



T.C.

AKSARAY ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**YAKIN RESİM FOTOGRAMETRİSİNDE CEP TELEFONU
KAMERALARININ KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ALİ ERSİN GÜRBAK

DANIŞMAN

Doç.Dr. Ferruh YILMAZTÜRK

AKSARAY, 2016

AKSARAY ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ONAY BELGESİ

Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 112306009 numaralı Yüksek Lisans öğrencisi, "Ali Ersin GÜRBAK", ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "YAKIN RESİM FOTOGRAMETRİSİNDE CEP TELEFONU KAMERALARININ KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI" başlıklı tezini, aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Ferruh YILMAZTÜRK
Aksaray Üniversitesi

Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Hacı Murat YILMAZ
Aksaray Üniversitesi

Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Hakan KARABÖRK
Selçuk Üniversitesi



Teslim Tarihi: 19 Şubat 2016

Savunma Tarihi: 11 Mart 2016

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın hazırlanmasında emeği geçen; başta tez danışman hocam Doç. Dr. Ferruh YILMAZTÜRK'e teşekkür ederim. Kayseri Teknik ve Endüstri Meslek Lisesi okul bahçesinde bulunan Sırçalı Kümbet'in arazi çalışmalarında gerekli izinleri sağlayan okul yönetimine teşekkür ederim. Ayrıca Kayseri Kültür ve Tabiat Varlıklarını Koruma Bölge Kurulu Müdürü Sayın Kemal KURD'a ve saha çalışmamda bana yardım eden TEKNİRENGİ firmasının sahibi Sayın M. Kemal KARSLI'ya şükranlarımı sunarım.

Ali Ersin GÜRBAK

DOĞRULUK BEYANI

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu çalışmayı, bilimsel etik, ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yol ve yardıma başvurmaksızın yazdığımı, yararlandığım eserlerin kaynakçada gösterilenlerden oluştuğunu ve bu eserleri her kullanışında alıntı yaparak yararlandığımı belirtir; bunu şerefimle doğrularım.

Enstitü tarafından belli bir zamana bağlı olmaksızın, tezimle ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara katlanacağımı bildiririm.

Ali Ersin GÜRBAK

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iii
DOĞRULUK BEYANI.....	iv
İÇİNDEKİLER	v
ÖZET.....	vii
ABSTRACT	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
2. TEMEL KAVRAMLAR	4
2.1 Fotogrametrinin Matematik Modeli	4
2.2 Optik Temeller	7
2.2.1 Optik izdüşüm	7
2.2.2 Mercek kusurları	7
2.2.2.1 Distorsiyon	8
2.3 Sayısal Görüntü Özellikleri.....	10
2.3.1 Sayısal görüntü.....	10
2.3.1.1 Geometrik (konumsal) çözünürlük	12
2.3.1.2 Radyometrik çözünürlük.....	13
2.3.2 Sayısal görüntü elde etme	13
2.3.2.1 Cep telefonu kameraları	15
3. FOTOGRAMETRİK DEĞERLENDİRME.....	17
3.1 Resim Çekimi.....	18
3.1.1 Tek resim çekimi.....	18
3.1.2 Stereo resim çekimi.....	19
3.1.3 Çoklu resim çekimi	20
3.2 Resimlerin Yöneltilmesi.....	21
3.2.1 İç yöneltme.....	21
3.2.2 Dış yöneltme	22
3.3 Ek Parametrelerle Demet Dengelemesi	23
3.4 Cisim Geometrisinin Yeniden Oluşturulması	27
3.5 Kamera Kalibrasyonu.....	29
3.5.1 Laboratuvar ortamında kalibrasyon	29
3.5.2 Test alanı kalibrasyonu	29
3.5.3 Çekim sırasında kalibrasyon	30
3.5.4 Self kalibrasyon.....	31
4. UYGULAMA.....	32
4.1 Kameraların Teknik Özellikleri	32
4.2 Kullanılan Test Alanı	33
4.3 Kameraların Karşılaştırılması	34
4.4 Fotogrametrik Yöntemle 3B Modelleme	38
4.4.1 Jeodezik işler.....	41
4.4.2 Kamera kalibrasyonu	42

4.4.3 Resim çekimi.....	45
4.4.4 Fotogrametrik değerlendirme.....	45
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	49
6. KAYNAKLAR	51
EKLER.....	53
EK.A Demet dengelemesi raporu çıktısı.....	54
ÖZGEÇMİŞ.....	58



ÖZET

Sayısal yakın resim fotogrametrinin temel girdisi sayısal görüntülerdir. Yakın resim fotogrametrisi çalışmalarında sayısal görüntüler, günümüzde doğrudan doğruya sayısal kameralarla elde edilir. Bu alanda en çok kullanılan kamera türü ise DSLR (Digital single-lens reflex) resim çekim makineleridir. Fakat bu tür makineler içerdikleri mercek ve aynalardan dolayı ağır ve pahalıdır. Bundan dolayı bu makinelere her an ulaşmak mümkün olmamaktadır. Diğer yandan cep telefonları ise her daim yanımızda bulunmaktadır. Teknolojik gelişmelere bağlı olarak cep telefonu kameraları da gelişim göstermiş ve ilerleyen zamanlarda daha da gelişeceği düşünülmektedir. Günümüzde kamera geometrik çözünürlüğü 41 mp olan cep telefonları bile mevcuttur.

Bu çalışmada, günümüz cep telefonu kamera görüntülerinin fotogrametrik uygulamalarda kullanılabilirliğinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla iki farklı uygulama gerçekleştirilmiştir. İlk uygulamada, yaklaşık 1x1 m. boyutlarında 84 noktalı ve değişik yüksekliklerde 3 boyutlu koordinatları bilinen bir test alanı hazırlanmış ve bu test alanı kullanılarak altı farklı cep telefonu kamerasının ve iki farklı sayısal kompakt resim çekme makinesinin karşılaştırmaları yapılmıştır. Karşılaştırmada doğruluk, presizyon ve resim koordinat düzeltmeleri gibi parametreler kullanılmıştır. Değerlendirme sonucunda, yaklaşık bir metreden alınan cep telefonu kamera görüntüleriyle mm düzeyi altında doğruluklar elde edilmiştir.

İkinci uygulamada ise, her üç karşılaştırma ölçütü içinde en iyi sonucu veren cep telefonu modeli Samsung S4 cep telefonu kamerası kullanılarak Kayseri’de bulunan tarihi Sırçalı Kümbet’in 3 boyutlu fotogrametrik modellemesi gerçekleştirilmiştir. Fotogrametrik değerlendirmede, konvergent durumda çekilmiş toplam 54 resim ve 133 kontrol noktası kullanılmıştır. Her iki uygulamanın sonuçları değerlendirildiğinde günümüz cep telefonu kameralarının fotogrametrik uygulamalarda rahatlıkla kullanılabileceği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Fotogrametri, Sayısal kameralar, Cep telefonu kameraları, Kamera kalibrasyonu, Doğruluk, Presizyon.

ABSTRACT

The basic inputs of digital close range photogrammetry are digital images. Nowadays, digital images on close range digital photogrammetry works are directly obtained with digital cameras. The most commonly used types of cameras are DSLR (Digital single-lens reflex) cameras in this study field. But they are heavy and expensive, because of its lens and mirrors. Therefore, usage of these machines is limited. On the other hand, usage of mobile phones is common. Cameras of mobile phones have been developing dramatically due to technological evolution. Even, there are some mobile phones providing 41 MP camera geometric resolutions.

In this study, it is aimed to research photogrammetric works using mobile phone cameras. For this purpose two different applications are carried out. At the first application, a test area of approximately 1x1 m. having 84 points with different 3D coordinates has prepared. Using this test area, comparisons are made between six different mobile phone cameras and two different compact photograph machines. In comparison, the parameters like accuracy, precision and image coordinate corrections were used. At the result of evaluation, it has been obtained of accuracies in micron precision, captured of pictures by using mobile phone cameras approximately height of 1 m.

At the second application, 3D photogrammetric model simulated on the historical Sırcalı Kumbet in Kayseri, using the camera of Samsung S4 mobile phone, that gives the best result for all three comparison criterias. At the photogrammetric evaluation, it has been used 133 control points and 54 images those are taken convergently. At the evaluation of both of each application, it has been achieved that, modern mobile phone cameras can be used easily on photogrammetric applications.

Key words: Photogrammetry, Digital cameras, Mobile phone cameras, Camera calibration, Accuracy, Precision.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1: Fotogrametrinin matematik modeli.	4
Şekil 2.2: Resim ve piksel koordinat sistemleri.	6
Şekil 2.3: Kalın kenarlı mercekte optik izdüşüm.....	7
Şekil 2.4: Distorsiyon çeşitleri.....	9
Şekil 2.5: Distorsiyon hatası (Yaşayan, 2011).....	9
Şekil 2.6: Çapsal ve teğetsel distorsiyon.	10
Şekil 2.7: Örnekleme ve niceleme adımları (Sunar, 2011).....	11
Şekil 2.8: Arkadan Aydınlatmalı CMOS algılayıcısı.	16
Şekil 3.1: 3B cisim geometrisini yeniden oluşturma ve yöneltme elamanlarını belirleme yöntemleri (Luhmann, 2006).	18
Şekil 3.2: Stereo resim çekim konfigürasyonları.....	19
Şekil 3.3: Çoklu resim çekimi.	20
Şekil 3.4: İç yöneltme parametreleri.....	21
Şekil 3.5: Stereo resimler için yöneltme yöntemleri (Luhmann, 2006).	22
Şekil 3.6: Demet dengelemesi işlemi için veri akışı (Luhmann, 2006).....	24
Şekil 3.7: Tek resim değerlendirme yöntemleri.	28
Şekil 3.8: Stereo resim değerlendirme yöntemleri	28
Şekil 3.9: Mobil test alanı ve duvar üzerinde sabit test alanı.	30
Şekil 4.1: Test alanı.	33
Şekil 4.2: Test alanı hedefleri.	34
Şekil 4.3: Resim çekim konumları.....	34
Şekil 4.4a: Sırçalı Kümbetinin Türkiye'deki konumu.	39
Şekil 4.4b: Sırçalı Kümbetinin Kayseri'deki konumu.	39
Şekil 4.5: Sırçalı Kümbet.....	40
Şekil 4.6: Hedeflerin yapıştırılması.	41
Şekil 4.7: Lazerli total station.....	42
Şekil 4.8: Kalibrasyon kâğıdı.	43
Şekil 4.9: Resim çekim konumları.....	43
Şekil 4.10: Kamera kalibrasyon parametreleri.	44

Şekil 4.11: Resim çekim konumları.....	45
Şekil 4.12: Kontrol noktalarının tanımlanması.....	46
Şekil 4.13: Epipolar çizgi.	47
Şekil 4.14: Tel kafes model.	48
Şekil 4.15: Doku kaplaması.....	48



ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 4.1: Araştırmada kullanılan kameralara ait teknik özellikler.	32
Çizelge 4.2: Kameraların karşılaştırılması.	36
Çizelge 4.2 (devam): Kameraların karşılaştırılması.	37



1. GİRİŞ

Fotogrametri, bir cismin konum ve şekil bilgisini elde etmek için resim ölçme ve yorumlama yöntemlerini içerir. Genel olarak fotogrametrik yöntemler, ölçülecek cismin fotoğraflık olarak kayıt edilebileceği bütün durumlarda uygulanabilir. Fotogrametrik ölçmenin temel amacı, sayısal ya da grafik formda bir cismin üç boyutlu geometrisinin yeniden oluşturulmasıdır.

Fotogrametriyi aşağıdaki şekilde sınıflandırmak mümkündür;

1. Kamera konumu ve cisim mesafesi;
 - Hava fotogrametrisi
 - Yersel fotogrametri
 - Yakın resim fotogrametrisi
 - Makro fotogrametri
2. Ölü resimlerinin sayısı;
 - Tek resim fotogrametrisi
 - Stereo fotogrametri
 - Çok resim fotogrametrisi
3. Kayıt ve değerlendirme yöntemlerine göre;
 - Analog fotogrametri
 - Analitik fotogrametri
 - Sayısal fotogrametri
 - Videogrametri
 - Panorama fotogrametrisi
4. Ölçme sonuçlarının elde edildiği zamana göre;
 - Gerçek zamanlı fotogrametri
 - Off-line fotogrametri
 - On-line fotogrametri

5. Uygulama alanlarına göre;

- Mimari fotogrametri
- Mühendislik fotogrametrisi
- Endüstriyel fotogrametri
- Orman fotogrametrisi
- Çoklu ortam fotogrametrisi

Bilgisayar ortamında çalışan veri işleme sistemleri ve özellikle CCD kameralarda sağlanan gelişmeler sayesinde, yüksek doğruluk isteyen 3 boyutlu ölçme uygulamaları için sayısal yakın resim fotogrametrisi 1990'lı yıllardan günümüze değin medikal, mimari fotogrametri, mühendislik fotogrametrisi ve endüstriyel fotogrametri gibi birçok farklı uygulamada başarıyla kullanılmıştır (Yılmaztürk, 2008).

Farklı uygulamalarda kullanılmasından dolayı yakın resim fotogrametrisinin çok güçlü disiplinler arası bir karakteri vardır. Yakın resim fotogrametrisi yalnız diğer ölçme teknikleriyle yakından ilgili olmayıp aynı zamanda matematik, fizik, bilgi sistemleri ve biyoloji gibi diğer temel bilimlerle de yakından ilişkilidir.

Fotogrametrik işlemler sayısal görüntüleme sistemleri ve değerlendirmedeki gelişmelerle birlikte temelden değişmiştir. Uygun hedef işareti içeren obje noktaları ve sayısal on-line görüntü kaydıyla karmaşık fotogrametrik görevler çok kısa sürelerde gerçekleştirilebilmektedir. İşaretili noktaların tam otomatik analizi, yöneltme ve ölçme işlemleri için manuel işlemlerle yer değiştirmiştir. Yüksek derecede otomasyon, bu konuda uzman olmayan kişilerin de veri işleme ve fotogrametrik kayıt işlemlerini yapabilmesine olanak sağlar.

Sayısal sistemler, otomasyon ve kısa veri işleme süreleri sağladığından, özellikle endüstriyel ölçme ve robotik çalışmalar gibi karmaşık gerçek zamanlı fotogrametrik uygulamalar için gereklidir.

Yüksek çözünürlüklü CCD/CMOS kameraların ve dizüstü bilgisayarların yardımı ile mobil, düşük maliyetli, yüksek performanslı sayısal sistemleri gerçekleştirme potansiyeli gün geçtikçe artmaktadır. Farklı yazılım ve donanım bileşenleri arasında mobil cep telefonları farklı sebeplerle görüntü verisi elde etmek için oldukça ilginç bir bileşen olmaktadır. Bu sebepler, ucuz olmaları, hafif ve her zaman el altında olmaları ve 41 mega piksele kadar görüntü formatına sahip CMOS kameralarla entegre edilebilmeleridir.

Yapılan literatür araştırmasında cep telefonu kameralarının kullanıldığı az sayıda fotogrametrik çalışma olduğu görülmüştür. DeChant (2012) tarafından yapılan çalışmada iphone 4 marka cep telefonu kamerası ile alınan görüntüler kullanılarak bir otomobilin fotogrametrik yöntemle 3 boyutlu modeli çıkarılmıştır. Agapiou ve Georgopoulos'un (2006), Nokia 5140 ve Sony Ericsson K700i marka cep telefonu kamera görüntülerini kullanarak karşılaştırılmalı biçimde tarihi bir yapının yine fotogrametrik yöntemle 3 boyutlu modellemesini gerçekleştirmişlerdir. Gruen ve Akça (2009) tarafından yapılan çalışmada bazı cep telefonları kameralarının geometrik doğruluklarının araştırması yapılmıştır.

Günümüz cep telefonu kameralarının iç yöneltme parametrelerinin değişmezliği ve üç boyutlu cisim geometrisini yeniden oluşturma yetenekleri üzerine üretim özelliklerinin etkisi literatürde tam olarak çalışılmamıştır.

Bu çalışmada, günümüz cep telefonu kameralarının fotogrametrik uygulamalarda kullanılabilirliğinin araştırılması amaçlanmıştır. Bunun için önce cep telefonu kameralarının doğruluk potansiyellerinin belirlenmesi gerekir. Bu amaçla, ilk olarak 3 boyutlu koordinatları bilinen bir test alanı hazırlanmış ve bu test alanı kullanılarak altı farklı cep telefonu kamerasının ve iki farklı sayısal kompakt resim çekme makinasının karşılaştırmaları yapılmıştır.

Çalışmanın ikinci bölümünde söz konusu cep telefonu kamerası yardımıyla tarihi bir yapının fotogrametrik 3 boyutlu modelleme çalışmalarında kullanılabilirliğine bakılmıştır. Bu amaçla çalışma cismi olarak Kayseri İli Melikgazi İlçesi Talas yolu üzerinde yer alan Sırçalı Kümbet seçilmiştir. Kümbet, yerden 1,5 metre yükseklikte 8,5x8,5 metre boyutlarındaki kare kaidenin merkezine yerleşmiş 11 metre yüksekliğinde silindir biçimli bir yapıdadır.

Tezin bundan sonraki bölümünde fotogrametrinin temel kavramları, matematik ve optik temellerle sayısal görüntü özellikleri anlatılacak, üçüncü bölümdeyse fotogrametrik değerlendirme hakkında bilgi verilecektir.

Uygulamada gerçekleştirilen cep telefonu kameralarının doğruluk testleri ve kümbetin fotogrametrik yöntemle 3B modellenmesi işlemi dördüncü bölümde anlatılacaktır.

Son bölümde ise yapılan çalışma ile ilgili sonuç ve öneriler yer alacaktır.

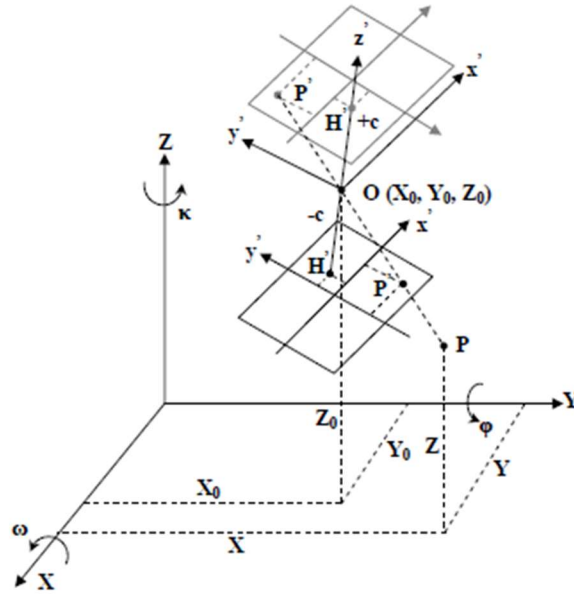
2. TEMEL KAVRAMLAR

2.1 Fotogrametrinin Matematik Modeli

Matematik model stokastik (modelin verileri ve bu nedenle de buna ilişkin kararın sonuçları hakkında çok fazla belirsizliğin olduğu matematiksel model) ve fonksiyonel modellerden oluşur. Fonksiyonel model fiziksel durumun belirleyici özelliklerini taşımaktadır. Stokastik model ise belirleyici olmayan olasılıklı özelliklerini taşımaktadır (Koçak ve Akarsu, 2002).

Cisim uzay koordinat sisteminde, var olan noktaların fiziksel oluşum esaslarının matematiksel ifadeler şeklinde gösterimi matematik modeldir. Kolinearite (eş doğrudaşlık) koşuluna göre, arazi noktası, izdüşüm merkezi ve arazi noktasına karşılık gelen resim noktası aynı doğru üzerinde olmalıdır (Şekil 2.1).

Kameranın optik sistemi tarafından görüntünün oluşturulması matematiksel olarak merkezi izdüşümle modellenir.



Şekil 2.1: Fotogrametrinin matematik modeli.

Matematiksel olarak bu koşul,

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \lambda \cdot R \begin{bmatrix} x' - x_p \\ y' - y_p \\ -c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

eşitliği ile ifade edilir. Bu eşitlikte;

X, Y, Z : P noktasının cisim uzayda koordinatları,

x', y' : P' noktasının resim koordinatları,

x_p, y_p : Ana nokta koordinatları,

c : Kamera sabiti,

R : Görüntü ve cisim uzayı koordinat sistemleri arasındaki dönüşüm matrisi,

X_0, Y_0, Z_0 : İzdüşüm merkezinin cisim uzay koordinatları,

λ : Her bir ışın için ölçek faktörü.

2.1 eşitliğinde, iç yöneltme, ana nokta koordinatları x_p, y_p ve kamera sabiti c ile tanımlanırken, dış yöneltme izdüşüm merkezinin (O) cisim uzay koordinatları (X_0, Y_0, Z_0) ve cisim koordinat sisteminden resim koordinat sistemine dönüşümü tanımlayan dönme matrisi $R(\omega, \varphi, \chi)$ ile tanımlanmıştır.

Elemanları görüntü ve cisim koordinat eksenleri arası doğrultu kosinüsleri olan 3x3'lük ortogonal dönüklük matrisi,

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \omega \cdot \cos \kappa & -\cos \varphi \cdot \sin \kappa & \sin \varphi \\ \cos \omega \cdot \sin \kappa + \sin \omega \cdot \sin \varphi \cdot \cos \kappa & \cos \omega \cdot \cos \kappa - \sin \omega \cdot \sin \varphi \cdot \sin \kappa & -\sin \omega \cdot \cos \varphi \\ \sin \omega \cdot \sin \kappa - \cos \omega \cdot \sin \varphi \cdot \cos \kappa & \sin \omega \cdot \cos \kappa + \cos \omega \cdot \sin \varphi \cdot \sin \kappa & \cos \omega \cdot \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

eşitliği ile verilir.

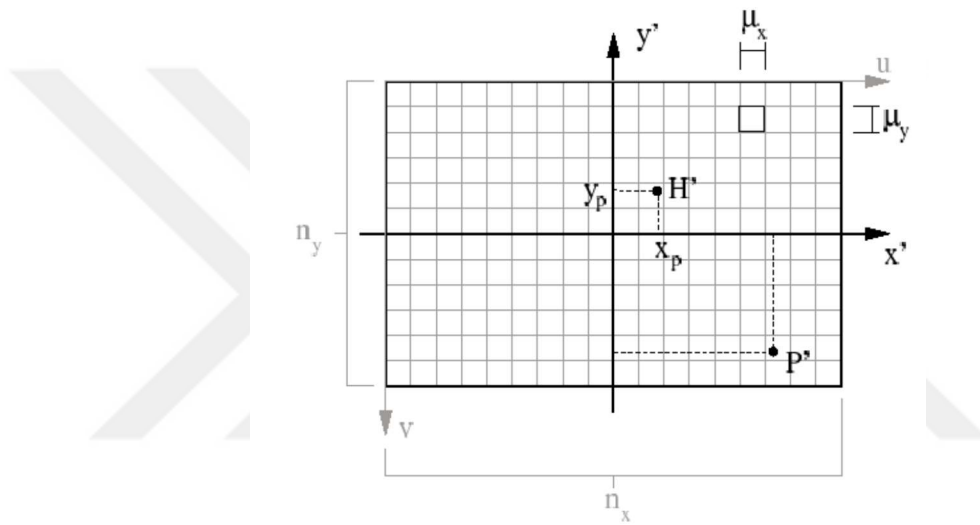
2.1 denklem sistemi fiziksel durumu tanımlayan üç eşitlik üretir. Her bir ışın için ayrı ayrı belirlenmesi gereken λ ölçek katsayısı, birinci ve ikinci eşitlikler üçüncü eşitliğe bölünerek elimine edilirse,

$$x' = x_p - c. \frac{r_{11} \cdot (X - X_0) + r_{21} \cdot (Y - Y_0) + r_{31} \cdot (Z - Z_0)}{r_{13} \cdot (X - X_0) + r_{23} \cdot (Y - Y_0) + r_{33} \cdot (Z - Z_0)} \quad (2.3a)$$

$$y' = y_p - c. \frac{r_{12.}(X - X_0) + r_{22.}(Y - Y_0) + r_{32.}(Z - Z_0)}{r_{13.}(X - X_0) + r_{23.}(Y - Y_0) + r_{33.}(Z - Z_0)} \quad (2.3b)$$

eşitlikleri elde edilir. Bu eşitlikler, kolinearite eşitliklerinin genel durumunu göstermektedir.

Sayısal fotogrametride, matematiksel modelin tanımı için son eşitlik görüntü düzlemi üzerindeki metrik koordinat sistemi ile piksel resim koordinat sistemi arasındaki dönüşümdür (Şekil 2.2). Bu bir afin dönüşüm olarak tanımlanır (Yılmaztürk, 2008).



Şekil 2.2: Resim ve piksel koordinat sistemleri.

$$x' = \left(u - \frac{\eta x}{2}\right) \cdot \mu x \quad (2.4a)$$

$$y' = \left(v - \frac{\eta y}{2}\right) \cdot \mu y \quad (2.4b)$$

Burada,

u, v : Piksel koordinatlarını,

η_x, η_y : Görüntü boyutlarını (piksel olarak),

μ_x, μ_y : Piksel boyutlarını gösterir.

2.2 Optik Temeller

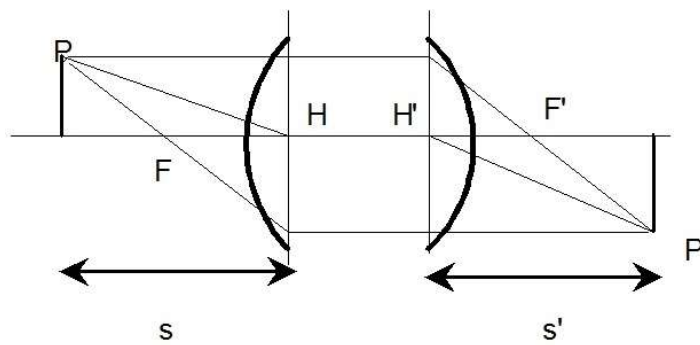
Fotogrametrik bir ölçme resmi cisim uzayının merkezi izdüşümüdür. Bu şekilde ifade edilen bir tanım fotogrametrik yöntemlerin matematiksel olarak ele alınmalarında yararlı olmaktadır. Bir ölçme resminin maddesel olarak meydana gelebilmesi için önce bir optik izdüşüm ve bu izdüşümün fotoğrafik olarak kayıt edilmesi gerekmektedir (Marangoz, 2002).

2.2.1 Optik izdüşüm

Herhangi bir P ışık noktasından çıkan ışık ışınları yolları üzerindeki bir optik düzeye sonucunda bir P' noktasında kesişecekleri biçimde yörüngelerinden saptırılacak olur ise, bu durumda P cisim noktasının P' izdüşüm noktasına optik olarak iz düşürüldüğünden söz edilebilir (Şekil 2.3). Bu izdüşüm için gerekli olan optik düzene optik sistem denilir. Mercek adı verilen optik eleman ile elde edilen optik izdüşümün temel denklemi merceğin kalınlığının ihmal edilebilir mertebede olması koşulu altında optik sistemin eksenini veya buna çok yakın bölgedeki cisim noktaları için 2.5 eşitliği oluşmaktadır.

$$\frac{1}{s'} + \frac{1}{s} = \frac{1}{f} \quad (2.5)$$

Gauss mercek denklemi olarak adlandırılan bu denklemde f merceğin odak uzaklığını göstermektedir.



Şekil 2.3: Kalın kenarlı mercekte optik izdüşüm.

2.2.2 Mercek kusurları

Bir optik matematiksel olarak merkezi izdüşüm denklemleri ile tanımlanır. Formül 2.5 mercek denkleminin kullanılma bölgesi optik eksenin yakın civarındaki noktaların

izdüşümü içindir. Merceğin kenar bölgelerine ışınlar veya büyük eğim açısı ile merceğe rastlayan ışınların verdikleri izdüşümler eksene yakın bölge için çıkartılan izdüşüm kurallarından sapma gösterirler. Bu sapmalara mercek kusurları denilir. Nedenlerine göre mercek kusurları üç gruba ayrılır;

- ❖ Eksene yakın bölgede olan ancak farklı yükseklikten merceğe gelen ışınların izdüşümündeki kusurlar;
 - ◆ Küresel aberasyon.
- ❖ Eksenin uzağında bulunan bölgelerin izdüşümünde ortaya çıkan kusurlar;
 - ◆ Koma.
 - ◆ Distorsiyon.
 - ◆ Astigmatizm.
 - ◆ Görüntü alanının eğriliği.
- ❖ Farklı dalga boyundaki ışık için;
 - ◆ Kromatik veya renksel aberasyon.

2.2.2.1 Distorsiyon

Resim çekimi esnasında resim çekme makinelerinin merceklerinin kimi fiziki özellikleri vardır. Optik izdüşüm, merceklerin fiziksel yapısı ile ilgili olarak resim düzlemine (merkezi izdüşüm düzlemi) değişik etkileri olur. Merceklerin izdüşümdeki bu fiziki oluşumlarına distorsiyon denir (Marangoz, 2002).

Distorsiyon, ölçme işlerindeki en önemli hata kaynağıdır. Diğer hata kaynaklarıysa optik sistem ile iz düşürülen görüntünün kalitesini etkilemektedir. Distorsiyonsa görüntünün yer değiştirmesine sebep olur ki, bu yer değiştirmenin belirli bir değeri aşması sonucunda prezisyonlu ölçüm yapma olanağı ortadan kalkar. Distorsiyon sebebiyle resim düzleminde ölçek değişimi ortaya çıkar. Bu değişim iki biçimde olur. Ölçek izdüşüm düzleminin kenarlarına doğru artar. Bu durumda pozitif bir distorsiyondan söz edilir ve bir kare biçimindeki cismin izdüşümü yastık biçiminde olur. Eğer izdüşüm ölçeği kenara doğru azalacak olursa, distorsiyon negatif olur aynı kare biçimindeki cismin izdüşümü fıçı şekline dönüşür (Şekil 2.4).

bağıntısına da *resim fonksiyonu* denilir. Teorik ve teknik sebeplerden ötürü distorsiyonsuz objektiflerin üretimi mümkün değildir. Lakin distorsiyon değeri kabul edilebilir bir değerin altında tutulabilir. Bundan dolayı gerçek fiziksel izdüşümün resim fonksiyonu $r' = f(\tau)$ ile teorik resim fonksiyonu ile teorik resim fonksiyonu $r = c \cdot \tan(\tau)$ arasındaki fark distorsiyon nedeni ile doğan Δr sapmasıdır. Bu sapma;

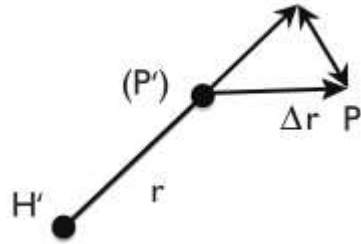
$$\Delta r = r' - r = f(\tau) - c \cdot \tan(\tau) \quad (2.6a)$$

biçiminde olup distorsiyonun sayısal değeridir. Bu durumda gerçek izdüşüm için resim fonksiyonu;

$$r' = r + \Delta r = c \cdot (\tan(\tau)) + \Delta r \quad (2.6b)$$

biçiminde olur.

Şekil 2.6'da (P') ve P' noktasını birleştiren Δr doğru parçası, vektörel hata; çap ve teğet yönünde iki bileşene ayrılır. Bunlardan çap yönünde (r yönünde) olan bileşene çapsal (radyal) distorsiyon, diğerine de teğetsel distorsiyon denir.



Şekil 2.6: Çapsal ve teğetsel distorsiyon.

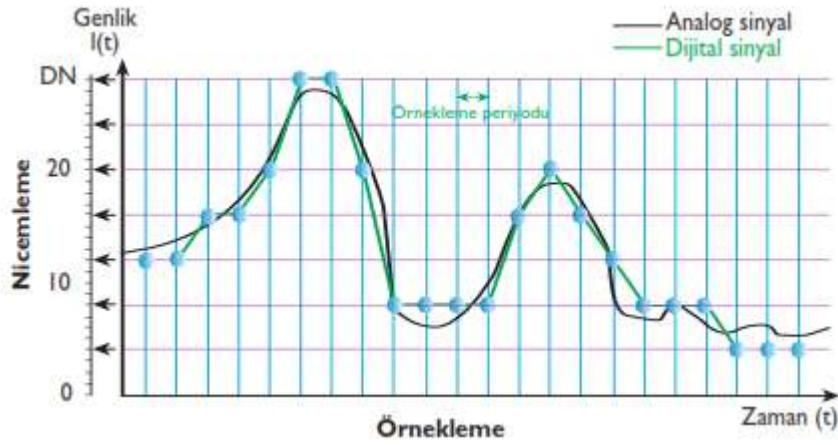
2.3 Sayısal Görüntü Özellikleri

2.3.1 Sayısal görüntü

Genel anlamda, bir görüntü, üç boyutlu gerçek fiziksel uzayın iki boyutlu bir gösterimidir. İnsan görme sistemi bir görüntü girdi verisini mekânsal olarak dağılmış ışık enerjisinin toplamı olarak algılar. Bu şekildeki algılama optik görüntü olarak adlandırılır. Alışılğelen analog resimler, sürekli bir $f(x,y)$ fonksiyonu ile ifade edilirler. $f(x,y)$ fonksiyonunun değeri, x,y mekânsal değişkenlerle belirtilen konumdaki yoğunluğu (genliği) ifade etmektedir. Sürekli bir fonksiyona sahip analog

bir görüntü mekânsal değişkenlerine ve genliğe göre ayırık hale getirilirse sonuçta oluşan ayırık $f(x,y)$ fonksiyonu sayısal görüntü olarak adlandırılır (Sunar, 2011).

Analog bir görüntünün sayısal görüntüye dönüştürülmesi ya da "Sayısallaştırma" olarak da adlandırılan bu işlem, örnekleme (sampling) ve niceleme (quantization - genliğin ayırıklaştırılması) adımlarından oluşur. Örnekleme sürekli görüntü fonksiyonundan (parlaklık) sayısal eşdeğerine belirli noktalarda yapılan bir geçiştir (Şekil 2.7).



Şekil 2.7: Örnekleme ve niceleme adımları (Sunar, 2011).

Bu örnekleme noktalarının düzlemde sıralanmasıyla oluşan geometrik ilişki grid olarak tanımlanır. Gridi oluşturan her bir örnekleme noktası piksel olarak adlandırılan bir resim elemanına karşılık gelir. Diğer bir ifade ile örnekleme işlemiyle sayısal bir görüntünün en küçük birimi olan pikseller elde edilirken niceleme işlemiyle gri yoğunluk değerleri elde edilmektedir (Sunar, 2011).

Bir pikselin bir veri dosyasında veya görüntüdeki konumu bir koordinat sistemi ile gösterilir. İki boyutlu koordinat sisteminde, satır ve sütundan $(N \times M)$ oluşan grid sistemi ile belirtilen her bir piksel konumunun 2 koordinat değeri (u,v) vardır.

Sayısal bir görüntü, elemanları, uzaydaki x,y konumlarına karşılık gelen noktaların $f(x,y)$ parlaklık değerlerini içeren bir matristir.

Sayısal görüntü;

$$f(x,y) = \begin{bmatrix} f(0,0) & f(0,1) & \dots & f(0,M-1) \\ f(1,0) & f(1,1) & \dots & f(1,M-1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ f(N-1,0) & f(N-1,1) & \dots & f(N-1,M-1) \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

olarak ifade edilir.

N, M = görüntü büyüklüğünü (toplam satır sayısı x toplam sütun sayısı) gösterir.

Genel olarak sayısal görüntüler aşağıda belirtilen dört farklı grupta sınıflandırılabilir;

1. İkili (Binari) görüntü: en basit görüntü çeşidi olup sadece 0 veya 1 olmak üzere 2 değer (siyah ve beyaz) alırlar.
2. Gri renk seviyeli görüntü: monokrom veya tek renkli görüntülerdir. Renk bilgisi içermeyip sadece parlaklık bilgisi içerirler.
3. Renkli görüntü: renk, cisimlerin farklı dalga boyuna sahip elektromanyetik dalgaları farklı şekilde yansıma özellikleri (parlaklık değeri) ile ilişkilidir. Doğal renkli görüntü, elektromanyetik spektrumun kırmızı, yeşil ve mavi bölgelerinden alınmış sayısal görüntülerin bilgisayar ekranında RGB katmanlarında görüntülenmesi ile elde edilir.
4. Çok spektrumlu görüntü: görünür bölgenin dışındaki bölgelerden alınan ve yanlış renkli görüntü olarak da adlandırılan görüntülerdir. (Sunar, 2011)

Bir pikselin radyometrik ve geometrik olmak üzere iki temel özelliği söz konusudur. Radyometrik özelliği, pikselin algılandığı elektromanyetik spektrumdaki gri değeri ile tanımlanır. Geometrik özelliği ise görüntü matrisinde sahip olduğu matris koordinatları ile tanımlanır. Bu özellikler görüntülerin elde edilmesinde kullanılan sistemin özelliklerine bağlı olarak değişir.

2.3.1.1 Geometrik (konumsal) çözünürlük

Yeryüzündeki komşu objeleri ayırt etme yeteneği olan çözünürlüktür. Konumsal çözünürlük, algılayıcının tasarımına ve objeden uzaklığına ilişkin bir fonksiyondur ve görüntünün mekânsal detay derecesini gösterir. Konumsal çözünürlük uzunluk ölçüsü birimleri ile ifade edilir. Konumsal çözünürlüğün küçülmesi nesnelerin daha ayrıntılı olarak görünmesini sağlar. Kısaca konumsal çözünürlük, görüntüyü oluşturan piksellerin boyutlarıdır. Konumsal çözünürlüğü de kendi arasında düşük çözünürlüklü görüntüler, orta çözünürlüklü görüntüler ve yüksek çözünürlüklü görüntüler olmak üzere üçe ayırmak mümkündür.

2.3.1.2 Radyometrik çözünürlük

Elektromanyetik enerji miktarında sahip olunan hassasiyet radyometrik çözünürlüğü gösterir. Başka bir ifadeyle, bir görüntüleme sisteminin radyometrik çözünürlüğü, enerji farklılıklarını ayırt edebilme yeteneğini gösterir. Buradaki enerji farklılıkları, ayırt edilmesi mümkün olan gri tonu sayısına denk gelir. Radyometrik çözünürlük, bilgisayar ortamında ve ikili sayı sistemi veya bit cinsinden tanımlanır. 8 bitten oluşan ve bir bayt adı verilen radyometrik çözünürlük gösterimi, 0 ile 255 arasında değişen 256 farklı parlaklık düzeyinin sayısal ortamda yer almasını sağlamaktadır. Radyometrik çözünürlüğün artması o oranda görüntü yorumlamasını kolaylaştırmaktadır.

2.3.2 Sayısal görüntü elde etme

Sayısal görüntü doğrudan sayısal kameralar ile elde edilebileceği gibi analog görüntülerin taranması suretiyle de elde edilebilir. Sayısal kameralar, odaklayıcı mercek, diyafram ve deklanşör ikilisi ile film yerine yarı iletken ışık algılayıcı bir elektronik devre elemanı yardımı ile sayısal görüntüyü oluşturur. Filmde ışığı algılamak için kullanılan gümüş tuzları yerine CCD (Charge Coupled Device) veya CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) algılayıcılar kullanılmaktadır. Bu algılayıcıların yüzeyinde çok sayıda ışığa duyarlı fotodiyotlar mevcuttur. Bunlar pikselleri oluşturur.

CCD'ler, ışık demetlerini ışığa duyarlı fotodiyotlar üzerine yönlendiren mikro merceklerle sahiptir. Bu merceklerin işlevi ışığı odaklamak değil, fotodiyotların üzerine doğru yönlendirerek aralarındaki boşluğa düşmelerini engellemektir. Mercekler aracılığı ile yönlendirilen ışık daha sonra bir kızılötesi filtre ile karşılaşır. Algılayıcıdaki ışığa duyarlı fotodiyotlar sadece gözle görebildiğimiz ışığa değil, göremediğimiz kızılötesi dalga boylarına karşıda da oldukça duyarlıdır. Algılayıcılardaki bu filtreler kızılötesi ışığı filtreleyerek resme zarar vermesini engeller. CCD'lerde hücrelerin ışığa duyarlı yüzeyleri oldukça geniştir ve genellikle hücrenin %95'ini kaplar. Bu CCD'leri ışığı yakalama konusunda etkili kılar (Göksel, 2010).

Pozlanma süresince fotonlar CCD hücrelerine dolmaya başlar. Hücreye dolan foton sayısı bir alt eşiği geçtikten sonra bu hücrede görüntünün bir pikseli oluşmaya başlar. Eğer eşiğin altında foton toplanırsa hücre siyah olur. Hücre tamamen fotonlarla

dolduğunda piksel beyaz olur. Aradaki tüm değerler pikselin grinin tonları olmasına neden olur. Eğer bir hücreye çok fazla foton dolarsa bu fotonlar dışarı taşar ve etraftaki hücrelere dolar, bu durumun sebep olduğu istenmeyen parlama etkisi "blooming" olarak adlandırılır.

CCD'deki bu hücreler ışığa duyarlı fotodiyotları aracılığı ile toplanan foton miktarı ile doğru orantılı elektriksel bir yük üretir. Bu zayıf bir analog sinyaldir ve güçlendirildikten sonra sayısal bir veriye dönüştürülmesi amacıyla sırayla analog/sayısal bir çeviriciye gönderilir. Dönüştürücüden çıkan sayısal bilgiler, görüntü işleme birimine aktarılır. Bu birim, renk ve çözünürlük hesaplamalarını yaptıktan sonra görüntüyü sayısal olarak sıkıştırıp bellek birimine yollar. Diğer bir deyişle elektriksel yük transfer edilerek kaydedilir ve radyometrik yoğunluk değerine dönüştürülür. Bu sayede bir kare resim çekilmiş olur.

Silikon tabanlı CCD'ler kırmızı (R), yeşil (G) ve mavinin (B) miktarlarını belirleme yeteneğine sahip değildirler. Bu nedenle tek renkli görüntüler üretirler. Görüntüde verilen renk bilgisinin çıkartılmasında farklı teknikler kullanılır. Yöntemlerden birinde, üç CCD kullanılır. Her bir CCD'nin üzerinde ayrı bir renk filtresi vardır. Bu nedenle temel renk bileşenleri ayrı ayrı algılanır.

Diğer başka yöntemde ise tek CCD kullanılır. Renk ayrımı CCD önüne yerleştirilen Bayer Filtresi gibi RGB (Kırmızı, Yeşil, Mavi) renk filtreleri yardımıyla yapılır. Adını mucidi olan Bryce E. Bayer'den alan Bayer Filtresi fotodiyotların üzerinde yer alan kırmızı, yeşil ve mavi renklerdeki filtrelerin belirli bir düzen içerisinde dizilmesiyle oluşur. Bu dizideki yeşil filtrelerin sayısı mavi ve kırmızı filtrelerin sayıların toplamına eşittir. Fotodiyotlar renkleri algılayamaz ama bir Bayer Filtresi sayesinde hangi fotodiyotun hangi renkteki ışığı ölçtüğü belirlenebilir. Bu görüntüyü oluşturmak için ihtiyaç duyulan bilginin üçte ikisinin eksik olduğu anlamına gelir. Bayer enterpolasyonu olarak bilinen bir yöntem sayesinde her pikselde eksik olan iki renge ait bilgi, komşu piksellerden elde edilen veriler doğrultusunda tahmin edilerek oluşturulur ve her pikselin bir RGB renk değerine sahip olması sağlanır (Göksel, 2010).

CMOS'larda CCD'lerde olduğu gibi mikro lensler ışığı, içerisinde fotodiyotların olduğu hücrelere yönlendirir. CMOS'larda CCD'lerde bulunmayan elektronik devre elemanları da yer alır ve bunun bir sonucu olarak ışığa duyarlı yüzeyler CCD'lerde olduğu kadar geniş değildir. Bazı CMOS algılayıcılarda hücre içindeki ışığa duyarlı

yüzey hücrenin ancak %50'si kadardır. CMOS'larda da fotonlar aynı şekilde hücrelere dolar ve ışık bir elektrik akımına çevrilir. CMOS'ların en önemli özelliği ışığın oluşturduğu elektrik akımlarının hücre içerisinde sayısal verilere dönüştürülmesidir.

CMOS algılayıcılar görüntüyü işlemede çok daha etkindir çünkü analog/sayısal dönüşüm tüm hücrelerin içinde aynı anda gerçekleşir. Bu CMOS'ların daha hızlı olmasını ve daha az enerji tüketmelerini sağlar. Art arda hızlı çekimlerin yapılması gereken durumlarda CMOS algılayıcı kullanan makineler tercih edilir. CMOS'ların yapısı RAM'ler gibi standart mikroçiplerin yapısına benzediğinden benzer olanaklarla ve üretim hatlarında üretilebilirler. CCD'lerin özel üretim koşulları gerektirmesi CMOS'lara üretim maliyeti açısından da bir avantaj kazandırır. Diğer yandan ışığa duyarlı yüzeylerinin küçük oluşu, bu tür algılayıcıların ışığa olan duyarlılıklarını azaltır ve yüksek kaliteli resimler oluşturmalarını engeller (Göksel, 2010).

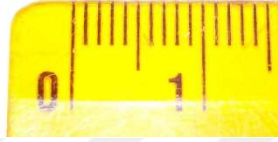
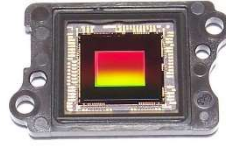
2.3.2.1 Cep telefonu kameraları

Cep telefonu kameraları çoğu karmaşık sistemler gibi birleşen ve olanak sağlayan teknolojilerin bir sonucudur. Gündelik hayatımızın vazgeçilmezleri arasında yer alan cep telefonları, yapabildikleri birçok şey yanında görüntüleme işlevini de yerine getirir. Çoğu cep telefonu kamerası video çekimi de yapabilmektedir.

Çoğu cep telefonu kamerası dijital kameralara göre oldukça basittir. Sabit odaklı mercekler ve oldukça küçük boyutlarda görüntü algılayıcıları, zayıf aydınlatma şartlarında cep telefonu kameralarının performanslarını özellikle görüntü kalitelerini düşürür. Ayrıca çok küçük yapıları içine, etkin hareket detektörleri ve güçlü motorlar yerleştirmedeki zorluk nedeniyle otomatik netleme hızları oldukça düşüktür. Dahası, çok yoğun rekabet ve maliyet kaygısı nedeniyle hızlı bir işlemci ve yeterli bir tampon bellekten yoksundur. Bu nedenle çekilen resmin kaydedilmesi aşamasında da yeterince hızlı değildir (İkizler, 2011).

Çoğu cep telefonu kamerasında genellikle köşegen uzunlukları 1/2.5", 1/1.8", 1/1.6" ve 2/3" olan algılayıcılar kullanılmaktadır. 2012 yılında üretilen Nokia 808 PureView model cep telefonu kamerası, 41 mp çözünürlük ve 1/1.2" (10.67x8.00 mm) algılayıcı boyutuyla kompakt kameraları dahi geçmiştir. Söz konusu model, cep telefon kameraları arasında en yüksek çözünürlük ve en büyük algılayıcı boyutuna sahip cep telefonu kamera modeli olarak bilinmektedir.

Bazı cep telefonu kameraları, CCD tipi kameralarla karşılaştırıldığında büyük ölçüde güç tüketimini düşürdüğü için CMOS algılayıcılar kullanmaktaydı. Artık günümüz cep telefonu kameraları, CCD ve CMOS algılayıcılara göre daha pahalı olan ve CMOS algılayıcıya göre daha az güç tüketen Arkadan Aydınlatmalı CMOS algılayıcıları (BackSide Illumination CMOS sensor) kullanmaktadır (Şekil 2.8). Bu teknolojiye, algılayıcının arkasından özel bir aydınlatma yapılmakta ve her bir pikselin ışık toplama kapasitesi yüzde 200 dolayında arttırılmaktadır (URL-1).



Şekil 2.8: Arkadan Aydınlatmalı CMOS algılayıcısı.

Görüntüler genellikle, RAW özelliği ve Android 5.0 Lollipop işletim sistemine sahip bazı üst düzey kameralı cep telefonları hariç, JPEG dosya biçiminde kaydedilir. Kablosuz altyapıları yardımıyla görüntü verisini paylaşabilirler. Birçok cep telefonu kamera modelinde performanslarını geliştirmek için harici flaş da kullanılabilmektedir (URL-1).

Son zamanlarda üretilen cep telefonu kameralarında JPEG formatında sıkıştırılmadan önce görüntüye distorsiyon ve farklı optik aberasyon düzeltmeleri de uygulanabilmektedir. Çoğu kamera modeli dijital yakınlaştırma özelliğine sahiptir. Birkaç kamera modelinde optik yakınlaştırma da mevcuttur.

Cep telefonlarının büyük bir bölümü “microSD” olarak bilinen bellek kartlarını kullanabilmektedir. Bu kartların bellek kapasiteleri, bunlara yüklenebilecek görüntü ve video görüntülerinin miktarını da belirlemektedir. Büyük kapasiteli bir bellek kartı, yeni görüntülerle birlikte daha önce çekilmiş olan görüntülerin de el altında bulunmasını sağlar.

3. FOTOGRAMETRİK DEĞERLENDİRME

Pratik kullanımdaki önemleri nedeniyle analitik hesaplama yöntemleri resim sayısına göre sınıflandırılır. İç ve dış yöneltme parametreleri tarafından kurulan resim bilgisi ve cisim geometrisi arasındaki ilişki bütün yöntemler için ortaktır. Yöntemler genellikle aşağıdaki biçimde olabilir;

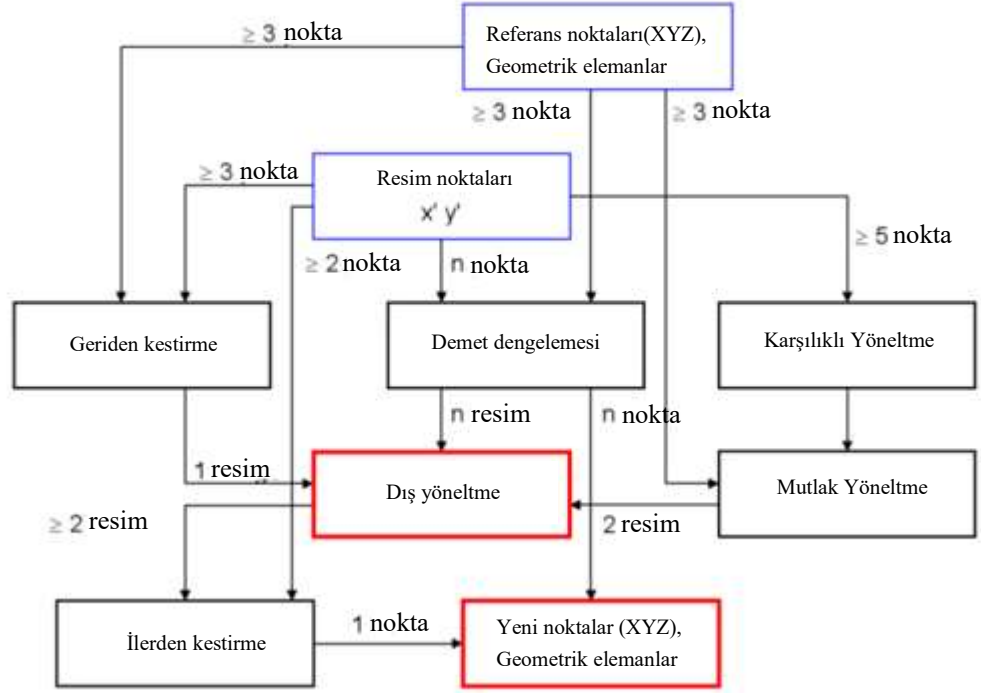
- Cisim bilgisi sağlama (referans noktaları, mesafeler, geometrik elemanlar),
- Yöneltme için resim noktalarının ölçülmesi,
- Yöneltme parametrelerinin hesabı,
- Yöneltilmiş resimlerden 3B cisim geometrisini yeniden oluşturma (yeni noktalar, geometrik elemanlar).

Yöntem ve uygulamaya bağlı olarak bu işlemler ya ardışık biçimde eş zamanlı olarak ya da işlem aşamaları sırasında iteratif olarak uygulanır.

Şekil 3.1’de üç boyutlu cisim geometrisini (yeni noktalar, geometrik elemanlar) yeniden oluşturma ve yöneltme elemanlarını (yalnız dış) belirleme yöntemlerini göstermektedir. Her iki prosedür de ölçülmüş resim koordinatları ve bilinen cisim bilgisine dayanır. Cisim geometrisini oluşturmak için gerekli olan 3B nokta belirleme, dış yöneltme parametreleri olmadan gerçekleştirilemez.

Eğer yöneltme verisi ve referans noktalarının koordinatları ya da ölçülmüş cisim noktaları mevcutsa aşağıdaki yöntemlerden biri ya da daha fazlası birlikte kullanılarak cisim geometrisi elde edilebilir;

- Nokta ve geometrik elemanların sayısal üretimi: Ek cisim koordinatları ve geometrik elemanların belirlenmesi için yöneltmesi bilinen resimlerin kullanımı, örneğin uzaysal ileriden kestirme.
- Grafikselle olarak cisim geometrisini yeniden oluşturma: Harita, çizimler ya da CAD modelleri üretmek için grafikselle ve geometrik bilginin çıkartılması.
- Rektifikasyon ya da ortofoto: farklı projeksiyonlar kullanılarak ölçme görüntüsünün görüntü tabanlı ürünlere dönüşümü.



Şekil 3.1: 3B cisim geometrisini yeniden oluşturma ve yöneltme elemanlarını belirleme yöntemleri (Luhmann, 2006).

3.1 Resim Çekimi

Fotogramtride görüntüleme (resim çekim) konfigürasyonları, cisim ölçmesi için bakış doğrultuları ve kamera istasyonlarının düzenlemesidir. Fotogramtride görüntüleme konfigürasyonları genellikle aşağıdaki biçimde sınıflandırılır;

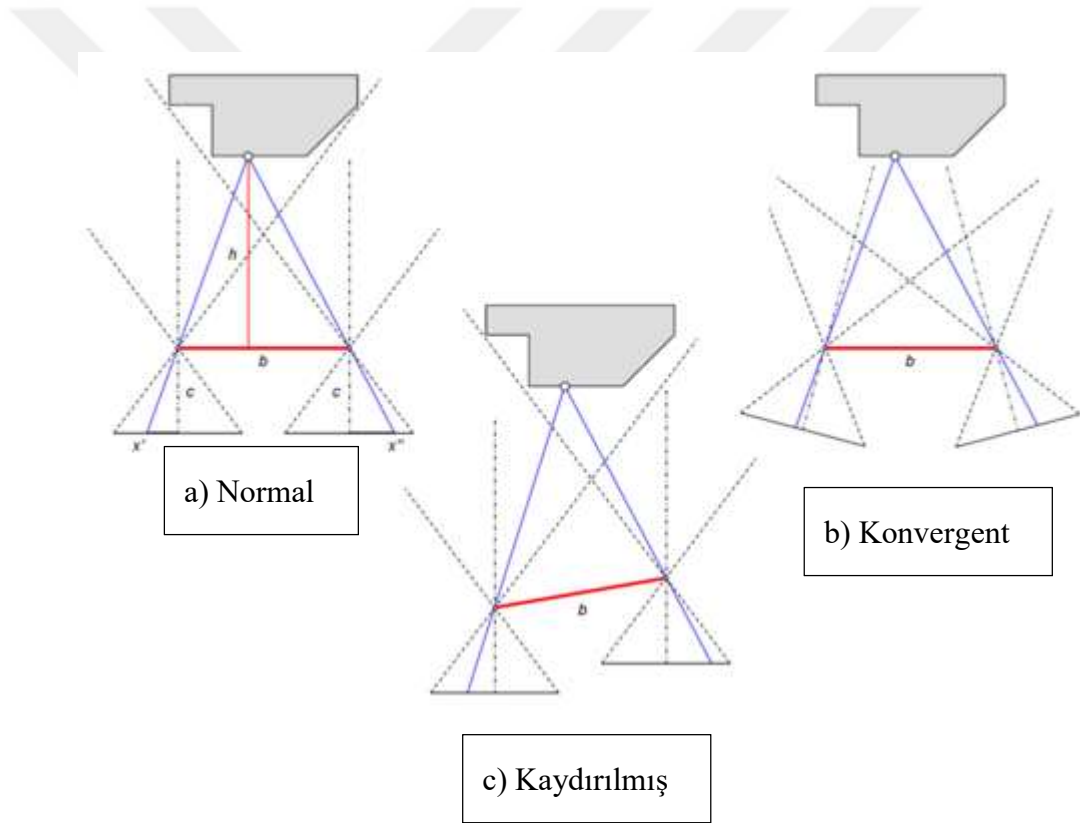
- Tek resim çekimi,
- Stereo resim çekimi,
- Çoklu resim çekimi.

3.1.1 Tek resim çekimi

Bir cismin 3 boyutlu olarak tek bir resimden elde edilmesi eğer cisim hakkında ek geometrik bilgi varsa mümkündür. Tek resim değerlendirmesi genellikle rektifikasyon, ortofoto ve düzlem cisim ölçmeleri için uygulanır. Cisim ölçmesinin elde edilebilir doğruluğu, temel olarak resim ölçeğine ve resim üzerinde ölçülecek detayları ayırt etme yeteneğine bağlıdır (Luhmann, 2006).

3.1.2 Stereo resim çekimi

Stereo görüntüleme, üç boyutlu cisim bilgisini elde etmek için minimum konfigürasyonu gösterir. Genellikle görme yolu ile ya da otomatik stereoskopik değerlendirme işlemi kullanılacaksa uygundur. İnsan görme sistemi yalnız sınırlı bir konvergent açısı altında rahatça görüntüleri işleyebileceği için neredeyse görme yolu ile işleme, normal duruma benzer paralel kamera eksenleri gerektirir (Şekil 3.2a). Sayısal stereo görüntü işleme için (Stereo görüntü eşleme) insan görmesinin önkoşulları, daha konvergent resim çiftlerinin elde edilebildiği durumlarda ihmal edilebilir (Şekil 3.2b). Kaydırılmış kamera pozisyonları paralel bakış doğrultuları sağlar fakat her görüntüde (Şekil 3.2c) ölçek farklı olur (Luhmann, 2006).



Şekil 3.2: Stereo resim çekim konfigürasyonları.

En basit durumda, resim çiftleri kullanılarak üç boyutlu olarak cisim yeniden oluşturma, bakış doğrultusundaki h mesafesine direkt olarak dönüştürülebilir resim paralaksının $px' = x' - x''$ ölçümüne dayanır (Şekil 3.2a). Daha genel olarak, eşlenik resim noktalarının resim koordinatları $(x'y', x''y'')$, uzaysal ileriden kestirmeyle 3B koordinatları hesaplamak için ölçülür. Bakış doğrultusunda hesaplanan cisim

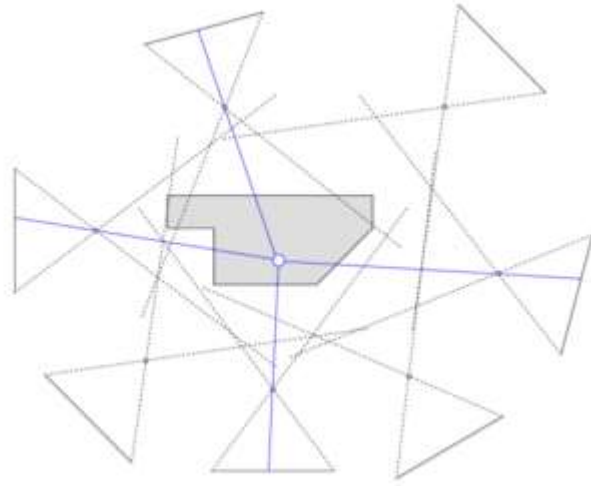
koordinatlarının doğruluğu resim düzlemine paralel olan koordinat bileşenlerinden farklıdır. Doğruluktaki fark, baz-yükseklik oranı olarak tanımlanan, eşlenik resim ışınları arasındaki kesişim açısının bir fonksiyonudur.

3.1.3 Çoklu resim çekimi

Çoklu resim çekim konfigürasyonunda (Şekil 3.3) kamera istasyonlarının seçimi ve bakış doğrultularıyla ilgili bir kısıtlama yoktur. Temel olarak cisim, cisim uzayında ışın demetinin yeterli kesişim açılarını sağlamak için seçilen konumlardan sınırsız sayıda resim yoluyla elde edilir. Farklı konumlardan alınan en az iki resim, üç boyutta koordinatlandırılacak her bir cisim noktasını kayıt etmelidir.

Cisim koordinatları çoklu resim triyângülasyonu ile belirlenir. Eğer yeterli sayıda ve konfigürasyonda resim ışınları (en az cisim noktası başına 3-4 resim) sağlanmışsa, bütün koordinatlarda aynı cisim doğrulukları elde edilebilir (Luhmann, 2006).

Yakın resim fotogrametrisinde çoklu resim konfigürasyonu en genel durumdur. Cisim yapısı nedeniyle çok sayıda bakış konumlarının gerekli olduğu ya da özel doğruluk taleplerinin sağlanması gereken bütün durumlarda uygulanır.

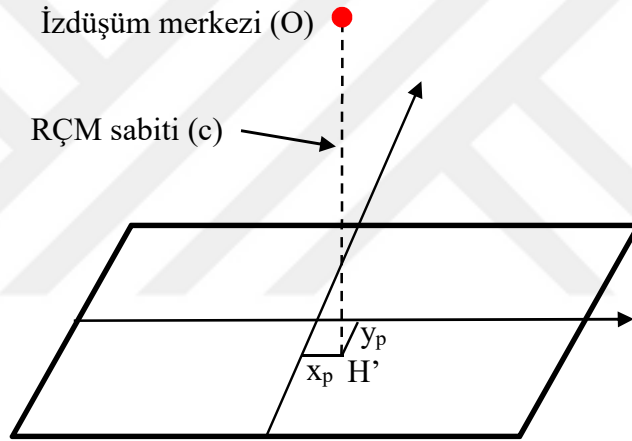


Şekil 3.3: Çoklu resim çekimi.

3.2 Resimlerin Yöneltilmesi

3.2.1 İç yöneltilme

Bir ölçme resmi izdüşüm merkezinin resim ana noktasına c kadar uzaklıkta bulunduğu tam bir merkezi izdüşüm olarak tanımlanır. Bu basitleştirilmiş matematik modelin elemanları olan c RÇM sabiti ve ana noktanın resim koordinat sistemindeki koordinatları x_p , y_p iç yöneltilmenin elemanları olarak kabul edilirler (Şekil 3.4). Ancak bu ideal durum tam gerçeği yansıtmaz. Optik sistemden, kameranın yapısından ve resimden gelen hatalar yüksek doğruluk taleplerinde göz önüne alınırlar. Distorsiyon bunlardan en önemli olanıdır. Daha kapsamlı bir biçimde bu tanım ele alınırsa bir resmin iç yöneltilmesi izdüşüm merkezinden cisim uzayındaki noktalara yayılan ışın demetinin biçimini tanımlar.



Şekil 3.4: İç yöneltilme parametreleri.

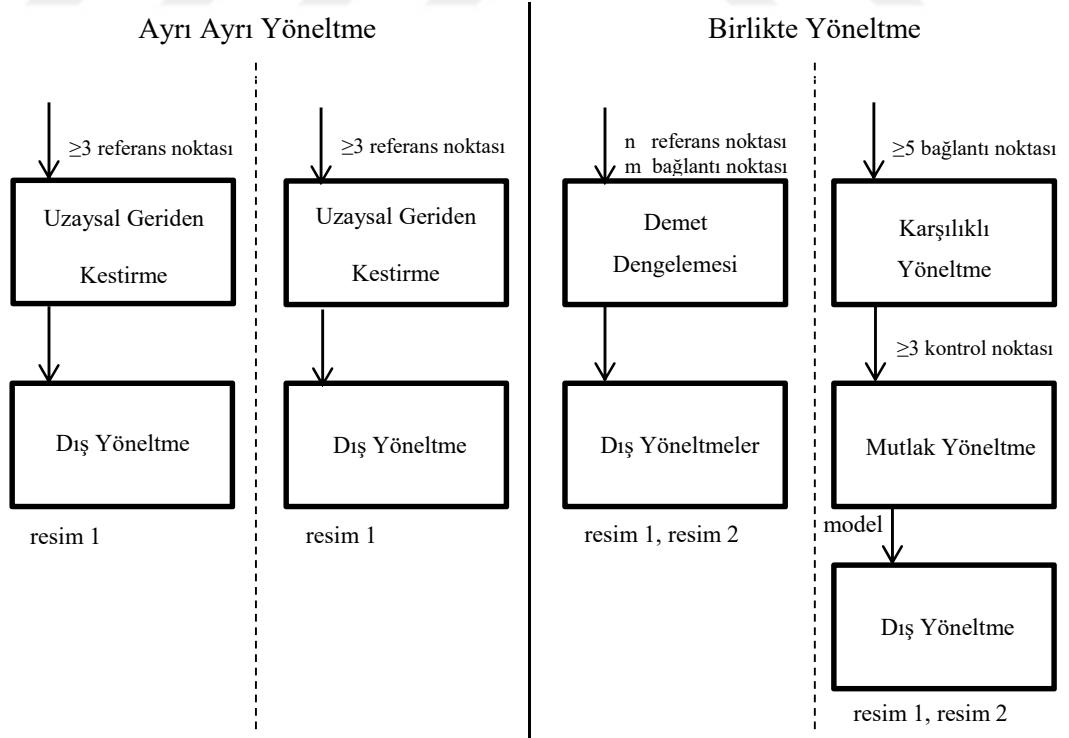
İç yöneltilme izdüşüm merkezine resim noktalarının konumunu esas alarak cisim uzayındaki ışınların arasındaki açısal bağıntıyı ifade eder. Böylece resim koordinat sistemine göre izdüşüm merkezinin konumu, iç yöneltilmenin geometrik elemanlarına karşılık gelir. Bunlara ek olarak mercek distorsiyonu da iç yöneltilmenin elemanlarından sayılabilir. Ancak mercek distorsiyonu gerektiği zaman hesap yoluyla elimine edilebilir. Analitik fotogrametride iç yöneltilme elemanlarının bilinmesi durumunda, bunlar sabit değer veya ölçme değeri olarak kabul edilirler, bilinmemeleri durumunda bilinmeyen değerler olarak dengeleme hesabına kapsatılırlar.

3.2.2 Dış yöneltme

Bir ışın demetinin cisim uzaydaki konumu, 3 konumsal öteleme ve 3 açısal dönüklük değerinin bilinmesiyle mümkündür. Bu değerler izdüşüm merkezinin cisim koordinat sistemindeki karşılığı olan X_0 , Y_0 ve Z_0 koordinatlarıyla cisim ve resim koordinat sistemleri arasındaki açısal bağıntıyı veren 3 dönüklük açısı ω , ϕ ve κ 'dan oluşur. Bu 6 elemana *dış yöneltme elemanları* denir.

3 boyutlu cisim geometrisinin yeniden oluşturulması için cismi içeren bindirmeli çekilmiş en az iki resim gerekir. Dolayısıyla bir çift ölçme resmi için toplamda 12 dış yöneltme parametresi bulunur. Stereo çiftin yöneltmesi için bu 12 dış yöneltme elemanının belirlenmesi gerekir. Resim çiftlerinin yöneltmesi ayrı ayrı yöneltme ya da birlikte yöneltme biçiminde olabilir (Şekil 3.5).

Ayrı ayrı yöneltme yaklaşımında bu görev uzaysal geriden kestirmeyle her bir resim için yerine getirilebilir. Fakat bu çözüm her resim için referans noktaları gerektirir. Her resim için aynı ya da farklı referans noktaları kullanılabilir. Bu yöntemde, stereo modeli oluşturan iki resim arasındaki geometrik ilişki kullanılmaz.



Şekil 3.5: Stereo resimler için yöneltme yöntemleri (Luhmann, 2006).

Birlikte yöneltme yönteminde stereo çiftin dış yöneltme elemanları iki şekilde çözülebilir. Tek adımlı çözümde demet dengelemesi yöntemi kullanılır. Her iki resim için yöneltme elemanları, referans ve bağlantı noktalarının resim koordinatları kullanılarak tek adımda eş zamanlı olarak çözülür.

Diğer çözüm yöntemi ise iki işlem adımında gerçekleştirilir. Bu işlem adımlarına *karşılıklı* ve *mutlak yöneltme* denir.

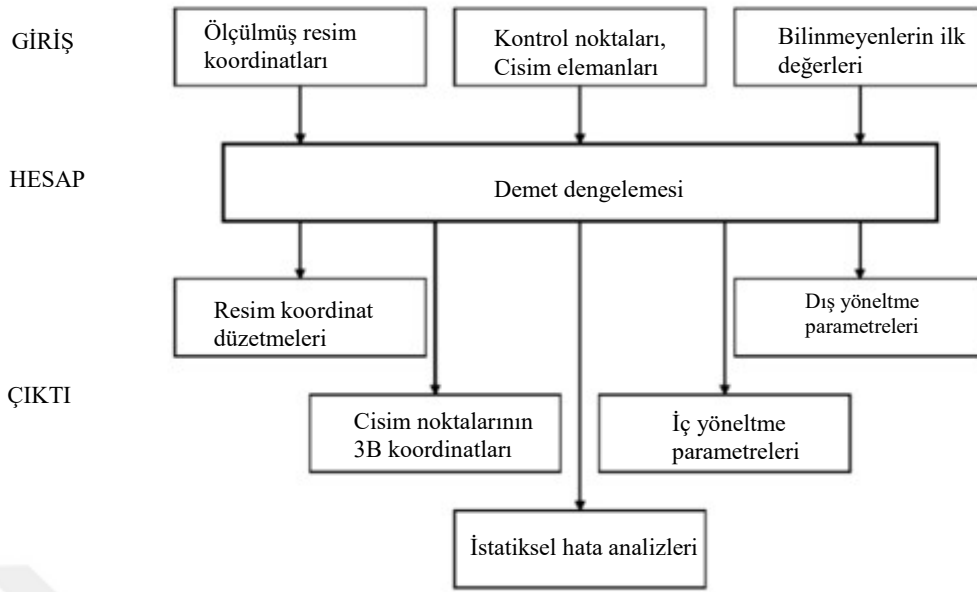
Karşılıklı yöneltme ile her 2 resimden elde edilen ışın demetleri resim çekim anındaki konumlarına getirilir. Bu aşamada resim kapsamı içinde bulunan bilgilere dayanarak her iki resimdeki eşlenik ışın çiftinin kesiştirilmesi sağlanır. Karşılıklı yöneltme sonucunda bir uzay model elde edilir. Bu uzay modelinin ölçeği, konumu ve yöneltmesi belirsizdir.

Mutlak yöneltme ile modelin cisim koordinat sistemi ile ilişkisi kurulur. Burada amaç referans noktaları kullanılarak stereo modelin döndürülmesi, ötelenmesi ve ölçeklendirilmesidir. Klasik fotogrametride 7 bilinmeyen bu aşamada uzay benzerlik dönüşümü ile çözülür.

Mutlak yöneltme parametrelerinin çözümlenebilmesi için cisim (arazi) ve model koordinatları arasında en az 7 denklem oluşturulmalıdır. Bu denklemlerin kurulmasında cisim uzayında koordinatları bilinen ful kontrol noktası, planimetrik nokta ya da yükseklik noktası biçiminde olabilecek referans noktaları kullanılır.

3.3 Ek Parametrelerle Demet Dengelemesi

Resim koordinatları ve ilgili izdüşüm merkezleri birer uzaysal ışın demeti tanımlar. Demet dengelemesiyle tüm resimler için tüm ışın destelerinin dış yöneltme elemanları, bağlantı noktalarının 3B koordinatları ve ek model parametreleriyle birlikte doğruluk ve güvenilirlikle ilgili istatistiksel bilgi eş zamanlı olarak hesaplanır. Bu işlemdeki ilk veriler, kontrol noktalarının resim ve cisim koordinatları ile birlikte bağlantı noktalarının resim koordinatlarından oluşur. Şekil 3.6 demet dengelemesi işlemi için temel veri akışını göstermektedir.



Şekil 3.6: Demet dengelenmesi işlemi için veri akışı (Luhmann, 2006).

Demet dengelenmesinin matematiksel modeli genişletilmiş kolinearite modele dayanır. Doğada fiziksel olan kolinearite koşulunun ideal geometrisinden olan sapmaların 4 ana kaynağı vardır. Bunlar sistematik radyal distorsiyon, teğetsel distorsiyon, resim düzleminin düz olmaması ve düzlemdeki resim distorsiyonudur. Herhangi bir resim noktasının teorik konumundan olan ötelenme bu kaynakların her birinin etkisinin toplamı kadar olacaktır. Böylece resim koordinat düzeltmeleri,

$$\Delta x = \Delta x_r + \Delta x_d + \Delta x_u + \Delta x_f \quad (3.1)$$

$$\Delta y = \Delta y_r + \Delta y_d + \Delta y_u + \Delta y_f \quad (3.2)$$

olur. Burada, r indeksi radyal distorsiyon, d, teğetsel distorsiyon, u, düzlem dışı düz olmama ve f'de düzlemde görüntü distorsiyonları için kullanılır (Yılmaztürk, 2008).

Analitik fotogrametride radyal mercek distorsiyonu matematiksel olarak bir polinom fonksiyonu ile ifade edilir.

$$\Delta r = k_1 r^3 + k_2 r^5 + k_3 r^7 \quad (3.3)$$

Burada, k1, k2 ve k3 terimleri radyal distorsiyon katsayılarını, r de ana noktadan olan radyal mesafeyi gösterir.

$$r^2 = x^{-2} + y^{-2} = (x - x_p)^{-2} + (y - y_p)^{-2} \quad (3.4)$$

x, y resim koordinatları için gerekli düzeltmeler;

$$\Delta x_r = \frac{\bar{x}\Delta r}{r} \text{ ve } \Delta y_r = \frac{\bar{y}\Delta r}{r} \quad (3.5)$$

eşitlikleri ile verilir. k_1 terimi, çok yüksek ölçme doğruluğu gerektirmeyen uygulamalarda tek başına yeterlidir. k_2 ve k_3 terimleri ise yüksek doğruluk gerektiren ölçme uygulamalarında ve geniş açılı objektiflerin kullanılması durumunda gereklidir.

Mercek elemanlarının optik eksen boyunca merkezlenememesi teğetsel distorsiyon olarak isimlendirilen mercek distorsiyonunun ikinci bir türüne neden olur. Mercek bileşenlerinin yanlış hizalanması aşağıdaki düzeltme eşitlikleriyle modellenen hem radyal hem de teğetsel distorsiyonlara yol açar.

$$\Delta x_d = p_1(r^2 + 2x^{-2}) + 2p_2\bar{x}\bar{y} \quad (3.6a)$$

$$\Delta y_d = 2p_1\bar{x}\bar{y} + p_2(r^2 + 2y^{-2}) \quad (3.6b)$$

Resim düzleminin düz olmaması nedeniyle oluşan sistematik resim koordinat hataları fotogrametrik triyangülasyonun doğruluğunu sınırlayabilir. Radyal görüntü ötelenmesi Δr_u resim ışınının geliş açısının bir fonksiyonudur. Bu etkiyi modellemek için resim düzleminin topoğrafik olarak ölçülmesi gerekir. Ondan sonra, bir üçüncü ya da dördüncü dereceden polinom ile resim koordinat ötelenmelerini modellenenbilir.

Düzlemdeki distorsiyonlar, genellikle x ve y resim koordinatları arasındaki ölçekleme farkından ya da resim koordinat eksenlerinin birbirine dik olmamasından kaynaklanır. Bu distorsiyonlar genellikle afin deformasyonlar gösterir ve 3.7 eşitliğine göre matematiksel olarak modellenenbilir (Yılmaztürk, 2008).

$$\Delta x_f = b_1\bar{x} + b_2\bar{y} \quad (3.7)$$

Bu düzeltmeler standart kolinearite eşitliklerine eklenerek genişletilmiş kolinearite model elde edilir. Toplam resim koordinat düzeltmeleri,

$$\Delta x = -x_p - \frac{\bar{x}}{c}\Delta c + \bar{x}r^2k_1 + \bar{x}r^4k_2 + \bar{x}r^6k_3 + (r^2 + 2x^{-2})p_1 + 2p_2\bar{x}\bar{y} + b_1\bar{x} + b_2\bar{y} \quad (3.8)$$

$$\Delta y = -y_p - \frac{\bar{y}}{c}\Delta c + \bar{y}r^2k_1 + \bar{y}r^4k_2 + \bar{y}r^6k_3 + 2p_1\bar{x}\bar{y} + (r^2 + 2y^{-2})p_2 \quad (3.9)$$

$$\begin{aligned} r &= \sqrt{x^{-2} + y^{-2}} \\ \bar{x} &= x - x_p \\ \bar{y} &= y - y_p \end{aligned} \quad (3.10)$$

olmak üzere genişletilmiş kolinearite model,

$$x' = x_p - c \cdot \frac{r_{11} \cdot (X - X_0) + r_{21} \cdot (Y - Y_0) + r_{31} \cdot (Z - Z_0)}{r_{13} \cdot (X - X_0) + r_{23} \cdot (Y - Y_0) + r_{33} \cdot (Z - Z_0)} + \Delta x \quad (3.11a)$$

$$y' = y_p - c \cdot \frac{r_{12} \cdot (X - X_0) + r_{22} \cdot (Y - Y_0) + r_{32} \cdot (Z - Z_0)}{r_{13} \cdot (X - X_0) + r_{23} \cdot (Y - Y_0) + r_{33} \cdot (Z - Z_0)} + \Delta y \quad (3.11b)$$

olarak verilir.

Bu denklemlerin yapısı, fotogrametrik görüntüleme işlemimdeki bilinmeyen bütün parametrelerin fonksiyonu olarak resim koordinat ölçmelerinin direkt olarak formülasyonuna izin verir. Dolayısıyla yaklaşık değerlerinde lineer hale getirilmiş Kolinearite eşitlikleri, Gauss-Markov modeline göre en küçük kareler dengelemesi için gözlem eşitlikleri olarak direkt kullanılabilir.

Genellikle gözlem olarak kullanılan eşlenik noktaların resim koordinat değerleridir. Aşağıdaki bilinmeyenler bu gözlemlerin fonksiyonu olarak iteratif olarak belirlenir:

- Her yeni nokta için 3B cisim koordinatları,
- Her bir resmin dış yöneltmesi,
- Her bir kameranın iç yöneltmesi.

Demet dengelemesi, dolayısıyla uzaysal geriden kestirmenin genişletilmiş bir formudur:

$$x'_i + vx'_i = F(X_{0j}, Y_{0j}, Z_{0j}, \omega_j, \varphi_j, \kappa_j, x_{pk}, y_{pk}, c_k, \Delta x_k, X_i, Y_i, Z_i) \quad (3.12a)$$

$$y'_i + vy'_i = F(X_{0j}, Y_{0j}, Z_{0j}, \omega_j, \varphi_j, \kappa_j, x_{pk}, y_{pk}, c_k, \Delta y_k, X_i, Y_i, Z_i) \quad (3.12b)$$

Burada;

i: nokta indeksini,

j: resim indeksini,

k: kamera indeksini gösterir.

n, ölçü sayısını ve u bilinmeyen sayısını göstermek üzere standart formda lineer hale getirilmiş model aşağıdaki eşitlikle verilir;

$$l_{n,1} + v_{n,1} = A_{n,u} \hat{x}_{u,1} \quad (3.13)$$

ve normal denklem sistemi;

$$N_{u,u} \hat{x}_{u,1} + n_{u,1} = 0_{u,1} \quad (3.14)$$

biçiminde olur. Burada,

$$N_{u,u} = A_{u,n}^T P_{n,n} A_{n,u} \quad (3.15a)$$

$$n_{u,1} = A_{u,n}^T P_{n,n} l_{n,1} \quad (3.15b)$$

olarak verilir. Çözüm vektörü ve onun kovaryans matrisi iteratif dengelemeyle çözümlenir:

$$\hat{x}_{u,1} = Q_{u,u} n_{u,1} = (A_{u,n}^T P_{n,n} A_{n,u})^{-1} A_{u,n}^T P_{n,n} l_{n,1} \quad (3.16)$$

Burada:

$$Q_{u,u} = N_{u,u}^{-1} \quad \text{Kofaktör matrisini,}$$

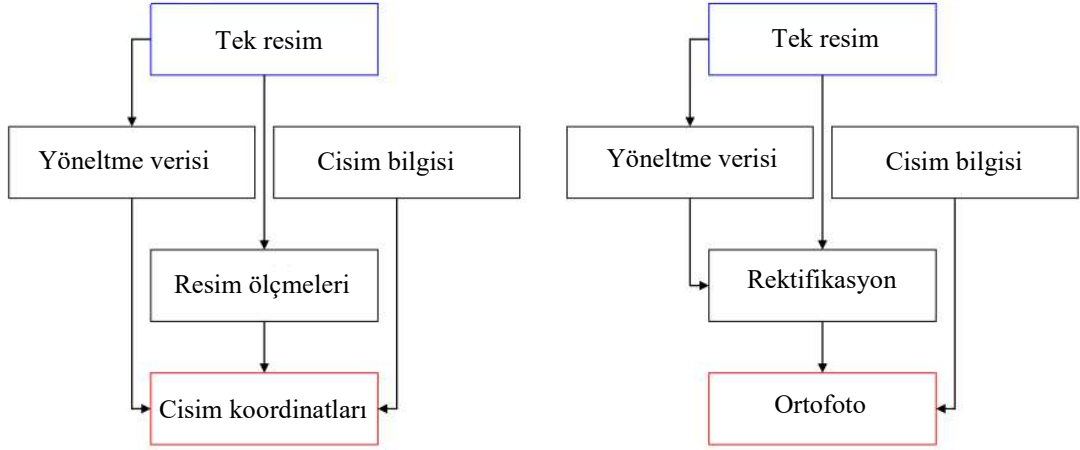
$$K_{u,u} = s_0^2 Q_{u,u} \quad \text{Varyans-kovaryans matrisini gösterir (Luhmann, 2006).}$$

3.4 Cisim Geometrisinin Yeniden Oluşturulması

Resim sayısına göre aşağıdaki yöntemlerden biri fotogrametrik değerlendirme için kullanılabilir.

- ***Tek resim değerlendirmesi***

Tek resim değerlendirmesi için fotogrametrik prosedürler ya cisim koordinatlarının belirlenmesi için ya da farklı geometrik projeksiyonlara resimlerin optik ya da hesapsal olarak rektifikasyonu için kullanılır (Şekil 3.7). Her iki durumda da resim yöneltme verisi ve ek cisim geometrisi (referans noktaları, geometrik elemanlar, SYM) gereklidir. Düzlem cisim durumu ile üç boyutlu yüzey arasındaki farkı gözetmek gerekir (Luhmann, 2006).

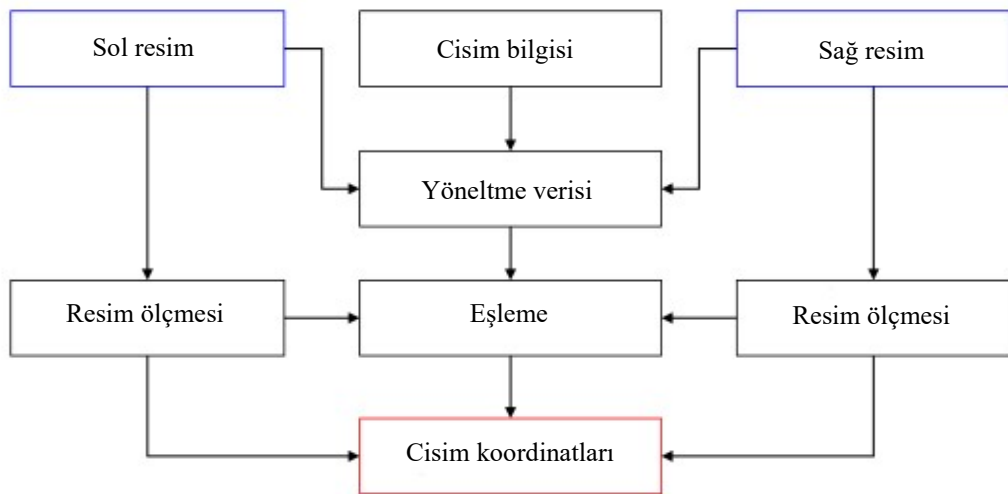


Şekil 3.7: Tek resim değerlendirme yöntemleri.

- ***Stereo resim değerlendirmesi***

Stereo değerlendirme, stereo resim çiftlerinin değerlendirmesi için görsel ya da hesapsal bütün yöntemleri içerir ve özellikle doğal detay noktalarının ölçülmesi ve serbest biçimli yüzeyleri elde etmede kullanılır (Şekil 3.8). Genellikle hava fotogrametrisinde uygulanır.

Stereo değerlendirmenin temeli epipolar bir düzlemde bulunan karşılıklı noktaların eşlenmesine dayanır. Epipolar düzlem, görüntü düzlemini epipolar çizgilerde keser. Stereo fotogrametrinin normal durumu için epipolar çizgiler birbirine paraleldir ve derinlik bilgisi x-paralaksı ölçülerek belirlenir (Luhmann, 2006).



Şekil 3.8: Stereo resim değerlendirme yöntemleri

- **Çoklu resim değerlendirme**

Çoklu resim değerlendirme, 3B cisim geometrisini elde etmede sınırsız sayıda resim üzerinde ölçülen resim koordinatlarına dayanır. En çok kullanılan çoklu resim değerlendirme yöntemi uzaysal ileriden kestirmedir. Bu yöntemde, ölçülen resim koordinatları, bilinen yöneltme parametreleriyle birlikte arazi noktalarının XYZ koordinatlarını hesaplamada kullanılır. Hesap, en küçük kareler dengelemesinde gözlem eşitlikleri olarak kullanılan kolinearite eşitliklerine (Formül 3.11a ve 3.11b) dayanır (Luhmann, 2006).

3.5 Kamera Kalibrasyonu

Kamera kalibrasyonunun amacı iç yöneltme parametreleri tarafından tanımlanan geometrik kamera modelini belirlemektir. Günümüz kamera kalibrasyon yöntemleri, genellikle cisim ölçmelerinden ayrılmayan kamera parametreleri için hesapsal bir çözümü içerir. Dolayısıyla kamera kalibrasyonu için farklı yaklaşımları anlamak için fotogrametrik yöneltme ve 3B cisim geometrisini yeniden oluşturma bilgisi ve özellikle demet dengelemesini iyi anlamak gerekir. Kalibrasyon yöntemleri, kullanılan referans objesi, kalibrasyonun zamanı ve kalibrasyonun konumu gibi parametrelere göre sınıflandırılır;

- Laboratuvar kalibrasyonu
- Test alanı kalibrasyonu
- Çekim sırasında kalibrasyon
- Self kalibrasyon

3.5.1 Laboratuvar ortamında kalibrasyon

Laboratuvar ortamında kalibrasyon, geçmişte metrik kameralar için kullanılmaktaydı. Bu yöntemde iç yöneltme parametreleri, goniometre, kolimotor ya da diğer optik hizalama teknikleri ile belirlenmektedir. Kullanıcı tarafından uygulanamayan laboratuvar kalibrasyonu yöntemlerinin yakın resim fotogrametrisinde çok az pratik uygulamaları olmuştur.

3.5.2 Test alanı kalibrasyonu

Test alanı kalibrasyonu, bilinen koordinatlar ya da mesafelere sahip cisim noktalarının uygun dağılımda işaretlenmiş bir alanından oluşur. Bu test alanı, iyi ışın kesişimleri

ve görüntü formatını dolduracak şekilde farklı kamera istasyonlarından görüntülenir. Test alanı mobil ya da sabit (bina duvarı) olabilir (Şekil 3.9).



Şekil 3.9: Mobil test alanı ve duvar üzerinde sabit test alanı.

Kamera modelinin parametreleri, dış yöneltme parametreleri ve bilinmeyen 3B cisim koordinatlarının da hesaplatıldığı demet dengelemesinin bir parçası olarak hesaplatılır. Bilinen veri farklı şekillerde dengelemeye kapsatılabilir ve ölçek sağlamak için kullanılır.

Normal olarak test alanı kalibrasyonu, kameranın doğruluk değerlendirmesinin gerekli olduğu ya da cisim ölçmesinin bir parçası olarak eş zamanlı kalibrasyonun mümkün olmadığı durumlarda uygulanır. Genelde test alanının dizaynı, ölçülecek cisim temsil etmelidir. Resim noktalarının sayısı ve dağılımı, distorsiyon parametrelerinin doğru biçimde belirlenebilmesi için oldukça önemlidir. Kalibrasyon parametrelerini korumak için test alanı ölçmesi ile 3B cisim geometrisini yeniden oluşturma çalışması arasında kamerada herhangi bir değişiklik (odaklama, farklı mercek) yapılmamalıdır (Luhmann, 2014).

3.5.3 Çekim sırasında kalibrasyon

Çekim sırasında kalibrasyon terimi, genellikle test alanı kalibrasyonunun cisim ölçmeleri ile birleştirildiği test alanı kalibrasyonu için kullanılır. Bu yaklaşım, ölçü cisimi, self kalibrasyonu mümkün kılan uygun geometri sağlamıyorsa mantıklıdır.

Basit bir çözüm, ölçülecek cismin yakınına konumlandırılan birkaç ölçek barından oluşan taşınabilir çerçeve tarafından sağlanır. Test alanının lokal koordinat sistemi, 3B cisim koordinat sistemi olarak kullanılabilir ve referans noktası gerekli olmaz.

3.5.4 Self kalibrasyon

Çekim sırasında kalibrasyona bir ekleme, self kalibrasyondur ki bu yöntemde cisim ölçmesi için çekilen resimler kullanılır. Aslında, test alanı kalibrasyonu için gerekli olan koşullar altında, test alanı resimlerinin çekilmesi gereken cismin kendisiyle yer değiştirir.

Self kalibrasyonun temel avantajı iç yöneltme elemanlarının cisim ölçmesiyle eş zamanlı olarak belirlenebilmesidir. Böylece 3B cisim geometrisini yeniden oluşturmada en yüksek doğruluk sağlanmış olur.

Self kalibrasyon, bilinen referans noktası koordinatları gerektirmeyebilir. İç yöneltme parametreleri, cisim şeklinin fotogrametrik olarak belirlenmesiyle yani yalnız görüntü bilgisi ve bilinmeyen cisim noktaları için kesişim koşullarının birleştirilmesiyle hesaplanabilir. Eğer kullanılırsa referans noktaları, dış yöneltme parametreleri için özel bir koordinat sistemi tanımlar. Ölçeği tanımlamak için cisim uzayında tek bir referans uzunluğu ölçmek yeterlidir.

Ölçülecek cisim uygun bir resim konfigürasyonuna izin vermiyorsa ya da on-line çoklu kamera sistemi kullanılıyorsa o zaman test alanı ya da çekim sırasında kalibrasyon yöntemi uygulanmalıdır (Luhmann, 2014).

4. UYGULAMA

Çalışmada günümüz cep telefonu kameralarının fotogrametrik uygulamalarda kullanılabilirliğinin araştırılması amacıyla iki işlem adımı gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, yaklaşık 1x1 m boyutlarında 84 noktalı 3 boyutlu koordinatları bilinen bir test alanı hazırlanmış ve bu test alanı kullanılarak altı farklı cep telefonu kamerasının ve iki farklı sayısal kompakt RÇM'nin (Resim Çekme Makinası) doğruluk potansiyelleri belirlenmiştir. İkinci işlem aşamasında ise kullanılan cep telefonu kameralarından en iyi ampirik doğruluğu veren Samsung S4 cep telefonu kamerası ile alınan görüntüler kullanılarak Kayseri'de bulunan tarihi Sırçalı Kümbet'in 3 boyutlu fotogrametrik modellemesi gerçekleştirilmiştir.

4.1 Kameraların Teknik Özellikleri

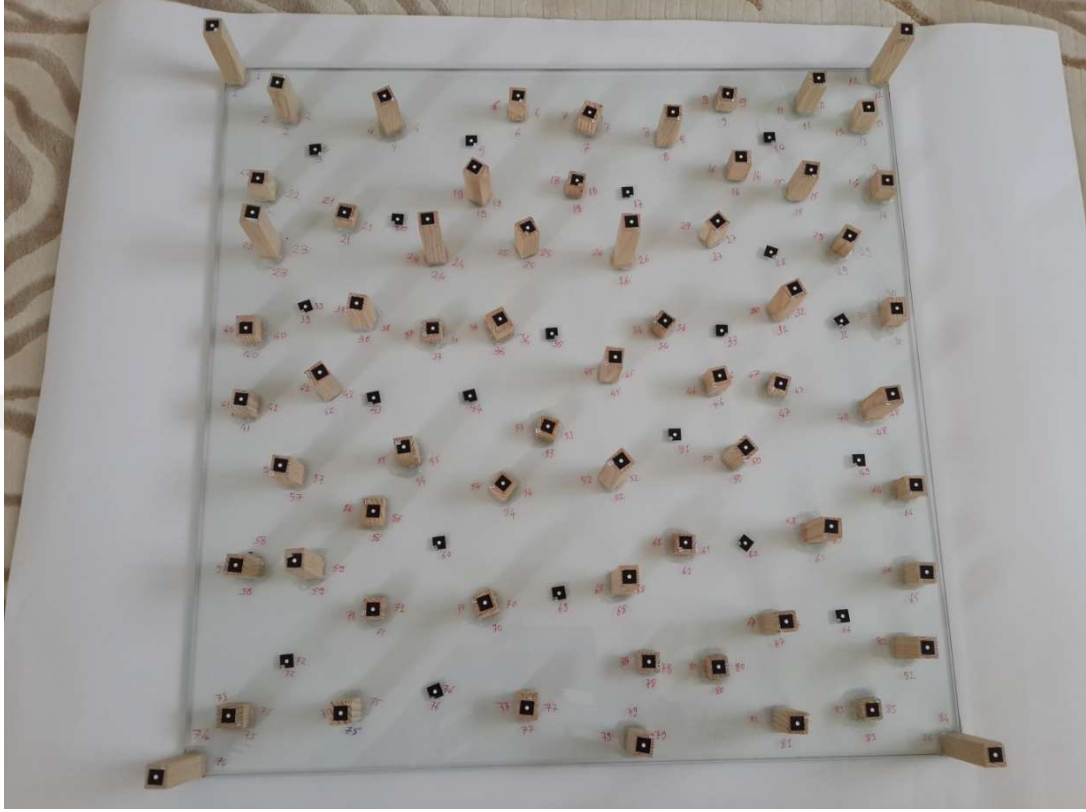
Günümüzde cep telefonu piyasasında birçok değişik marka ve modele sahip telefon kullanıcıların hizmetine sunulmaktadır. Çalışmanın yapıldığı dönemde cep telefonu piyasasında yaygın olarak kullanılan 6 adet cep telefonu ve 2 adet sayısal kompakt RÇM araştırma için tercih edilmiştir. Çizelge 4.1’de araştırma için tercih edilen RÇM ve cep telefonu kameralarının teknik özellikleri yer almaktadır.

Çizelge 4.1: Araştırmada kullanılan kameralara ait teknik özellikler.

Telefon Markası	Telefon Modeli	Kamera Çözünürlüğü (mega piksel)	Kamera Sensör Tipi	Kamera Sensör Boyutu (mm)	Kamera Çözünürlük Yüksekliği (Piksel)	Kamera Çözünürlük Genişliği (Piksel)	Kamera Odak Uzaklığı (mm)
HTC	Sensation XE	8	1/3.2"	4.54x3.42	2448	3264	4
APPLE	iphone 5	8	1/3.2"	4.54x3.42	2448	3264	4
NOKIA	C7	8	1/3.2"	4.56x3.41	2448	3264	4.3
SAMSUNG	Galaxy S3	8	1/3.2"	4.54x3.42	2448	3264	3.7
SAMSUNG	Galaxy S4	13.1	1/3.06"	4.69x3.52	3096	4128	4
SONY	Xperia S LT26i	12	1/3"	4.8x3.6	3000	4000	4
CANON	Powershot SX210 IS	14.1	1/2.3"	6.17x4.55	3240	4320	5
CANON	ixus 960 IS	12.1	1/1.7"	7.53x5.64	3000	4000	8
Kaynak: (URL-2-3-4)							

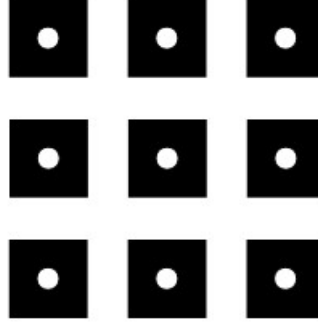
4.2 Kullanılan Test Alanı

Söz konusu cep telefonu kameralarının ve RÇM'lerin doğruluk potansiyellerinin belirlenmesi amacıyla ilk olarak kalibrasyon test alanı oluşturulmuştur (Şekil 4.1).



Şekil 4.1: Test alanı.

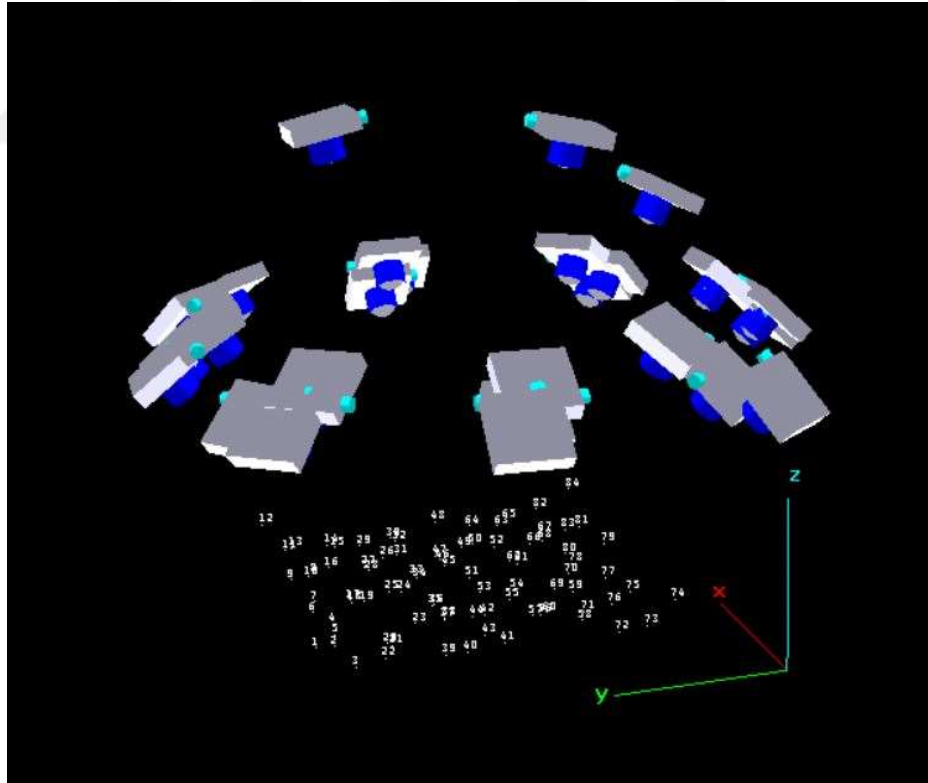
Test alanı için, 1x1 metrelik boyutlarda ve 6 milimetrelik kalınlığa sahip şeffaf bir cam levha kullanılmıştır. Bu levha üzerine farklı yüksekliklerde 84 adet nokta tesis edilmiştir. Hedef işareti olarak 3 milimetrelik çaplara sahip siyah zemin ortasında beyaz benek şeklinde hedef işaretleri kullanılmıştır (Şekil 4.2). Bu hedef işaretlerinin 3 boyutlu koordinatları, fotogrametrik yöntemle belirlenmiştir. Hesaplama cisim nokta koordinatlarının ortalama prezisyon değerleri için X doğrultusunda 0.036 mm, Y doğrultusunda 0.036 mm ve Z doğrultusunda da 0.050 mm değerleri elde edilmiştir.



Şekil 4.2: Test alanı hedefleri.

4.3 Kameraların Karşılaştırılması

RÇM'lerin ve cep telefonu kameralarının karşılaştırılması amacıyla yaklaşık aynı konumlardan test alanının toplam 25 adet resmi her bir kamera ile çekilmiştir. Resim çekim mesafesi yaklaşık 1 metre civarındadır. Şekil 4.3'te Samsung S4 marka cep telefonu kamerasına ait resim çekim konumları gösterilmiştir.



Şekil 4.3: Resim çekim konumları.

Fotogrametrik değerlendirmede endüstriyel fotogrametrik bir yazılım olan Australis 6.06 kullanılmıştır. Demet dengelenmesinde, 3 boyutlu koordinatları bilinen toplam 84

test alanı noktasından sırasıyla 10, 27, 43 ve 60'ı kontrol noktası olarak kullanılmış ve geriye kalan noktaların (denetleme noktalarının) 3 boyutlu koordinatları hesaplatılmıştır. Ayrıca her bir kamera için serbest ağ dengelemesi de uygulanmıştır. Bu durumda kontrol noktaları kullanılmamış ve dengelemeye denetleme noktası olarak dahil edilmiştir.

Dengeleme sonuçlarının istatistikî değerlendirmesinde farklı ölçütler kullanılabilir. Bu ölçütlerden ilki, resim koordinat düzeltmelerinin karesel ortalama hata değerleridir. Resim koordinat düzeltmeleri ya da düzeltmelerin karesel ortalama hata değerleri birçok fotogrametrik yazılımda da önemli bir kalite göstergesi olarak kabul edilir. Bir diğer ölçütse prezisyon değerleridir. Prezisyon, en küçük kareler dengelemesi ile kestirilen parametrelerin istatistikî değişkenliğini tanımlar.

Cisim nokta koordinatlarının ortalama prezisyon değerleri, aşağıdaki eşitlikler kullanılarak hesaplanır.

$$\hat{\sigma}_x = \sqrt{\frac{\sum \hat{\sigma}_{x_i}^2}{n_x}} \quad \hat{\sigma}_y = \sqrt{\frac{\sum \hat{\sigma}_{y_i}^2}{n_y}} \quad \hat{\sigma}_z = \sqrt{\frac{\sum \hat{\sigma}_{z_i}^2}{n_z}} \quad (4.1)$$

Burada; n_x , n_y ve n_z , cisim nokta koordinatlarının sayısını göstermektedir (Yılmaztürk, 2008).

Doğruluk ise kestirilen parametrelerin gerçek değerlere ne kadar yakın olduğunu belirler ve ampirik bir ölçüt hassas referans değerlerle karşılaştırılarak,

$$\mu_x = \sqrt{\frac{\sum (X_i^r - X_i)^2}{n_{rX}}} \quad \mu_y = \sqrt{\frac{\sum (Y_i^r - Y_i)^2}{n_{rY}}} \quad \mu_z = \sqrt{\frac{\sum (Z_i^r - Z_i)^2}{n_{rZ}}} \quad (4.2)$$

eşitlikleri ile elde edilir. Burada X^r, Y^r ve Z^r denetleme noktalarının yani koordinatları bilinen fakat dengelemeye bilinmeyen olarak giren noktaların referans koordinatlarını, n_{rX}, n_{rY}, n_{rZ} 'lerde denetleme nokta koordinatlarının sayısını ifade eder (Yılmaztürk, 2008).

Her bir kamera için uygun dağılımlı farklı sayıda kontrol noktasının kullanıldığı dört uygulama ve serbest dengeleme sonucu hesaplanan değerler Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2: Kameraların karşılaştırılması.

Canon Powershot SX210 IS										
Kontrol Noktası	Denetleme Noktası	Bağlantı Noktası	Ek Parametre	Sigma0 (μm) (piksel)	$\hat{\sigma}_x$ (mm)	$\hat{\sigma}_y$ (mm)	$\hat{\sigma}_z$ (mm)	μ_x (mm)	μ_y (mm)	μ_z (mm)
10	68	6	10	0.27	0.044	0.043	0.055	0.036	0.022	0.037
27	57	0	10	0.27	0.031	0.030	0.040	0.040	0.022	0.036
43	39	2	10	0.27	0.028	0.027	0.036	0.037	0.020	0.035
60	24	0	10	0.28	0.025	0.024	0.033	0.020	0.017	0.024
serbest			10	0.27	0.023	0.020	0.029			

Canon Digital ixus 960 IS										
Kontrol Noktası	Denetleme Noktası	Bağlantı Noktası	Ek Parametre	Sigma0 (μm) (piksel)	$\hat{\sigma}_x$ (mm)	$\hat{\sigma}_y$ (mm)	$\hat{\sigma}_z$ (mm)	μ_x (mm)	μ_y (mm)	μ_z (mm)
10	68	6	10	0.38	0.072	0.072	0.089	0.059	0.049	0.078
27	57	0	10	0.42	0.051	0.051	0.063	0.080	0.067	0.093
43	39	2	10	0.36	0.038	0.038	0.048	0.068	0.071	0.093
60	24	0	10	0.42	0.037	0.037	0.046	0.041	0.036	0.060
serbest			10	0.41	0.021	0.020	0.028			

HTC Sensation XE										
Kontrol Noktası	Denetleme Noktası	Bağlantı Noktası	Ek Parametre	Sigma0 (μm) (piksel)	$\hat{\sigma}_x$ (mm)	$\hat{\sigma}_y$ (mm)	$\hat{\sigma}_z$ (mm)	μ_x (mm)	μ_y (mm)	μ_z (mm)
10	68	6	10	0.71	0.095	0.095	0.123	0.127	0.123	0.181
27	57	0	10	0.66	0.092	0.089	0.128	0.279	0.270	0.284
43	39	2	10	0.37	0.081	0.065	0.094	0.088	0.095	0.163
60	24	0	10	0.62	0.071	0.069	0.098	0.285	0.311	0.316
serbest			10	0.70	0.075	0.070	0.110			

iphone5										
Kontrol Noktası	Denetleme Noktası	Bağlantı Noktası	Ek Parametre	Sigma0 (μm) (piksel)	$\hat{\sigma}_x$ (mm)	$\hat{\sigma}_y$ (mm)	$\hat{\sigma}_z$ (mm)	μ_x (mm)	μ_y (mm)	μ_z (mm)
10	68	6	10	0.35	0.056	0.054	0.070	0.084	0.044	0.126
27	57	0	10	0.33	0.044	0.043	0.057	0.082	0.077	0.119
43	39	2	10	0.35	0.049	0.043	0.055	0.059	0.070	0.134
60	24	0	10	0.34	0.037	0.036	0.048	0.052	0.065	0.105
serbest			10	0.34	0.033	0.031	0.044			

Çizelge 4.2 (devam): Kameraların karşılaştırılması.

Nokia C7										
Kontrol Noktası	Denetleme Noktası	Bağlantı Noktası	Ek Parametre	Sigma0 (μm) (piksel)	$\hat{\sigma}_x$ (mm)	$\hat{\sigma}_y$ (mm)	$\hat{\sigma}_z$ (mm)	μ_x (mm)	μ_y (mm)	μ_z (mm)
10	68	6	10	0.39	0.060	0.060	0.072	0.064	0.053	0.148
27	57	0	10	0.34	0.053	0.051	0.062	0.128	0.094	0.149
43	39	2	10	0.39	0.039	0.038	0.045	0.061	0.064	0.140
60	24	0	10	0.35	0.046	0.044	0.053	0.053	0.053	0.071
serbest			10	0.34	0.047	0.043	0.052			

Samsung Galaxy S3										
Kontrol Noktası	Denetleme Noktası	Bağlantı Noktası	Ek Parametre	Sigma0 (μm) (piksel)	$\hat{\sigma}_x$ (mm)	$\hat{\sigma}_y$ (mm)	$\hat{\sigma}_z$ (mm)	μ_x (mm)	μ_y (mm)	μ_z (mm)
10	68	6	10	0.32	0.055	0.054	0.073	0.056	0.055	0.091
27	57	0	10	0.32	0.040	0.039	0.055	0.065	0.062	0.113
43	39	2	10	0.31	0.035	0.034	0.049	0.045	0.045	0.066
60	24	0	10	0.32	0.030	0.029	0.043	0.044	0.042	0.062
serbest			10	0.32	0.033	0.031	0.047			

Samsung Galaxy S4										
Kontrol Noktası	Denetleme Noktası	Bağlantı Noktası	Ek Parametre	Sigma0 (μm) (piksel)	$\hat{\sigma}_x$ (mm)	$\hat{\sigma}_y$ (mm)	$\hat{\sigma}_z$ (mm)	μ_x (mm)	μ_y (mm)	μ_z (mm)
10	68	6	10	0.24	0.031	0.032	0.038	0.054	0.035	0.098
27	57	0	10	0.24	0.023	0.023	0.028	0.057	0.034	0.107
43	39	2	10	0.24	0.021	0.021	0.025	0.058	0.038	0.089
60	24	0	10	0.25	0.019	0.020	0.023	0.043	0.036	0.068
serbest			10	0.24	0.016	0.017	0.019			

Sony Xperia S LT26i										
Kontrol Noktası	Denetleme Noktası	Bağlantı Noktası	Ek Parametre	Sigma0 (μm) (piksel)	$\hat{\sigma}_x$ (mm)	$\hat{\sigma}_y$ (mm)	$\hat{\sigma}_z$ (mm)	μ_x (mm)	μ_y (mm)	μ_z (mm)
10	68	6	10	0.51	0.062	0.062	0.082	0.062	0.055	0.100
27	57	0	10	0.51	0.043	0.043	0.061	0.075	0.054	0.109
43	39	2	10	0.50	0.037	0.038	0.054	0.062	0.052	0.102
60	24	0	10	0.51	0.034	0.034	0.049	0.060	0.029	0.050
serbest			10	0.50	0.027	0.027	0.043			

$\hat{\sigma}_x, \hat{\sigma}_y, \hat{\sigma}_z$: Cisim nokta koordinatlarının ortalama prezisyon değerleri.

μ_x, μ_y, μ_z : Denetleme noktalarının ampirik doğruluk değerleri.

Sigma0 : Resim koordinat düzeltmelerinin karesel ortalama hata değerleri.

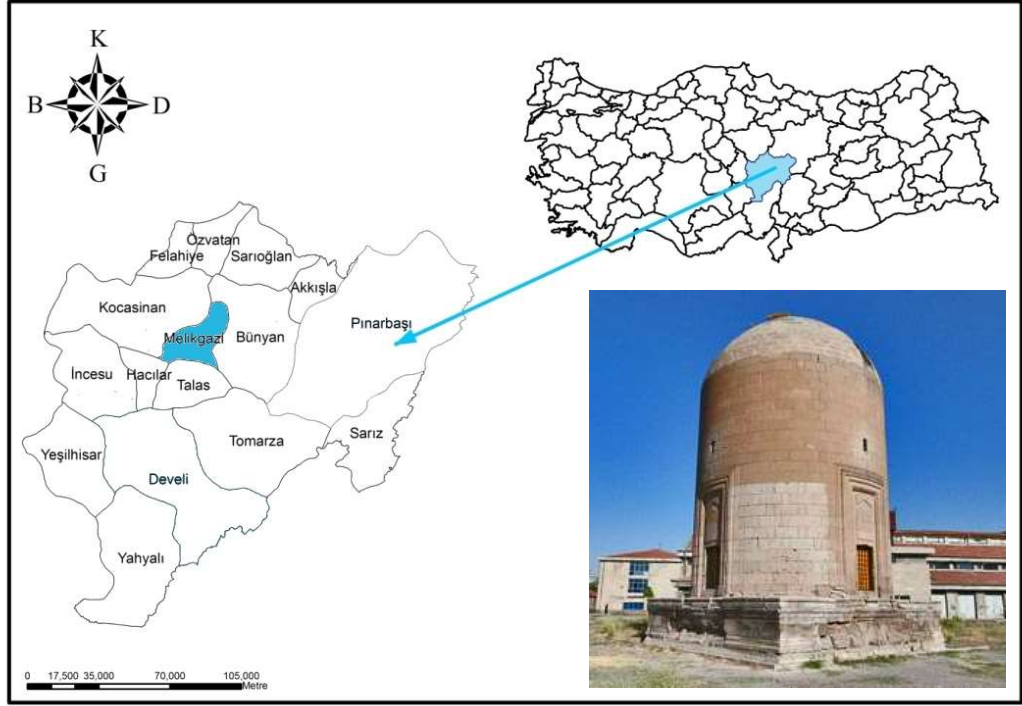
RÇM'leri ve cep telefonu kameraları, resim düzeltmelerinin karesel ortalama hatası, doğruluk ve prezisyon değerlerine göre kıyaslanmıştır. Bu parametrelere göre en iyi sonuçlar, Canon Powershot SX210 IS sayısal kompakt RÇM ve Samsung Galaxy S4 marka cep telefonu kamerası ile yapılan uygulamalarda elde edilmiştir. Her iki kamera ile yapılan uygulamalarda Sigma0, 0.24-0.28 piksel aralığında hesaplanmıştır. Kompakt kamera için doğruluk değerleri X doğrultusunda 20-40 mikron, Y doğrultusunda 17-22 mikron ve Z doğrultusunda da 24-34 mikron aralığında hesaplanırken S4 cep telefonu kamerası için X doğrultusunda 43-58 mikron, Y doğrultusunda 34-38 mikron ve Z doğrultusunda da 68-107 mikron aralığında hesaplanmıştır. Değerlendirmeler sonucunda en iyi prezisyon değerleri yine Canon Powershot SX210 IS sayısal kompakt RÇM ve Samsung Galaxy S4 marka cep telefonu kamerası için elde edilmiştir.

Diğer cep telefonu kameraları ile yapılan uygulama sonuçlarına bakıldığında yine mm düzeyi altında doğruluklar elde edilebildiği görülmüştür. En kaba sigma0 değeri HTC cep telefonu kamerası için 0.71 piksel olarak hesaplanmıştır. Yine bu cep telefonu kamerası için elde edilen ampirik doğruluk ve teorik prezisyon değerlerinin diğer cep telefonu kameralarına göre daha kaba çıktığı görülmüştür.

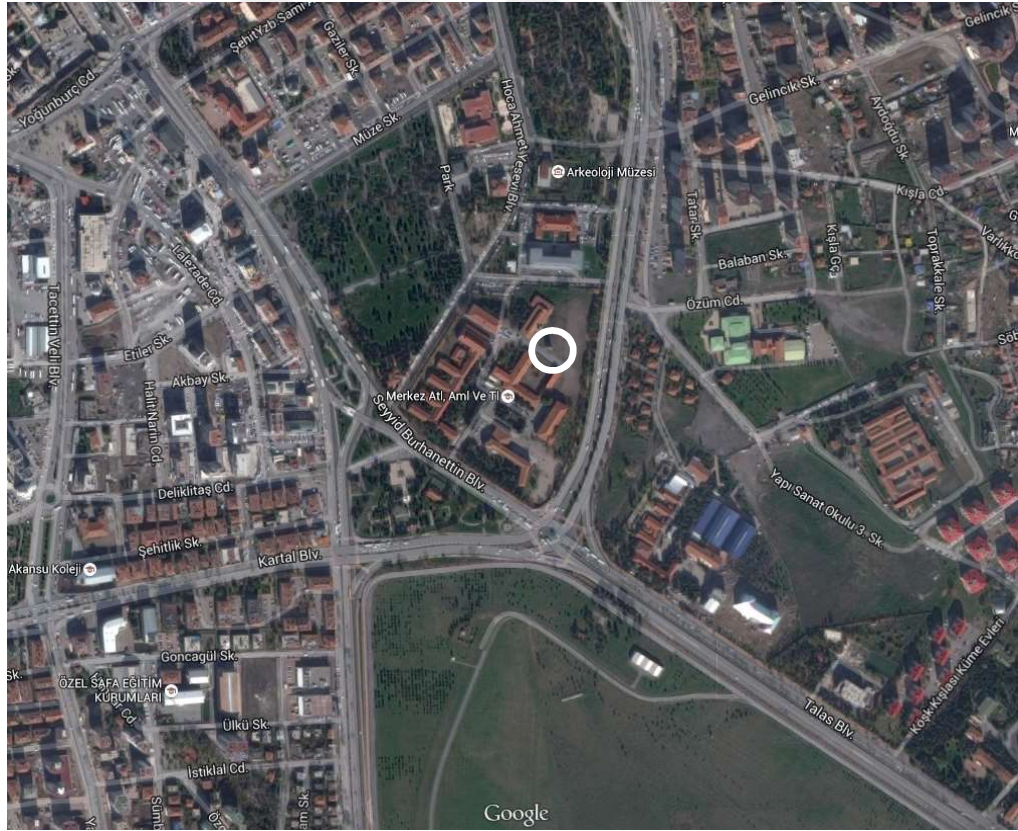
Elde edilen sonuç değerlere göre ikinci işlem adımı olan fotogrametrik 3B modelleme çalışmasında Samsung Galaxy S4 marka cep telefonu kamerasının kullanılmasına karar verilmiştir.

4.4 Fotogrametrik Yöntemle 3B Modelleme

Uygulama alanı olarak seçilen Sırçalı Kümbet, Kayseri İli Melikgazi İlçesi Talas yolu üzerinde yer alan Kayseri Teknik ve Endüstri Meslek Lisesi'nin bahçesinde yer almaktadır (Şekil 4.4a ve 4.4b).



Şekil 4.4a: Sırçalı Kümbetinin Türkiye’deki konumu.



Şekil 4.4b: Sırçalı Kümbetinin Kayseri’deki konumu.

Sırçalı Kümbet'in herhangi bir kitabesi bulunmamaktadır. Bundan dolayı banisi ve kesin inşa tarihi bilinmemekle beraber, Albert Gabriel "Kayseri Abideleri" isimli kitabında, benzerleri dikkate alındığında Sırçalı Kümbet'in 14. yüzyılın ortalarında yapılmış olabileceğini iddia etmektedir. Kümbet 4 köşe bir kaide üzerine oturtulmuş olup, aynı zamanda mumyalık kısmına ve yuvarlak planlı bir mescide sahiptir. Yerden 1,5 metre yükseklikte 8,5x8,5 metrelik kare bir kaideye merdivenler ile çıkılır. Kare kaidenin merkezine yerleşmiş olarak 11 metre yüksekliğinde silindir biçimli bir yapıdadır.



Şekil 4.5: Sırçalı Kümbet.

4.4.1 Jeodezik işler

Arazi çalışmasının başında kümbeti çevreleyen, ülke koordinat sistemine dayalı bir poligon ağı şebekesi tesis edilmiştir. 5 adet yer kontrol noktası tesisi yapılmış ve bu noktalar RTK-CORS yöntemi ile koordinatlandırılmıştır. Daha sonra kümbetin üzerine şekil 4.6'daki gibi toplam 106 adet hedef işaretleri yapıştırılmıştır.



Şekil 4.6: Hedeflerin yapıştırılması.

Lazerli okuma özelliğine sahip olan Leica TS02 Power 7 marka total station aleti (Ölçme hassasiyeti: 1,5 mm+2 ppm) ile (Şekil 4.7) 5 yer kontrol noktasından bu hedef noktalarına ve nokta yapıştırırmada ulaşamayan kümbetin üst kısımlarında yer alan ve çekilen resimler üzerinde de rahatça görülebilecek belirgin noktalara koordinat okumaları yapılmıştır. Bu şekilde kümbet üzerinde toplamda 133 kontrol noktası belirlenmiştir.



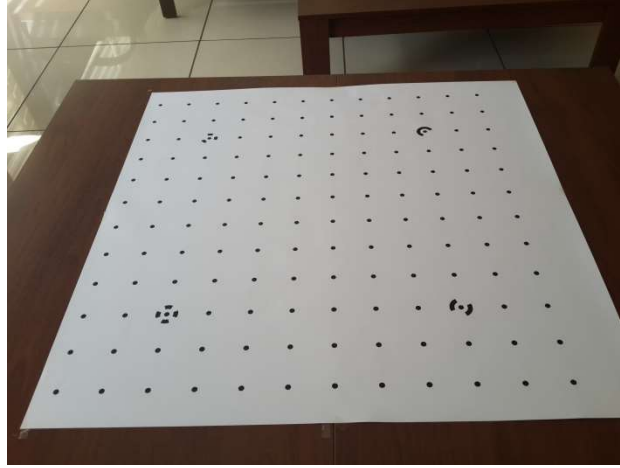
Şekil 4.7: Lazerli total station.

4.4.2 Kamera kalibrasyonu

Kamera kalibrasyonu amatör RÇM'lerin kullanıldığı fotogrametrik bir uygulama için ön koşuldur. Kamera kalibrasyonu, kameranın bir ölçme aracı olarak kullanılabilmesi için özelliklerinin belirlenmesi işlemidir. Kameranın bu özellikleri RÇM sabiti, sayısal kameranın CCD format boyutu, ana noktanın konumu ve mercek distorsiyon parametrelerini içerir.

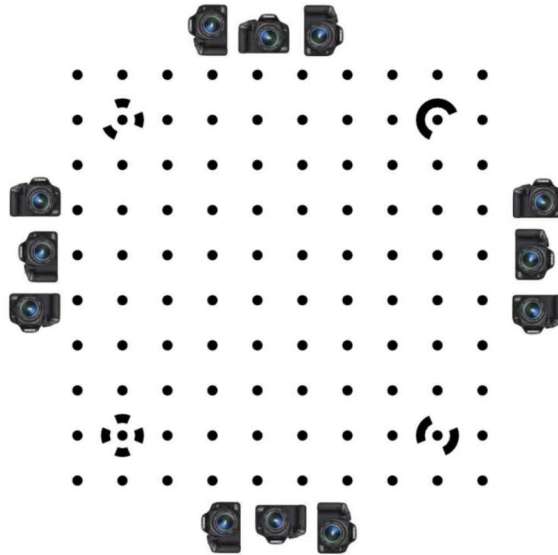
Samsung S4 cep telefonu kamerasının kalibrasyonu PhotoModeler Scanner 2013 yazılımında otomatik olarak gerçekleştirilmiştir. Kalibrasyon objesi olarak yazılımın kurulum klasöründe bulunan 2 boyutlu kalibrasyon gridi (Şekil 4.8) kullanılmıştır.

Kalibrasyon gridi, modellenecek objenin boyutuna bağlı olarak farklı boyutlarda bastırılabilir. Yapılan çalışmada gridin A0 boyutlarında baskısı yapılmış ve yaklaşık 1 m'den resimleri çekilmiştir.



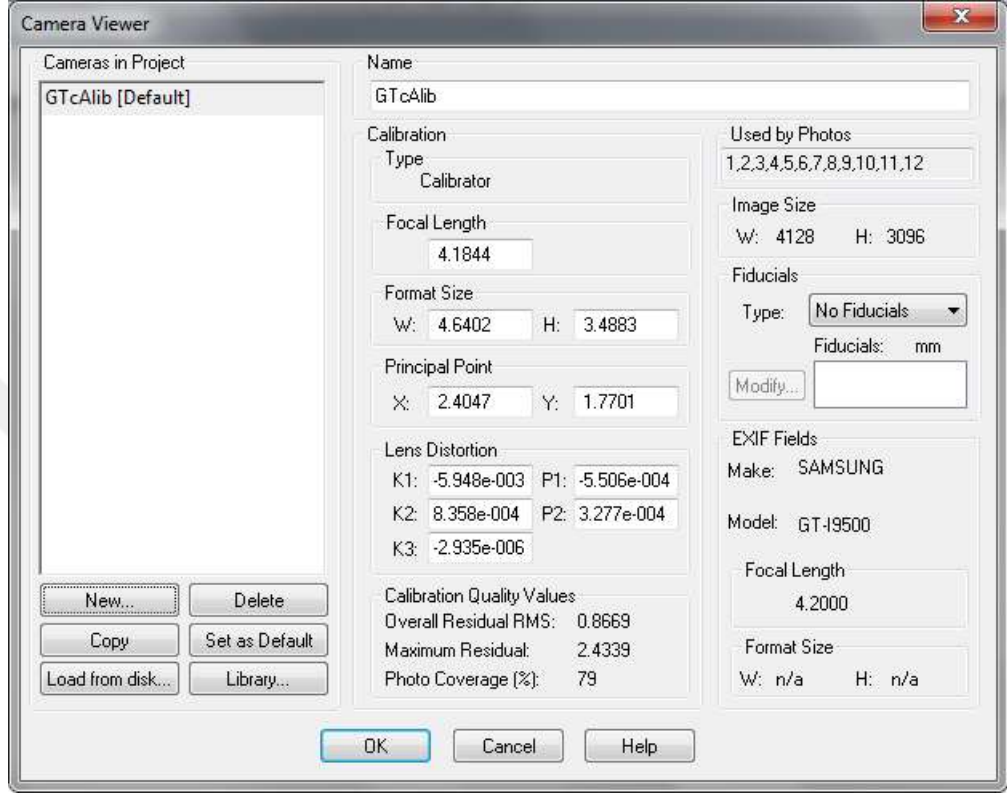
Şekil 4.8: Kalibrasyon kâğıdı.

Kalibrasyon için toplamda 12 resim çekilmekle birlikte söz konusu yazılım için 6 resim de yeterli olmaktadır. 12 resim kullanımı fazla ölçü sayısını arttırmakta ve sonuçların daha doğru elde edilmesini sağlamaktadır. Samsung S4 cep telefonu kamerası ile normal konumda bir ve 90° sola ve 90° sağa dönük konumda iki olmak üzere gridin her bir kenarından üç resim çekilmiştir (Şekil 4.9). Resim çekiminde cep telefonu kamerasının odak uzaklığı, minimum zoomda (geniş açıda) kullanılmıştır.



Şekil 4.9: Resim çekim konumları.

Yazılım, kalibrasyon gridi üzerinde bulunan 4 tane özel işaretli kontrol noktasını kullanarak kalibrasyon işlemini otomatik olarak gerçekleştirmektedir (Şekil 4.9). Kalibrasyon işlemi sonucunda hesaplanan parametreler Şekil 4.10'da verilmiştir.



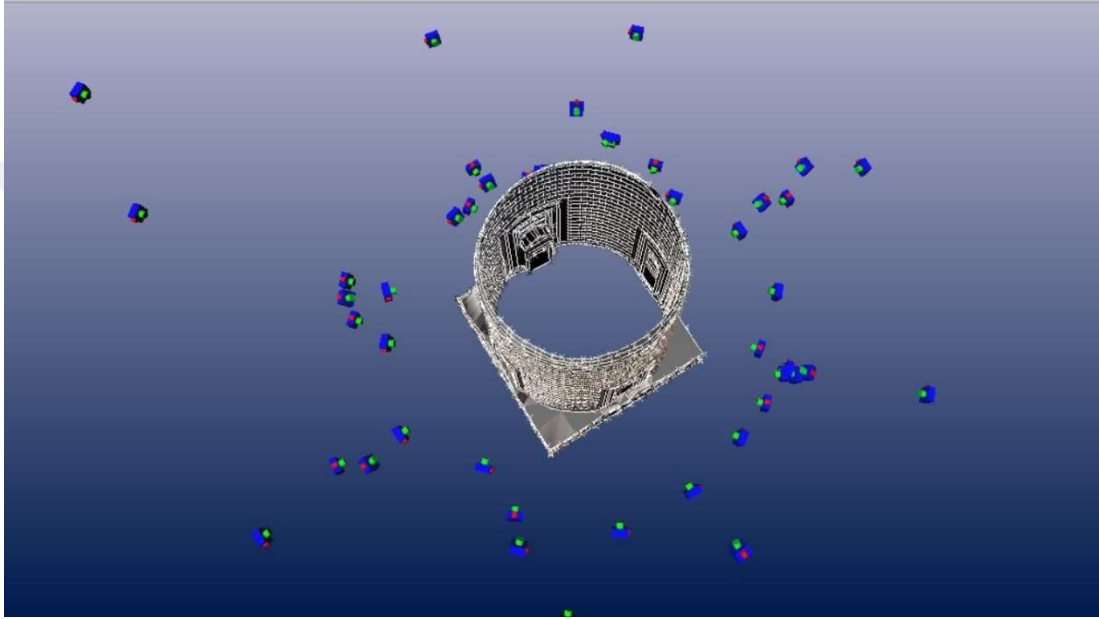
Şekil 4.10: Kamera kalibrasyon parametreleri.

Kalibrasyon parametrelerinin kabul edilebilir ve kullanılabilir olması için "Toplam Son Hata" (Total Last Error) değeri 1'den küçük olmalıdır. Kalibrasyon uygulaması için son hata değeri 0.91 olarak hesaplandığı için sonuç parametreler kabul edilmiş ve kullanım için depolanmıştır. Toplam son hata değeri demet dengelemesi işleminde yazılım tarafından hesaplanan istatistiksel bir ölçüdür.

Kamera kalibrasyonunun kalitesiyle ilgili bir diğer ölçütse resim koordinat düzeltmeleriyle (Tüm düzeltmelerin karesel ortalama hatası ve en büyük düzeltme) ilgilidir. Bu değerlerinde 1 piksel den küçük olması istenmektedir. Gerçekleştirilen kalibrasyon uygulamasında tüm düzeltmelerin karesel ortalama hatası için 0.87 piksel ve en büyük düzeltme içinde 2.43 piksel değerleri elde edilmiştir.

4.4.3 Resim çekimi

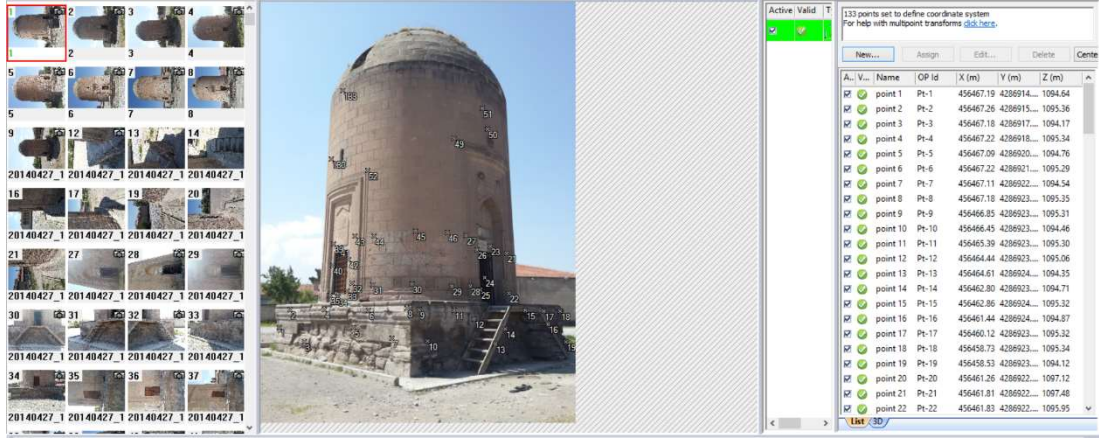
Kamera kalibrasyon işleminden sonra kümbetin resimlerinin çekimine geçilmiştir. Çalışma kapsamında, konvergent çekim yöntemiyle kümbetin toplam 100 adet resmi çekilmiş ve bunlardan 54 tanesi projede kullanılmıştır. Şekil 4.11 kümbet ve resim çekim konumlarını göstermektedir. Resim çekim mesafesi yaklaşık 5-20 m aralığındadır. Ortalama çekim mesafesi ise yaklaşık 9 m'dir.



Şekil 4.11: Resim çekim konumları.

4.4.4 Fotogrametrik değerlendirme

Fotogrametrik değerlendirme, PhotoModeler Scanner 2013 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Değerlendirmenin ilk aşamasında resimler ve kontrol noktası dosyası programa dahil edilmiş ve her bir resim üzerinde, kontrol noktaları ve bağlantı noktaları ölçülerek diğer resimlerdeki ilgili noktalarla referanslandırılmıştır. Bu ölçmeler, özel hedef işaretleri ve diğer işaretlenemeyen doğal kontrol noktaları için elle yapılmıştır (Şekil 4.12). Uygulamada 123 kontrol noktası kullanılmış geriye kalan 10 nokta ise fotogrametrik değerlendirmenin doğruluğunu test etmek amacıyla denetleme noktası olarak kabul edilmiştir.



Şekil 4.12: Kontrol noktalarının tanımlanması.

Program her bir resim üzerinde uygun dağılımlı yeteri kadar kontrol noktasının ölçülmesi durumunda (en az 4 nokta), söz konusu resmin yaklaşık yöneltmesini gerçekleştirmektedir.

Bütün resimlerin yaklaşık yöneltme işlemleri tamamlandıktan sonra demet dengelenmesi işlemi gerçekleştirilmiştir (Ek A). Dengelemede kamera kalibrasyon parametreleri de tekrar hesaplatılmıştır. Dengeleme işlemi sonucunda toplam son hata değeri 0.844, tüm düzeltmelerin karesel ortalama hata değeri 1.56 piksel ve en büyük düzeltme değeri 5.03 piksel olarak elde edilmiştir. Hesaplanan bu değerler yazılımın yardım menüsünde bahsedilen sınır değerler içeresindedir.

Fotogrametrik değerlendirmenin doğruluğunu kontrol etmek amacıyla denetleme noktalarının dengeleme sonucunda hesaplanan koordinatlarıyla bilinen koordinat değerleri karşılaştırılmış ve karşılaştırma sonucunda koordinat bileşenleri arasında ortalama 7 mm fark olduğu görülmüştür.

Yazılımın kalibrasyon gridiyle gerçekleştirilen ilk kamera kalibrasyon uygulamasında hesaplanan parametrelerin kullanıldığı tekrar bir dengeleme yapılmış ve dengeleme sonucunda toplam son hata değeri 0.89, tüm düzeltmelerin karesel ortalama hata değeri 1.64 piksel ve en büyük düzeltme değeri de 5.44 piksel olarak hesaplanmıştır. Dengeleme sonuçları karşılaştırıldığında çekim sırasında kalibrasyon yöntemiyle hesaplanan kalibrasyon parametrelerinin fotogrametrik değerlendirmenin geriye kalan bölümünde kullanılması daha uygun görülmüştür.

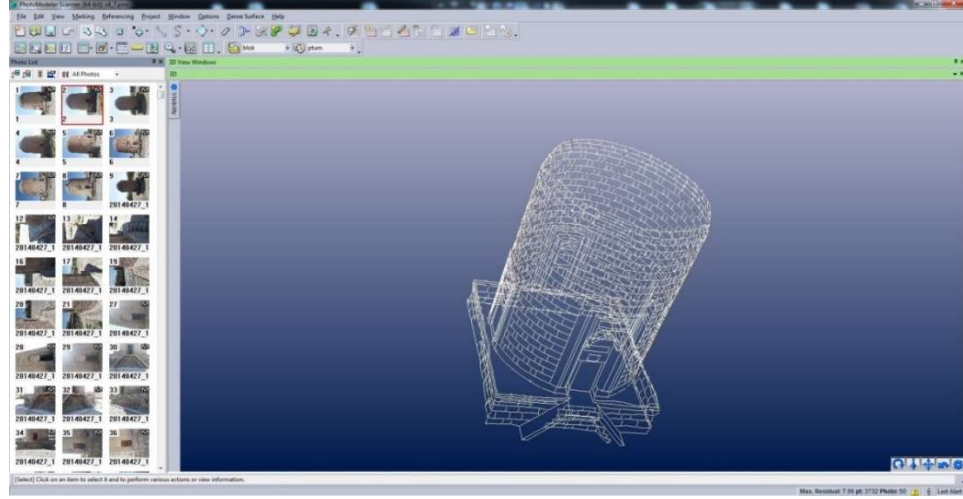
Yöneltme işlemleri tamamlandıktan sonra programda fotogrametrik değerlendirme aşamasına geçilmiştir. Kümbetin ilgili detayını çevreleyen köşe noktaları işaretlenmiş

ve noktalar arası çizilmiştir. Bir resim üzerinde işaretlenen bir detay noktasının diğer resimdeki karşılığını bulmak için epipolar çizgilerden yararlanılmıştır (Şekil 4.13). Tüm projede toplam 2816 farklı detay noktası kullanılmış ve her bir resim üzerinde ortalama 144 nokta işaretlenmiştir. Bütün detay noktaları işaretlendikten sonra demet dengelemesine geçilmiş ve dengeleme sonucunda toplam son hata değeri 0.99, tüm düzeltmelerin karesel ortalama hata değeri 1.41 piksel ve en büyük düzeltme değeri 6.36 piksel olarak hesaplanmıştır.



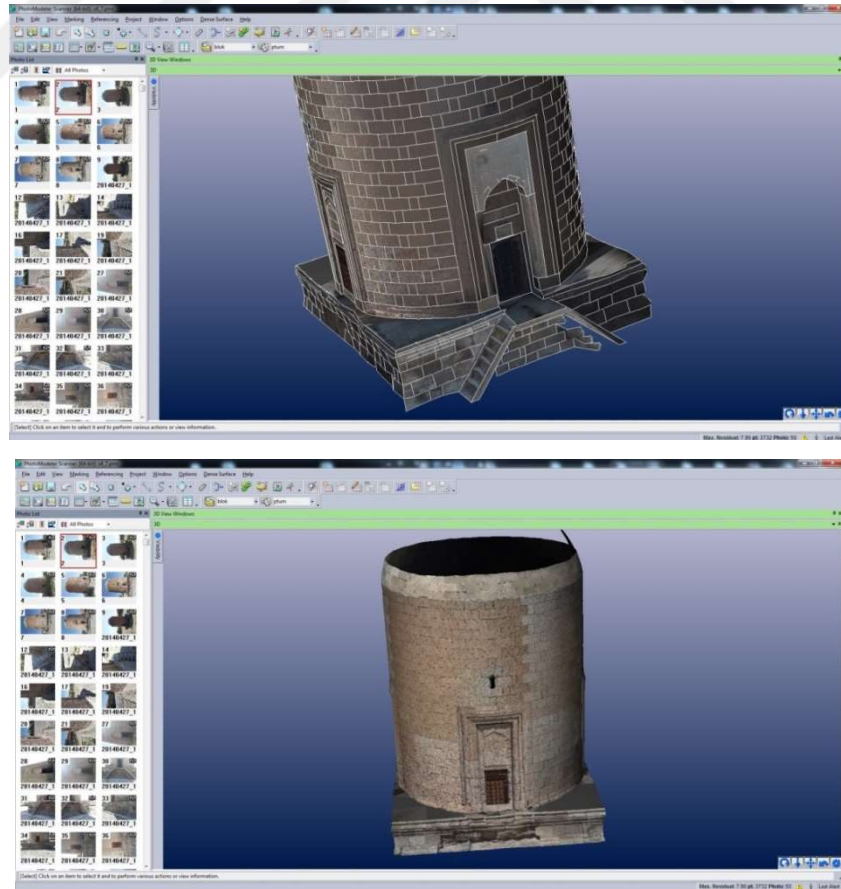
Şekil 4.13: Epipolar çizgi.

Değerlendirme sonrası elde edilen üç boyutlu tel kafes modeli Şekil 4.14'te gösterilmektedir.



Şekil 4.14: Tel kafes model.

3 boyutlu modellemenin son işlem aşaması ise doku kaplamadır. Bu amaçla önce kümbet yüzeyine ait toplam 1157 yüzey parçası oluşturulmuş ve resimlerdeki doku (texture) yapısı modele taşınmıştır. (Şekil 4.15).



Şekil 4.15: Doku kaplaması.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada cep telefonu kamera görüntülerinin fotogrametrik uygulamalarda kullanılabilirliğinin araştırılması amacıyla iki aşamalı bir uygulama gerçekleştirilmiştir. Birinci aşmada birbirinden farklı 6 adet cep telefonu kamerası ve iki farklı sayısal kompakt RÇM'nin resim koordinat düzeltmeleri, doğruluk ve prezisyon yönünden karşılaştırmaları yapılmıştır. Değerlendirmeler sonucunda en iyi değerler Canon Powershot SX210 IS sayısal kompakt RÇM ve Samsung Galaxy S4 marka cep telefonu kamerası için elde edilmiştir. Resim koordinat düzeltmelerinin karesel ortalama hataları her iki kamera içinde yaklaşık 1/4 piksel oranında hesaplanmıştır. Diğer kameralar için bu oran 1/2-1/3 piksel aralığındadır. Tüm kameralar için cisim uzayında mm altı düzeyde doğruluk değerleri elde edilmiştir.

Elbette ki fotogrametrik bir değerlendirme sonucunda elde edilen doğruluk değerlerine resim çekim mesafesi, görüntü çözünürlüğü, kamera kalibrasyonun kalitesi, resim çekim geometrisi gibi birçok faktör etki etmektedir. Yapılan bu çalışmada da bütün kameralar için aynı çekim geometrisi kullanılarak bir standart sağlanmaya çalışılmıştır.

İkinci işlem aşamasında ise kullanılan cep telefonu kameralarından en iyi ampirik doğruluğu veren Samsung S4 cep telefonu kamerası ile alınan görüntüler kullanılarak Kayseri'de bulunan tarihi Sırçalı Kümbet'in 3 boyutlu fotogrametrik yöntemle modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Fotogrametrik değerlendirmede kümbetin, ortalama 9 metre uzaklıktan çekilen 54 resmi kullanılmıştır. Kümbetin fotogrametrik değerlendirmesinde kamera kalibrasyonu da uygulanmış ve hesaplanan bu parametre değerleri kullanılmıştır. Değerlendirme sonucunda yazılım tarafından istenen toplam son hata değeri, tüm düzeltmelerin karesel ortalama hata değeri ve en büyük düzeltme değeri gibi dengeleme kalite ölçütleri sağlanmıştır. Fotogrametrik değerlendirme sonucunda kümbetin üç boyutlu foto modeli elde edilmiştir.

Yapılan fotogrametrik değerlendirmenin doğruluğunu kontrol etmek amacıyla kümbetin üzerinde, koordinatları bilinen 10 nokta değerlendirmeye denetleme noktası olarak sokulmuş ve hesaplanan koordinatlarla karşılaştırılarak X doğrultusunda 8 mm,

Y doğrultusunda 9 mm ve Z doğrultusunda da 7 mm yaklaşık doğruluk değerleri elde edilmiştir.

Sonuç olarak cep telefonu kamera görüntülerinin deformasyon ölçmelerinden üç boyutlu modelleme çalışmalarına kadar birçok fotogrametrik uygulamada kullanılabileceği söylenebilir. Teknolojik gelişmelere paralel olarak cep telefonu kameraları daha da gelişecek ve bunun sonucu cep telefonu kamera görüntülerinin kullanıldığı fotogrametrik uygulamalardan daha iyi sonuçlar elde etmek mümkün olacaktır.



6. KAYNAKLAR

- Agapiou, A. ve Georgopoulos A., 2006. Photogrammetric potential of digital cameras in handheld gadgets for digital close range applications, The 7th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage.
- DeChant, L. F., 2012. Close-range photogrammetry and mobile phone cameras, DeChant Consulting Services – DCS Inc, Bellevue, Washington.
- Göksel, E., 2010. Sayısal Fotoğrafa Giriş, Anadolu Üniversitesi Ders Kitabı Yayını, Yayın no:2171, 84-93, Eskişehir.
- Gruen, A. ve Akça, D., 2009. Comparative geometric and radiometric evaluation of mobile phone and still video cameras, The Photogrammetric Record 24(127): 217–245, Zürih.
- İkizler, E., 2011. Sayısal fotoğraf makineleri, Anadolu Üniversitesi Ders Kitabı Yayını, Yayın no:2324, 9-10, Eskişehir.
- Koçak, M. G. ve Akarsu, V., 2002. Serbest ve dinamik ağ çözümleri ile uygulamalar, Selçuk Üniversitesi Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Öğretiminde 30. Yıl Sempozyumu, 482, Konya.
- Luhmann, T., 2006. Close range photogrammetry principles methods and applications, Whittles Publishing, Cilt 1, 201-283, Wittles.
- Luhmann, T., 2014. Close range photogrammetry and 3D imaging, Walter de gruyter gmbh, Cilt 2, 567-572, Berlin.
- Marangoz, A. M., 2002. Sayısal kameralarla tarihsel yapıların rölövelerinin çıkarılması olanakları, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Sunar, F., 2011. Uzaktan Algılama, Anadolu Üniversitesi Ders Kitabı Yayını, Yayın no:2320, 95, Eskişehir.
- Yaşayan, A., 2011. Fotogrametri, Anadolu Üniversitesi Ders Kitabı Yayını, Yayın no:2295, 120, Eskişehir.
- Yılmaztürk, F., 2008. Yapı elemanlarının dinamik testlerinde yer değiştirmelerin izlenebilmesi için videogrametrik bir sistem tasarımı, Doktora Tezi, İTÜ., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

URL-1 <https://en.wikipedia.org/wiki/Camera_phone>, alındığı tarih: 10.03.2016.

URL-2 <<http://geekaphone.com/>>, alındığı tarih: 31.08.2015.

URL-3 <https://en.wikipedia.org/wiki/Image_sensor_format>, alındığı tarih: 31.08.2015.

URL-4 <<http://www.teknokulis.com/Haberler/Mobil/2013/04/21/kamera-karsilastirmasi-galaxy-s4-htc-one-xperia-z-iphone-5-lumia-920-galaxy-s3>>, alındığı tarih: 31.08.2015.



EKLER



EK.A Demet dengelemesi raporu çıktısı

Status Report Tree

Project Name: ersin_kn111.pmr

Problems and Suggestions (1)

Project Problems (1)

Problem: The largest point residual in your project (Point7 - 5.43) is greater than 5.00.

Suggestion: In normal projects, strive to get all point residuals under 5.00 pixels. If you have just a few high residual points, study them on each photo to ensure they are marked and referenced correctly. If many of your points have high residuals then make sure the camera stations are solving correctly and that you are using the best camera parameters possible.

Problems related to most recent processing (0)

Information from most recent processing

Last Processing Attempt: Tue Dec 08 14:55:14 2015

PhotoModeler Version: 2013.0.0.911 - final,full (64-bit)

Status: successful

Processing Options

Orientation: on

All photos oriented.

Number of photos oriented: 54

Global Optimization: on

Calibration: off

Constraints: on

Total Error

Number of Processing Iterations: 4

Number of Processing Stages: 2

First Error: 0.890

Last Error: 0.887

Precisions / Standard Deviations

Quality

Photographs

Total Number: 54

Bad Photos: 0

Weak Photos: 2

OK Photos: 52

Number Oriented: 54

Number with inverse camera flags set: 0

Cameras

Camera1: GTcAlib

Calibration: yes

Number of photos using camera: 54

Average Photo Point Coverage: 75%

Point Marking Residuals

Overall RMS: 1.644 pixels

Maximum: 5.433 pixels

Point 7 on Photo 68

Minimum: 0.315 pixels

Point 6372 on Photo 66

Maximum RMS: 3.956 pixels

Point 7

Minimum RMS: 0.181 pixels

Point 6372

Point Tightness

Maximum: 0.042 m

Point 51

Minimum: 0.0016 m

Point 7680

Point Precisions

Overall RMS Vector Length: 0.00499 m

Maximum Vector Length: 0.00965 m

Point 6386

Minimum Vector Length: 0.00227 m

Point 36

Maximum X: 0.00634 m

Maximum Y: 0.00779 m

Maximum Z: 0.00588 m

Minimum X: 0.00128 m

Minimum Y: 0.00128 m

Minimum Z: 0.00104 m

Point Angles

Maximum: 89.96 degrees

Point 7541

Minimum: 41.23 degrees

Point 7055

Average: 75.69 degrees

Check measurements

Check point delta

Max: 0.0388 m (19, OP19)

Max X,Y,Z

X: 0.0349 m (19, OP19)

Y: 0.0292 m (81, OP81)

Z: 0.0152 m (85, OP85)

Min: 0.00549 m (59, OP59)

Min X,Y,Z

X: 7.47e-005 m (112, OP112)

Y: 5.19e-005 m (75, OP75)

Z: 0.000102 m (63, OP63)

Average: 0.0162 m (from 133 items)



ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı : ALİ ERSİN GÜRBAK

Doğum Tarihi ve Yeri: 01.01.1984 TRABZON

E-posta adresi : aliersing@hotmail.com

EĞİTİM BİLGİLERİ (Kurum ve Yıl)

Lisans : Selçuk Üniversitesi 2008

Yüksek Lisans : Aksaray Üniversitesi (Öğrenci) 2016

Doktora :

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLERİ

2005 – 2008 yılları arasında özel sektörde çalışma.

2008 – 2009 yılları arasında askerlik hizmetinin Yedek Subay olarak ifası.

2010 yılından bu yana Devlet Su İşleri (Kayseri) bünyesinde çalışma.