

Robot Kolu ve Lazer Profil Algılayıcı ile Otonom 3B Nesne Modelleme

Kaya Turgut

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak 2016

Autonomous 3-D Object Modeling with Robot Manipulator and Laser Profile Sensor

Kaya Turgut

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Electrical Electronics Engineering

January 2016

Robot Kolu ve Lazer Profil Algılayıcı ile Otonom 3B Nesne Modelleme

Kaya Turgut

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Kontrol ve Kumanda Sistemleri Bilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Helin Dutağacı

Bu Tez ESOGU BAP tarafından “2015-755” no’lu proje ve TÜBİTAK tarafından
“115E374” no’lu proje çerçevesinde desteklenmiştir.

Ocak 2016

ONAY

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Kaya Turgut'un YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "Robot Kolu ve Lazer Profil Algılayıcı ile Otonom 3B Nesne Modelleme" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

Danışman : Yrd. Doç. Dr. Helin Dutağacı

İkinci Danışman : -

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye : Yrd. Doç. Dr. Helin Dutağacı

Üye : Prof. Dr. Osman Parlaktuna

Üye : Yrd. Doç. Dr. Semih Ergin

Üye : Yrd. Doç. Dr. Metin Özkan

Üye : Yrd. Doç. Dr. Hatice ınar Akakın

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Hürriyet ERŐAHAN
Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Yrd. Doç. Dr. Helin Dutağacı danışmanlığında hazırlamış olduğum “Robot Kolu ve Lazer Profil Algılayıcı ile Otonom 3B Nesne Modelleme” başlıklı YÜKSEK LİSANS tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 18/01/2016

Kaya Turgut

İmza

ÖZET

Derinlik algılayıcı cihazların kolay temini ve artan hassasiyetinden dolayı, 3B fiziksel nesnelerin dijital ortama aktarımında hızlı bir artış gözlenmektedir. Nesnenin tamamlanmış, doğru ve hassas bir modelini elde etmek için tek bir görüş noktası yeterli olmamaktadır. Bu yüzden nesne etrafında birden fazla görüş noktası belirlemek gerekmektedir. Görüş noktalarını belirleme aşamasında model üzerinde insan faktöründen kaynaklanacak olan hataları azaltmak ve bu süreci hızlandırmak için otonom sayısallaştırma metotları üzerinde çalışılmaya başlanmıştır. Bundan dolayı modelleme aşaması bir sonraki en iyi görüş planlama (NBV) problemine dönüşmektedir.

Bu kapsamda oluşturulan tez çalışmasında, insan faktörünü en aza indirecek bir modelleme yöntemi geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Geliştirilen yöntemde, önceden planlanmış sürekli tarama yolundan elde edilen nokta bulutu kümeleri kullanılarak kısmen tamamlanmış 3B yüzey modeli elde edilir. Elde edilen model üzerinden tamamlanmamış bölgeler saptanır ve modeli tamamlamak için tekrar tarama yolları hesaplanır. Tekrar tarama ile iyileştirilmiş 3B yüzey modelinin elde edilmesi hedeflenmektedir. Oluşturulan sistem 6 eksenli endüstriyel robot kolu ve lazer profil sensörü ile test edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Robot kolu, lazer tarayıcı, 3B yüzey modelleme, görüş planlama, bir sonraki en iyi görüş (NBV).

SUMMARY

Digitization of 3D physical objects has grown immensely due to low cost and the increased precision of depth sensing devices. To obtain accurate and complete object model one viewpoint is not sufficient. Therefore it is necessary to identify more than one viewpoint around the object. While determining these viewpoints, the use of automatic digitization methods are proposed to minimize the impact of the human factor and speed up the process. Therefore, the modeling task is transformed into the problem of the determination of the next best view (NBV).

In this thesis, a 3-D modeling method is developed to minimize the human intervention. In the proposed method, a partially complete, initial 3-D surface model is generated using the point cloud obtained from pre-programmed continuous scan paths. Incomplete regions are detected on the initial model and rescan paths are determined to complete the model. It is intended to obtain a fine 3-D surface model with the rescans. The proposed system is implemented with a 6-axis industrial robot arm and laser profile a sensor.

Keywords: Robot manipulator, laser scanner, 3-D surface modeling, view planning, next best view (NBV)

TEŞEKKÜR

Tez konumun belirlenmesinde, araştırma aşamasında, karşılaştığım sorunlarda yönlendirmesinde ve tezimin tamamlanmasında destek olan tez danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Helin DUTAĞACI'na, tezimin her aşamasında yardımlarını esirgemeyen değerli hocalarım Yrd. Doç. Dr. Metin ÖZKAN'a ve Prof. Dr. Osman PARLAKTUNA'ya, 2013-77 ve 2015-755 numaralı projeler kapsamında gerekli malzeme ve cihaz desteği sağlayan Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) kuruluna, yüksek lisans süresince maddi destek/burs sağlayan TÜBİTAK 2210-A burs programına ve 115E374 numaralı proje kapsamında maddi destek sağlayan TÜBİTAK Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programına (1001) teşekkür ederim.

Ayrıca bu süreçte her türlü destekleriyle yanımda olan aileme ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	vi
SUMMARY.....	vii
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	4
2.1. Hacimsel Yöntem.....	4
2.2. Yüzeysel Yöntem	8
2.3. Küresel Yöntem	14
3. SİSTEM DONANIMI	17
3.1. Endüstriyel Robot Kolu	17
3.2. Lazer Profil Algılayıcı	19
3.3. İş istasyonu	21
4. SİSTEM YAZILIMI	22
4.1. Robot Sunucu Modülü.....	22
4.2. Veri Toplama Modülü	22
5. GÖRÜŞ PLANLAMA.....	24
5.1. 3B Modelleme.....	25
5.1.1. Veri edinimi	25
5.1.2. Kayıtlama	28
5.1.3. Yumuşatma	30
5.1.4. Filtreleme	31
<u>5.1.4.1. Aykırı değer filtresi.....</u>	<u>31</u>
<u>5.1.4.2. Gürültü filtresi</u>	<u>32</u>
<u>5.1.4.3. Voksel filtresi</u>	<u>33</u>
5.1.5. Yüzey oluşturma.....	34
5.2. Delik Algılama.....	35
5.3. Tekrar Tarama.....	36
5.3.2. Tarama yolu	37

İÇİNDEKİLER(devam)

	<u>Sayfa</u>
5.3.3. Tarama yol adayları.....	40
5.3.4. Işın izleme.....	42
5.3.5. Robot yönelimini belirleme.....	44
6. GÖRÜŞ PLANLAMA UYGULAMASI.....	46
6.1. Ön Modelleme.....	46
6.1.1. Nesne-1.....	47
6.1.2. Nesne-2.....	49
6.2. Delik algılama.....	50
6.2.1. Nesne-1.....	51
6.2.2. Nesne-2.....	52
6.3. Tekrar Tarama.....	53
6.3.1. Nesne-1.....	53
6.3.2. Nesne-2.....	56
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	59
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	60

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.1. Kawasaki RS005L 6 eksenli endüstriyel robot kolu	18
3.2. Lazer profil algılayıcı optik üçgenleme prensibi.....	19
3.3. Micro Epsilon scanControl 2900-100 lazer profil algılayıcı	20
3.4. İş istasyonu	21
5.1. Görüş planlama akış diagramı	24
5.2. Lazer profil sensör ölçüm prensibi.....	25
5.3. Belirlenmiş tarama yolları örnek görünümü	26
5.4. Çalışma tablası ve döner sistem.....	26
5.5. Çalışma tablası koordinat eksenini belirleme: a) döner tabla, b) oluşturulan tabla eksenini.....	27
5.6. Robot taban koordinat eksenini ve çalışma tablası koordinat eksenini arasındaki	27
5.7. Dönüşüm işlemi öncesinde (a) ve sonrasında (b) nokta bulut kümeleri.....	28
5.8. ICP algoritması kullanılmadan önce nokta bulutları: a) sağ, b) ön, c) sol görünümü	29
5.9. ICP algoritması	29
5.10. ICP algoritması uygulandıktan sonra nokta bulutların nokta bulutları: a) sağ, b) ön, c) sol görünümü.....	30
5.11. Yumuşatma algoritmasından sonra nokta bulutu: a) sağ, b) ön, c) sol görünümü	31
5.12. Aykırı değer içeren nokta bulutu (a) ve aykırı değer filtresi uygulandıktan sonra nokta bulutu: b) sağ, c) ön, d) sol görünümü	32
5.13. Gürültü nokta bulutu (a) ve gürültüsüz nokta bulutu (b).....	33
5.14. Voksel filtresi uygulanmadan önceki (a) ve uygulandıktan sonraki (b) nokta.....	33
5.15. Çokgen örgü yapısı; köşe noktaları sayı ile ve yüzeyler ise harf ile işaretlenmiştir.....	34
5.16. 3B yüzey modeli: a) sağ, b) ön, c) sol görünümü.....	35
5.17. Yarı-kenar veri yapısı	35
5.18. Delikleri tanımlayan nokta bulutu kümeleri	36
5.19. Delik karakteristiğini tanımlayan özvektörler.....	37
5.20. İz düşüm için tanımlanan düzlem.....	38
5.21. Deliğin izdüşümü alınmış şekli ve deliğin çapı	39
5.22. Delik için belirlenen tarama yolu	40
5.23. Nokta bulutu için bulunan sınırlayıcı kutu: a) kübik b) silindirik	41
5.24. Delikler için tarama yol adayları.....	41
5.25. Işın izleme metodu ile bulunan engelli ve engelsiz görüş yönleri.....	42

ŞEKİLLER DİZİNİ(devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.26. Işın izleme algoritması	43
5.27. Işın izleme algoritması çıktıları: a) görülen nokta sayısı, b) görüş yön vektörü	43
5.28. Yönelim koordinat eksenini	44
6.1. Uygulamalarda kullanılan nesne-1 ve nesne-2	46
6.2. Nesne-1, işlemden geçirilmemiş nokta bulutu kümesi	47
6.3. Nesne-1, işlemden geçirildikten sonra nokta bulut modeli	48
6.4. Nesne-1, 3B yüzey modeli: a) arka, b) ön, c) sağ, d) sol görünümü	48
6.5. Nesne-2, işlemden geçirilmemiş nokta bulutu kümesi	49
6.6. Nesne-2, işlemden geçirildikten sonra nokta bulut modeli	49
6.7. Nesne-2, 3B yüzey modeli: a) ön, b) arka, c) sağ, d) sol görünümü	50
6.8. Nesne-1'de model üzerindeki ilk dokuz delik (a-1)	51
6.9. Nesne-2'de model üzerindeki ilk dokuz delik (a-1)	52
6.10. Nesne-1, tarama yol adayları	53
6.11. Nesne-1, tekrar tarama ile elde edilen, iki farklı açıdan gösterilen nokta bulutu kümeleri (a ve b)	54
6.12. Nesne-1, tamamlanmamış 3B yüzey modeli (a, c, e, g) ve tekrar tarama ile iyileştirilmiş olan 3B yüzey modeli (b, d, f, h) ile karşılaştırılması	55
6.13. Nesne-2, tarama yol adayları	56
6.14. Nesne-2, tekrar tarama ile elde edilen, iki farklı açıdan gösterilen nokta bulutu kümeleri (a ve b)	56
6.15. Nesne-2, tamamlanmamış 3B yüzey modeli (a, c, e, g, i) ve tekrar tarama ile iyileştirilmiş olan 3B yüzey modeli (b, d, f, h, i) ile karşılaştırılması	58

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
3.1. Kawasaki RS005L 6 eksenli endüstriyel robot kolu genel özellikleri.....	18
3.2. Lazer profil algılayıcı genel özellikleri	20

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
${}^{taban}_{unp}D$	Robot uç konum koordinat sisteminin robot taban koordinat sistemine göre dönüşüm matrisi
${}^{taban}_{unp}R$	Robot uç konum koordinat sisteminin robot taban koordinat sistemine göre rotasyon matrisi
P_{unp}	Robot uç nokta konumu
X_{unp}	Robot uç nokta konumunun X bileşeni
Y_{unp}	Robot uç nokta konumunun Y bileşeni
Z_{unp}	Robot uç nokta konumunun Z bileşeni
O	İlk rotasyonu ifade eden Euler açısı
A	İkinci rotasyonu ifade eden Euler açısı
T	Üçüncü rotasyonu ifade eden Euler açısı
${}^{taban}_{tabla}D$	Tabla koordinat sisteminin robot taban koordinat sistemine göre dönüşüm matrisi
${}^{tabla}_{taban}D$	Robot taban koordinat sisteminin tabla koordinat sistemine göre dönüşüm matrisi
${}^{taban}_{tabla}R$	Tabla koordinat sisteminin robot taban koordinat sistemine göre rotasyon matrisi
${}^{tabla}_{taban}R$	Robot taban koordinat sisteminin tabla koordinat sistemine göre rotasyon matrisi
X_{tabla}	Tabla koordinat sisteminin X bileşeni
Y_{tabla}	Tabla koordinat sisteminin Y bileşeni
Z_{tabla}	Tabla koordinat sisteminin Z bileşeni
${}^{taban}P_{tablaorg}$	Tabla koordinat sistemi orijinin robot taban koordinat sistemine göre konumu
E	Delik için tanımlanan özvektör matrisi
C	Delik ağırlık merkezi vektörü
n	Düzlem normali
$p_{s\ 3x1}$	Delik için en uzun ayırıtı için başlangıç noktası
$p_{f\ 3x1}$	Delik için en uzun ayırıtı için bitiş noktası

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
d_{fov}	Lazer profil algılayıcı ölçüm uzaklığı
$pp_{s_{1x3}}$	$p_{s_{3x1}}$ 'nin özvektör yönünde ötelenmiş hali
$pp_{f_{1x3}}$	$p_{f_{3x1}}$ 'nin özvektör yönünde ötelenmiş hali
$pp_{s.of_{1x3}}$	Tarama yolu için başlangıç noktası
$pp_{f.of_{1x3}}$	Tarama yolu için bitiş noktası
p_{ray}	Yönelim koordinat sistemi orijin noktası
${}^{taban}_{yönelim}R$	Yönelim koordinat sisteminin robot taban koordinat sistemine göre rotasyon matrisi
X_{orient}	Yönelim koordinat sisteminin X bileşeni
Y_{orient}	Yönelim koordinat sisteminin Y bileşeni
Z_{orient}	Yönelim koordinat sisteminin Z bileşeni
<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
3B	Üç Boyutlu
3-D	Three Dimension
ICP	Iterative Closest Point
MLS	Mean Least Square
MVC	Mass Vector Chain
NBS	Next Best Scan
NBV	Next Best View
PCL	Point Cloud Library

1. GİRİŞ

Son yıllarda, hesaplama gücündeki artış ve derinlik algılayıcı cihazlardaki yenilikler sonucu, 3B fiziksel nesnelerin dijital ortama aktarımında hızlı bir artış gözlenmektedir. Nesnelerin 3B modelleri, kültürel değere sahip tarihi eserlerin görselleştirilip korunması, bilgisayar oyunları, tıbbi uygulamalar (vücut şeklinin ve duruşunun değerlendirilmesi), gösteri araçları, endüstriyel örnekleme (ters mühendislik, kalite kontrol ve kopyalama) gibi sayıları gün geçtikçe artan uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Bu tarz uygulamalar için yüksek kalite ve hassasiyette 3B modeller gereklidir. Model kullanıcı tarafından yapay olarak oluşturulduğunda, bu teknik bilgisayar destekli tasarım (CAD) olarak adlandırılır. 3B model ayrıca fiziksel nesnenin yüzeyinden derinlik bilgileri toplanarak da oluşturulur. Tek bir yüzey taraması ile nesnenin bütün geometrisini tanımlamak mümkün olmadığı için, nesnenin yüzeyinden birçok taramaya ihtiyaç duyulur. Yani, modelin tüm yüzeyini elde etmek için tarayıcı, nesne etrafında hareket ettirilmek zorundadır.

Günümüzde, bilinmeyen nesnelerin 3B modellemesi elle planlanmış taramalar ile elle yönlendirilen tarama sistemleri ya da otonom modelleme sistemleri ile oluşturulur. Taranacak fiziksel nesne basit bir şekle sahip ve az sayıda görüş noktasından modellenebiliyor ise, elle tarama daha etkilidir. Ancak, nesne karmaşık bir şekle sahipse ve tam modelini oluşturmak için çok fazla görüş noktasına ihtiyaç duyuluyorsa, bu işlemi zorlaştırır ve oluşturulan modelin yüzeyinde eksiklikler kalabilir. Tarama sayısı artırılırsa bu problemin üstesinden gelinebilir fakat bu yaklaşım, daha fazla zaman ve daha fazla iş yükü gerektirir. Nesnenin kendi engelli bölgelerinin olması ve derinlik algılayıcının görüş alanının kısıtlı olması nedeniyle algılayıcı farklı görüş noktalarına yerleştirilmek zorundadır. Bu farklı görüş noktaları belli edinim kısıtlarından dolayı dikkatlice seçilmelidir. Elde edilen sonuçların kalitesi nesnenin şeklinin karmaşıklığının yanında; büyük oranda seçilen görüş noktalarına (tarayıcı konum ve yönelimi), bu noktaları belirleyecek olan operatörün tecrübesine ve yeteneğine bağlıdır. Dahası, elle tarama, güvenilir, tekrarlanabilir ve hızlı programlama rutinlerini gerektiren endüstriyel uygulamaların yüksek seviye gereksinimlerini karşılamamaktadır. Bundan dolayı, yapılan

çalışmalar insan faktörü etkisini en aza indirecek etkili otonom modelleme sistemleri üzerinde yoğunlaşmıştır.

Otomatik tarama problemi, elde edilen modeli daha da iyileştirmek ve modelin yüzeyini tamamlamak için gerekli bir sonraki en iyi görüş noktasını (NBV) arayan görüş planlama problemine dönüşür. 1980'den günümüze kadar, NBV problemi birçok araştırmacı tarafından ele alınmıştır. Ancak hala açık bir problem olarak devam etmektedir. NBV yaklaşımı, 3B derinlik sensörleri için oluşturulan tek görüş noktaları ile ilgilidir. Ancak, daha yüksek ölçüm hassasiyetlerinden dolayı 3B modelleme işlemi için 2B lazer profil sensörleri de uygulanmaya başlanmıştır. Böyle sistemler için tek bir görüş noktası yeterli olmayıp sürekli bir tarama yoluna ihtiyaç duyulur. Bu yüzden Kriegel vd. (2015), birçok görüşü içeren değişken uzunluktaki tarama yolu için bir sonraki en iyi tarama (NBS) terimini tanıtmıştır. Elle taramanın aksine; endüstriyel robot kolu, döner tabla ve mobil robotlar gibi hareketli sistemler ile otomatik tarama, en yüksek hassasiyet ve en az görüş sayısı ile modeli tam olarak oluşturma süreci için tarayıcıyı en iyi görüş noktalarına konumlandırır. Otomatik tarama iki aşamada incelenebilir: i-) derinlik algılayıcı-nesne için görüş noktalarının belirlenmesi ve ii-) derinlik algılayıcıyı bir önceki görüş noktasından hesaplanan görüş noktasına götüreceği yörünge planlamasının oluşturulması.

NBV problemi için 3 yaklaşım tanımlanabilir: basit görüş nokta uzayı kullanmak (silindirik ya da küresel), CAD modeline göre hesaplanan görüş noktaları kullanmak (daha çok teknik parçalar için) ve nesneden alınan bölgesel derinlik bilgileri dikkate alınarak çevrim içi oluşturulan görüş noktalarını kullanmak. CAD modelleri olmayan kültürel miraslar gibi ya da ters mühendislik ürünleri gibi eşsiz nesnelere CAD tabanlı yaklaşım kullanılamaz. Basit görüş nokta uzayı yöntemi kullanılarak yapılan görüş nokta planlaması, daha önceden tanımlanmış yolu kullanarak veri elde eder. Daha önceki elde edilen verileri dikkate almaz. Yani, bu yöntem fiziksel nesnenin yüzey özelliklerini kullanmadığından model kalitesi ve modelleme süresi için uygun değildir. Bu planlama yöntemi konveks yapıları nesnelere tamamlanmamış modellerle sonuçlanır.

Sunduğumuz yöntemde, 6 eksenli robot kolu ve 2B lazer profil algılayıcı kullanılarak bilinmeyen 3B nesnenin modellenmesi için otomatik bir yöntem geliştirilmiştir. Sunulan yöntem iki kısımdan oluşmaktadır: ön modelleme ve iyileştirilmiş

modelleme. İlk olarak silindirik görüş nokta uzayı ile daha önceden belirlenmiş konumlardan doğrusal tarama yapılarak elde edilen nokta bulutu verilerinden bir ön model çıkartılır. Ön modelin yüzey bilgilerinden model üzerinde tamamlanmamış bölgeler bulunarak, tamamlanmış model elde etmek için belirlenen bu bölgelerin otomatik taranması ile model iyileştirilmiş olmaktadır. Modelleneyecek nesnenin konumunun ve yaklaşık olarak boyutunun bilindiği varsayılmaktadır. Ön model çıkarılırken, tarama uzayı silindirik olarak kısıtlanmıştır. Ancak ikinci kısımda daha hassas ve doğru bir model elde etmek için görüş nokta uzayına bir kısıt konulmamıştır.

Geliştirilen bu yöntemin amacı, aşırı hesaplama yükünü azaltarak hızlı ve doğru modelleme işlemini gerçekleştirmektir. Model oluşturmak için gerekli olan tarama sayısı, nokta bulutları arasındaki çakışma miktarı ve algılayıcının kısıtları dikkate alınarak belirlenen görüş noktası, modelleme süresini ve kalitesini direkt olarak etkilemektedir. Ön modelleme aşamasında önceden planlanmış, modeli kısmen oluşturacak, minimum sayıda tarama yolu kullanılarak hızlı bir şekilde ön model elde edilir. İyileştirilmiş modelleme aşamasında, elde edilen yüzey bilgisi kullanılarak tamamlanmamış bölgeler için kısıtlar dikkate alınarak görüş noktaları belirlenir ve model tamamlanmaya çalışılır. Bu iki aşama ile insan etkileşimini en aza indirilerek, hızlı ve doğru modelleme süreci gerçekleşmiş olacaktır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Sensör görüş planlama, literatürde genellikle bir sonraki en iyi görüş planlama (NBV) olarak adlandırılır. 1980'den günümüze kadar bu konu birçok araştırmacı tarafından üzerinde çalışılmasına rağmen hala açık bir problem olarak nitelendirilmektedir. Tarabani vd. (1995) ve Scott vd. (2003) görüş planlama problemleri üzerine genel bir araştırma çalışması sunmuşlardır. Scott vd. (2003) birçok farklı NBV algoritmasını incelemiş ve iki ana kategoriye ayırmıştır: model tabanlı ve model tabanlı olmayan. Model tabanlı yaklaşımda nesnenin CAD veya kaba modeli önceden bilinmelidir ve görüşler çevrim dışı belirlenir. Ancak model tabanlı olmayan yaklaşımda nesnenin şekli ile ilgili bir ön bilgi ya da bir model yoktur. Yapılan çalışmalar bilinmeyen veya CAD modeli bulunmayan nesnelere üzerinden yoğunlaştığından birçok NBV algoritması model tabanlı olmayan yaklaşım üzerine kurulmuştur. Tez çalışmasında bilinmeyen nesnelere 3B modellenmesi esas olduğundan model tabanlı olmayan yaklaşım üzerinde durulmuştur. Scott vd. (2003) model tabanlı olmayan yaklaşımı üç temel alt kategoride sınıflandırmıştır: Hacimsel yöntem, yüzeysel yöntem ve küresel yöntem.

2.1. Hacimsel Yöntem

Bu yaklaşım çalışma uzay durumu analizini yapar, örneğin boş ve dolu alanları tanımlamak için voksel yapısını kullanır.

Connolly (1985), en iyi görüş noktasını belirlemek için kısmi sekizli ağaç (octree) modelini kullanan iki farklı algoritma sunmuştur. NBV belirlenmesi dört farklı düğüm içeren bu yapının güncellenmesini gerektirir: Çocuklara sahip aile düğümü ve boş, dolu ve görülmeyen olarak etiketlenen yaprak düğümü. İlk algoritma olan Planetarium algoritması ile nesne etrafında bir görüş küresi oluşturulur. Görüş noktaları küre üzerinde enlem ve boylam boyunca aynı oranda örneklenmişlerdir. Küre üzerinde en çok görülmeyen alanı gören örneklenmiş nokta NBV olarak seçilir. Ayrıca bu algoritma görülen voksellerin sebep olduğu engelli bölgeleri belirler. Bu algoritma işlem yükü olarak ekonomik olmamasına rağmen tarama sayısı açısından ekonomiktir. İkinci algoritma ise Normal algoritmasıdır. Bu algoritma boş komşuluğa sahip görülen voksellerin normallerini sayarak

uygulanır ve bir görüş vektörü verir. Bu algoritma ilkinde göre çok daha hızlı olmasına rağmen, engelli alanları dikkate almaz.

Abidi (1995)'nin önerdiği çevrim dışı yöntemde, bilgi kuramındaki dağıntı kavramı (Information Theory concept of entropy) bilinmeyen nesnenin hacimsel modelleme probleminde uyarlanmıştır. Bu fonksiyon ile sensör konumlandırma ve veri edinim süreçlerinin her aşamasında elde edilen bilgi miktarı değerlendirilir. Bir sonraki görüş noktası, bu fonksiyonun yerel maksimum noktasıdır; yani en geniş bilgi içeriğiyle kenar parçasını verir. Nesnenin şeklinde, yöneliminde ya da konumunda herhangi bir kısıt bulunmamakla birlikte sisteme bu karakteristikler ile ilgili bir bilgi de verilmemektedir. Bu sistem operatör etkisi olmadan ve nesne hakkında ön bir bilgi olmadan otonom olarak çalışır.

Banta vd. (1995), NBV belirlemek için voksellerin görülen ya da görülmeyen olarak etiketlendiği doluluk ızgara (occupancy grid) yapısını kullanmıştır. Doluluk ızgara yapısının avantajlarını optimize ettiği için NBV belirlerken geometrik yaklaşım geliştirilmiştir. Sıçrayış (jump) sınırlarının konumuna odaklanan geometrik yaklaşımda, yüzey farklılıkları kenar noktalarda yerel maksimuma ulaştığı için derinlik verisi uygun filtrelerden geçirilerek kenar bilgisi elde edilir. Bu kenarların daha belirgin noktalarının normalleri tanımlanarak aday görüş yönleri bulunur. Görüş pozisyonları ise doluluk ızgarası ile eş merkezli tanımlanan küresel görüş uzayı üzerinden bulunur. Bulunan her aday yön için saklı bilgi miktarı belirlenir. En çok saklı bilgiye sahip konum ve yönelim NBV olarak seçilir.

Massions ve Fisher (1998), önceki çalışmalarda kullanılan görülebilirlik ölçütüne ek olarak her görüş noktası için bir de kalite ölçütü getirmişlerdir. Vokseller boş, görülen, görülemeyen ve engelli düzlem olarak etiketlenir. Görülen olarak etiketlenen vokseller için farklı sayısal değerler atanır. Bu atanan değerler, voksellerin normal vektörü ve görüş yön vektörünün iç çarpımı ile bulunur. Voksel haritası çıkarıldıktan sonra sensör ve nesne kısıtları dikkate alınarak oluşturulmuş kesikli (mozaik şeklinde oluşturulmuş) küre üzerine izdüşümü alınır. Görülebilirlik ölçütü, her yeni görüş noktasından görülebilen engelli düzlem voksellerin miktarını maksimize ederken kalite ölçütü, her yeni görüş noktasından görülebilen düşük kalite voksellerin miktarını maksimize eder. Küre üzerinde bulunan her

görüş noktası için görülebilirlik ve kalite ölçütlerinin ağırlıklı ortalamaları alınarak bir fonksiyon bulunur ve en yüksek değere sahip çıktısı bir sonraki en iyi görüş noktası (NBV) olarak seçilir. Sonlandırma ise şu şekilde gerçekleştirilir: Daha önce belirlenmiş ve veri alınmış görüş nokta konumu tekrar NBV olarak belirlenirse algoritma durdurulur.

Wong vd. (1999) bilinen ve bilinmeyen olarak sınıflandırılan vokseller içeren doluluk ızgarası yaklaşımını kullanan bir algoritma önermişlerdir. Bu algoritma 3 kısımdan oluşur: İlk verinin alındığı derinlik tarayıcı aşaması, hacimsel modeldeki bilinmeyen bilgiyi inceleyen ve bir sonraki en iyi görüş noktası belirlemek için amaç fonksiyonunu kullanan NBV karar verici aşaması ve son olarak hacimsel modelin oluşturulduğu ve güncellendiği model oluşturma aşaması. NBV algoritması potansiyel görüş noktalarını hesaplar ve en fazla sayıda bilinmeyen vokseli gören aday NBV olarak seçilir. Nesnenin yaklaşık olarak boyutunun ve merkezinin bilindiği varsayıldığından dolayı NBV aday sayısını kısıtlamak için küre görüş uzayı kullanılmıştır. NBV adaylarını belirlerken 3 farklı metot önermişlerdir: Optimum metot, yüzey normallerine dayanan metot ve uyarlamalı metot. Optimum metot potansiyel görüş noktalarını homojen olarak küre etrafında yerleştirir. Yüzey normallerine dayanan metot ise görülebilen bilinmeyen her voksel küpünün 8 köşesine ait yüzey normallerinin toplamına göre NBV adaylarını belirler. Optimum metot ile amaç fonksiyonunun hesaplamak çok zaman gerektirir iken yüzey normallerine dayanan metot ile engelli alan içeren nesnelere model tamamlanamaz. Bu yüzden iki metot birleştirilerek uyarlamalı metot oluşturulmuştur.

Banta vd. (2000)'de yayınladıkları çalışmada bir önceki çalışmalarını (1995) temel alarak 3 aşamalı yaklaşım içeren yeni bir modelleme tekniği sunmuşlardır. Nesnenin boyutunun yaklaşık olarak bilindiği varsayılarak, NBV konumu, hesaplamaları basitleştirmek ve muhtemel sensör konumlarını kısıtlamak için küresel görüş uzayı kullanılarak bulunmuştur. Her algoritma sadece tek bir NBV bulur. İlk algoritma kenar tabanlı sensör yerleşimi olarak adlandırılır. Bu algoritma ile yüzey bilgisinin saklı olduğu engelli bölgeler aranarak kaba model çıkartılır. Kenar haritasının birinci türevinde yüksek yoğunlukların fazla miktarda bilinmeyen bilgiyi sakladığı varsayımı ile NBV, kenar haritasının en parlak yoğunluğa sahip olduğu yönelim olarak belirlenir. İkinci algoritma ise merkezci modelleme olarak adlandırılabilir ve oluşturulmuş voksel verisini inceleyerek NBV belirlemek için daha iyi bir yaklaşım içerir. NBV engelli bölgenin merkezine yakın

voksel yüzeyine doğru yönlendirilir. Bu yaklaşım ilk veri alım aşamalarında iyi çalışır; fakat sonraki veri alım sürecinde engelli bölgeler farklı alanlarda yer aldığından merkezci yaklaşım tarayıcıyı anlamsız konumlara yönlendirebilir. Bu yüzden üçüncü metot olan minimum-maksimum uzaklık tabanlı kümeleme yaklaşımı önerilmiştir. Kümeleme algoritması ile bulunan en geniş kümenin ortalamasına yakın olan voksele doğru NBV yönelimi bulunur. Yeni tarama ile yüzey sayısında az bir değişim oluyorsa ve oluşturulan yüzey engelli yüzeyden fazla ise modelleme sonlandırılır.

Callieri vd. (2004) RoboScan olarak adlandırdıkları 6 eksenli robot kolu, 3B lazer tarayıcı ve döner tabladan oluşan ticari uygulamalar için bir otomatik modelleme sistemi kurmuşlardır. İlk olarak, operatör, nesnenin boyutuna ve konumuna göre belirlediği düzlemsel ya da silindirik sınırlayıcı kutu üzerinde görüş nokta sayısını ve yoğunluğunu belirler. Bu noktalardan alınan derinlik bilgileri kayıtlanıp birleştirilerek kaba model elde edilir. Sonra bu model üzerinde örneklenmeyen bölgeler bulunarak otomatik tarama yapılır. Her piksel için renk ataması yapılmıştır ve arka yüze ait renk değerine sahip pikseller delik olarak algılanmıştır. Nesne etrafından oluşturulan küresel yüzeyde konumlanan görüş nokta adaylarının arka yüzey piksel yüzdeleri hesaplanır ve görüş noktaları bu değerlere göre sıralanırlar. Model üzerinde kabul edilebilir bir değişiklik olmayana kadar bu algoritma çalıştırılır. Tarama işlemi sonlandıktan sonra elde edilen örgü (mesh) üzerinde kalan delikler modelin yüzeyine göre otomatik olarak tamamlanırlar.

Munkelt vd. (2006)'da yayınladıkları çalışmada, Massions ve Fisher (1998)'in sunduğu algoritmayı genişletmişlerdir. Bu çalışmada nesneye ait belirli görüş noktalarından taranarak elde edilen kaba model ya da CAD modelin olduğu düşünülerek voksel NBV algoritması genişletilmiştir. Daha iyi görüş noktaları için önceki algoritmaya dâhil edilen kaba modelden dolayı kalite ve görülebilirlik kısıtlarının oluşturduğu ağırlık fonksiyonuna ek olarak bir de belli bir kalite ölçüt eşiği dikkate alınarak görülebilir voksel miktarını maksimize eden bir fonksiyon tanıtılmıştır. NBV algoritmasının hesaplama yükünü azaltmak için muhtemel sensör konumu, nesnenin merkezde kabul edildiği dairesel bir yol üzerinden seçilir. Durdurma ölçütü, NBV yönünde taramadan elde edilen yeni bilginin düşük miktarda olmasıdır.

Vasquez-Gomez vd. (2009) aday görüş noktalarını hesaplayan ve sonra en iyi görüş noktasını bulmak için her adayı değerlendiren arama tabanlı bir yenilikçi yöntem önermiştir. Her adımda elde edilen kısmi nesne modeli voksel haritası kullanılarak depolanır ve görüntü oluşturulur. 5 farklı voksel tipi kullanılmıştır: İşaretlenmemiş, dolu, boş, engelli ve sınır engelli. Ayrıca her voksel 3 özellekle temsil edilen uzay hakkındaki bilgiyi depolar: Voksel tipini işaret eden etiket, yüzey normal ve kalite değeri. Oluşturulan voksel haritasına ve küre görüş uzayına göre sensörün konumu belirlenir. Görüş adaylarını değerlendirmek için tanıtılan yeni fayda fonksiyonuna göre yeni görüş, görülmeyen alanları içermeli, voksel kalitesini artırmalı ve sensörün gideceği yeni konum için uzaklığı azaltmalı. Ayrıca NBV belirlerken arama zamanını kısaltmak için iki arama yöntemi uygulanmıştır. Vasquez-Gomez vd. (2014) çalışmalarında mevcut algoritma üzerine konum hatası etkisini azaltmak için tekrar değerlendirme evresini eklemiştirlerdir. Yani NBV hataları tahmin eder ve bunu gidermek için görüşü planlar. Bu çalışmada nesnenin boyutunun ve konumunun yaklaşık olarak bilindiği varsayılmış ve algoritma simülasyon ortamında denenmiştir.

2.2. Yüzeysel Yöntem

Yüzeysel yöntem, elde edilen kısmi modeldeki kayıp bölgeleri bulup tamamlamak için yüzey bilgisini kullanır.

Maver ve Bajcsy (1993)'nin çalışması engelli alan kenar metodunu kullanan ilk çalışmalardan birisidir. Amaç, engelli alanların sınır kenarını bulmak ve etiketlemektir. Görüş planlama, destek fikstürü tarafından tanımlanan düzlemi referans olarak yapılır. Engelli alanların bu düzleme izdüşümü poligon olarak benzetilmiştir. Her piksel için görüş yayları toplanarak bir histogram oluşturulur ve bu histogramın maksimum noktası NBV olarak belirlenir.

Maver vd. (1993), NBV belirlemek için sezgisel maksimum-minimum prensibini kullanmışlardır. Yeni görüş noktasını seçmek için, sensör sistemi her muhtemel görüş yönünden elde edilecek gerekli ve hala bilinmeyen veri miktarını tahmin etmek zorundadır. Sonuç olarak her görüş yönü için elde edilebilecek minimum veri sayısı beklenmektedir. NBV, elde edilen minimum veriden maksimum yeni bilgi edinimini sağlamak zorundadır.

Morooka vd. (1999) NBV belirleme aşamasında gerekli olan hesap yükünü azaltmak amacıyla görüş uzayının ayrıklaştırılması için yeni bir metot sunmuşlardır. Görülür yüzey üçgen parçaları pürüzsüz (smooth), engelli (occluded), güvenilmez (unreliable) ve boş (void) olarak sınıflandırılır. Bu görülür yüzey parçalarından toplanan değerlere göre görüş adayları değerlendirilir ve en fazla değere sahip aday NBV olarak belirlenir. İlk olarak metot küresel görüş uzayını mozaik yapıya getirir ve 2B başvuru (look-up) dizisine dönüştürür. 2B görüş nokta dizisinin getirdiği avantajları şunlardır: Her nesne yüzeyindeki üçgen parçalar için görüş bölgelerinin çıkarılması hızlı bir başvuru (look-up) işlemi ile belirlenir ve NBV belirlenirken dikkate alınan görülebilirlik fonksiyonu sadece yeni eklenen veriyi dikkate alarak hızlı bir şekilde güncellenir. Bu sistem 6 eksenli robot kolu, kontrol edilebilir laser-slit tarayıcı ve stereo derinlik algılayıcı ile kurulmuştur.

Li ve Liu (2003) yaptıkları çalışmada kademeli olarak B-spline eğri belirsizliğini azaltan belirsizlik odaklı bir görüş planlama sunmuşlardır. 3B ölçüm sistemi robot kolu ve ucuna eklenmiş bir 3B tarayıcı ile oluşturulmuştur. B-spline modelinde belirsizlik ölçümü için dağıntı (entropy) bilgisi kullanılmıştır. Elde edilen kısmi modelden enine kesitler alınarak elde edilen B-spline eğrileri için model parametreleri tahmin edilir, her kesit için belirsizlik analizi yapılır ve sonra aday görüş için bilgi kazancı tahmin edilir. Bu modelin bilgi kazancı nesneyi merkez olarak kabul eden kesikli (mozaik haline getirilmiş) küresel görüş uzayında haritalandırılır ve maksimum bilgi kazancını veren görüş NBV olarak seçilir.

Chen ve Li (2005), şekil tahminine dayanan bir çalışma önermiştir. Bu metot, keşif yönünün kararı ve NBV'nin belirlenmesini içerir. Nesnenin bilinmeyen kısımlarını tahmin etmek için ipucu olarak yüzey eğilimi kullanılır ve tahmin edilen bu yüzey ile NBV belirlenir. Yüzey eğilimi ile ilgili daha önceki çalışmalar ikinci dereceden denklem oluşturmaya odaklanırken bu çalışmada yenilikçi bir matematiksel metot önermişlerdir. Önerilen bu algoritmayla her veri alınımından sonra çözünürlük, görüş alanı ve görüş açısı kısıtları dikkate alınarak sensör yönelimi ve konumu belirlenir. Yüzey birinci ve ikinci dereceden eğri ya da yüzeylerden oluşuyorsa nesnenin bilinmeyen yüzeyi kesin bir şekilde bu yöntemle tahmin edilir. Modelin tamamlanma oranına bağlı olarak algoritma

sonlandırılır. Ayrıca belli genişlikte delikler modelde bulunuyorsa, buralar için tekrar tarama yapılır.

He ve Li (2006) tarafından önerilen yöntemde minimum ön bilgi ve sonlandırma fonksiyonu ile etkili bir modelleme üzerinde durulmuştur. Bu sistemde, ilk adım olarak modellenen nesnenin derinlik verisi alınır ve üçgen oluşturularak örgü yapısına dönüştürülür. Sonra, görüş küresi sensör konumlarını kısıtlamak için kullanılır. NBV adayları belirlenir ve analiz edildikten sonra bir tanesi seçilir. Ayrıca modellenen kısmın hacmi hesaplanarak ve art arda olan iki tarama arasındaki hacim değişikliği analiz edilerek algoritma sonlandırma ölçütü eklenmiştir. Potansiyel adaylar belirlenirken üçgen örgü modeli pürüzsüz kısım, engelli kısım, güvensiz kısım ve sıradan kısım olarak bölümlendirilir. Engelli ve güvensiz kısımlar için görülebilirlik fonksiyonu çıktıları bulunur ve sıralanır. NBV konumu belirlenirken, en fazla bilgi miktarını elde edecek görüş seçilir. Bu bilgi miktarı yüzey normal integralleri tamamlanarak bulunur.

Wenhardt vd. (2007), Kalman filtre tabanlı olasılıksal durum tahminine dayalı modelleme yöntemi önermişlerdir. NBV, D-optimalite (Gauss matrisinin kovaryans determinanı ile ilişkili), E-optimalite (özdeğerler ile ilişkili) ve T-optimalite (matrisin izi ile ilişkili) gibi durum tahmin belirsizlik ölçütlerinin minimizasyonu doğrultusunda belirlenir. Modelleme aşamasında kamera ile elde edilen 2B görsellerden Kalman filtresi yardımı ile 3B model elde edilmiştir. Bu çalışmada engelli bölge kısımları dikkate alınmadığından her nesne bu yöntem uygulanamamaktadır. NBV için görüş konumları yarı küre görüş uzayında örneklenmiştir.

He vd. (2010), doğrusal hareket kabiliyetine sahip 3 eksenli bir hareket sistemi ve döner tabla ile oluşturdukları sistemde, sistemin hassasiyetini temel alarak sınır ölçüm bölgelerini elde etmişlerdir. Buna göre, kısmi olarak elde edilen nesne sınır bölgeleri dikkate alınarak, oluşturulan sistemin özelliklerine göre sağ ve sol sınır görsel bölgesi tahmin edilir. Sistemin öteleme ve dönüş açısı ile ilgili yapılandırma parametreleri bulunan sınır görsel yüzeyine göre hesaplanır. Görsel alan elde edilir ve görülebilir alanı maksimum yapan NBV görüş noktası aday noktalar arasından seçilir. Bu çalışma NBV bulurken sistemin özelliklerini dikkate almıştır; bu yüzden bir sonraki çalışmada (He vd. 2009) nesnenin sınır görsel bölgelerini ve yüzey tahmini birlikte kullanılmıştır. Yine de

önerilen bu metotlar iç bükey ve engelli alan içeren nesnelere için uygun değildir. Özellikle engelli alan içeren nesnelere için yeni bir çalışma yapılmıştır (He vd. 2010). Mevcut sisteme bir kamera daha eklenmiş; elde edilen nesne modelinin tamamlanmasını garanti etmek için engelli alan planlama stratejisi geliştirilmiştir.

Trummer vd. (2010), modellenen nesne üzerinde bir kısıt koymadan kamera kullanılarak NBV planlama, 3B modelleme ve özellik takibini içeren çevrim içi bir yöntem sunmuşlardır. Yönelim ile ilgili modelleme belirsizliğini azaltmak için bir sonraki taramanın konum bilgisini veren geliştirilmiş E-optimalite kriteri tanıtılmıştır ve NBV planlamaya optimum çözüm getirilmiştir. NBV için görüş pozisyonları küre görüş uzayında örneklenmiştir.

Kriegel vd. (2011) tarafından sunulan gerçek zamanlı olmayan çalışmada yüzeydeki sınırlar bulunur ve elde edilen modelin yüzey eğri tahmini kullanılarak her sınır için ikinci derece yüzey eğrisi hesaplanır. Üçgen örgüsü üzerinde bir kenarı boş olan üçgenler araştırılarak bulunan sınır kenarları sağ, sol, yukarı ve aşağı olarak sınıflandırılır. Her sınır kenarı için bölge büyütme işlemiyle bulunan noktalar kullanılarak ikinci dereceden bir eğri tahmin edilir. Tahmin edilen eğriyi kullanarak, yüzeye dik ve bir önceki veri ile belli oranda çakışan bölgeler için NBV adayları hesaplanır. Bu çalışma ne minimum görüş noktası belirlemeye ne de çalışma uzayı bilgi kazancına odaklanır. Sadece modelin tamamlanmasına odaklanılmıştır ve daha iyi bir model elde etmek için çalışma uzayı silindir ya da küre modeli ile kısıtlanmamıştır. Nesne üzerindeki kısıtlar, nesnenin tarayıcı hassasiyetine göre seçilmeli ve kenarlarında keskin açılarının olmamasıyla sınırlıdır. Yeni elde edilen örgü bir önceki ile kıyaslanır, belli bir sayıda yeni bilgi yok ise, bu tarama çıkarılır ve yığından yeni bir NBV alınır. Kenarlar dikkate alındığı için bir sonraki NBV arasında mesafe az olacağından robot hareketi kısalmış olur. Yığında hiç aday görüş noktası kalmaz ise algoritma sonlandırılır. Bu işlem bulunan her kenar noktası için uygulanır. Algoritma 6 eksenli bir robot kolu ve lazer profil algılayıcı ile denenmiştir. Robot, çarpışmalardan kaçınmak için sınırlayıcı kutuyu kullanırken, yol planlama sınırlayıcı kutu üzerinden başlangıç ve bitiş noktası aralarında sabit yönelim ile doğrusal olarak bulunur. Burada her kenar için görüş noktası belirlenmiş ve iki tarama noktası arası ara değerlere ayrıştırılmıştır.

Torabi ve Gupta (2012) tarafından önerilen sistemde görüş alanı, görüş açısı, çakışma ve engelli bölgeler dikkate alınarak 5 boyutlu görüş arama uzayı içerisinde (4 eş merkezli küre üzerinde tanımlanan görüş noktaları) NBV aranır. Sistemdeki planlama evresi 3 aşamadan oluşur: Nesneyi modellemek için NBV algoritması, bilinmeyen çalışma uzayının keşfi için NBV algoritması ve çarpışmasız robot hareketi için sensör tabanlı yol planlama algoritması. Sinyalin geri dönüş süresini dikkate alarak ölçüm yapan derinlik algılayıcı (ToF kamera) ve 6 eksenli robotun uç eksenleri ile birlikte koni şeklinde bir görüş alanı oluşturulmuştur. Sensörden yayılan iki komşu ışın için bulunan derinlik bilgileri arasında eşliği aşan bir uzaklık olursa burası engelli ya da sınır bölge olarak kabul edilir. İki ışının düştüğü yerler dikkate alınarak görüş nokta adayları belirlenir. Bu adaylar engelli ya da sınır olarak tanımlanan hedef nokta sayısına göre sıralanırlar ve en fazla hedef noktaya gören aday NBV olarak seçilir. Modellenen nesnenin şekil ve geometrisinde herhangi bir kısıt bulunmamaktadır; ancak konumu ve boyutu bilinen bir sınırlayıcı kutu içerisinde bulunduğu varsayılmaktadır. Çalışma uzayı sekizli ağaç (octree) yapısı ile hücrelere bölünmüştür. Bu yöntem NBV planlarken engelli bölge kontrolü, yol planlamada ise çarpışma kontrolünü kolaylaştırır. Önerilen algoritma için sonlandırma ölçütü ise modelin tamamlanmasıdır.

Karaszewski vd. (2012) kültürel mirasların 3B otomatik sayısallaştırılması için yenilikçi bir sistem sunmuşlardır. Bu sistem 3 ana parça içerir: Ölçüm hacim modeli, NBV hesaplama modeli ve çarpışmasız yol planlama modeli. Bu sistemin temel yeniliği, sensör ölçüm hacmi nesnenin boyutundan daha küçük derinlik algılayıcı için NBV belirlenmesi ve bu algoritmanın ölçülen nesnenin boyutuna göre uyarlanmasıdır. Geliştirilen algoritma 3 aşamadan oluşur: İlk ölçüm, kaba ölçüm ve iyi ölçüm. İlk ölçüm aşamasında nesneyi çevreleyecek voksel uzayı için silindirik parametreler belirlenir ve ilk tarama yapılır. Böylelikle voksel uzayı belirlenmiş ve ilk veri alınmıştır. İlk aşama bir kez gerçekleştirildikten sonra kaba ölçüm aşamasında, tekrarlı tarama ile kaba model çıkarılır. Elde edilen modelin sınır noktaları, nokta yoğunluğunun belli aralıkta olduğu yerler olarak belirlenir. Bu noktalar NBV için aday olarak kabul edilir. Her aday bir ağırlık vektörü ile ilişkilendirilir. Bu ağırlık vektörü NBV yönelim vektörü ile ölçülen noktaların yönelim vektörü arasındaki açının sinüs değeridir. Adaylar arasından en büyük ağırlık vektörüne sahip aday NBV olarak seçilir. İyi ölçüm aşamasında, kaba model üzerindeki nokta yoğunlukları dikkate alınarak çok boşluklu alanlar belirlenir ve bu kısımlar tekrar taranır.

Sistem 3B sensör ve 6 eksenli robot kolu, dikey hareket edilebilen bir sistem ve döner tabla ile kurulmuştur. Bu algoritma nesne üzerindeki engelli bölgeler gibi kısıtları dikkate almadığından model üzerinde tamamlanmamış delikler kalır.

Khalfaoui vd. (2012) hareket sisteminin ve nesne geometrisinin kısıtlarının dikkate alınmadığı basit, sezgisel ve hızlı bir NBV sistemi sunmuşlardır. Veri alım işlemi 3 aşamadan oluşur: Sınırlayıcı kutu, konum ve yönelim tanımı, tarayıcı konumlandırma ve veri edinimi, sınırlayıcı kutunun boyutunun güncellenmesi. Nesne etrafındaki görüş noktalarının dağılımı sabittir ve veri alım işlemi operatör tarafından belirlenmiş konum sayısına bağlıdır. Her adımda alınan veri bir önceki taramalardan bağımsızdır. İki veriyi bağlayan tek bilgi sınırlayıcı kutunun boyutudur ve modellenen nesnenin geometrisi dikkate alınmamıştır. Bu çalışma 6 eksenli bir robot kolu ve 3B bir tarayıcı ile gerçekleştirilmiştir. Operatör sadece sınırlayıcı kutunun boyutunu ve tarama sayısını belirlemektedir.

Kriegel vd. (2012) bir önceki çalışmalarının (2011) eksik olduğu kısımları giderebilmek için yeni bir çalışma sunmuşlardır. Bu çalışmada görüş planlama ve çevre modelleme üzerinde durulmuştur. Bu çalışma bilinmeyen karmaşık bir nesnenin 3B yüzey modelini istenilen yüzey kalitesinde modellemeye olanak sağlar. Aynı zamanda nesne etrafında bilinmeyen uzay keşfedilir ve böylelikle çarpışmasız yol planlama sağlanmış olur. Nesnenin yaklaşık konumun bilindiği varsayılmaktadır. Keşif yapıldığı için tarama yüzey şekillerine adapte olabilir ve bu sayede robot nesneye daha yakın hareket edebilir. Bilinmeyen uzayı keşfetmek ve nesne modelini tamamlamak için NBV seçerken ölçüt olarak bilgi kazancı kullanılır. Sınır noktaları için bir önceki çalışmadaki yöntem kullanılmıştır. Dağılım tabanlı keşif ve çarpışmalardan kaçınma algoritmaları için olasılıksal voksel uzayı kullanışlı olduğundan, her yeni derinlik bilgisinde Bayes teoremi kullanılarak voksel uzayı güncellenir. Yüzey eğilimi kullanılarak bulunan NBS adayları, görüşteki tüm voksellerin ağırlıklı olasılıklarının toplamına göre değerlendirilir ve en yüksek bilgi kazancına sahip olan aday NBS olarak seçilir. Durdurma ölçütü olarak tamamlanma yüzdesi dikkate alınmıştır; ancak bu tamamlanma yüzdesine ulaşılmıyorsa maksimum tarama sayısına ulaşıldıktan sonra algoritma sonlandırılır. Tamamlanma yüzdesine ulaşılmamış ve iki ardışık tarama sonrası model tamamlanma oranı değişmiyorsa delik var demektir. Delikler bulunduktan sonra Lorient (2008)'in önerdiği metot ile tarama konum ve yönelimi belirlenir.

Khalfaoui vd. (2013)'de yayınlanan çalışmalarında yeni bir sayısallaştırma yöntemi ile nesnenin yüzey bilgisini dikkate alan bir 3B modelleme sistemi sunmuşlardır. Önerilen metot esas olarak iki aşamadan oluşur: İlk olarak elde edilen yüzey “iyi görülen” ve “neredeyse görülmeyen” olarak bölümlendirilir. Bu gruplandırma işlemi ışın izleme testi ve görülebilirlik tanımını içeren görülebilirlik kontrolüne dayanır. İkinci aşamada ise görüş noktaları, ortalama kayma (mean shift) tekniği ile gruplandırma yapılarak seçilir. Maksimum yüzey kaplamı amaçlandığı için en geniş sayıda tanımlayıcı içeren küme NBV olarak seçilir. Algoritma, uzaklık ölçütünü doğrulayan herhangi bir görüş yönü kalmazsa sonlandırılır. Bu çalışmada nesne üzerindeki tek kısıt çok keskin kenarlara sahip olmamasıdır. Tarama noktalarının birbirine yakın olmaması ve düzenli dağılması için görüşler arasında minimum uzaklık ölçütü tanımlanmıştır. Algoritma 6 eksenli bir robot kolu ve 3B sensör ile denenmiştir. Sensör için bir model oluşturulmadığından her sensör için bu algoritma kullanılabilir. Sensör küresel bir yol boyunca nesne etrafında hareket ettirilir. Nesne tamamının sensörün görüş alanında olduğu varsayılmaktadır.

Kriegel vd. (2015) tarafından yayınlanan çalışmada 6 eksenli endüstriyel robot kolu ve lazer profil algılayıcı içeren 3B otonom modelleme sistemi ile bilinmeyen küçük ölçekli nesnelerin etkin bir şekilde modellenmesi için gerçek zamanlı bir sistem sunulmuştur. Daha önceki çalışmalarının (2012, 2011) geliştirilmiş versiyonu olan sistemde, görüş planlama aşamasında modelin yüzey kalite ölçütü ilk defa dikkate alınmaktadır. Kalite ölçütünü belirleyen iki özellik kullanılır: Yerel örnekleme yoğunluğu ve ışın ile yüzey normali arasındaki açı. Bir önceki çalışma ile kıyaslandığındaki temel katkıları şu şekilde sıralanabilir: Gerçek zamanlı uzay güncelleme, konum hata minimizasyonu (ICP), NBS seçerken bilgi kazancı ve yüzey kalitesini dikkate alma ve son olarak, sonlandırma ölçütü olarak nokta yoğunluğu ve model tamamlanma oranının kullanılması.

2.3. Küresel Yöntem

Küresel yöntemler, geometrik verinin yerel karakteristiklerinin yerine küresel karakteristiklerini dikkate alarak görüş planlamayı içerir.

Yuan (19915), kapalı modeli karakterize etmek için kütle vektör zinciri (MVC) kavramını tanıtmıştır. Nesnenin kütle vektör zinciri bir ağırlık vektör serisidir. Bu seride, nesnenin yüzey parçalarına bir vektör atanır. MVC, yüzey normalleri yönünde iz düşüm alanları ile ağırlıklandırılan bütün yüzey normallerinin toplamı ile tanımlanır. Kapalı modeller için oluşturulduğundan kütle vektör zincirinin toplamı sıfır olmalıdır. Model üzerinde tamamlanmayan kısımlar vektör toplamının sıfır olmamasına neden olurlar. Modeli tamamlamak için kütle vektör toplamının zıt yön vektörü NBV olarak belirlenir. Bu algoritma sadece nesne modeli tamamlandığı zaman durur, bundan dolayı bu yaklaşım karmaşık nesnelere için uygun değildir. Ayrıca bu yöntemle sadece sensör görüş yönü belirlenir.

Pito (1999), birçok araştırmacı gibi, NBV araması için model yüzey üzerindeki engelli kenarları ipucu olarak kullanır. Ancak yenilikçi bir yaklaşım olarak konumsal uzay yaklaşımını tanıtmıştır. Belli bir çakışma oranı ile sadece engelli sınırlara yakın kısımları en iyi tarama için değerlendirmiştir. Pito'nun NBV algoritması nesne yüzey görülebilirliği ve sensör tarama potansiyelini içeren konumsal uzay yaklaşımı ile oluşturulmuştur. Sensör ve nesne arasına konumsal uzay yüzeyi yerleştirilmiştir. Nesne yüzey uzayı, konumsal uzay yüzeyi ve görüş nokta uzayı kesikli hale getirilir. Nesne yüzey modelinde her örgü elemanının görülebilirliği ışın izleme yöntemi kullanılarak konumsal uzay yüzeyi hücrelerine kodlanır. Yüzey görülebilirliğini kodlarken ışın ve yüzey normali arasında kalan açı kullanılarak ağırlık oranı atanmıştır. Verinin görülen ve boş yüzeyleri konumsal uzayda bu şekilde kodlanır. Verilen görüş noktasında, aynı şekilde derinlik kamerasının tarama potansiyeli, kameranın ışın izleme yöntemi kullanılarak konumsal uzay yüzeyi ve kamera ışınının kesişimini belirleyerek kodlanır. NBV, mümkün olduğu kadar fazla boş yüzey kısımlarını ayna anda tarayabilecek konum olarak seçilir. Bu algoritmanın göze çarpan özellikleri şunlardır: Çok sayıda potansiyel tarama konumunu dikkate alır, yüksek oranda engelli bölgeleri modellemek için doğru konumları elde eder ve birçok tarayıcı ile kullanılabilir. Modellenecek nesnenin topolojisi ya da geometrisi hakkında özel bir varsayım yoktur.

Loriot vd. (2008) tarafından yayınlanan çalışmada kültürel değere sahip eserlerin maksimum yüzey kaplamasını elde etmek için iki aşamadan oluşan bir yöntem önerilmiştir. İlk aşama Yuan (1995)'in geliştirdiği yaklaşıma dayanır ve NBV belirlemek için kütle

vektör zinciri (MVC) kullanılır. Bu yöntem nesnenin engelli bölgelerinden dolayı delikler içeren maksimum yüzey kaplamını verir; yani nesnenin kaba modeli elde edilmiş olur. MVC görüş noktası için konum bilgisini vermediğinden dolayı tarayıcı belli bir uzaklıkta bir önceki tarama ile alınan verinin kütle merkezine yönlendirilir. Bu metot uygulaması basit ve hesaplama zamanı açısından verimlidir. İkinci aşamada ise elde edilen örgü yapısında kalan delikler kullanılarak NBV konum ve yönelimi hesaplanır. Örgü tek bir üçgene ait kenarlar konumlandırılarak delikler bulunur. Her delik için normal, konum ve boyut hesaplanır. Bu üç parametre ile hesaplanan kütle merkezine doğru ve delik normaline zıt yönde bir NBV hesaplanır. İkinci aşamada, alınan veri modele eklenmeden önce, tarama ile elde edilen fazla ve gereksiz veriyi modele eklememek için kütle merkezinden belli uzaklıkta olan noktalar atılır. Bu çalışma 5 eksenli bir hareket sistemi ve 3B üçgen tabanlı bir lazer sensör kullanılmıştır. Algoritma birçok nesne üzerinde denenmiş, içbükey nesnelere hariç iyi sonuçlar alınmıştır.

Zhang vd. (2015), NBV konum ve yönelimini bulmak için servo tabanlı otomatik yeni bir yaklaşım sunmuşlardır. Bu yaklaşımda NBV yönelimini bulmak için klasik MVC yöntemini (1995) kullanılmış; klasik yöntem NBV konumunu belirleyemediğinden konum, servo tabanlı optik bir kontrol yöntemi ile belirlenmiştir. Bu optik yaklaşım ile nesne alanını içeren görüntü özellikleri çıkarılır ve nesnenin kütle merkez koordinatları bulunur. İlk veri alımı manuel olarak gerçekleştirilir; daha sonra MVC yöntemi ve görüntü özelliği çıkarılarak sonraki NBV belirlenir. Bu yöntem, 6 eksenli endüstriyel robot kolunun uç eksenine eklenmiş lazer profil algılayıcı ve kamera ile gerçekleştirilmiştir. MVC toplam değeri yeteri kadar küçük olduğunda, algoritma sonlandırılır.

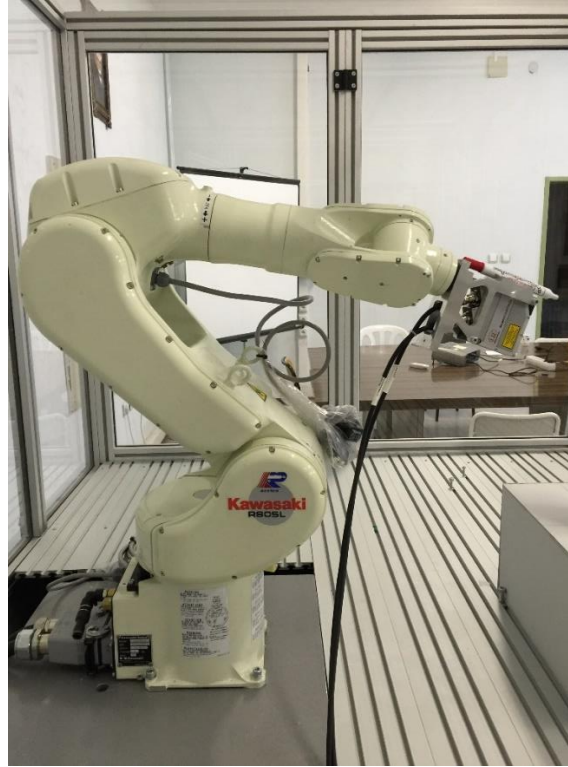
Yapılan tüm çalışmalar dikkate alındığında otonom modelleme hala çözülmeye çalışılan açık bir problem olarak görülmektedir. Literatürde, 3B model oluştururken farklı algılayıcı ve hareketli mekanizmaların kullanıldığı çalışmalar bulunmaktadır. Kullanılan algılayıcıların çoğunun bir görüş noktasından yüzey bilgisini alan 3B algılayıcılar olduğu görülmektedir. Bu tez kapsamında kullanılan algılayıcı 2B lazer profil sensörü olduğundan, 3B algılayıcılar gibi tek görüş noktasından 3B veri elde edilememektedir. Bu yüzden algılayıcının bir sonraki konum ve yönelimi hesaplanırsa bile tarama esnasında hareketinin nasıl olacağı ile ilgili problemler ortaya çıkmaktadır. Literatüre bakıldığında bu problem ile ilgili çok az sayıda çalışmaya rastlanmıştır ve geliştirilme ihtiyacı görülmektedir.

3. SİSTEM DONANIMI

NBV problemi, genel olarak iki temel aşamadan oluşmaktadır: Taranması gereken hedef noktaların belirlenmesi ve algılayıcının bu noktaya hareket ettirilmesi. Bu işlevleri yerine getirebilmek için iki temel bileşene ihtiyaç duyulmaktadır: Algılayıcı ve algılayıcının hareketini sağlayacak sistem. Görüş nokta uzayına herhangi bir kısıt koymamak için hareket serbestlik derecesi yüksek endüstriyel robot kolu kullanılmıştır. Yüksek çözünürlüklü model elde edebilmek için ise algılayıcı olarak da lazer profil sensörü tercih edilmiştir.

3.1. Endüstriyel Robot Kolu

Robotların yetenekleri, çok basit noktadan noktaya hareketlerden, tümleşik endüstriyel sistemin bir parçası olarak karmaşık hareketlere kadar değişmektedir. Bundan dolayı, robot kullanımında, robotların özellikleri iyi bilinmelidir. Kol tipi, eksen sayısı, yük taşıma kapasitesi, hareket hızı, çalışma hacmi, güvenilirlik, tekrarlanabilirlik, programlama yöntemi, hareket elemanları, denetim sistemleri ve koordinat sistemi göz önüne alınması gereken önemli noktalar. Bu tez konusu için dikkat edilecek en önemli özellik serbestlik derecesi, çalışma alanı ve hareket hassasiyetidir. Robot kolu istenilen her noktaya ulaşabilmesi için en az 6 serbestlik derecesine sahip olmalı, orta büyüklükte nesnelere modellemeye imkan sağlayacak kadar geniş bir çalışma alanı sunabilmeli ve hareket hassasiyeti ise lazer algılayıcının hassasiyetine yakın seçilmelidir. İstenilen bu özellikler dikkate alındığında, Kawasaki firması tarafından üretilen küçük ve orta endüstriyel işlemleri gerçekleştirebilecek kapasiteye sahip RS005L model 6 eksenli endüstriyel robot kolu uygun görülmüştür. Bu modele ait görüntü Şekil 3.1.'de gösterilmiştir. Robot kolunun genel özellikleri ve her eklemin hareket aralıkları ve maksimum hızları Çizelge 3.1.'de gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Kawasaki RS005L 6 eksenli endüstriyel robot kolu

Çizelge 3.1. Kawasaki RS005L 6 eksenli endüstriyel robot kolu genel özellikleri

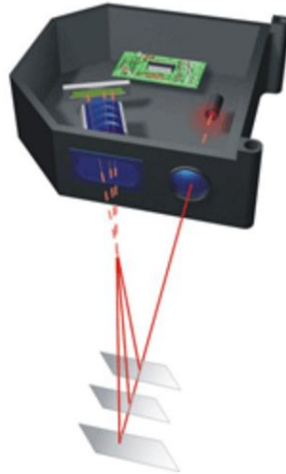
RS005L Özellikleri			
Yük taşıma kapasitesi	5 kg		
Yatayda erişim	930 mm		
Dikeyde erişim	1484 mm		
Tekrarlanabilirlik	± 0.03 mm		
Hareket aralığı ve Maksimum hız	Eksen	Hareket aralığı	Maksimum hız
	1.	$\pm 180^\circ$	$300^\circ/s$
	2.	$+135^\circ \sim -80^\circ$	$300^\circ/s$
	3.	$+118^\circ \sim -172^\circ$	$300^\circ/s$
	4.	$\pm 360^\circ$	$460^\circ/s$
	5.	$\pm 145^\circ$	$460^\circ/s$
	6.	$\pm 360^\circ$	$7400^\circ/s$
Ağırlık	37 kg		

RS005L robot kolu, Kawasaki E70 adlı robot denetleyicisi ile kontrol edilmektedir. Robot firması tarafından geliştirilen AS programlama dili ile robot kolu programlanmaktadır. Ayrıca, denetleyiciye bağlanan kumanda paneli ile robot elle ya da

öğretme yolu ile de kontrol edilebilir. Robot denetleyici ile veri alışverişi RS232 ya da Ethernet iletişim protokolleri ile sağlanabilmektedir. Denetleyici üzerinde bulunan kart üzerinde harici giriş ve çıkışlar bulunmaktadır.

3.2. Lazer Profil Algılayıcı

Nesne yüzeyinden hassas ve yüksek çözünürlüklü bilgi edinebilmek için lazer profil algılayıcı tercih edilmiştir. Lazer profil algılayıcı farklı hedef yüzeylerinden 2B profil algılaması için optik üçgenleme prensibini kullanmaktadır. Özel lensler kullanılarak, lazer ışını statik lazer çizgisi oluşturmak için genişletilir ve bu ışınlar nesne yüzeyine yansıtılır. Nesne yüzeyine çarpıp geri dönen dağınık ışınlar CCD alıcı yardımı ile yüksek hassasiyete sahip sensör matrisine yansır. Bu matris görüntüsünden, uzaklık bilgisi (z eksen) ve lazer çizgisi boyunca (x eksen) konum hesaplanır. Hesaplanan bu değerler algılayıcıya göre sabit 2B koordinat sistemindeki çıktılardır. Algılayıcıda kullanılan optik üçgenleme prensibi, nesne üzerine düşürülen ve geri yansıyan ışınların açısını dikkate alarak uzaklığı hesaplayan bir yöntemdir. Algılayıcının optik üçgenleme prensibine dayanan ölçümü Şekil 3.2.'de gösterilmektedir.



Şekil 3.2. Lazer profil algılayıcı optik üçgenleme prensibi

Modelleme kalitesini ve doğruluğunu belirleyen en önemli etken algılayıcı seçimidir. Bu seçimi yaparken nesne yüzeyinden güvenilir ölçüm alınabilmesi için gerekli olan z ve x eksen üzerinde belirlenmiş ölçüm aralığı, veri ölçüm hızını işaret eden frekans,

sapma miktarını gösteren doğrusallık ve ölçüm aralığında algılayabileceği en küçük değişiklik anlamına gelen çözünürlük gibi parametreler dikkate alınmalıdır. Bu parametreler dikkate alındığında Micro-Epsilon firması tarafından üretilen scanCONTROL 2900-100 model lazer profil algılayıcı uygun görülmüştür. Lazer profil algılayıcı Şekil 3.3.'de ve bu algılayıcıya ait özellikler Çizelge 3.2.'de gösterilmektedir.



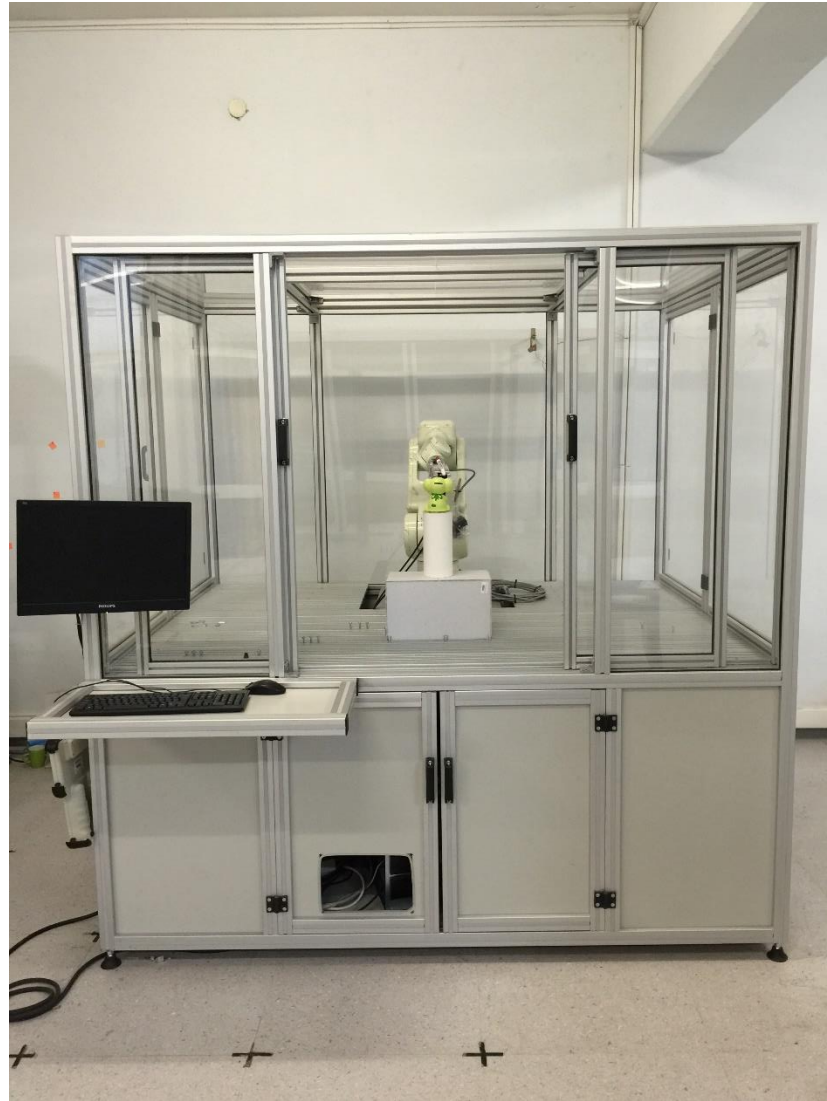
Şekil 3.3. Micro Epsilon scanControl 2900-100 lazer profil algılayıcı

Çizelge 3.2. Lazer profil algılayıcı genel özellikleri

z-ekseni (yükseklik)	Standart ölçüm alanı	100 mm
	Ölçüm aralığı	125 – 390 mm
	Doğrusallık	+/-0.16%
	Çözünürlük	0.012 mm
x-ekseni (genişlik)	Ölçüm aralığı başlangıcı	58.5 mm
	Orta aralık	100 mm
	Ölçüm aralığı sonu	143.5 mm
	Çözünürlük	1280 nokta/profil
Profil Frekansı		200 Hz
Ölçüm Oranı		256000 nokta/saniye
Giriş/Çıkış portu		Ethernet, Lazer aç/kapa, RS422, 3 adet programlanabilir giriş

3.3. İş istasyonu

Bir tabla üzerine monte edilmiş robot kolu, bir uç aparatı ile robot uç noktasına monte edilen lazer profil algılayıcı, bilgisayar ve kesintisiz güç kaynağı gibi sistemin sahip olduğu tüm elemanların çevre ile etkileşimini engellemek ve güvenli bir şekilde çalışabilmesini sağlamak için bir iş istasyonu bulunmaktadır. Robot kolunun hareket kabiliyetini artırmak ve ulaşamadığı arka bölgeleri taramak için basit döner çalışma tablası da eklenmiştir. Bu platform Şekil 3.4.'de gösterilmektedir.



Şekil 3.4. İş istasyonu

4. SİSTEM YAZILIMI

Oluşturulan sistemde istenilen görevlerin yapılabilmesi için bilgisayar, robot denetleyicisi ve algılayıcı arasında haberleşmenin oluşturulması ve veri alışverişinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu sistemde bilgisayar, robot denetleyicisine ve lazer algılayıcıya TCP/IP ile bağlanarak iletişim kurar. Hareket kontrolü ve veri alışverişini kontrol eden iki yazılım modülü tanıtılmıştır. Bahsedilen yazılımlar daha önce yapılmış yüksek lisans tez çalışması (Seçil, S., 2015) kapsamında oluşturulmuş ve daha detaylı bir biçimde anlatılmıştır. Burada sadece çalışma kapsamında kullanılacak modüller tanıtılmıştır.

4.1. Robot Sunucu Modülü

Robot sunucu modülü dört farklı işlemi gerçekleştirmektedir: 1) Robot kolundan bilgisayara uç noktasının konum ve yönelim bilgisinin aktarımı; 2) bu bilgi aktarımı ile eş zamanlı olarak lazer profil algılayıcıya tetikleme sinyali yollayarak robot uç noktası ve algılayıcı ölçümlerinin eşzamanlı bir şekilde gerçekleştirilmesi; 3) bilgisayardan robot koluna bir sonraki konum ve yönelim için gerekli olan eklem açılarının aktarımı; 4) robot kolunun hareket planının gerçekleştirilmesi ve denetlenmesi.

4.2. Veri Toplama Modülü

Veri toplama modülü iki farklı işlemi gerçekleştirmektedir. İlk olarak robot denetleyicisinden robot uç noktasına ait konum ve yönelim bilgileri ile birlikte lazer profil algılayıcısının topladığı yüzey bilgileri alınır. İkinci olarak elde edilen bu verilerin robot taban koordinat sistemine göre dönüşümü yapılarak 3B nesnenin yüzey verisi elde edilir. Algılayıcıdan elde edilen veriler algılayıcının uç noktasına göre olan konum bilgisini içerir iken robot uç noktası konum bilgileri robot taban koordinat sistemine göre elde edilir. İki farklı veriyi birleştirip nesne yüzeyinin 3B verisini robot taban koordinat sisteminde ifade etmek için ilk olarak lazer algılayıcı robot taban koordinat eksenine göre dönüştürülmelidir. Bunu sağlamak için Eşitlik 3.1’de verilen ${}_{unp}^{taban}D$ dönüşüm matrisi

kullanılarak her nokta için dönüşüm işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu eşitlikte ${}^{taban}_{unp}R$ matrisi, (3x3) boyutlarında ve Euler açıları Z-Y-Z konvansiyonuna göre düzenlenmiş rotasyon matrisidir ve robot denetleyicisinin sunduğu yönelim açılarını kullanmaktadır. ${}^{taban}_{unp}R$ matrisi Eşitlik 3.2’de gösterilmektedir. P_{unp} vektörü ise Eşitlik 3.3’de gösterildiği gibi robot denetleyicisinin sunduğu uç nokta konumunu içermektedir.

$${}^{taban}_{unp}D = \begin{bmatrix} {}^{taban}_{unp}R_{3 \times 3} & P_{unp}_{3 \times 1} \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$${}^{taban}_{unp}R =$$

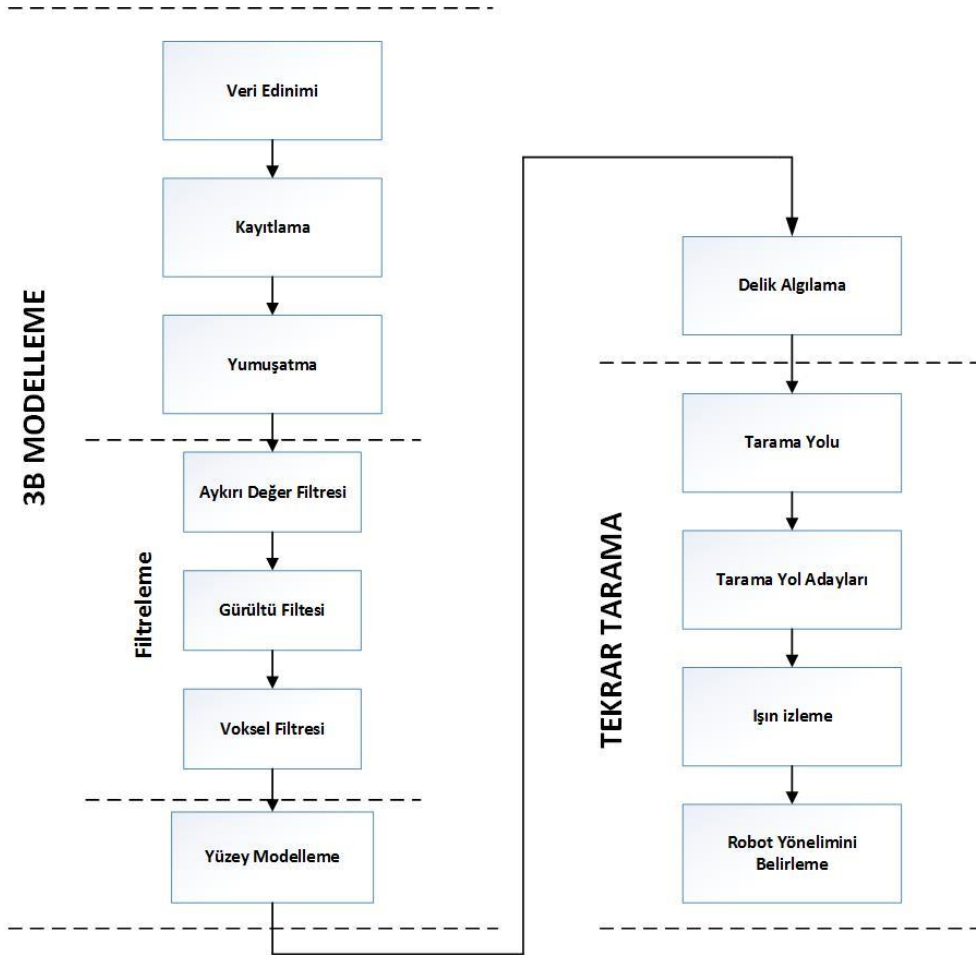
$$\begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \theta \cos \psi - \sin \varphi \sin \psi & -\cos \varphi \cos \theta \sin \psi - \sin \varphi \cos \psi & \cos \varphi \sin \theta \\ \sin \varphi \cos \theta \cos \psi + \cos \varphi \sin \psi & -\sin \varphi \cos \theta \sin \psi - \cos \varphi \cos \psi & \sin \varphi \sin \theta \\ -\sin \theta \cos \psi & \sin \varphi \cos \psi & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$$P_{unp} = \begin{bmatrix} X_{unp} \\ Y_{unp} \\ Z_{unp} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Dönüşüm işlemi tamamlandıktan sonra elde edilen 3B yüzey bilgileri PCL kütüphanesine uygun nokta bulut veri dosyası formatında, “.pcd” uzantılı dosya olarak elde edilir.

5. GÖRÜŞ PLANLAMA

Görüş planlama için önerdiğimiz yöntemde, önceden belirlenmiş olan tarama yollarında lazer profil algılayıcı hareket ettirilerek nesne yüzeyine ait derinlik bilgileri alınır. Bu bilgiler kullanılarak modelin tamamlanmamış olan kısımları algılanır ve tekrar tarama ile modelin tamamlanması amaçlanır. Algoritma C++ programlama dilinde yazılmış, nokta bulutu ve üçgen örgü modellerinin işlenmesi için açık kaynaklı PCL (Point Cloud Library) kütüphanesinden faydalanılmıştır. Geliştirilen yöntemde ait aşamalar Şekil 5.1'deki akış diagramı ile gösterilmektedir.



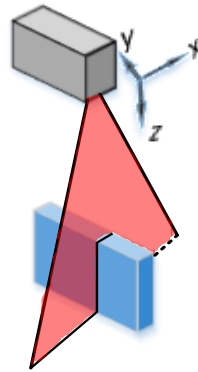
Şekil 5.1. Görüş planlama akış diagramı

5.1. 3B Modelleme

Bu aşamada nesne yüzeyine ait veriler alınarak, sırasıyla kayıtlama, yumuşatma, filtreleme ve yüzey oluşturma aşamalarından geçirilir.

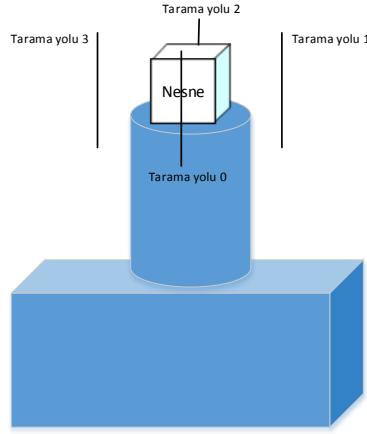
5.1.1. Veri edinimi

Nesne etrafında, tarayıcının belirli konum ve yönelimlerde ölçüm yapması ile nesnenin derinlik bilgisi elde edilir. Tez kapsamında kullanılan sensör, bir görüş noktasından sadece bir profil verisi almaktadır. Alınan bu veriler Şekil 5.2.'de gösterildiği gibi dikey ekseninde z ve yatay ekseninde ise belirli bir çözünürlük sayısında x koordinatlarından oluşmaktadır.



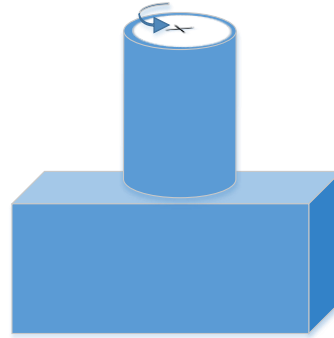
Şekil 5.2. Lazer profil sensör ölçüm prensibi

Sensörden elde edilen 2B veriden nesnenin 3B derinlik bilgisinin elde edilebilmesi için tek bir görüş noktası yeterli olmamaktadır. Bu yüzden bir tarama yoluna gereksinim duyulur ve nesnenin tam modelini tek bir tarama ile elde etmek mümkün olmadığından ardışık taramalar gerekmektedir. Bu çalışmada nesne modelini elde etmek için gerekli olan taramalar daha önceden belirlenmiş olan iki konum noktası arasında doğrusal hareket ile tanımlanmıştır. Şekil 5.3.'de çalışma tablası üzerindeki nesne için belirlenmiş olan doğrusal tarama yollarının örnek görünümü verilmektedir.



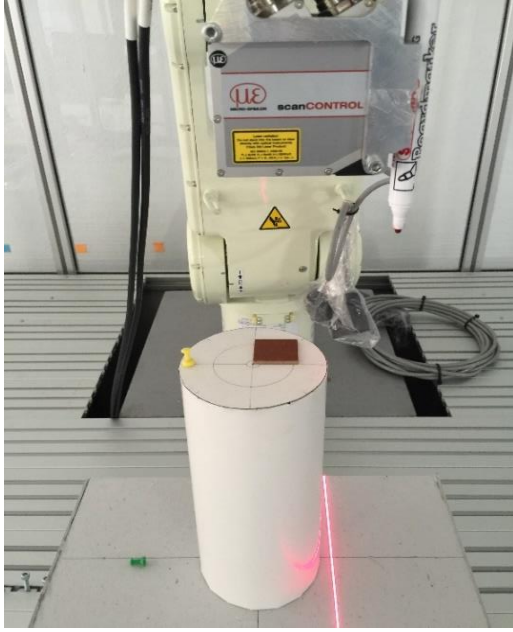
Şekil 5.3. Belirlenmiş tarama yolları örnek görünümü

Hareket sisteminin erişim kısıtlarından dolayı nesnenin arka yüzeyini modellemek için belirlenmiş tarama yolları gerçekleştirilememektedir. Bu problemi aşmak için gerekli olan döner tabla, sistemin donanımında mevcut olmadığından dolayı bu işlevi yerine getirecek basit bir sistem kurulmuştur. Şekil 5.4.'de çalışma tablası üzerinde beyaz renk ile gösterilen parça, belirli bir merkez etrafında hareket edebilen döner bir sistem işlevi görmektedir.

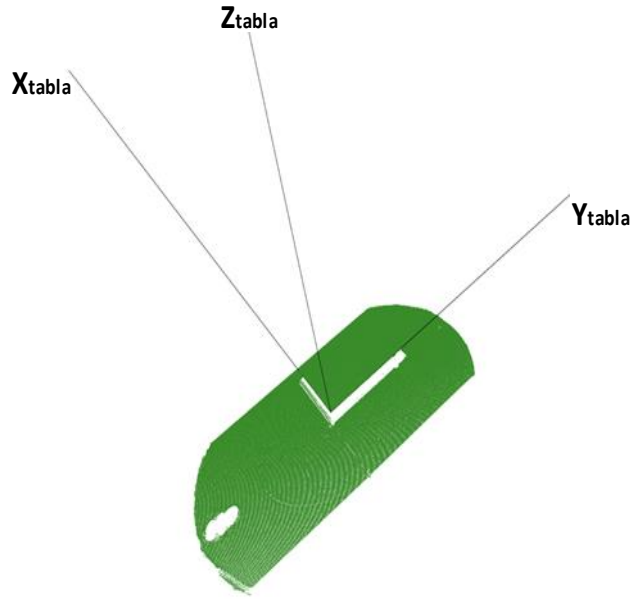


Şekil 5.4. Çalışma tablası ve döner sistem

Bu sistemin amacı, tabla üzerindeki merkez etrafında 180 derece döndürülen nesnenin yüzeyinden derinlik bilgisi alındıktan sonra, bu verinin tabla koordinat ekseninin yüzeye dik bileşenine göre 180 derece dönüşüm işlemi yapılarak hareket sisteminin ulaşamadığı bölgelerinde modellenmesini sağlamaktır. Bu referans koordinat sisteminin belirlenmesi için Şekil 5.5.'de gösterilen parça lazer algılayıcı ile taranmış ve bu parça üzerindeki noktalar kullanılarak bir tabla eksen sistemi belirlenmiştir.



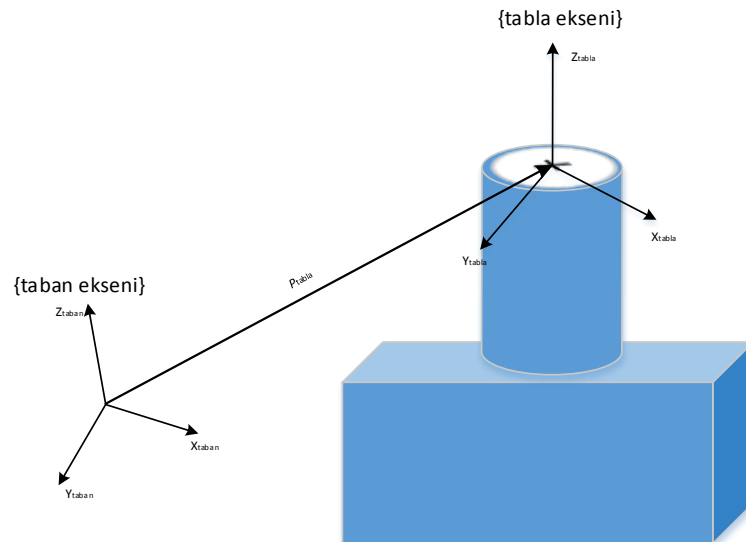
a.



b.

Şekil 5.5. Çalışma tablası koordinat eksenleri belirlenmesi: a) döner tabla, b) oluşturulan tabla eksenleri

Taban koordinat sistemi ile tabla koordinat sistemi arasındaki ilişki Şekil 5.6.'da gösterilmektedir. Eşitlik 5.1 kullanılarak koordinat eksenleri arasında rotasyon matrisi ve Eşitlik 5.2 kullanılarak da dönüşüm matrisi bulunur.



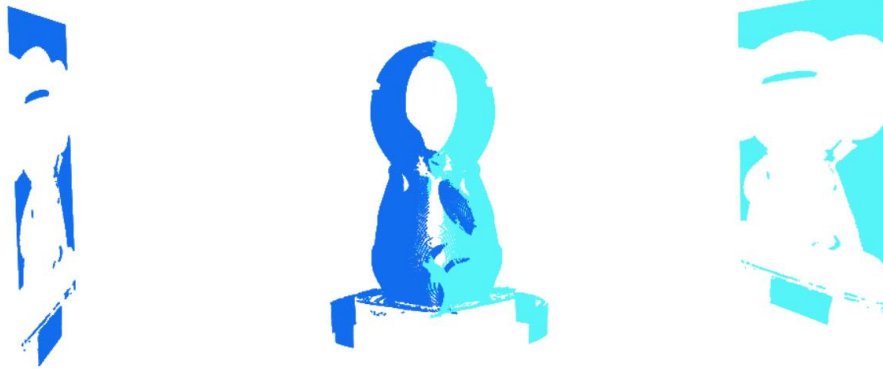
Şekil 5.6. Robot taban koordinat eksenleri ve çalışma tablası koordinat eksenleri arasındaki ilişki

Elde edilen dönüşüm matrisi ile nokta bulutu tabla koordinat sistemine dönüştürülür. Tabla koordinat sistemine göre elde edilen nokta bulutu Z_{tabla} eksenini etrafında 180 derece döndürülür. İşlem tamamlandıktan sonra nokta bulutu tekrar robot taban koordinat sistemine göre oluşturulmalıdır. Eşitlik 5.3'e göre bulunan dönüşüm matrisinin tersi alınarak nokta bulutu dönüşümü yapılırca robot taban eksenine göre tekrar elde edilmiş olur. Dönüşüm işleminden önceki ve sonraki veriler Şekil 5.7.'de gösterilmektedir.

$${}_{tabla}R_{taban} = {}_{taban}R_{tabla}^T = [X_{tabla} \quad Y_{tabla} \quad Z_{tabla}]^T \quad (5.1)$$

$${}_{taban}D_{tabla} = \begin{bmatrix} {}_{taban}R_{tabla}^T & -{}_{taban}R_{tabla}^T \cdot P_{tabla} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

$${}_{taban}D_{tabla} = {}_{taban}D_{tabla}^{-1} \quad (5.3)$$



a.

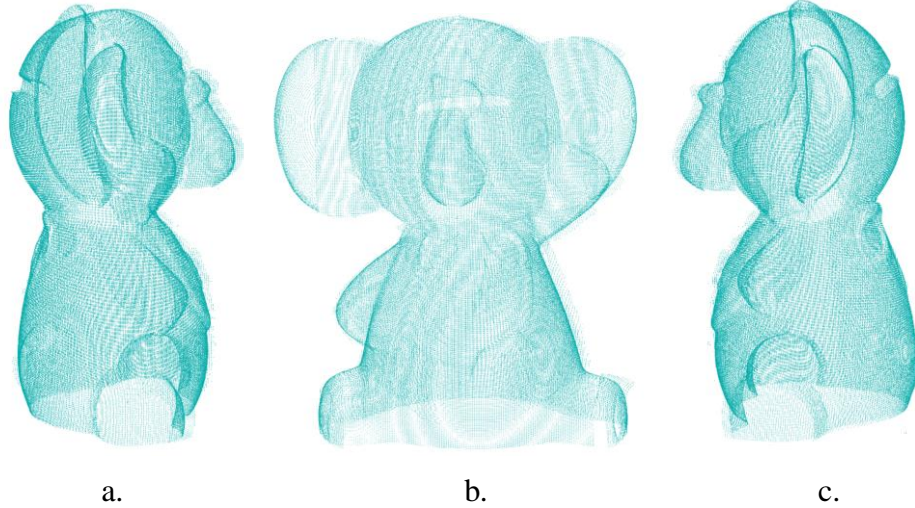
b.

Şekil 5.7. Dönüşüm işlemi öncesinde (a) ve sonrasında (b) nokta bulut kümeleri

5.1.2. Kayıtlama

Her bir taramadan elde edilen verinin robotun taban koordinat sistemine göre dönüşümü yapıldığından, elde edilen verilerdeki ortak bölgelerin çakışması beklenmektedir. Ancak robot ve sensör ölçüm hatalarından dolayı ve arka yüzeyleri

taramak için kurulan sistemin hassas olmamasından dolayı taramalar arasında tam çakışma olmamaktadır. Bu hatalar Şekil 5.8.'de gösterilmektedir.



Şekil 5.8. ICP algoritması kullanılmadan önce nokta bulutları: a) sağ, b) ön, c) sol görünümü

Bu hataları en aza indirmek için birbirini takip eden taramalarda ICP (Besl ve McKay, 1992) algoritması kullanılmıştır. Bu algoritma nokta bulutları arasındaki uzaklığı minimize etmeye çalışır. Bir nokta bulutu sabit tutulurken yani hedef nokta bulutu olurken diğer nokta bulutu yani kaynak nokta bulutu ise hedef nokta bulutu ile en iyi uyum için hizalanır. Bu algoritma genel olarak Şekil 5.9.'da verilmektedir.

Algoritma-Nokta bulutlarının kayıtlanması

ICP parametrelerini belirle

Nokta bulutu = P_0

Geçici nokta bulutu = Nokta bulutu

Döngü $i=1$ 'den nokta bulutu sayısına kadar

Kaynak nokta bulutu = P_i

Hedef nokta bulutu = Geçici nokta bulutu

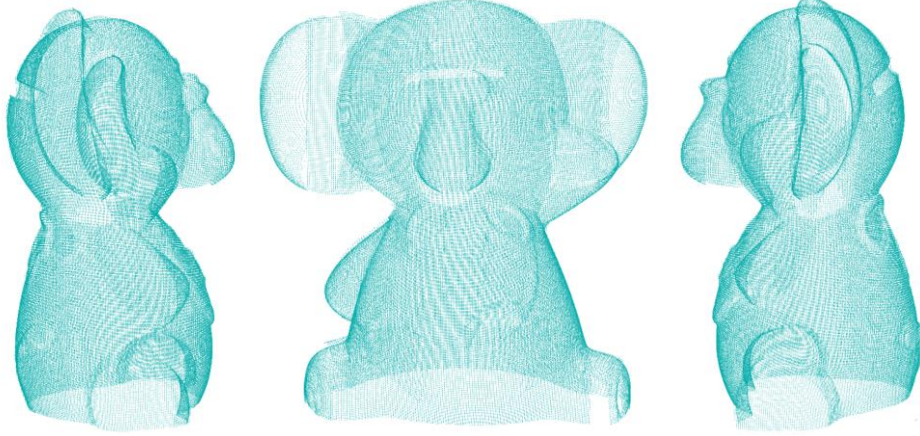
Hedef ve kaynak nokta bulutunu ICP ile hizala ve sonucunu Geçici nokta bulutuna ata

Nokta bulutu = Nokta bulutu ve Geçici nokta bulutu birleştir

Döngüyü sonlandır

Şekil 5.9. ICP algoritması

ICP ile kayıtlama aşamasında hemen sonra hizalanan nokta bulutları birleştirilerek tek bir nokta bulutu elde edilir. Algoritmanın çıktıları Şekil 5.10.'da gösterilmektedir.



a.

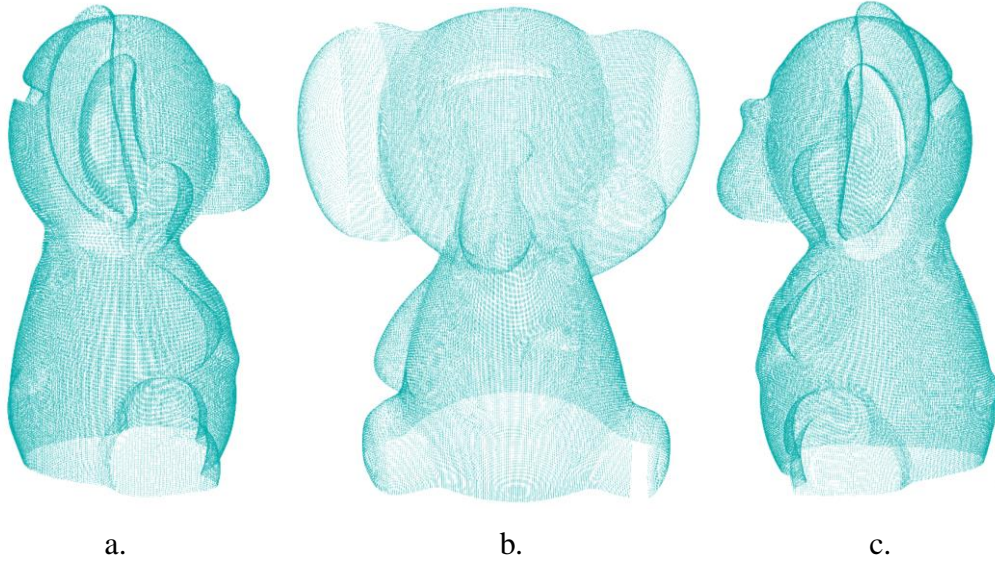
b.

c.

Şekil 5.10. ICP algoritması uygulandıktan sonra nokta bulutların nokta bulutları: a) sağ, b) ön, c) sol görünümü

5.1.3. Yumuşatma

ICP algoritmasının çıktısı kontrol edildiğinde örtüşmesi gereken noktalar arasında hataların olduğu görülmektedir. ICP algoritması ile nokta bulutları arasında dönüşüm işlemleri gerçekleştirilir; ancak, her zaman etkili sonuçlar alınamamaktadır. Bu yüzden nokta bulutları arasında geçişleri pürüzsüzleştirmek için MLS (Mean Least Square) yumuşatma (Alexa vd., 2004) algoritması kullanılmaktadır. Şekil 5.11.'de bu algoritmanın çıktısı görülmektedir.



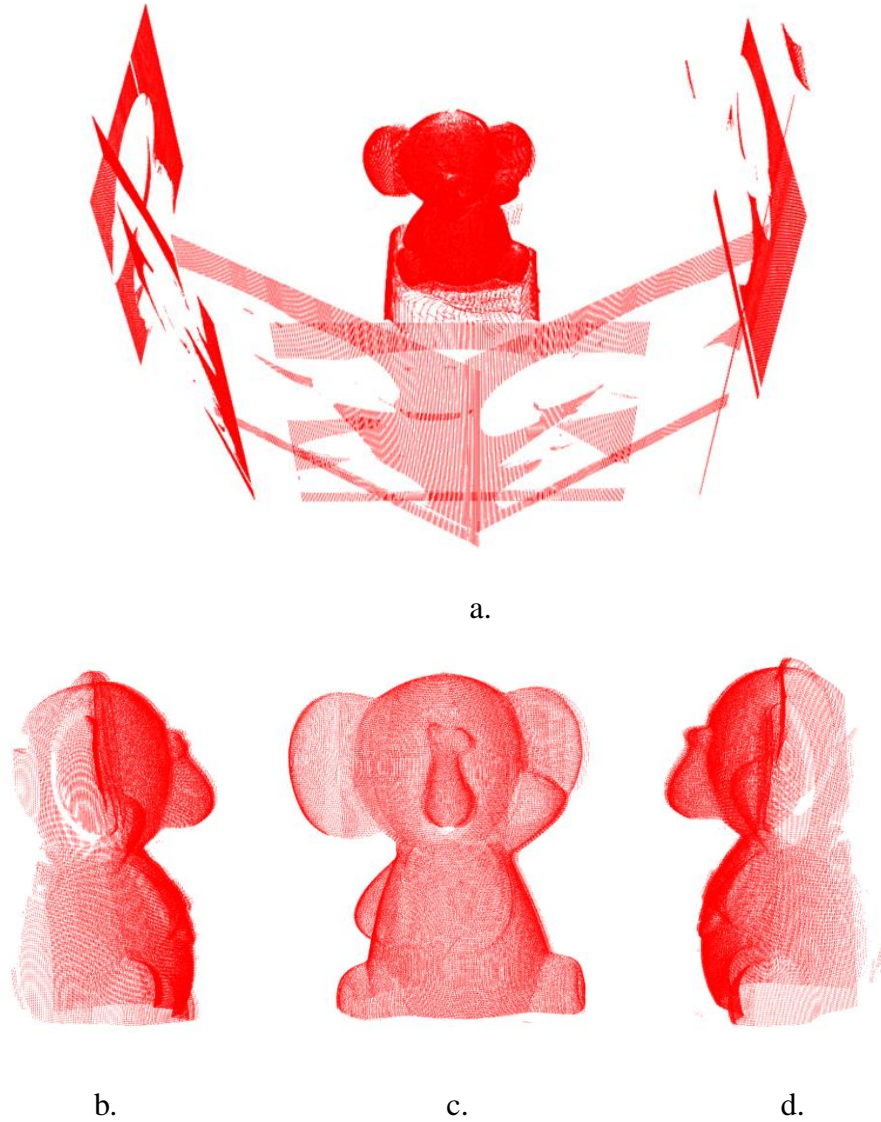
Şekil 5.11. Yumuşatma algoritmasından sonra nokta bulutu: a) sağ, b) ön, c) sol görünümü

5.1.4. Filtreleme

Nokta bulutu kümesi üzerinde istenilmeyen bölgelerin atılması, ölçümden kaynaklı hatalı noktaların çıkarılması ve modeldeki nokta kümelerinin örneklenmesi için sırasıyla aykırı değer, gürültü ve voksel filtreleri kullanılır.

5.1.4.1. Aykırı değer filtresi

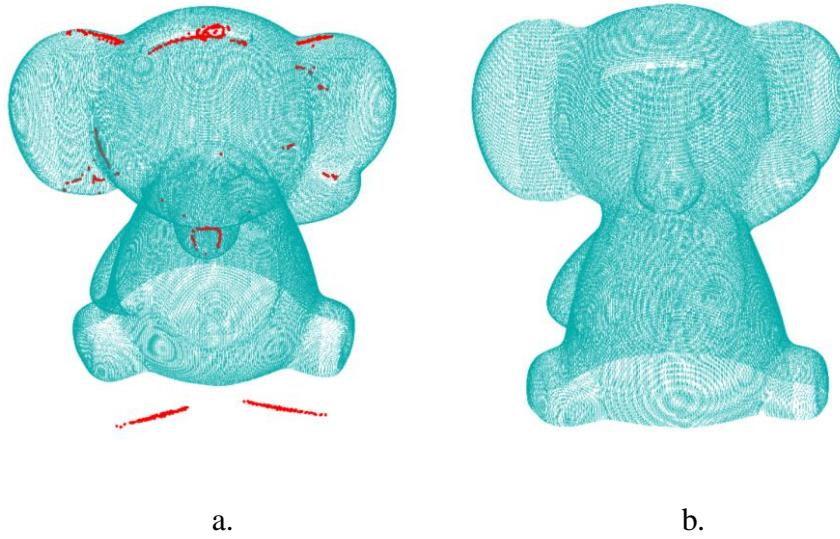
Kullanılan lazer profil algılayıcının belirli bir çalışma aralığı vardır. Ölçüm yaparken sensörden yayılan ışın, sensör ölçüm aralığından daha yakın ya da daha uzağa düşerse, o noktalardan derinlik bilgisi elde edilemez. Bu noktalar için ölçüm sıfır olarak elde edilir. Uygulanan algoritmalarda yanlış sonuçlar almamak için bu noktaların temizlenmesi gerekmektedir. Bu yüzden X, Y ve Z koordinatlarında belirli aralıklar dışına düşen tüm verilerin nokta bulutu kümesinden atılması için filtre kullanılmıştır. Aykırı değer içeren nokta bulutları ve filtre uygulanmış hali Şekil 5.12.'de gösterilmektedir.



Şekil 5.12. Aykırı değer içeren nokta bulutu (a) ve aykırı değer filtresi uygulandıktan sonra nokta bulutu: b) sağ, c) ön, d) sol görünümü

5.1.4.2. Gürültü filtresi

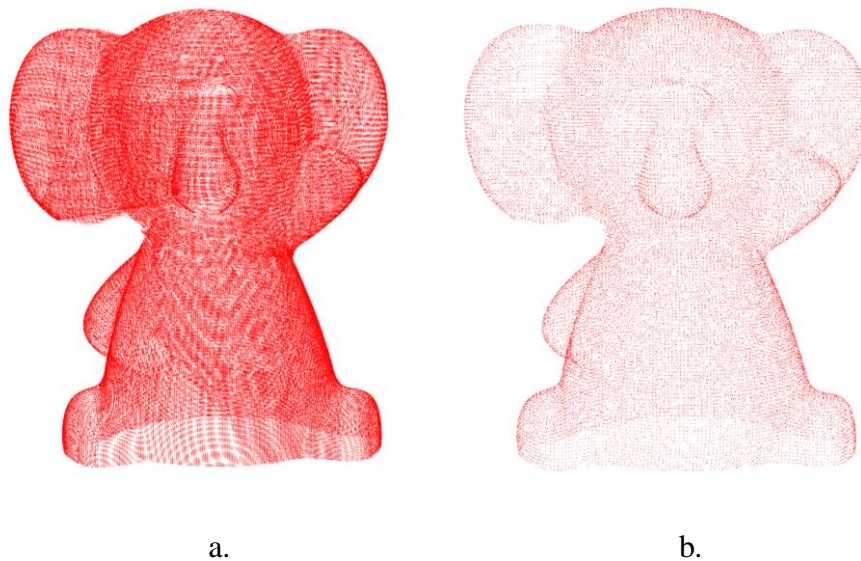
Elde edilen veri üzerinde ölçüm hatasından kaynaklı noktalar filtrelenir. Her nokta için belli bir yarıçap komşuluğuna bakılır. Bu komşuluktaki nokta sayısı belirlenen minimum nokta sayısından az komşuluğa sahip ise o nokta gürültü olarak kabul edilir ve atılır. Şekil 5.13.'de görselleştirilen nokta bulutu içerisindeki kırmızı noktalar filtrelenmiştir.



Şekil 5.13. Gürültü nokta bulutu (a) ve gürültüsüz nokta bulutu (b)

5.1.4.3. Voksel filtresi

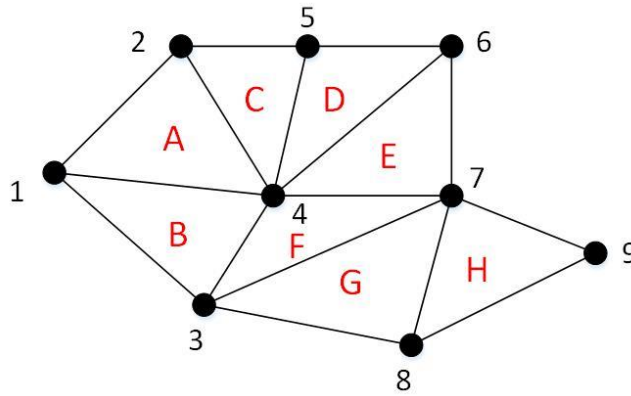
Nokta bulutu verisinde homojen bir dağılım elde etmek için voksel filtresi uygulanmaktadır. Ayrıtlarını belirlediğimiz bir küpün içerisine birden fazla nokta düşüyorsa, bu noktalar küpün merkezindeki tek bir noktaya indirgenir. Böylelikle nokta bulutu verisinde noktalar arasındaki uzaklığın model yüzeyi üzerinde çok farklılık göstermesi engellenmiş olur. Şekil 5.14.'de voksel filtresinin çıktısı gösterilmektedir.



Şekil 5.14. Voksel filtresi uygulanmadan önceki (a) ve uygulandıktan sonraki (b) nokta bulutu

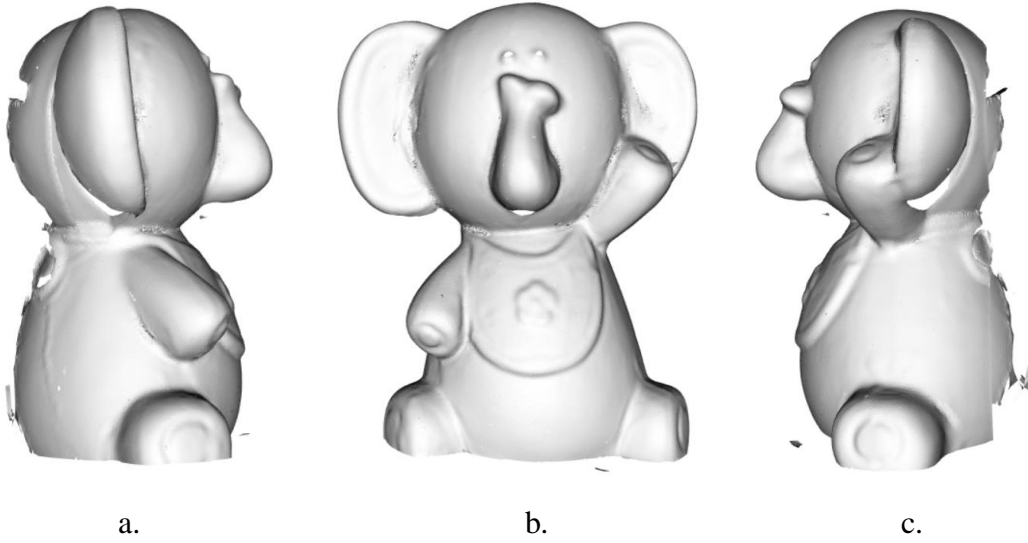
5.1.5. Yüzey oluşturma

3B modelleri tanımlamak için çokgen örgü yapısı yaygın biçimde kullanılan veri formatıdır. Çokgen örgü yapısında oluşturulan modeller üç farklı yapı içerir: Köşe noktaları, kenarlar ve yüzler. Farklı sayıda kenarlar ile ifade edilebilen örgü yapısı genellikle üçgen yapıda oluşturulur. Köşe noktaları pozisyonu ifade ederken, iki köşe noktası arasındaki bağlantı kenarları ve üç kenar ise yüzleri ifade eder. Şekil 5.15.'de köşe noktaları, kenarlar ve yüzlerden oluşan üçgen örgü yapısı verilmiştir.



Şekil 5.15. Çokgen örgü yapısı; köşe noktaları sayı ile ve yüzeyler ise harf ile işaretlenmiştir.

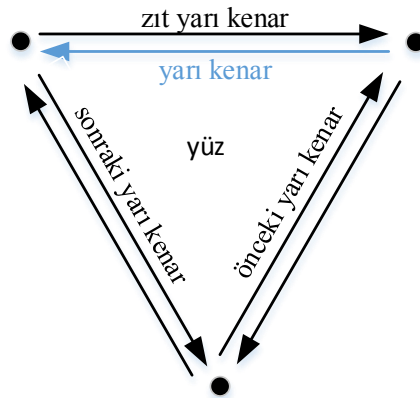
Greedy Projection Triangulation (Marton vd. 2009) yüzey modelleme algoritması kullanılarak, nokta bulutu üzerinde noktaların üçgen örgü yapısında birbirlerine bağlanarak yüzey oluşturma işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu algorithmada her hedef nokta için belirli bir yarıçap içerisindeki komşu noktalar bulunur. Komşu noktaların, hedef nokta ve komşuluğundaki noktaların oluşturdukları yüzeye teğet bir düzleme izdüşümü alınır. Belirlenen maksimum ve minimum üçgen açısı kriterine göre noktalar üçgen örgü yapısına eklenirler. Bu algoritma ile oluşturulan yüzey modeli Şekil 5.16.'da gösterilmektedir.



Şekil 5.16. 3B yüzey modeli: a) sağ, b) ön, c) sol görünümü

5.2. Delik Algılama

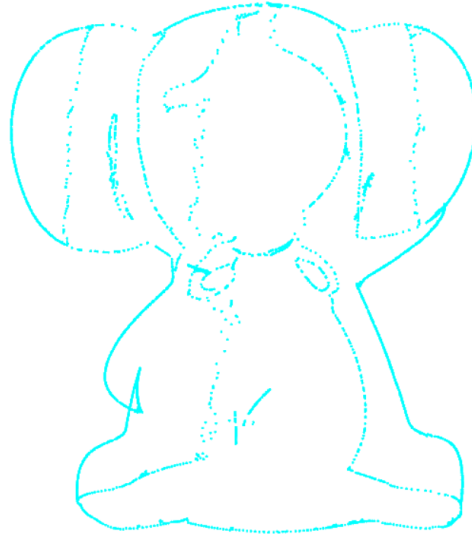
Oluşturulan yüzey modelindeki her üçgen örgü yapısı, her kenar birbirine zıt yönlere iki yarı kenara ayrılan yarı-kenar veri yapısı ile temsil edilmektedir. Bu topolojide noktalar ve yüzeyler açık bir biçimde birbirine bağlanmazlar ancak ilgili yarı kenarlar ile bunlara ulaşılmaktadır. Üçgen örgü yapısına ait tüm bilgi aslında yarı kenarlarda saklanmaktadır. Şekil 5.17.'de bir yarı-kenar veri yapısı örneği verilmektedir.



Şekil 5.17. Yarı-kenar veri yapısı

Bu veri yapısında yarı kenarlara ait köşe nokta, sonraki yarı kenar, önceki yarı kenar ve yüz bilgisine ulaşılmaktadır. Her üçgen örgü yapısındaki bu bilgiler belirli indeks numaraları ile kodlanırlar. Geçersiz yüz indeksine sahip yüzeylerin yarı kenarları sınır yarı

kenar ve bu kenarlara bağlı kse noktaları da sınır nokta olarak kabul edilir. Sınır yarı kenarlar takip edilerek kapalı döngü oluşturan kenarlar delik olarak algılanır ve bu sınır yarı kenarlara ait sınır noktaları belirlenerek her delik için nokta bulutu tanımlanır. Belirlenen deliklere ait nokta bulutu kümeleri Şekil 5.18.'de gösterilmektedir.



Şekil 5.18. Delikleri tanımlayan nokta bulutu kümeleri

5.3. Tekrar Tarama

Bulunan her bir deliğin tekrar taranabilmesi için bir tarama yoluna ihtiyaç duyulur. Tarama yolu için de iki konum bilgisi ve yol boyunca robotun uç ekseninin alacağı yönelim bilgileri gerekmektedir. Bu bilgileri elde edebilmek için gerekli aşamalar aşağıda verilmiştir.

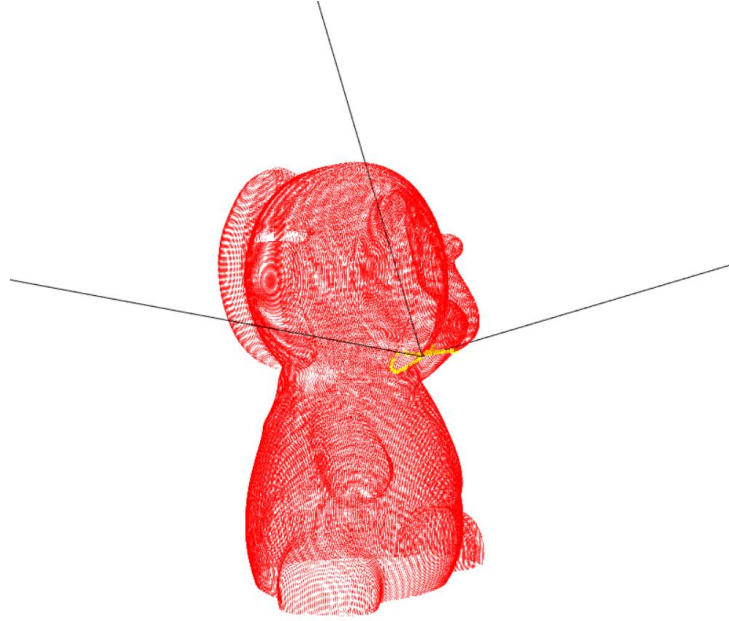
5.3.1. Delik karakteristiği

Delik karakteristiğini çıkarabilmek için deliği tanımlayan nokta kümesinin ağırlık merkezi ve özvektörleri kullanılmıştır. zvektrler Eşitlik 5.4'deki E matrisi ile, ağırlık merkezi ise Eşitlik 5.5'deki C vektörü ile temsil edilmektedir.

$$E_{3 \times 3} = [Eig_{0_{3 \times 1}} \quad Eig_{1_{3 \times 1}} \quad Eig_{2_{3 \times 1}}] \quad (5.4)$$

$$C_{1 \times 3} = [C_x \quad C_y \quad C_z] \quad (5.5)$$

Şekil 5.19.'da görüldüğü gibi özvektörlerden, en küçük özdeğere sahip özvektörün tersi yönelim için kullanılmaktadır.



Şekil 5.19. Delik karakteristiğini tanımlayan özvektörler

5.3.2. Tarama yolu

Bulunan delikleri en etkili şekilde tarayabilmek için tarama yoluna ihtiyaç duyulmaktadır. Belirlenecek olan tarama yolu ile deliğin tek seferde taranabilmesi için delik çapı boyunca tarama yapılması gerekmektedir. 3B veri üzerinden çapı belirlemek yanlış sonuçlar oluşturabileceğinden deliğin izdüşümü alınarak analizler yapılmıştır. Özvektörler delik karakteristiğini ifade ettiğinden dolayı bu vektörler ile oluşturduğumuz düzlem üzerine izdüşüm alınır. Eşitlik 5.6'da belirtilen düzlem parametrelerini belirlemek için Eşitlik 5.7'de verildiği gibi özvektörlerin iki bileşenin vektörel çarpımı ile düzlem normali n bulunur. Normalin X yönündeki bileşeni a parametresine, Y yönündeki bileşeni b parametresine ve Z yönündeki bileşeni c parametresine eşittir. Deliğin ağırlık merkezi Eşitlik 5.9'da verildiği gibi kullanılarak d parametresi de belirlenmiş olur. Bulunan düzlem

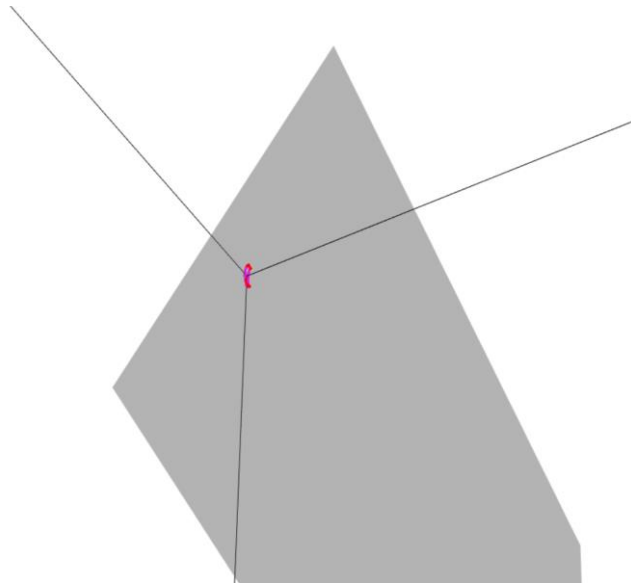
üzerine izdüşüm alınarak nokta kümesi üzerinde çapı buluruz. Şekil 5.20.'de elde edilen düzlem ve bu düzleme nokta bulutunun izdüşümü verilmektedir.

$$a.x + b.y + c.z + d = 0 \quad (5.6)$$

$$n_{1 \times 3} = (Eig_0_{3 \times 1}) \times (Eig_1_{3 \times 1}) \quad (5.7)$$

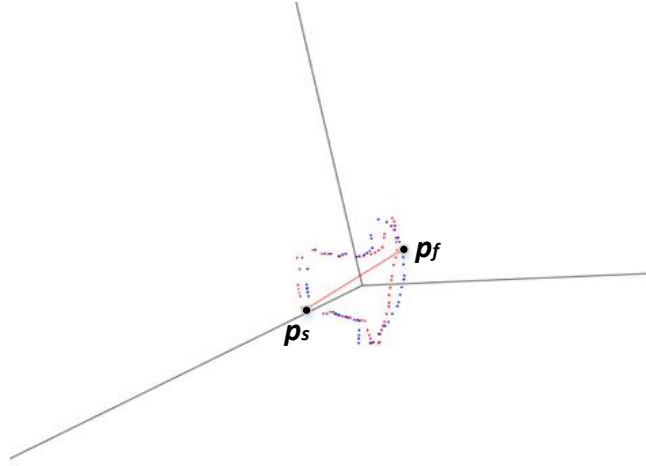
$$a = n(0), \quad b = n(1), \quad c = n(2) \quad (5.8)$$

$$d = -aC_x - bC_y - cC_z \quad (5.9)$$



Şekil 5.20. İz düşüm için tanımlanan düzlem

İzdüşümü alınan nokta bulutu kümesinde iki nokta arasındaki en büyük uzaklık öklit mesafesine göre belirlenir. Bulunan delik çapını tanımlayan $p_{s_{3 \times 1}}$ ve $p_{f_{3 \times 1}}$ noktaları ve uzunluğu Şekil 5.21.'de verilmektedir.



Şekil 5.21. Delğin izdüşümü alınmış şekli ve delğin çapı

Bulunan delğin çapı özvektör tersi yönünde sensörün ölçüm aralığı dikkate alınarak Eşitlik 5.10 ve 5.11 kullanılarak ötelenir. $pp_{s_{1x3}}$ noktası, $p_{s_{1x3}}$ noktasının görüş yönü olarak belirlenen özvektör tersi yönünde sensör görüş aralığı için gerekli olan d_{fov} uzaklığına ötelenmiş halidir. Aynı şekilde $pp_{f_{1x3}}$ noktası da $p_{f_{1x3}}$ noktasının ötelenmiş halidir.

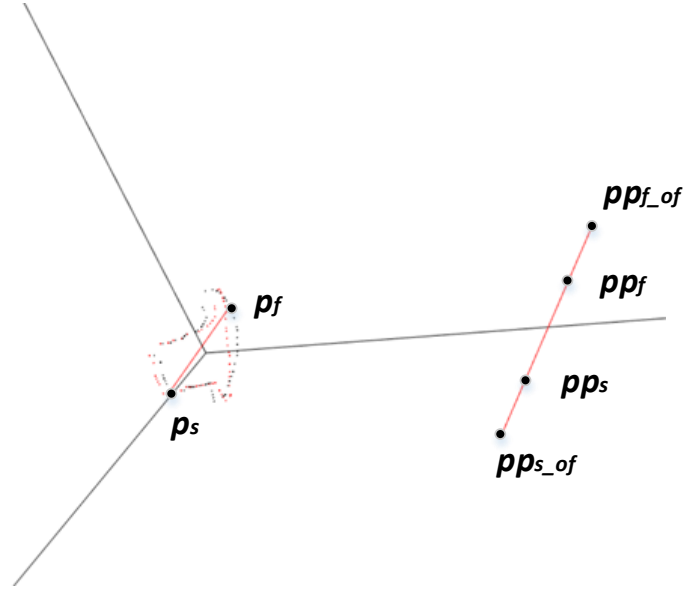
$$pp_{s_{1x3}} = p_{s_{1x3}} - d_{fov} \cdot Eig_{0_{3x1}} \quad (5.10)$$

$$pp_{f_{1x3}} = p_{f_{1x3}} - d_{fov} \cdot Eig_{0_{3x1}} \quad (5.11)$$

Taramadan sonra elde edilen yeni nokta bulutu var olan veriye kayıtlanırken ICP algoritmasının etkili çalışması için, iki nokta bulutunun belirli bir oranda çakışması gerekmektedir. Bu yüzden bulunan yolun, $pp_{s_{1x3}}$ ve $pp_{f_{1x3}}$ arasındaki uzaklığın yarısı kadar her iki tarafına Eşitlik 5.12 ve 5.13 kullanılarak offset eklenerek $pp_{s_{of_{1x3}}}$ ve $pp_{f_{of_{1x3}}}$ hesaplanır. Bu aşamada deliği taramak için gerekli olan tarama yoluna ait başlangıç ve bitiş konumları belirlenmiş olur. Şekil 5.22.'de bulunan tarama yolu görselleştirilmektedir.

$$pp_{s_{of_{1x3}}} = pp_{s_{1x3}} + (pp_{f_{1x3}} - pp_{s_{1x3}}) \cdot (1 + offset) \quad (5.12)$$

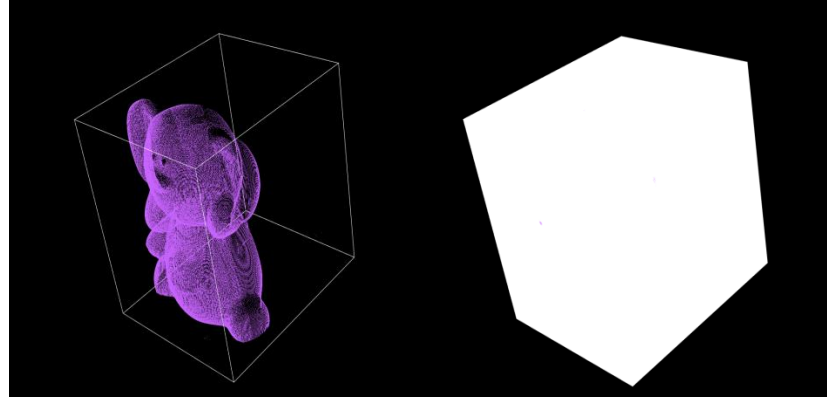
$$pp_{f_{of_{1x3}}} = pp_{f_{1x3}} + (pp_{s_{1x3}} - pp_{f_{1x3}}) \cdot (1 + offset) \quad (5.13)$$



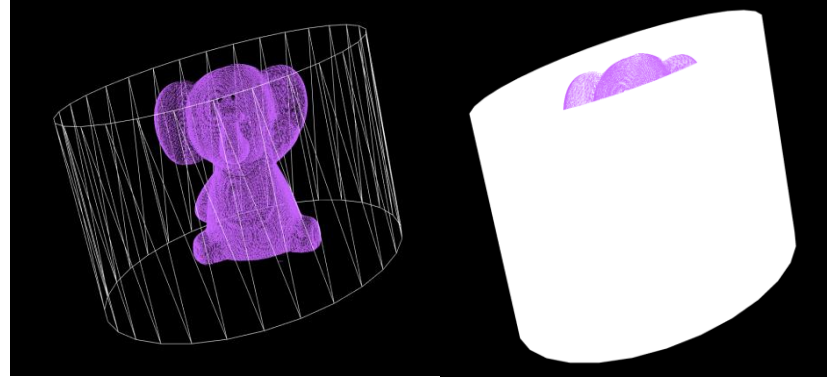
Şekil 5.22. Delik için belirlenen tarama yolu

5.3.3. Tarama yol adayları

Delik algılama algoritması ile birçok delik bulunmuş olur; ancak hepsi anlamlı ve taramaya değer değildir. Bu yüzden bulunan her delik için içerdikleri noktalar arasındaki öklit uzaklıkları hesaplanarak delik çevreleri bulunur. Delikler, bulunan çevre uzunluklarına göre sıralanırlar. Sıralanan deliklerden kaç tanesinin taramaya değer olduğunu belirleyebilmek için elde edilen nesne modelinin çevresi kullanılır. Modelin çevresini hesaplayabilmek için, silindirik ve kübik sınırlayıcı kutular için parametreler belirlenir. Bulunan sınırlayıcı kutular Şekil 5.23.'de verilmektedir.



a.



b.

Şekil 5.23. Nokta bulutu için bulunan sınırlayıcı kutu: a) kübik b) silindirik

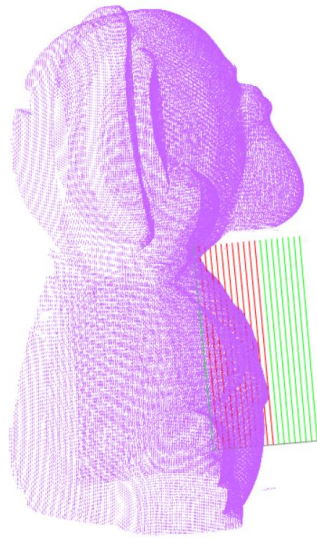
Model çevresine göre belirli bir oranda olan delikler aday olarak belirlenir ve bu delikler için tarama yolu hesaplanır. Hesaplanan tarama yol adayları Şekil 5.24.'de gösterilmektedir.



Şekil 5.24. Delikler için tarama yol adayları

5.3.4. Işın izleme

Özvektörlerin delik yönündeki bileşenin tersi yönündeki sensör görüş yönü olarak kabul ediyoruz. Ancak sensör bu yönden baktığında nesnenin bazı bölgelerinin engellerinden dolayı deliğin tamamını göremeyebilir. Engelli bölgelerin varlığını belirleyebilmek için ışın izleme yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem ile çalışma uzayı sekizli ağaç yapısında oluşturulmuş ve çalışma uzayını belirleyen parametreler için sınırlayıcı kutu parametreleri kullanılmıştır. Bu yöntemde çalışma uzayı içerisinde ışının başlangıç ve bitiş konumlarını belirlenir. Belirlenen ışının temas ettiği sekizli ağaç düğümleri içerisinde modele ait nokta verisi varsa iki nokta engelli alan olarak belirlenir. Bu çalışma yapısı dikkate alınarak bulunan tarama yolu belirli sayıda noktada örneklenmiştir. Şekil 5.25.'de kırmızı çizgiler engelli alanları yeşil çizgiler ise engelsiz alanları temsil etmektedir.



Şekil 5.25. Işın izleme metodu ile bulunan engelli ve engelsiz görüş yönleri

Tarama yönü, yol üzerinde örneklenmiş noktaların birinden deliğin ağırlık merkezine doğrudur. Örneklenen her noktadan deliği tanımlayan noktaların her birine ışın yolları ve engelsiz ışın sayıları bulunur. Örneklenen noktalardan bakıldığında deliğe ait noktalardan en çok sayıda nokta gören yön ağırlık merkezine doğru görüş yönü olarak kabul edilir. Şekil 5.26.'da ışın izleme ile görüş yönü belirleme algoritması verilmektedir.

Algoritma-Işın İzleme ile görüş yönü belirleme

Yönelim başlangıç noktasını tarama yolunun orta noktası olarak ayarla

Yönelim bitiş noktasını deliğin ağırlık merkezi olarak ayarla

Adım sayısı=20

Döngü $i=0$ 'den adım sayısına kadar

Işın bitişini i *adım sayısı kadar tarama yolu bitiş noktasına doğru kaydır

Işın başlangıcını, ışın bitişinin delik ayrıtı üzerindeki karşılığı olarak ayarla

Görülür nokta sayısını = 0

Işın izleme ile engel belirle

Eğer Engel yoksa

Döngü $k=0$ ' dan delik nokta sayısına kadar

Işın başlangıcını delikteki k indisli nokta olarak ayarla

Eğer Engel yoksa

Görülür nokta sayısı++

Döngüyü sonlandır

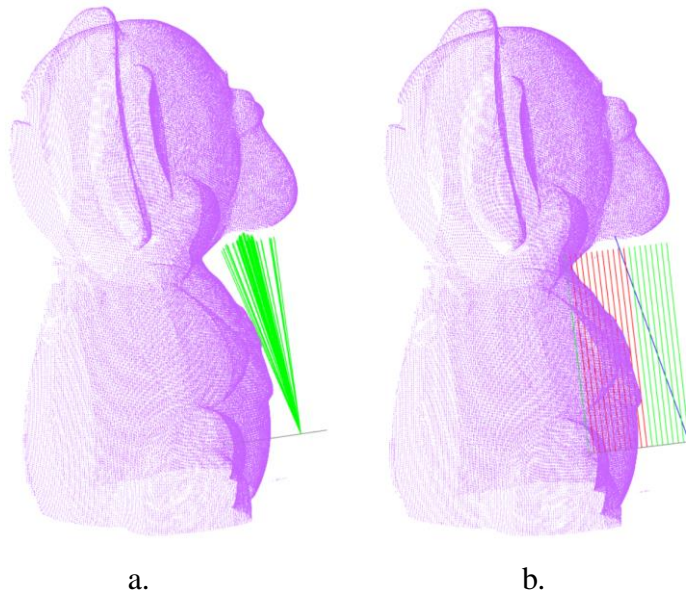
Eğer görünür nokta sayısı bir öncekinde fazla ve delikteki noktaların %60'ını görüyor ise

Yönelim başlangıç noktasına ışın bitişini ata

Döngüyü sonlandır

Şekil 5.26. Işın izleme algoritması

Algoritmaların çıktıları Şekil 5.27.'de gösterilmektedir. Mavi ile gösterilen çizgi en fazla nokta sayısını gören örneklenmiş noktadır ve görüş yön vektörü olarak kabul edilir.

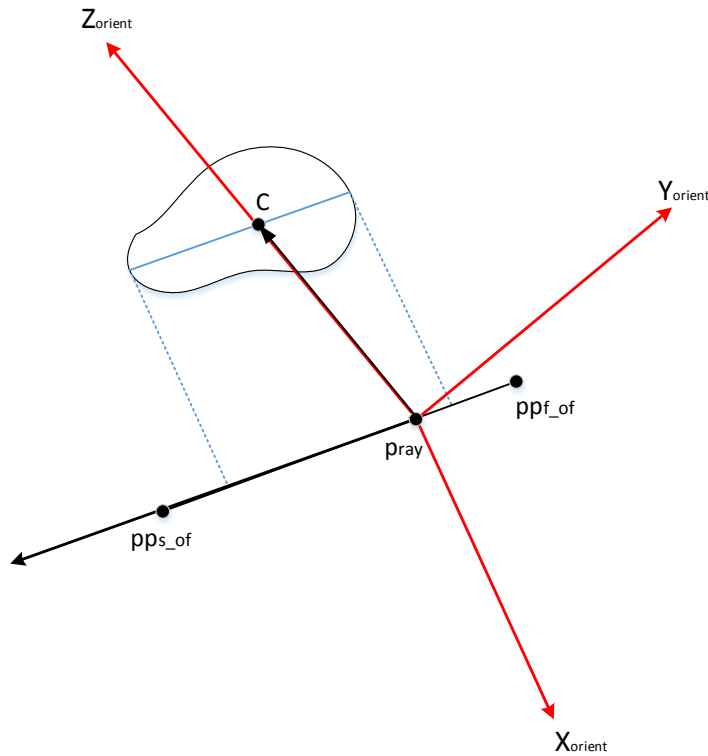


Şekil 5.27. Işın izleme algoritması çıktıları: a) görülen nokta sayısı, b) görüş yön vektörü

5.3.5. Robot yönelimini belirleme

Delik için tarama yolu ve görüş yönü belirlendikten sonra bu koordinatların robota aktarılması gerekmektedir. Robotun hareketi için başlangıç ve bitiş konumu ile birlikte yönelim için Euler açı değerleri gereklidir. Bu çalışmada robot başlangıç ve bitiş konumu arasında sabit yönelim ile doğrusal olarak hareket ettirilir.

Ancak robot X-Y-Z koordinatları ve Z-Y-Z Euler açılarını konum bilgisi olarak kabul ettiğinden dolayı ışın izleme metodunda elde ettiğimiz görüş yön vektörü kullanılarak Z-Y-Z Euler dönüşümüne göre O, A ve T açılarını hesaplamak gerekmektedir. Şekil 5.28.'de bir delik için bulunan görüş yön vektörü ($\overrightarrow{p_{ray}C}$) ve tarama yolu için başlangıç ve bitiş noktaları gösterilmektedir. Görüş yön vektörünü kullanarak, robotun yönelimini belirlemek için, bir ekseninin görüş yön vektörü yönünde olan bir referans noktası tanımlamamız gerekmektedir.



Şekil 5.28. Yönelim koordinat eksenini

Eşitlik 5.14, 5.15 ve 5.16 kullanılarak p_{ray} noktasında yönelim koordinat sistemi oluşturulur.

$$Z_{orient} = (p_{ray} - C) / \|p_{ray} - C\| \quad (5.14)$$

$$X_{orient} = \left(\frac{pp_{s_of} - p_{ray}}{\|pp_{s_of} - p_{ray}\|} \right) \times (Z_{orient}) \quad (5.15)$$

$$Y_{orient} = (X_{orient}) \times (Z_{orient}) \quad (5.16)$$

Koordinat sistemi oluşturulduktan sonra taban eksenine göre rotasyon matrisi Eşitlik 5.17 kullanılarak belirlenir.

$${}_{\text{yönelim}}^{\text{taban}}R_{3 \times 3} = [X_{orient} \quad Y_{orient} \quad Z_{orient}] \quad (5.17)$$

Rotasyon matrisi elde edildikten sonra Eşitlik 5.18 - 5.21 kullanılarak Z-Y-Z Euler konvansiyonuna göre açılar hesaplanmış olur.

$${}_{\text{yönelim}}^{\text{taban}}R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (5.18)$$

$$O = \text{atan2}(r_{23}, r_{13}) \quad (5.19)$$

$$A = \text{atan2}(\sqrt{r_{31}^2 + r_{32}^2}, r_{33}) \quad (5.20)$$

$$T = \text{atan2}(r_{32}, -r_{31}) \quad (5.21)$$

6. GÖRÜŞ PLANLAMA UYGULAMASI

Tez kapsamında geliştirilen algoritma, önceki çalışmamızda (Seçil, S., 2014) oluşturulan sistem kullanılarak, 9x11x6 cm ve 11x12x10 cm boyutlarında Şekil 6.1.'de gösterilen sırasıyla kurbağa ve fil olmak üzere iki nesne üzerinde uygulanmıştır. İlk olarak, modellenecek nesnelere için dört farklı tarama yolu belirlenmiştir. Taramalar sonucu elde edilen modeller kayıtlanıp, yüzey oluşturulduktan sonra model üzerinde tamamlanmamış bölgeler algılanarak bu alanlar için tekrar tarama işlemi gerçekleştirilmiştir. Uygulama, temel olarak 3 aşamadan oluşur: Ön modelleme, delik bulma ve tekrar tarama. Her iki nesne için de tüm işlemlerde aynı parametreler kullanılmıştır.



Şekil 6.1. Uygulamalarda kullanılan nesne-1 ve nesne-2

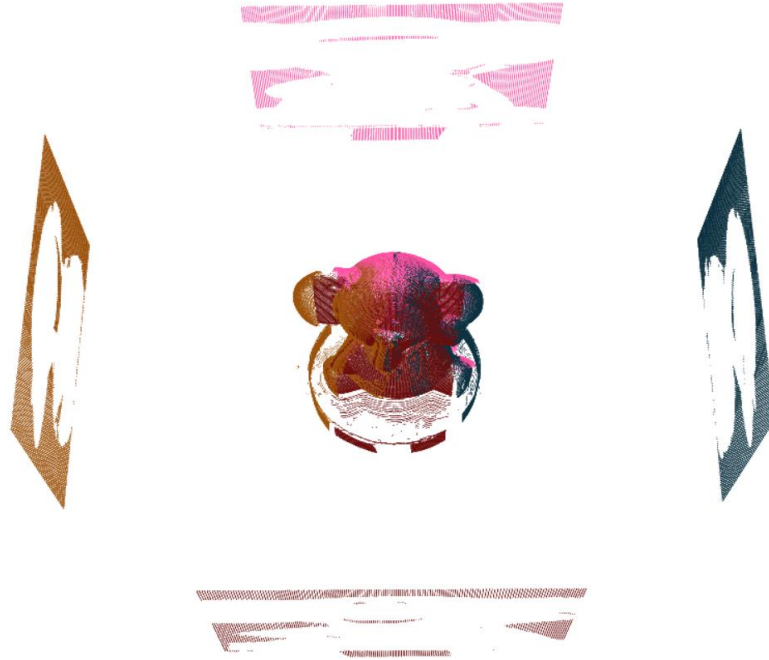
6.1. Ön Modelleme

İlk olarak robot hareket ettirilerek nesne etrafında önceden belirlenmiş olan tarama yolunda sabit yönelim ile doğrusal olarak dört farklı tarama yapılır. Bu aşamada nesne yüzeyinden veriler alınarak 3B nokta bulut modeli elde edilir. Elde edilen dört taramaya ait veriler ICP algoritması ile kayıtlanır ve birleştirilir. ICP algoritmasının çıktısında hala örtüşmeyen noktalar bulunmaktadır. Bu yüzden yumuşatma algoritması ile bu bölgeler arasında geçiş yumuşatılır. Örtüşen ve birleştirilen nokta bulutu kümesi için aykırı değer,

gürültü giderme ve voksel filtreleri uygulanır. En son olarak nokta bulut modelinden yüzey oluşturulur ve modelleme aşaması son bulur.

6.1.1. Nesne-1

Elde edilen dört nokta bulutu kümelerinin görselleştirilmiş hali Şekil 6.2.'de verilmektedir. Şekilde bulunan nokta kümelerinden arka yüzeye ait olan veri kümesi dönüşüm işlemi yapıldıktan sonra görselleştirilmiştir.



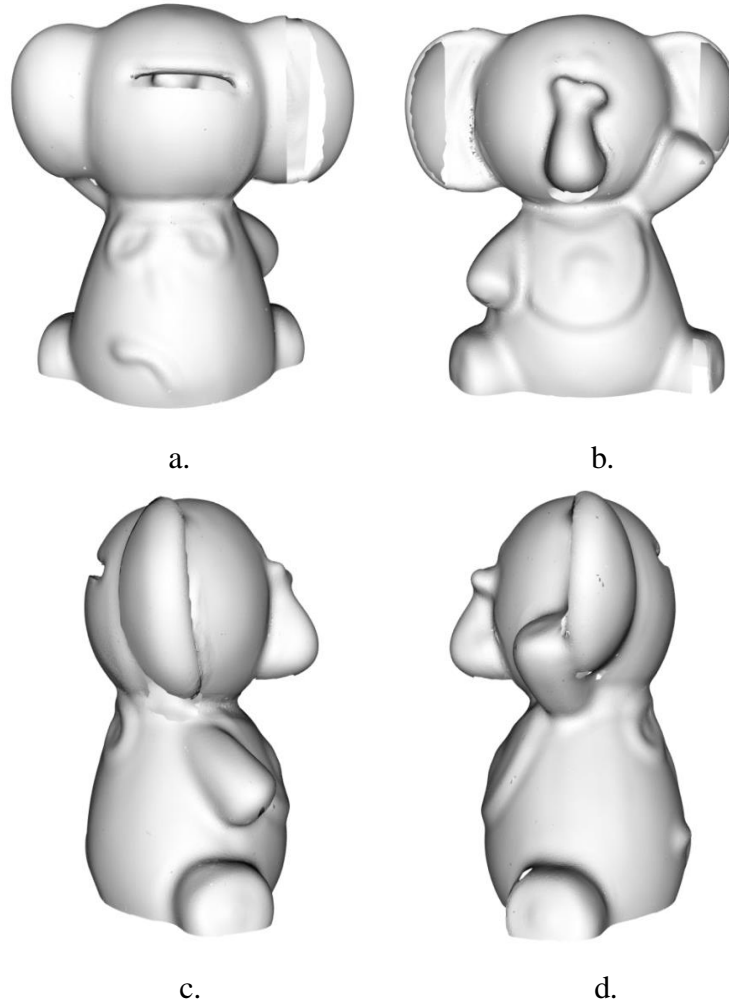
Şekil 6.2. Nesne-1, işlemde geçirilmemiş nokta bulutu kümesi

Tüm algoritmalar uygulandıktan sonra elde edilen nokta bulut modeli Şekil 6.3.'de verilmektedir.



Şekil 6.3. Nesne-1, işlemden geçirildikten sonra nokta bulut modeli

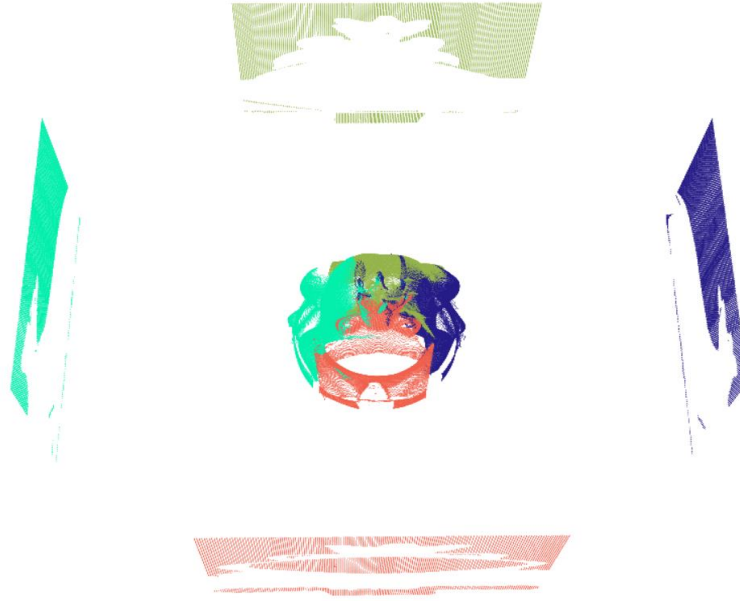
Elde edilen nokta bulutu kümesi üzerinde yüzey oluşturma işlemi gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.4.'de farklı açılardan oluşturulan yüzey modeline ait görseller incelediğinde yüzey modeli üzerinde tamamlanmamış bölgelerin bulunduğu görülmektedir.



Şekil 6.4. Nesne-1, 3B yüzey modeli: a) arka, b) ön, c) sağ, d) sol görünümü

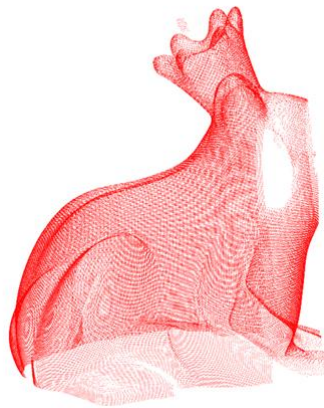
6.1.2. Nesne-2

Belirlenen yollar kullanarak ikinci nesne için de veri alımı gerçekleştirilmiştir. Alınan nokta bulutu kümelerinin görselleştirilmiş hali Şekil 6.5.'de verilmektedir.



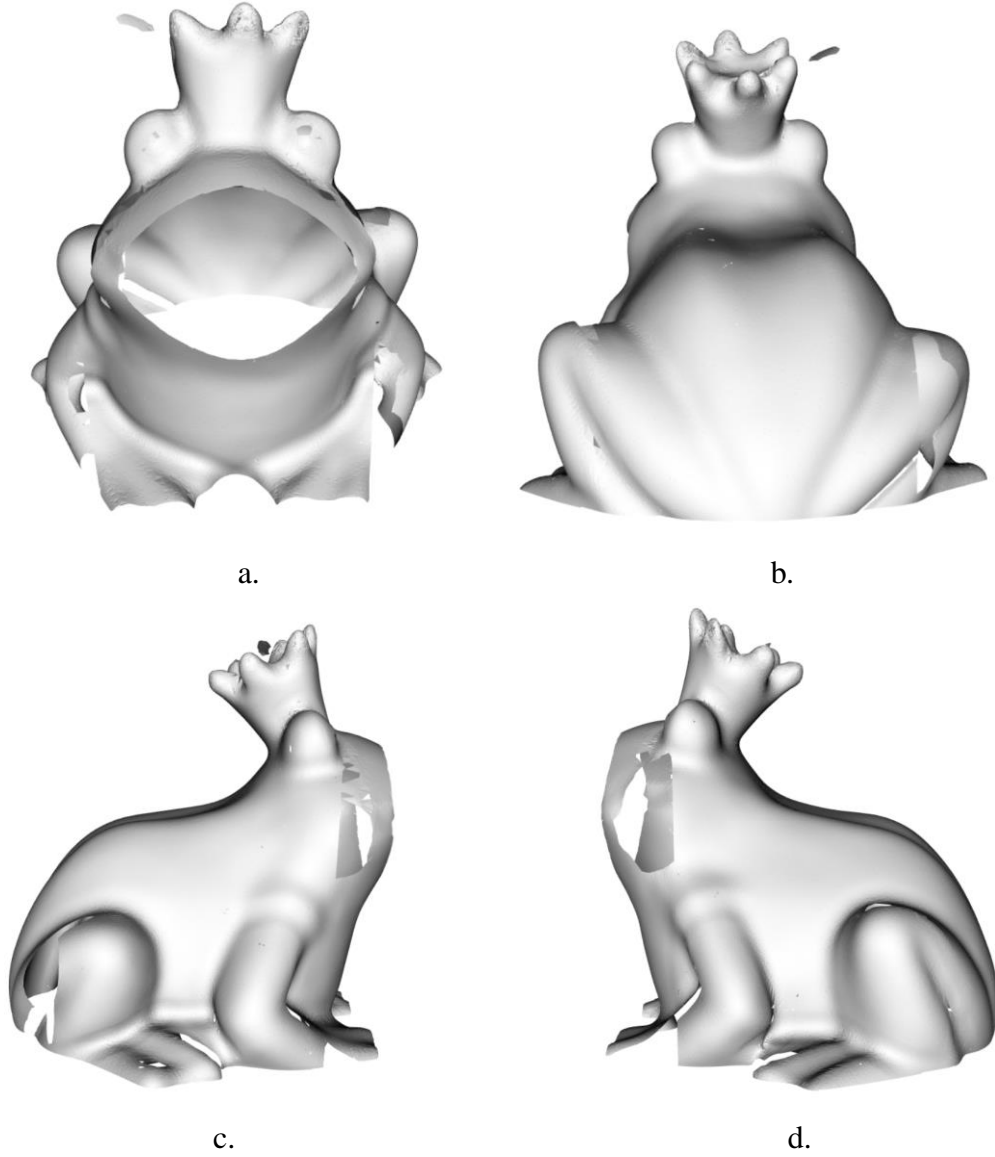
Şekil 6.5. Nesne-2, işleminden geçirilmemiş nokta bulutu kümesi

Tüm algoritmalar uygulandıktan sonra elde edilen nokta bulut modeli Şekil 6.6.'da verilmektedir. Tarama yolları değiştirilmeden ikinci nesne için modelleme işlemi gerçekleştirildiğinden, modelin ön bölgesi algılayıcının görüş aralığına girmemektedir. Bundan dolayı bu bölge için veri elde edilememiştir.



Şekil 6.6. Nesne-2, işleminden geçirildikten sonra nokta bulut modeli

Nokta bulut verisinden oluşturulan yüzeyin farklı açılardan elde edilmiş görseli Şekil 6.7.'de verilmektedir. Dört tarama ile tamamlanmış model elde etmek mümkün değildir. Ancak elde edilen model yeniden tarama için yeterli bilgiyi vermektedir.



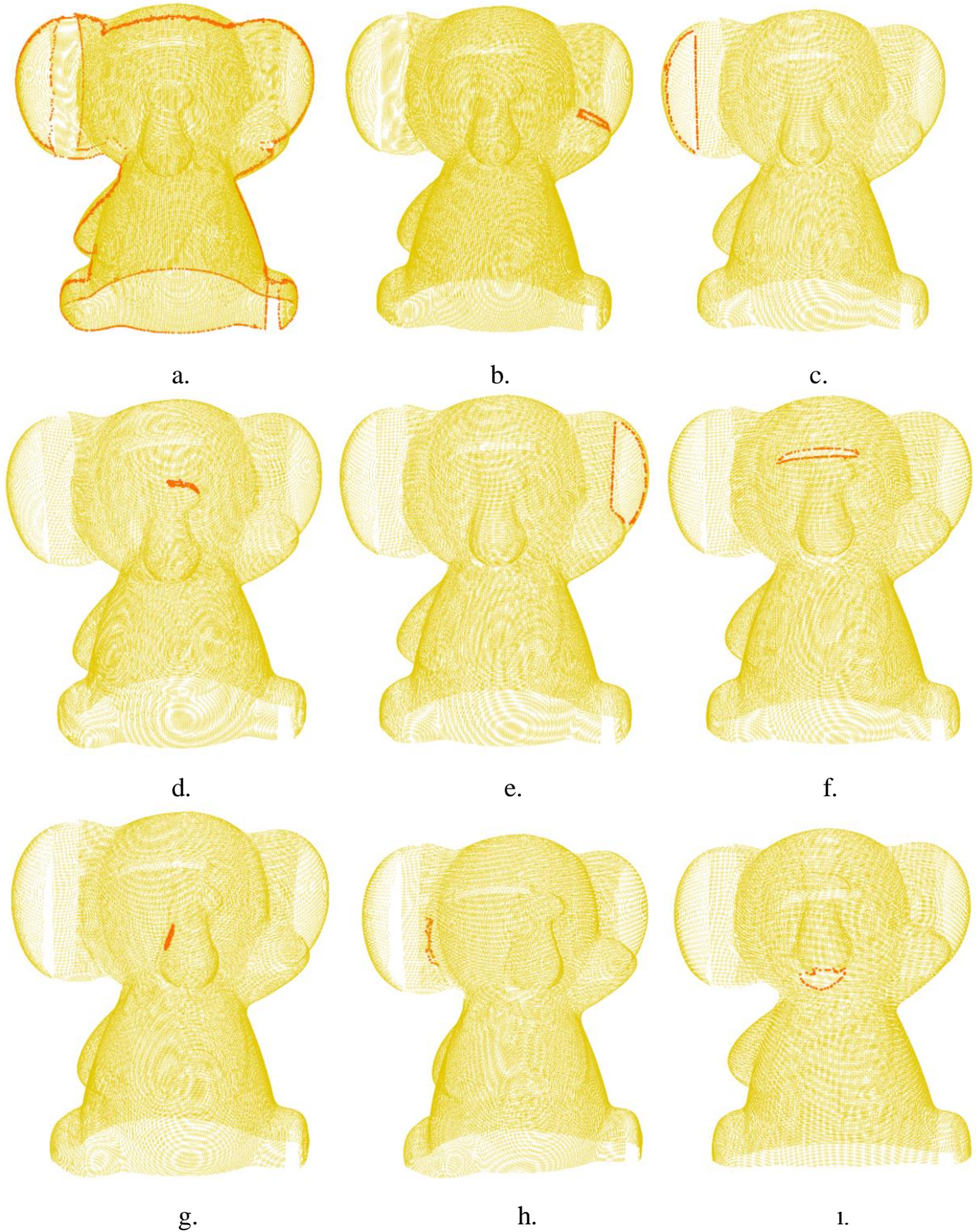
Şekil 6.7. Nesne-2, 3B yüzey modeli: a) ön, b) arka, c) sağ, d) sol görünümü

6.2. Delik algılama

Elde edilen yüzey modelinde tamamlanmamış bölgeler yani delikler bulunmaktadır. Kapalı bir döngü oluşturan sınır noktaları bulunarak delik adayları belirlenmiştir. Bulunan her delik için, noktalar arasındaki öklit uzaklıkları kullanılarak çevreleri bulunur.

6.2.1. Nesne-1

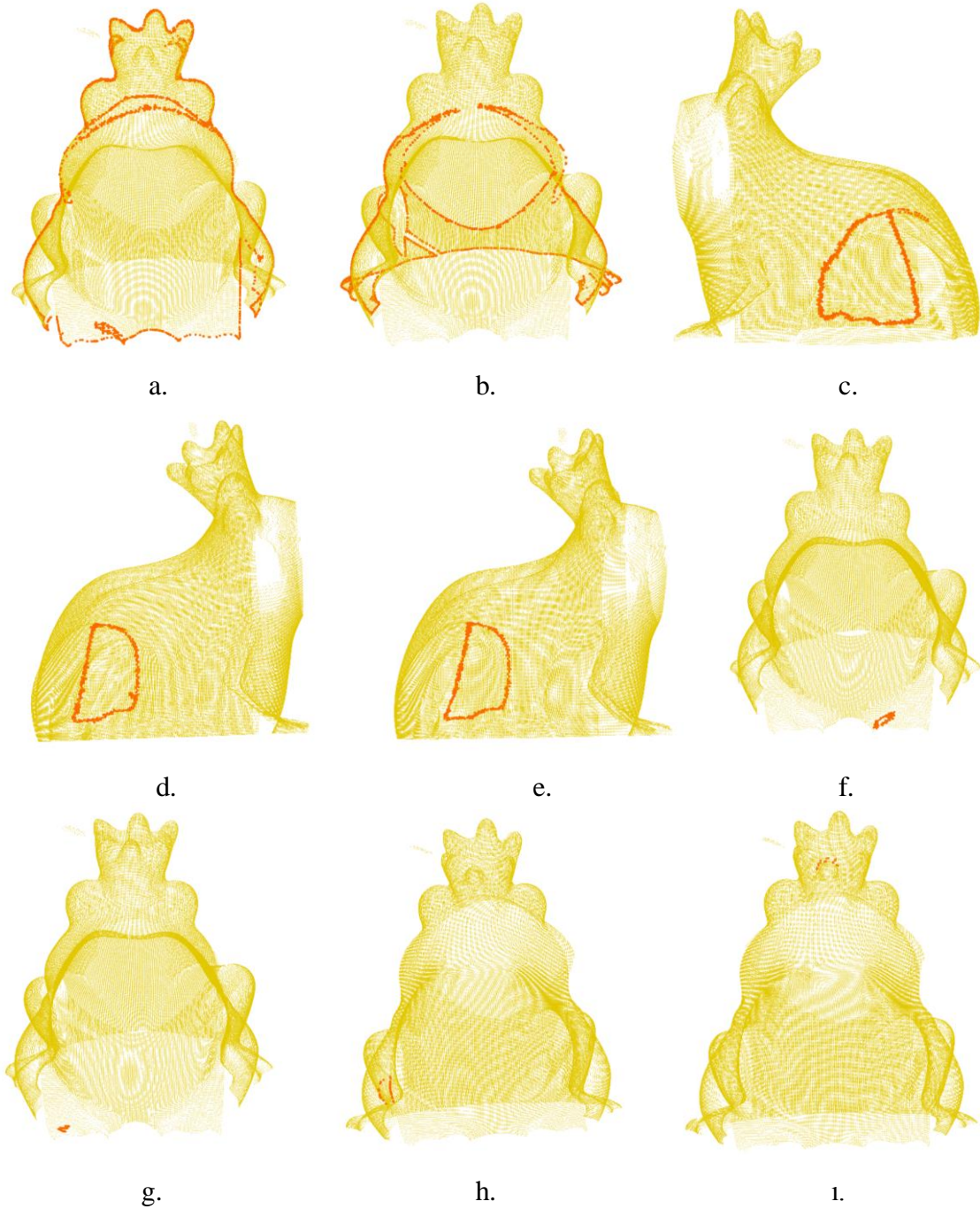
Şekil 6.8.'de model üzerinde bulunan delikler arasında çevre uzunluklarına göre ilk dokuz delik sırasıyla görselleştirilmiştir.



Şekil 6.8. Nesne-1'de model üzerindeki ilk dokuz delik (a-i)

6.2.2. Nesne-2

Şekil 6.9.'da model üzerinde bulunan delikler arasında çevre uzunluklarına göre ilk dokuz delik sırasıyla görselleştirilmiştir.



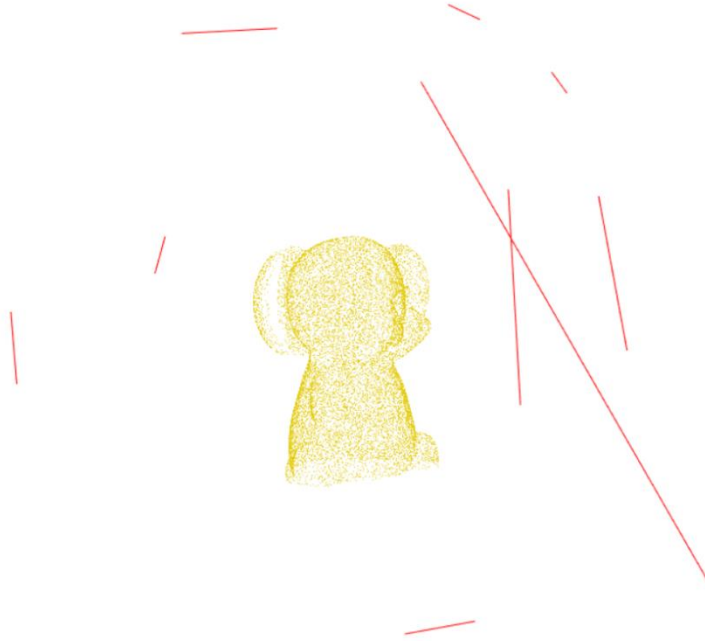
Şekil 6.9. Nesne-2'de model üzerindeki ilk dokuz delik (a-i)

6.3. Tekrar Tarama

Model üzerinde bulunan deliklerin tamamını tekrar taramak anlamlı değildir. Çünkü burada amacımız az tarama ile nesne modelini elde etmek olduğundan dolayı belirli delikler seçilmeli ve taranmalıdır. Bu yüzden bulunan silindirik sınırlayıcı kutunun çevresi ile delik çevresi kıyaslanır ve silindir çevresine göre belirli bir orandan daha büyük delikler anlamlı kabul edilir ve bu delikler için tarama yolu hesaplanır. Belirlenen her yol için robota başlangıç ve bitiş noktası ile yönelim bilgisi verilir ve tarama gerçekleşir.

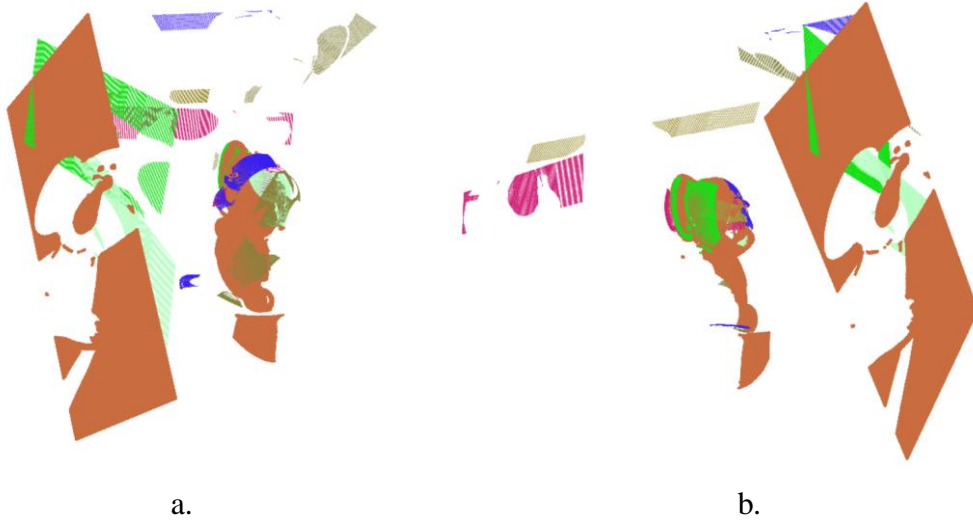
6.3.1. Nesne-1

İlk nesne için Şekil 6.10.'da gösterildiği üzere tarama için anlamlı delik sayısı dokuz olarak bulunmuştur.



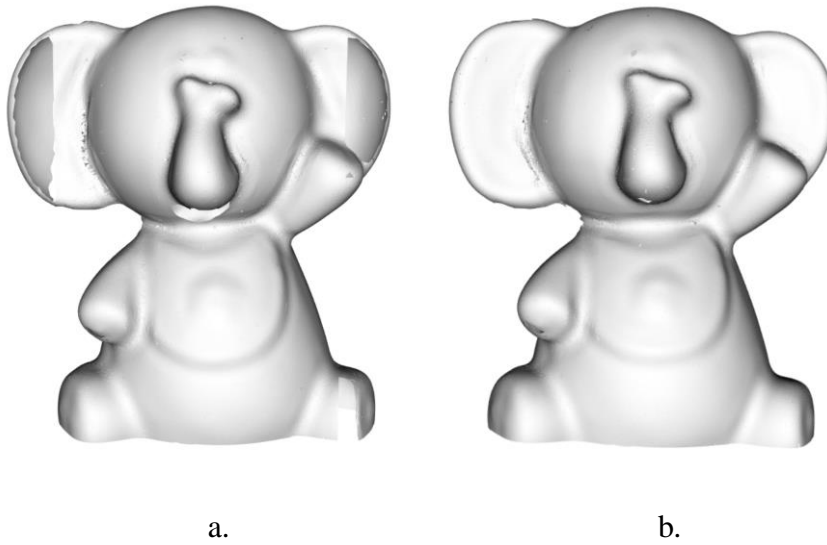
Şekil 6.10. Nesne-1, tarama yol adayları

Belirlenen iki tarama robotun ulaşamayacağı konum ve yönelime sahip olduğundan tarama gerçekleşmemiştir. Geriye kalan yedi tarama sonucu elde edilen tüm nokta bulutu verisi Şekil 6.11.'de verilmektedir.

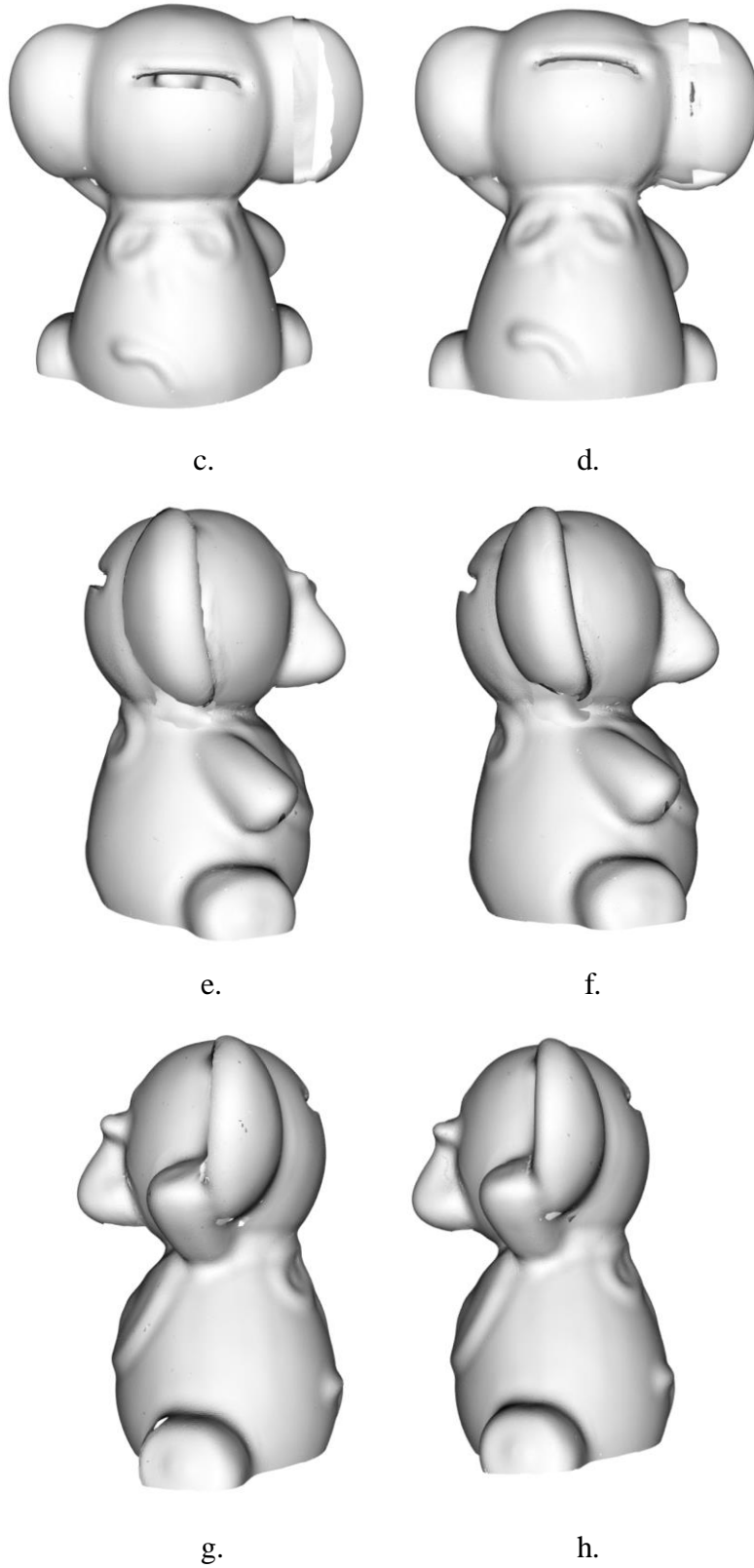


Şekil 6.11. Nesne-1, tekrar tarama ile elde edilen, iki farklı açıdan gösterilen nokta bulutu kümeleri (a ve b)

Deliklerin taranması ile elde edilen yeni nokta bulutu, belirli tarama yollarıyla elde edilen nokta bulutlarıyla tekrar modelleme aşamasına sokulur. Deliklerin taranması ile elde edilen yeni model için oluşturulan yüzey ve tamamlanmamış olan yüzey Şekil 6.12.'de kıyaslanmıştır. Soldaki 3B modeller tamamlanmamış yüzey modeli iken, sağdaki 3B modeller tekrar taramadan sonra iyileştirilen yüzey modelleridir. Ön modelde 407251 üçgen örgü yapısı bulunurken, iyileştirilmiş modelde 633254 üçgen örgü yapısı bulunmaktadır.



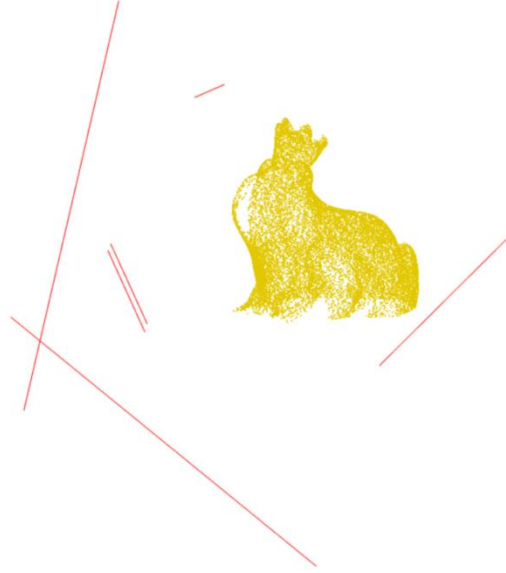
Şekil 6.12. Devam ediyor.



Şekil 6.12. Nesne-1, tamamlanmamış 3B yüzey modeli (a, c, e, g) ve tekrar tarama ile iyileştirilmiş olan 3B yüzey modeli (b, d, f, h) ile karşılaştırılması

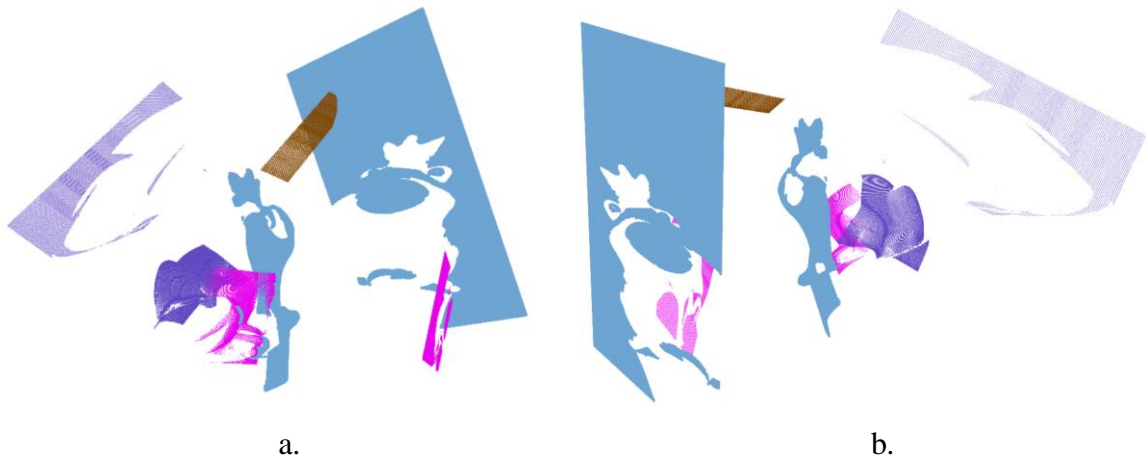
6.3.2. Nesne-2

İkinci nesne için Şekil 6.13.'de gösterildiği üzere tarama için anlamlı delik sayısı altı olarak bulunmuştur.



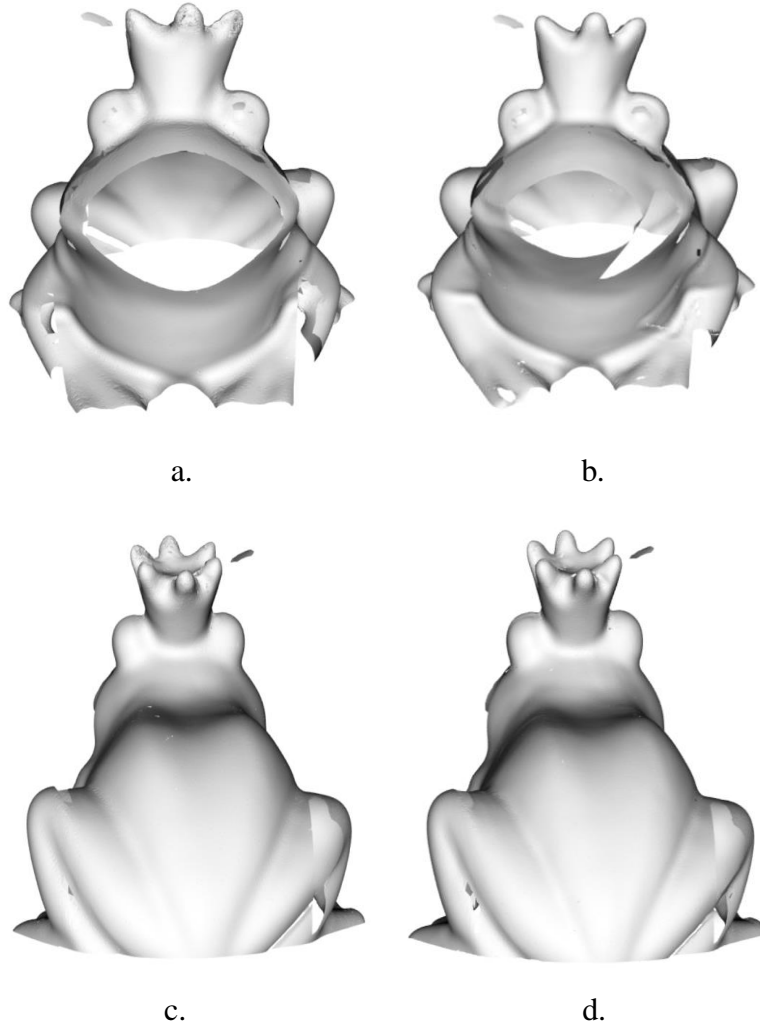
Şekil 6.13. Nesne-2, tarama yol adayları

Ancak bulunan tarama yollarından ikisi çok yakın olduklarından birisi için tarama yapılmamıştır ve bir tarama yolu da çalışma tablasına çarpışacağından dolayı uygulanmamıştır. Geriye kalan dört tarama sonucu elde edilen tüm nokta bulutu verisi Şekil 6.14.'de verilmektedir.

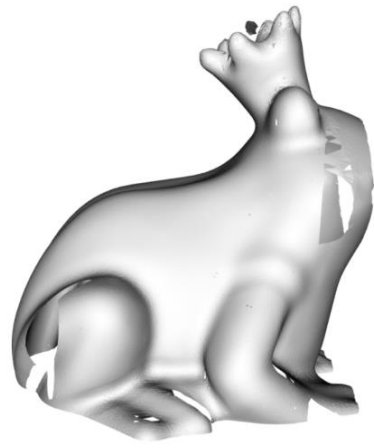


Şekil 6.14. Nesne-2, tekrar tarama ile elde edilen, iki farklı açıdan gösterilen nokta bulutu kümeleri (a ve b)

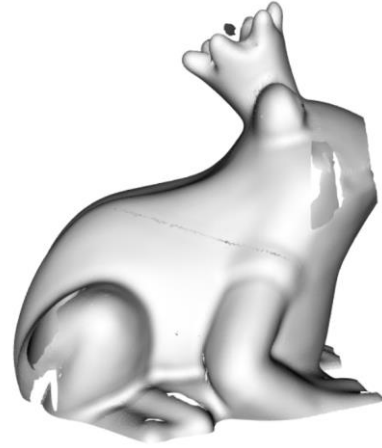
Deliklerin taranması ile elde edilen yeni nokta bulutu, belirli tarama yollarıyla elde edilen nokta bulutlarıyla tekrar modelleme aşamasına sokulur. Deliklerin taranması ile elde edilen yeni model için oluşturulan yüzey ve tamamlanmamış olan yüzey Şekil 6.15.'de kıyaslanmıştır. Soldaki 3B modeller tamamlanmamış yüzey modeli iken, sağdaki 3B modeller ise tekrar taramadan sonra iyileştirilen yüzey modelleridir. Ön modelde 343560 üçgen örgü yapısı bulunurken, iyileştirilmiş modelde 544446 üçgen örgü yapısı bulunmaktadır.



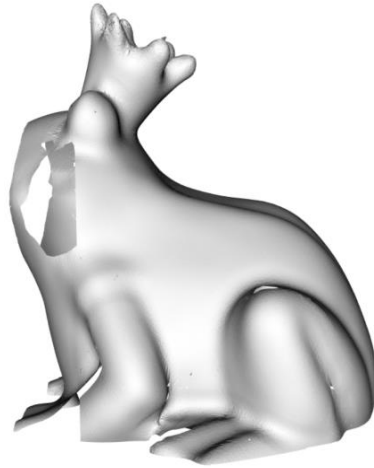
Şekil 6.15. Devam ediyor.



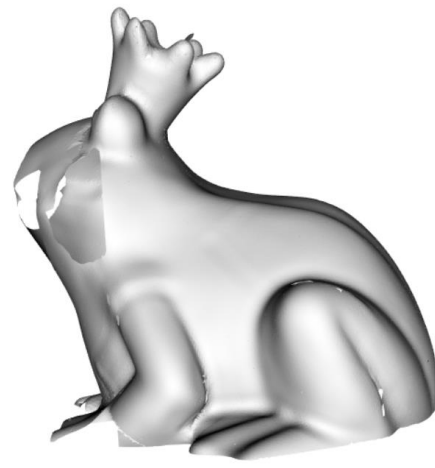
e.



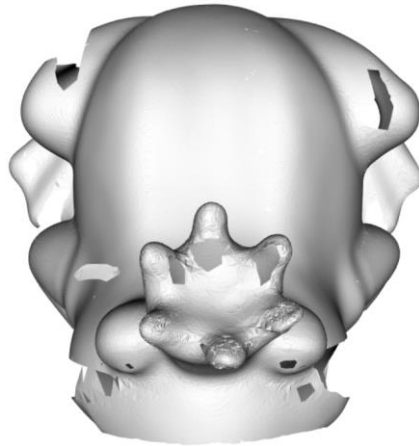
f.



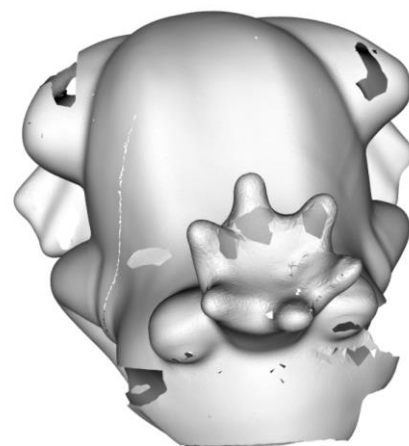
g.



h.



i.



i.

Şekil 6.15. Nesne-2, tamamlanmamış 3B yüzey modeli (a, c, e, g, i) ve tekrar tarama ile iyileştirilmiş olan 3B yüzey modeli (b, d, f, h, i) ile karşılaştırılması

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada endüstriyel robot kolu ve lazer profil algılayıcı ile 3B otonom modelleme işlemi gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Robotun uç eksenine monte edilmiş olan lazer profil algılayıcının nesne etrafından belirlenmiş olan tarama yolunda hareketi ile nesne yüzeyinden derinlik bilgisi elde edilmiştir. Elde edilen nokta bulut kümesi kullanılarak nesnenin kısmen tamamlanmış, yüzey modeli elde edilmiştir. Elde edilen yüzey modeli üzerinde tamamlanmamış tekrar taramaya ihtiyaç duyulan bölgeler bulunarak, bu bölgelerden tekrar veri alınabilmesi için robot denetleyicisine başlangıç ve bitiş konumundan oluşan bir tarama yolu ile yönelim açıları verilmiştir. Tekrar tarama ile elde edilen yeni nokta bulutu kümeleri, mevcut nokta bulutu kümesi ile birleştirilerek güncellenmiş 3B yüzey modeli elde edilmiştir.

Bu çalışma ile otonom 3B modelleme için temel bir yaklaşım sunulmuştur. Sunulan bu yaklaşım ile modelleme aşamasında görüş nokta ve konumlarının belirlenmesinde operatör etkisi büyük oranda azaltılmıştır. Sistem donanımında entegre bir döner tabla olmaması, oluşturulan çalışmanın etkinliğini büyük oranda azaltmaktadır. Nesnenin arka yüzeyini modellemek için oluşturulan sistemden kaynaklı olarak, bulunan en uzun delik, modelin arka ve ön yüzeyi arasındaki bağlantı noktasıdır. Bunun sebebi ise, dönüşüm işlemine uğrayan arka yüzey noktalarına ait normallerin ters yönde oluşmasıdır. Bundan dolayı geçiş noktalarında örgü modelleri birbirine bağlanmadıkları için sınır olarak algılanıyor. Sınırlara yakın diğer delikleri de kapsadıklarından dolayı, tekrar taraması gereken bazı delikler bulunmamaktadır. İlerleyen çalışmalarda mevcut sisteme bir döner tabla eklenmesi planlanmaktadır. Bu sayede donanımsal hatalar model analizini ve tamamlanma oranını etkilemeyecektir. Ayrıca oluşturulan sistemin hiçbir şekilde operatör müdahalesi olmadan tam otonom bir yapıya kavuşabilmesi için belirlenmiş tarama yolları yerine tarama ile elde edilen veri analiz edilerek bir sonraki tarama yolunu nesne şekline uygun olarak belirleyen bir yaklaşım üzerinde çalışılacaktır. Bu yaklaşım ile, tarayıcının nesneye çarpmadan hareketini güvenli bir şekilde gerçekleştirmesi için çarpışmasız yol planlama algoritması geliştirilen yöntem eklenilecektir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Alexa, M., Behr, J., Cohen-Or, D., Fleishman, S., Levin, D., Suva, C. T., 2003, Computing and rendering point set surfaces, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 9(1): p. 19-30.
- Abidi, B.,1995, Automatic sensor placement, in:SPIE Conf. on Intelligent Robots and Computer Vision XIV, vol. 2588, Philadelphia, PA.p. 387–398.
- Banta, J.E., Zhien, Y., Wang, X.Z., Zhang, G., Smith, M.T., Abidi, M.A., 1995, A best-next-view algorithm for three-dimensional scene reconstruction using range images. In XIV session of intel systems and advanced manufacturing symposium, SPIE, p. 418–29.
- Banta, J., Wong, L., Dumont, C., Abidi, M., 2000, A next-best-view system for autonomous 3-D object reconstruction, *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics: Part A*,30 (5) 589–598.
- Besl, P.J., McKay, N.D., 1992, A method for registration of 3-D shapes, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14 (2) 239–256.
- Callieri, M., Fasano, A., Impoco, G., Cignoni, P., Scopigno, R., Parrini, G., Biagini, G., 2004, RoboScan: An Automatic System for Accurate and Unattended 3D Scanning. In: *IEEE 3DPVT*, p. 805–812.
- Chen, S.Y., Li, Y., 2005, Vision sensor planning for 3-D model acquisition, *IEEE TSMC*. 35(5):894–904.
- Connolly, C.I., 1985,The determination of next best views, in: *Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation*, vol. 2, IEEE Computer Society, St. Louis, MO, USA, p.432–435.
- Ding, H., He, B., Zhou, X., 2010, A novel occlusion planning method for unknown 3D objects automatic reconstruction", *AICI (Artificial Intelligence and Computational Intelligence International Conference)*, pp. 463-467.
- He, B.W., Li, Y.F., 2006, A next-best-view method with self-termination in active modeling of 3D objects, in: *IROS'06*, 5345–5350.
- He, B.W, Zhou, X.L., Li, Y.F., 2009, A view planning method for automatic 3D modeling based on the trend surface and limit region, in *Instrumentation and Measurement Technology Conference I2MTC '09. IEEE* ,p.803-808.
- He, B.W., Zhou, X.L., Li, Y.F., 2010, The research of an automatic object reconstruction method based on limit visible region of the laser-scanning vision system, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, no.26, p. 711-719.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Karaszewski, M., Sitnik, R., Bunsch, E., 2012, On-line, collision-free positioning of a scanner during fully automated three-dimensional measurement of cultural heritage objects. RAS. 60(9):1205–1219.
- Khalfaoui, S., Aigueperse, A., Seulin, R., Fougerolle, Y., Fofi, D., 2012, Fully automatic 3D digitization of unknown objects using progressive data bounding box, in: Proceedings of SPIE Electronic Imaging, CA, p.829011.
- Khalfaoui, S., Ralph, S., Fougerolle, Y.D., Fofi, D., 2013, An efficient method for fully automatic 3D digitization of unknown objects ., Computers in Industry, 64(9):1152–1160.
- Kriegel, S., Bodenmüller, T., Suppa, M., Hirzinger, G., 2011, A surface- based next-best-view approach for automated 3D model completion of unknown objects. In: IEEE ICRA, pp. 4869– 4874.
- Kriegel, S., Rink, C., Bodenmüller, T., Narr, A., Suppa, M., Hirzinger, G., 2012, Next-best-scan planning for autonomous 3D modeling. In: IEEE/RSJ IROS, p.2850–2856.
- Kriegel, S., Rink, C., Bodenmüller, T., Suppa, M., 2015 , Efficient next-best-scan planning for autonomous 3D surface reconstruction of unknown objects, Journal of Real-Time Image Processing, Volume 10, Issue 4 , pp 611-631.
- Li, Y.F., Liu Z., Liu, G., 2003, Uncertainty-driven viewpoint planning for 3d object measurements, IEEE ICRA, p.127-132.
- Loriot, B., Ralph, S., Gorria, P., 2008, Non-model based method for an automation of 3D acquisition and post-processing, ELCVIA, 7(3):67–82.
- Marton, Z.C., Rusu, R.B., Beetz, M., 2009, On fast surface reconstruction methods for large and noisy datasets, in Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), p. 3218-3223.
- Massios, N.A., Fisher, R.B., 1998, A Best Next View Selection Algorithm Incorporating a Quality Criterion. In: BMVC(British Machine Vision Association), p. 780–789.
- Maver, J., Bajcsy, R., 1993, Occlusions as a guide for planning the next view, IEEE PAMI. 15:417–433
- Maver, J., Leonardis, A., Solina, F., 1993, Planning the next view using the max-min principle, in CAIP '93: Proceedings of the 5th International Conference on Computer Analysis of Images and Patterns , 543–547.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Munkelt, C., Denzler, J., Kuhmstedt, P., 2006, Incorporation of a-priori information in planning the next best view, in: Proceedings of the ISPRS Commission V Symposium Image Engineering and Vision Metrology, p. 261–268.
- Pito, R., 1999, A Solution to the Next Best View Problem for Automated Surface Acquisition, IEEE PAMI, vol. 21, no. 10, p.1016–1030.
- Seçil, S., 2015, Endüstriyel robot kolları için kolay programlama yöntemi geliştirme, s. 23-46.
- Seçil, S., Turgut, K., Parlaktuna, O., Özkan, M., 3-D visualization system for geometric parts using a laser profile sensor and an industrial robot, Robotics and Manufacturing Automation (ROMA), p.160-165.
- Scott, W.R., Roth, G., Rivest, J.F., 2003, 2014, View planning for automate 3D object reconstruction inspection, ACM Comput. Surv. 35(1), 64–96.
- Tarabanis, K.A., Allen, P.K., Tsai, R.Y.,1995, A survey of sensor planning in computer vision, IEEE Transactions on Robotics and Automation 11 (1), 86–104.
- Torabi, L., Gupta, K., 2012, An autonomous six-DOF eye-in-hand system for in situ 3D object modeling. IJRR. 31(1):82–100.
- Trummer, M., Munkelt, C., Denzler, J., 2010, Online next-best-view planning for accuracy optimization using an extended e-criterion. In: IEEE ICPR, p. 1642–1645.
- Vasquez-Gomez, J.I., Lopez-Damian, E., Sucar, L.E., 2009, View planning for 3d object reconstruction, In: IEEE/RSJ IROS, p. 4015–4020.
- Vasquez-Gomez, J. I., Sucar, L.E., Murrieta-Cid, R., Lopez-Damian, E., 2014, Volumetric Next-best-view Planning for 3D Object Reconstruction with Positioning Error. Int J Adv Robot Syst, 11:159.
- Yuan, X., 1995, A mechanism of automatic 3D object modeling, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence ,17 (3) 307–311.
- Zhang, L., Zuo, J., Yao, X., Zhang, X., Shuai,L., 2015, A robot visual servo-based approach to the determination of next best views, in Mechatronics and Automation (ICMA), IEEE International Conference on ,p.2654-2659.
- Wenhardt, S., Deutsch, B., Angelopoulou, E., Niemann, H., 2007, Active visual object reconstruction using d-, e-, and t-optimal next best views, in: IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Society, p. 1–7.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Wong, L.M., Dumont, C., Abidi, M.A., 1999, Next best view system in a 3-D Object Modeling Task. In: IEEE CIRA, p. 306–311.