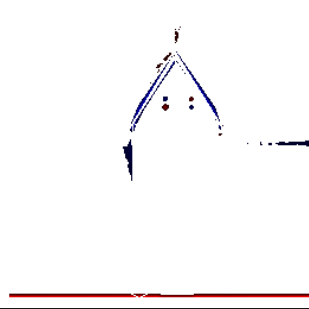
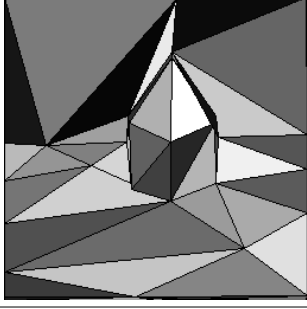
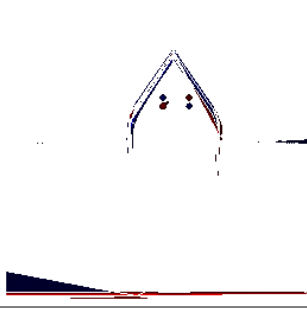
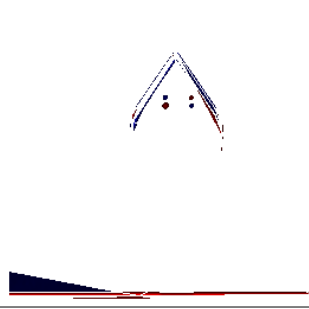
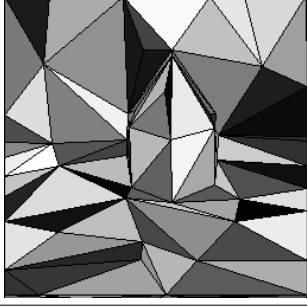
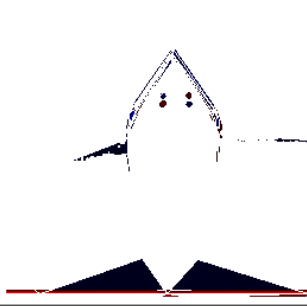
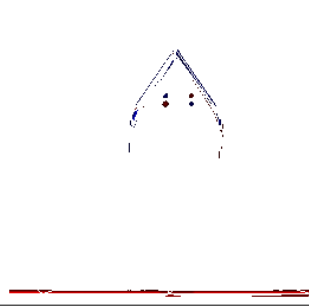
Şekil 4.5-b'deki imge üzerine uygulanmış üçgenleme ve buna bağlı yansımaya simülasyonu sonuçları incelendiğinde (bkz. Çizelge 4.13), hata sezimi ve üçgen tel file modelleri için kullanılabilir ideal kenar sayısının 80 olduğu görülmektedir. Çizelge 4.14'de de benzer bir sonuç olduğu göz önüne alındığında, kullanılan üç imge için hata sezme de kullanılabilir tek bir kenar sayısı bulunabildiği görülmüş olur.

Çizelge 4.13: Farklı kenar sayıları için Şekil 4.5-b imgesi üzerine uygulanmış üçgenleme ve buna bağlı yansıma simülasyonu sonuçları.

Knr. Say.	Üçgenleme	Yansıma Simülasyonu eşik=0,1	Yansıma Simülasyonu eşik=0,15
60			
80			
150			

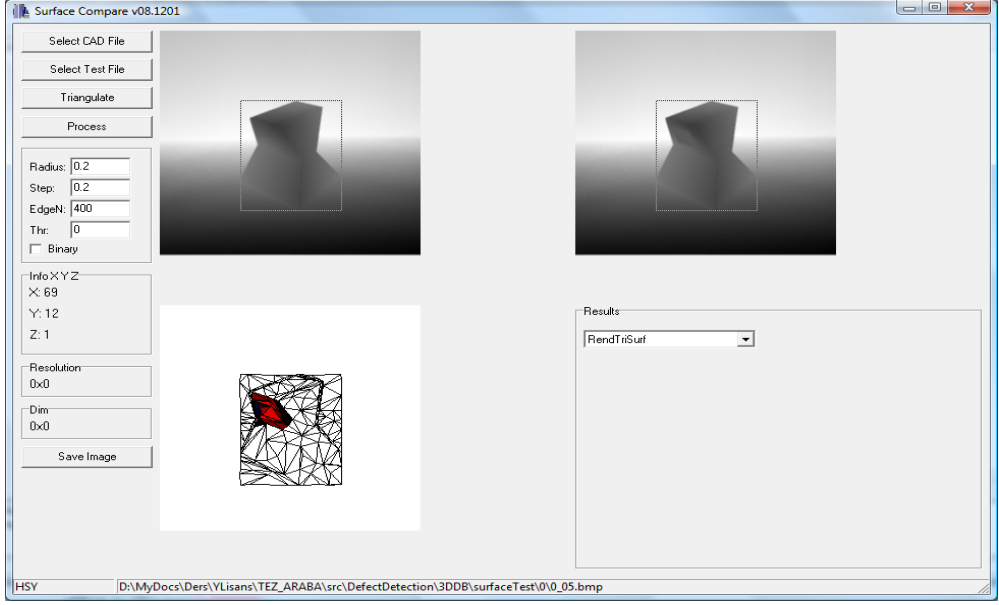
Bu bölümde yapılan testlerde farklı derinlik imgeleri üzerinde sistemin hata sezme performansı test edilmiştir. Sonuçta üç farklı imge üzerindeki yükselti ve çöktüntüler yansıma simülasyonu yöntemiyle görünür hale getirilmiş, farklı imgeler için sabit parametreler kullanılabildiği gösterilmiştir. Öte yandan Çizelge 4.11'a bakıldığında önceki bölümde kullanılan imge için ideal kenar sayısının 60 olduğu ama 80 kenar sayısı ile de sistemin hataları görselleştirebildiği görülmektedir. Bu durum kullanılması gereken kenar sayısının imgeden tamamen bağımsız olmadığını göstermektedir.

Çizelge 4.14: Farklı kenar sayıları için Şekil 4.5-c imgesi üzerine uygulanmış üçgenleme ve buna bağlı yansımaya simülasyonu sonuçları.

Knr. Say.	Üçgenleme	Yansımaya Simülasyonu eşik=0,1	Yansımaya Simülasyonu eşik=0,15
60			
80			
150			

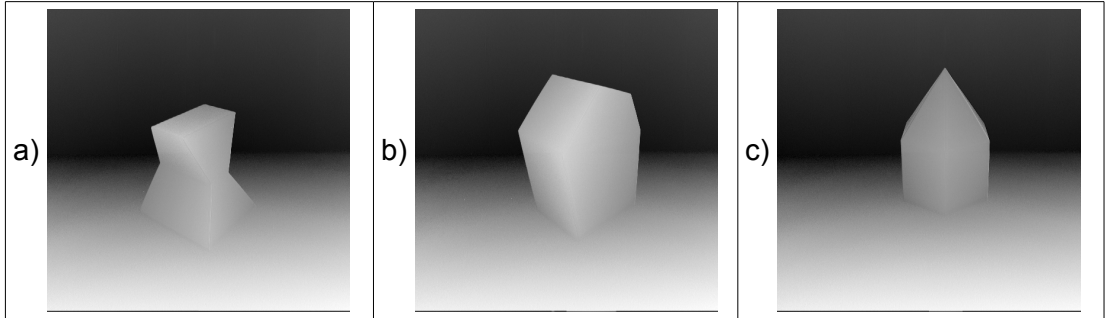
4.4. Yüzey Bozukluklarının Sezilmesi

CAD bilgisi kullanılarak üretilen ürünlerin yüzeylerindeki bozulmaları tespit etmek amacıyla tasarlanan sistem, C/C++ programlama dilleri kullanılarak bilgisayar ortamında gerçekleştirilmiştir. Yapılan testlerde bölüm 4.1'de kullanılan derinlik imgeleri üzerinde sentetik yüzey bozulmaları yaratılmıştır. Elimizde gerçek CAD bilgisi bulunmadığından bozulmalı ve bozulmasız imgeler üzerinde aynı koordinatlarda ilgi bölgesi belirlenerek işlemler bu ilgi bölgesi içerisinde yapılmaktadır (bkz Şekil 4.15).



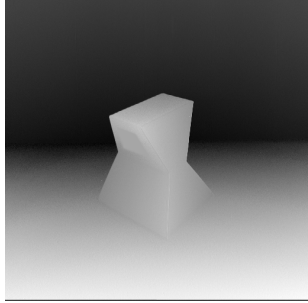
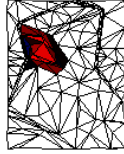
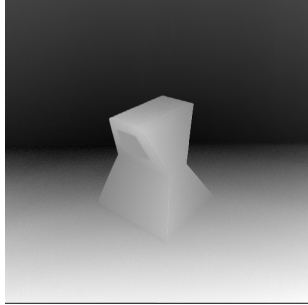
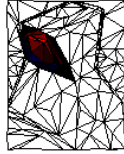
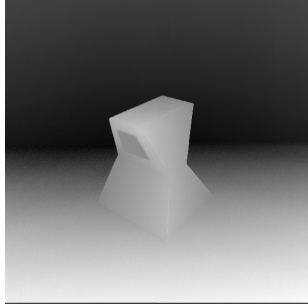
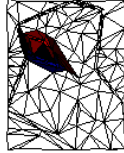
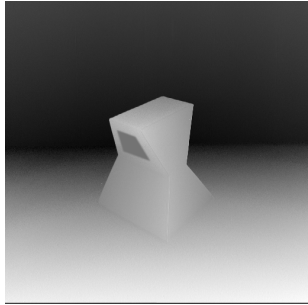
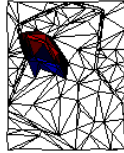
Şekil 4.15: Yüzeysel bozulmaları sezmek için gerçekleştirilmiş olan bilgisayar programının kullanıcı arayüzü

Testlerde üç farklı cisme ait derinlik imgeleri kullanılmış (bkz Şekil 4.16), imgelerin her biri üzerinde farklı biçimlerde sentetik bozulmalar oluşturulmuştur. Cisim üzerinde oluşturulan sentetik hatalar yüzeysel çöküntü ya da yükselti şeklinde olup, her bir imge için hatanın bulunduğu yüzeyle oluşturduğu derinlik farkı %25, %15, %10 ve %5 olacak şekilde 4 farklı test imgesi mevcuttur. Yapılan testlerde cisimler üzerindeki hatalı yüzeylerin tel file modelleri kullanılarak tespit edilmesi amaçlanmıştır.



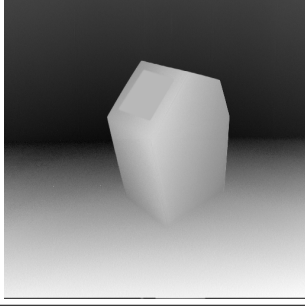
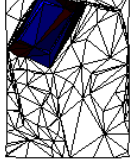
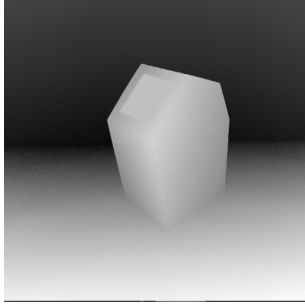
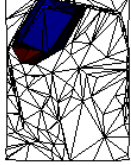
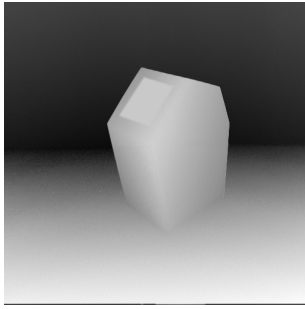
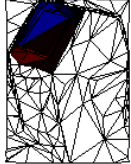
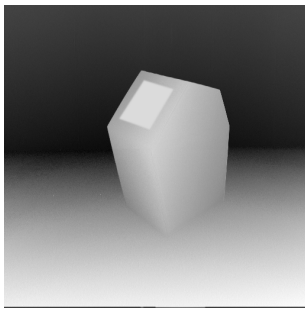
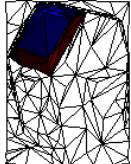
Şekil 4.16: Hatasız derinlik imgeleri

Çizelge 4.15: Farklı derinlik farkları için Şekil 4.16-a'da bulunan imgeden oluşturulmuş hatalı test imgeleri ve yansım simülasyonu sonuçları.

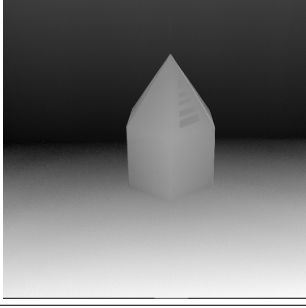

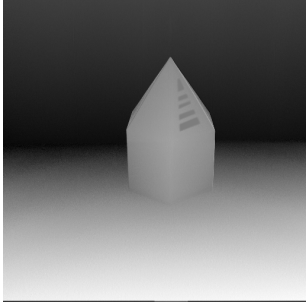

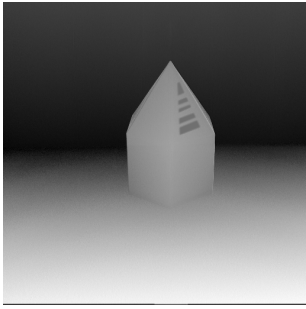
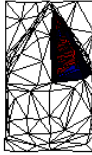
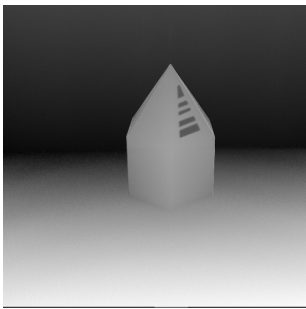

HATA DERİNLİK FARKI	HATALI DERİNLİK İMGESİ	YANSIMA SİMÜLASYONU
%5		
%10		
%15		
%25		

Hatalı imge seçilen ilgi bölgesi içerisinde üçgen tel file alt yüzeylere bölünmektedir. Yapılan testler incelendiğinde (bkz Çizelge 4.15, Çizelge 4.16 ve Çizelge 4.17), bozuk yüzeyin parçası olan alt yüzeylerin yansım simülasyonu sonuçlarında kırmızı ve mavi tonlarda olduğu görülmektedir. Bu sayede bozulma olan yüzeyler tespit edilmiştir. Testlerde %5'ten %25'e kadar olan hata derinlik farklarının hepsinde hatalı yüzey tespit edilebilmiştir, yanlış alarm rastlanmamıştır. Yansım simülasyonu işlemlerinde orijinal hatasız imgenin kullanılıyor olması performansı arttırmıştır.

Çizelge 4.16: Farklı derinlik farkları için Şekil 4.16-b'de bulunan imgeden oluşturulmuş hatalı test imgeleri ve yansıma simülasyonu sonuçları.

HATA DERİNLİK FARKI	HATALI DERİNLİK İMGESİ	YANSIMA SİMÜLYONU
%5		
%10		
%15		
%25		

Çizelge 4.17: Farklı derinlik farkları için Şekil 4.16-c'de bulunan imgeden oluşturulmuş hatalı test imgeleri ve yansımaya simülasyonu sonuçları.

HATA DERİNLİK FARKI	HATALI DERİNLİK İMGESİ	YANSIMA SİMÜLASYONU
%5		
%10		
%15		
%25		

5. SONUÇLAR VE İLERİYE YÖNELİK ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, yansıma simülasyonu yöntemi ile derinlik imgelerinden hata ve bozulmaları sezebilen iki sistem C/C++ programlama dilleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Birinci sistemde yüzeylerdeki noktasal boyutlardaki hataları sezmek, ikinci sistemde ise yüzeysel bozukları tespit etmek amaçlanmaktadır.

Birinci sistem noktasal boyutta hataları sezme kapasitesine sahip olup iki farklı şekilde çalışmaktadır. Birinci durumda kullanılan derinlik imgesi tek bir yüzey olarak ele alınır ve yüzeyi oluşturan her bir noktanın temsil ettiği yüzey parçasının, kendi yüzey normali yönünün, tüm yüzeyin ortalama yüzey normali yönünden sapma miktarına göre hatalı yüzey olup olmadığına karar verilir. İkinci durumda üçgenleme kullanılarak imge, tel file alt yüzeylere bölünür. Sonrasında noktasal yüzey parçalarına, içerisinde buldukları alt yüzeylerde birinci durumdaki işlemler uygulanır. Normalden sapmaları hesaplamak için, normale dik olan yüzey eğimlilikleriyle normallerin iç çarpımları kullanılarak yansıma simülasyonu sonuçları hesaplanır. Birinci durumda üçgen tel file alt yüzeyler oluşturulmadığından sistem daha hızlı çalışmaktadır. İşlemsel karmaşıklık ikinci duruma göre düşüktür. İkinci durumda tel file alt yüzey hesaplarından dolayı sistem yavaşlarsa da çok yüzeyli cisimler üzerinde daha yüksek performans göstermektedir. Gerçeklenen sistemde ilgi bölgesi (*Region of Interest*) seçimi yoktur. İki durumda da (alt yüzeylere bölerek ya da bölmeyerek) işlemler eldeki tüm imge üzerinde yapılır. Hata sezme işlemleri, orijinal hatasız derinlik imgeleri bilinmeden yapılmaktadır. Yapılan testlerde tarayıcıdan alınan derinlik verilerinin bir örnek süzgeç ile süzülmesinin, sistem performansını etkilediği görülmüştür. Kullanılan bir örnek süzgecin boyutu azaldıkça gürültü artmakta öte yandan süzgeç boyutu arttığında da hatalı noktalar süzülerek, gerekli bilgiler kaybedilmektedir.

Tasarlanan ikinci sistemde ise yüzeysel bozulmaları tespit etmek amacıyla test edilecek cismin yüzeyleri üçgenleme ile bölütlenerek üçgen yüzey parçaları bazında hata analizi yapılmaktadır. Test edilecek cisme ait yüzey sınırlarının bulunması ve sınırları bilinen yüzeylerin eğimliliklerinin hesaplanması için cismin CAD bilgisi kullanılmaktadır. Test edilecek olan yüzey üçgenleme ile yüzey parçalarına ayrılarak her bir üçgen yüzey parçasının yüzey normali hesaplanır. Bu yüzey parçasının

normalinin, orijinal yüzeyin normalinden sapma miktarı yansıma simülasyonu yöntemi ile ölçülerek yüzeyin hatalı olan parçaları belirlenir.

İleride, sistemin robot kollarına bağlı derinlik tarayıcılarla entegre çalışması sağlanarak, gerçek zamanlı yapılan yüzey taraması üzerinde hata analizi yapmak mümkündür. Bu sayede üretim bandı üzerinde çalışan bir sistem tasarlanarak hataların üretim esnasında otomatik olarak sezilmesi, dolayısıyla üretim kalitesinin artması sağlanabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Chung Y.C., and Chang M.**, 2006. Visualization of Subtle Defects of Car Body Outer Panels, *SICE-ICASE International Joint Conference*, Bexco, Busan, Korea, October 18-21.
- [2] **Park C.D., Chung W.J., Kim B.M.**, 2007. A numerical and experimental study of surface deflections in automobile exterior panels, *Journal of Materials Processing Technology* 187–188, 2007, pp. 99–102
- [3] **Karbacher S., Babst J., Hausler G. and Laboures X.**, 1999. Visualization and Detection of Small Defects on Car-Bodies, *Proceedings of 4th Conference on Vision, Modeling and Visualization*, Infix Verlag, Erlangen, Germany, November 1999, pp.1-8.
- [4] **Ashish V.K.**, 2004. An Investigation Of Image Processing Techniques For Paint Defect Detection Using A Machine Vision System, *Master Thesis*, University of Kentucky, Lexington, Kentucky.
- [5] **Muehlemann M.**, 2000. Standardizing Defect Detection for the Surface Inspection of Large Web Steel, *Illumination Technologies, Inc.*, NewYork
- [6] **Doring C., Eichhorn A., Wang X. and Kruse R.**, 2006. Improved Classification of Surface Defects for Quality Control of Car Body Panels, *IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, Sheraton Vancouver Wall Centre Hotel, Vancouver, July 16-21.
- [7] **Minolta Vivid 910**, 2002. Non-Contact 3D Digitizer Vivid 910/VI-910, Instruction Manual (Hardware)
- [8] **Fabio R.**, 2003. From Point Cloud To Surface: The Modeling And Visualization Problem, *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXIV-5/W10. International Workshop on Visualization and Animation of Reality-based 3D Models*, Tarasp-Vulpera, Switzerland, February 24-28.
- [9] **Amenta N., Bern M. and Kamvysselis M.**, 1998. A new Voronoi-based surface reconstruction algorithm, *Proceedings for Siggraph '98*, pp. 415-421
- [10] **Day T.K., Giesen J. and Hudson J.**, 2001. Delaunay Based Shape Reconstruction from Large Data, *Proceedings of the IEEE 2001 symposium on parallel and large-data visualization and graphics*, October 22-23, 2001, San Diego, California.
- [11] **Curless B. and Levoy M.**, 1996. A Volumetric Method for Building Complex Models from Range Images, *Proceedings for SIGGRAPH '96*, pp. 303-312.

- [12] **Karbacher S., Laboureux X., Schön N., and Häusler G.**, 2001. Processing Range Data for Reverse Engineering and Virtual Reality, *Proceedings of Third International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling 2001*, IEEE, Quebec, Canada, pp. 314-321.
- [13] **Duda R.O. and Hart P.E.**, 1973. Pattern Classification and Scene Analysis, New York: John Wiley & Sons
- [14] **Kanugo T., Mount D.M., Netanyahu N.S., Piatko C.D., Silverman R. and Wu A.Y.**, 2002. An Efficient k-Means Clustering Algorithm: Analysis and Implementation, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, VOL.24, NO.7, July 2002
- [15] **Shewchuk R.J.**, 2001. Delaunay Refinement Algorithms for Triangular Mesh Generation, Department of Electrical Engineering and Computer Science, University of California at Berkeley, Berkeley
- [16] **Vigneron A.**, 2004. Computational Geometry Lecture Notes, INRA, Département mathématiques et informatique appliquées, Domaine de Vilvert.
- [17] **Pless R.**, 2003. Computational Geometry Lecture Notes, Computer Science and Engineering, Washington University, St.Louis.
- [18] **Turk G. and Levoy M.**, 1994. Zippered Polygon Meshes from Range Images, *Proceedings for SIGGRAPH '94*, pp. 311-318.
- [19] **Hoover A.**, 1995. Perceptron Images: The Camera and Models, Image Analysis Research Laboratory, University of South Florida

ÖZGEÇMİŞ



Doğum Yeri ve Tarihi:

İstanbul / 03 Ağustos 1982

Eğitim Durumu:

İstanbul Teknik Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Müh. Lisans (2000-2004)
Tez Konusu: "Psikoakustik temelli ses işleme"

Beşiktaş Atatürk Anadolu Lisesi (1993-2000)

İş Deneyimi:

FOREKS Bilgi İletişim Hizmetleri - Yazılım Geliştirme Uzmanı (Mart 2008 – devam)

- Finansal Veri Yayının işlenmesiyle ilgili yazılım geliştirme (C++)

BEKO Elektronik A.Ş. - Yazılım Tasarım Müh. (Şubat 2005 – Mart 2008)

- Gömülü sistemler üzerinde yazılım geliştirme (C/C++)

İTÜ Çoğul Ortam Sinyal İşleme ve Örüntü Tanıma Lab.-Yazılım Tasarım Müh.
(Ekim 2003 – Şubat 2005)

- Sayısal Sinyal İşleme uygulamaları geliştirme (C/C++)

Yayın:

Yaslan S. ve Günsel B., 2005. "Sayısal Ses Sinyallerinden Duygu Algılama", *IEEE Sinyal İşleme Uygulamaları Kurultayı*, Kayseri