

T.C



MARMARA ÜNİVERSİTESİ



TEKNOLOJİ FAKÜLTESİ

MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ

Fotogrametri Yöntemiyle 3D Tarama Sistemi

Abdelwahab Rayis

Muhammed Şeyhoğlu

Dr.Öğr.Üyesi ERSİN TOPTAŞ

İSTANBUL,2025

T.C

MARMARA ÜNİVERSİTESİ



TEKNOLOJİ FAKÜLTESİ

MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ



Fotogrametri Yöntemiyle 3D Tarama Sistemi

Abdelwahab Rayis

(170219922)

Muhammed Şeyhoğlu

(170221997)

Dr.Öğr.Üyesi ERSİN TOPTAŞ

İSTANBUL,2025

TEŞEKKÜR

Araştırma ve uygulama aşamasında yardımlarını esirgemeyen, yol göstericimiz olan sayın Dr. Öğr. Üyesi **ERSİN TOPTAŞ'** a, kullanılan programın öğreniminde yardımcı olup, problemlerin çözümünde katkıda bulunan herkese ve bu uzun süreçte bizi anlayışla karşılayan ailelerimize şükranlarımızı sunmayı bir borç biliriz.

İçindekiler

TEŞEKKÜR.....	iii
İçindekiler	iv
SEMBOL LİSTESİ.....	vi
Kısaltma Listesi	vii
Şekil Listesi	viii
Özet	x
1. Giriş.....	1
1.1. Projenin Amacı.....	1
1.2. Projenin Kapsamı.....	2
1.3. Projenin Önemi	2
2. Literatür Taraması	4
2.1. Fotogrametri Temelleri	4
2.2. 3D Tarama Yöntemleri	5
2.2.1. Temassız Yöntemler	5
2.2.2. Temaslı Yöntemler	6
2.3. Diğer Teknolojilerle Karşılaştırma	6
3. Sistem Mimarisi.....	8
3.1. Mekanik Tasarım	10
3.1.1. Hareket Mekanizması ve Dişli Aktarma Yapısı.....	10
3.1.2. Kamera Taşıyıcı Yapı ve X Eksen Hareketi	11
3.1.3. Sistemin Entegrasyonu ve Tasarım Gerekçesi	11
3.2. Elektronik Tasarım.....	12
3.2.1. Elektronik Bileşenler, Görevleri ve Özellikleri	13
3.2.2. Devre Tasarımı	16
3.3. Yazılım Mimarisi	17
3.4. Görüntü İşleme ve Modelleme Yazılımları	20
4. Uygulama ve Sonuçlar	23
4.1. Örnek Tarama Uygulaması.....	23
4.2. Elde Edilen 3D Modeller.....	24
4.3. Sistem Performans Analizi	26
5. Tartışmalar.....	27

5.1.	Başarılan Hedefler.....	27
5.2.	Karşılaşılan Sorunlar ve Çözüm Yolları.....	27
5.2.1.	Aydınlatma Seviyelerine Göre Karşılaştırma	27
5.2.2.	Fotoğraf Sayılarına Göre Karşılaştırma	30
5.2.3.	Arka Plana Göre Karşılaştırma.....	32
5.2.4.	Döner Tablanın Geometrik Şekline Göre Karşılaştırma	33
5.2.5.	Mekanizmasında Motor Hızı ve Mikroadımlamanın Etkisi	34
5.3.	Sistemin Kısıtları.....	35
6.	Sonuç ve Öneriler	37
6.1.	Genel Sonuçlar	37
6.2.	Gelecek Çalışmalar İçin Öneriler	37
6.2.1.	Mekanik Geliştirmeler	37
6.2.2.	Elektriksel Geliştirmeler	38
6.2.3.	Yazılım ve Otomasyon Geliştirmeleri.....	39
7.	KAYNAKLAR	40
8.	Ekler	42
	ÖZGEÇMİŞLER.....	44

SEMBOL LİSTESİ

N	: Dönüş Sayısı
R	: Yarıçap
nF	: Nanofarad
uF	: Mikrofarad

Kısaltma Listesi

2D	: 2 boyut
3D	: 3 boyut
SFM	: Hareketten Yapı Çıkarımı (Surface From Motion)
MVS	: Çoklu Görüntüden Stereo Eşleşme (Multi-View Stereo)
PMVS	: Yama Tabanlı MVS (Patch-Based MVS)
CMVS	: Görünümleri Gruplayarak MVS İşleme (Clustering Views For MVS)
CAD	: Bilgisayar Destekli Tasarım (Computer Aided Design)
CMM	: Koordinat Ölçüm Makinesi (Coordinate Measuring Machine)
CPU	: Merkezi İşlem Birimi (Central Processing Unit)
GPU	: Grafik İşlem Birimi (Graphics Processing Unit)
GUI	: Grafikselle Kullanıcı Arauüzü (Graphical User Interface)
IP	: İnternet Protokolü (Internet Protocol)
SCP	: Güvenli Dosya Kopyalama Protokolü (Secure Copy Protocol)
MP	: Megapixel
GB	: Gigabyte
CSI	: Kamera Seri Arayüzü (Camera Serial Interface)
GPIO	: Genel Amaçlı Giriş-Çıkış Pinleri (General Purpose Input/Output)
EMF	: Elektromotor Kuvvet (Electromotive Force)
DC	: Doğru Akım (Direct Current)
LCD	: Sıvı Kristal Ekranı (Liquid Crystal Display)
LED	: Işık Yanan Diyot (Light Emitting Diode)
SMD	: Yüzeye Montajlı Elektronik Bileşen (Surface Mount Device)
PCB	: Baskılı Devre Kartı (Printed Circuit Board)

Şekil Listesi

Şekil 1-1 Gerçek İle Taranan Fotoğraf Arası Karşılaştırma.....	1
Şekil 2-1 Nirengi Noktasını Gösteren Stereo Fotogrametri Tekniğinin Temsili [3]	4
Şekil 2-2 SFM Prosesi [2].....	5
Şekil 3-1 Tasarlanan Sistem	8
Şekil 3-2 Sistemin Akış Şeması	9
Şekil 3-3 Sistemin Mekanik Tasarımı.....	10
Şekil 3-4 Büyük ve Küçük Halka	10
Şekil 3-5 Döner Tabla.....	11
Şekil 3-6 Sistemin İç Tasarımı	11
Şekil 3-7 Sistem Farklı Açılardan Çekilirken Durumu	12
Şekil 3-8 Elektronik Sistem Tasarımı	12
Şekil 3-9 Raspberry Pi 4 Pinleri [16].....	13
Şekil 3-10 Raspberry Pi Camera Module V2 [17]	14
Şekil 3-11 NEMA 17 Step Motor [18]	14
Şekil 3-12 DRV8825 Step Motor Sürücüsü Ve Mikrodenetleyici İle Bağlantısı [18]	16
Şekil 3-13 Devre Çizimi	16
Şekil 3-14 Lehimli Devre	17
Şekil 3-15 Raspberry Pi Kod Algoritması	18
Şekil 3-16 Kullanıcının Fotoğraf Sayısı Girmesi	19
Şekil 3-17 Çekilen Fotoğrafların Raspberry Pi’da Kaydedilmesi	19
Şekil 3-18 Çekilen Fotoğrafların Bilgisayarda Kaydedilmesi İçin Kullanıcının Şifre Girme	20
Şekil 3-19 Program Yazılım Algoritması	20
Şekil 3-20 VisualSFM Arayüzü	21
Şekil 3-21 3D Yeniden Yapılandırma (3D Reconstruction).....	21
Şekil 3-22 Yoğun Yeniden Yapılanma (Dense Reconstruction)	21
Şekil 4-1 Tarama İşlemi.....	23
Şekil 4-2 Beyaz Arka Planlı	23
Şekil 4-3 Fotoğraf Seti.....	24
Şekil 4-4 İki Farklı Fotoğraftaki Özellik Eşleştirme İşlemi (feature matching)	24
Şekil 4-5 3D Reconstruction Uygulama	25
Şekil 4-6 Dense Reconstruction.....	25
Şekil 4-7 Meşleme İşlemi (Meshing Process)	26
Şekil 5-1 Çok Düşük Aydınlatmadaki Objeler ve Point Cloud Sayısı	28
Şekil 5-2 Düşük Aydınlatmadaki Objeler ve Point Cloud Sayısı.....	28
Şekil 5-3 Orta Aydınlatmadaki Objeler ve Point Cloud Sayısı.....	28
Şekil 5-4 Yüksek Aydınlatmadaki Objeler ve Point Cloud Sayısı.....	29
Şekil 5-5 Çok Yüksek Aydınlatmadaki Objeler ve Point Cloud Sayısı	29
Şekil 5-6 Farklı Aydınlatma Düzeylerinde Dense Point Cloud Üretimi	30
Şekil 5-7 25 Fotoğraf 3D Yeniden Yapılanma, Dense ve Point Cloud Sayısı.....	30
Şekil 5-8 50 Fotoğraf 3D Yeniden Yapılanma, Dense ve Point Cloud Sayısı.....	30
Şekil 5-9 100 Fotoğraf 3D Yeniden Yapılanma, Dense ve Point Cloud Sayısı.....	31

Şekil 5-10 200 Fotoğraf 3D Yeniden Yapılanma, Dense ve Point Cloud Sayısı	31
Şekil 5-11 300 Fotoğraf 3D Yeniden Yapılanma, Dense ve Point Cloud Sayısı	31
Şekil 5-12 Farklı Çekilen Fotoğraf Sayılarına Göre Dense Point Cloud Üretimi.....	32
Şekil 5-13 Beyaz Arka Planlı Dense ve Point Cloud Sayısı.....	32
Şekil 5-14 Yarı Beyaz – Yarı Kahverengi Zemin Arka Planlı 3D Yeniden Yapılanma ve Point Cloud Sayısı.....	33
Şekil 5-15 Normal Çevresel Arka Planlı 3D Yeniden Yapılanma	33
Şekil 5-16 İlk Kullanılan Döner Tabla (Yalpalama Yapan)	33
Şekil 5-17 Nesne ve Yalpalama Yapan Döner Tabla İle Çekilen Nesnenin Dense Point Cloud Oluşumu	34
Şekil 5-18 Yeniden Tasarlanan Dengeli Döner Tabla.....	34
Şekil 5-19 Mikro Adımlama Pinleri [14]	35
Şekil 6-1 Tarama Örnekleri	37
Şekil 6-2 SMD Tasarımı İçin PCB Devre Çizimi, Katman ve 3D Modeli	38
Şekil 8-1 Mekanik Parçalar	42
Şekil 8-2 Elektronik Bölümünde Tasarlanan Devrenin PCB Katmanı ve 3D Modeli.....	42
Şekil 8-3 Raspberry Pi Kodu (Python).....	43

Tablo Listesi

Tablo 1 Step, DC ve Servo Motor Arasında Karşılaştırma	15
Tablo 2 Aydınlatma Etkisi	26
Tablo 3 Mikro Adımları	34

Özet

Bu çalışmada, fotogrametri yöntemi kullanılarak 3D modelleme yapabilen yarı otomatik bir tarama sistemi geliştirilmiştir. Sistem; mekanik hareket kabiliyeti, görüntü işleme ve yazılım desteğiyle entegre çalışarak, küçük ve orta boyutlu nesnelerin dijital ortamda yüksek hassasiyetle modellenmesini amaçlamaktadır. Fotogrametri, yalnızca fotoğraflar kullanarak 3D modelleme yapılabilmesini sağladığı için düşük maliyetli, taşınabilir ve erişilebilir bir çözüm sunar. Geliştirilen sistemde Raspberry Pi mikrodenetleyicisi ile motorlar ve kamera senkronize biçimde kontrol edilmiş; elde edilen görüntüler Wi-Fi aracılığıyla bilgisayara aktarılmış ve VisualSFM yazılımı ile nokta bulutu oluşturularak 3D modelleme süreci tamamlanmıştır.

Yazılım tarafında tam otomatik bir yapı henüz sağlanamamış olsa da, fotoğraf çekimi ve veri aktarımı gibi önemli adımlar otomasyona yakın şekilde yürütülmüştür. Sistem, mekanik, elektronik ve yazılımsal olarak modüler bir yapıda tasarlanmış ve bütünleşik olarak test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, sistemin hedeflenen doğrulukta çalıştığını ve pratik kullanım için uygun bir çözüm sunduğunu göstermektedir.

Bu projenin ilerleyen aşamalarda daha gelişmiş mekanik tasarım, standart elektronik devre yapıları ve tam otomasyon destekli yazılım mimarisi ile daha kararlı, verimli ve yüksek performanslı bir 3D tarama sistemi haline getirilebileceğine inanıyoruz.

Anahtar Kelimeler: Fotogrametri, 3D Tarama, Raspberry Pi, Görüntü İşleme, VisualSFM, Nokta Bulutu (Point Cloud), Structure From Motion (SFM), 3D Rekonstrüksiyon, Kamera Kalibrasyonu, Taşınabilir Tarama Cihazı, Dijital Modelleme, Otomatik Görüntüleme Sistemi, Python Programlama, Donanım Entegrasy

1. Giriş

Günümüz dünyasında dijital dönüşüm, üretimden tasarıma, kültürel mirasın korunmasından sanayiye kadar birçok alanda 3D modelleme tekniklerine olan ilgiyi artırmıştır. Nesnelerin dijital ortama doğru, ölçülebilir ve görsel olarak gerçekçi şekilde aktarılması ihtiyacı, 3D tarama sistemlerinin gelişimini hızlandırmıştır. Bu gelişim sürecinde, hem ekonomik hem de taşınabilir olması nedeniyle fotogrametri yöntemi ön plana çıkmaktadır.

Fotogrametri, bir nesnenin farklı açılardan çekilmiş fotoğraflarından geometrik veriler elde edilmesini sağlayan bir tekniktir. Bu yöntem, lazer tarama gibi yüksek maliyetli sistemlere kıyasla daha düşük donanım gereksinimleriyle uygulanabilir olması nedeniyle özellikle küçük ve orta ölçekli projelerde tercih edilmektedir. Gelişen açık kaynak yazılımlar ve mikrodenetleyici teknolojileri sayesinde fotogrametri sistemleri daha erişilebilir hale gelmiştir. Bu çalışmada, fotogrametri temelli, taşınabilir ve kullanıcı dostu bir 3D tarama makinesi tasarlanmış ve prototipi üretilmiştir. Sistem; mekanik yapı, elektronik donanım ve yazılım bileşenlerinin bütünleşik bir şekilde çalıştığı, otomasyona yakınlaştırılmış bir yapıda oluşturulmuştur. Tarama işlemi sırasında kamera, farklı açılardan nesne görüntüleri toplamak üzere motorlarla kontrol edilmekte, görüntüler Raspberry Pi aracılığıyla bilgisayara aktarılmakta ve VisualSFM yazılımı ile 3D model üretimi gerçekleştirilmektedir. Şekil 1.1’de sistemin çıktısı ile gerçek parça gösterilmiştir.

Projede kullanılan yöntemler; düşük maliyetli bileşenlerle yüksek doğruluklu tarama elde etme, sistemin taşınabilir ve modüler yapıda olması ve gelecekte tam otomasyona dönüştürülebilir bir altyapı oluşturulması hedeflerini esas almaktadır. Bu bağlamda, çalışmanın bir mühendislik ürünü olarak geliştirilmesi hem uygulamalı deneyim hem de endüstriyel çözümler açısından önemli katkılar sağlamaktadır.



Şekil 1-1 Gerçek İle Taranan Fotoğraf Arası Karşılaştırma

1.1. Projenin Amacı

Bu projenin amacı, fotogrametri yöntemiyle küçük ve orta boyutlu nesnelerin 3D modellerini oluşturabilen, taşınabilir ve düşük maliyetli bir tarama sistemi geliştirmektir. Sistem; yazılım ve donanım bileşenlerinin entegre çalıştığı, kullanıcı dostu bir yapıya sahiptir. Maksimum tarama hacmi 11 cm³ ile sınırlıdır ve en fazla 1 kg ağırlığındaki nesneler taranabilir.

Projede hedeflenen başlıca amaçlar şunlardır:

- Fotogrametri tekniğiyle çalışan bir tarama algoritması geliştirmek ve farklı açılardan alınan görüntülerden 3D model üretebilmek,
- Raspberry Pi tabanlı mikrodenetleyici ile step motor ve kamera entegrasyonu sağlayarak otomatik veya yarı otomatik fotoğraf çekim sürecini yürütmek,

- VisualSFM gibi açık kaynak yazılımlar kullanarak nokta bulutu üretimi ve modelleme yapmak,
- Kullanıcıların sistemi rahatlıkla kullanabilmesini sağlayacak basit ve etkili bir kontrol yapısı oluşturmak,
- Taşınabilir, modüler ve ekonomik bir sistem mimarisi geliştirerek saha ve laboratuvar ortamlarında kullanılabilir bir cihaz ortaya koymak.
- Bu proje ile birlikte, yüksek maliyetli profesyonel 3D tarayıcı sistemlerine alternatif olabilecek, yerli ve ulaşılabilir bir çözüm üretilmesi amaçlanmaktadır.

1.2. Projenin Kapsamı

Bu proje, fotogrametri temelli bir 3D tarama sisteminin tasarımı, prototip üretimi ve temel işlevselliğinin test edilmesini kapsamaktadır. Projenin kapsamı; mekanik tasarım, elektronik devre yapısı ve yazılım geliştirme olmak üzere üç ana teknik bileşeni içermektedir. Ayrıca, sistemin entegrasyonu, test edilmesi ve elde edilen çıktılarına göre değerlendirilmesi de çalışmanın önemli parçalarındandır.

Proje kapsamı şu temel unsurları içermektedir:

- Mekanik Tasarım: Nesnenin döndürülmesini ve kameranın farklı açılarda konumlanmasını sağlayan iki eksenli hareket sisteminin tasarımı ve üretimi. Parçalar CAD ortamında modellenmiş, 3D yazıcı ile prototip baskıları yapılmıştır.
- Elektronik Sistem: Raspberry Pi tabanlı kontrol birimi, NEMA17 step motorlar, DRV8825 motor sürücüler ve diğer temel bileşenlerin entegrasyonu. Motor kontrolü ve sistem geri bildirimi için gerekli devreler breadboard üzerinde test edilmiş ve ilerleyen süreçte PCB tasarımı yapılmıştır.
- Yazılım Altyapısı: Motor hareketlerinin zamanlanması, fotoğraf çekimi, görüntülerin aktarılması ve VisualSFM ile 3D model oluşturma süreçlerinin yarı otomatik hale getirilmesi. Kodlama dili olarak Python tercih edilmiş; kamera sürücüsü ve GPIO kontrolü bu dille gerçekleştirilmiştir.
- Fotogrametrik İşleme: Çekilen çoklu görüntülerden, Structure from Motion (SfM) algoritması kullanılarak nokta bulutu elde edilmesi ve üç boyutlu modelin oluşturulması. Bu aşamada VisualSFM yazılımı kullanılmıştır.
- Performans Testleri: Sistem, farklı sayıda ve farklı açılardan çekilen görüntülerle test edilmiş, model yoğunluğu ve doğruluk karşılaştırmaları yapılmıştır.

Proje, henüz tam otomatik hale gelmemiş olmakla birlikte, gelecekteki geliştirmelere açık bir yapıda tasarlanmış; yazılım, donanım ve mekanik sistemlerin birbirine entegre şekilde çalıştığı yarı otomatik bir sistem ortaya konmuştur.

1.3. Projenin Önemi

Gelişen teknoloji ile birlikte üç boyutlu modelleme ve tarama sistemlerine olan ihtiyaç, yalnızca endüstriyel alanlarda değil; eğitim, sağlık, kültürel mirasın korunması, sanat ve arkeoloji gibi birçok farklı sektörde de hızla artmaktadır. Ancak piyasada bulunan profesyonel 3D tarama sistemleri genellikle yüksek maliyetli, karmaşık yapı ve taşınabilirlik açısından sınırlıdır. Bu durum, özellikle düşük bütçeli araştırma ve geliştirme faaliyetleri ile eğitim ortamlarında bu teknolojilere erişimi zorlaştırmaktadır.

Bu bağlamda geliştirilen proje, düşük maliyetli, modüler, taşınabilir ve kullanıcı dostu bir 3D tarama sistemi sunarak bu ihtiyaca cevap vermeyi amaçlamaktadır. Fotogrametri yöntemi, yalnızca bir kamera ve açık kaynak yazılımlarla uygulanabildiği için, geniş kullanıcı kitlelerinin erişimine olanak tanır. Projede bu avantaj en verimli şekilde değerlendirilmiş, sistem minimum donanım ile yüksek doğrulukta sonuçlar elde edecek şekilde optimize edilmiştir.

Ayrıca, sistemin açık kaynak yazılımlar ve donanımlar üzerine kurulmuş olması, hem yerli üretim açısından önemli bir örnek teşkil etmekte hem de ileriye dönük geliştirme çalışmaları için uygun bir temel oluşturmaktadır. Yazılımın yarı otomatik olarak çalışması, kullanıcı müdahalesini minimuma indirerek işlemleri sadeleştirmekte; bu da sistemin farklı seviyelerdeki kullanıcılar tarafından rahatça kullanılmasını sağlamaktadır.

Sonuç olarak bu proje, teknolojik erişilebilirlik, uygulamalı eğitim olanakları, araştırma-geliştirme faaliyetlerinde kullanım ve yerli üretim teknolojilerine katkı gibi birçok açıdan önemli bir çalışma niteliği taşımaktadır.

2. Literatür Taraması

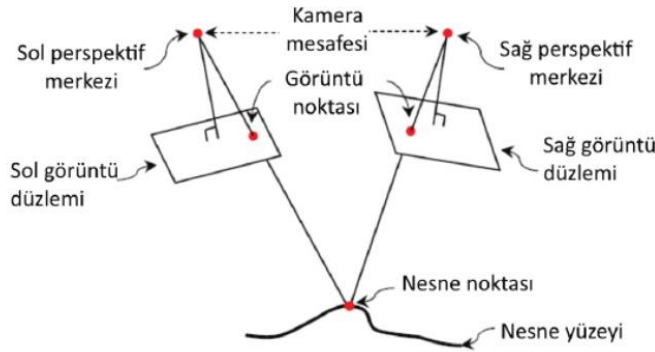
Bu bölümde, üç boyutlu modelleme alanında kullanılan fotogrametri ve diğer 3D tarama yöntemleri incelenerek mevcut teknolojilerin avantaj ve dezavantajları karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır.

2.1. Fotogrametri Temelleri

Fotogrametri, farklı açılardan çekilen fotoğraflar aracılığıyla nesnelerin geometrik özelliklerini belirleyerek üç boyutlu modellerin oluşturulmasını sağlayan bir tekniktir [1]. Bu yöntem, yalnızca bir görüntü toplama tekniği değil, aynı zamanda birçok teorik ve yazılımsal kavramı içeren çok disiplinli bir yaklaşımdır. Özellikle kültürel mirasın belgelenmesi ve korunması gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır [2].

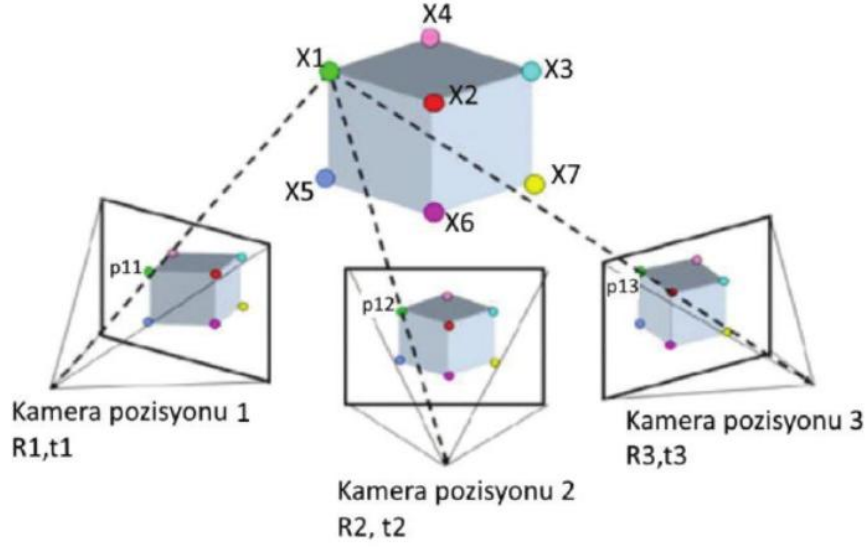
Günümüzde, fotogrametri temelli 3D modelleme için çok sayıda açık kaynaklı ve ticarî yazılım geliştirilmiştir. VisualSFM [3], Meshroom [4] ve Regard3D [5] gibi araçlar, bu yöntemin daha geniş bir kullanıcı kitlesi tarafından benimsenmesini sağlamıştır. Bu bölümde, projede kullanılan yöntemlerin ve yazılımların anlaşılmasına yardımcı olacak bazı temel kavramlar aşağıda açıklanmıştır:

- **Tek Görüntü Fotogrametrisi (Single-image photogrammetry):** Tek bir fotoğraf üzerinden düzlem koordinatları elde edilmesine imkân tanır. Arkeoloji ve mimarlık gibi alanlarda yaygındır.
- **Stereo Fotogrametri:** En az iki farklı açıdan çekilen görüntülerle yapılan 3D koordinat tahminine dayanır. Paralaks farklarının analiz edilmesi esasına göre çalışır. Şekil 2.1’de gösterilmiştir [1].



Şekil 2-1 Nirengi Noktasını Gösteren Stereo Fotogrametri Tekniğinin Temsili [3]

- **Grafik, Analog ve Analitik Fotogrametri:** Grafik fotogrametri çizimlerle ölçüm yapılan erken dönem tekniğidir. Analog fotogrametri optik-elektromekanik sistemlere dayanırken, analitik fotogrametri sayısal modellere geçişi temsil eder.
- **Görüntü Tabanlı Modelleme (Image-Based Modelling):** Farklı açılardan çekilmiş görüntülerin yazılımlar aracılığıyla işlenerek 3D modellere dönüştürülmesini ifade eder.
- **3D Rekonstrüksiyon:** Fiziksel nesne ya da ortamın dijital ortamda üç boyutlu biçimde yeniden oluşturulmasıdır.
- **Structure From Motion (SFM):** Ardışık veya çok açılı görüntülerden hem kamera pozisyonlarını hem de sahne geometrisini tahmin eder. Projede kullanılan VisualSFM yazılımı bu yöntemle dayalı çalışır. Şekil 2.2’de gösterilmiştir [2].



Şekil 2-2 SfM Prosesi [2]

- **Multi View Stereo (MVS):** SfM ile elde edilen kamera pozisyonlarına dayanarak daha ayrıntılı ve yoğun 3D veri (dense point cloud) üretimini sağlar. CMVS ve PMVS gibi modüller MVS'in özel uygulamalarıdır [6].
- **Nokta Bulutu (Point Cloud):** Nesnelerin X, Y, Z koordinatlarıyla uzayda temsil edildiği veri kümesidir. Seyrek (sparse) bulut kamera hizalamasını gösterirken, yoğun (dense) bulut yüzey detaylarını içerir [7].
- **Kafes, Poligon ve Yüzey Modelleri:** Nokta bulutundan sonra oluşturulan bu modeller, nesnenin geometrisini ifade eder. Kafes modeli sadece hatları, poligon model yüzeyleri tanımlar. Yüzey modeli dış kabuğu temsil ederken, katı modeller iç hacim bilgisiyle birlikte daha detaylı yapılar sunar [8].

Bu kavramlar, fotogrametri tabanlı sistemlerde kullanılan yazılımların nasıl çalıştığını anlamak ve elde edilen çıktının kalitesini değerlendirmek açısından temel öneme sahiptir. Özellikle SfM ve MVS yöntemleri, işlem süresi, model detay seviyesi ve nokta bulutu kalitesi gibi faktörlerin belirleyicisidir [9].

2.2. 3D Tarama Yöntemleri

Farklı üç boyutlu tarama yöntemleri, uygulama alanlarının gereksinimlerine göre değişen avantaj ve dezavantajlar barındırır. Genel olarak 3D tarama teknolojileri temassız (non-contact) ve temaslı (contact) olmak üzere iki ana kategoriye ayrılmaktadır [10]. Aşağıda yaygın kullanılan tarama yöntemleri ve temel özellikleri özetlenmiştir:

2.2.1. Temassız Yöntemler

- **Lazer Tarama:** Nesne yüzeyine lazer ışınları göndererek nokta bulutu şeklinde yüksek hassasiyetli ve ayrıntılı ölçümler sağlar [11]. Özellikle mühendislik ve endüstriyel uygulamalarda çok kesin sonuçlar verebilmektedir. Ancak, lazer tabanlı tarayıcıların maliyeti oldukça yüksektir ve cihazlar genellikle hacimli olduğundan taşınabilirlikleri düşüktür.

- **Yapılandırılmış Işık Tarama:** Projeksiyon cihazları ile nesne üzerine belirli bir desen (ör. ışık şeritleri) yansıtılarak yüzey geometrisi hızlı bir şekilde elde edilir. Küçük ve orta boyutlu nesnelerin taranmasında yüksek çözünürlük ve hız avantajı sunar. Bununla birlikte, parlak veya yansıtıcı yüzeylerde projeksiyon desenleri bozularak algılama sorunlarına yol açabilir; bu nedenle yapılandırılmış ışık tarayıcılar, yansıtıcı veya şeffaf nesnelerde sağlıklı sonuç vermekte zorlanabilir [12].
- **Fotogrametri:** Pasif bir yöntem olan fotogrametri, yalnızca standart bir dijital kamera ve yazılım kullanarak 3D model elde etmeyi mümkün kılar. Ek özel donanım gerektirmediği için diğer yöntemlere kıyasla çok daha düşük maliyetli ve esnek bir tarama yöntemidir; sıradan bir kamera ile sahada görüntü toplanabilir ve yazılımla modellenenebilir.

Ancak, kaliteli sonuçlar elde edebilmek için uygun çekim teknikleri ve aydınlatma koşulları gereklidir [13]; örneğin zayıf ışık ya da yanlış pozlama, fotoğraflardan elde edilecek modelin kalitesini düşürebilir. Ayrıca fotogrametri, yansıtıcı veya transparan yüzeyli nesnelerin modellenmesinde geleneksel olarak güçlük yaşamaktadır.

2.2.2. Temaslı Yöntemler

- **Koordinat Ölçüm Makineleri (CMM):** Bu yöntemde nesnenin yüzeyi, bir prob ile doğrudan temas edilerek örneklenir. Belirli noktaların koordinatları son derece yüksek hassasiyetle ölçülebilir ve bu sayede özellikle endüstriyel kalite kontrolünde güvenilir sonuçlar elde edilir. Temaslı ölçüm yöntemleri arasında yer alan CMM cihazları, yapıları gereği büyük ve sabittir; bu da tarama işleminin yavaş ilerlemesine ve taşınabilirlik açısından kısıtlı kalmasına neden olur.

Bu nedenle, CMM ile tüm bir nesnenin detaylı taranması pratik olmayabilir ancak referans ölçümler için sıklıkla kullanılır.

2.3. Diğer Teknolojilerle Karşılaştırma

Fotogrametri, diğer 3D tarama yöntemleriyle karşılaştırıldığında çeşitli avantajlara sahiptir:

- **Maliyet:** Yalnızca fotoğraf makinesi ve bilgisayar yazılımı ile uygulanabildiği için ek tarayıcı donanımı gerektirmez; bu da sistemi düşük maliyetli hale getirir. Lazer tarayıcı gibi aktif sistemlerle kıyaslandığında fotogrametriye giriş maliyeti oldukça düşüktür.
- **Taşınabilirlik:** Fotogrametri ekipmanının büyük kısmı kamera ve tripod gibi kolay taşınabilir parçalardan oluşur. Arazide veya saha koşullarında rahatlıkla kullanılabilir, hatta insansız hava araçları (drone) ile ulaşılması zor alanlarda bile fotoğraf toplanarak uygulanabilir. Donanımın hafif ve kompakt olması, yöntemin istenilen her yerde kurulup uygulanabilmesini sağlar.
- **Erişilebilirlik:** Kullanımının görece kolay oluşu ve yaygın kamera teknolojileri üzerine kurulması sayesinde fotogrametri, akademiden hobi amaçlı kullanıcılara kadar geniş bir kitle tarafından erişilebilir durumdadır. Profesyonel yazılımların yanı sıra ücretsiz ve açık kaynak fotogrametri yazılımlarının bulunması da yöntemin yaygınlaşmasını sağlamaktadır [14].

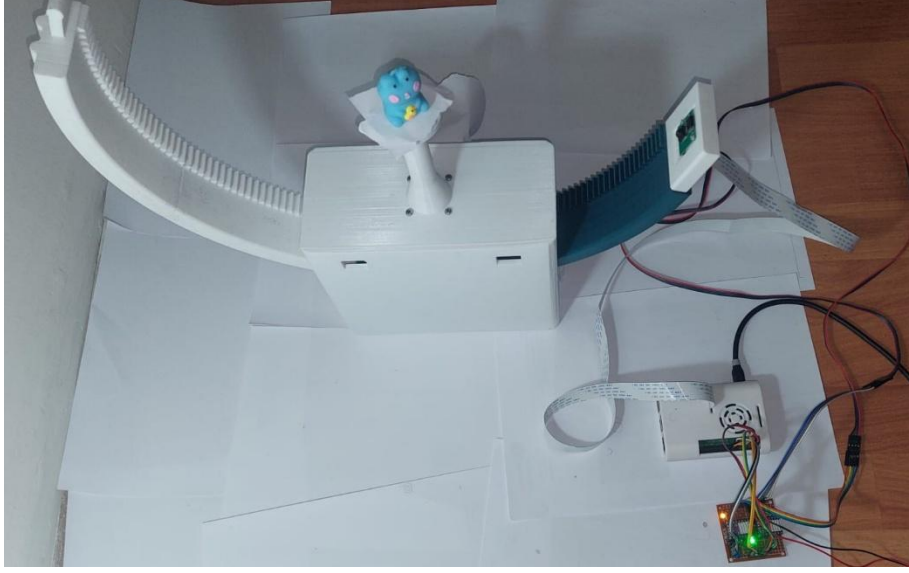
Bununla birlikte, fotogrametrinin bazı sınırlamaları da vardır. Özellikle nesne üzerinde yansıtıcı (aydınlık ve parlak) veya saydam yüzeyler bulunduğunda, fotogrametri yazılımları bu bölgelerde güvenilir bir nokta bulutu üretemeyebilir ve modelde boşluklar oluşabilir.

Ayrıca başarılı bir 3D model elde etmek için yeterli sayıda fotoğraf çekilmesi ve çekim sırasında iyi bir aydınlatma sağlanması gerekir. Yetersiz ışık koşulları veya görüntü kalitesinin düşük olması, fotogrametriden elde edilecek modelin doğruluğunu olumsuz etkileyebilmektedir [15].

Sonuç olarak, çok yüksek geometrik hassasiyet gereken uygulamalarda (ör. büyük ölçekli mühendislik projeleri) lazer tarayıcılar tercih edilirken; düşük maliyet, taşınabilirlik ve pratiklik istenen durumlarda fotogrametri yöntemi üstün gelmektedir.

3. Sistem Mimarisi

Geliştirilen üç boyutlu tarama sistemi; mekanik yapı, elektronik kontrol ünitesi ve yazılım mimarisinin birbirine entegre şekilde olarak çalıştığı, tam otomatik ve senkronize bir sistem olarak tasarlanmıştır. Amaç, küçük ve orta boyutlu nesnelerin farklı açılardan görüntülerini alarak yüksek doğrulukta fotogrametrik 3D modeller üretmektir.



Şekil 3-1 Tasarlanan Sistem

Şekil 3.1’de görüldüğü gibi sistemin fiziksel temelini oluşturan gövde yapısı içerisinde, iki ekseninde hareket sağlayan bir mekanizma yer almaktadır. Y eksenindeki hareket, nesnenin yerleştirildiği döner tablanın yatay düzlemde 360° döndürülmesini sağlar. Bu hareket, küçük bir step motorun tahrik ettiği ve 20:1 oranına sahip bir dişli sistemine bağlı olan 217 mm yarıçaplı büyük halka dişli aracılığıyla gerçekleştirilir. Motor her döndüğünde, dişli sistem sayesinde döner tabla hassas adımlarla dönerek çok açılı çekimler için istenen açı konumlarına gelir.

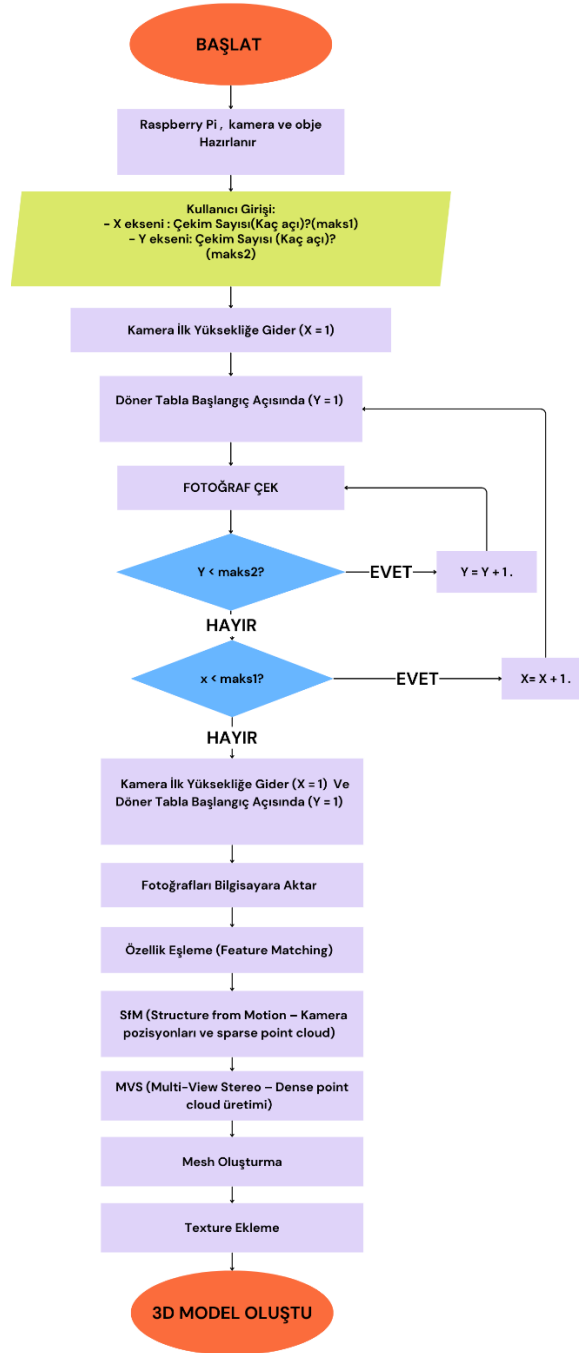
Buna paralel olarak, X eksenindeki hareket, kamera taşıyıcısının sistemin iç yüzeyine entegre edilmiş yay formundaki ray üzerinde yukarı-aşağı hareket etmesini sağlar. Bu ray, belirli adımlarla kameranın farklı yüksekliklere çıkarılmasını mümkün kılar. Bu sayede nesne hem yatayda (Y eksen) hem de dikeyde (X eksen) taranabilir ve fotogrametri için gerekli olan çok açılı görüntüler sistematik olarak toplanır. Kamera taşıyıcısını hareket ettiren step motor da bu yay formundaki hareketi sağlayacak şekilde monte edilmiş ve hassas şekilde kontrol edilmektedir.

Bu mekanik yapının kontrolü tamamen Raspberry Pi 4 tarafından sağlanmaktadır. Her iki step motor, DRV8825 sürücüler aracılığıyla ayrı ayrı ama senkronize biçimde kontrol edilmektedir. Yani bir motor döner tablayı döndürürken diğer motor kamera yüksekliğini ayarlamakta; bu sırada sistem, yazılım aracılığıyla her yeni pozisyonda kamera tetikleyerek fotoğraf çekimini gerçekleştirmektedir. Kullanıcıdan alınan yatay ve dikey çekim sayılarına göre yazılım, adım adım hangi motorun ne kadar döneceğini, kameranın ne zaman ve hangi isimle fotoğraf çekeceğini belirler.

Kamera modülü, doğrudan Raspberry Pi’ye CSI (Camera Serial Interface) üzerinden bağlanmıştır ve çekilen her görüntü, yazılım tarafından sıralı biçimde kaydedilir. Tüm X ve Y

pozisyonlar tamamlandığında, sistem başlangıç pozisyonuna dönmekte ve çekilen tüm görseller kablosuz bağlantı aracılığıyla hedef bilgisayara aktarılmaktadır.

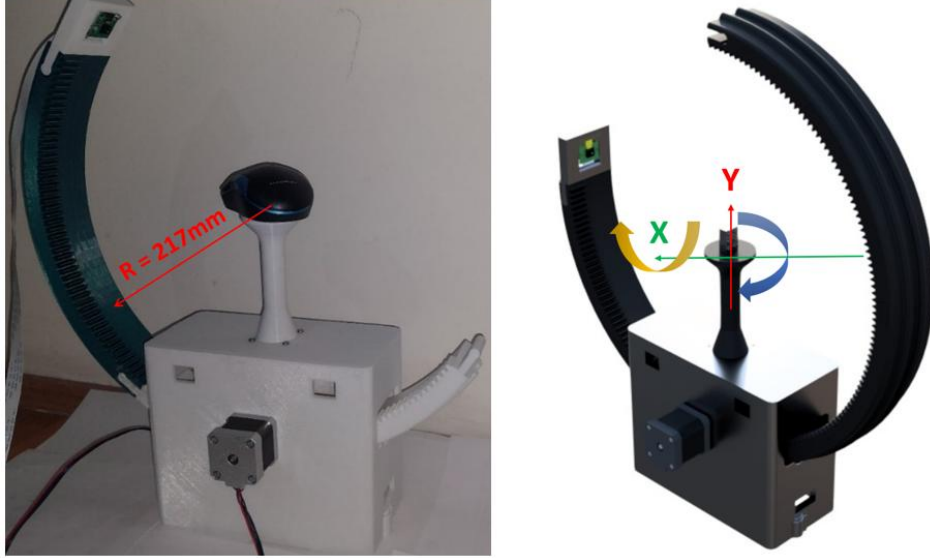
Bu üçlü yapı mekanik sistemin doğrusal ve dairesel hareketi, elektronik kontrol ünitesinin motorları ve kamerayı koordine etmesi, ve yazılımın tüm süreci zamanlaması birlikte çalışarak tamamen otomatik bir 3D veri toplama ve modelleme süreci sunmaktadır. Son aşamada, bu görseller dış bilgisayarda işlenerek önce sparse (seyrek) sonra dense (yoğun) nokta bulutu üretilmekte, ardından gerekirse ağ (mesh) ve doku (texture) aşamaları ile tam 3D model ortaya çıkarılmaktadır. Şekil 3.2’de sistemin akış şeması gösterilmiştir.



Şekil 3-2 Sistemin Akış Şeması

3.1. Mekanik Tasarım

Bu bölümde, geliştirilen fotogrametri tabanlı 3D tarama sisteminin mekanik altyapısı, sistem bütünlüğü içerisinde ele alınarak açıklanmaktadır. Amaç, yalnızca parçaları tarif etmek değil; bu parçaların sistem içerisindeki işlevsel ilişkilerini, hareket koordinasyonlarını ve neden bu mekanizmanın tercih edildiğini açıklamaktır.



Şekil 3-3 Sistemin Mekanik Tasarımı

Şekil 3.3'te gösterilen geliştirilen sistem, iki eksende hareket sağlayarak fotogrametri için gereken çok açılı görüntülerin otomatik olarak elde edilmesini mümkün kılar. Bu eksenler:

- Y Ekseninde: Nesnenin döner tabla üzerinde yatay düzlemde 360° döndürülmesi,
- X Ekseninde: Kamera ve büyük halka bir ray üzerinde yukarı-aşağı hareket ettirilmesidir.

3.1.1. Hareket Mekanizması ve Dişli Aktarma Yapısı

Sistemin merkezinde, nesnenin yerleştirildiği bir döner tabla yer alır. Bu döner tabla, Y eksenindeki hareketi sağlayan bir step motor aracılığıyla döndürülür. Motor, miline bağlı küçük çaplı tahrik dişlisi çap 20 mm ile, çapı 217 mm olan, Şekil 3.4'te gösterilen büyük halka dişliyi döndürmektedir. Dişli oranı 1:20 olarak belirlenmiştir. Bu sayede, küçük dişli 20 tur attığında büyük dişli yalnızca 1 tur tamamlar. Bu oran, döner tabla hareketinde yüksek hassasiyet ve küçük adımlarla açısal konumlandırma sağlar. Denklemle ifade edilirse:

$$\frac{N_{Küçük}}{N_{Büyük}} = \frac{1}{20}$$

Burada N , ilgili dişlinin dönüş sayısını ifade etmektedir.



Şekil 3-4 Büyük ve Küçük Halka

Döner tabla dönüşü sayesinde nesne, fotogrametri için gerekli olan açısal çeşitliliği sağlar. Sistemin bu kısmı, doğrudan Y eksen hareketi ile ilişkilidir. Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3-5 Döner Tabla

3.1.2. Kamera Taşıyıcı Yapı ve X Eksen Hareketi

Kamera, sistemin büyük halkaya entegre edilmiş yay formundaki bir ray üzerinde yukarı-aşağı hareket edebilen bir taşıyıcıya monte edilmiştir. Şekil 3.6'da gösterilmiştir. Bu taşıyıcı yapı, ikinci bir step motor ile kontrol edilmektedir ve X eksenindeki dikey konumlamayı sağlamaktadır. Rayın formu, kameranın nesneye her seviyede merkezi bir açıdan bakmasını sağlayacak şekilde optimize edilmiştir.

Motor kontrollü bu taşıyıcı, kamerayı belirli dikey pozisyonlara getirir. Her yükseklikte, döner tabla yeniden Y eksen boyunca döndürülerek farklı açılardan görüntüler alınır. Böylece her fotoğraf, nesnenin hem farklı yükseklikten hem de farklı yatay açıdan çekilmiş versiyonunu sunar.



Şekil 3-6 Sistemin İç Tasarımı

3.1.3. Sistemin Entegrasyonu ve Tasarım Gerekçesi

Bu mekanizma tercih edilmiştir çünkü:

- Y eksen: Nesnenin döndürülmesini sağlayarak görüntü açısı çeşitliliği sunar.
- X eksen: Kameranın dikey hareketi ile üç boyutlu yapının derinliğine dair veri sağlar.
- Dişli oranı (1:20): Kamera konumlamasında yüksek açısal çözünürlük sunar.
- Yay formu: Kameranın her seviyede nesnenin merkezine odaklı kalmasını sağlar.
- Tüm sistem merkezi simetrik yapıdadır: Bu, modellemede hizalama hatalarını azaltır.



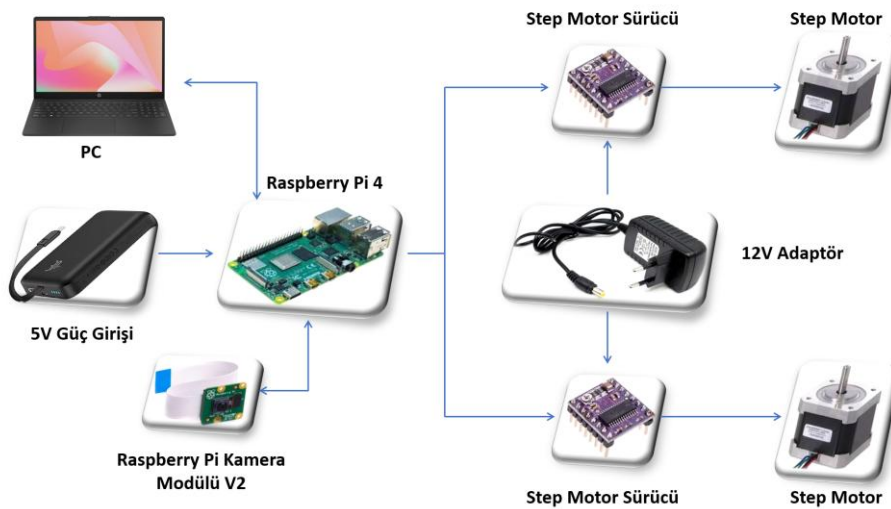
Şekil 3-7 Sistem Farklı Açılardan Çekilirken Durumu

Döner tablanın boyutları, küçük ve orta boyutlu nesnelerin güvenli şekilde yerleştirilebilmesini sağlayacak biçimde yaklaşık $110 \times 110 \times 110$ mm olarak belirlenmiştir. Kamera taşıyıcı mekanizması ise, dikey ekseninde maksimum 217 mm yüksekliğe kadar pozisyonlanabilecek şekilde tasarlanmıştır. Bu boyutlandırma, sistemin hem kompakt ve taşınabilir kalmasını hem de fotogrametri için gerekli açısal ve yükseklik çeşitliliğini sağlayacak sayıda görüntünün alınmasını mümkün kılmaktadır.

Kısaca sistem; döner tabla, büyük halka-küçük dişli tahrik mekanizması kamera sayesinde iki ekseninde hassas ve tekrarlanabilir hareket sağlayarak fotogrametriye uygun yüksek kaliteli görüntü verisi üretmektedir. Bu yapı, düşük maliyetli parçalarla üretilebilirken, mühendislik açısından yeterli kararlılık ve hassasiyeti garanti etmektedir. Tüm görüntüler, yazılım ile kontrol edilen motor hareketleriyle senkronize biçimde alınmakta ve sonuç olarak 3D modelleme için gerekli olan çok açılı ve tutarlı veri seti elde edilmektedir.

3.2. Elektronik Tasarım

Bu bölümde, geliştirilen 3D tarama sisteminin elektriksel ve elektronik altyapısı ayrıntılı olarak incelenmektedir. Sistem, mekanik bileşenlerin hareketini kontrol eden motorlar, bu motorları süren sürücüler, görüntü yakalama modülü ve merkezi kontrol birimi olan mikrodenetleyiciden oluşmaktadır. Şekil 3.8’de elektronik sistem tasarımı gösterilmiştir.

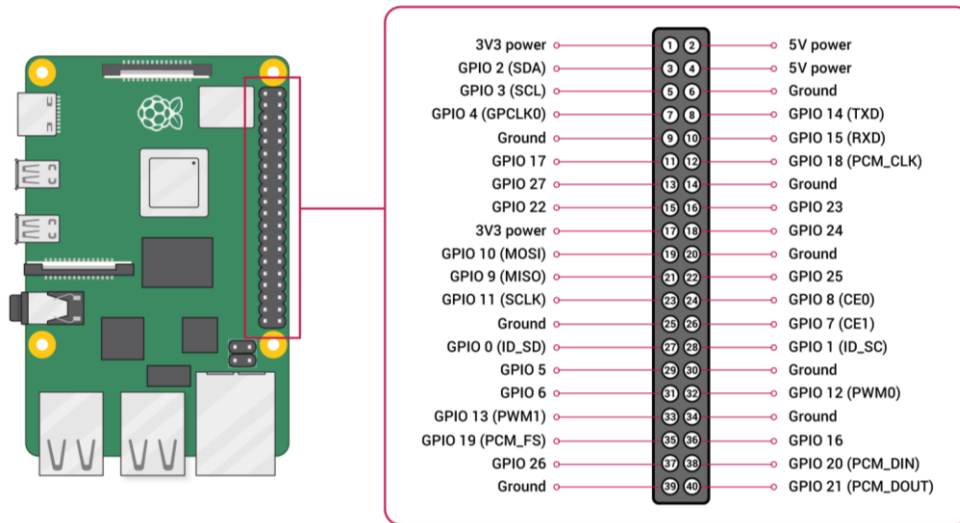


Şekil 3-8 Elektronik Sistem Tasarımı

Elektronik tasarım sürecinde, düşük maliyetli fakat güvenilir bileşenler seçilerek sistemin taşınabilir, modüler ve kullanıcı dostu olması hedeflenmiştir. Motorların hassas kontrolü, fotoğraf çekimiyle senkronize çalışarak fotogrametrik modelleme sürecinin doğruluğunu doğrudan etkilemektedir.

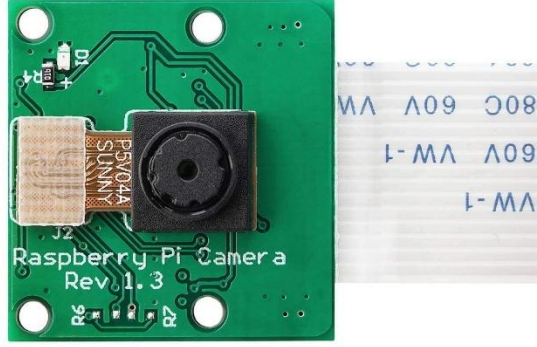
3.2.1. Elektronik Bileşenler, Görevleri ve Özellikleri

- **Raspberry Pi 4 8GB - Model 4B:** Bu projede, sistemin kontrolünü sağlamak üzere Raspberry Pi 4 tercih edilmiştir. Yüksek işlem kapasitesi, donanım uyumluluğu ve düşük enerji tüketimi gibi avantajları nedeniyle uygun bir platform sunmaktadır. Raspberry Pi'nin pin yapısı Şekil 3.9'de gösterilmiştir. Yoğun işlem süreçlerinde oluşabilecek ısınmayı önlemek amacıyla üzerine soğutma fanı eklenmiştir.
 - 8GB RAM ve 64-bit 4 çekirdekli işlemci ile yüksek işlem gücü sunar.
 - Kamera modülünü doğrudan (CSI arabirimiyle) destekler.
 - GPIO pinleri sayesinde motor sürücüleri ve LED gibi donanımlarla kolayca entegre olur.
 - Düşük güç tüketimi ile enerji verimlidir.
 - Wi-Fi desteği sayesinde kablosuz veri aktarımı yapılabilir.
 - V2 kamera modülü ile uyumludur, görüntü işleme ve kontrol birlikte yürütülür.
 - Flat kablo kullanımı, kompakt ve düzenli sistem tasarımı sağlar.



Şekil 3-9 Raspberry Pi 4 Pinleri [16]

- **Raspberry Pi Camera Module V2 (Sony IMX219):** Bu kamera modülü, sistemin görüntü yakalama birimini oluşturur ve fotogrametri uygulamaları için optimize edilmiştir. Şekil 3.10'da gösterilmiştir. Bu kameranın bazı özellikleri aşağıdaki gibidir.
 - 8 MP çözünürlük (3280x2464 piksel) ve sabit odaklı lens ile yüksek kaliteli görüntüler sunar.
 - CSI arabirimi ile doğrudan Raspberry Pi'ye bağlanarak kompakt ve entegre bir yapı oluşturur. Bağlantı için 15 pinli ribbon (şerit) kablo kullanılır.



Şekil 3-10 Raspberry Pi Camera Module V2 [17]

- **NEMA17 Step Motorlar (2 adet):** Bu motorlar, sistemde iki farklı eksendeki mekanik hareketi sağlamak için kullanılır:
 1. **MOTOR1:** Nesnenin yerleştirildiği döner tablayı yatay eksende 360° döndürür.
 2. **MOTOR2:** Kamera taşıyıcısını yarım daire şeklindeki ray boyunca dikey eksende hareket ettirir.



Şekil 3-11 NEMA 17 Step Motor [18]

Şekil 3.11’de NEMA17 motorlar, düşük maliyetli otomasyon sistemlerinde yaygın olarak kullanılan kompakt ve hassas hareket sağlayan motorlardıdır. Step motor, diğer motorlar ile karşılaştırılması Tablo 1’de gösterilmiştir.

Gövde ağırlıkları sayesinde sistemde ek sabitleyiciye ihtiyaç duymadan dengeli biçimde durabilirler ve yapısal titreşimleri azaltırlar. Bu motorlarda adım hassasiyetini artırmak için kullanılan mikro adımlama (microstepping) yöntemi, ilerleyen bölümlerde ele alınacaktır.

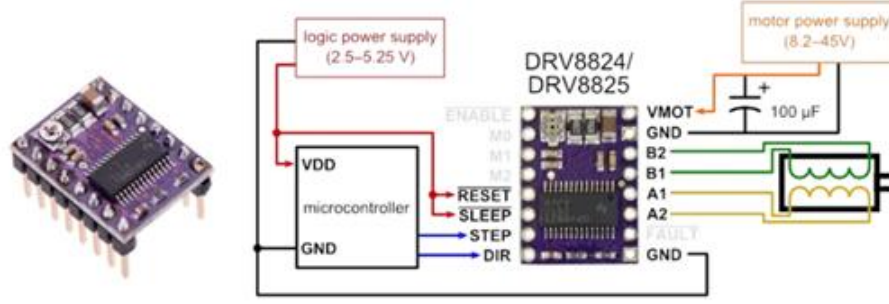
Motorun bazı özellikleri aşağıdaki gibidir:

- Boyutlar: 42.3 mm x 42.3 mm x 38 mm (şaft hariç)
- Ağırlık: 280–285 g
- Mil Çapı: 5 mm (D tipi şaft)
- Adım Açısı: 1.8° (devir başına 200 adım)
- Faz Sayısı: 2 (bipolar yapı)
- Faz Voltajı: 2.6–2.8 V
- Faz Akımı: 1.68–1.7 A
- Kablo Uzunluğu: 30–100 cm (4 kablolu)

Tablo 1 Step, DC ve Servo Motor Arasında Karşılaştırma

Özellik / Motor Tipi	STEP MOTOR	DC MOTOR	SERVO MOTOR
Pozisyon Kontrolü	Evet (adım adım, hassas kontrol)	Hayır (geri besleme yoksa konum bilinmez)	Evet (geri besleme ile hassas)
Açısal Hassasiyet	Yüksek (1.8°/adım, microstepping ile daha hassas)	Düşük (PWM ile hız ayarı, pozisyon zor)	Yüksek (genellikle 0.1° altında)
Maliyet	Düşük	Düşük	Orta–Yüksek
Sürücü Gereksinimi	Basit (DRV8825 gibi)	Basit (motor sürücü veya doğrudan)	Geri beslemeli sürücü gerekir
Geri Besleme Sistemi	Gerekmez (açık çevrimle çalışabilir)	Gerekir (doğruluk için encoder şart)	Var (içinde dahili encoder bulunur)
Yük Altında Performans	Stabil, kayma yapmaz	Kayma yapabilir, hız değişir	Stabil (PID kontrollü)
Montaj & Boyut	Kompakt, yaygın ölçülerde	Kompakt, çeşitli boyutlar	Büyük ve ağır olabilir
Yazılım Kontrolü	Kolay, doğrudan adım sayısı verilir	Hız ve süre kontrolü gerekir	Karmaşık PWM ve PID ayarı gerekebilir

- **DRV8825 Step Motor Sürücüsü (2 adet):** Step motorların kontrolü için DRV8825 entegresi kullanan sürücü kartları tercih edilmiştir. Kompakt yapısı, geniş voltaj aralığı ve mikro adım desteği sayesinde bu sürücüler sistemin hassas kontrol gereksinimlerini karşılamaktadır. Şekil 3.12’de sürücü ve sürücünün bağlantı konfigürasyonu gösterilmiştir. DRV8825 step motor sürücüsünün bazı özellikleri aşağıdaki gibidir:
 - Motor besleme gerilimi 8.2V ile 45V arasında değişebilir.
 - Kart üzerinde akım sınırlama potansiyometresi bulunur; motor bobinine uygulanacak maksimum akım bu potansiyometre ile ayarlanabilir.
 - Lojik seviyede çalışan STEP ve DIR pinleri ile Raspberry Pi gibi mikrodenetleyicilerle kolayca kontrol edilebilir.
 - Kart üzerinde 5V regülatör bulunduğu için ayrı bir lojik besleme gerekmez.
 - 2.54 mm (0.1") pin aralığına sahiptir, breadboard ve PCB'ye kolayca monte edilebilir.
 - Motor bobininde oluşabilecek ters EMF’ye karşı, 47–100µF/35V kondansatör kullanımı önerilmektedir.
 - 1A üzeri akım değerlerinde çalışırken entegre yüksek sıcaklığa ulaşabileceğinden, mutlaka küçük bir soğutucu ile kullanılması gerekir.

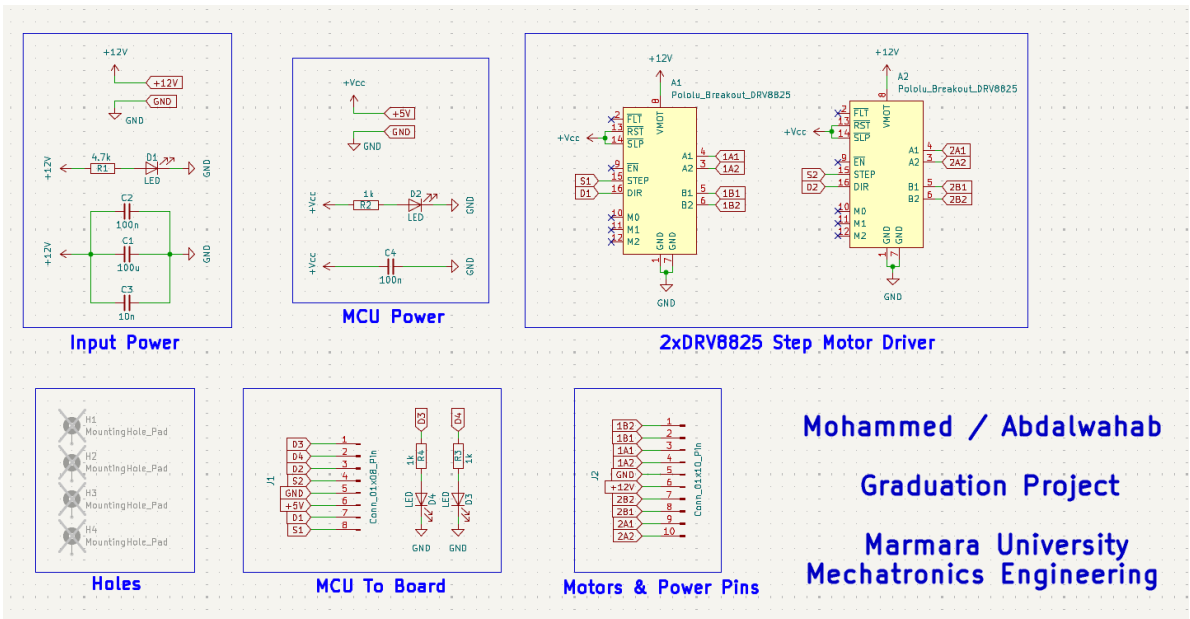


Şekil 3-12 DRV8825 Step Motor Sürücüsü Ve Mikrodenetleyici İle Bağlantısı [18]

- Diger Elektronik Elemanlar:** Sistemin enerji kararlılığını sağlamak, parazitleri önlemek ve bileşenleri olası gerilim zararlarından korumak amacıyla bazı pasif elektronik elemanlar kullanılmıştır. En kritik bileşenlerden biri olan 100 nF seramik kondansatör, Raspberry Pi ve kamera modülüne giden güç hatlarına yerleştirilerek yüksek frekanslı parazitleri bastırmakta ve daha temiz bir enerji iletimi sağlamaktadır. DRV8825 motor sürücüsünün motor bobinlerinde oluşturabileceği ters gerilimleri (back EMF) filtrelemek için ise 47–100 μ F değerinde 35V elektrolitik kondansatör motor besleme hattına bağlanmıştır. Tüm sistemin enerji ihtiyacı, 12V DC adaptör ile karşılanmaktadır. Step motorlar ve motor sürücüleri bu ana kaynak üzerinden çalışırken, Raspberry Pi için ayrı bir 5V besleme hattı kullanılmaktadır. Bağlantı kabloları ise enerji ve veri iletiminin sorunsuz sağlanması için uygun kalınlıkta ve kısa mesafeli olarak seçilmiştir. Ayrıca, sistemin çalıştığını görsel olarak belirtmek amacıyla yerleştirilen LED'e seri olarak 10k Ω direnç bağlanmış, böylece hem kullanıcıya enerji bilgisi verilmiş hem de LED'in aşırı akımdan zarar görmesi engellenmiştir.

3.2.2. Devre Tasarımı

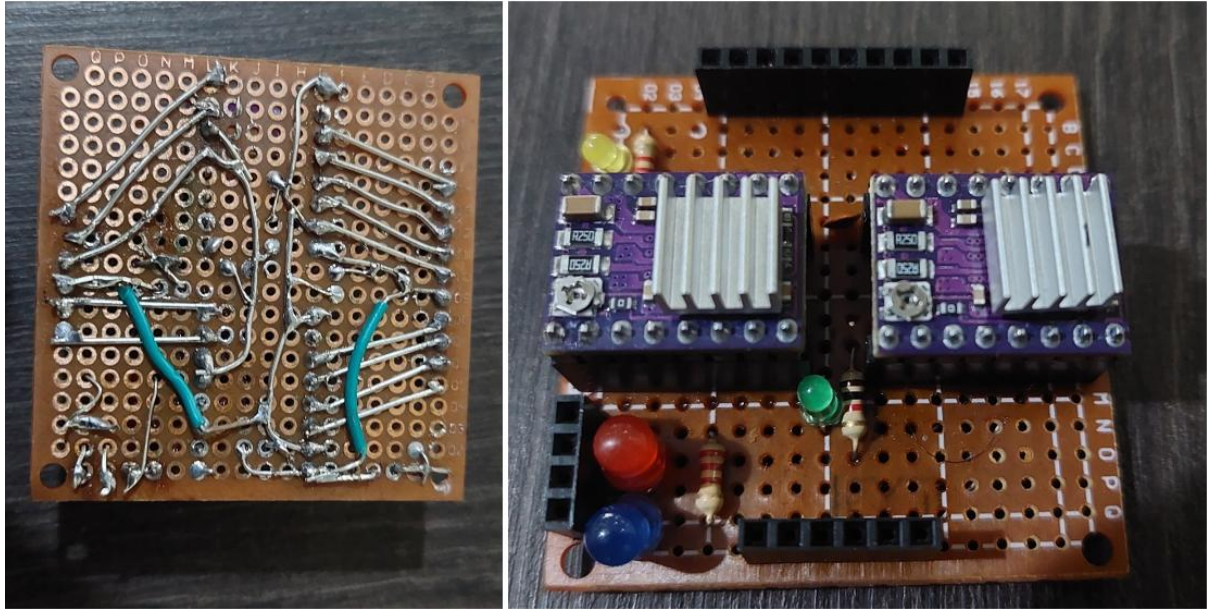
Sistemin elektronik bağlantı ve kart tasarımları, açık kaynaklı elektronik devre çizim programı olan KiCad kullanılarak hazırlanmıştır. Şekil 3.13'te devre tasarımı gösterilmiştir.



Şekil 3-13 Devre Çizimi

Tasarım sürecinde, bileşenlerin konumlandırılması, güç yolları ve sinyal hatları; sistemin kararlı ve güvenilir çalışmasını sağlamak üzere optimize edilmiştir. Devre üzerindeki elemanlar, test edilebilirlik ve bakım kolaylığı sağlayacak şekilde düzenlenmiştir.

İlk etapta sistemin testleri, lehimli delikli pertinaks (protoboard) kart üzerinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.14'te gösterilmiştir. DRV8825 motor sürücüler, LED'ler ve dirençler bu karta manuel olarak lehimlenmiş ve kablolar aracılığıyla Raspberry Pi ile bağlantıları yapılmıştır. Tasarımın geçerliliği prototip aşamasında doğrulandıktan sonra, daha profesyonel ve kararlı bir kullanım için özel bir PCB (baskı devre) tasarımı yapılmıştır.



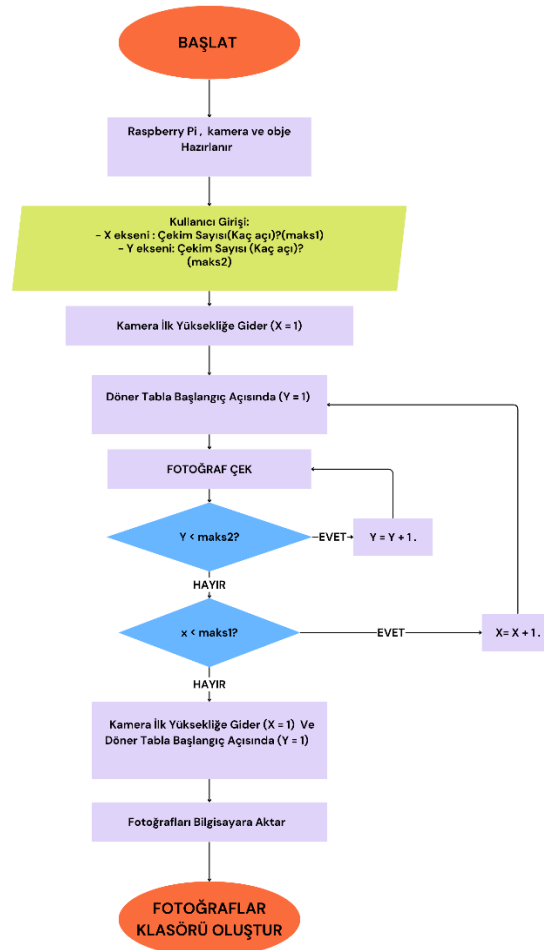
Şekil 3-14 Lehimli Devre

Kısaca sistemin elektriksel yapısı, enerji dağıtımı, motor kontrolü ve görüntü işleme işlevlerini bir araya getirerek entegre bir çalışma sağlar. Raspberry Pi 4 mikrodenetleyici ile senkronize çalışan motorlar, kamera modülü ve sürücüler; düşük maliyetli, taşınabilir ve güvenilir bir 3D tarama sisteminin temelini oluşturmaktadır.

3.3. Yazılım Mimarisi

Geliştirdiğimiz üç boyutlu (3D) tarama sistemi, donanım bileşenlerinin belirli bir sırayla çalışmasını ve görüntü yakalama işlemlerinin bu hareketlerle senkronize şekilde yürütülmesini sağlayan bir yazılım altyapısıyla entegre şekilde çalışmaktadır. Yazılım; çekim döngüsünü yönetmekte, elde edilen görüntüleri düzenli biçimde kaydetmekte ve bu verileri harici bir bilgisayara otomatik olarak aktarmaktadır. Böylece, operatör müdahalesi olmadan, belirli bir sistematik içinde çok sayıda görsel veri toplanabilmektedir.

Yazılım, Python diliyle Raspberry Pi 4 üzerinde geliştirilmiştir. Sistemdeki iki eksenli hareket step motorlarla sağlanmakta ve bu motorlar DRV8825 sürücüler aracılığıyla kontrol edilmektedir. Görüntü yakalama işlemi, Raspberry Pi Camera Module V2 ile gerçekleştirilmekte olup, motorlar ve kamera doğrudan GPIO pinleri ve CSI arayüzü üzerinden mikrodenetleyiciye bağlanmıştır. Bu yapı sayesinde tüm zamanlama ve kontrol süreçleri tek bir işlemci üzerinden senkronize edilmektedir.



Şekil 3-15 Raspberry Pi Kod Algoritması

Kod yapısı, sistem başlatıldığında donanım bileşenlerini hazır hâle getirir. Kullanıcıdan alınan çekim parametrelerine (dikey ve yatay pozisyon sayıları) göre sistem, kamera taşıyıcısını her bir dikey seviyeye getirir. Her seviyede, nesne döner tabla üzerinde belirli açılarla çevrilir ve her açıdan yüksek çözünürlüklü görüntü alınır. Görseller, “v_d_h.jpg” formatına göre adlandırılarak kaydedilir.

Tarama işlemi tamamlandığında sistem, başlangıç pozisyonuna geri döner ve tüm görseller, tanımlı bir hedef bilgisayara SCP protokolü üzerinden otomatik olarak aktarılır. Bu yapı, veri organizasyonunu kolaylaştırmakta ve manuel dosya aktarma ihtiyacını ortadan kaldırmaktadır. Ancak, veri toplama ve aktarım süreçleri tam otomatik olsa da, 3D modelleme süreci hâlâ kullanıcı müdahalesi gerektirmektedir. Aktarılan görsellerin fotogrametri yazılımlarına (örneğin VisualSFM veya COLMAP) yüklenmesi ve modelleme sürecinin başlatılması manuel olarak yapılmaktadır. Bu nedenle sistemimiz, yüksek düzeyde otomatik veri toplama ve aktarım yeteneğine sahip olmakla birlikte, yarı otomatik bir 3D tarama döner tabla olarak tanımlanmaktadır.

Yazılım, kullanıcıdan terminal arayüzü üzerinden yatay ve dikey yönde kaç adet fotoğraf çekileceğine dair giriş alır. Şekil 3.16’da görüldüğü gibi kod çalıştırılırken kullanıcıdan fotoğraf sayısı girmesi istenir.


```
geany_run_script_3RIO82.sh
File Edit Tabs Help
[1:01:32.296656973] [2570] INFO Camera camera_manager.cpp:326 libcamera v0.5.0+
59-d83ff0a4
[1:01:32.323468318] [2592] WARN RPISdn sdn.cpp:40 Using legacy SDN tuning - ple
ase consider moving SDN inside rpi.denoise
[1:01:32.325769841] [2592] INFO RPI vc4.cpp:447 Registered camera /base/soc/i2c
0mux/i2c@1/ov5647@36 to Unicam device /dev/media1 and ISP device /dev/media2
[1:01:32.325899450] [2592] INFO RPI pipeline_base.cpp:1121 Using configuration
file '/usr/share/libcamera/pipeline/rpi/vc4/rpi_apps.yaml'
[1:01:32.334745474] [2570] INFO Camera camera.cpp:1205 configuring streams: (0)
4056x3040-BGR888 (1) 2592x1944-SGBRG10_CSI2P
[1:01:32.335447853] [2592] INFO RPI vc4.cpp:622 Sensor: /base/soc/i2c0mux/i2c@1
/ov5647@36 - Selected sensor format: 2592x1944-SGBRG10_1X10 - Selected unicam fo
rmat: 2592x1944-pGAA
Enter number of horizontal images per level: 10
Enter number of vertical levels: 20
```

Şekil 3-16 Kullanıcının Fotoğraf Sayısı Girmesi

Daha sonra sistem, belirlenen dikey seviyelerde her seferinde sabit adımlarla motorları hareket ettirerek fotoğraf çekimini gerçekleştirir. Her dikey pozisyonda, yatay ekseninde de aynı şekilde belirli sayıda eşit açılı çekim yapılır. Bu sayede, tüm çekimler sistemli bir şekilde $v(dikey)_h(yatay).jpg$ formatında adlandırılarak `/home/pi/Desktop/photos/...` dizinine kaydedilir. Örneğin, `v2_h6.jpg` şeklinde adlandırılan bir görsel, dikey ikinci seviye ve yatay altıncı pozisyona ait olduğunu belirtmektedir. Şekil 3.17’de çekilen fotoğrafların Raspberry Pi’da kaydedilmesi gösterilmiştir.

```
geany_run_script_3RIO82.sh
File Edit Tabs Help
Saved: /home/pi/Desktop/photos/2025-06-20_16-23-22/v2_h8.jpg
Saved: /home/pi/Desktop/photos/2025-06-20_16-23-22/v2_h9.jpg
Saved: /home/pi/Desktop/photos/2025-06-20_16-23-22/v2_h10.jpg
Saved: /home/pi/Desktop/photos/2025-06-20_16-23-22/v3_h1.jpg
Saved: /home/pi/Desktop/photos/2025-06-20_16-23-22/v3_h2.jpg
Saved: /home/pi/Desktop/photos/2025-06-20_16-23-22/v3_h3.jpg
Saved: /home/pi/Desktop/photos/2025-06-20_16-23-22/v3_h4.jpg
Saved: /home/pi/Desktop/photos/2025-06-20_16-23-22/v3_h5.jpg
Saved: /home/pi/Desktop/photos/2025-06-20_16-23-22/v3_h6.jpg
SSaved: /home/pi/Desktop/photos/2025-06-20_16-23-22/v3_h7.jpg
Saved: /home/pi/Desktop/photos/2025-06-20_16-23-22/v3_h8.jpg
Saved: /home/pi/Desktop/photos/2025-06-20_16-23-22/v3_h9.jpg
Saved: /home/pi/Desktop/photos/2025-06-20_16-23-22/v3_h10.jpg
Saved: /home/pi/Desktop/photos/2025-06-20_16-23-22/v4_h1.jpg
Saved: /home/pi/Desktop/photos/2025-06-20_16-23-22/v4_h2.jpg
Saved: /home/pi/Desktop/photos/2025-06-20_16-23-22/v4_h3.jpg
Saved: /home/pi/Desktop/photos/2025-06-20_16-23-22/v4_h4.jpg
```

Şekil 3-17 Çekilen Fotoğrafların Raspberry Pi’da Kaydedilmesi

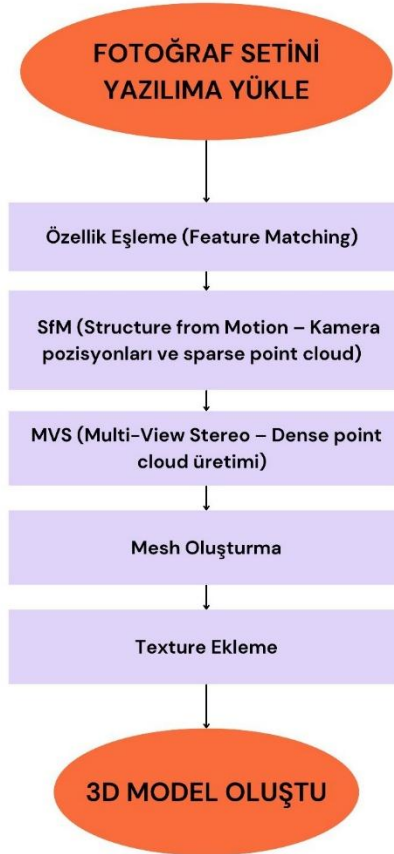
Fotoğraf çekim işlemi tamamlandıktan sonra sistem, motorları ve kamerayı başlangıç pozisyonlarına döndürerek süreci sonlandırır. Ardından, elde edilen tüm görseller SCP (Secure Copy Protocol) kullanılarak, önceden belirlenmiş IP adreslerine sahip bilgisayarlara otomatik olarak aktarılır. Bu yapı sayesinde, veri aktarımları da insan müdahalesine gerek kalmadan gerçekleşir. Terminal ekranında işlem adımlarına dair çıktılar kullanıcının takibi için gösterilmektedir. Şekil 3.18’de gösterildiği gibi çekilen bütün fotoğraflar bilgisayara kaydedilmesi için kullanıcının şifre girmesi gerekmektedir.

```
geany_run_script_3R1082 sh
File Edit Tabs Help
Saved: /home/pi/Desktop/photos/2025-06-20_16-23-22/v19_h6.jpg
Saved: /home/pi/Desktop/photos/2025-06-20_16-23-22/v19_h7.jpg
Saved: /home/pi/Desktop/photos/2025-06-20_16-23-22/v19_h8.jpg
Saved: /home/pi/Desktop/photos/2025-06-20_16-23-22/v19_h9.jpg
Saved: /home/pi/Desktop/photos/2025-06-20_16-23-22/v19_h10.jpg
Saved: /home/pi/Desktop/photos/2025-06-20_16-23-22/v20_h1.jpg
Saved: /home/pi/Desktop/photos/2025-06-20_16-23-22/v20_h2.jpg
Saved: /home/pi/Desktop/photos/2025-06-20_16-23-22/v20_h3.jpg
Saved: /home/pi/Desktop/photos/2025-06-20_16-23-22/v20_h4.jpg
Saved: /home/pi/Desktop/photos/2025-06-20_16-23-22/v20_h5.jpg
Saved: /home/pi/Desktop/photos/2025-06-20_16-23-22/v20_h6.jpg
Saved: /home/pi/Desktop/photos/2025-06-20_16-23-22/v20_h7.jpg
Saved: /home/pi/Desktop/photos/2025-06-20_16-23-22/v20_h8.jpg
Saved: /home/pi/Desktop/photos/2025-06-20_16-23-22/v20_h9.jpg
Saved: /home/pi/Desktop/photos/2025-06-20_16-23-22/v20_h10.jpg
Transferring photos to ... with: scp -r /home/pi/Desktop/photos/2025-
06-20_16-23-22 ... :~/raspberry_photos
...s password: 
```

Şekil 3-18 Çekilen Fotoğrafların Bilgisayarda Kaydedilmesi İçin Kullanıcının Şifre Girme

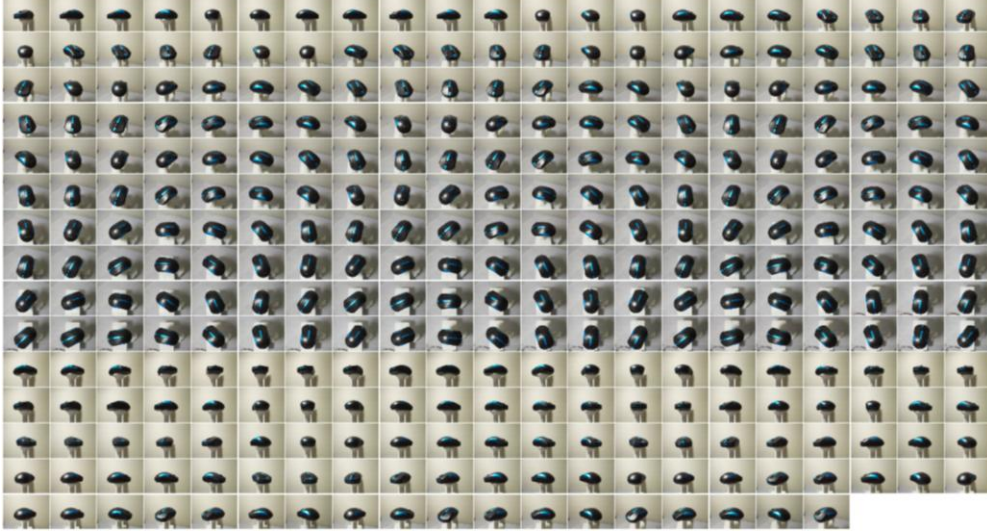
3.4. Görüntü İşleme ve Modelleme Yazılımları

Raspberry Pi tarafından çekilen ve sistemli şekilde adlandırılan fotoğraflar, bilgisayara aktarıldıktan sonra açık kaynaklı fotogrametri yazılımları yardımıyla üç boyutlu modellere dönüştürülmektedir. Bu süreçte temel olarak kullanılan yazılım VisualSFM'dir. Alternatif yazılımlar olan COLMAP, OpenMVS ve Regard3D de incelenmiş ancak sistem donanımına uygunluk açısından VisualSFM tercih edilmiştir.

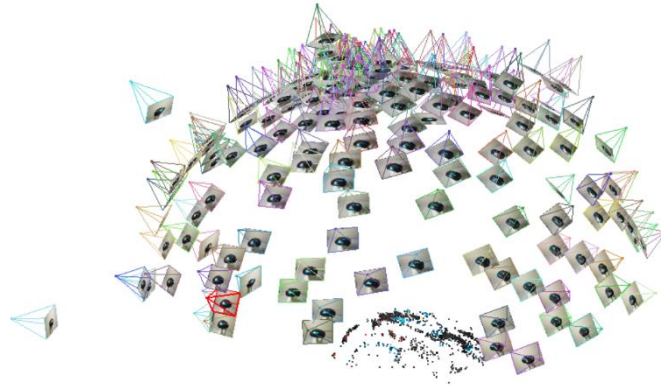


Şekil 3-19 Program Yazılım Algoritması

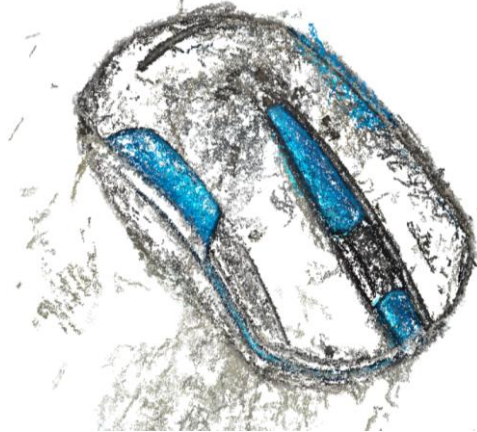
VisualSFM, kullanıcı dostu grafik arayüzü ile birlikte, sparse point cloud (seyrek nokta bulutu) üretimini oldukça pratik hale getirmektedir. Ayrıca CMVS ve PMVS modülleri ile desteklenerek dense point cloud (yoğun nokta bulutu) üretimi de sağlanabilmektedir. Bu yazılımın en önemli avantajlarından biri, yalnızca CPU üzerinden çalışabilmesidir. Bu özelliği sayesinde VisualSFM, CUDA destekli bir GPU gerektirmediği için, sistemimizde kullanılan donanım ile tam uyum içinde çalışmaktadır. Aşağıdaki şekillerde VisualSFM yazılım programının arayüzü ve kullanım aşamaları gösterilmiştir.



Şekil 3-20 VisualSFM Arayüzü



Şekil 3-21 3D Yeniden Yapılandırma (3D Reconstruction)



Şekil 3-22 Yoğun Yeniden Yapılandırma (Dense Reconstruction)

Alternatif olarak değerlendirilen COLMAP yazılımı ise, SfM algoritmaları açısından oldukça gelişmiş olmasına rağmen, yoğun işlemleri için CUDA destekli bir grafik işlemcisine ihtiyaç duymaktadır. Bu durum, sistemimizin mevcut bilgisayar altyapısında işlem yapmayı zorlaştırdığı için pratikte kullanılamamıştır. Aynı şekilde, COLMAP ıktıları üzerinden alışan OpenMVS yazılımı da benzer şekilde yüksek işlem g talep etmektedir.

VisualSfM'in tercih edilmesi, sistemin düşük maliyetli ve taşınabilir yapısıyla uyumlu olup, görüntü işlemeyi CPU tabanlı olarak gerçekleştirebilme olanağı sunmuştur. Ek olarak, GUI destekli bir yapı sunduğundan kullanıcıya ara yüz üzerinden manuel müdahale ve kontrol imknı da tanınmaktadır. Kullanıcı arayüzüne dayalı alışan Regard3D gibi alternatif yazılımlar da incelenmiş, ancak VisualSfM'in hem kullanım kolaylığı hem de işlem uyumluluğu nedeniyle tercih edilmesi uygun görülmüştür.

SfM ve MVS algoritmalarının başarılı çalışabilmesi için fotoğrafların doğru şekilde hizalanması büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle, motor hareketleri sabit açılarla ve titreşimsiz biçimde yapılmakta; ayrıca görseller sistemli olarak v_d_h_k.jpg formatında adlandırılmaktadır. Bu yapı sayesinde görüntüler arasında yeterli örtüşme sağlanmakta ve model üretimi için uygun veri seti oluşturulmaktadır.

4. Uygulama ve Sonuçlar

Bu bölümde, geliştirilen fotogrametri sisteminin uygulamalı testi gerçekleştirilmiş ve sistemin performansı nicel ve nitel çıktılarla değerlendirilmiştir. Seçilen rnek nesne üzerinden yapılan tarama işlemi sayesinde, sistemin hem mekanik hem de yazılımsal bütünlüğü sınıanmış, 3D modelleme süreci boyunca alınan fotoğrafların kalitesi, kamera ve ışık konumlandırmasının etkisi ve arka planın tek renkli olmasının sonuçlara yansıması analiz edilmiştir.

Ayrıca, farklı senaryolarda elde edilen nokta bulutu yoğunlukları karşılaştırmalı olarak sunulmuş ve elde edilen modellerin görsel ıktıları ekler bölümünde paylaşılmıştır.

4.1. rnek Tarama Uygulaması

Sistemin performansını değerlendirmek amacıyla, örnek bir nesne olarak küçük boyutlu bir ördek modeli seçilmiştir. Bu model, farklı ışıklandırma ve arka plan senaryolarında taranarak, sistemin üç boyutlu modelleme şekil 4.1’de görüldüğü gibi başarımı gözlemlenmiştir.



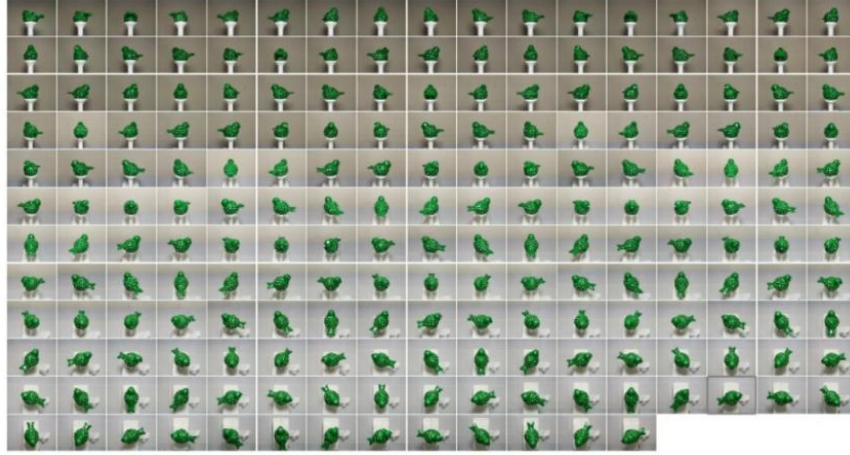
şekil 4-1 Tarama işlemi

Uygulama sürecinde, ördek modeli sabit bir dnr tabla üzerine yerleştirilmiş ve sistem tarafından önceden belirlenen motor adımları doğrultusunda toplam 300 farklı açıdan fotoğraflanmıştır. Kamera ile model arasında yaklaşık 10 ile 15 cm’lik sabit bir mesafe korunmuş, böylece hem netlik hem de ölçek açısından tutarlı görüntüler elde edilmiştir. şekil 4.2’de görüldüğü gibi arka plan beyazdır.



şekil 4-2 Beyaz Arka Planlı

Modelin arka planı, ideal koşullarda tamamen beyaz tek renkli bir yüzey olarak tercih edilmiştir. Bu sayede modelin kenarlarının görüntü işleme yazılımları tarafından daha doğru bir şekilde algılanması sağlanmış ve arka plan kaynaklı segmentasyon hataları önemli ölçüde azaltılmıştır. Fotoğraflar, Raspberry Pi kontrolcüsü aracılığıyla otomatik olarak çekilmiş ve kablosuz bağlantı (Wi-Fi) yoluyla bilgisayara aktarılmıştır.

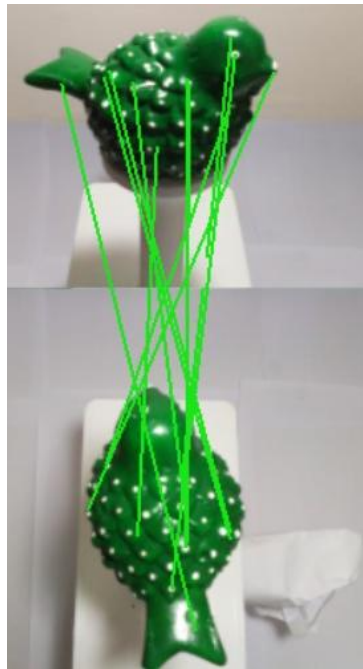


Şekil 4-3 Fotoğraf Seti

Işıklandırma ile model yüzeyleri homojen aydınlatılmış, gölgeler azalmıştır. Tek renkli beyaz arka plan ise modelin sınırlarının yazılım tarafından daha net algılanmasını sağlamış, segmentasyon hataları en aza indirilmiştir.

4.2. Elde Edilen 3D Modeller

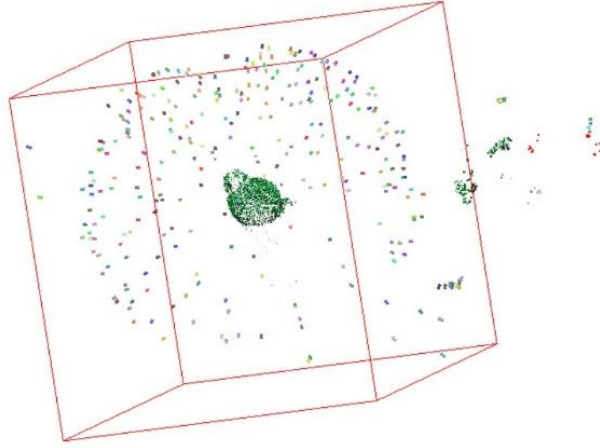
Fotoğraf çekimi ve veri aktarım sürecinin ardından, elde edilen görüntüler VisualSFM yazılımına aktarılmış ve burada Structure from Motion (SfM) yöntemiyle ilk olarak seyrek nokta bulutu (sparse point cloud) oluşturulmuştur. Bu aşamada sistem, her bir görüntüdeki ortak özellik noktalarını tespit ederek kameraların uzaydaki konumlarını ve modelin üç boyutlu yapısının temel iskeletini belirlemiştir.



Şekil 4-4 İki Farklı Fotoğraftaki Özellik Eşleştirme İşlemi (feature matching)

Şekil 4.4'te iki farklı yatay ve dikey açılardan çekilen fotopraftaki özellik eşleştirme (feature matching) işlemi gösterilmiştir.

Ortalama olarak her bir tarama için yaklaşık 4.000–9.000 arasında özellik noktası tespit edilmiştir. Bu sparse bulut, modelin genel geometrisini tanımlamak açısından yeterli bir temel sunmuştur.



Şekil 4-5 3D Reconstruction Uygulama

SfM aşamasının ardından, dense (yoğun) nokta bulutu oluşturulmuştur. Bu süreçte, sparse nokta bulutu referans alınarak görüntülerin tamamı derinlik bilgisiyle eşleştirilmiş ve yüzey detayları artırılmıştır. Dense point cloud aşamasında yaklaşık 10.000–800.000 nokta elde edilmiş ve bu sayede modelin yüzey özellikleri çok daha detaylı biçimde temsil edilmiştir.



Şekil 4-6 Dense Reconstruction

Son olarak, mesh reconstruction modülü ile yüzey ağı (mesh) çıkarımı yapılmıştır. Bu adımda, yoğun nokta bulutu üçgen yüzeylerle birleştirilmiş ve modelin 3D geometrik yapısı tamamlanmıştır. Mesh modeli daha sonra optik düzeltme ve yüzey yumuşatma işlemlerine tabi tutulmuştur. Modelin üst ve alt bölgelerinde kamera açısından kaynaklanan örtüşme eksiklikleri dışında genel form başarılı bir şekilde elde edilmiştir.



Şekil 4-7 Meşleme İşlemi (Meshing Process)

4.3. Sistem Performans Analizi

Sistem, yapılan uygulamalarda genel olarak stabil ve tutarlı bir performans sergilemiştir. Özellikle beyaz ve tek renkli arka plan ile desteklenen ortamda, kamera görüş alanındaki nesne sınırları yazılım tarafından doğru şekilde algılanmış ve bu da nokta bulutu oluşumunu olumlu yönde etkilemiştir. Aydınlatmanın yeterli olduğu koşullarda, yüzey detayları daha belirgin şekilde çıkarılmış, gölgelenme minimum seviyeye indirilmiştir.

Bu uygulamada 300 adet orta çözünürlüklü fotoğraf ile yapılan çekimlerde, hem sparse hem de dense point cloud verilerinde yapısal bütünlük korunmuş ve modelleme süreci sorunsuz tamamlanmıştır. Ancak daha fazla sayıda ve farklı açılardan çekilmiş görüntüler ile daha yüksek kaliteli bir model elde edilebilirdi. Benzer şekilde, daha homojen bir ışık dağılımı ve stüdyo tipi ortam şartları sağlansaydı, modelin üst ve alt bölgelerindeki yüzey eksiklikleri de azaltılabilirdi.

Sonuç olarak sistem, uygun çevresel koşullar altında etkin biçimde çalışmakta; ancak iyileştirilmiş çekim ortamı ve artırılmış veri ile çok daha kaliteli çıktılar üretme potansiyeline sahiptir.

Tablo 2 Aydınlatma Etkisi

Koşul	Nokta Yoğunluğu	Mesh Kalitesi	Gözlemler
Aydınlatmasız, renkli arka plan	Düşük	Zayıf	Görüntü yüksek, kenarlar bozuk
Aydınlatmalı, beyaz arka plan	Yüksek	Orta-İyi	Net sınırlar ve yüzeyler düzgün
Ekstra fazla fotoğraf	Çok Yüksek	İyi	Detaylı, daha düzgün mesh

5. Tartışmalar

Bu bölümde, geliştirilen fotogrametri tabanlı 3D tarama sisteminin performansı mühendislik kriterleri çerçevesinde değerlendirilmiştir. Sistem; mekanik stabilite, elektronik kontrol güvenilirliği, yazılım iş akışı ve çıktı kalitesi açısından ayrı ayrı analiz edilmiştir. Uygulama aşamasında elde edilen çıktılar, belirlenen tasarım hedefleriyle karşılaştırılmış ve sistemin hangi açılardan yeterli olduğu, hangi alanlarda geliştirmeye açık olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, sistemin gerçek çalışma koşullarında karşılaştığı teknik sınırlamalar, bu sınırlamaların nedenleri ve çözüm yaklaşımları detaylı biçimde ele alınmıştır.

5.1. Başarılan Hedefler

Proje kapsamında hedeflenen düşük maliyetli, modüler ve otomasyona uygun bir fotogrametri sistemi tasarımı başarıyla gerçekleştirilmiştir. Raspberry Pi mikrodenetleyicisi üzerinden hem motor kontrolü hem de fotoğraf çekimi senkronize bir şekilde yürütülmüş, belirlenen algoritma doğrultusunda sistem tutarlı bir döngü içerisinde çalışmıştır. Mekanik bileşenlerin (dışli sistemi, kamera taşıyıcısı) doğru oranlarda tasarlanması sayesinde döner tabla dengeli bir hareket sağlamış ve titreşimden kaynaklı görüntü bozulmaları minimumda tutulmuştur. Görüntü verileri VisualSFM ile işlenerek seyrek nokta bulutu, ardından yoğun nokta bulutu ve mesh model üretilmiştir. Bu aşamalar gösterdi ki sistem, belirli ortam koşulları altında 3D modeli başarıyla çıkarabilmekte ve teorik planlamayı pratikte doğrulayabilmektedir. Ayrıca, otomatik veri aktarımı ve iş akışı, sistemin kullanım kolaylığını artırarak kullanıcı müdahalesini en aza indirmiştir.

5.2. Karşılaşılan Sorunlar ve Çözüm Yolları

Sistemin test sürecinde, çıktı kalitesini etkileyen çeşitli faktörler fotoğraf sayısı, arka plan yapısı ve aydınlatma seviyesi karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Bu değişkenlerin, modelin doğruluğu ve elde edilen nokta bulutu yoğunluğu üzerinde doğrudan etkili olduğu gözlemlenmiştir.

5.2.1. Aydınlatma Seviyelerine Göre Karşılaştırma

Her test senaryosunda, aynı örnek nesne (ördek modeli) kullanılarak sistem farklı aydınlatma koşullarında değerlendirilmiştir. Kamera, model etrafında yatayda 10 ve düşeyde 20 farklı konumda olacak şekilde konumlandırılmış ve toplam 200 farklı açıdan fotoğraf çekilmiştir. Elde edilen görüntüler VisualSFM ile işlenerek dense point cloud oluşturulmuş; her durumda oluşturulan objelerin sayısı, bütünlüğü ve nokta yoğunluğu analiz edilmiştir.

- **Çok Düşük Aydınlatma:** Aydınlatma yetersizliği nedeniyle görüntülerde yüksek oranda gölgelenme ve kontrast kaybı oluşmuştur. Yazılım 12 farklı objeyi tanıyabilmiş ve bunlar birbirinden kopuk, eksik bağlantılı yapılar şeklinde algılanmıştır. Hiçbir obje tam olarak modellenememiştir. Elde edilen dense point cloud sayısı: 3.830. Bu değer, modelleme açısından yetersiz bir seviyeyi işaret etmektedir. Şekil 5.1’de gösterilmiştir.



Şekil 5-1 Çok Düşük Aydınlatmadaki Objeler ve Point Cloud Sayısı

- **Düşük Aydınlatma:** Bu koşulda sistem 4 objeyi kısmen tanımlayabilmiştir. Bu objelerden biri görece daha bütünlüklü iken diğerleri ciddi eksiklikler içermektedir. Görüntülerin netliği göreceli olarak artmış ancak ışık dağılımı hâlâ dengesiz kalmıştır. Dense point cloud sayısı: 62.473. Kalite, çok düşük aydınlatmaya göre artmış olsa da, model detayları halen sınırlıdır. Şekil 5.2’de gösterilmiştir.



Şekil 5-2 Düşük Aydınlatmadaki Objeler ve Point Cloud Sayısı

- **Orta Seviye Aydınlatma:** Bu aydınlatma düzeyi sistem için en verimli koşulu sağlamıştır. Görüntüler yeterince net, kontrastlı ve gölgeden arındırılmıştır. Yazılım, tek ve bütünlüklü bir ördek modelini doğru şekilde oluşturmuş, parçalanma veya eksiklik görülmemiştir. Elde edilen dense point cloud sayısı: 215.382. Bu seviye, model bütünlüğü ve nokta yoğunluğu açısından optimum sonuçları sağlamıştır. Şekil 5.3’te gösterilmiştir.



Şekil 5-3 Orta Aydınlatmadaki Objeler ve Point Cloud Sayısı

- **Yüksek Aydınlatma:** Yüksek aydınlatma seviyesinde iki ayrı obje tespit edilmiştir. Bunlardan biri tam bir ördek modelini temsil ederken, diğeri kısmen eksik bir yapıya sahiptir. Aşırı parlak alanlarda detay kayıpları gözlemlenmiştir.



Şekil 5-4 Yüksek Aydınlatmadaki Objeler ve Point Cloud Sayısı

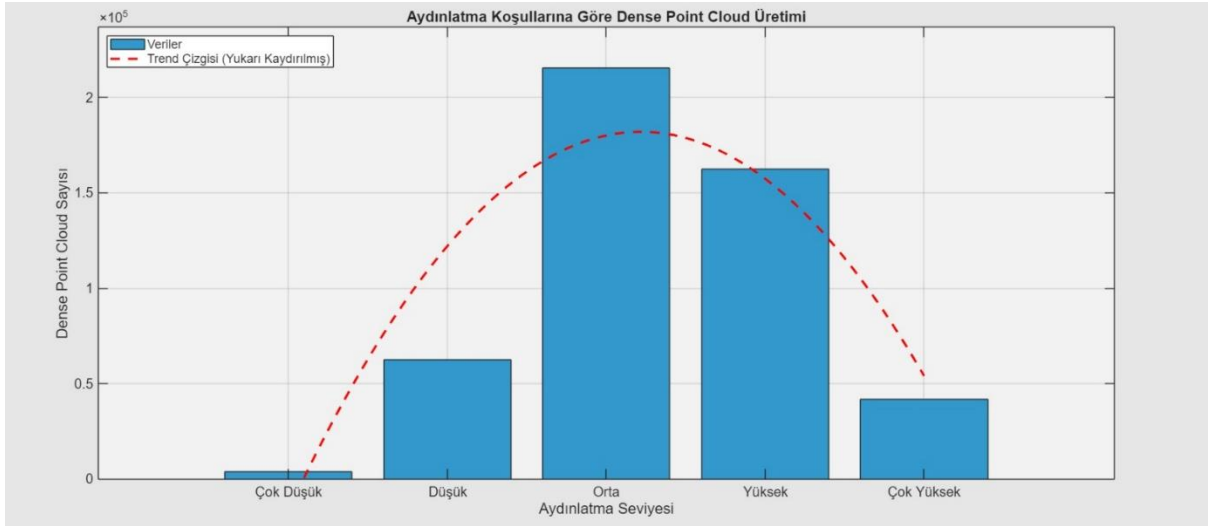
Şekil 5.4'te gösterildiği gibi dense point cloud sayısı: 162.543. Bu değer orta seviyeye kıyasla daha düşüktür ve aşırı ışığın bazı bölgelerde aşırı pozlamaya neden olduğu görülmüştür.

- **Çok Yüksek Aydınlatma:** Bu durumda sistem, 10 farklı parça (obje) tespit etmiş ancak bunların hiçbirini tam olarak modellenememiştir. Aşırı ışık yansıması ve patlayan beyaz bölgeler nedeniyle yazılım detayları ayırt etmekte zorlanmış ve model bütünlüğü ciddi şekilde bozulmuştur. Dense point cloud sayısı: 41.825. Bu sonuç, sistemin çok yüksek ışıpta kararlılığını kaybettiğini göstermektedir. Şekil 5.5'te gösterilmiştir.



Şekil 5-5 Çok Yüksek Aydınlatmadaki Objeler ve Point Cloud Sayısı

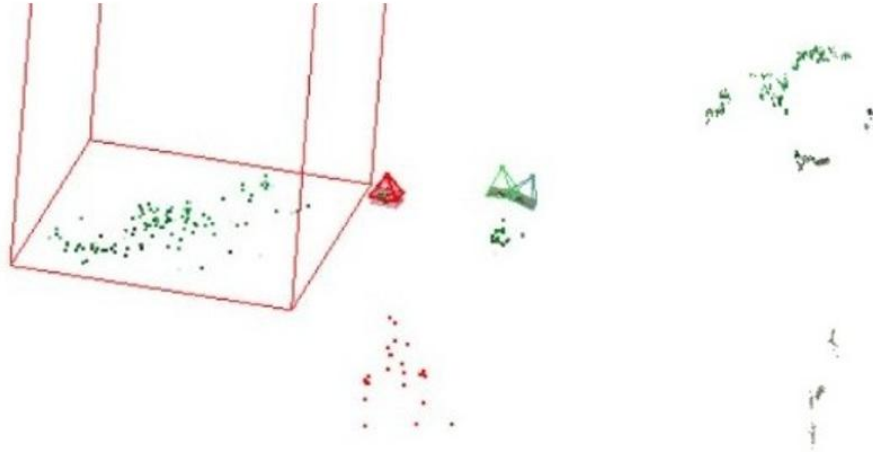
Aydınlatma seviyesi, fotogrametri tabanlı modelleme sistemlerinde modelin bütünlüğünü ve nokta yoğunluğunu doğrudan etkileyen kritik bir parametredir. Yapılan testler sonucunda, orta seviye aydınlatma koşulları, model doğruluğu ve veri yoğunluğu açısından en verimli sonuçları vermiştir. Çok düşük ve çok yüksek ışık seviyeleri ise hem modelin parçalanmasına hem de algoritmaların doğru eşleşme yapamamasına yol açarak çıktının kalitesini düşürmüştür. Farklı aydınlatma düzeylerinde dense point cloud üretimi Şekil 5.6'da gösterilmiştir.



Şekil 5-6 Farklı Aydınlatma Düzeylerinde Dense Point Cloud Üretimi

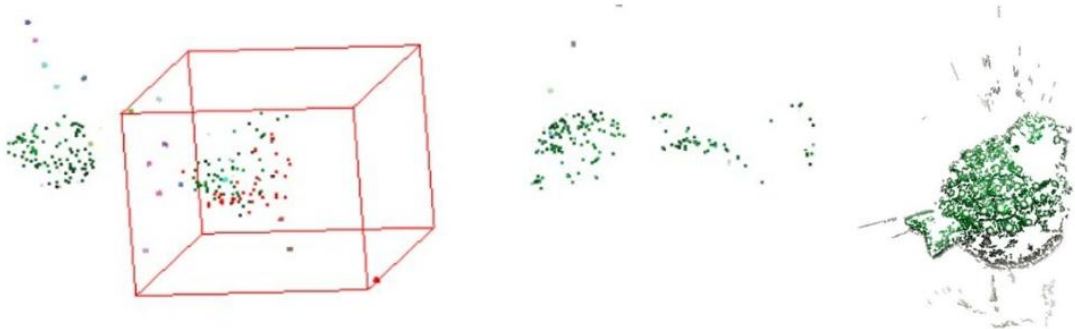
5.2.2. Fotoğraf Sayılarına Göre Karşılaştırma

- **25 fotoğraf** ile yapılan taramada 30.300 dense point cloud elde edildi. Sistem 3 obje oluşturdu ancak hepsi eksik ve parçalıydı. Şekil 5.7’de gösterilmiştir.



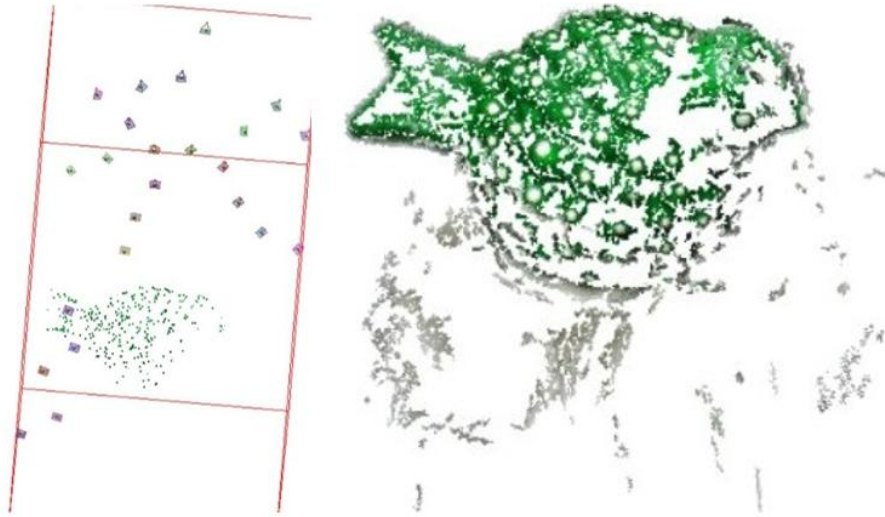
Şekil 5-7 25 Fotoğraf 3D Yeniden Yapılanma, Dense ve Point Cloud Sayısı

- **50 fotoğraf** ile 45.128 dense point cloud üretildi. Yine 3 obje algılandı fakat model bütünlüğü sağlanamadı. Şekil 5.8’de gösterilmiştir.



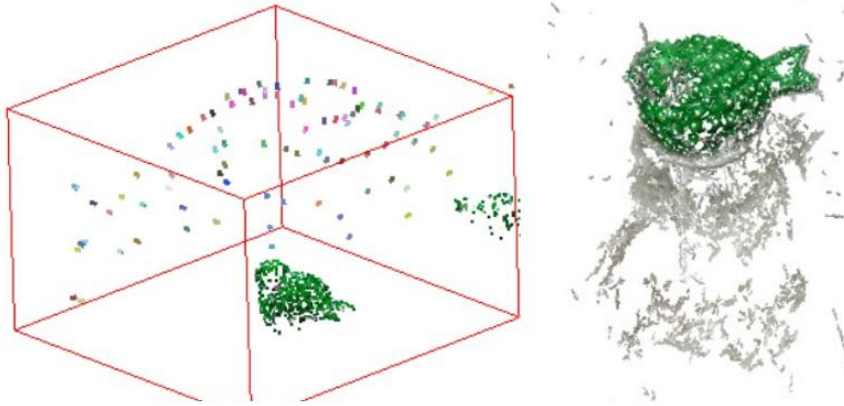
Şekil 5-8 50 Fotoğraf 3D Yeniden Yapılanma, Dense ve Point Cloud Sayısı

- **100 fotoğraf** ile yapılan işlemde 77.631 dense point cloud oluşturuldu. Bu kez 1 obje üretildi, genel form belirgindi ancak bazı eksikler mevcuttu. Şekil 5.9’da gösterilmiştir.



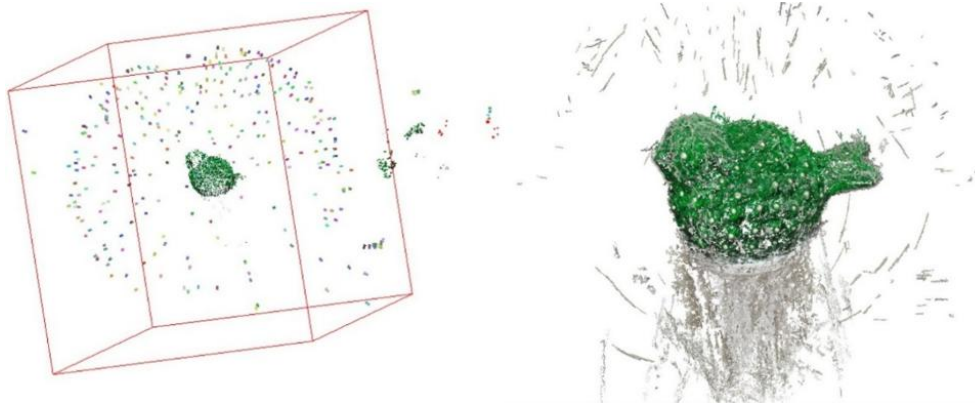
Şekil 5-9 100 Fotoğraf 3D Yeniden Yapılanma, Dense ve Point Cloud Sayısı

- **200 fotoğraf** ile 233.376 dense point cloud elde edildi. Tek ve bütünlüklü bir model oluşturularak tatmin edici bir sonuç alındı. Şekil 5.10’da gösterilmiştir.



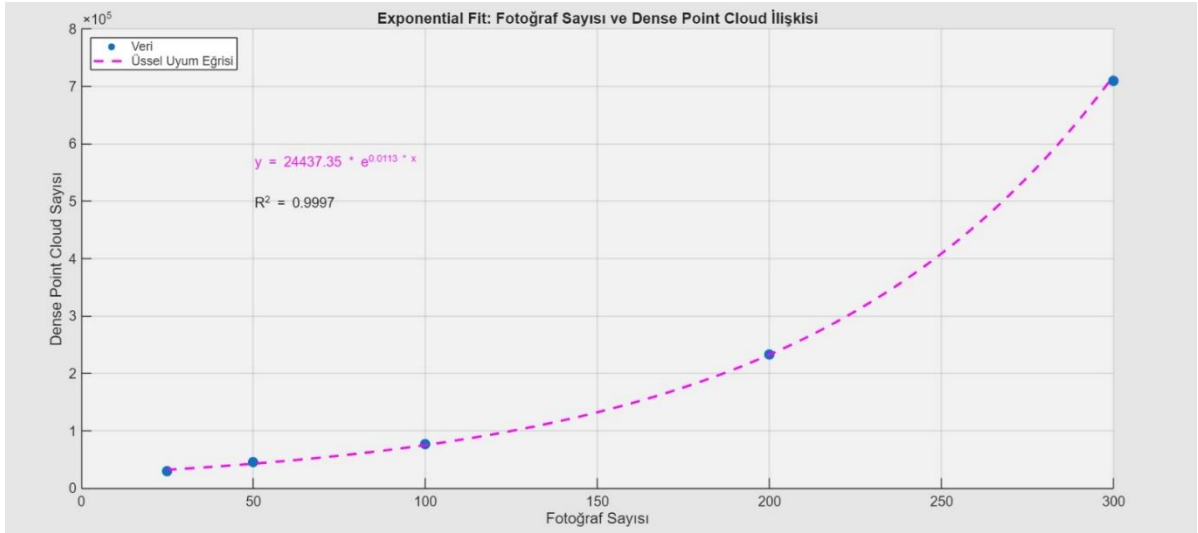
Şekil 5-10 200 Fotoğraf 3D Yeniden Yapılanma, Dense ve Point Cloud Sayısı

- **300 fotoğraf** ile yapılan taramada yine 709.285 dense point cloud elde edildi. Oluşan obje, 200 fotoğrafa göre daha detaylı ve düzgün yapıya sahipti. Şekil 5.11’da gösterilmiştir.



Şekil 5-11 300 Fotoğraf 3D Yeniden Yapılanma, Dense ve Point Cloud Sayısı

Kısaca, Fotoğraf sayısı arttıkça elde edilen dense point cloud miktarı ve model kalitesi genel olarak artış göstermiştir. Şekil 5.12’de çekilen fotoğraf sayısı ile oluşan yoğunluk point cloud sayısı arasındaki ilişki gösterilmiştir.



Şekil 5-12 Farklı Çekilen Fotoğraf Sayılarına Göre Dense Point Cloud Üretimi

5.2.3. Arka Plana Göre Karşılaştırma

Fotogrametri tabanlı 3D modelleme süreçlerinde, elde edilen dense point cloud sayısı her zaman modelin kalitesini tam olarak yansıtmaz. Özellikle arka planın rengi ve düzenliliği, yazılımın objeyi sahneden doğru şekilde ayırabilmesi açısından kritik bir rol oynamaktadır. Çok renkli veya karmaşık arka planlar, yazılım tarafından gürültü (noise) olarak algılanabilir ve bu durum, modelin sınırlarının bulanıklaşmasına ya da parçalanmasına neden olur. Bu sebeple, arka planın tamamen tek renkli ve düz olması, yüksek yoğunluklu veri elde edilse bile modelin bütünlüğünü koruyabilmek açısından gereklidir. Aşağıda aynı sayıda fotoğrafla farklı arka plan koşullarında elde edilen sonuçlar verilmiştir.

- **Tamamen beyaz** arka plan ile 200 fotoğraf çekildi. Tek ve bütünlüklü bir obje oluşturuldu; 162.543 dense point cloud elde edildi ve modelin geometrisi büyük ölçüde doğru şekilde çıkarıldı. Şekil 5.13'te gösterilmiştir.



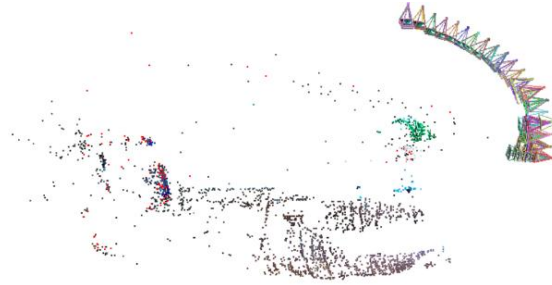
Şekil 5-13 Beyaz Arka Planlı Dense ve Point Cloud Sayısı

- **Yarı beyaz – yarı kahverengi zemin** arka plan kullanıldığında yine 200 fotoğraf çekildi. Bir obje üretildi ancak kenar detaylarında bozulmalar görüldü; 146.098 dense point cloud üretildi. Şekil 5.14'te gösterilmiştir.



Şekil 5-14 Yarısi Beyaz – Yarısi Kahverengi Zemin Arka Planlı 3D Yeniden Yapılanma ve Point Cloud Sayısı

- **Normal çevresel arka plan** (masa, duvar vb.) ile 200 fotoğraf kullanıldığında modelleme başarısız oldu. Tek bir obje tam olarak oluşmadı, sahnede parça parça tanımlamalar yapıldı; Şekil 5.15'te gösterilmiştir. 132.871 dense point cloud üretildi ancak model bütünlüğü sağlanamadı.



Şekil 5-15 Normal Çevresel Arka Planlı 3D Yeniden Yapılanma

5.2.4. Döner Tablanın Geometrik Şekline Göre Karşılaştırma

Fotogrametrik tarama sırasında döner tablanın dengeli dönmesi, görüntülerin netliği ve tutarlılığı açısından kritik öneme sahiptir. Eğer tabla dönerken yalpalama yaparsa, çekilen fotoğraflar arasındaki hizalama bozulur ve bu durum doğrudan nokta bulutu oluşumunu olumsuz etkiler. Bu nedenle sistemde kullanılan mekanik parçaların kararlılığı, tarama kalitesini belirleyen temel unsurlardan biridir.

- **Yalpalayan Döner Tabla:** Projede ilk kullanılan döner tabla Şekil 5.16'da gösterildiği gibi mekanik olarak dengesiz ve dönerken yalpalama yaptı. Bu durum, fotoğrafların açılarında tutarsızlığa neden oldu.



Şekil 5-16 İlk Kullanılan Döner Tabla (Yalpalama Yapan)

Sonuç olarak SfM aşamasında hizalama hataları oluştu ve nokta bulutu bozuk, dağınık ve düşük doğrulukta elde edildi. Özellikle kenar bölgelerde yığılmalar ve boşluklar

dikkat çekiciydi. Şekil 5.17’de yalpalayan döner tabla üzerinde yerleştirilen parçanın dense point cloud’u gösterilmiştir.



Şekil 5-17 Nesne ve Yalpalama Yapan Döner Tabla İle Çekilen Nesnenin Dense Point Cloud Oluşumu

- **Yeniden Tasarlanan Dengeli Döner Tabla:** İlk denemedeki sorunlar sonrası döner tabla daha rijit ve dengeli şekilde yeniden tasarlandı. Yeni yapı sabit ekseninde titreşimsiz döndü, nesne hep merkezde kaldı. Böylece çekimler tutarlı oldu ve nokta bulutu düzgün, boşluksuz ve yüksek doğrulukta elde edildi. Yeniden tasarlanan dengeli döner tabla Şekil 5.18’de gösterilmiştir.



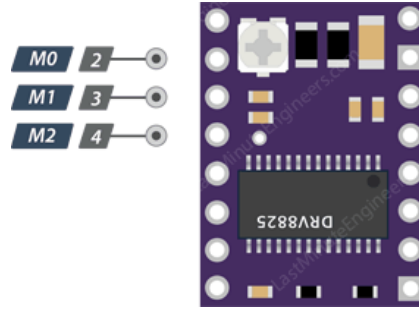
Şekil 5-18 Yeniden Tasarlanan Dengeli Döner Tabla

5.2.5. Mekanizmasında Motor Hızı ve Mikroadımlamanın Etkisi

Ayrıca sistemde, düşey ekseninde yer alan büyük halka dişli mekanizması, step motor ile sürülerek kameranın yukarı-aşağı hareketi sağlanmaktadır. Bu ekseninde kullanılan motor, mikroadımlama (microstepping) yöntemiyle kontrol edilmekte ve farklı hız seviyelerinde sistem davranışı analiz edilmiştir.

Tablo 3 Mikro Adımları

MODE 0	MODE 1	MODE 2	Mikro adımları
LOW	LOW	LOW	Tam Adım (1)
HIGH	LOW	LOW	Yarım Adım (1/2)
LOW	HIGH	LOW	1/4
HIGH	HIGH	LOW	1/8
LOW	LOW	HIGH	1/16
HIGH	LOW	HIGH	1/32
LOW	HIGH	HIGH	1/32
HIGH	HIGH	HIGH	1/32



Şekil 5-19 Mikro Adımlama Pinleri [14]

Yapılan deneysel gözlemler aşağıdaki önemli bulguları ortaya koymuştur:

- **Çok düşük hızlarda** çalıştırılan motor, kamera taşıyıcısının hareketini belirgin şekilde titreşimli hale getirmiştir. Bu titreşim, özellikle halka dişlinin büyük çapı nedeniyle sistemin tamamında sarsıntı etkisi oluşturmuş, fotoğraf çekimi sırasında görüntü stabilitesini azaltmıştır.
- **Orta hız seviyelerinde**, mekanik yapı daha kararlı çalışmış ve hem motor hem de dişli mekanizması daha akıcı bir hareket sağlamıştır. Bu durum, hem görüntülerin netliğini hem de dense point cloud çıktılarının kalitesini olumlu yönde etkilemiştir. Orta hız, sistemin rezonans noktalarından uzak bir aralıkta çalışmasına olanak tanımış, bu da titreşimleri en aza indirmiştir.
- **Yüksek hızlarda** ise sistemde tekrar belirgin titreşim artışı gözlemlenmiştir. Büyük halkanın atalet etkisiyle birlikte hızlı harekette denge kaybı yaşanmış ve bu durum, bazı görüntülerde bulanıklık ve hizalama sorunlarına yol açmıştır. Ayrıca step motorun tork kaybı yaşaması nedeniyle adım kaçırma ihtimali artmıştır.

Bu sonuçlara göre, x eksenindeki motor'nin büyük halka üzerinde çalıştığı hız aralığının dikkatle seçilmesi, hem mekanik stabilite hem de fotogrametrik çıktı kalitesi açısından kritik öneme sahiptir. Mikroadımlama tekniği, hareketi hassaslaştırsa da sistemin kendi fiziksel dinamikleri göz önüne alınmadan seçilen hızlar, veri kalitesini düşürebilmektedir.

5.3. Sistemin Kısıtları

Geliştirilen fotogrametri tabanlı 3D tarama sistemi, belirli hedefleri başarıyla yerine getirmiş olsa da bazı teknik ve operasyonel sınırlamalara sahiptir. Bu kısıtlar hem donanımsal hem de yazılımsal kaynaklıdır ve sistemin genel performansını sınırlayan önemli faktörler arasında yer almaktadır.

- **Donanım Kısıtları:** İlk olarak, sistemin çekim süreci Raspberry Pi tarafından otomatikleştirilmiş olsa da, görüntü işleme aşamaları (SfM ve MVS) yüksek işlem gücü gerektirdiği için harici bir bilgisayarda yürütülmek zorundadır. Bu durum, sistemi tam anlamıyla gömülü ve taşınabilir bir çözüm olmaktan uzaklaştırmakta, iş akışını iki ayrı donanım arasında bölmektedir.

Kamera olarak kullanılan Raspberry Pi Camera V2 modeli sabit odaklıdır ve odak uzaklığı ayarlanabilir değildir. Bu da farklı boyut ve derinlikteki nesnelerin taranmasında netlik kaybına yol açmakta, özellikle küçük detayların kaybolmasına neden olabilmektedir.

Ayrıca, lehimlenen devre üzerinde delikli pertinaks (proto-board) kullanılması, kablo bağlantılarının manuel olarak tek tek yapılmasını gerektirmekte ve bu durum sistemin kurulum süresini uzatmaktadır.

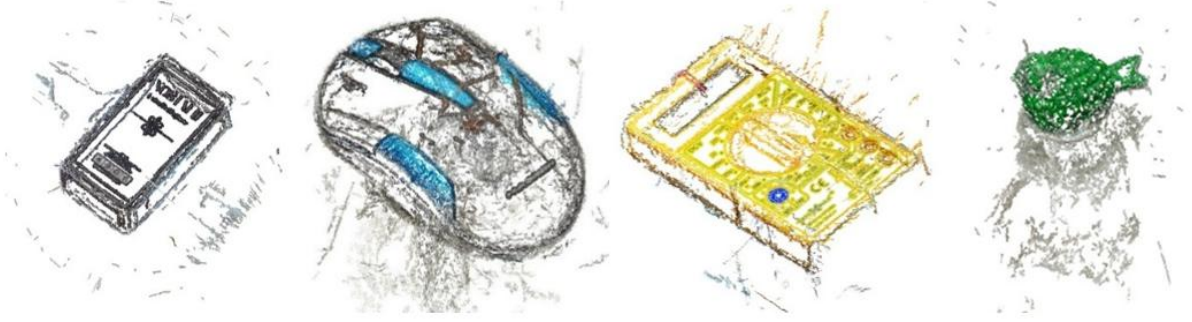
- **Mekanik Kısıtları:** Mekanik yapının belirli geometrik sınırları bulunmaktadır. Kamera taşıyıcının hareket alanı, sistemin yalnızca küçük ve orta boyutlu nesneleri taramasına izin vermektedir. Daha büyük nesnelerin modellenmesi için sistemin fiziksel ölçülerinin genişletilmesi veya hareket eksenlerinin artırılması gereklidir.
- **Çevresel Kısıtları:** Ayrıca, sistem ortam koşullarına oldukça duyarlıdır. Aydınlatma dengesizliği, karmaşık arka planlar, çevresel titreşimler gibi dış faktörler model kalitesini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle sistem, kapalı ve kontrollü bir ortamda daha verimli çalışmakta, doğal ortamlarda ise çıktı kalitesi ciddi şekilde düşebilmektedir. Son olarak, işlem sonrası elde edilen modellerde bazı eksik yüzeyler ve bozulmalar gözlemlenmiştir.

6. Sonuç ve Öneriler

Bu bölümde, geliştirilen fotogrametri tabanlı 3D tarama sisteminin genel değerlendirmesi yapılmakta ve elde edilen sonuçlar ışığında gelecekteki iyileştirme önerileri sunulmaktadır. Yapılan uygulamalar, sistemin temel işlevlerini başarıyla yerine getirdiğini göstermiştir; ancak daha yüksek doğruluk ve esneklik için bazı teknik geliştirmelere ihtiyaç duyulmaktadır.

6.1. Genel Sonuçlar

Bu çalışmada, düşük maliyetli, açık kaynaklı ve yarı otomatik çalışan bir fotogrametri tabanlı 3D tarama sistemi başarıyla tasarlanmış ve uygulanmıştır. Raspberry Pi kontrollü bir yapı üzerinde, step motorlar ve kamera yardımıyla farklı açılardan otomatik fotoğraf çekimi gerçekleştirilmiş; bu görüntülerden VisualSFM yazılımı aracılığıyla sırasıyla sparse point cloud, dense point cloud ve 3D mesh model elde edilmiştir.



Şekil 6-1 Tarama Örnekleri

Yapılan deneyler, özellikle orta düzeyde aydınlatma ve tek renkli (beyaz) arka plan koşullarının model kalitesi üzerinde belirleyici olduğunu göstermiştir. Ayrıca, çekilen fotoğraf sayısı arttıkça, modelin detay seviyesi ve yüzey doğruluğu da önemli ölçüde artmıştır. 200’den fazla yüksek kaliteli görüntü ile yapılan taramalarda, sistem tek ve bütünlüklü bir obje oluşturabilmiş ve fotogrametrik eşleştirme başarılı olmuştur. Şekil 6.1’de başka örnekler gösterilmiştir. Sistem, teknik olarak stabil çalışmakta; mekanik yapı, elektronik kontrol ve yazılım bileşenleri uyumlu şekilde entegre olmuştur. Bununla birlikte, donanımsal sınırlamalar ve çevresel etkenlere duyarlılık, model kalitesini doğrudan etkileyen faktörler arasında yer almaktadır.

6.2. Gelecek Çalışmalar İçin Öneriler

Gelecekte sistemin daha kararlı, kompakt ve akıllı hale gelmesi için aşağıda dört ana başlık altında çeşitli iyileştirme önerileri sunulmuştur.

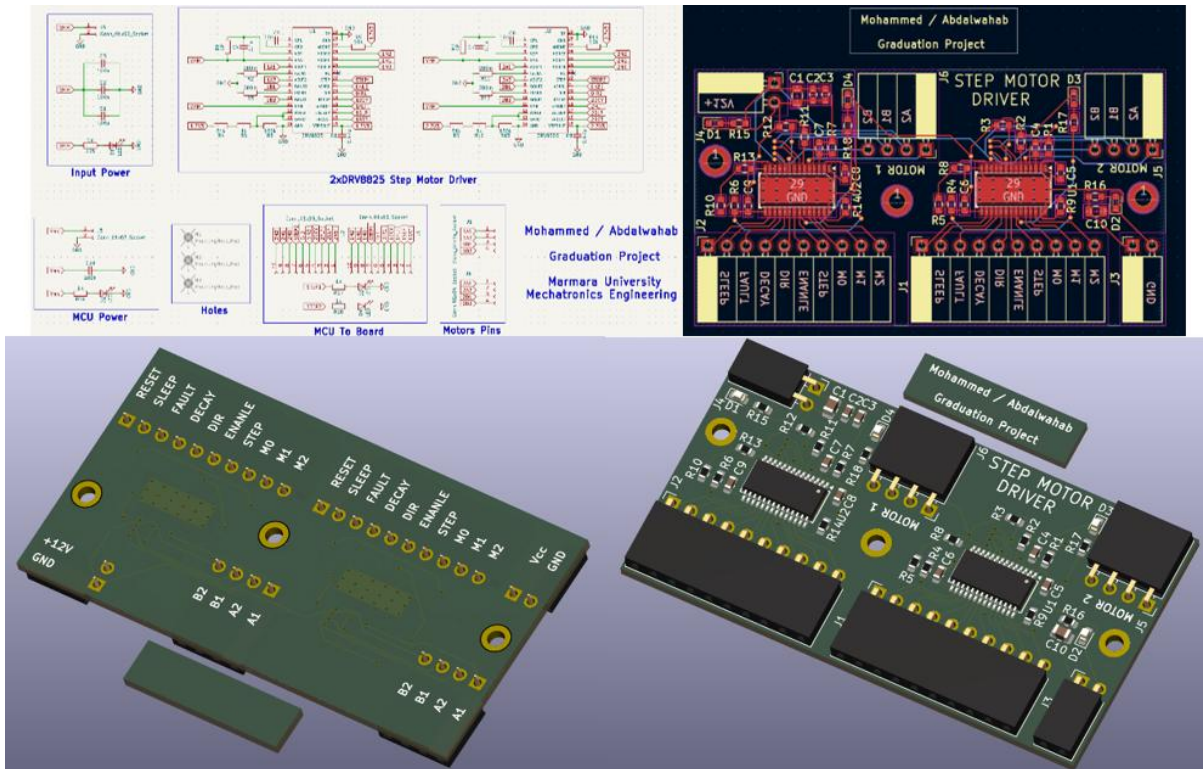
6.2.1. Mekanik Geliştirmeler

- **Objenin Sabitlenmesi İçin Yeni Yöntem:** Mevcut sistemde obje döner tablaya doğrudan yapıştırılmaktadır. Bu yöntem yerine, nesneyi sabitleyip izole eden ve iz bırakmayan bir kelepçe veya destek sistemi tasarlanabilir.
- **Döner Tabla Genişletilmesi:** Kamera taşıyıcı sistemin hareket açıklığı artırılarak daha büyük boyutlu nesnelerin de taranması mümkün hale getirilebilir.

- **Tüm Sistemin İç Mekanda Toplanması:** Elektronik devre kartı, motorlar ve kablolama sistemi için daha kompakt, ergonomik ve kapalı bir gövde tasarlanarak taşınabilirlik ve güvenlik artırılabilir.

6.2.2. Elektriksel Geliştirmeler

- **Odak Ayarlı Kamera Entegrasyonu:** Raspberry Pi kamera yerine değişken odaklı (auto-focus) bir kamera sistemi kullanılarak, farklı nesne boyutlarında daha net görüntüler elde edilebilir.
- **SMD Tasarımı:** SMD tipi devre kartı tasarımı yapılmalıdır. Bu sayede kartın boyutu küçülür, üretim otomasyona uygun hale gelir ve mekanik dayanıklılık artar.



Şekil 6-2 SMD Tasarımı İçin PCB Devre Çizimi, Katman ve 3D Modeli

- **Entegre Güç Yönetimi:** Entegre güç modülü eklenmelidir. Voltaj regülasyonu ve koruma devreleri kart üzerine entegre edilerek sistemin kablo karmaşası ve arıza riski azaltılabilir.
- **LCD Ekran Kullanımı:** Kullanıcı arayüzü için LCD ekran entegre edilmelidir. Bu ekran üzerinden sistem durumu izlenebilir ve ayarlar görsel olarak takip edilebilir.
- **Giriş Kontrol Arayüzü:** Fotoğraf sayısı girişi için kullanıcı kontrol birimi eklenmelidir. Joystick, buton veya dokunmatik ekran kullanılarak yatay ve dikey çekim sayıları kullanıcı tarafından kolayca ayarlanabilir.
- **Ürünleştirme Odaklı Tasarım:** Kart tasarımı ürünleştirmeye uygun olmalıdır. Tüm elektronik birimler tek bir gövdede toplanmalı, sistem ergonomisi ve taşınabilirliği artırılmalıdır.

6.2.3. Yazılım ve Otomasyon Geliştirmeleri

- **Gömülü Görüntü İşleme:** Görüntü işleme görevlerinin Raspberry Pi yerine daha güçlü bir gömülü sistem (örneğin NVIDIA Jetson) ile gerçekleştirilmesi, süreci hızlandıracak ve bağımsızlık kazandıracaktır.
- **Bulut Tabanlı Otomasyon:** Tüm veri aktarımı ve işleme süreci bulut üzerinden gerçekleştirilerek, sistem uzaktan izlenebilir ve tüm modelleme işlemleri otomatik hale getirilebilir.
- **Yapay Zekâ ile Görüntü Seçimi ve Arka Plan Filtreleme:** Yapay zekâ destekli algoritmalar kullanılarak bulanık veya işe yaramayan görüntüler otomatik olarak ayıklanabilir. Aynı zamanda, sahnedeki karmaşık arka planları yazılımsal olarak beyaz fon gibi yorumlayarak modelleme doğruluğu artırılabilir.

7. KAYNAKLAR

- [1]. Sürmen HK., 2022, Fotogrametri ile Üç Boyutlu Tarama – 3B Fotogrametri, Mühendislik Alanında Uluslararası Araştırmalar - I, Serüven Yayınevi, ISBN: 978-625-6399-08-2.
- [2]. Remondino F, El-Hakim S., 2006, Image-based 3D modelling: a review, The Photogrammetric Record, 21(115):269–291.
- [3]. Wu C., 2011, VisualSFM: A Visual Structure from Motion System, <http://ccwu.me/vsfm/>
- [4]. AliceVision, 2024, Meshroom: Photogrammetric Computer Vision Framework, <https://alicevision.org/#meshroom>
- [5]. Regard3D, 2024, Open Source Structure-from-Motion Program, <http://www.regard3d.org>
- [6]. Luhmann T, Robson S, Kyle S, Boehm J., 2013, Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging, De Gruyter.
- [7]. Cignoni P, Callieri M, Corsini M, Dellepiane M, Ganovelli F, Ranzuglia G., 2008, MeshLab: an open-source mesh processing tool, Eurographics Italian Chapter Conference, 129–136.
- [8]. MeshLab, 2024, 3D Mesh Processing Software, <https://www.meshlab.net>
- [9]. OpenScan, 2024, Open-source 3D scanning solutions, <https://openscan.eu>
- [10]. Hartley R, Zisserman A., 2004, Multiple View Geometry in Computer Vision (2nd ed.), Cambridge University Press.
- [11]. Westoby MJ, Brasington J, Glasser NF, Hambrey MJ, Reynolds JM., 2012, Structure-from-Motion photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications, Geomorphology, 179:300–314.
- [12]. Schönberger JL, Frahm JM., 2016, Structure-from-Motion Revisited, Proc. CVPR, <https://colmap.github.io>
- [13]. Blender Foundation, 2024, Blender: Free and Open Source 3D Creation Suite, <https://www.blender.org>
- [14]. Instructables, 2023, Open 3D Scanner: DIY Photogrammetry Rig, <https://www.instructables.com/Open-3D-Scanner/>
- [15]. Solomon C, Breckon T., 2010, Fundamentals of Digital Image Processing: A Practical Approach with Examples in Matlab, Wiley-Blackwell.

[16]. Raspberry Pi Foundation, 2024, Raspberry Pi 4 Documentation, <https://www.raspberrypi.com/documentation>

[17]. Gonzalez RC, Woods RE., 2008, Digital Image Processing (3rd ed.), Pearson Prentice Hall.

[18]. Pololu Robotics, 2024, DRV8825 Stepper Motor Driver Carrier, <https://www.pololu.com/product/2133>

8. Ekler

Ek-1. Mekanik Tasarım (CAD + Prototip)

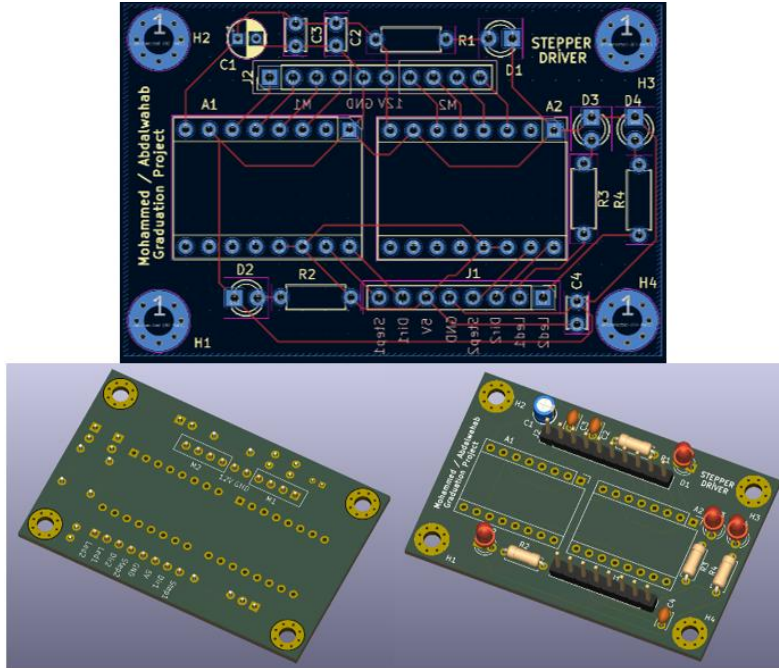
Bu ekte, sistemin tüm mekanik bileşenlerinin CAD çizimleri ve fiziksel prototip görselleri sunulmaktadır. Ana gövde, dişli mekanizmalar, döner tabla, kamera standı ve slider bileşenleri; fotogrametri için gerekli olan iki eksenli hareketi sağlar. Tüm parçalar hassas, sarsıntısız ve tekrarlanabilir çalışacak şekilde tasarlanmış ve test edilmiştir.



Şekil 8-1 Mekanik Parçalar

Ek-2 PCB Tasarımı ve Prototip Görselleri

Bu ekte, sistemin elektronik altyapısına ait devre şeması, PCB yerleşim planı, 3D görünüm ve prototip test kartı görselleri sunulmuştur. Tasarımlar KiCad yazılımı ile hazırlanmış, bileşen yerleşimi ve iz yolları sistemin kararlı çalışmasını sağlayacak şekilde optimize edilmiştir. İlk testler lehimli delikli pertinaks kart üzerinde yapılmış, ardından özel PCB tasarımıyla profesyonel geçiş sağlanmıştır.



Şekil 8-2 Elektronik Bölümünde Tasarlanan Devrenin PCB Katmanı ve 3D Modeli

Ek-3. Yazılım Sistemi (Python Otomasyon)

Bu ekte, Raspberry Pi üzerinde çalışan otomasyon kodları sunulmaktadır. Yazılım; motorları hareket ettirir, kamera ile fotoğraf çeker, görselleri kaydeder ve otomatik olarak bilgisayara aktarır. Başlatma, fonksiyonlar, ana döngü ve hata yönetimi kodlarla modüler şekilde sağlanmıştır. Sistem tam otomatik çalışmaktadır.

```
1 import RPi.GPIO as GPIO
2 import time
3 import os
4 from picamera2 import Picamera2
5 from datetime import datetime
6 import subprocess
7 import sys
8 STEP1, DIR1 = 17, 18
9 STEP2, DIR2 = 23, 24
10 LED1, LED2 = 22, 27
11 DELAY_US = 1000 # Delay between motor steps in microseconds
12 WAIT_TIME = 1 # Delay between 2 motor movement and camera capture
13 camera = Picamera2()
14 camera.configure(camera.create_still_configuration(main={"size": (4096, 3040)}))
15 camera.start()
16 GPIO.setmode(GPIO.BCM)
17 GPIO.setwarnings(False)
18 for pin in [STEP1, DIR1, STEP2, DIR2, LED1, LED2]:
19     GPIO.setup(pin, GPIO.OUT)
20 GPIO.output(LED1, GPIO.LOW)
21 GPIO.output(LED2, GPIO.LOW)
22
23 def wait():
24     time.sleep(WAIT_TIME)
25
26 def move_motor(step_pin, dir_pin, enable_led_on, enable_led_off, steps, direction):
27     GPIO.output(dir_pin, GPIO.HIGH if direction == 'forward' else GPIO.LOW)
28     GPIO.output(enable_led_on, GPIO.HIGH)
29     GPIO.output(enable_led_off, GPIO.LOW)
30     for _ in range(steps):
31         GPIO.output(step_pin, GPIO.HIGH)
32         time.sleep(DELAY_US / 1_000_000)
33         GPIO.output(step_pin, GPIO.LOW)
34         time.sleep(DELAY_US / 1_000_000)
35     GPIO.output(enable_led_on, GPIO.LOW)
36
37 def capture_photo(path):
38     camera.capture_file(path)
39     print(f"Saved: {path}")
40
41 def transfer_photos(photo_dir, targets):
42     for pc_ip, pc_user in targets:
43         target_path = f"{pc_user}@{pc_ip}:/raspberrypi_photos"
44         scp_command = ["scp", "-r", photo_dir, target_path]
45         print(f"Transferring photos to {pc_ip} with: {' '.join(scp_command)}")
46         subprocess.run(scp_command)
47
48 def main():
49     horizontal = int(input("Enter number of horizontal images per level: "))
50     vertical = int(input("Enter number of vertical levels: "))
51
52     photo_dir = f"/home/pi/Desktop/photos/{datetime.now().strftime('%Y-%m-%d_%H-%M-%S')}
53     os.makedirs(photo_dir, exist_ok=True)
54
55     motor1_steps_per_rotation = 200 # Steps required for motor 1 to make one full turn
56     motor2_steps_total = 1200 # Steps required for motor 2 to make one full turn
57     motor1_steps = motor1_steps_per_rotation // horizontal
58     motor2_steps = motor2_steps_total // vertical
59
60     for v in range(1, vertical + 1):
61         move_motor(STEP2, DIR2, LED2, LED1, motor2_steps, 'forward')
62         wait()
63
64         for h in range(1, horizontal + 1):
65             filename = os.path.join(photo_dir, f"v{v}_h{h}.jpg")
66             capture_photo(filename)
67             wait()
68             if h != horizontal:
69                 move_motor(STEP1, DIR1, LED1, LED2, motor1_steps, 'forward')
70                 wait()
71
72             move_motor(STEP1, DIR1, LED1, LED2, motor1_steps * (horizontal - 1), 'backward')
73
74         move_motor(STEP2, DIR2, LED2, LED1, motor2_steps * vertical, 'backward')
75
76     camera.stop()
77     GPIO.cleanup()
78
79     targets = [
80         ("192.168.1.1", "User_Name_1"), ("IP_ADDRESS_1", "User_Name_1"),
81         ("192.168.1.2", "User_Name_2"), ("IP_ADDRESS_2", "User_Name_2")
82     ]
83     transfer_photos(photo_dir, targets)
84     print("Done! Photos transferred to all targets.")
85
86 try:
87     main()
88 except KeyboardInterrupt:
89     print("Interrupted by user.")
90     camera.stop()
91     GPIO.cleanup()
92     sys.exit(0)
93 except Exception as e:
94     print(f"An error occurred: {e}")
95     camera.stop()
96     GPIO.cleanup()
97     sys.exit(1)
```

Şekil 8-3 Raspberry Pi Kodu (Python)

ÖZGEÇMİŞLER

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Abdelwahab Rayis
Doğum Yılı : 2002
Ana Dili : Arapça
Yabancı Dili : İngilizce, Türkçe
E-Posta : rayis2021@gmail.com

EĞİTİM BİLGİLERİ

Derece	Bölüm/Program	Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Mekatronik Mühendisliği	Marmara Üniversitesi	2025

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Muhammed Şeyhoğlu
Doğum Yılı : 2003
Ana Dili : Arapça
Yabancı Dili : İngilizce, Türkçe
E-Posta : muhammet.elsik@gmail.com

EĞİTİM BİLGİLERİ

Derece	Bölüm/Program	Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Mekatronik Mühendisliği	Marmara Üniversitesi	2025