T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PANORAMİK KAMERALARIN KALİBRASYONU VE FOTOGRAMETRİK ENTEGRASYONU

İLKAY MURAT ERTEKİN
YÜKSEK LİSANS TEZİ
HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
JEODEZİ VE COĞRAFİ BİLGİ TEKNOLOJİLERİ PROGRAMI

GEBZE
2022

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PANORAMİK KAMERALARIN KALİBRASYONU VE FOTOGRAMETRİK ENTEGRASYONU

İLKAY MURAT ERTEKİN
YÜKSEK LİSANS TEZİ
HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
JEODEZİ VE COĞRAFİ BİLGİ TEKNOLOJİLERİ PROGRAMI

DANIŞMANI
DOÇ. DR. CUMHUR ŞAHİN

GEBZE
2022

T.R.

GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

CALIBRATION AND PHOTOGRAMMETRIC INTEGRATION OF PANORAMIC CAMERAS

İLKAY MURAT ERTEKIN

A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE

DEPARTMENT OF GEOMATICS ENGINEERING

GEODESY AND GEOGRAPHIC INFORMATION TECHNOLOGIES PROGRAME

THESIS SUPERVISOR

ASSOC.PROF. DR. CUMHUR ŞAHİN

GEBZE

2022

GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ	**YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU**

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 30/06/2022 tarih ve 2022/33 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 12/10/2022 tarihinde tez savunma sınavı yapılan İlkay Murat ERTEKİN'in'ın tez çalışması Harita Mühendisliği Anabilim Dalı Jeodezi ve Coğrafi Bilgi Teknolojileri Programında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE
(TEZ DANIŞMANI) :Doç.Dr.Cumhur ŞAHİN

ÜYE :Doç.Dr.Bahadır ERGÜN

ÜYE :Prof.Dr.Himmet KARAMAN

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
…..…/…..…/..…..… tarih ve ……/…….. sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Bu tez çalışmasında çok algılayıcılı panoramik görüntü elde etme sistemlerinin kalibrasyonunda yaşanan sorunlara çözüm önerisinde bulunulması amaçlanmıştır. Tez çalışmasında yatay eksende beş adet ve düşey eksende bir adet görüntü alan toplam altı kameralı LadyBug2 kamerası kullanılmıştır. Ladybug2 panoramik algılayıcısında bulunan altı kamera balıkgözü merceğe sahiptir. Tezin test aşamasında Ladybug2 kamerasında bulunan altı adet özdeş kameranın her biriyle -üç boyutlu koordinatları bilinen- 112 noktalı kalibrasyon alanının ayrı ayrı görüntüleri alınmıştır. Tez çalışması kapsamında Python dilinde geliştirilmiş kod ile önce piksel koordinatlardan resim koordinatlarına afin dönüşümü yapılmıştır. Resim koordinatlarından direkt lineer dönüşüm ile lineer dönüşümün 11 parametresi hesaplanıp bu parametrelerden iç ve dış yöneltme elemanları hesaplanmıştır. Ardından equidistant projeksiyon parametreleri hesaplanmıştır. Bu parametreler panoramik kalibrasyon odasında izdüşümsel olarak kontrol edilmiştir. Elde edilen düzeltilmiş equidistant projeksiyon koordinatlarından hesaplanan cisim noktaları ile jeodezik olarak ölçülen cisim noktaları karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Panoramik Kamera Kalibrasyonu, Direkt Lineer Dönüşüm, Balıkgözü Mercek, Equidistant Model

SUMMARY

The aim of this thesis is to propose solutions to the problems experienced in the calibration of multi-camera panoramic image acquisition systems. In the thesis study, a multi-camera LadyBug2 camera, which takes five images on the horizontal axis and one image on the vertical axis, was used. All six cameras on the Ladybug2 panoramic sensor are fisheye lenses. In the testing phase of the thesis, separate images of the 112-point calibration area with known three-dimensional coordinates were taken with each of the six identical cameras in the Ladybug2 camera. In the thesis study, firstly, affine transformation from pixel coordinates to image coordinates was made with the code developed in Python software. With direct linear transformation from picture coordinates, 11 parameters of linear transformation are calculated, and inner and outer orientation parameters are calculated from these parameters. Then equidistant projection parameters were calculated. These parameters were controlled projectively in the panoramic calibration room. Object coordinates were calculated from the corrected equidistant projection coordinates obtained and compared with the geodesically measured object points.

Key Words: Panoramic Camera Calibration, Direct Linear Transformation (DLT), Fisheye Lens, Equidistant Model.

TEŞEKKÜR

Başta, yüksek lisans eğitim hayatım boyunca bana her türlü konuda yardımcı olan danışman hocam Doç. Dr. Cumhur Şahin'e,

Yüksek lisans çalışmam boyunca yanımda olan, her türlü destek ve yardımlarını esirgemeyen sayın hocam Doç. Dr. Bahadır Ergün'e,

Bu akademik serüvene başlama ve içinde bulunduğum şartlarda bana sürekli destek olan aileme en içten teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
TABLOLAR DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği	1
2. PANORAMİK SAYISAL KAMERALAR	4
2.1. Panoramik görüntü elde etme yöntemleri	4
2.1.1. Yansımalı Katadioptik Sistemler	5
2.1.2. Yansımasız Dioptik Sistemler	5
2.1.2.1. Çok Algılayıcılı Sistemler	6
2.1.2.2. Balıkgözü Mercekler	6
2.1.2.3. Doğrudan Tarama	8
2.1.2.1. Birleştirme	8
2.2. Panoramik Kameraların Kalibrasyonu	9
2.2.1. Koordinat Sistemleri	9
2.2.2. Balıkgözü Kameralar İçin Equidistant Model	11
2.2.3. Direkt Lineer Dönüşüm	14
3. SAYISAL ÖRNEK ve SONUÇLAR	15
3.1. Çalışmada Kullanılan Çok Algılayıcılı Kamera Sistemi ve Kalibrasyon Alanları	15
3.1.1 Kalibrasyon Alanı	16
3.1.2. Kalibrasyon Odası	17
3.2. Python ile Geliştirilen Uygulama	18
3.3. Kalibrasyon Alanında Yapılan Çalışmalar	23
3.4 Panoramik Kalibrasyon Odasında Uygulama Verileri ile Çalışmalar	27

4. SONUÇ ve ÖNERİLER 41

KAYNAKLAR 43
ÖZGEÇMİŞ 45
EKLER 46

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler ve Kısaltmalar		**Açıklamalar**
ω	:	Dönüklük parametresi
φ	:	Dönüklük parametresi
κ	:	Dönüklük parametresi
X_0	:	İz Düşüm Noktası X koordinatı
Y_0	:	İz Düşüm Noktası Y koordinatı
Z_0	:	İz Düşüm Noktası Z koordinatı
c_x	:	X ekseni odak mesafesi
c_y	:	Y ekseni odak mesafesi
c		Odak mesafesi
x_o	:	Resim orta noktası x koordinatı
y_o	:	Resim orta noktası x koordinatı
DLT	:	Direkt lineer dönüşüm

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No:		Sayfa
2.1:	Sayısal- Panoramik görüntü elde etmek için kullanılan donanımlar.	5
2.2:	Piksel koordinat sistemi	10
2.3:	Resim koordinat sistemi	10
2.4:	Cisim koordinat sistemi	11
2.5	Küresel koordinat sistemine dayalı geometrik model	12
2.6:	Resim koordinat sistemi ile cisim koordinat sistemi arasındaki geometrik ilişki	14
3.1:	LadyBug2	16
3.2:	Kalibrasyon alanı	17
3.3:	Kalibrasyon odası	17
3.4:	Geliştirilen python uygulamasının arayüzü	19
3.5:	Geliştirilen uygulamada nokta seçim çerçevesi	20
3.6:	Geliştirilen uygulamada afin dönüşüm işlemi	21
3.7:	Python dilinde yazılan uygulamaya resim yükleme işlemi	23
3.8:	Afin dönüşüm sonrası piksel ve resim koordinatları	24
3.9:	Hesaplanan direkt lineer dönüşüm parametreleri	25
3.10	Kalibrasyon parametreleri ve equidistant koordinatları	26
3.11:	Geliştirilen uygulamada piksel koordinat sistemindeki hedeflerin 2 boyutlu görselleştirilmiş hali	26
3.12:	Uygulama alanının ladybug2 panoramik kamerası ile elde edilen görüntüsü	28
3.13:	Uygulama alanının ladybug2 panoramik kamerası ile elde edilen görüntüsü	28
3.14:	Uygulama alanının ladybug2 kameraları ile çekilmiş ve Python uygulamasına yüklenen 1 numaralı balıkgözü görüntü	29
3.15:	Uygulama alanının ladybug2 kameraları ile çekilmiş ve Python uygulamasına yüklenen 2 numaralı balıkgözü görüntü.	29
3.16:	Uygulama alanının ladybug2 kameraları ile çekilmiş ve Python uygulamasına yüklenen 3 numaralı balıkgözü görüntü	30

3.17:	Uygulama alanının ladybug2 kameraları ile çekilmiş ve Python uygulamasına yüklenen 4 numaralı balıkgözü görüntü	30
3.18:	Uygulama alanının ladybug2 kameraları ile çekilmiş ve Python uygulamasına yüklenen 5 numaralı balıkgözü görüntü	31
3.19:	Uygulama alanının ladybug2 kameraları ile çekilmiş ve Python uygulamasına yüklenen 6 numaralı balıkgözü görüntü	31
3.20:	1 Numaralı resim için piksel ve resim koordinatları	32
3.21:	Uygulama odası için yerleştirilen hedeflerin görselleştirilmesi	35
3.22:	Cisim noktaları üç boyutlu görselleştirilmesi	36
3.23:	Farklı bir açıdan cisim noktaları üç boyutlu görselleştirilmesi	36
3.24:	Uygulama odası hedeflerinin resim koordinat sistemindeki değerlerinin görselleştirilmesi	37
3.25:	Bir numaralı resim için equidistant ve iç yöneltme ve dış yöneltme elemanları	37
3.26:	İki numaralı resim için equidistant ve iç yöneltme ve dış yöneltme elemanları	38
3.27:	Üç numaralı resim için equidistant ve iç yöneltme ve dış yöneltme elemanları	38
3.28:	Dört numaralı resim için equidistant ve iç yöneltme ve dış yöneltme elemanları	39
3.29:	Beş numaralı resim için equidistant ve iç yöneltme ve dış yöneltme elemanları	39
3.30:	Altı numaralı resim için equidistant ve iç yöneltme ve dış yöneltme elemanları	40
4.1:	Equidistant projeksiyon modelindeki resim noktalarından hesaplanmış cisim nokta koordinatları	42
4.2:	Equidistant projeksiyon modelinden hesaplanan cisim noktaları ile jeodezik ölçme ile ölçülen noktalar	42

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo No:		Sayfa
3.1:	Dengeleme sonrası koordinat doğrulukları	18
3.2:	Altı kamera için kalibrasyon parametreleri	27
3.3:	Birinci resim görüntüsü için piksel, resim ve equidistant koordinatlar	27
3.4:	Bir numaralı resim için piksel ve resim koordinatları	32
3.5:	İki Numaralı resim için piksel ve resim koordinatları	33
3.6:	Üç Numaralı resim için piksel ve resim koordinatları	33
3.7:	Dört Numaralı resim için piksel ve resim koordinatları	33
3.8:	Beş Numaralı resim için piksel ve resim koordinatları	33
3.9	Altı Numaralı resim için piksel ve resim koordinatları	34
3.10	Altı kamera için de iç yöneltme, dış yöneltme elemanları ile resim orta noktaları	34

1. GİRİŞ

Fotogrametri, nesnelere temas etmeden nesnelerin görüntüleriyle nesneler hakkında metrik bilgi elde etme işlemidir [Kraus et al., 2007]. Gelişen teknolojinin etkisiyle birlikte, fotogrametrik çalışmalardaki gelişmelerde giderek artmıştır. Günümüzde bilginin öneminin bu kadar artmasıyla birlikte, buna paralel olarak fotogrametrik çalışmaların kullanım alanları ve önemi de artmıştır. Fotogrametrinin topoğrafya, jeoloji, arkeoloji, restorasyon, madencilik, gibi alanlarla birlikte üç boyutlu modellemenin yoğun olarak kullanıldığı oyun, dizi-film sektörü gibi alanları kapsayan geniş bir kullanım alanı yelpazesi vardır.

İlerleyen tüm bu süreçle beraber insanoğlunun büyük nesneleri tek bir görüntü içine sığdırma çalışması aslında çok eskiye dayanmaktadır [Parian,2007]. Panoramik kameranın icadı Avustralyalı Puchberger' in lensli bir kameranın patentini aldığı 1843 yılına dayanmaktadır [Luhmann, 2004]. Çok büyük nesnelerin minimum sayıda görüntüye sığdırılması fotogrametrik çalışmalar içinde önemli yer tutmaktadır. Fotoğrafların tek tek birleştirilmesi ile başlayan süreç sonunda artık günümüzde 360 derecelik panoramik görüntüler elde eden sistemler mevcuttur.

1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği

Panoramik görüntülerin kullanımı günümüzde giderek artmaktadır. Bu süreçle beraber panoramik görüntü elde etme donanımları da gelişmektedir. Panoramik kameralar daha az görüntü sayısı ile daha çok alan görüntüleyebilirler. Değişik amaçlar için kullanılan panoramik kameralar kültürel mirasın dokümantasyonu, mobil haritalama gibi fotogrametri alanlarında da tercih edilmektedir. Panoramik kameralar geleneksel kameraların aksine merkezi iz düşüm sistemine uymazlar. Bu yüzden panoramik kameralar fotogrametrik çalışmalarda uzun bir süre kullanılmamıştır. Balıkgözü mercekler yüksek distorsiyona sahiptirler. Bu sorunların modellenebilir sorunlar olması ilerleyen teknolojiyle birlikte panoramik kameraların fotogrametri alanında da kullanımını yaygınlaştırmıştır. Çok algılayıcılı kameralar çok çeşitli geometrik konfigürasyonlarda üretilirler. Literatür incelendiğinde kamera modellemesi ve kalibrasyon için birçok matematiksel yöntemin geliştirildiği görülmektedir. Çoklu kamera sistemleri için kalibrasyon

tipik olarak iki farklı parametre grubunu kapsar: her bir kamera için görüntü oluşum geometrisine ilişkin içsel parametreler ve kameralar arasındaki göreceli konumları ve yönelimleri tanımlayan dışsal parametreler.

Günümüzde çoklu kamera sistemleri ile yapılan birçok uygulama bulunmaktadır. Örneğin; [Bosch et al., 2007]'de yapılan çalışmaya göre temelde kara uygulamaları için kullanılan altı kameralı bir çoklu kamera sisteminin sualtı çalışmalarında kullanıldığı gösterilmiştir. [Campos et al., 2007]'de çok yönlü bir kamera içeren düşük maliyetli ve hafif bir Kişisel Mobil Karasal Sistem sunulmuş ve değerlendirilmiştir. [Rau et al., 2007]'de, sırt çantasıyla taşınan bir mobil haritalama sistemi aracılığıyla üç boyutlu ölçüm amacıyla küresel bir fotogrametri görüntüleme sistemi geliştirmeyi amaçlamaktadır. [Wang et al, 2007] hareketli bir araç aracılığı ile toplanan panoramik görüntüler ve mobil LİDAR için otomatik bir karşılıklı bilgi kayıt yöntemi sunar. Panoramik görüntüler, altı balıkgözü mercekten oluşan Ladybug3 kamerasından elde edilen görüntülerdir. [Mirzaei et al., 2011] 3D Velodyne lidar'ın iç parametrelerini tahmin ederken aynı zamanda katı bir şekilde bağlı bir kameraya göre dış kalibrasyonunu hesaplama problemini ele alıyor. Bu sorunu çözmek için, problemi iki en küçük kareler alt problemine ayırın ve bilinmeyen parametreler için kesin bir başlangıç tahmini belirlemek için her birini analitik olarak çözün. Kentsel arama ve kurtarma görevleri için TRADR dış mekân robotu, yüksek kaliteli bir pan-tilt-zoom kameradan yoksundur. Ladybug3 [Chmel et al., 2015]'ten gelen verileri kullanan mevcut bir sanal kamera kullanılarak simüle edilebilir. [Kundu et al., 2017]′in amacı, iç mekân navigasyonu için Omni-tekerlekli bir robotun mutlak bir görsel konum belirleme sistemini geliştirmektir. Çok tekerlekli robotlar çok yönlü sürüş kapasitesine sahiptir. [Kwiatek et al., 2014] bu çalışmada, fotogrametride sürükleyici videografinin potansiyelini araştırır. Sürükleyici video, her bir kamera belirli bir açıya bakacak şekilde düzenlenmiş birden fazla kameradan oluşturulur. [Akın, 2015], yüksek çözünürlüklü ve çok kameraları bir derinlik haritası tahmin donanımı önermektedir. [Firoozfam, 2014] çalışmasında, altı ve on iki sensörlü stereo konik bir görüntüleme sistemi geliştirmiştir. Bu sistem için matematiksel bir model de vermiştir. [Şahin ve Ergun, 2019] çalışmasında, stereo panoramik uygulama yapabilmek için kalibrasyon odasında iki farklı noktadan panoramik görüntü elde edilmiş ve belirlenen hedefler için fotogrametrik üç boyutlu koordinatlar hesaplanmıştır.

Bu tez çalışmasında amacı çok algılayıcılı kamera sistemleri için bir kalibrasyon yazılımı geliştirmektir. Yazılım ile elde edilen balıkgözü mercek parametreleri panoramik kameralar için hazırlanmış kalibrasyon odasında izdüşümsel olarak kontrol edilmiştir.

2. PANORAMİK SAYISAL KAMERALAR

Günümüzde panoramik kamera kullanımı oldukça yaygınlaşmıştır. Panoramik kameraların sağladığı geniş görüş alanı sebebiyle kullanım alanları çok geniştir. Klasik kameraların aksine çok geniş alanları tek bir görüntü üzerinde gösteren panoramik kameralar insanlar ilgisini uzun süre çekmiştir.

2.1. Panoramik görüntü elde etme yöntemleri

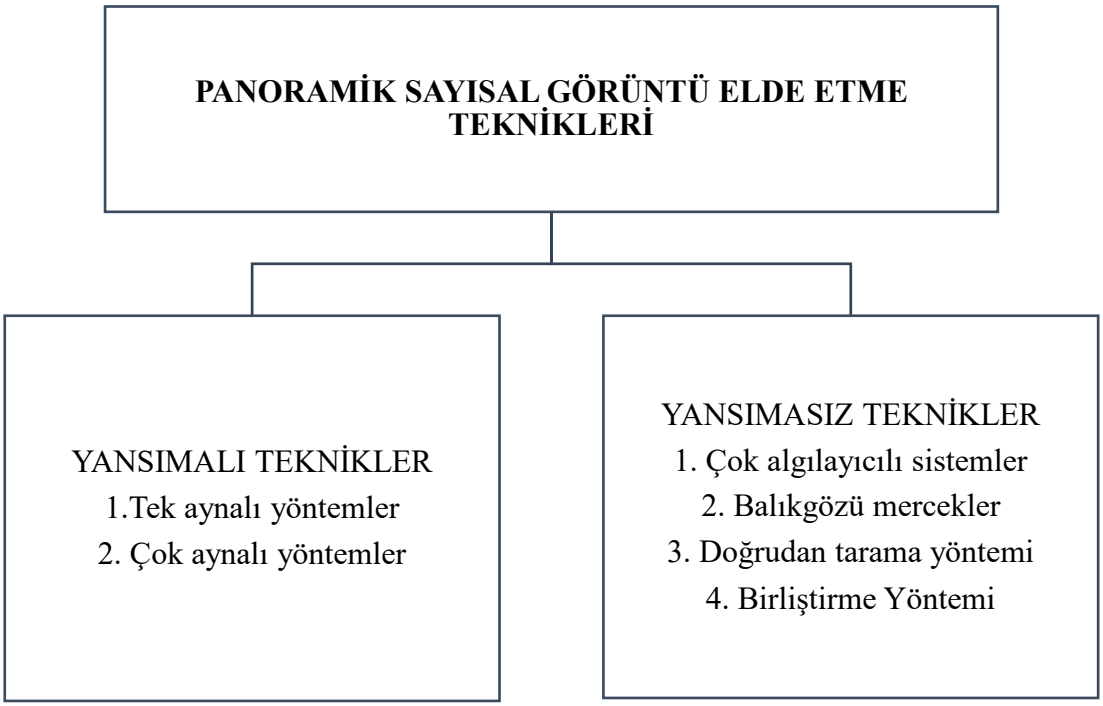
"Panorama" kelimesi Merriam-Webster sözlüğüne göre Yunanca "hepsi" anlamına gelen 'pan' ve 'görüş' anlamına gelen horama kelimelerinin birleştirilmesi ile oluşturulmuştur. Yine Merriam-Webster sözlüğüne göre panorama kelimesinin popüler kullanıma başlama yılı olarak 1796 yılını listelemektedir [Parian, 2007].

İlk panoramik kamera 1843 yılında P. Puchberger tarafından icat edilmiştir. Bu kamera 150° yatay görüş alanına sahip bir panoramik bir kameraydı. M. Greralla ise 1857 yılında İngiltere de dönen kamera icadı görüş alanını 360° dereceye çıkarmıştır [Benosman and Kang, 2001].

Fotogrametri alanında panoramik kameraların gelişimine bakarsak ilk fotogrametrik panoramik kamera 1858 yılında Porro tarafından ve yine aynı yıl Chevallier tarafından yapılmıştır. Porro'nun kamerası dikey bir eksen etrafında dönerek panoramik görüntü üretiyordu. Yine de erken dönem panoramik kameraları fotogrametri alanında başarılı bir şekilde kullanılamamıştır. Bu durumun sebepleri hem görüntü elde ederken döndürme mekaniğinde yaşanan sorunlar ve görüntü düzeltme işlemleri sırasında görüntüleri modellemek daha karmaşık ve daha çok çaba gerektirmesiydi [Luhmann, 2004].

Panoramik kameralar uzun süre fotogrametri alanının dışında kullanılmaya devam etmiştir. Gelişen teknoloji ile panoramik kameraların fotogrametri alanında kullanımı günümüzde daha da artmıştır. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte kameraların yanı sıra panoramik görüntü üretmek için geniş açılı mercekler ve özel aynaların kullanımı gibi çeşitlik yöntemler gelişmiştir [Ergün, Şahin,2009]. Sayısal panoramik görüntü elde etme yöntemlerini Şekil 2.1 de gösterildiği gibi iki ana

başlık altında toplayabiliriz. Bunlar katadioptik (yansımalı) sistemler ve dioptik (yansımasız) sistemlerdir [Parian, 2007].



Şekil 2.1: Sayısal- Panoramik görüntü elde etmek için kullanılan donanımlar.

2.1.1. Yansımalı Katadioptik Sistemler

Yansımalı (Katadioptik) sistemlerde panoramik görüntü oluşumu için hem kamera merceğinin hem de aynalı sistemlerin beraber kullanıldığı sistemlerdir. Kataoptik sistemler ışığı kıran yöntemler için kullanılırken, dioptik sistemler ışığı yansıtan yöntemlere verilen isimdir [Baştanlar, 2005]. Katadioptik sistemlerde panoramik görüntü üretmek için tek görüş noktalı bir aynalı sistem kullanılıyorsa bu nokta, kamera merkez noktası gibi davranır. Gelen ışınlar kamera merkezinde olduğu gibi direkt bu nokta üzerinden geçer [Baker and Nayar, 1999]. Katadioptik sistemlerde panoramik görüntü üretmek için tercih edilen aynalar parabolik ve hiperbolik aynalardır [Baştanlar, 2005].

2.1.2. Yansımasız Dioptik Sistemler

Yansımasız (Dioptik) sistemler ışığı kırarak panoramik görüntü üreten yöntemlerdir. Dioptik sistemler kendi içinde 4 gruba ayrılırlar. Bunlar:

- Çok algılayıcılı sistemler
- Balıkgözü (fisheye) mercekler
- Doğrudan Tarama Yöntemi
- Birleştirme Yöntemi

2.1.2.1. Çok Algılayıcılı Sistemler

Çok algılayıcılı sistemler, geniş görüş alanı elde etmek amacıyla bir platform üzerine monte edilmiş genellikle özdeş ikiden fazla kameranın aynı anda fotoğraf çekip herhangi bir operatöre ihtiyaç duymadan otomatik olarak birleştirildiği panoramik görüntü üretme yöntemidir [Kwiatek, K., 2005]. 1884'te bir balona bağlı yedi kameradan oluşan bir çoklu kamera sistemi üzerinde deneyler Triboulet tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada bir kamera aşağıya doğru bakmaktaydı ve altı kamera balonun çevresine eşit olarak dağıtıldı [Sturm et al., 2010]. Literatür incelendiğinde; çok algılayıcılı sistemlerin, hem donanımsal gelişmeler hem de veri işleme teknolojisindeki ilerlemeler nedeniyle otonom araçlardan, kompleks uydu platformlarına kadar değişik çalışmalarda kullanıldığı görülmektedir.

Çok algılayıcılı sistemlerde görüş alanını arttırmak için balıkgözü mercekler tercih edilir. Balıkgözü merceklerin odak uzaklıkları düşüktür, görüş açıları geniş açıdır. Balıkgözü mercekler çok algıyacılı sistemlerden ayrı olarak direkt tercih edildiklerinde, düşük çözünürlük değerine sahip olurlar [Schneider et al., 2009]. Çok algılayıcılı sistemlerde birden fazla kamera kullanıldığı için görüntü çözünürlüğü yüksek olurken aynı zaman da yine birden fazla kamera kullanıldığından dolayı tek bir iz düşüm merkezi elde etmenin zorluğu dezavantajlı yönüdür [Uyttendaele et al., 2003].

2.1.2.2. Balıkgözü Mercekler

Kısa odak uzaklığına ve 100 derecenin üstündeki görüş açısına sahip mercekler için balıkgözü mercekler tanımı yapılmaktadır. Balıkgözü mercekler bu geniş görüş açısı sayesinde tek bir görüntü ile çok geniş alanları gösterebilmektedir [Schneider et al., 2009]. Balıkgözü merceklerin çok kısa odakları sebebiyle çok yüksek

distorsiyon değerleri vardır ve bu yöntemin en büyük dezavantajı yüksek distorsiyondur [Abraham and Förstner, 2005]. Distorsiyon modellenebildiği için balıkgözü merceklerin kullanımı yaygındır. Gelişen teknoloji ile balıkgözü merceklerin ölçü kamerası olarak kullanımı yaygındır.

Merkezi izdüşümün olduğu perspektif projeksiyonlarda gelme açısı, yansıma açısına eşittir. Gelen ışınlar düzdür ve projeksiyon merkezinde kesişirler. Balıkgözü mercekler için kullanılan projeksiyonların hepsinde gelme açısı yansıma açısından farklıdır [Schneider et al., 2009].

Equidistant projeksiyon:

$$r' = c.\alpha \tag{2.1}$$

Equisolid-angle projeksiyon:

$$r' = 2c.\sin\frac{\alpha}{2} \tag{2.2}$$

Stereographic projeksiyon:

$$r' = 2c.\tan\frac{\alpha}{2} \tag{2.3}$$

Orthographic projeksiyon:

$$r' = c.\sin\alpha \tag{2.4}$$

Balıkgözü mercekleri, merceğin yapısına bağlı olan projeksiyon modellerinin geometrilerine göre de sınıflandırabilir. (2.1) eşitliğinde balıkgözü merceklerde mercek geometrisine göre oluşturulan farklı projeksiyonların eşitlikleri verilmiştir [Prenzel, 1986; Ray, 1994]. (2.1) de ki eşitliklerde r' görüntü yarıçapı, α ışının gelme açısı ve c de görüntü asal mesafesini temsil etmektedir.

Equidistant projeksiyon: bu projeksiyon sisteminde gelme açıları ile radyal mesafe arasında doğru orantı vardır. Bu sebepten dolayı bu projeksiyon sistemi radyal yönde açıların çevrilmesine izin verir.

Equisolid-angle projeksiyon: literatüre bakıldığında Equisolid-angle projeksiyonuna eşit alan projeksiyonu da denir. Bu projeksiyon sisteminde gelen

katı açının oranı ile görüntü sonuç alanının sabit olduğu anlamına gelir. Örtü oranlarının hesaplanmasında bu tür lensler daha uygundur.

Stereographic projeksiyon: Bu projeksiyon tipinde cisim uzayında bulunan herhangi bir açı bu projeksiyon sisteminde de korunmaktadır. Bu sebeple cisim uzayındaki nesnelerin oranı ile projeksiyondaki nesnelerin oranı aynıdır.

Orthographic projeksiyon: Bu projeksiyon tipinde radyal mesafe ile gelme açısının sinüsü doğru orantılıdır. Bu durum görüntünün kenarlarında yüksek bozulmalara neden olsa da yarıkürenin görüntü düzlemi üzerinde ortogonal bir izdüşümünü oluşturur.

2.1.2.3. Doğrudan Tarama

Doğrudan tarama yönteminde, hareketli bir mekanizma üzerinde kameranın yatay eksende 360 derece döndürülmesi ile panoramik görüntüler elde edilir. Bu yöntemde görüntünün düşey ekseni ise kamera odak uzaklığı ile kamera görüş açısına bağlıdır [Kwiatek, K., 2005]. Günümüzde akıllı telefonlar ve çeşitli dönel sabitleyiciler ile bile bu şekilde panoramik görüntüler elde edebilmek mümkündür.

2.1.2.4. Birleştirme

Birleştirme yöntemi panoramik görüntü üretmek için kullanılan ilk yöntemdir. Bu yöntemde geleneksel kameralar ile belirli bir bindirme oranında ardışık görüntüler çekilir ve daha sonra bu görüntülerin bir araya getirilmesi ile panoramik görüntü üretilir [Parian,2006]. Bu yöntemde en büyük dezavantaj olarak panoramik görüntü üretmek için ihtiyaç duyulan çok sayı da bindirme oranına sahip görüntülerin üretilmesi işlemidir.

2.2. Panoramik Kameraların Kalibrasyonu

Kamera kalibrasyonu fotogrametrik işlemlerin temel adımıdır. Kalibrasyon yapılmamış görüntülerdeki bozulma işlemi sonraki adımlara da devam edeceği için fotogrametrik işlemlerde kalibrasyon çok önemlidir. Kamera kalibrasyonu sonunda, kameranın iç parametrelerine dair bilgiler öğrenilir. Elde edilen bu kamera

metrikleri iç yöneltme elemanları, kamera odak uzaklığı, resim ana noktası koordinatları ve distorsiyon parametreleridir. Demet dengelemesi işlemi sonucunda ise kameraya ait dış yöneltme elemanları, yani kamera konum koordinatları ve dönüklük açıkları kestirilir.

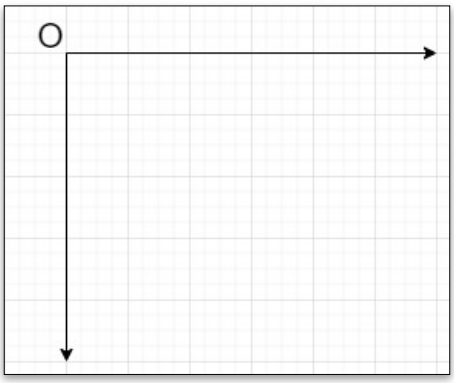
Panoramik kameraların merkezi iz düşüm sistemine uymamaları sebebiyle kalibrasyonları daha kompleks bir yapıdadır. Bu tez çalışmasında hem çoklu kamera sistemi hem de balıkgözü merceklerin kullanıldığı ladybug2 kamerası için bir kalibrasyon yöntemi üzerinde çalışılmıştır.

2.2.1. Koordinat sistemleri

Klasik sayısal fotogrametrik işlemlerde 3 temel koordinat sistemi vardır. Bu koordinat sistemlerini aşağıdaki maddeler şeklinde sıralayabiliriz.

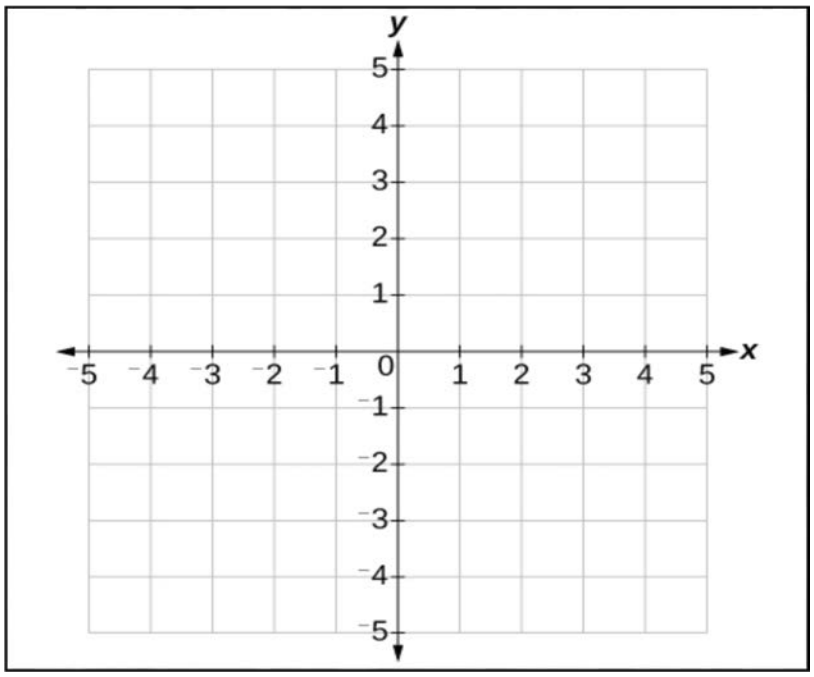
- Piksel Koordinat Sistemi
- Resim Koordinat Sistemi
- Cisim Koordinat sistemi

Piksel koordinat sistemleri dijital görüntünün elde edildiği ilk halinde olan koordinat sistemidir. Şekil 2.2'de gösterildiği gibi başlangıç noktası sol üst köşe olan piksel koordinat sistemleri tek yönlü koordinat sistemleridir. Günümüzde dijital görüntülerde çözünürlük olarak ifade ettiğimiz şey, görüntü üzerindeki piksel sayısıdır ve bu koordinat sistemidir.



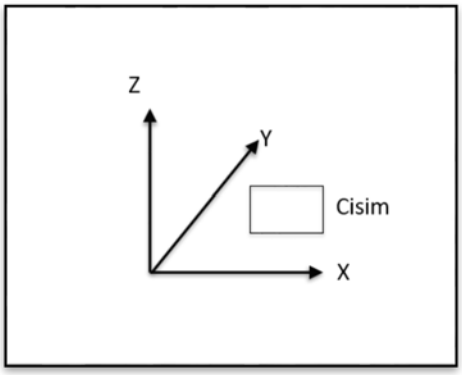
Şekil 2.2: Piksel koordinat sistemi

Piksel koordinat sisteminin tek yönlü olması ve hataların giderilememesi gibi sebeplerle piksel koordinat sisteminden resim koordinat sistemine dönüşüm yapılmaktadır. Şekil 2.3' te gösterildiği gibi resim koordinat sisteminin orijin noktası resim orta noktasıdır. Resim orta bulucular sayesinde resim orta noktası hesaplanabilmektedir.



Şekil 2.3: Resim koordinat sistemi

Cisim Koordinat sistemi ise diğer iki sistemden farklı olarak üç boyutlu bir koordinat sistemidir. Şekil2.4 de gösterildiği gibi, üç boyutlu uzayı temsil eden bu koordinat sisteminde üçüncü boyut olarak yükseklik-derinlik bilgisi de bulunmaktadır.



Şekil 2.4: Cisim koordinat sistemi

Piksel koordinat sistemlerinden resim koordinat sistemlerine geçiş iç yöneltme işlemi ile yapılırken resim koordinat sistemlerinden cisim koordinat sistemlerine geçiş dış yöneltme işlemi ile yapılmaktadır.

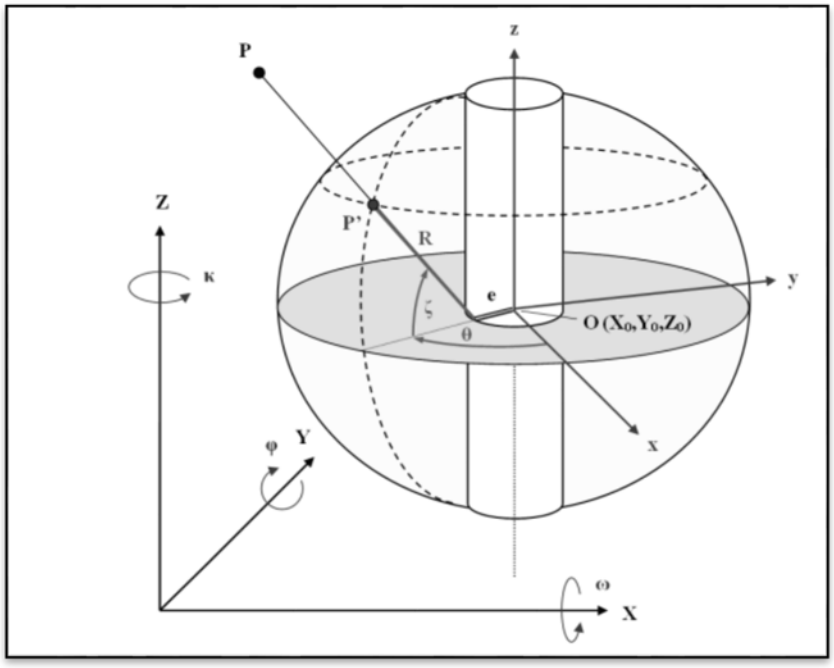
Panoramik görüntüler düzlem koordinat sistemlerine doğrudan aktarılamadıkları için bir resim koordinat sistemi ile cisim koordinat sistemi arasında yardımcı bir koordinat sistemine ihtiyaç duyarlar [Schneider et al., 2009]. Biz tez çalışmasında bir önceki bölümde açıklanan equidistant projeksiyon kullanarak silindirik bir yardımcı koordinat sistemi kullanılmıştır.

2.2.2. Balıkgözü Kameralar İçin Equidistant Model

Balıkgözü mercekler normalde görülemeyecek kadar geniş bir alanı tek bir resim karesine sığdırırlar. Su yüzeyine bakan bir balığın görüntüsüne benzediği için bu ismi almıştır [Schneider et al., 2009]. Balıkgözü mercekleri merceğin yapısına bağlı olarak kullanılan projeksiyon modellerine göre sınıflandırabiliriz. Bunlar equidistant model, equisolid-angle model stereo-graphic ve orthographic projeksiyon model olarak sınıflandırabiliriz [Prenzel, 1986; Ray, 1994]

Bir balıkgözü kamera projeksiyonunu tanımlamak için üç koordinat sistemi kullanılır. Bunlar resim koordinat sistemi, yardımcı koordinat sistemi ve cisim koordinat sistemidir. Balıkgözü mercekler merkezi iz düşüm sistemine uymadıkları için görüntüleme yüzeyleri bir düzlem değil, küredir. Resim koordinat sisteminden direkt olarak cisim koordinat sistemine dönüşüm yapılamadığı için yardımcı bir koordinat sistemine ihtiyaç duyarlar. Yardımcı koordinat sistemi resim koordinat sistemi ile cisim koordinat sistemi arasında ara bir koordinat sistemi olarak konumlanır [Schneider et al., 2009].

Geleneksel merceklerin kullanıldığı kameraların geometrik modeli, bir görüntü yönünde merkezi izdüşüm geometrisi ve diğer görüntü yönünde silindirik bir geometrik olarak tanımlanabilir. Balıkgözü merceklerin kullanıldığı panoramik kameralar herhangi bir merkezi izdüşüm geometrisine uymadıkları için silindirik koordinat sistemi yerine küresel koordinat sistemi kullanılır [Abraham and Förstner, 2005].



Şekil 2.5: Küresel koordinat sistemine dayalı geometrik model

Balıkgözü merceklerden elde edilen görüntüler yüksek distorsiyon içerirler. Merkezi izdüşüm düzlemine uymayan balıkgözü mercekler şekil 2.5 de belirtilen küre bir projeksiyon ile ifade edilirler.

$$x' = c.\frac{\tan^{-1}\frac{\sqrt{x^2+y^2}}{z}}{\sqrt{\left(\frac{y}{x}\right)^2+1}} + x_0' + \Delta x' \quad y' = c.\frac{\tan^{-1}\frac{\sqrt{x^2+y^2}}{z}}{\sqrt{\left(\frac{x}{y}\right)^2+1}} + y_0' + \Delta y' \qquad (2.5)$$

Eşitlik (2.5) de equidistant projeksiyon model koordinatlarına dönüşüm gösterilmektedir.

Radyal distorsiyon, merceklerdeki açısal büyütme ile orantılı olarak merceğe aynı uzaklıktan ancak farklı açılara sahip hedeflerden gelen ışık ışınlarının izdüşüm düzleminin önünde ya da arkasında odaklanması sonucu oluşan görüntü ötelemesi şeklindeki distorsiyondur. İzdüşen ışık ışının izdüşüm merkezinin (resim düzleminin) önünde ya da arkasında odaklanmasına göre distorsiyon pozitif veya negatif olarak adlandırılır. Radyal mercek distorsiyonu matematiksel olarak bir polinom fonksiyonu ile şu şekilde ifade edilir

Distorsiyon temelde optik eksene yatık olarak gelen ışınların farklı kırılma indisli yüzeylere gelip farklı biçimlerde kırılması ile ortaya çıkan bir hatadır. Distorsiyon hatalarında objeler görüntü üzerinde yer değiştirir ve bir ölçek değişimi

söz konusudur. Distorsiyon, radyal distorsiyon ve teğetsel distorsiyon olmak üzere 2 bölüme ayrılır. Distorsiyon parametreleri ise radyal ve teğetsel distorsiyonu modellemek için kullanılan katsayılardır.

Radyal distorsiyonda, merceğe gelen ışık ışınlarının farklı açılardan gelmesi sebebiyle, gelen ışınların resim düzleminin önünde ya da arkasında odaklanması sonucu meydana gelen hatadır. Görüntünün, resim düzleminin önünde ya da arkasında odaklanmasına göre radyal distorsiyon pozitif ya da negatif diye adlandırılır.

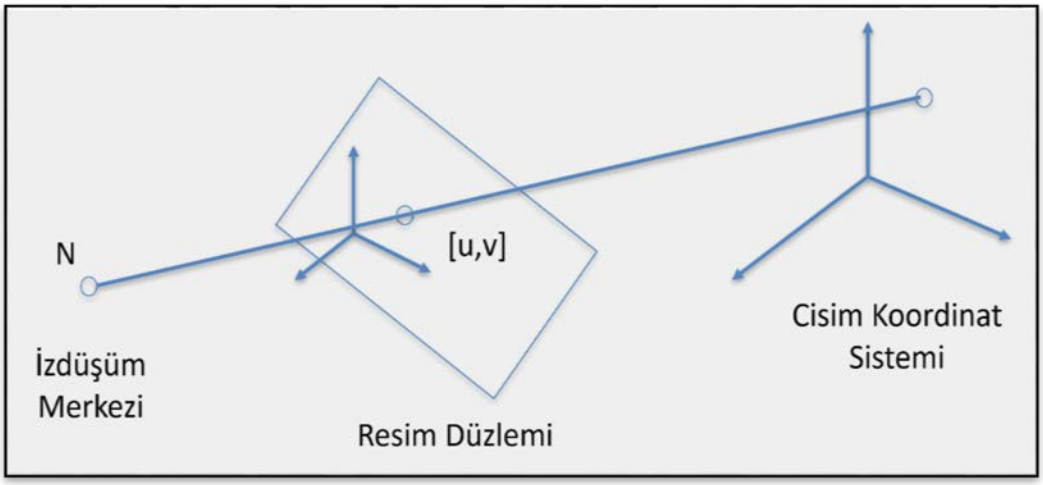
Teğetsel distorsiyon ise kamera merceği ve görüntü sensörlerinin merkezlerinin farklı olması ve görüntüleme düzlemlerinin paralel olmamasından kaynaklanır. Kameralar üretilirken ne kadar dikkat edilse de teğetsel distorsiyon hataları meydana gelmektedir.

$$\begin{aligned} \Delta x' &= x' \,.\, \left(A_1 r'^2 + A_2 r'^4 + A_3 r'^6\right) + B_1 \,.\left(r'^2 + 2x'^2\right) + 2B_2 x'y' + C_1 \,.\, x' \\ &\quad + C_2 \,.\, y' \\ \Delta y' &= y' \,.\left(A_1 r'^2 + A_2 r'^4 + A_3 r'^6\right) + 2B_1 x'y' + B_2 \,.\left(r'^2 + 2y'^2\right) \end{aligned} \tag{2.6}$$

Eşitlik (2.6) de equidistant model denklemlerinin düzeltmeleri gösterilmiştir. Eşitlik (2.6) de gösterilen $A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, C_1, C_2$ parametreleri distorsiyon parametreleridir. A_1, A_2, A_3 Radyal distorsiyon parametrelerini ifade ederken, B_1, B_2 parametreleri ise asimetrik ve teğetsel distorsiyon parametrelerini ifade etmektedir. Son olarak C_1, C_2 parametreleri ise ölçek ve kayma değerlerini ifade etmektedir.

2.2.3. Direkt Lineer Dönüşüm

Direkt lineer dönüşüm yönteminin temel prensibi resim koordinatları ile cisim koordinatları arasında lineer bir ilişki kurmasıdır.



Şekil 2.6: Resim koordinat sistemi ile cisim koordinat sistemi arasındaki geometrik ilişki

Şekil 2.6 de direkt lineer dönüşümün temel aldığı resim ve cisim koordinat sistemleri arasındaki geometrik ilişki gösterilmiştir. Direkt lineer transformasyonun temelde 11 parametresi bulunur ve bu 11 parametre sayesinde kamera kalibrasyon parametreleri ile iç yöneltme ve dış yöneltme metrikleri elde edilir. [Abdel-Aziz and Karara, 2015].

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ \vdots \\ v_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_1X_1 & -u_1Y_1 & -u_1Z_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & -v_1X_1 & -v_1Y_1 & -v_1Z_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_n & Y_n & Z_n & 1 & -v_nX_n & -v_nY_n & -v_nZ_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ \vdots \\ L_{11} \end{bmatrix} \tag{2.7}$$

Eşitlik (2.7) de Direkt lineer dönüşüm denklerinin matris biçiminde yazılışı gösterilmektedir.

3. SAYISAL ÖRNEK ve SONUÇLAR

3.1. Çalışmada Kullanılan Çok Algılayıcılı Kamera Sistemi ve Kalibrasyon Alanları

Bu çalışma kapsamında, altı adet özdeş kameraya sahip ladybug2 kamerası kullanılmıştır. Ladybug2 üzerindeki balıkgözü merceğe sahip altı kameradan oluşur. Beş kamera yatayda 360 derece görüntüsü verirken altıncı kamera dikey doğrultuda görüntü vermektedir. Ladybug2 kamerası ile elde edilen görüntüler 'Ladybug Pro' ve 'Ladybug Cap Pro' yazılımı ile yapılır. Yazılım üzerinden görüntü ve video almak gibi opsiyonlar bulunurken ilgili kameralara ait ilgili görüntüler de çeşitli resim formatlarında çıkarılabilmektedir.

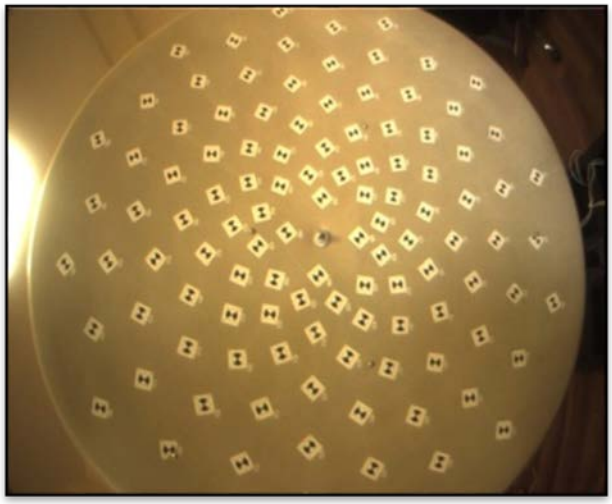
Ladybug2 çok algılayıcılı kamera sistemin donanım yapısı temelde 2 ana bölüme ayrılır: Altı adet balıkgözü merceklerden oluşan algılayıcı ve kontrol biriminin ana birimdir. Ana birim renkli, 1024X768 çözünürlüklü, piksel büyüklüğü 4,65 µm olan altı tane Sony ICX204AQ 1/3'' CCD algılayıcının birleştirilmesinden oluşur. Bitişik kameralar arasında küçük bir üst üste binme alanı olduğu için, mercekler elde edilmiş verinin birleştirilmesine olanak verecek şekilde seçilmiştir yönüdür [Uyttendaele et al., 2003]. Ladybug2 çok algılayıcı kamera sisteminde bulunan altı özdeş merceğin tamamı balıkgözü mercek olduğu için görüntüler yüksek distorsiyon içermektedir. Distorsiyon modellenebilir bir sistemik hata olduğu için görüntü üzerindeki bozulmaları ilave geometrik yöntemler ile hesaplanmalıdır. En yaygın yaklaşım distorsiyon transformasyonunun polinomal yaklaşımı temeline dayanan yaklaşımdır [Kock, 2007].

Şekil 3.1: LadyBug2

Çalışmada kullanılan, altı adet fisheye (balıkgözü) merceğin kalibrasyon parametrelerini bulmak için kullanılan üç boyutlu kalibrasyon alanı 112 noktalıdır. Diğer üç boyutlu kalibrasyon alanı ise panoramik kameralar için tesis edilmiş 360 dereceye yayılmış 200 adet nokta içeren kalibrasyon odasıdır. Her iki kalibrasyon alanı Gebze Teknik Üniversitesi Fotogrametri Laboratuvarında tesis edilmiştir.

3.1.1. Kalibrasyon Alanı

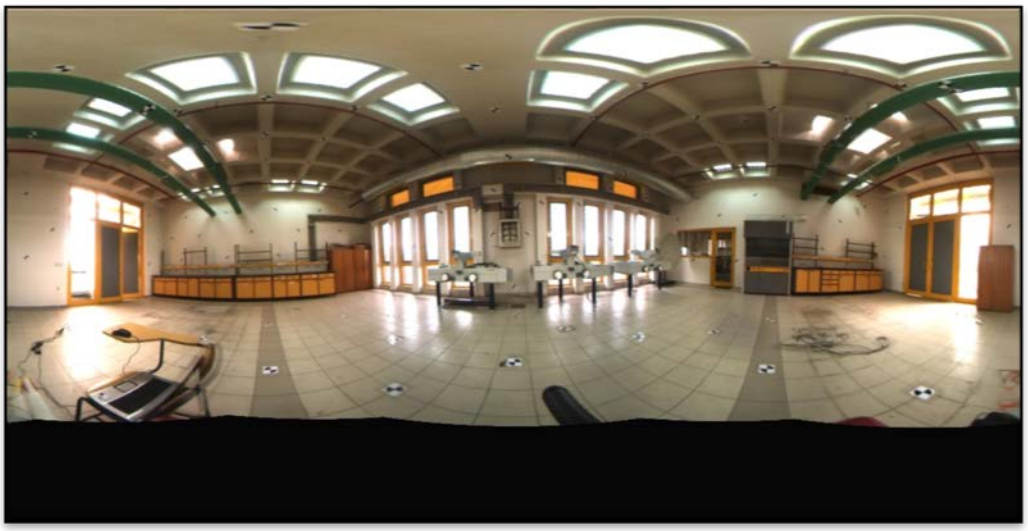
Kalibrasyon alanı çapı 1,5 metre olan konveks bir yüzeydir. Düzgün sayısal yüzey modeline sahip olması, geometrik olarak lens yüzey modeline benzer olması sebebiyle seçilmiştir. Kalibrasyon alanı toplam 112 noktaya sahiptir. Düşük nokta konum doğruluğuna ulaşabilmek için 0,15 mgon okuma hassasiyetli Wild T3 teodolit ile beş tam seri yatay ve düşey doğrultu ölçmeleri gerçekleştirilmiştir. Alan üzerindeki noktaların koordinatları iki farklı istasyon noktasından üçgen dengelemesi yapılarak hesaplanmıştır. 112 noktalı kalibrasyon alanı üzerinde nokta konum doğruluğu yaklaşık 30-35 mikron metre olarak tespit edilmiştir. Şekil 3.2 de hazırlanan kalibrasyon alanı ve üzerindeki hedefler gösterilmiştir. Kalibrasyon alanının her bir kamera ile ayrı ayrı fotoğrafları çekilmiştir.



Şekil 3.2: Kalibrasyon Alanı

3.1.2. Kalibrasyon Odası

Farklı yüzeylerde üç boyutlu koordinatları bilinen kalibrasyon odası tesisi için Gebze Teknik Üniversitesi Fotogrametri Laboratuvarı kullanılmıştır. Laboratuvarda toplam 200 kontrol noktası tesis edilmiştir. Noktalar odanın tüm yüzeylerine (360°) dağılmış olarak tesis edilmiştir. Noktalardan 43 tanesi zemine, 79 tanesi duvarlara ve 78 tanesi ise tavana tesis edilmiştir. Şekil 3.3 kalibrasyon odasını göstermektedir.



Şekil 3.3: Kalibrasyon odası

Kalibrasyon odası ağında, jeodezik ölçmeler için, doğrultu ölçümlerinde $0{,}5^{cc}$ hassasiyetle teodolit T2002 (Wild) kullanılmıştır. Topcon GTS 701 2mm+2 ppm

hassasiyete sahip total station poligon noktalarından hedeflere mesafe ölçümü için kullanılmıştır. Tüm doğrultu ve mesafe ölçümleri için dört poligon noktası kullanılmıştır. Yatay ve düşey doğrultular, dört tam seri olarak ölçülmüştür. Tüm poligonlardan hedeflere olan mesafe ölçümleri de dört kez tekrarlanmıştır. Ardından dengeleme yapılıp nokta koordinatları hesaplanmıştır. XYZ dengelenmiş koordinatlar sonrasında noktaların maksimum ve minimum hataları Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3. 1: Dengeleme sonrası koordinat doğrulukları

ODA BOYUTLARI	YATAY (12m)	DİKEY (9m)	YÜKSEKLİK (4m)
Dengeleme Sonrası Koordinat Doğruluğu	X (Mm.)	Y (Mm.)	Z (Mm.)
Minimum	0,00478	0,00272	0,144143
Maksimum	1,666697	0,48859	1,16539
Standart Sapma	0,22777	0,06653	0,18498

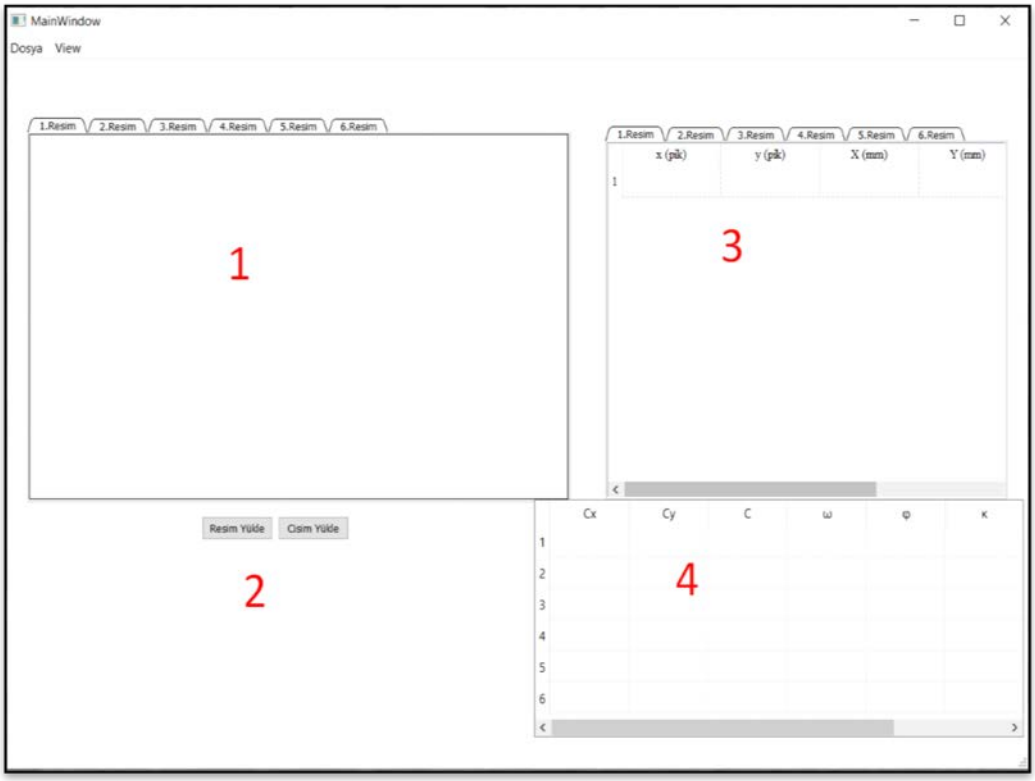
Benzer çalışmalarda da panoramik test alanları (farklı kalibrasyon odası türleri) kullanılmıştır. Örneğin: Dresden Teknik Üniversitesi'nde kurulan panoramik test alanının boyutu 224 nokta ile 14 m x 5 m x 3 m'dir. X, Y, Z koordinatları için kontrol noktalarının ortalama standart sapması sırasıyla 0,2 mm, 0,3 mm, 0,1 mm'dir; maksimum standart sapmalar 0,7 mm, 4,5 mm, 0,9 mm'dir. ETH Zürih Üniversitesi Test Alanı 15 m x 12 m x 3 m boyutlarında ve 96 puana sahiptir. X, Y, Z koordinatları için kontrol noktalarının ortalama standart sapması sırasıyla 0,3 mm, 0,3 mm, 0,1 mm'dir; maksimum standart sapmaları 0,9 mm, 0,8 mm, 0,3 mm'dir [Parian, 2007].

3.2. Python ile Geliştirilen Uygulama

Yürütülen bu tez çalışması kapsamında python programlama dilinde uygulama geliştirilmiştir. Geliştirilen bu uygulama arayüz ile beraber yaklaşık olarak iki bin satırdan oluşmaktadır. Uygulama geliştirilmeye başlanırken ilk olarak arayüz

tasarımına karar verilmesi ve yapılacak uygulamanın algoritmasının belirlenmesi adımları izlenmiştir.

Geliştirilen python uygulamasında arayüz için PyQt kütüphanesi tercih edilmiştir. PyQt kütüphanesinin tercih edilmesindeki en büyük etkenler, ilgili kütüphanenin python dilinde arayüz geliştirme işlemlerinde birçok araca sahip olması ve büyük bir topluluğu olması önemli olmuştur. Yapılan arayüz tasarımında, resim yükle ve cisim yükle olmak üzere iki adet buton bulunmaktadır. Altı görüntü için altı resim çerçevesi ve altışar adet piksel koordinatları, resim koordinatları ve equidistant koordinatlarını gösteren tablo bulunmaktadır. Ayrıca arayüz üzerinde direkt lineer dönüşüm parametreleri ile elde edilen x ekseni odak mesafesi, y ekseni odak mesafesi, odak uzaklığı mesafesi ve ω, φ, κ dönüklük açılarını içeren tablo oluşturulmuştur.

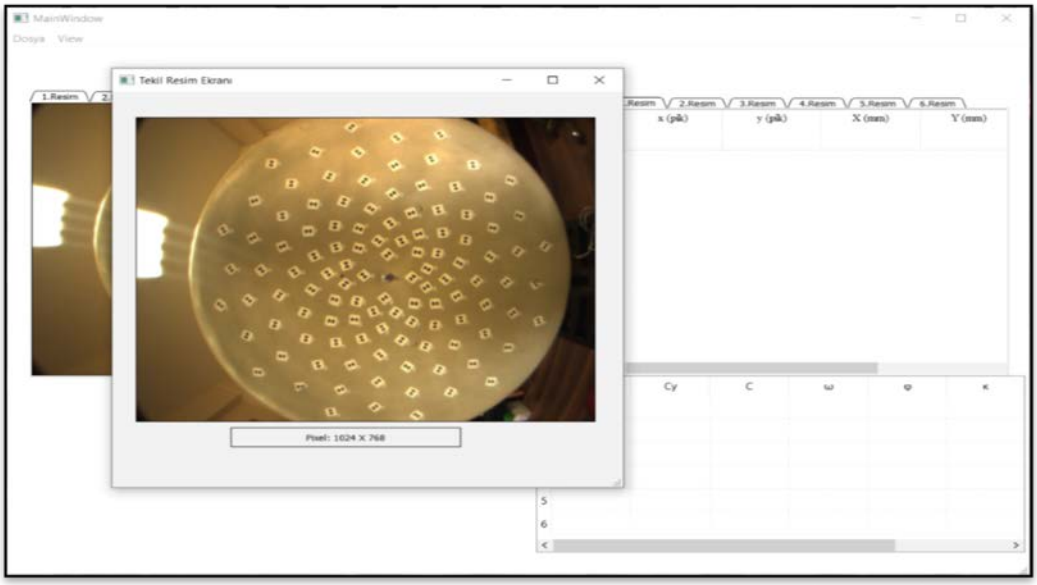


Şekil 3.4: Geliştirilen python uygulamasının arayüzü

Şekil 3.4 de gösterilen arayüz görselinde 1 numaralı bölüm yüklenen resimlerin görüntülendiği resim çerçevesidir. Bu bölüm altı ayrı çerçeveden oluşmaktadır ve her çerçeve için ayrı ayrı resim yüklenebilmektedir. 2 numaralı bölüm resim yükleme ve cisim noktalarını yüklemek için bulunan buton grup alanıdır.1 numaralı

bölümde seçilen resim çerçevesi için resim yükle butonu ile ilgili çerçeveye resim yüklenmektedir. Resim yükle butonu ile yüklenmeye çalışılan resimler için desteklenen resim formatları jpg, jpeg, png, bmp, tif uzantıları şeklindedir. Cisim noktalarını yükle butonu ise txt formatını desteklemektedir ve nokta numarası-X-Y-Z sırası ile yüklenmektedir. 3 numaralı bölüm yüklenen resimler üzerinden operatörün seçtiği hedef noktalarının koordinatlarının gösterildiği tablo bölümüdür. Altı farklı resim için ayrı ayrı tablolar tutulmaktadır. Seçilen noktaların piksel koordinat sistemindeki koordinatları ve afin dönüşüm ile elde dilen resim koordinatları gösterilmektedir. Uygulamaya cisim noktaları da yüklenirse equidistant koordinatları da tabloda yazılmaktadır. 4 numaralı kısım ise cisim koordinatlarının yüklendiği durumda seçilen hedef noktalara göre iç yöneltme ve dış yöneltme elemanlarının yazıldığı tablo kısmıdır.

Ardından, çalışma için geliştirilen yazılımın algoritması kurgulanmıştır. Algoritma kurgusu belirlenirken yapılacak uygulamada kullanılan dönüşüm adımları ve tüm formüller değerlendirilmiştir. Arayüzde tasarlanan bölümlerin işlevselleştirilmesi sağlanmıştır. İlk olarak resim yükleme işlemi ve yüklenen resimlerin ilgili çerçevelerde gösterilmesi sağlanmıştır. Resim yükleme ve tasarlanan çerçevelerde gösterilmesi işlemlerinde PyQt kütüphanesinin metotları kullanılmıştır. Yüklenen resimler opencv kütüphanesi ile okunmuştur.



Şekil 3.5: Geliştirilen uygulamada nokta seçim çerçevesi

Çerçeveye yüklenen fotoğraflara, operatörün nokta seçim işlemi yapması için çift tıklandığında yeni bir çerçeve açılacak şekilde tasarlanmıştır. Şekil 3.5 de çift tıklama sonucunda açılan çerçeve gösterilmektedir. Resim üzerinde seçilen noktalar afin dönüşüm işlemi ile resim koordinat sistemine aktarılmaktadır. Bu işlem yapılırken numpy kütüphanesi ile python dilinde lineer cebir işlemlerinin uygulaması sağlanmıştır.

```
36  #Afin dönüşümünün yapıldığı bölümdür.
37  #w=resim gemişliği(pix)
38  #h=resim yüksekliği(pix)
39
40      def affine(self,w,h):
41
42              self.w=w
43              self.h=h
44              self.imgkose=np.array([[-w/2,h/2],[w/2,h/2],[w/2,-h/2],[-w/2,-h/2]])
45              self.pixkose=np.array([[0,0],[w,0],[w,h],[0,h]])
46      #        [x]     [a  b   c ] [u]
47      #        [y] =   [d  e   f ] [v]
48      #        [1]     [0  0   1 ] [1]
49      #        x=a.u+b.v+c
50      #        y=d.u+e.v+c
51              self.katsayi=np.array([[0,0,1],[w,0,1],[w,h,1]])
52              self.bilinen_x=np.array([(-w/2),(w/2),(w/2)])
53              self.bilinen_y=np.array([(h/2),(h/2),(-h/2)])
54              self.bilinmeyen_abc=np.linalg.solve(self.katsayi,self.bilinen_x)
55              self.bilinmeyen_def=np.linalg.solve(self.katsayi,self.bilinen_y)
56              self.transformasyo=np.array([[self.bilinmeyen_abc[0],self.bilinmeyen_abc[1],self.bilinmey
57                                           [self.bilinmeyen_def[0],self.bilinmeyen_def[1],self.bilinmeye
58                                           [0,0,1]])
59
60
61
```

Şekil 3.6: Geliştirilen uygulamada afin dönüşüm işlemi

Şekil 3.6 de afin dönüşüm işleminde kullanılacak, afin dönüşümün bilinmeyen 6 parametresinin nasıl hesaplandığı gösterilmektedir. Resim yükleme işlemi sonrasında, yüklenen resimlerin piksel koordinat sisteminde ve resim koordinat sisteminde 4 köşe noktasının koordinatları bilinmektedir. Bilinen bu 4 nokta sayesinde 6 bilinmeyen için her noktadan x ve y çiftleri için toplamda 8 adet denklem yazılabilmektedir. Denklem sayısı, bilinmeyen sayısından fazla olduğu durumlarda en küçük kareler yöntemi ile dengeleme işlemi yapılabilmektedir. Bu yöntemle 6 bilinmeyen afin dönüşüm parametresi hesaplanmıştır. Hesaplanan 6 afin dönüşüm parametresi sayesinde piksel noktaları bilinen her noktanın afin dönüşüm yöntemi ile resim koordinat sistemindeki koordinatları hesaplanmıştır.

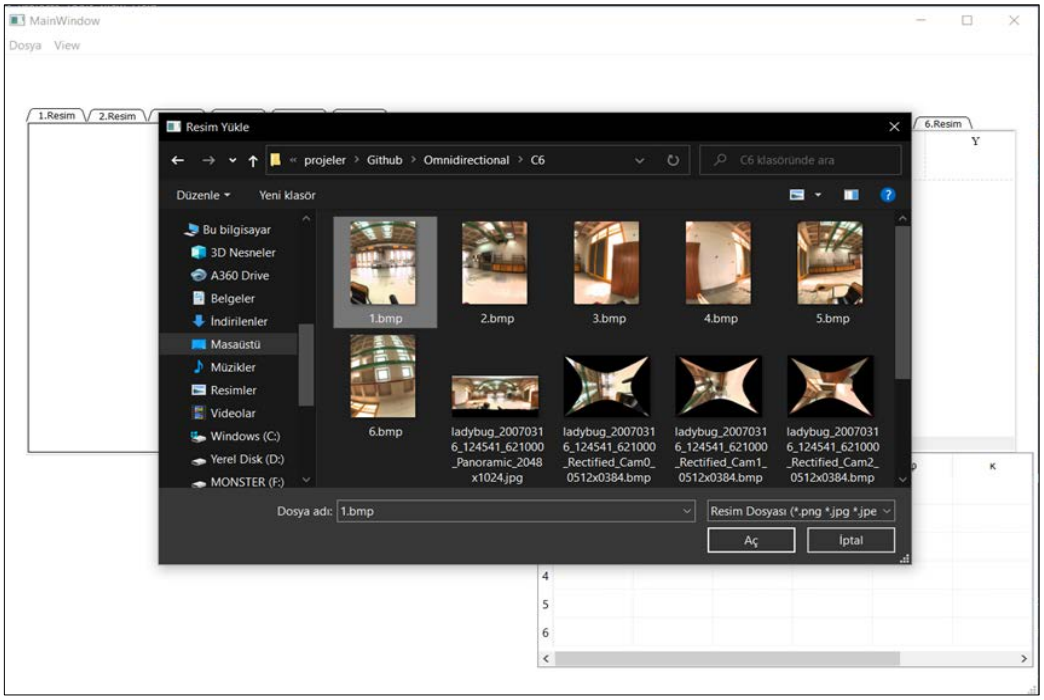
Uygulamanın bir sonraki adımında direkt lineer dönüşüm denklemlerinin geliştirilen uygulamaya entegre edilmesidir.

Direkt lineer dönüşüm denklemleri eşitlik 2.2 de gösterildiği gibi matris biçiminde yazılmıştır. Direkt lineer dönüşümün on bir bilinmeyenin bulunması için piksel koordinatlarından afin dönüşüm yöntemi ile elde ettiğimiz en az altı resim noktasına ihtiyacımız var. Cisim noktaları ve resim noktaları bilinen 6 noktanın seçilmesi ile eşitlik 2.2 da gösterilen denklem çözülebilir. Bu işlem yapılırken iteratif bir çözüm uygulanmıştır. İlk iterasyon işleminden sonra elde edilen on bir direkt lineer dönüşüm parametresinde L değerleri birbirlerine yaklaşana kadar iteratif çözüme devam edilmiştir. Bu çalışma kapsamında kullanılan resimler ve seçilen resim nokta koordinatları için yedi iterasyon sayısının çözüm için ideal olduğu gözlenmiştir. Direkt lineer dönüşümün on bir parametresi bulunduktan sonra, bu on bir parametre iç yöneltme ve dış yöneltme elemanlarının hesaplanmasında kullanılmıştır. Kamera metrik bilgileri ve dış yöneltme elemanlarının hesaplanması ile ölçülere düzeltmeler getirilmiştir.

Direkt lineer dönüşümün 11 parametresi ile düzeltme getirilmiş resim noktaları kullanılarak equidistant projeksiyonuna geçiş yapılır. Bu işlem yapılırken eşitlik 2.3 de gösterilen equidistant denklemleri geliştirilen uygulamaya entegre edilmiştir. Bu işlemler sırasında python in math kütüphanesi ile numpy kütüphanelerinden yararlanılmıştır. Elde edilen equidistant projeksiyon sistemindeki noktalar ile 2.4 de verilen equidistant modeli için distorsiyon düzeltmeleri hesaplanmıştır. Bu işlem yapılırken iteratif bir çözüm izlenmiştir.

$A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, C_1, C_2$ Distorsiyon parametrelerinin bulunması ile düzeltmeler equidistant modelindeki nokta koordinatlarına eklenmiştir. Düzeltilmiş equidistant nokta koordinatlarından sonra elimizdeki resim nokta koordinatları artık merkezi izdüşüm sistemine uymasını beklediğimiz ve cisim noktalarını hesaplayabildiğimiz noktalar olmasını bekledik.

Geliştirilen uygulamanın son adımında ise equidistant projeksiyon sistemi için düzeltilmiş nokta koordinatlarından, yöneltme işlemi ile cisim nokta koordinatlarına geçiş yapılmıştır. Mathplotlib kütüphanesi kullanılarak, piksel ve resim koordinatları iki boyutlu olarak görselleştirilmiştir. Ayrıca cisim noktaları üç boyutlu olarak görselleştirilmiştir.



Şekil 3.7: Python dilinde yazılan uygulamaya resim yükleme işlemi

3. 3. Kalibrasyon Alanında Yapılan Çalışmalar

Yapılan bu çalışma kapsamında parametrelerin belirlenebilmesi için kalibrasyon alanı kullanılmıştır. Ladybug2 kamerası ile kalibrasyon alanının görüntüler alınmıştır. Çekilen görüntüler ladybug2 kamerası üzerinde bulunan altı özdeş balıkgözü mercek için ayrı ayrı elde edilmiştir. Altı özdeş kameradan çekilen her bir görüntü bilgisayar ortamına aktarıldıktan sonra python dilinde yazılmış script ile afin dönüşüm kullanılarak piksel koordinat sisteminden resim koordinat sistemine dönüştürülmüştür (EKB: Kalibrasyon alanı için piksel ve resim koordinatları tablosu). Afin dönüşüm işleminde 2 ölçek, 2 öteleme, 2 dönüklük olmak üzere toplam 6 adet dönüşüm parametresi bulunmaktadır. Bu işlem ile iç yöneltme işlemi gerçekleştirilmiştir. 6 adet bilinmeyen için 2 koordinat sisteminde de ortak en az 3 nokta gerekmektedir. Bu işlem için resim köşe noktalarından yararlanılmıştır. Afin dönüşüm denklemi eşitlik (3.1) de verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ d & e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c \\ f \end{bmatrix} \tag{3.1}$$

1.Resim | 2.Resim | 3.Resim | 4.Resim | 5.Resim | 6.Resim

	x	y	X	Y
1	693	25	181.0	359.0
2	863	181	351.0	203.0
3	910	357	398.0	27.0
4	863	521	351.0	-137.0
5	753	641	241.0	-257.0
6	613	713	101.0	-329.0
7				

Şekil 3.8: Afin dönüşüm sonrası piksel ve resim koordinatları

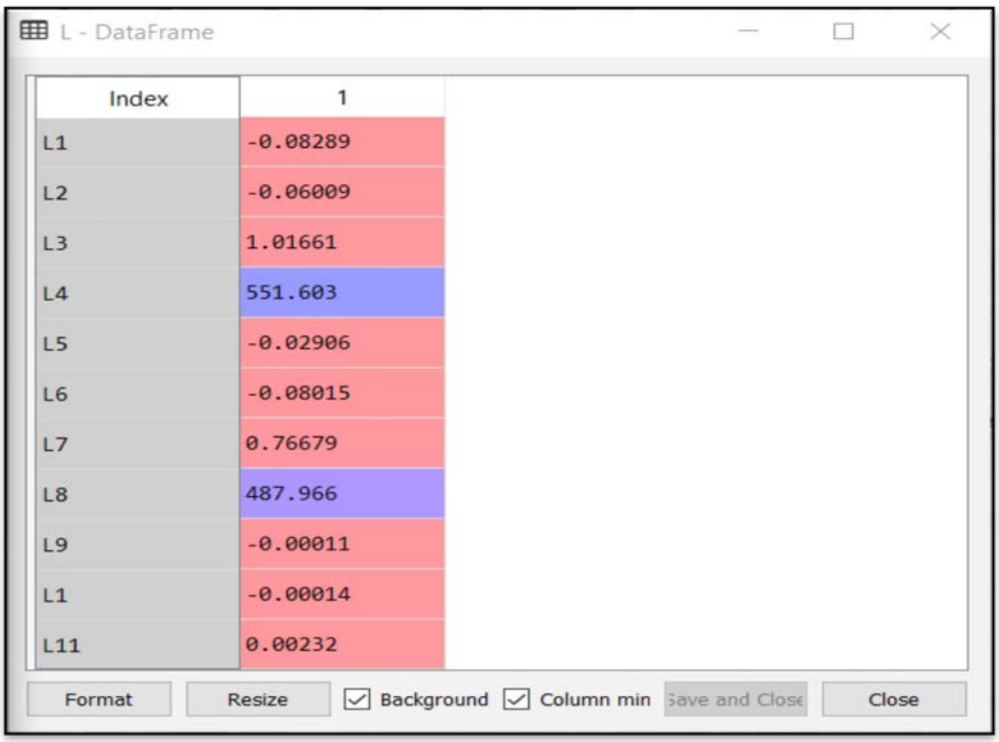
Şekil 3.8 de bu çalışma için hazırlanan python dilindeki yazılım ile yapılan afin dönüşüm sonrası koordinatlar gözükmektedir. X ve Y resim koordinatlarını gösterirken x ve y ise piksel koordinatlarını ifade etmektedir.

Afin dönüşümü yöntemi ile resim koordinatları elde edilmiştir. Resim ve cisim koordinatları ile direkt lineer dönüşüm yöntemi (DLT) ile resim koordinatlarına düzeltme uygulanmıştır. Düzeltme getirilen resim koordinatları ile direkt lineer dönüşümün on bir parametresi hesaplanmıştır.

$$x = \frac{L_1X + L_2Y + L_3Z + L_4}{L_9X + L_{10}Y + L_{11}Z + 1}$$
$$y = \frac{L_5X + L_6Y + L_7Z + L_8}{L_9X + L_{10}Y + L_{11}Z + 1} \tag{3.2}$$

$$L_1X + L_2Y + L_3Z + L_4 - xL_9X - xL_{10}Y - xL_{11}Z - x = 0$$
$$L_5X + L_6Y + L_7Z + L_8 - yL_9X - yL_{10}Y - yL_{11}Z - y = 0 \tag{3.3}$$

Eşitlik 3.2 ve eşitlik 3.3 de direkt lineer dönüşüm ve on bir parametresi gözükmektedir. Bu on bir katsayı cisim uzayı referans düzlemi ile resim düzlemi arasındaki ilişkiyi yansıtır. Hesaplanan direkt lineer dönüşüm parametreleri Şekil 3.9'da verilmektedir. Şekil 3.9 da gösterilen on bir direkt lineer dönüşüm parametresi kalibrasyon alanın altı özdeş kameradan elde edilen görüntüleri ile hesaplanmıştır.

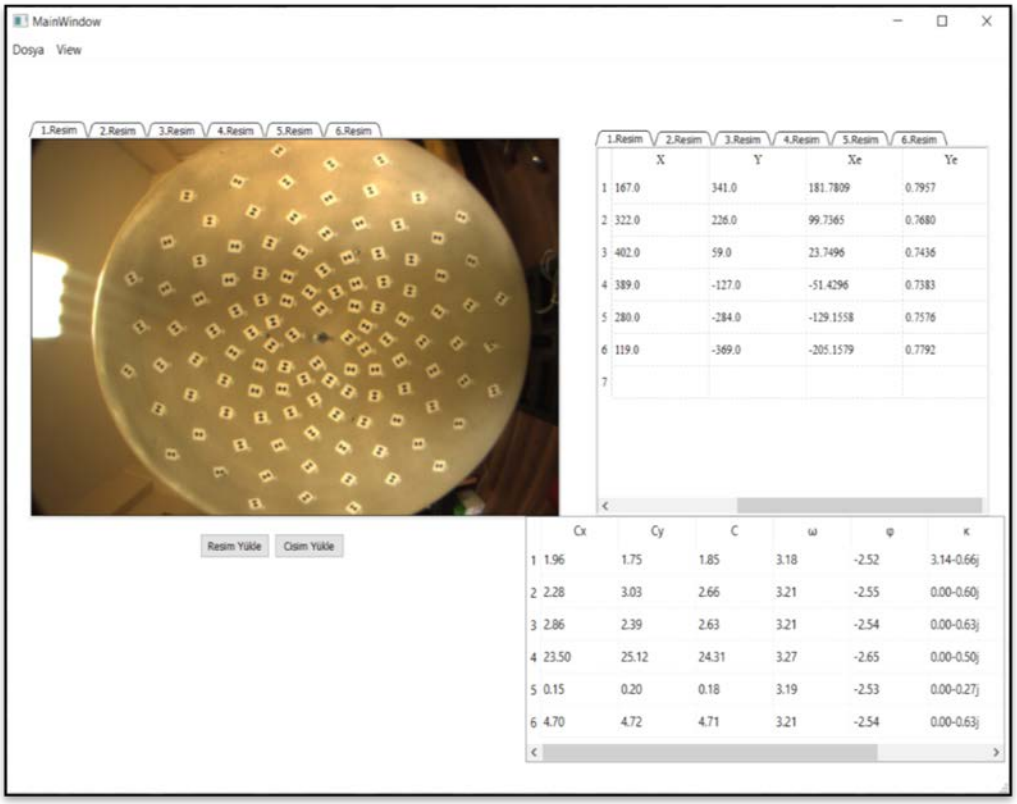


Index	1
L1	-0.08289
L2	-0.06009
L3	1.01661
L4	551.603
L5	-0.02906
L6	-0.08015
L7	0.76679
L8	487.966
L9	-0.00011
L1	-0.00014
L11	0.00232

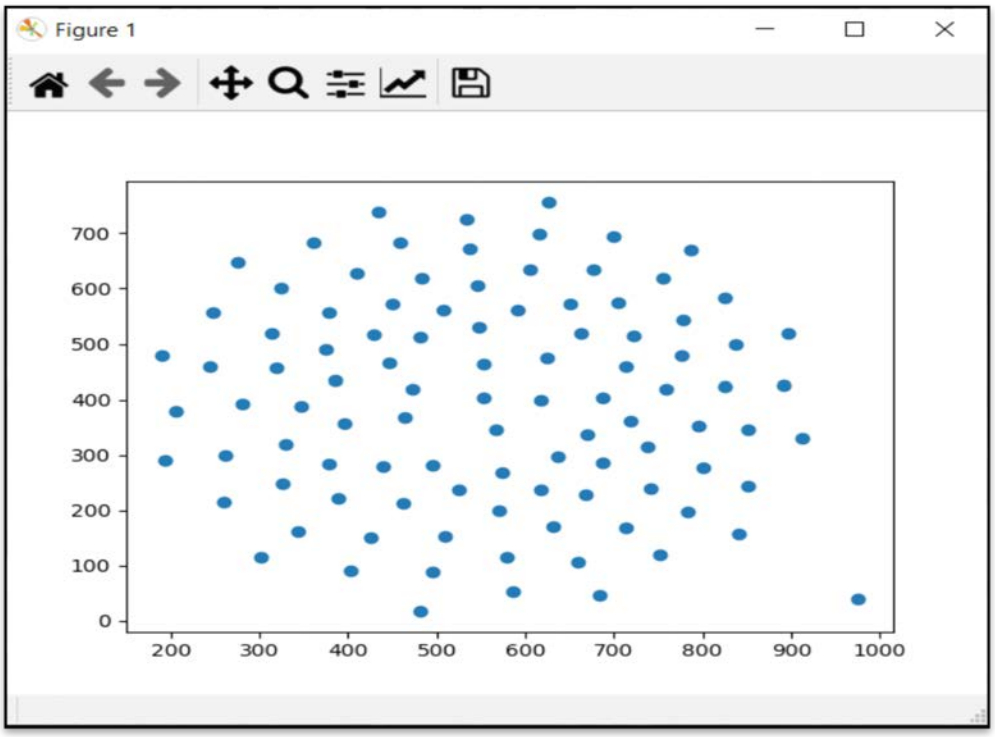
Şekil 3.9: Hesaplanan direkt lineer dönüşüm parametreleri

Hesaplanan on bir direkt lineer dönüşüm parametresi ile c_x, c_y, x_0, y_0 iç yöneltme ve X_0,Y_0, Z_0, ω, φ, κ dış yöneltme elemanları hesaplanmıştır. Bir sonraki aşama olarak equidistant koordinatları hesaplanmıştır.

Şekil 3.10 de kalibrasyon alanın altı ayrı resmi için görüntü üzerinden seçilen altı ayrı noktanın resim ve equidistant koordinatları ile kalibrasyon parametreleri gösterilmektedir.



Şekil 3.10: Kalibrasyon parametreleri ve equidistant koordinatları



Şekil 3.11: Geliştirilen uygulamada piksel koordinat sistemindeki hedeflerin 2 boyutlu görselleştirilmiş hali

Şekil 3.11 deki görselde test için kullanılan kalibrasyon alanı üzerindeki hedef noktaların piksel koordinat sistemindeki koordinatları görselleştirilmiştir.

Tablo 3.2: Altı kamera için kalibrasyon parametreleri.

Cx	Cy	C	ω	φ	κ	X_0	Y_0
1.96	1.75	1.85	3.18	-2.52	3.14-0.66j	307.05	243.07
2.28	3.03	2.66	3.21	-2.55	0.00-0.60j	309.63	249.22
2.86	2.39	2.63	3.21	-2.54	0.00-0.63j	292.93	229.13
23.50	25.12	24.31	3.27	-2.65	0.00-0.50j	366.75	150.02
0.15	0.20	0.18	3.19	-2.53	0.00-0.27j	283.18	232.19
4.70	4.72	4.71	3.21	-2.54	0.00-0.63j	321.27	228.99

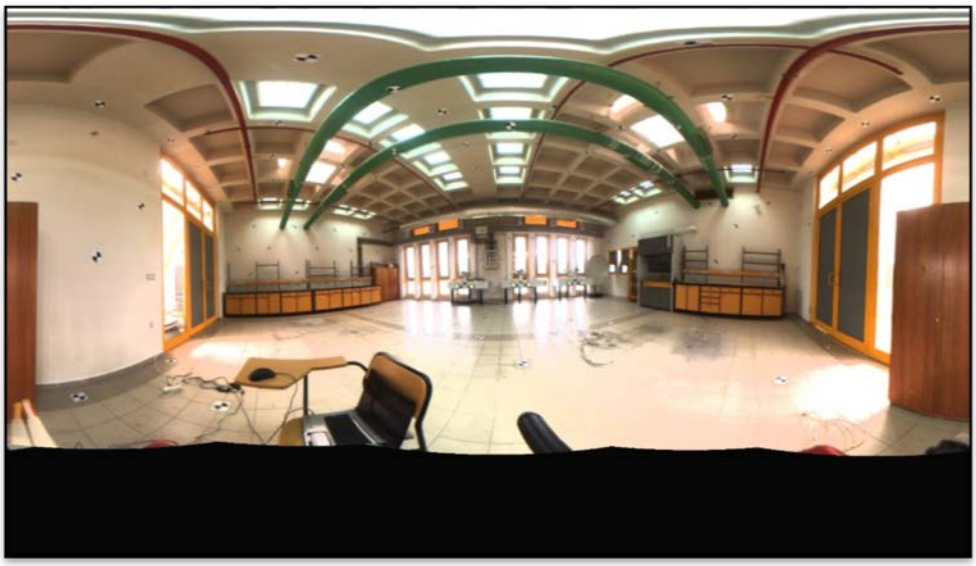
Tablo 3.3: Birinci resim görüntüsü için piksel, resim ve equidistant koordinatları.

U	V	X	Y	Xe	Ye
679	43	167	341	181.7809	0.7957
874	158	322	226	99.7365	0.7680
914	325	402	59	23.7496	0.7436
901	511	389	-127	-51.4296	0.7383
792	668	280	-284	-129.1558	0.7576
631	753	119	-369	-205.1579	0.7792

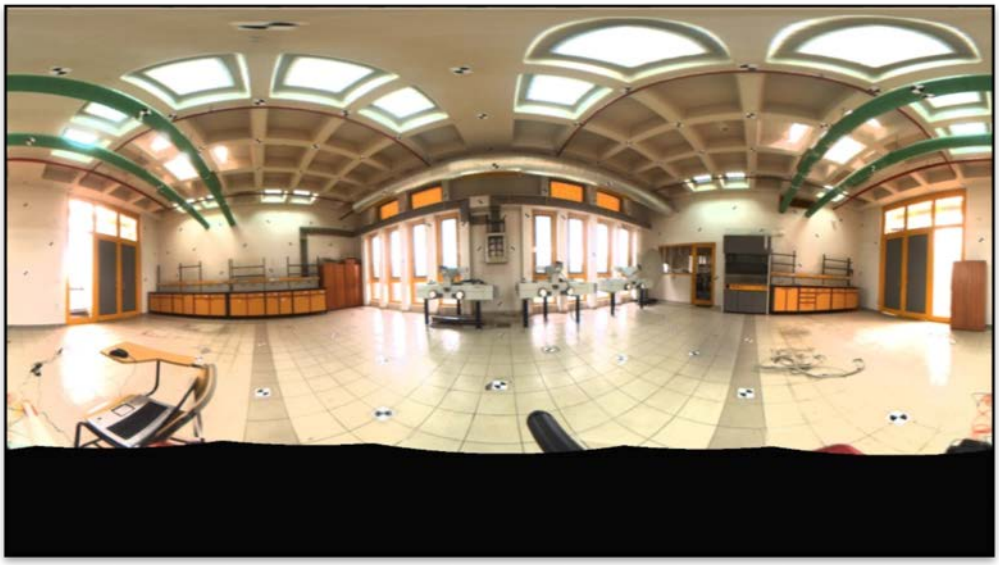
Tablo 3.2 de u, v piksel koordinatlarını X, Y resim koordinatlarını ve Xe, Ye equidistant model koordinatlarını temsil etmektedir. Tablo 3.3 de gösterilen cx ve cy odak uzaklığının eksenlere göre mesafelerini c odak uzaklığını ω, φ, κ dönüklük açıklarını temsil etmektedir. X0 ve Y0 ise resim orta noktalarını temsil etmektedir.

3.4 Panoramik Kalibrasyon Odasında Uygulama Verileri ile Çalışmalar

Kalibrasyon alanında elde edilen verilerin ardından, Panoramik kamera kalibrasyonu için Gebze Teknik Üniversitesi tesis edilmiş 200 tane noktayı içeren Fotogrametri Laboratuvarının, Şekil 3.12 ve Şekil 3.13'te gösterildiği gibi, Ladybug2 kamerası ile panoramik görüntüleri elde edilmiştir.



Şekil 3.12: Uygulama alanının ladybug2 panoramik kamerası ile elde edilen görüntüsü



Şekil 3.13: Uygulama alanının ladybug2 panoramik kamerası ile elde edilen görüntüsü

Şekil 3.12 ve Şekil 3.13 de gösterildiği gibi uygulama alanın ladybug2 ile alınan panoramik görüntüleri altı adet balıkgözü lens tarafından çekilen görüntülerin birleştirilmesi ile oluşturulmuştur. Uygulama alanında, çalışma için alan içerisine yerleştirilen hedeflerde gösterilmektedir.

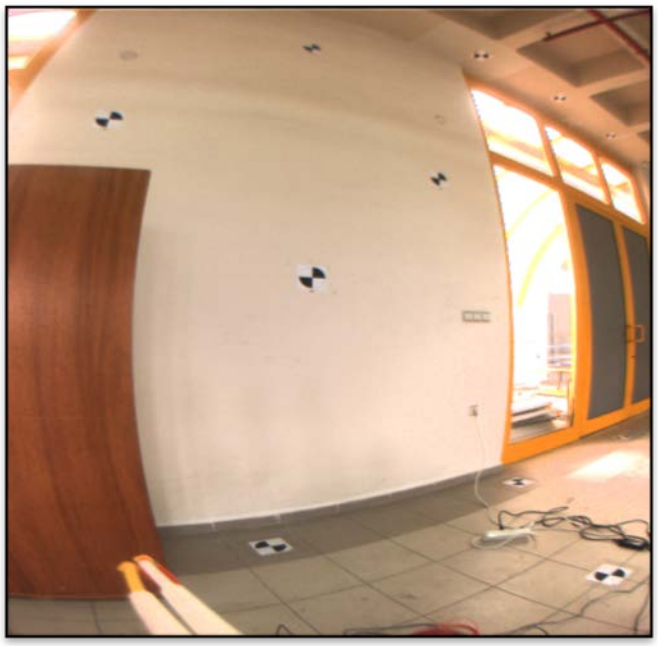
Uygulama verisi ile çalışma yapılırken Python programlama dili ile yazılan uygulamaya uygulama alanının altı adet fotoğrafı ve hedef nokta koordinatları girilmiştir. Şekil 3.14 ile 3.19 arasında Gebze Teknik Üniversitesi Fotogrametri

Laboratuvarında tesis edilmiş kalibrasyon odasının ladybug2 kamerasına ait altı özdeş balıkgözü kamerası ile çekilmiş fotoğrafları görülmektedir. Her bir fotoğraf Python dilinde yazılmış uygulamaya yüklenerek hedef noktalar ve cisim noktaları kullanılarak öncelikle afin dönüşümü yöntemiyle piksel koordinat sisteminden resim koordinat sistemine geçiş yapılmıştır.

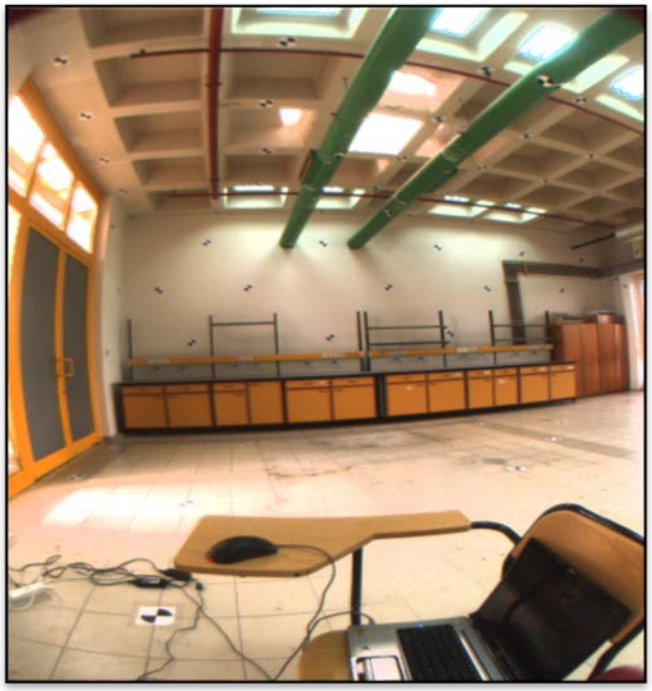
Şekil 3.14: Uygulama alanının ladybug2 kameraları ile çekilmiş ve Python uygulamasına yüklenen 1 numaralı balıkgözü görüntü

Şekil 3.15: Uygulama alanının ladybug2 kameraları ile çekilmiş ve Python uygulamasına yüklenen 2 numaralı balıkgözü görüntü

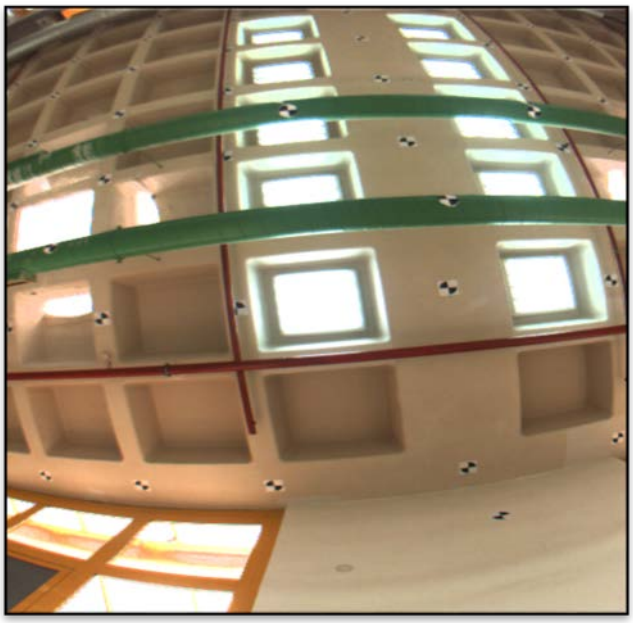
Şekil 3.16: Uygulama alanının ladybug2 kameraları ile çekilmiş ve Python uygulamasına yüklenen 3 numaralı balıkgözü görüntü



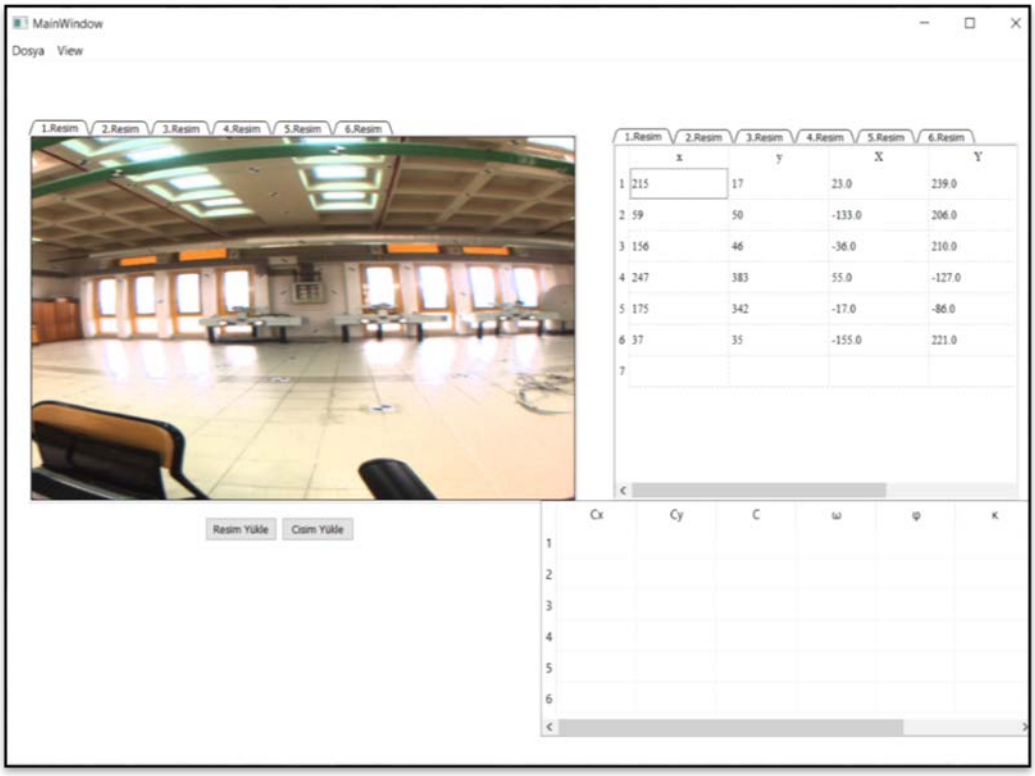
Şekil 3.17: Uygulama alanının ladybug2 kameraları ile çekilmiş ve Python uygulamasına yüklenen 4 numaralı balıkgözü görüntü



Şekil 3.18: Uygulama alanının ladybug2 kameraları ile çekilmiş ve Python uygulamasına yüklenen 5 numaralı balıkgözü görüntü



Şekil 3.19: Uygulama alanının ladybug2 kameraları ile çekilmiş ve Python uygulamasına yüklenen 6 numaralı balıkgözü görüntü



Şekil 3.20: Bir numaralı resim için piksel ve resim koordinatları

Şekil 3.20 de uygulama üzerindeki bir numaralı resme ait piksel ve resim koordinatları gözükmektedir. Küçük x ve y kolonları resme ait piksel koordinatlarını ifade ederken büyük X ve Y kolonları ise afin dönüşüm ile elde edilmiş resim koordinatlarını ifade etmektedir. Altı kameradan elde edilen resim içinde ayrı ayrı resim koordinatları hesaplanmıştır. Resim koordinatlarının elde edilmesi ile direkt lineer dönüşüm yöntemi uygulanıp resim koordinatlarına düzeltme getirilmiştir. Düzeltme getirilen resim koordinatları ile direkt lineer dönüşümün on bir parametresi uygulama alanı fotoğrafları içinde elde edilmiştir.

Tablo 3.4: Bir numaralı resim için piksel ve resim koordinatları

1.Resim	x	y	X	Y
1	215	17	23	239
2	59	50	-133	206
3	156	46	-36	210
4	247	383	55	-127
5	175	342	-17	-86
6	37	35	-155	221

Tablo 3.5: İki numaralı resim için piksel ve resim koordinatları

2.Resim	x	y	X	Y
1	349	416	157	-160
2	253	227	61	29
3	284	170	92	86
4	237	137	45	119
5	148	151	-44	105
6	114	23	-78	233

Tablo 3.6: Üç numaralı resim için piksel ve resim koordinatları

3.Resim	x	y	X	Y
1	51	412	-141	-156
2	357	83	165	173
3	116	357	-76	-101
4	183	18	-9	238
5	131	54	-61	202
6	96	823	-96	174

Tablo 3.7: Dört numaralı resim için piksel ve resim koordinatları

4.Resim	x	y	X	Y
1	358	461	166	-205
2	159	438	-33	-182
3	183	218	-9	38
4	60	90	-132	166
5	257	139	65	117
6	180	33	-12	223

Tablo 3.8: Beş numaralı resim için piksel ve resim koordinatları

5.Resim	x	y	X	Y
1	93	461	-99	-205
2	32	41	-160	215
3	170	27	-22	229
4	155	73	-37	183
5	48	121	-144	56
6	47	83	-145	173

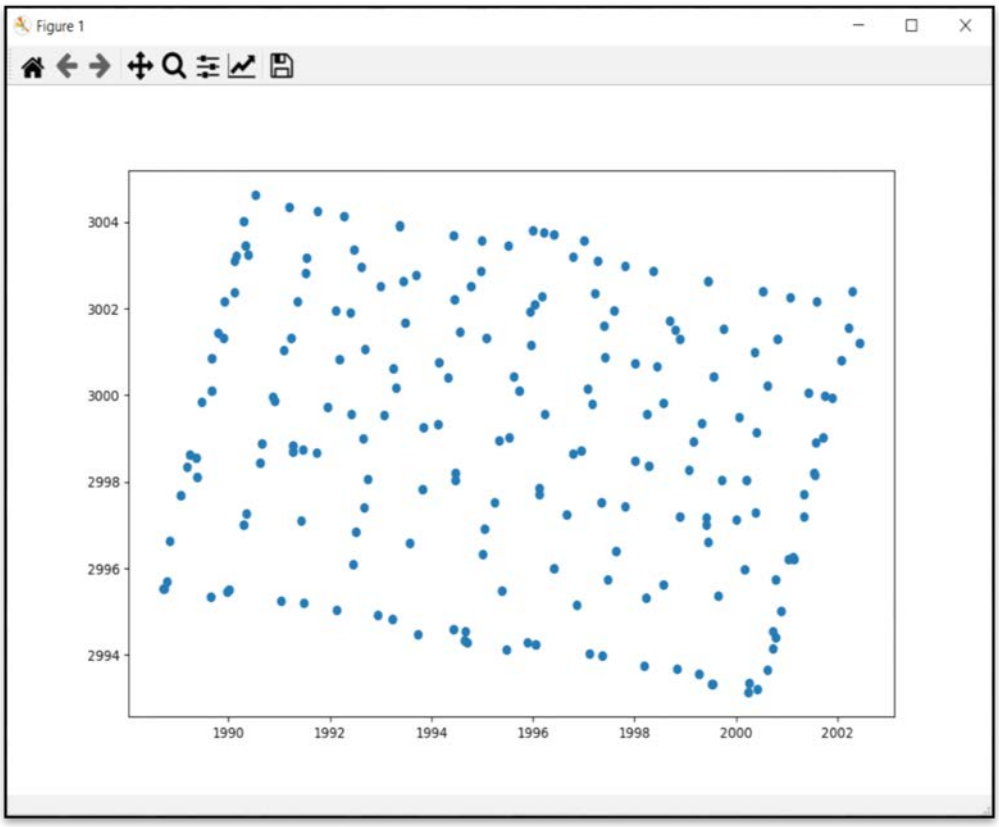
Tablo 3.9: Altı numaralı resim için piksel ve resim koordinatları

6.Resim	x	y	X	Y
1	284	388	92	-132
2	274	238	82	18
3	273	161	81	95
4	249	112	57	144
5	174	85	-18	171
6	327	88	-135	168

Yukarıdaki bir görsel ve altı tablo gösterildiği gibi her bir resim için piksel koordinatları resim koordinatlarına dönüştürülmüştür. Tablolarda her resim için ilk altı noktanın piksel ve resim koordinatları verilmiştir. Direkt lineer dönüşüm parametrelerinin hesaplanması ve getirilen düzeltmeler ile equidistant koordinat sistemine geçilmiştir.

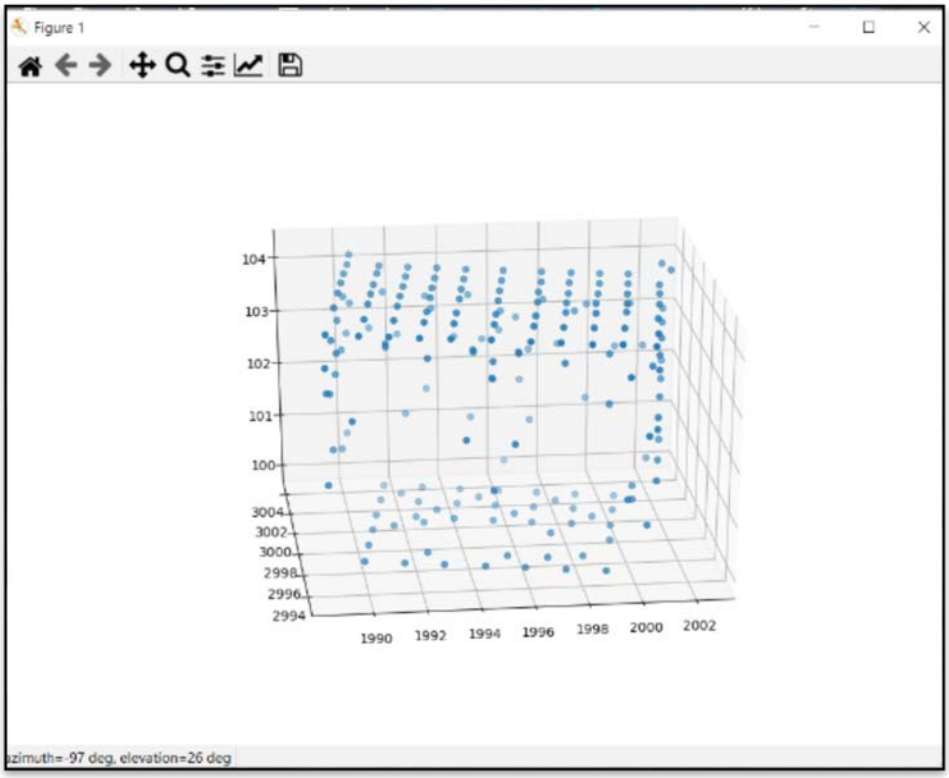
Tablo 3.10: Altı kamera için de iç yöneltme, dış yöneltme elemanları ile resim orta noktaları

Cx	**Cy**	**C**	**ω**	**φ**	**κ**	**X_0**	**Y_0**
2.00	2.10	2.05	1.8	-8652	3.14-0.86j	-44.89	-70.79
2.95	3.76	3.36	2.09	-10.55	0.00-0.60j	43.18	13.02
5.33	3.65	4.49	0.03	-13.42	0.81-0.00j	-5.04	246.60
3.81	4.94	4.38	3.24	-10.62	3.14-1.64j	7.24	8.44
3.37	2.97	3.17	1.12	-11.42	0.00-1.50j	-22.06	23.81
1.37	4.01	3.69	-0.60	-13.73	1.43-0.00j	102.15	-130.91

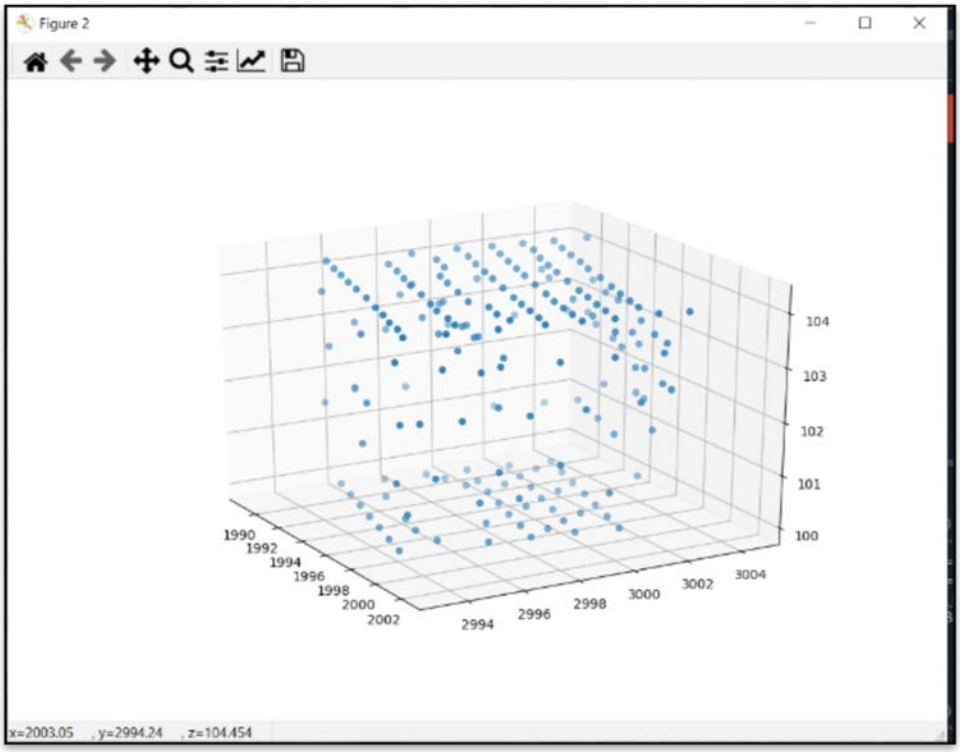


Şekil 3.21: Uygulama odası için yerleştirilen hedeflerin görselleştirilmesi

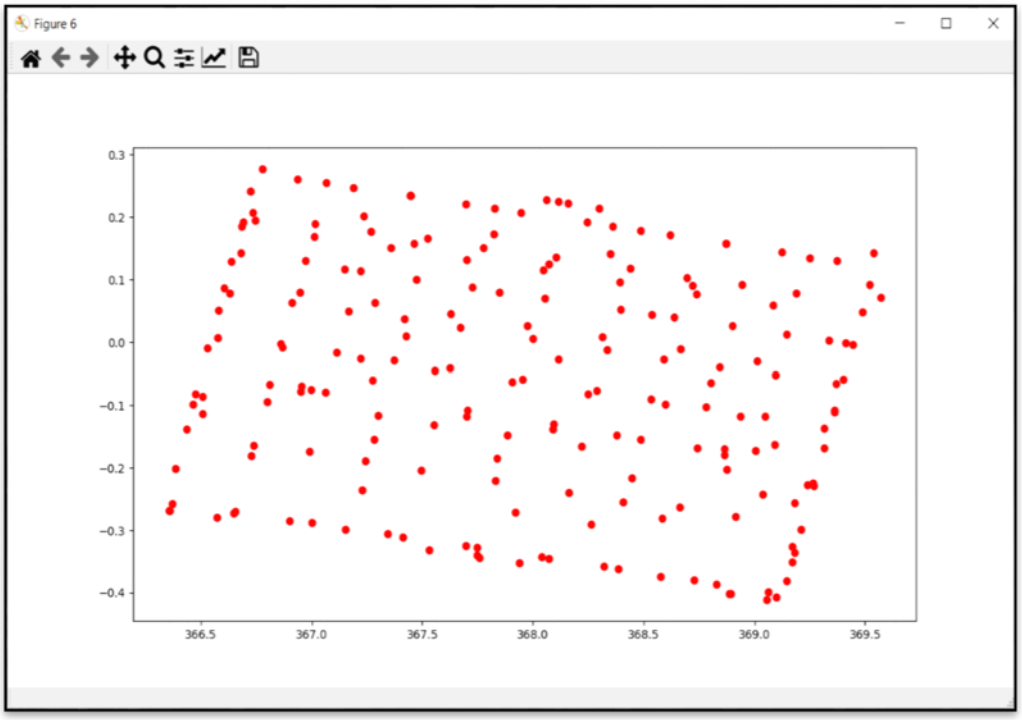
Klasik jeodezik ölçmeler ile elde edilen koordinatlar Python programlama dilinde Mathplotlib kütüphanesi ile Şekil 3.21 deki gibi görselleştirilmiştir. Söz konusu şekilde, Kütüphane kullanılarak uygulama odasına yerleştirilen hedeflerin, cisim noktası koordinatları –iki boyutlu düzlemde- gözükmektedir. Şekil 3.22 ile Şekil 3.23 iki farklı açıdan, yine geliştirilen yazılım ile, üç boyutlu olarak kalibrasyon odasında tesis edilmiş noktaları göstermektedir. Şekil 3.24'te geliştirilen yazılım ile elde edilen resim koordinatları gösterilmektedir.



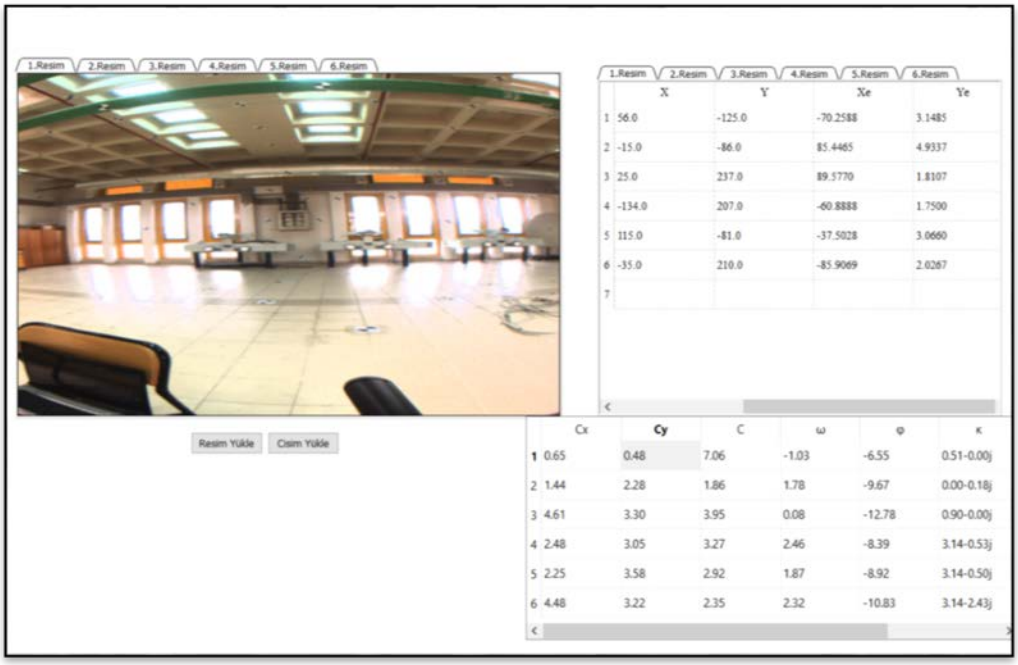
Şekil 3.22: Cisim noktaları üç boyutlu görselleştirilmesi



Şekil 3.23: Farklı bir açıdan cisim noktaları üç boyutlu görselleştirilmesi



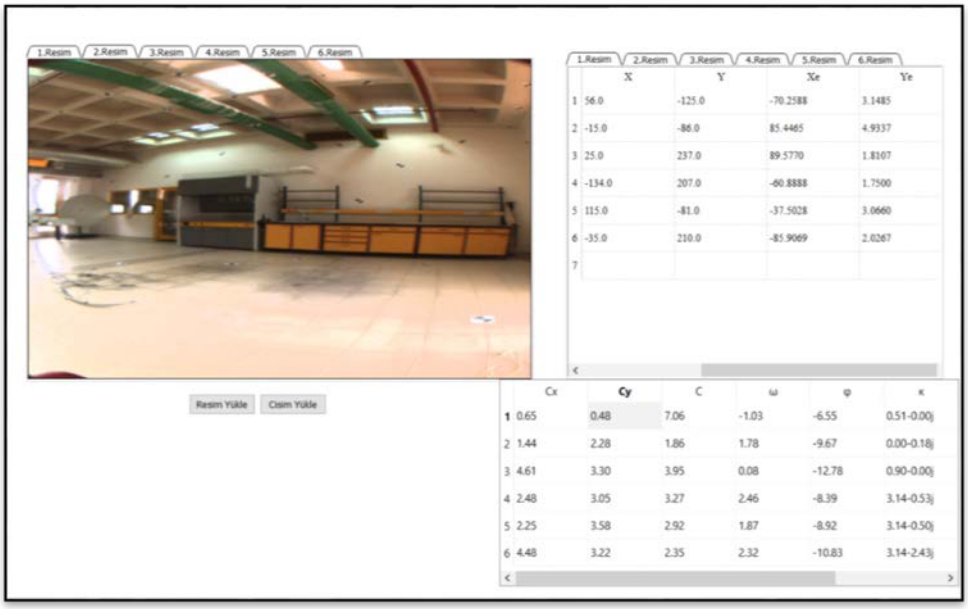
Şekil 3.24: Uygulama odası hedeflerinin resim koordinat sistemindeki değerlerinin görselleştirilmesi



Şekil 3.25: Bir numaralı resim için equidistant ve iç yöneltme ve dış yöneltme elemanları

Şekil 3.25 da X ve Y kolonları resim noktalarını gösterirken Xe ve Ye kolonları equidistant koordinat sistemindeki koordinatları göstermektedir. Bir numaralı resim

için altı nokta seçildikten sonra aynı zamanda resim iç yöneltme ve dış yöneltme elemanları da hesaplanır. Bu işlem altı resim için de uygulanır.



	X	Y	Xe	Ye
1	56.0	-125.0	-70.2588	3.1485
2	-15.0	-86.0	85.4465	4.9337
3	25.0	237.0	89.5770	1.8107
4	-134.0	207.0	-60.8888	1.7500
5	115.0	-81.0	-37.5028	3.0660
6	-35.0	210.0	-85.9069	2.0267
7				

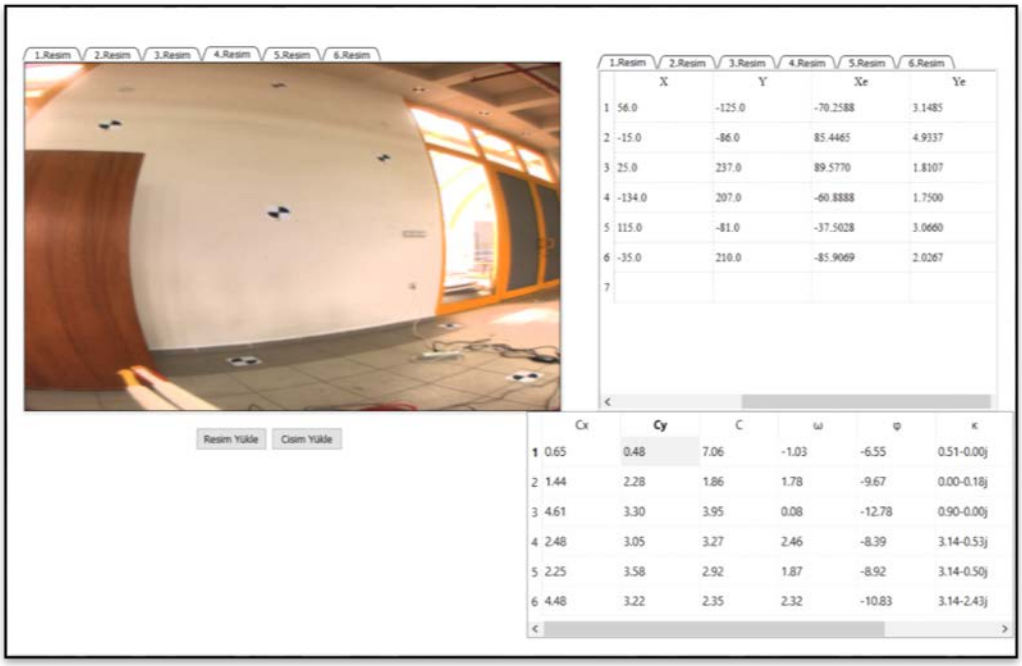
	Cx	Cy	C	ω	φ	κ
1	0.65	0.48	7.06	-1.03	-6.55	0.51-0.00j
2	1.44	2.28	1.86	1.78	-9.67	0.00-0.18j
3	4.61	3.30	3.95	0.08	-12.78	0.90-0.00j
4	2.48	3.05	3.27	2.46	-8.39	3.14-0.53j
5	2.25	3.58	2.92	1.87	-8.92	3.14-0.50j
6	4.48	3.22	2.35	2.32	-10.83	3.14-2.43j

Şekil 3.26: İki numaralı resim için equidistant ve iç yöneltme ve dış yöneltme elemanları

	X	Y	Xe	Ye
1	56.0	-125.0	-70.2588	3.1485
2	-15.0	-86.0	85.4465	4.9337
3	25.0	237.0	89.5770	1.8107
4	-134.0	207.0	-60.8888	1.7500
5	115.0	-81.0	-37.5028	3.0660
6	-35.0	210.0	-85.9069	2.0267
7				

	Cx	Cy	C	ω	φ	κ
1	0.65	0.48	7.06	-1.03	-6.55	0.51-0.00j
2	1.44	2.28	1.86	1.78	-9.67	0.00-0.18j
3	4.61	3.30	3.95	0.08	-12.78	0.90-0.00j
4	2.48	3.05	3.27	2.46	-8.39	3.14-0.53j
5	2.25	3.58	2.92	1.87	-8.92	3.14-0.50j
6	4.48	3.22	2.35	2.32	-10.83	3.14-2.43j

Şekil 3.27: Üç numaralı resim için equidistant ve iç yöneltme ve dış yöneltme elemanları



	X	Y	Xe	Ye
1	56.0	-125.0	-70.2588	3.1485
2	-15.0	-86.0	85.4465	4.9337
3	25.0	237.0	89.5770	1.8107
4	-134.0	207.0	-60.8888	1.7500
5	115.0	-81.0	-37.5028	3.0660
6	-35.0	210.0	-85.9069	2.0267
7				

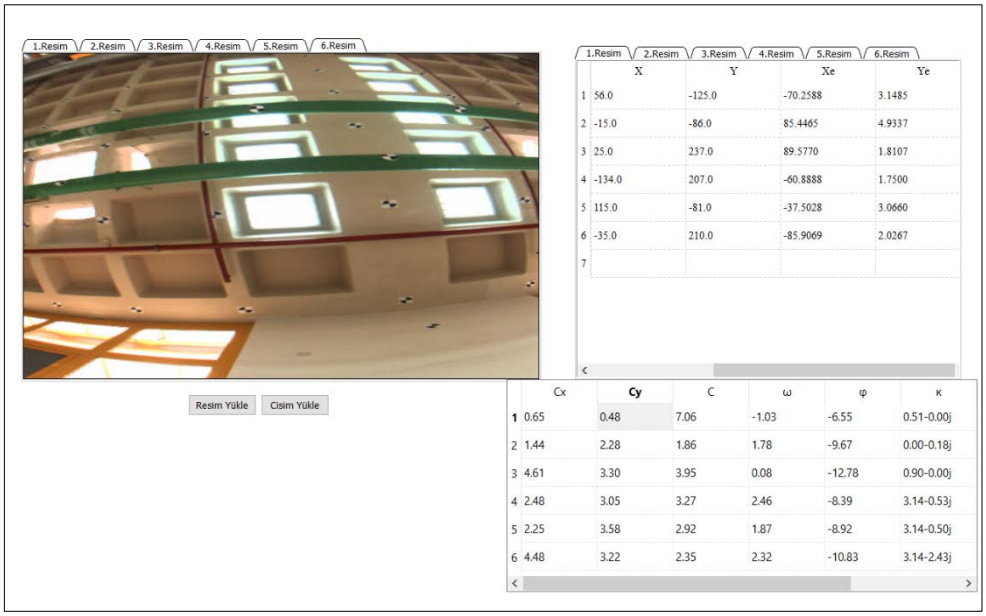
	Cx	Cy	C	ω	φ	κ
1	0.65	0.48	7.06	-1.03	-6.55	0.51-0.00j
2	1.44	2.28	1.86	1.78	-9.67	0.00-0.18j
3	4.61	3.30	3.95	0.08	-12.78	0.90-0.00j
4	2.48	3.05	3.27	2.46	-8.39	3.14-0.53j
5	2.25	3.58	2.92	1.87	-8.92	3.14-0.50j
6	4.48	3.22	2.35	2.32	-10.83	3.14-2.43j

Şekil 3.28: Dört numaralı resim için equidistant ve iç yöneltme ve dış yöneltme elemanları

	X	Y	Xe	Ye
1	56.0	-125.0	-70.2588	3.1485
2	-15.0	-86.0	85.4465	4.9337
3	25.0	237.0	89.5770	1.8107
4	-134.0	207.0	-60.8888	1.7500
5	115.0	-81.0	-37.5028	3.0660
6	-35.0	210.0	-85.9069	2.0267
7				

	Cx	Cy	C	ω	φ	κ
1	0.65	0.48	7.06	-1.03	-6.55	0.51-0.00j
2	1.44	2.28	1.86	1.78	-9.67	0.00-0.18j
3	4.61	3.30	3.95	0.08	-12.78	0.90-0.00j
4	2.48	3.05	3.27	2.46	-8.39	3.14-0.53j
5	2.25	3.58	2.92	1.87	-8.92	3.14-0.50j
6	4.48	3.22	2.35	2.32	-10.83	3.14-2.43j

Şekil 3.29: Beş numaralı resim için equidistant ve iç yöneltme ve dış yöneltme elemanları



	X	Y	Xe	Ye
1	56.0	-125.0	-70.2588	3.1485
2	-15.0	-86.0	85.4465	4.9337
3	25.0	237.0	89.5770	1.8107
4	-134.0	207.0	-60.8888	1.7500
5	115.0	-81.0	-37.5028	3.0660
6	-35.0	210.0	-85.9069	2.0267
7				

	Cx	Cy	C	ω	φ	κ
1	0.65	0.48	7.06	-1.03	-6.55	0.51-0.00j
2	1.44	2.28	1.86	1.78	-9.67	0.00-0.18j
3	4.61	3.30	3.95	0.08	-12.78	0.90-0.00j
4	2.48	3.05	3.27	2.46	-8.39	3.14-0.53j
5	2.25	3.58	2.92	1.87	-8.92	3.14-0.50j
6	4.48	3.22	2.35	2.32	-10.83	3.14-2.43j

Şekil 3.30: Altı numaralı resim için equidistant ve iç yöneltme ve dış yöneltme elemanları

Yapılan bu çalışma ve elde edilen sonuçlar piksel koordinat sistemlerinden resim koordinat sistemine afin dönüşümü ile yapılan iç yöneltme işleminin ardından, direkt lineer dönüşüm yöntemi ile balıkgözü panoramik görüntülerinin equidistant model ile modellenebildiğini gösterilmiştir. Hem 112 noktalı test alanında hesaplanan parametreler hem de kalibrasyon odası verileri ile yapılan bu çalışma benzer sonuçları vermiştir.

4. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında yersel fotogrametride kullanımı giderek artan panoramik kameraların kalibrasyonu üzerine çalışılmıştır. Fisheye (balıkgözü) merceklerin equidistant projeksiyon modeli özelinde python dilinde kod geliştirilmiştir. Çok algılayıcılı panoramik görüntü elde etme sistemlerinde her bir kameranın iç yöneltme elemanları ile kameraların birbirlerine göre göreceli konum ve dönüklükleri hesaplanır.

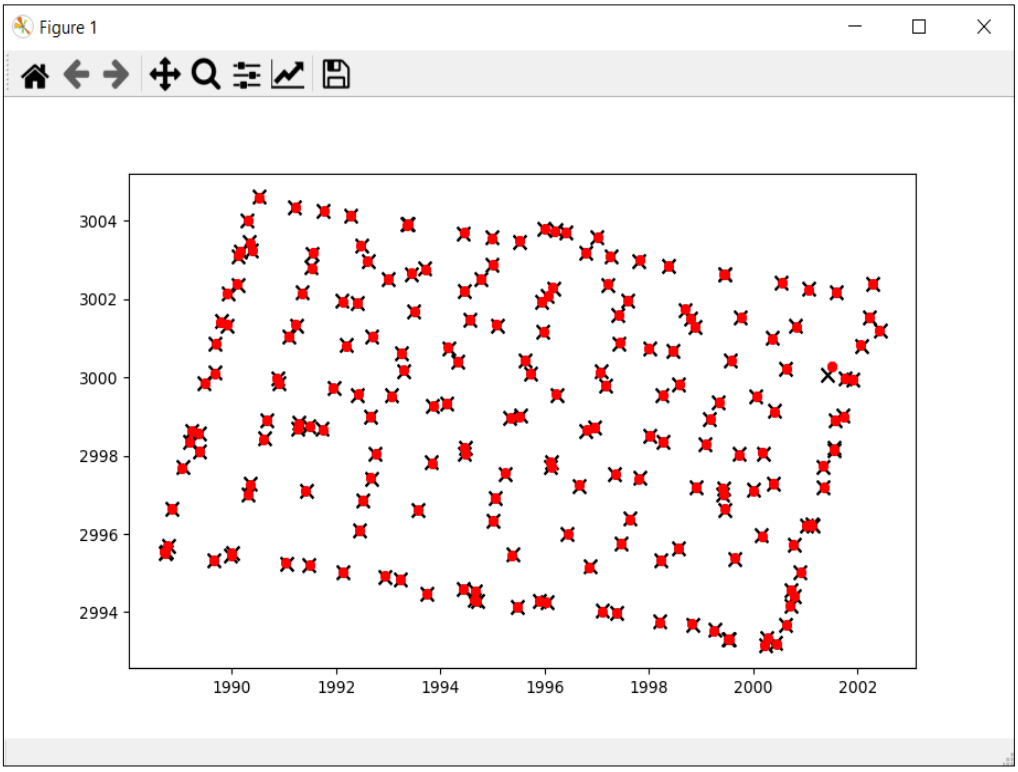
Tez çalışması kapsamında test aşaması ve uygulama verisi adı verilen iki veri seti vardır. Tezin test aşamasında Ladybug2 kamerasında bulunan altı adet özdeş kameranın her biriyle -üç boyutlu koordinatları bilinen- 112 noktalı kalibrasyon alanının ayrı ayrı görüntüler alınmıştır. Alan üzerindeki numaralandırılmış hedef noktaları cisim koordinatları txt formatta yazılmıştır. İkinci bir test alanı olarak kullanılan kalibrasyon odası içerisinde 360 derecelik bir dağılım gösterecek şekilde iki yüz hedef noktası içeren bir alandır. Laydbug2 kamerası ile iki ortama ait resimler çekilmiştir. Öncelikle kalibrasyon alanının altı özdeş balıkgözü mercekten ayrı ayrı elde edilen görüntüler bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Piksel koordinat sistemi üzerinde gelen görüntüler ilk olarak afin dönüşüm işlemi ile resim koordinat sistemine aktarılmıştır. Resim koordinatlarının elde edilmesi ile direkt lineer dönüşümün on bir parametresi iteratif bir çözümle hesaplanmıştır. Direkt lineer dönüşüm işleminin ardından resim noktalarına düzeltmeler getirilmiş ve iç yöneltme ve dış yöneltme elemanları hesaplanmıştır. Düzeltilmiş resim noktaları ile equidistant projeksiyon modeline dönüşüm işlemi yapılmıştır. İlk dönüşüm işleminin ardından iteratif olarak equidistant model üzerindeki $A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, C_1, C_2$ distorsiyon parametreleri hesaplanmıştır. Distorsiyon parametrelerinin hesaplanmasının ardından equidistant model üzerindeki noktalara distorsiyon düzeltmeleri getirilmiştir. Son adım olarak elde edilen düzeltilmiş equidistant projeksiyon koordinatları cisim koordinatlarına dönüştürülmüştür.

Bu çalışma kapsamında equidistant model koordinat sisteminden hesaplanan cisim noktaları ile ölçülen cisim noktaları karşılaştırılmıştır. Şekil 4.1'te geliştirilen yazılım ile Equidistant projeksiyon modelindeki resim noktalarından hesaplanmış cisim nokta koordinatlarından bir bölüm verilmiştir. Jeodezik ölçüler ile geliştirilen yazılım ile bulunan noktaların üç boyutlu koordinatları EK3 te verilmiştir.

equdistant_cs - NumPy object array

	0	1	2	3
0	14	2000.82356	2994.91948	102.4996
1	20	2001.63872	2998.93761	102.49746
2	48	1989.6111	3000.79027	103.45102
3	52	1989.31248	2998.69971	103.4592
4	54	1989.1309	2997.80029	102.64105
5	219	1992.50289	2999.62497	100.14087

Şekil 4.1: Equidistant projeksiyon modelindeki resim noktalarından hesaplanmış cisim nokta koordinatları



Şekil 4.2: Equidistant projeksiyon modelinden hesaplanan cisim noktaları ile jeodezik ölçme ile ölçülen noktalar

Şekil 4.2 de gösterilen x işaretleri jeodezik yöntemlerle ölçülen cisim noktası koordinatlarını gösterirken o işareti ile gösterilen noktalar ise equidistant projeksiyon model ile hesaplanan cisim noktalarını göstermektedir.

KAYNAKLAR

Abdel-Aziz, Y.I., Karara, H.M., (1971), “Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry”, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 81(2): 103-107.

Abraham, S., Förstner, W., (2005), “Fish-eyestereo calibration and epipolar rectification”, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 59, 278-288.

Akın, A., (2015), “Real-time high-resolution multiple-camera depth map estimation hardware and its applications”, Doktora Tezi, Ecole polytechnique fédérale de lausanne, Suisse,.

Kundu, A. S., Mazumder, O., Dhar, A., Lenka, P. K., Bhaumik, S., (2017), “Scanning Camera and Augmented Reality Based Localization of Omnidirectional Robot for Indoor Application”, Procedia Computer Science, 105, 27–33.

Baker, S., Nayar, S.K., (2004), “A Theory of Single-Viewpoint Catadioptric Image Formation”, International Journal of Computer Vision, 35, 175-196.

Baştanlar, Y., (2005), “Parameter extraction and image enhancement for catadioptric omnidirectional cameras”, Yüksek Lisans Tezi, O.D.T.Ü. Enformatik Enstitüsü, Ankara.

Benosman, R.B., Kang, S.B., (2001), “Panoramic vision : sensors, theory, and applications”.

Ergün, B., Şahin, C., (2009), "Günümüzde kullanılan optik ve sayısal küresel fotogrametri teknikleri", Harita Dergisi, 142, 40-50.

Mirzaei F.M., Kottas D. G., Roumeliotis S.I., (2011), “Analytical least-squares solution for 3D lidar-camera calibration”, Robotics Research - The 15th International Symposium of Robotics Research, Flagstaff, USA, 2011, 183-200.

Bosch, J., Gracias, N.R., Ridao, P., Ribas, D. (2015). “Omnidirectional Underwater Camera Design and Calibration”, Sensors (Basel, Switzerland), 15, 6033 - 6065.

Chmel J., (2015), “SW and HW Integration of an IP PTZ camera onto a mobile outdoor robot”, Bachelor’s Thesis, Czech Technical University in Prague Faculty of Electrical Engineering Department of Cybernetics.

Rau, J. Y., Su, B. W., Hsiao, K. W., Jhan, J. P., (2016), “Systematic Calibration for a Backpacked Spherical Photogrammetry Imaging System”, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Czech Republic, 695-702.

.

Kraus, K., Harley I., Kyle S., (2007), “Photogrammetry: Geometry from Images and Laser Scans”, Walter De Gruyter.

Kwiatek, K., (2005), “Generation of a virtual tour in the 3D space applying panoramas”, exercised on the sites of Dresden and Cracow. Lisans Tezi, AGH University ofScience and Technology, Dresden.

Kwiatek, K., Tokarczyk, R. (2014). “Photogrammetric Applications Of Immersive Video Cameras”, ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 211-218.

Luhmann, T., (2004), “A Historical Review on Panorama Photogrammetry”.

Campos, M.B., Tommaselli, A.M., Honkavaara, E., Prol, F.D., Kaartinen, H., Issaoui, A.E., Hakala, T., (2018), “A Backpack-Mounted Omnidirectional Camera with Off-the-Shelf Navigation Sensors for Mobile Terrestrial Mapping: Development and Forest Application”, Sensors (Basel, Switzerland), 18.

Parian, J. A., (2006), “Panoramic Imaging: Techniques, Sensor Modeling and Applications”, International Summer School “Digital Recording and 3D Modelling”, Crete, Yunanistan, 24-29 Nisan 2006.

Parian, J.A., (2007), “Sensor modeling, calibration and point positioning with terrestrial panoramic cameras".

P. Firoozfam, (2004), “Multi-camera imaging for 3D mapping and positioning: Stereo and panoramic conical views”, Doktora Tezi, The University of Miami, USA.

Sturm, P.F., Ramalingam, S., Tardif, J., Gasparini, S., Barreto, J., (2011), “Camera Models and Fundamental Concepts Used in Geometric Computer Vision”, Found. Trends Comput. Graph. Vis., 6, 1-183.

Wang, R., Ferrie, F.P., MacFarlane, J., (2012), “Automatic registration of mobile LiDAR and spherical panoramas”, 2012 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, 33-40.

Sahin, C., Ergun, B., (2019), "Indoor stereo photogrammetry via omnidirectional multicamera system case study: Ladybug2", 9, 197-224, in Book Series: Advances in Sensors: Reviews, 7, ISBN: 978-84-09-14512-6, IFSA / International Frequency Sensor Association Publishing.

Schneider, D., Schwalbe, E., Mass, H. G., (2009), “Validation of Geometric models for fisheye lenses”, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Article in Press

Uyttendaele, M., Criminisi, A., Kang, S. B., Winder, S., Hartley, R., Szeliski, R., (2003), “High-quality Imagebased Interactive Exploration of Real-Word Environments”, Technical Report, MSR-TR-2003-61.

ÖZGEÇMİŞ

İlkay Murat Ertekin 2012 yılında başladığı Çanakkale On sekiz Mart Üniversitesi Mühendislikte Fakültesi Geomatik Mühendisliği bölümünü 2017 yılında başarıyla tamamladı. 2018 yılında Gebze Teknik Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü Harita Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisansa başladı. Özel sektörde Harita mühendisi olarak çeşitli görevler aldı. Şu an özel sektörde yazılım geliştirme mühendisi unvanı ile çalışmaktadır.

EKLER

Ek A: Tez Çalışması Kapsamında Yapılan Yayınlar

Ertekin M.İ., Şahin C., (2020), " Panoramik Algılamada Kullanılan Balıkgözü Kameraların DLT Kalibrasyonu ", Ispec International Conference On Engineering & Natural Sciences-9, 308-313, Ankara, Türkiye, 13-15 Kasım 2020

Ek B: Altı özdeş kamera görüntüsünden elde edilen görüntüler üzerindeki altı hedef için piksel ve resim koordinatları (Kalibrasyon Alanı).

Tablo B1.1: Altı özdeş kamera görüntüsünden elde edilen görüntüler üzerindeki altı hedef için piksel ve resim koordinatları

Nokta Numarası	x (Pik)	y (Pik)	X (Mm)	Y (Mm)
1.Resim				
1	836	158	324	226
2	910	325	398	59
3	900	514	388	-130
4	792	666	280	-282
5	626	750	114	-366
6	436	743	-76	-359
2.Resim	x (Pik)	y (Pik)	X (Mm)	Y (Mm)
1	684	43	172	341
2	843	155	331	229
3	916	330	404	54
4	913	513	391	-129
5	797	666	285	-282
6	627	753	115	-396
3.Resim	x (Pik)	y (Pik)	X (Mm)	Y (Mm)
1	808	163	296	221
2	884	343	372	41
3	859	535	347	-151
4	746	683	234	-299
5	576	761	64	-377

Tablo B1.1: Devam

6	387	750	-125	-366
4.Resim	x (Pik)	y (Pik)	X (Mm)	Y (Mm)
1	693	52	181	
2	868	211	356	173
3	912	388	400	-4
4	870	546	358	-162
5	758	666	246	-282
6	615	734	103	-350
5.Resim	x (Pik)	y (Pik)	X (Mm)	Y (Mm)
1	733	179	221	205
2	813	307	301	77
3	804	464	292	-80
4	728	598	216	-214
5	597	678	85	-294
6	442	684	-70	-300
6.Resim	x (Pik)	y (Pik)	X (Mm)	Y (Mm)
1	733	194	221	190
2	810	322	298	62
3	818	474	306	-90
4	746	609	234	-225
5	615	692	103	-308
6	450	705	-62	-321

Ek C: Kalibrasyon Odası ölçülen cisim ve Equidistant modelden hesaplanan cisim noktaları ve farkları

Tablo C1.1: Kalibrasyon Odası ölçülen cisim ve Equidistant modelden hesaplanan cisim noktaları

	X (m)	**Y (m)**	**Z (m)**	Xe **(m)**	Ye **(m)**	Ze **(m)**
1	1988.72328	2995.52623	103.57371	1988.71	2995.54	103.578
2	1989.65044	2995.33748	102.64828	1989.65	2995.33	102.666
3	1988.73492	2995.52867	101.45847	1988.73	2995.52	101.466
4	1994.65047	2994.32910	103.50293	1994.64	2994.32	103.494
5	1993.73332	2994.47540	102.39212	1993.73	2994.48	102.392
6	1995.47551	2994.12222	102.35264	1995.47	2994.13	102.338

Tablo C1.1: Devam

7	1994.70780	2994.27812	101.48894	1994.7	2994.29	101.489
8	1999.54551	2993.32037	103.61014	1999.53	2993.31	103.599
9	2000.23781	2993.14950	102.59075	2000.22	2993.15	102.58
10	1999.51935	2993.31819	101.41658	1999.52	2993.31	101.412
11	2000.77830	2994.39904	103.53542	2000.79	2994.4	103.539
12	2000.62324	2993.66428	102.61168	2000.63	2993.68	102.624
13	2000.72054	2994.15247	101.58316	2000.71	2994.16	101.574
14	2000.89172	2995.01774	102.58184	2000.91	2995.01	102.601
15	2001.12895	2996.25522	103.48061	2001.11	2996.26	103.463
16	2001.13815	2996.20071	101.58003	2001.13	2996.2	101.571
17	2001.34499	2997.19259	102.55850	2001.36	2997.19	102.545
18	2001.54558	2998.15532	103.46646	2001.54	2998.14	103.448
19	2001.54466	2998.19624	101.59138	2001.54	2998.18	101.589
20	2001.71674	2999.01929	102.57025	2001.73	2999.01	102.555
21	2001.89887	2999.93505	103.45787	2001.9	2999.94	103.456
22	2002.07445	3000.81560	102.59838	2002.05	3000.82	102.605
23	2002.21694	3001.54810	103.44831	2002.22	3001.54	103.466
24	2001.07006	3002.25384	103.44582	2001.06	3002.24	103.434
25	2001.58762	3002.17784	102.66435	2001.59	3002.17	102.673
26	1999.44812	3002.64178	103.39853	1999.43	3002.64	103.393
27	2000.53383	3002.41078	102.62758	2000.55	3002.42	102.61
28	1999.45393	3002.63632	101.62320	1999.46	3002.64	101.632
29	1997.81282	3002.98118	103.45322	1997.82	3003	103.472
30	1998.37055	3002.86124	102.63230	1998.38	3002.85	102.638
31	1997.27184	3003.09496	102.50536	1997.25	3003.09	102.525
32	1996.78495	3003.19660	103.10434	1996.79	3003.19	103.095
33	1996.21704	3003.75615	102.77936	1996.2	3003.74	102.795
34	1997.00078	3003.58174	101.85046	1997.01	3003.58	101.831
35	1995.99082	3003.79722	101.82969	1996	3003.8	101.846
36	1996.41144	3003.70574	100.26941	1996.41	3003.71	100.279
37	1994.98776	3003.57013	103.48897	1994.98	3003.56	103.503
38	1995.50970	3003.46398	102.66806	1995.51	3003.48	102.674
39	1993.36692	3003.91777	103.44047	1993.35	3003.9	103.447
40	1994.44134	3003.68212	102.69653	1994.45	3003.69	102.714
41	1993.37537	3003.90878	101.67753	1993.37	3003.91	101.682
42	1991.75714	3004.24888	103.48528	1991.76	3004.25	103.494
43	1992.28165	3004.12434	102.70110	1992.27	3004.14	102.705
44	1991.20685	3004.34965	102.79931	1991.23	3004.34	102.807
45	1990.11711	3003.10107	103.60352	1990.12	3003.11	103.593
46	1990.29275	3004.01713	102.76696	1990.3	3004	102.761
47	1990.15155	3003.21511	101.00540	1990.16	3003.22	101.017

Tablo C1.1: Devam

48	1989.67643	3000.85224	103.53598	1989.7	3000.87	103.532
49	1989.91885	3002.16014	102.76619	1989.91	3002.16	102.747
50	1989.79284	3001.44211	101.02963	1989.79	3001.42	101.014
51	1989.46886	2999.85189	102.71108	1989.48	2999.85	102.716
52	1989.23601	2998.63317	103.54128	1989.22	2998.64	103.522
53	1989.18878	2998.35413	101.58608	1989.19	2998.35	101.592
54	1989.05966	2997.70023	102.72752	1989.05	2997.68	102.721
55	1988.84868	2996.64352	102.92253	1988.86	2996.65	102.914
101	1988.78816	2995.70198	104.13813	1988.77	2995.71	104.12
102	1989.97754	2995.46256	104.13361	1989.99	2995.46	104.129
103	1991.04325	2995.24563	104.13882	1991.02	2995.26	104.132
104	1992.12877	2995.03003	104.13376	1992.12	2995.02	104.121
105	1993.23346	2994.82866	104.13572	1993.24	2994.85	104.121
106	1994.66108	2994.54601	104.14702	1994.68	2994.53	104.154
107	1996.04643	2994.24829	104.13965	1996.03	2994.26	104.133
108	1997.10523	2994.03293	104.13757	1997.11	2994.02	104.142
109	1998.19799	2993.76049	104.13631	1998.21	2993.74	104.146
110	1999.26466	2993.55702	104.15119	1999.25	2993.54	104.147
112	1990.35405	2997.27121	104.12635	1990.36	2997.26	104.128
113	1991.42683	2997.09761	104.11974	1991.42	2997.1	104.106
114	1992.50718	2996.85135	104.10962	1992.51	2996.87	104.091
115	1993.57431	2996.59763	104.11173	1993.58	2996.6	104.11
116	1995.01287	2996.33269	104.11584	1995	2996.34	104.112
117	1996.42079	2996.01129	104.11364	1996.44	2996	104.094
118	1997.46841	2995.74471	104.12248	1997.46	2995.75	104.108
119	1998.56741	2995.62617	104.11462	1998.56	2995.63	104.133
120	1999.63959	2995.36851	104.13343	1999.64	2995.39	104.135
121	1989.37281	2998.56478	104.14026	1989.36	2998.56	104.149
122	1990.66498	2998.89280	104.13259	1990.66	2998.91	104.13
123	1991.73493	2998.67692	104.11411	1991.74	2998.66	104.114
124	1992.75316	2998.05250	104.09804	1992.76	2998.04	104.096
125	1993.82058	2997.82212	104.09694	1993.84	2997.81	104.115
126	1995.24383	2997.53497	104.09762	1995.24	2997.55	104.079
127	1996.66840	2997.23190	104.09716	1996.67	2997.24	104.097
128	1997.81381	2997.42644	104.10649	1997.81	2997.42	104.098
129	1998.89385	2997.19480	104.11124	1998.91	2997.19	104.116
130	2000.01287	2997.11735	104.12871	2000	2997.1	104.111
131	1989.66780	3000.11303	104.15296	1989.67	3000.11	104.148
132	1990.88297	2999.96181	104.14192	1990.86	2999.98	104.125
133	1991.95153	2999.73250	104.12185	1991.95	2999.73	104.113
134	1993.06408	2999.53469	104.10621	1993.06	2999.53	104.105

Tablo C1.1: Devam

135	1994.12814	2999.32049	104.10287	1994.13	2999.32	104.111
136	1995.53165	2999.02134	104.09816	1995.52	2999	104.113
137	1996.95765	2998.72197	104.09519	1996.95	2998.73	104.097
138	1998.00870	2998.49475	104.10185	1998.02	2998.5	104.097
139	1999.07247	2998.28334	104.11075	1999.09	2998.3	104.105
140	2000.19759	2998.04919	104.12455	2000.18	2998.07	104.119
141	1989.89890	3001.31978	104.14219	1989.91	3001.34	104.141
142	1991.09775	3001.04693	104.13565	1991.1	3001.03	104.145
143	1992.19049	3000.82150	104.12301	1992.19	3000.8	104.12
144	1993.25504	3000.61768	104.10834	1993.25	3000.62	104.112
145	1994.33092	3000.39653	104.10520	1994.34	3000.4	104.114
146	1995.73626	3000.09482	104.10360	1995.72	3000.11	104.111
147	1997.15907	2999.79370	104.10473	1997.16	2999.8	104.123
148	1998.24580	2999.55622	104.09921	1998.27	2999.54	104.099
149	1999.32706	2999.35430	104.10940	1999.34	2999.37	104.095
150	2000.39837	2999.14100	104.12422	2000.4	2999.12	104.139
151	1990.11117	3002.37456	104.14256	1990.1	3002.39	104.141
152	1991.35282	3002.17503	104.16033	1991.34	3002.16	104.141
153	1992.41108	3001.90558	104.12933	1992.41	3001.89	104.118
154	1993.48388	3001.67989	104.11899	1993.5	3001.69	104.134
155	1994.56849	3001.46861	104.11521	1994.56	3001.47	104.108
156	1995.96215	3001.16855	104.11505	1995.98	3001.16	104.106
157	1997.42370	3000.86810	104.11767	1997.44	3000.88	104.11
158	1998.44978	3000.67040	104.11658	1998.45	3000.67	104.105
159	1999.56725	3000.43382	104.12101	1999.58	3000.43	104.129
160	2000.61251	3000.22183	104.13406	2000.63	3000.23	104.152
161	1990.33913	3003.44590	104.14213	1990.35	3003.43	104.143
162	1991.53504	3003.16380	104.14330	1991.55	3003.18	104.139
163	1992.61772	3002.95827	104.13509	1992.6	3002.96	104.126
164	1993.70445	3002.77427	104.13157	1993.72	3002.75	104.15
165	1994.78317	3002.52377	104.12701	1994.77	3002.51	104.141
166	1996.17982	3002.27397	104.12578	1996.16	3002.29	104.107
167	1997.60120	3001.96184	104.12942	1997.6	3001.95	104.142
168	1998.69201	3001.73124	104.12798	1998.69	3001.74	104.108
169	1999.75848	3001.53255	104.12926	1999.78	3001.52	104.142
170	2000.80921	3001.30736	104.13900	2000.82	3001.3	104.145
171	2000.42378	2993.21234	104.15694	2000.44	2993.2	104.156
172	2000.73349	2994.55669	104.15260	2000.72	2994.57	104.167
173	2001.02625	2996.21956	104.14224	2001.03	2996.23	104.134
174	2001.34703	2997.71066	104.14909	2001.34	2997.73	104.133
175	2001.57040	2998.90495	104.14947	2001.57	2998.92	104.15

Tablo C1.1: Devam

176	2001.76067	2999.97547	104.13510	2001.76	2999.99	104.14
177	2002.42980	3001.19612	104.20707	2002.42	3001.2	104.209
178	2002.29552	3002.39162	104.14177	2002.29	3002.39	104.149
179	1990.52790	3004.61953	104.14364	1990.53	3004.6	104.132
201	1990.00524	2995.50533	100.01342	1990	2995.51	99.997
202	1991.47790	2995.20632	100.01327	1991.49	2995.2	100.021
203	1992.93625	2994.91371	100.01574	1992.93	2994.92	100.015
204	1994.44298	2994.58832	100.02214	1994.44	2994.6	100.019
205	1995.89445	2994.29502	100.02665	1995.89	2994.28	100.007
206	1997.37270	2993.97854	100.02643	1997.37	2993.98	100.044
207	1998.83410	2993.68601	100.03241	1998.82	2993.71	100.029
208	1992.44849	2996.08489	100.01926	1992.44	2996.08	100.026
209	1995.38997	2995.47521	100.02323	1995.37	2995.46	100.032
210	1996.86161	2995.16864	100.02397	1996.85	2995.16	100.029
211	1990.30702	2996.99856	100.01730	1990.3	2997.01	100.002
212	1998.22361	2995.33153	99.99153	1998.22	2995.34	100.007
213	1990.62003	2998.43906	100.02373	1990.61	2998.43	100.02
214	1999.45950	2996.61851	100.01342	1999.45	2996.64	100.011
215	1991.46749	2998.75346	100.02342	1991.49	2998.75	100.043
216	1992.65140	2999.00461	100.01539	1992.67	2999.01	100.019
217	1997.34610	2997.53188	100.01215	1997.36	2997.54	100.003
218	1990.90316	2999.86459	100.02375	1990.91	2999.85	100.008
219	1992.41337	2999.56106	100.02144	1992.42	2999.58	100.021
220	1993.84920	2999.26019	100.01845	1993.86	2999.27	100.013
221	1995.32892	2998.96498	100.01275	1995.34	2998.96	100.004
222	1996.78594	2998.64375	100.00927	1996.8	2998.65	100.02
223	1998.27642	2998.35864	100.01217	1998.26	2998.37	100.019
224	1999.72618	2998.04446	100.01278	1999.73	2998.02	100.022
225	1993.29457	3000.16803	100.02007	1993.29	3000.19	100.013
226	1996.23090	2999.55796	100.01030	1996.22	2999.57	100.009
227	1999.16612	2998.93703	100.02014	1999.17	2998.93	100.034
228	1991.24032	3001.33375	100.02809	1991.23	3001.34	100.029
229	1992.68318	3001.05400	100.01993	1992.7	3001.05	100.011
230	1994.15487	3000.75176	100.01691	1994.14	3000.77	99.999
231	1995.61793	3000.43361	100.01269	1995.63	3000.43	100.005
232	1997.07560	3000.14592	100.00897	1997.06	3000.13	100.012
233	1998.57441	2999.81547	100.01431	1998.58	2999.82	99.9986
234	2000.05674	2999.50233	100.01929	2000.06	2999.51	100.033
235	1992.10781	3001.94999	100.02244	1992.12	3001.93	100.034
236	1995.08448	3001.33279	100.01291	1995.08	3001.34	100.03
237	1998.01630	3000.72700	100.00882	1998	3000.73	100.017

Tablo C1.1: Devam

238	1991.52244	3002.81384	100.02609	1991.53	3002.8	100.029
239	1993.00359	3002.51181	100.01946	1992.99	3002.51	100.037
240	1994.46047	3002.20527	100.01677	1994.46	3002.21	100.026
241	1995.93936	3001.92173	100.01224	1995.95	3001.94	100.028
242	1997.40979	3001.59717	100.01078	1997.42	3001.59	100.013
243	1998.88547	3001.29675	100.00478	1998.89	3001.3	99.9856
244	2000.36463	3000.99994	100.00385	2000.36	3000.98	100.001
401	1989.37771	2998.11448	103.39364	1989.37	2998.12	103.389
402	1992.67925	2997.41745	103.36482	1992.67	2997.43	103.369
403	1995.04844	2996.92169	103.35410	1995.06	2996.93	103.342
404	1997.64301	2996.39184	103.37031	1997.64	2996.37	103.387
405	2000.77760	2995.73948	103.37675	2000.76	2995.73	103.384
406	1991.26824	2998.69453	103.38020	1991.26	2998.68	103.391
407	1994.46441	2998.04561	103.34598	1994.48	2998.04	103.352
408	1996.11686	2997.70421	103.34803	1996.13	2997.7	103.35
409	1999.41619	2997.00260	102.49612	1999.43	2997	102.491
410	1991.27538	2998.83979	103.41347	1991.28	2998.82	103.409
411	1994.46945	2998.19591	103.35788	1994.46	2998.21	103.373
412	1996.12504	2997.84510	103.35237	1996.12	2997.84	103.336
413	1999.42254	2997.17459	103.37944	1999.42	2997.16	103.397
414	1990.38134	3003.25491	103.45538	1990.39	3003.26	103.444
415	1993.44752	3002.64219	103.41068	1993.44	3002.66	103.397
416	1996.04261	3002.08682	103.41183	1996.06	3002.07	103.407
417	1998.80561	3001.51492	103.45916	1998.8	3001.5	103.441
418	1992.48241	3003.35999	101.31660	1992.47	3003.36	101.335
419	1994.98008	3002.87469	101.29434	1995	3002.89	101.284
420	1997.21976	3002.35904	101.29727	1997.22	3002.38	101.304
421	2000.26104	2993.35508	100.92491	2000.28	2993.35	100.913
422	2000.16292	2995.97035	100.90459	2000.17	2995.95	100.888
423	2000.39107	2997.28114	100.90465	2000.39	2997.3	100.915
424	2001.42855	3000.05591	100.90072	2001.51	3000.27	101.071

Tablo C1.2: Kalibrasyon Odası ölçülen cisim ve Equidistant modelden hesaplanan cisim nokta farkları

Nokta Numarası	X-Xe **(m)**	Y-YE **(m)**	Z-Ze **(m)**
1	0.01588	-0.01843	-0.00463
2	-0.00180	0.00341	-0.01768
3	0.00935	0.00683	-0.00704
4	0.00629	0.00877	0.00940
5	0.00002	0.00038	-0.00036

Tablo C1.2: Devam

6	0.00228	-0.00320	0.01417
7	0.00285	-0.01365	0.00019
8	0.01442	0.00632	0.01141
9	0.01699	0.00164	0.01030
10	-0.00114	0.01272	0.00464
11	-0.00743	0.00075	-0.00356
12	-0.00894	-0.01813	-0.01186
13	0.00838	-0.00621	0.00949
14	-0.01789	0.00540	-0.01887
15	0.01558	-0.00561	0.01769
16	0.00723	0.00557	0.00864
17	-0.01678	-0.00173	0.01358
18	0.00719	0.01661	0.01854
19	0.00552	0.01887	0.00276
20	-0.01648	0.00554	0.01481
21	0.00008	-0.00386	0.00137
22	0.01953	-0.00334	-0.00677
23	-0.00405	0.00446	-0.01810
24	0.01073	0.00900	0.01149
25	-0.00536	0.01075	-0.00875
26	0.01445	0.00147	0.00520
27	-0.01261	-0.01049	0.01765
28	-0.00746	-0.00567	-0.00920
29	-0.00693	-0.01719	-0.01887
30	-0.01052	0.00933	-0.00537
31	0.01776	0.00442	-0.01980
32	-0.00221	0.01149	0.00951
33	0.01810	0.01434	-0.01577
34	-0.01283	0.00519	0.01940
35	-0.01250	-0.00161	-0.01646
36	-0.00240	-0.00397	-0.00918
37	0.00900	0.00570	-0.01356
38	-0.00463	-0.01834	-0.00597
39	0.01467	0.01291	-0.00627
40	-0.01183	-0.01243	-0.01713
41	0.00514	-0.00262	-0.00450
42	0.00080	-0.00239	-0.00876
43	0.01406	-0.01226	-0.00406
44	-0.01823	0.01123	-0.00757
45	-0.00104	-0.00600	0.01022
46	-0.00500	0.01250	0.00627

Tablo C1.2: Devam			
47	-0.00950	-0.00306	-0.01182
48	-0.01893	-0.01549	0.00390
49	0.01184	0.00331	0.01969
50	0.00087	0.01870	0.01551
51	-0.01244	0.00372	-0.00532
52	0.01399	-0.00345	0.01959
53	-0.00459	0.00871	-0.00611
54	0.01445	0.01911	0.00617
55	-0.00815	-0.00863	0.00887
101	0.01595	-0.01033	0.01786
102	-0.00991	0.00667	0.00478
103	0.01890	-0.01601	0.00679
104	0.01320	0.00711	0.01315
105	-0.01118	-0.01922	0.01497
106	-0.01964	0.01938	-0.00702
107	0.01853	-0.01115	0.00656
108	-0.00403	0.00872	-0.00401
109	-0.01230	0.01971	-0.01019
110	0.01402	0.01431	0.00411
112	-0.00262	0.01543	-0.00212
113	0.00306	0.00073	0.01380
114	-0.00423	-0.01628	0.01867
115	-0.00584	-0.00364	0.00192
116	0.01539	-0.01040	0.00349
117	-0.01694	0.01433	0.01969
118	0.01196	-0.00627	0.01443
119	0.01206	0.00064	-0.01791
120	-0.00071	-0.01725	-0.00169
121	0.01223	0.00929	-0.00923
122	0.00797	-0.01342	0.00239
123	-0.00542	0.01299	0.00058
124	-0.00659	0.01296	0.00189
125	-0.01998	0.01556	-0.01811
126	0.00675	-0.01041	0.01877
127	0.00148	-0.01214	0.00017
128	0.00122	0.00491	0.00853
129	-0.01466	0.00238	-0.00471
130	0.00817	0.01410	0.01784
131	-0.00058	0.00155	0.00450
132	0.01869	-0.01640	0.01716
133	0.00402	0.00342	0.00929

Tablo C1.2: Devam			
134	0.00240	0.00478	0.00142
135	-0.00143	0.00108	-0.00849
136	0.01404	0.01841	-0.01457
137	0.00921	-0.01123	-0.00172
138	-0.00848	-0.00592	0.00482
139	-0.01718	-0.01888	0.00531
140	0.01712	-0.01913	0.00556
141	-0.01450	-0.01610	0.00154
142	0.00039	0.01618	-0.00933
143	-0.00314	0.01781	0.00289
144	0.00712	-0.00566	-0.00338
145	-0.00601	-0.00692	-0.00857
146	0.01559	-0.01734	-0.00773
147	-0.00581	-0.00654	-0.01815
148	-0.01958	0.01959	-0.00004
149	-0.01344	-0.01269	0.01479
150	0.00053	0.01764	-0.01475
151	0.01087	-0.01081	0.00132
152	0.00809	0.01062	0.01929
153	0.00417	0.01101	0.01142
154	-0.01304	-0.00698	-0.01483
155	0.01162	-0.00247	0.00732
156	-0.01641	0.01065	0.00873
157	-0.01132	-0.01186	0.00784
158	-0.00386	0.00057	0.01183
159	-0.00973	0.00711	-0.00827
160	-0.01255	-0.00488	-0.01790
161	-0.00639	0.01969	-0.00108
162	-0.01065	-0.01760	0.00428
163	0.01659	0.00290	0.00860
164	-0.01483	0.01989	-0.01864
165	0.01231	0.00975	-0.01432
166	0.01827	-0.01746	0.01895
167	0.00016	0.01467	-0.01268
168	0.00040	-0.00611	0.01998
169	-0.01659	0.00989	-0.01310
170	-0.00808	0.00514	-0.00599
171	-0.01825	0.01350	0.00056
172	0.01155	-0.01277	-0.01468
173	-0.00604	-0.00554	0.00809
174	0.00607	-0.01803	0.01623

Tablo C1.2: Devam			
175	0.00044	-0.01790	-0.00004
176	0.00055	-0.01393	-0.00529
177	0.01370	-0.00570	-0.00151
178	0.00080	0.00156	-0.00746
179	-0.00205	0.01792	0.01165
201	0.00537	-0.00541	0.01641
202	-0.01286	0.01007	-0.00815
203	0.00627	-0.00997	0.00079
204	0.00659	-0.00837	0.00312
205	0.00138	0.01962	0.01926
206	-0.00146	-0.00413	-0.01802
207	0.01769	-0.01905	0.00310
208	0.00473	0.00129	-0.00652
209	0.01974	0.01445	-0.00886
210	0.00892	0.01093	-0.00479
211	0.00679	-0.01329	0.01494
212	0.00327	-0.00454	-0.01591
213	0.00755	0.00792	0.00368
214	0.00983	-0.01652	0.00279
215	-0.01782	0.00169	-0.01936
216	-0.01653	-0.00905	-0.00383
217	-0.01190	-0.00910	0.00894
218	-0.00208	0.01772	0.01609
219	-0.00284	-0.01828	0.00001
220	-0.01196	-0.01235	0.00586
221	-0.00879	0.00366	0.00872
222	-0.01396	-0.00169	-0.01118
223	0.01410	-0.01185	-0.00647
224	-0.00421	0.01984	-0.00964
225	0.00098	-0.01888	0.00737
226	0.01265	-0.01532	0.00175
227	-0.00093	0.01075	-0.01364
228	0.00874	-0.01080	-0.00106
229	-0.01586	0.00492	0.00914
230	0.01815	-0.01584	0.01786
231	-0.01026	0.00272	0.00763
232	0.01088	0.01474	-0.00295
233	-0.00777	-0.00776	0.01573
234	-0.00735	-0.00985	-0.01414
235	-0.01636	0.01964	-0.01205
236	-0.00027	-0.00986	-0.01724

Tablo C1.2: Devam			
237	0.01860	-0.00127	-0.00839
238	-0.00312	0.01504	-0.00244
239	0.01205	0.00092	-0.01732
240	0.00140	-0.00332	-0.00959
241	-0.00953	-0.01628	-0.01604
242	-0.00538	0.00950	-0.00214
243	-0.00593	-0.00565	0.01914
244	0.00671	0.01701	0.00257
401	0.00951	-0.00379	0.00457
402	0.00662	-0.01467	-0.00435
403	-0.00960	-0.00963	0.01192
404	0.00792	0.01886	-0.01669
405	0.01423	0.00699	-0.00698
406	0.00335	0.01734	-0.01130
407	-0.01180	0.00772	-0.00580
408	-0.01436	0.00299	-0.00168
409	-0.01436	0.00196	0.00495
410	-0.00320	0.02000	0.00496
411	0.01292	-0.01869	-0.01524
412	0.00686	0.00817	0.01589
413	0.00407	0.01332	-0.01717
414	-0.01086	-0.00470	0.01151
415	0.00632	-0.01542	0.01358
416	-0.01616	0.01275	0.00460
417	0.00550	0.01237	0.01825
418	0.01312	-0.00278	-0.01846
419	-0.01630	-0.01620	0.00984
420	0.00269	-0.01699	-0.00700
421	-0.01589	0.00678	0.01155
422	-0.01019	0.01984	0.01689
423	0.00284	-0.01883	-0.01058
424	-0.08485	-0.21061	-0.17058

Ek D: Diğer Ekler (CD)

Tez kapsamında geliştirilen ilgili yazılıma ait kod bloğu