

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FOTOGRAMETRİK VERİ ELDE ETME
SİSTEMLERİNİN KALİBRASYON YÖNTEMLERİ**

**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

701355

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Müh. Ali Osman DEMİRAY
501981201**

101355

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 19 Eylül 2001

Tezin Savunulduğu Tarih: 31 Ekim 2001

Tez Danışmanı: Prof.Dr. Sıtkı KÜLÜR

Diğer Jüri Üyeleri: Prof.Dr. Gönül TOZ (İ.T.Ü)

Prof.Dr. Ahmet YAŞAYAN (Y.T.Ü)

EKİM 2001

ÖNSÖZ

Öncelikle yüksek lisans öğrenimim ve tez çalışmam süresince bana yol gösteren ve desteğini esirgemeyen tez danışmanım Prof. Dr. Sıtkı KÜLÜR'e, uygulama konusunda yardımlarını esirgemeyen araştırma görevlileri Bahadır ERGÜN ve T. Murat ÇELİKOYAN'a ve tez çalışmamda emeği geçen tüm arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca benim için bugüne kadar maddi ve manevi hiç bir fedakarlıktan kaçınmayan aileme de sonsuz şükranlarımı sunarım.

Ekim 2001

Ali Osman DEMİRAY



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
KISALTMALAR	iv
TABLO LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
SEMBOL LİSTESİ	vii
ÖZET	viii
SUMMARY	ix
1.GİRİŞ	1
2. FOTOGRAMETRİNİN TARİHİ GELİŞİMİ VE MATEMATİKSEL MODELİ	3
2.1 Fotogrametrinin Tarihi Gelişimi	3
2.1.1 Grafik Fotogrametri	5
2.1.2 Analog Fotogrametri	5
2.1.3 Analitik Fotogrametri	5
2.1.4 Dijital Fotogrametri	5
2.1.4.1 Dijital Fotogrametrinin Temelleri	6
2.1.4.2 Dijital Resim ve Kullanım Amacı	6
2.1.4.3 Dijital Resim Kullanmanın Yararları	7
2.1.4.4 Yersel Dijital Fotogrametrik Sistemler	7
2.1.4.5 Dijital Veri ve Özellikleri	7
2.1.4.6 Dijital Fotogrametride Veri Toplama Yöntemleri	9
2.1.4.7 Bir Dijital Donanımın Özellikleri	11
2.2 Fotogrametrinin Matematiksel Modeli	12
3. FOTOGRAMETRİNİN MÜHENDİSLİK ALANINDAKİ UYGULAMALARI	15
3.1 Mühendislik Alanındaki Uygulamalarda Kullanılan Fotogrametrik Sistem Yapısı	15
3.1.1 Bağımsız Sistemler	16
3.1.1.1 Bağımsız Sistemlerde İşlemin Gerçekleştirilmesi	18
3.1.2 Bütünleşik Sistemler	19
3.1.2.1 Bütünleşik Sistemlerde İşlemin Gerçekleştirilmesi	21

3.2 Uygulama Alanları	24
3.2.1.Mimarlık ve Arkeolojik Çalışmalardaki Uygulamaları.....	24
3.2.1.1 Arkeolojik Amaçlı Çalışmalarda Kullanılması	26
3.2.2 Tıp Alanındaki Uygulama Alanları.....	27
3.2.3 Fotogrametrinin Sanayi Uygulama Alanları.....	28
3.2.3.1 Trafik Kazaları ve Suç Anlarının Bilgisayar Ortamında Elde Edilmesinde Kullanımı.....	28
3.2.3.2 Animasyon Amaçlı Kullanımı.....	28
3.2.3.3 Eğitim Amaçlı Çalışmalarda Kullanımı.....	28
3.2.3.4 Bina İç Tasarım Uygulamalarında Kullanımı.....	29
3.2.3.5 Makine Mühendisliği Uygulamalarında Kullanımı.....	29
3.2.3.6 Kalite Kontrol Amaçlı Kullanımı.....	29
3.2.3.7 Uçak Endüstrisindeki Kullanımı.....	29
3.2.3.8 Otomotiv Endüstrisindeki Kullanımı.....	29
3.2.3.9 Nükleer Güç Santrallerinde Kullanılması.....	30
3.2.3.10 Petrokimyasalları İşleme ve Üretimi Fabrikalarında Kullanımı.....	30
3.2.3.11 Kağıt Üretim Sektöründe Kullanımı.....	30
4. FOTOGRAMETRİK VERİ ELDE ETME SİSTEMLERİNİN KALİBRASYON YÖNTEMLERİ	31
4.1 Kalibrasyonun Tanımı ve Amacı.....	31
4.1.1 Resim Çekme Makinalarının İç Yöneltilme Elemanları ve Hata Kaynakları.....	31
4.1.1.1 Radyal Distorsiyon	31
4.1.1.2. Teğetsel Distorsiyon.....	33
4.2 Resim Çekme Makinelerinin Kalibrasyon Yöntemleri.....	34
4.2.1 Klasik Yöntemler.....	34
4.2.1.1 Çekim Sırasında Kalibrasyon.....	34
4.2.1.2. Kendine Özgü Kalibrasyon.....	35
4.2.1.3 Geometrik Özellikleri Kullanarak Kalibrasyon.....	35
4.2.2 Lineer Transformasyon ile Kalibrasyon Yöntemleri.....	36
4.2.2.1 Direkt Lineer Transformasyon Yöntemi.....	36
4.2.2.2 Ağırlıkların Dikkate Alınmasıyla En Küçük Kareler Yöntemi.....	45
4.2.2.3 Çift Düzlem Yöntemi.	50

4.2.2.4 Ölçme Yöntemi.....	52
4.2.2.5 Değiştirilmiş Direk Transformasyon Yöntemi.....	56
4.2.2.6 Sınırlandırılmış Direkt Transformasyon Yöntemi.....	59
4.2.3 Bilinen Yıldız Konumlarıyla Kalibrasyon.....	60
4.2.4 Ganiometrelerle Kalibrasyon Yöntemleri.....	64
4.2.4.1 Ganiometrelerle Kalibrasyon	64
4.2.4.2 Çoklu Kolimatör Işınlarıyla Kalibrasyon.....	66
4.2.5 Dijital Resim Çekme Makinalarının Kalibrasyonu.....	68
4.2.5.1 Dijital Kamera Modeli.....	68
4.2.5.2 Spektral Özellikler.....	69
4.3 Diğer Fotogrametrik Sistemlerin Kalibrasyonu.....	71
4.3.1 Tarayıcıların Kalibrasyonu.....	71
4.3.2 Mekanik Sistemlerin Kalibrasyonu.....	71
4.3.3 Foto Dedektörlerin Kalibrasyonu.....	72
4.3.3.1 Geometrik Özellik ve Zıt Transfer.....	72
4.3.3.2 Radyometrik Özellikler.....	72
4.3.3.3 Spektral Özellikler.....	73
5.UYGULAMA	74
5.1 Amaç.....	74
5.2 Kullanılan Araç ve Test Alanı.....	75
5.3 Yapılan Çalışmalar	76
5.3.1 Nikon 950 Resim Çekme Makinesinin 7mm ve 21mm Zoomlarında Kalibre Edilmesi.....	77
5.4 Sonuçlar.....	82
6. SONUÇLAR	85
KAYNAKLAR	87
EKLER VE ÇİZİMLER	89
ÖZGEÇMİŞ	103

KISALTMALAR

DLT	: Direkt Lineer Transformasyon
MDLT	: Değiştirilmiş Direkt Lineer Transformasyon
PSE	: Temel Eigen Vektör (Principle Eigenvector)
CCD	: Dijital Kamera (Charge Couple Device)
MSE	: Karesel Ortalama Hata
RÇM	: Resim Çekme Makinesi



TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 4.1. Parametre sayısına bağılı olarak gerekli olan minimum kontrol noktası sayısı.....	40
Tablo 5.1. Kodak DCS200 için kalibre edilmiş kamera değerleri.....	82
Tablo 5.2. Nikon 950 R.Ç.M ile 7mm zomunda kalibre edilmiş kamera değerleri.....	82
Tablo 5.3. Nikon 950 R.Ç.M ile 21mm zomunda kalibre edilmiş kamera değerleri.....	83
Tablo 5.4. Kodak DCS200 için korelasyonlu ve korelasyonsuz değerler.....	83
Tablo 5.5. Nikon 950 R.Ç.M ile 7mm zomu için korelasyonlu ve korelasyonsuz değerler.....	84
Tablo 5.6. Nikon 950 R.Ç.M ile 21mm zomu için korelasyonlu ve korelasyonsuz değerler.....	84

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa No
Şekil 2.1 Fotogrametrinin Tarihi Gelişimi.....	4
Şekil 2.2 Resim Koordinat Sistemi.....	8
Şekil 2.3 Analog ve dijital resimde düz çizginin gösterimi.....	9
Şekil 2.4 Fotogrametrinin Matematiksel Modeli.....	12
Şekil 2.5 Yersel Fotogrametrik İzdüşüm.....	13
Şekil 3.1 Bağımsız sistemler.....	17
Şekil 3.2 İlk Ölçme İçin Mevcut Olan İşlem Akış Şeması.....	18
Şekil 3.3 Tekrarlı Ölçme İçin Mümkün Olan İşlem Akış Şeması.....	19
Şekil 3.4 Bütünleşik Sistemler.....	20
Şekil 3.5 Sabit modda akış şeması.....	22
Şekil 3.6 Hareketli Modda Akış Şeması.....	23
Şekil 3.7 Yakın Resim Fotogrametrisinde Multi Konvergent Durumun Gösterimi.....	24
Şekil 4.1 (b), (a)'da gösterilen düz çizgilerin distorsiyon etkisiyle aldıkları durumu gösterir.....	32
Şekil 4.2 Çeşitli Kamera Lenslerine Açısal Distorsiyon Etkisi.....	33
Şekil 4.3 Resim koordinat sistemi ile cisim koordinat sistemi arasındaki geometrik ilişki.....	36
Şekil 4.4 Çift düzlemlerin gösterimi.....	50
Şekil 4.5 Çift kamera ile çift düzlem yönteminin gerçekleştirilmesi.....	52
Şekil 4.6 Kontrol noktalarının açısal konumlarının ölçümü.....	54
Şekil 4.7 Kalibrasyon alanının alt alanlara bölünmesi.....	59
Şekil 4.8 Pinhole kamera modeli.....	60
Şekil 4.9 Tüm optik parametrelerin optimizasyonu sonrasında pinhole modeli için radyal hata.....	61
Şekil 4.10 Tüm optik parametrelerin optimizasyonu sonrasında değiştirilen pinhole modeli için radyal hata.....	62
Şekil 4.11 Atmosferden geçen ışın yolu ve gerçek zenit görüş çizgisi arasındaki yükseklik düzeltmesi.....	63
Şekil 4.12 Kolimatörle kalibrasyonunu genel yapısı.....	65
Şekil 4.13 Teodolite benzeyen alternatif goniometre sistemi.....	66
Şekil 4.14 Çoklu kolimatörler metodunun şematik gösterimi.....	67
Şekil 4.15 Dijital kameralarla resim elde etme işleminin gösterimi.....	68
Şekil A.1 Pictran-D ve B değerlendirme programlarının çalışma ortamının görünüşü.....	90

SEMBOL LİSTESİ

x_0, y_0	: Resim ana nokta koordinatları
c	: Odak uzaklığı
k	: Ölçek faktörü
u, v	: Resmin gerçek koordinatları
u', v'	: Resmin distorsiyona uğramış koordinatları
x, y	: Resmin gerçek normalleştirilmiş resim koordinatları
r_{ij}	: Dönme matrisi elemanları
λ_u, λ_v	: Birim dönüşümü katsayıları
$L_1, L_2, L_3, \dots, L_{11}$	: Direkt lineer transformasyon (DLT) parametreleri
L_{12}, L_{13}, L_{14}	: Optik distorsiyonla ilgili DLT parametreleri
L_{15}, L_{16}	: Merkezi distorsiyonla ilgili DLT parametreleri

FOTOGRAMETRİK VERİ ELDE ETME SİSTEMLERİNİN KALİBRASYON YÖNTEMLERİ

ÖZET

Günümüzde fotogrametri alanındaki teknolojik gelişmelerle yersel fotogrametri mühendislik, uçak ve otomotiv endüstrisinde, tıp alanlarında, eğitim alanında, mimari ve arkeoloji çalışmalarda vb. olmak üzere bir çok sanayi alanlarında geniş olarak kullanılmaktadır.

Bir yersel fotogrametrik çalışmada fotogrametrik veri elde etmek için öncelikle resim çekme makinelerine, değerlendirme alet ve donanımlarına gereksinim vardır. Diğer jeodezik ölçmelerde olduğu gibi fotogrametride de doğruluk ve hassasiyet çok büyük önem arz etmektedir. Elde edilen ürünün kalitesinin bilinmesi gerekir. Dolayısıyla fotogrametride doğru sonuçlar elde edebilmek için kullanılan sistemin kalibrasyonunun yapılması gerekmektedir. Bir sistemin kalibrasyonu sistemi en iyi şekilde tanımlayan parametrelerin bulunmasıdır. Fotogrametride bu parametreler resim çekim merkezinin odak uzaklığı (c), resim koordinat sistemi eksenlerinin yönleri ve dönüklükleri ve distorsiyon parametreleridir.

Bu tez çalışmasında ilk olarak fotogrametrinin temel esasları ele alındıktan sonra dijital fotogrametrinin mühendislik alanındaki uygulama alanlarına gözetilmiştir. Daha sonra fotogrametrik veri elde etme sistemlerinin kalibrasyon yöntemleri ve özellikleri incelenmiş avantajları ve dezavantajlarıyla birlikte yöntemlerin karşılaştırması yapılmıştır. Kodak DCS200 ve Nikon 950 (zoom özellikli) dijital fotogrametrik resim çekme makinelerinin kalibrasyonu test alanında gerçekleştirilmiştir. Kalibrasyon sonuçları incelenerek sunulmuştur

THE CALIBRATION METHODS OF THE PHOTOGRAMMETRIC DATA ACQUIZATION SYSTEMS

SUMMARY

Nowadays, close range photogrammetry developed very fast and used for different industrial engineering problems, architectural and archeological works, education and ship manufacturing and repairing.

Camera, evaluation device and evaluation hardwares are needed to obtain photogrammetrical data at the photogrammetry. Accuracy and precision are most important at the photogrammetry like the other geodesical measurements. Quality of the obtained product must be known. So using systems at the photogrammetry must be calibrated to obtain accuracy results. Calibration is obtaining of the parameter that defines the systems best. These photogrammetrical parameters are focal length, directions and rotations of the picture coordinate system axes and distortion parameters.

In this study firstly fundamentals of the photogrammetry and digital photogrammetric applications are explained. Then the calibration methods of the photogrammetric data acquisition systems are explained and compared with each others with their advantages and disadvantages. Kodak DCS200 and Nikon 950 (with zoom properties) digital cameras are calibrated at the test fields. The calibration results are examined.

1.GİRİŞ

Fotogrametri, cisimler ve oluşturdıkları çevrede yayılan ışınların şekillendirdiği fotografik görüntülerin ve yaydıkları elektromagnetik enerjinin kayıt, ölçme ve yorumlama işlemleri sonunda bu cisimler ve çevre hakkında güvenilir bilgilerin elde edildiği bir bilim dalıdır. Kısaca fotogrametri, bir cismin resminin çekilmesi ile şekil ve konumuna göre yeniden oluşturulmasıdır.

Fotogrametrinin temel amacı, plan ve harita yapımı olmakla birlikte zamanla modern tekniğin gelişmesiyle hemen hemen her alanda yerini almıştır. Fotogrametri cismin bir veya birkaç resimden yararlanılarak şeklinin, boyutlarının ve konumunun hassas bir biçimde belirlenmesi amaçlamaktadır. Resim ölçmesi geniş kapsamlı olarak aslına uygun merkezi izdüşümün oluşturulmasına ait optik-mekanik yöntem olan fotoğrafçılığın ortaya çıkışıyla grafikleşmiştir. Fotografik yöntemler diğer yöntemlerin uygulanamadığı alanlarda uygulanabilmesiyle avantaj sağlar. Fotogrametrinin sağlamış olduğu avantajlar şunlardır:

- 1- Ölçme işlemi yer ve zaman yönünden resim çekme işleminden bağımsız olup sakin ve rahat bir ortamda her an yapılabilir ve tekrarlanabilir.
- 2- Cisimlere dokunmadan cismin ölçümü gerçekleştirilir.
- 3- Karmaşık yapılı ve hareket halindeki cisimlerin şekli ve davranışları kolaylıkla belirlenebilir.
- 4- Resimler birer belge niteliğinde olup istenildiğinde tekrar kullanılabilir.
- 5- Gözle görülemeyen ışınlardan belli ölçülerde yararlanılabilir.

Temelde fotogrametri resim çekme noktasının konumuna göre,

- 1- Hava fotogrametrisi (Uzak mesafe fotogrametrisi),
- 2- Yersel Fotogrametri (Yakın mesafe fotogrametrisi) olmak üzere ikiye ayrılır.

Hava fotogrametrisi başlıca topografik veya tematik ve sayısal arazi modelleri elde etmek için kullanılır. Yersel fotogrametri ise mimarlık, harita ve inşaat mühendisliği (yapıların mevcut konumlarının kontrolü, deformasyon ve hasar tesbiti amacıyla)

arkeolojik amaçlı çalışmalarda, cerrahide özellikle plastik cerrahide ve trafik kazaları veya suçların belgelenmesi gibi polisiye çalışmalarda yoğun olarak kullanılmaktadır.

Mühendislikte özellikle jeodezi ve fotogrametri mühendisliğinde alet donanımlarının ve ölçüm aletlerinin ölçme doğruluğu ve yeterlilik dereceleri bilinmelidir. Bu sayede elde edilen veriler kullanılarak ortaya çıkan problemin çözümünde en uygun alet donanımı ve ölçme yöntemi seçilebilmektedir.

Bu tez çalışmasında temel olarak fotogrametrinin temel esaslarının anlatıldıktan sonra dijital fotogrametrinin mühendislik alanındaki uygulama alanlarına gözetilmiştir. Son olarak da fotogrametrik veri elde etme sistemlerinin kalibrasyon yöntemleri ve özellikleri incelenmiş avantajları ve dezavantajlarıyla birlikte yöntemlerin karşılaştırması yapılarak Kodak DCS200 ve Nikon 950 dijital fotogrametrik kameralarının kalibrasyonu test alanında gerçekleştirilmiştir. Kalibrasyon sonuçları incelenerek sunulmuştur.

2. FOTOGRAMETRİNİN TARİHİ GELİŞİMİ VE MATEMATİKSEL MODELİ

2.1. Fotogrametrinin Tarihi Gelişimi

Fotogrametri Eski Yunancada ışık anlamına gelen “photos”, çizgi anlamına gelen “gramma” ve ölçme anlamına gelen, “metron”, kelimelerinin birleşmesiyle elde edilmiştir. İsim yönünden fotogrametrinin fotografla birlikte ortaya çıktığı sanılır. Ancak bunun aksine perspektifin bulunması ve Leonardo Da Vinci, Albert Dürer gibi sanatçılar tarafından resim sanatında kullanılmasıyla geometrik uzayın düzleme izdüşümüne ait temeller atılmaya başlanmıştır.

Fotogrametrinin geometrik ve analitik esasları 1800’lü yıllarda S.Finsterwalder tarafından genişletilmiştir. Elektronik çağında ortaya çıkan bütün analitik yöntemler kendisinin ve öğrencilerinin 20.yy başlarında yaptıkları çalışmalara dayanmaktadır. Fotogrametrinin topografik uygulamalar Alman jeologlar tarafından ele alınmış ve geliştirilmiştir. W.Jordan bunu 1874’te Sahra Vakası Dachel’de başarıyla kullanmış ve böylece yeni yöntemin bilinmeyen bölgelerdeki keşif seyahatlerinde başarılı olacağı gösterilmiştir. Yersel fotogrametrinin özellikle dağlık alanlarda harita yapımındaki avantajlarını İtalyan askeri coğrafyacıları Ferro ve Paganinni farketmiş ve bundan sistemli olarak yararlanmışlardır. 1880’de Alpler’de fotogrametrik arazi çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

1851 yılında Fransız binbaşı A.Caussedat ilk yersel ölçme kameralarını yapmış ve bunları “metrographie” adını verdiği plançete ile klasik arazi alımına benzeyen bir topografik alım yöntemi kullanmıştır. Meydanbauer bunu, 1858’den itibaren mimarlık ölçmelerindeki özel problemlere uygulanması ile mimarlık fotogrametrisinin bulucusu olmuştur.

İnsanın aynı cisme ait 2 düzlem perspektifi, stereoskopik görme olayında uzay modelini birleştirme yeteneğinden faydalanma C.Pulfrich tarafından streo-komparatörlerin çizilmesi ve Carl Zeiss Jena tarafından da imal edilmesiyle ölçme tekniğine dahil edilmiştir. Böylece fotogrametrinin diğer bütün topografik haritalama yöntemlerinin önüne geçeceği olasılığı gerçekleşmiştir. Topografik fotogrametriye

esas geçiş ise 1908 yılında Avustralyalı askeri coğrafiyacısı E.V.Orel'in yaptığı mekanik değeriendirme aleti olan stereo-autograph ile gerçekleşmiştir. Bu aletin tam fonksiyonlu modeli 1911'de Carl Zeiss Jena tarafından yapılmıştır. Stereo-autograph, stereo modelde tesviye eğrilerinin çizimini mümkün kılmıştır.

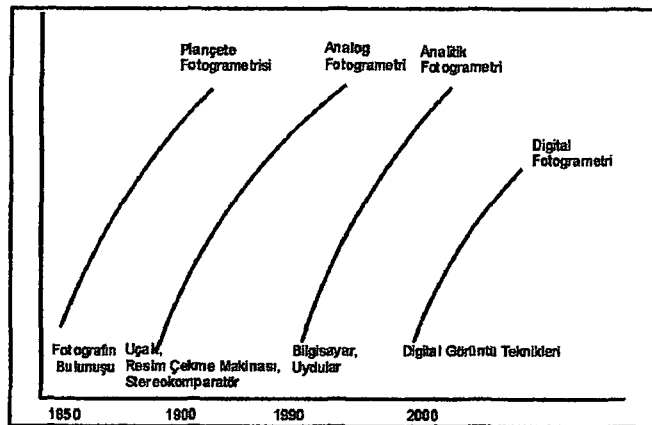
Fotogrametride asıl gelişme resmin havadan çekimiyle başlamıştır. Bu nedenle resim ölçme işleminin hava fotogrametrisinde geniş bir yer bulur. Avusturalyalı askeri coğrafiyacısı Schempflug'u 1897'den itibaren hava fotoğrafının düşeye çevrilmesi yani yaklaşık yatay arazinin tek fotoğrafının ölçeye uygun olarak plana geçirilmesi temel çalışmasına sevk eden de hava fotoğraflarının doğrudan doğruya haritaya benzerliği olmuştur.

Hava fotoğraflarının sistematik olarak kullanılması ancak 1.Dünya savaşı ile olağanüstü ivme kazanan motorlu uçakların gelişmesiyle ortaya çıkmıştır. O.Mester tarafından 1915 yılında ilk seri ölçme kamerasının üretilmesiyle fotoğrafların otomatik olarak çekilmesine imkan vermiştir.

Fotogrametri son bulunuşundan sonra 120 yıl içinde günümüzde teknik ve kültürel bir yapı taşı haline almış olup, uzay bilimlerinden yaşam bilimcilerine pek çok disiplin ile yakın ilişki ve işbirliği içinde olan bir bilim dalı olarak yakın gelecekte dünya bilimi içinde atılacak olan büyük adımlarla önemli bir etken olacaktır.

Fotogrametri tarihsel gelişimi açısından incelendiğinde 4 ana evreden oluşmaktadır.(Şekil 2.1)

- 1.Grafik fotogrametri (plançetre fotogrametri),
- 2.Analog fotogrametri,
- 3.Analitik fotogrametri,
- 4.Dijital fotogrametri,



Şekil 2.1 (Fotogrametrinin Tarihi Gelişimi)

2.1.1 Grafik Fotogrametri

Fotogrametrinin bu yöntemi mutlak düzeyde belli temel geometrik prensiplerle resim elde edilmesine dayanır. Yersel fotogrametride kullanım alanı bulmuştur. Kamera ve teodelitlerin birleştiği fototeodelitler kullanılmıştır.

2.1.2 Analog Fotogrametri

Bir resim çiftinin değerlendirilmesindeki temel ilke her iki resmin dış yöneltme elemanlarının bilinip bilinmemesine, ölçülen resim koordinatlarından hareket ederek değerlendirmenin hesapla veya optik-mekanik aletlerle yapılıp yapılmadığına bağlıdır.

Analog yöntemde değerlendirme aletlerinde, iç yöneltme yapılarak elde edilen resimlerin ışık ışını demetleri kesiştirilerek resmi çekilen bölgenin üç boyutlu modeli elde edilir. Ancak bu model keyfi ölçekte olup uzaydaki konumu da belirsizdir. Bu durumu ortadan kaldırmak için ikisi tam geçiş noktası (X,Y,Z bilinen) ve biri de yükseklik geçiş noktası (Z bilinen) ve üçü aynı doğru üzerinde bulunmayan 3 kontrol noktasına ihtiyaç vardır. Bu üç geçiş noktası yardımıyla elde edilen 7 koordinat değerinden yararlanılarak model uzayda konumlandırılır ve istenilen ölçeğe getirilir.

2.1.3 Analitik Fotogrametri

Analog resimlerin elde edilmesi ile başlar, yöneltme elemanları yapılan ölçmelerle dengeleme ile hesaplanır. Kullanılan optik aletler bir işlemci ile desteklenerek ölçmelerin bilgisayar ortamında saklanması ve hesaplarının yapılmasını sağlamaktır. Dengeleme işlemi ilk başlarda bağımsız modeller şeklinde yapılırken daha sonra da ışın demetleriyle dengeleme metodu ile yapılır. Ayrıca değerlendirme işlemi bilgisayarlarda yapıldığından sonuçlar koordinat bilgisi olarak saklanabilmekte ve elde edilen sonuçların bilgisayar destekli tasarım (CAD) sistemlerine aktarılması ve görsel efektlerle desteklenmesi mümkün olmaktadır.

2.1.4 Dijital Fotogrametri

Fotogrametrik olarak tüm veri ve sonuçların dijital ortamda olduğu bilim dalıdır. Dijital fotogrametride tüm işlem adımları bilgisayar sisteminde yapılmaktadır. Analog yöntemle elde edilen resimler tarayıcılarla taranarak dijital ortama aktarılır.

Ayrıca dijital kameralarla resim çekimi yapıldığında resim çekme işlemi de bilgisayar ortamında yapılmaktadır.

Dijital fotogrametrinin günümüzde yaygın olarak kullanılmaya başlamasından sonra dijital görüntülerin yorumlanması ve işlenmesi ile ilgili olarak dijital fotogrametrinin bir çok uygulama alanı ortaya çıkmıştır.

2.1.4.1 Dijital Fotogrametrinin Temelleri

Analitik fotogrametriden dijital fotogrametriye geçişin sağlanmasıyla fotogrametrideki en büyük gelişmelerden biri gerçekleşmiştir. Bu geçiş sırasında fotogrametrinin geçirdiği evreler şunlardır:

Analog fotogrametri: Resimlerle başlar optik, mekanik ve optik-mekanik aletlerle devam eder.

Analitik fotogrametri: Resimlerle başlar bilgisayar destekli aletlerle devam eder.

Dijital fotogrametri: Kamera görüntü düzlemindeki ışık fotogrametrik olarak değil elektronik araçlarla kaydedilir. Sonra insan gözü ve algılamasını taklit eden bilgisayarlı tekniklerle devam eder. Bu yöntemde Computer Vision, Image Understanding Pattern Recognition, Softcopy Photogrammetry veya Dijital Fotogrametri gibi isimler verilmektedir.

Dijital fotogrametrik değerlendirmenin fiziksel anlamda ana unsurlarından olan dijital resim, donanım ve yazılım altlığı ile tamamlanmış olup veri toplanması ve işlenmesinde tam ve yaygın bir kullanım alanı oluşturmaktadır.

2.1.4.2 Dijital Resim ve Kullanım Amacı

Tarihsel süreç içerisinde elektronik biliminn hızla gelişmesiyle birlikte ortaya çıkan teknik gelişmelerle fotogrametrik alanda metrik kameraların odak sensörleri dijitalleşmiş ve ilk olarak fotogrametrik kayıt ve ölçme alanlarında kullanılmıştır.

Bu ilerlemelerle dijital resim analog resmin yerini almış olup öncelikle yakın mesafe fotogrametrisi olarak bilinen yersel uygulamalarda ve uydu fotogrametrisinde kullanılmıştır. Yersel çalışmalarda doğruluk aralığı (esneklik) dijital sistemin çözünürlüğüne bağlıdır. Yersel sistemlerin kuruluş amaçları doğrultusunda sistemin hızı ve kalitesi en temel etkindir. Uydulardan çekilen resimleri çekici kılan öge ise, resimlerin direkt olarak dijital formda kayıt edilip gerektiğinde nakledilebilmeleridir.

2.1.4.3 Dijital Resim Kullanmanın Yararları

- a) Optik-mekanik gereksinimlere ihtiyaç duyulmaksızın dijital resimlerin bilgisayar ekranından ölçülebilir ve görülebilir olması,
- b) Ölçme sistemlerinin, kalibrasyon gerektirmeyen değişmez sistemler olması,
- c) Bu sistemlerde resim kalitesinin artırılabilir olması,
- d) Bu sistemlerin kullanıcılara otomasyon olanağı sağlaması,
- e) Uygulamaların gerçek zamanlı olarak veya çok yakın zamanda yapılabilir olması,

2.1.4.4 Yersel Dijital Fotogrametrik Sistemler

Bütün dijital sistemler fotogrametrik yersel amaçlı olmayabilirler. Bir sistemin yersel fotogrametriye hizmet etmesi için;

- Kendi kendini kalibre eden kontrol sistemlerine,
- Yüksek çözünürlüklü, yüksek prezisyonlu kontrol sistemlerine,
- Güvenilir üç boyutlu obje yapısı sağlayabilen esnek bir arabirime sahip olma özelliklerini taşımalıdır.

Dijital resim elde edilmesinde resim boyutundan daha önemlisi resim elde etme sürecinin hızlı işler nitelikte olmasıdır. Bu özellik esas olarak yersel gerçek zamanlı uygulamalarda önemli yer tutmaktadır. Bunun yanı sıra robot görüntü 3 boyutlu katı modellerin en önemli kısmını oluşturur ki bu da akıllı makine adı verilen yapay zekanın başladığı noktadır.

2.1.4.5 Dijital Veri ve Özellikleri

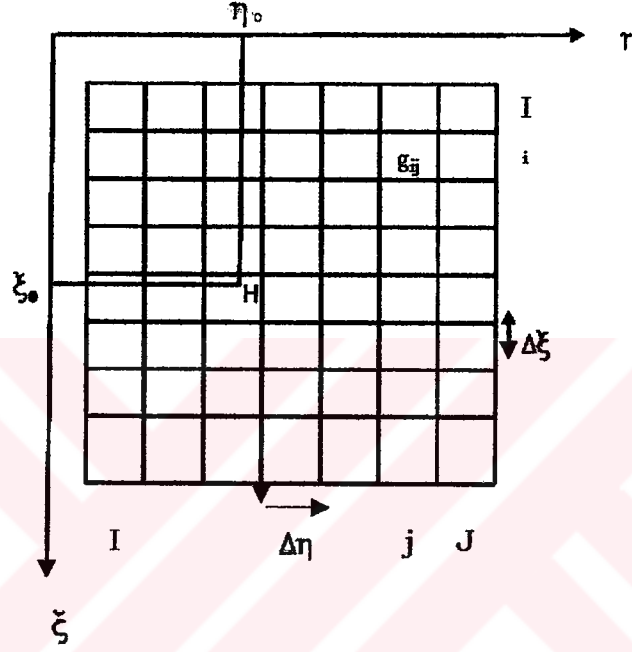
Bir dijital resim, elemanları g_{ij} olan 2 boyutlu G matrisinden oluşur. Bir dijital resimde gri değere sahip her bir eleman birer pixeldir. Her pixel bir x, y koordinatına sahip Δx ve Δy sonlu büyüklüklerinden oluşan alanlardır. $\Delta x, \Delta y$ değerleri pixeller arası farktır.

Dijital resim matrisinin (G) her bir elemanları g_{ij} 'de i satır indeksi 1'den I 'ya kadar gider ($i=1(1)I$). Sütun ise aynı biçimde ($j=1(1)I$) indisi kullanılır. Her matris elemanı bir alanı gösterdiğinden bir resim noktası yerine bir resim elemanı söz konusudur. Resim elemanının büyüklüğü $\Delta \xi \times \Delta \eta$ kadardır.

g_{ij} resim elemanları bilgi taşıyıcılarıdır. Siyah beyaz resimler için değer elemanları 0 ile 255 arasındadır ve bu değer insan gözünün gri renk tonu ayırt etme olanağının üzerindedir. 256 farklı durum için bilgi 8-bit ile gösterilir. Renkli resim için ise aynı büyüklükte üç resim matrisi vardır.

Bir dijital resimdeki fotogrametrik problemlerin çözümünde piksel ile resim koordinat sistemi (Şekil 2.2) arasındaki bağlantı bilinmelidir.

Gri değer seviyesi analog resim üzerinde devam ettiği şekilde aynen alınır.



Şekil 2.2. (Resim Koordinat Sistemi)

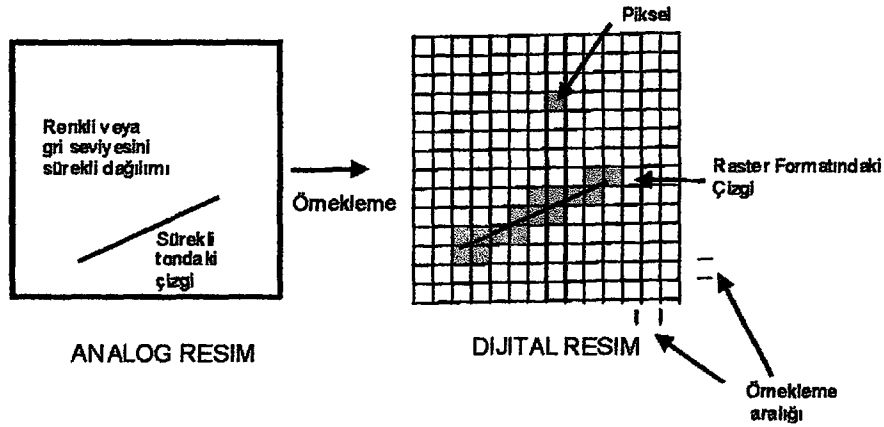
Aşağıda açıklanacak olan terimler ölçülen niceliği tanımlamak için kullanılır. Bunlar;

Genişlik: Resim parlaklığı ya da resim üzerindeki x,y koordinatının sahip piksellerin bir fonksiyonudur.

Gri değer: Kayıt edilen siyah ile beyaz arasındaki 256 gri renk tonu olarak ifade edilir. DN (Dijital Number) olarak da ifade edilir.

Yoğunluk: Analog filmlerde geliştirme esnasında karanlık derecesidir. Dijital olarak gri değerler ile ifade edilir.

Örnek:



Şekil 2.3 (Analog ve dijital resimde düz çizginin gösterimi)

(Şekil 2.3)'te açık olarak görüldüğü gibi düz çizgi analog resimde sürekli, dijital resimde ise kesik kesik pixeller şeklinde gözükmetedir. Eğer dijital resimdeki pixel boyutu (örnekleme aralık) küçültülürse çizgi daha sürekli bir görünüm alacak fakat daha fazla pixelle gösterilecektir.

Bu örnekte görüldüğü gibi, örneklemede en önemli faktör pixel boyutu veya örnekleme aralığıdır. Optimum aralık uzaysal bölgeden frekans alanına Furier transformu kullanılarak türetilir.

2.1.4.6 Dijital Fotogrametride Veri Toplama Yöntemleri

Dijital görüntülerin elde edilmesi dijital fotogrametrik uygulamaların en önemli adımlarından biridir. Gerekli hassasiyet gösterilmediği takdirde prezisyon ve ekonomi yönünden olumsuzluklar doğar. Bu nedenle uygulamanın konusuna ve teknik özelliklerine göre optimum çözüm bulunmalı ve uygulanmalıdır.

Dijital görüntülerin elde edilmesi günümüz teknolojisinde 2 şekilde yapılmaktadır.

Bunlar;

- Doğrudan dijital görüntü alan kameraların (CCD Kameralar) kullanılması,
- Tarayıcılar (Scannerlar): Analog kameralarla çekilen resimlerin optik tarayıcılar kullanılarak dijital sistemlere aktarılmasıdır.

a) Dijital (CCD kameralar)

CCD (Charge Coupled Device) kameralar 1960'ların sonlarında Bell laboratuvarlarında geliştirilmiştir. İlk başlarda bilgisayar hafızasının yeni ve karmaşık yapıda kullanımı olarak gözükmüş olsa da, daha sonraları silikonun ince duyarlılığından dolayı CCD teknolojisinin dijital görüntüler üzerine geniş bir uygulama alanı bulduğu açıktır.

CCD kameralar fotogrametrik uygulamalarda yüzey üzerine düşen ışık miktarını kaydetmek için en yaygın olarak kullanılan aletlerdir. Bunlar, görüntülerin dijital olarak elde edilmesini sağlayan iki boyutlu çizgisel algılayıcılardan oluşmuşlardır. Işığın algılayıcı yüzeye vurmasıyla bu sensörler aynı anda düşen ışık miktarını, yüzeye düşen ışıkla oluşan elektronlar fotonlara dönüştürülerek kayıt edilir. Bu algılayıcı dizilerin büyüklüğü pixel büyüklüğüdür. En önemli karakteristik özelliği kameraların teknoloji ile sınırlı olmalarıdır.

b) Tarayıcılar

Dijital görüntü elde etmenin yöntemlerinden bir diğeri de analog resimlerin taranmasıdır. Bu şekilde elde edilen dijital görüntüler CCD kameralar kullanılarak elde edilmiş dijital görüntülerden daha yüksek çözünürlüğe sahiptirler. Ancak görüntü elde etme işlemi dijital kameralara göre daha zahmetli olmakta ve daha uzun sürmektedir.

3 temel tarayıcı tipi vardır.

- Tüp scannerlar,
- Düzgün çizgisel scannerlar,
- CCD sensör ilave edilmiş analitik çiziciler.

Köbl 1994'te tarayıcıların performansını test etmiş ve tarayıcıların performansı ve gücünü belirleyen faktörleri şu şekilde ifade etmiştir.

Tarayıcının sahip olduğu;

- Geometri,
- Resim çözünürlüğü,
- Sinyal gücü,

- Hareket mesafesi,
- Renk tanınması,
- Veri tutma (depolama) miktarı,
- Kullanım kolaylığı,

olarak belirlenmiştir.

2.1.4.7 Bir Dijital Donanımın Özellikleri

Fotogrametrik dijital veri işlemede temel gereksinimler uygulamalara göre farklılık gösterir. Dijital donanımın amacına göre sıralanacak özellikler kesinlikle birbirinden farklı olsalar da temelde ölçme yapabileceğimiz yazılım en önemli noktadır. Ölçme sisteminin en önemli olduğu fotogrametrik uygulamalarda, donanımda 3 ayrı koordinat sistemi kullanılır.

Bunlar:

- Pixel koordinat sistemi,
- Resim koordinat sistemi,
- Cisim koordinat sistemi,

Temel bir ölçme donanımının sahip olması gereken sistemler ise;

- Resim görüntüleme sistemi,
- Resim hafıza sistemi,
- Ölçme sistemi,
- Dış ortamdan data girişini sağlayan sistemler,
- Kamera veya tarayıcı ile bağlantı arayüz donanımları,
- Veri çıkış sistemi' dir.

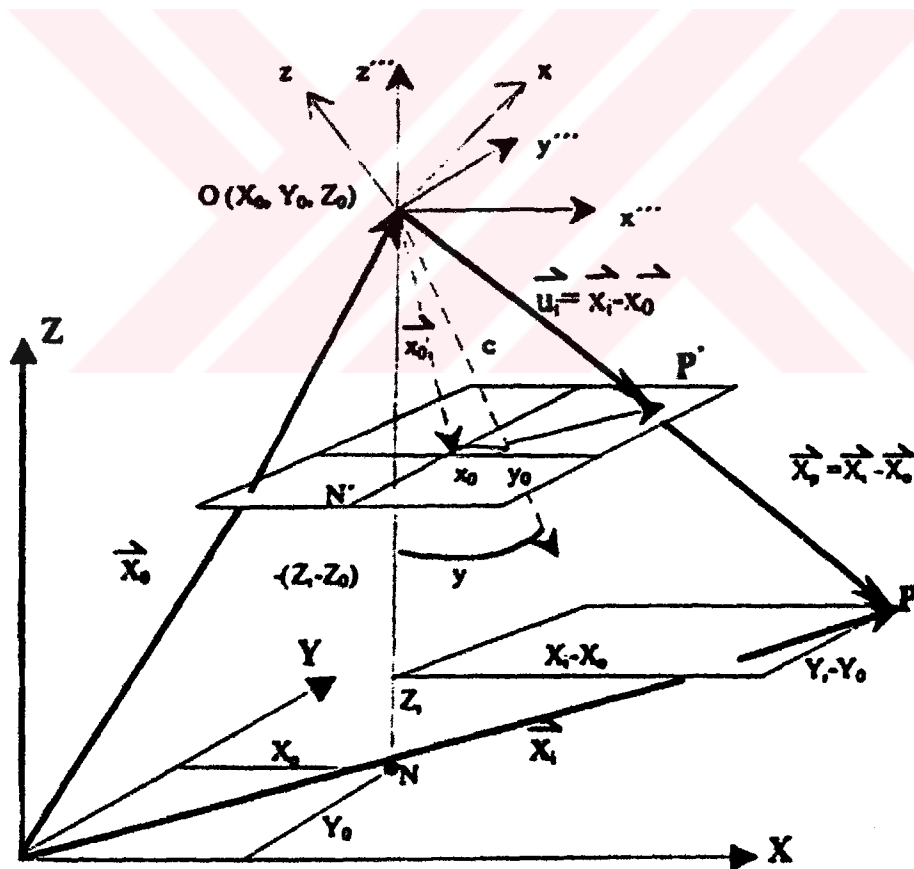
2.2 Fotogrametrinin Matematiksel Modeli

Matematik model, cisim uzay koordinat sisteminde noktaların fiziksel oluşum esaslarının matematiksel ifadeler olarak gösterimidir. (Şekil 2.4)

Kolinerite koşuluna göre, cisim uzayındaki noktaları gösteren ışınlar resim çekme makinesi izdüşüm merkezinden gerçek resim düzlemine bir doğru boyunca izdüşürülür. Bu şekilde oluşan görüntüler, yeniden inşa probleminin çözümünü iki adımda gerçekleştirir.

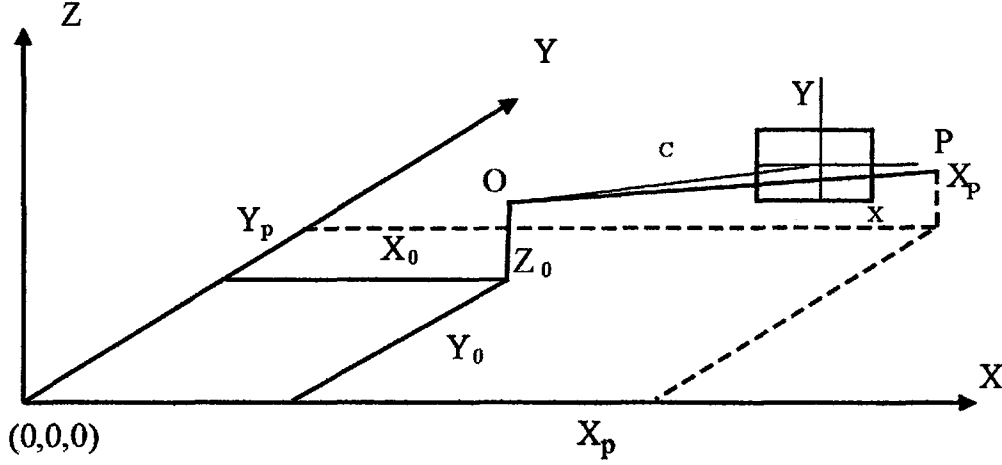
İlk adım, resim çekme makinesi iç yöneltme parametrelerinin (ana nokta uzunluğu ve ana nokta koordinatları) belirlenmesidir.

İkinci adım ise dış yöneltme adımıdır. Burada X_o, Y_o, Z_o koordinatlarına sahip istasyon noktasından ω, ϕ, χ dönüklük değerleri ile çekilen resimlerin cisim uzay koordinat sistemindeki koordinatlarının hesaplanması amaçlanmıştır.



Şekil 2.4. (Fotogrametrinin Matematiksel Modeli)

Cisim uzay koordinat sistemi, noktaların X, Y, Z cisim koordinatlarını, resim koordinat sistemi x, y, z resim koordinatlarını gösteren sağ el kartezyen koordinat sistemidir. (Şekil 2.5)



Şekil 2.5 (Yersel Fotogrametrik İzdüşüm)

Resim ve cisim uzay koordinat sistemleri arası açısal ilişkiler, koordinat eksenleri arası doğrultu kosinüslerinin oluşturduğu (3x3) ortogonal dönüşüm matrisi ile belirlenir.

Resim koordinat sisteminde p noktasının konumunu belirleyen resim vektörü;

$$P = \begin{bmatrix} x_p - x_0 \\ y_p - y_0 \\ 0 - c \end{bmatrix} \quad \text{olur.} \quad (2.1)$$

Burada x_0 , y_0 ana nokta koordinatları, c ise odak uzaklığıdır.

Resim çekme makinesi sonsuza odaklanmadıkça ana nokta uzaklığı, odak uzaklığına eşit değildir. Bu durumda ana nokta uzunluk değeri, odak uzaklığından Δf kadar sapma değerine sahiptir.

$$c = f + \Delta f \quad (2.2)$$

Cisim uzay koordinat sisteminde P noktasının konum vektörü,

$$P = \begin{bmatrix} X_p - X_0 \\ Y_p - Y_0 \\ Z_p - Z_0 \end{bmatrix} \quad \text{olur.} \quad (2.3)$$

Kolinerite eşitliğine göre, p resim ve P cisim vektörleri arasındaki matematiksel bağıntı,

$$P = k.D.P \quad (2.4)$$

$$\begin{vmatrix} x_p - x_0 \\ y_p - y_0 \\ 0 - c \end{vmatrix} = k.D. \begin{vmatrix} X_p - X_0 \\ Y_p - Y_0 \\ Z_p - Z_0 \end{vmatrix} \quad (2.5)$$

şeklinde ifade edilir. Burada k ölçek faktörü olup,

$$k = \frac{p}{P} \quad (2.6)$$

olarak ifade edilir.

Resim koordinatlarının bilinen değerler olması durumunda cisim koordinatları,

$$k = \frac{1}{k}.D^T.p \quad (2.7)$$

$$\begin{vmatrix} x_p - x_0 \\ y_p - y_0 \\ 0 - c \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 \\ D^T \\ k \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} X_p - X_0 \\ Y_p - Y_0 \\ Z_p - Z_0 \end{vmatrix} \quad (2.8)$$

olarak elde edilir.

k ölçek faktörünün kolinerite eşitliklerinde her bir ışın için ayrı ayrı belirlenmesi gerekmektedir. Bu durumda oluşan matematiksel ifadelerden k ölçek faktörü yok edilirse;

$$f_1 = x - x_0 + c \frac{a_{11}(X - X_0) + a_{12}(Y - Y_0) + a_{13}(Z - Z_0)}{a_{31}(X - X_0) + a_{32}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0)} \quad (2.9)$$

$$f_2 = y - y_0 + c \frac{a_{21}(X - X_0) + a_{22}(Y - Y_0) + a_{23}(Z - Z_0)}{a_{31}(X - X_0) + a_{32}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0)} \quad (2.10)$$

matematiksel ifadeleri elde edilir.

3.FOTOGRAMETRİNİN MÜHENDİSLİK ALANINDAKİ UYGULAMALARI

3.1 Mühendislik Alanındaki Uygulamalarda Kullanılan Fotogrametrik Sistem Yapısı

Seri ve hatasız üretim sanayiide çok büyük önem taşımaktadır. Digital fotogrametrinin endüstriyel ölçme şartları göz önüne alındığında ölçme hızı, veri işleme, değerlendirme ve ölçme doğruluğu açısından üretilen malın değerlendirilmesinde en uygun sonucu verdiği ve ölçme işleminin üretim koşullarında yapılabilmesi ile en uygun ölçme yöntemi olduğu görülmüştür.

Endüstriyel fotogrametrinin üretim sektöründe kullanılan en geniş uygulama alanı içerisinde en önemli özellik gerçek zamanda veya gerçek zamana yakınlık ta denilen üç boyutlu konum belirlemedeki kesinliktir. Resim ölçeklerinin diğer yakın mesafe fotogrametrisine oranla daha büyük olması nedeniyle endüstriyel fotogrametride cisim uzayı için iki boyutlu resim koordinatlarından 3 boyutlu cisim koordinatlarının hesaplanmasında iki ayrı sistem yapısı geliştirilmiştir.

1. Bağımsız sistemler

2. Bütünleşik sistemler

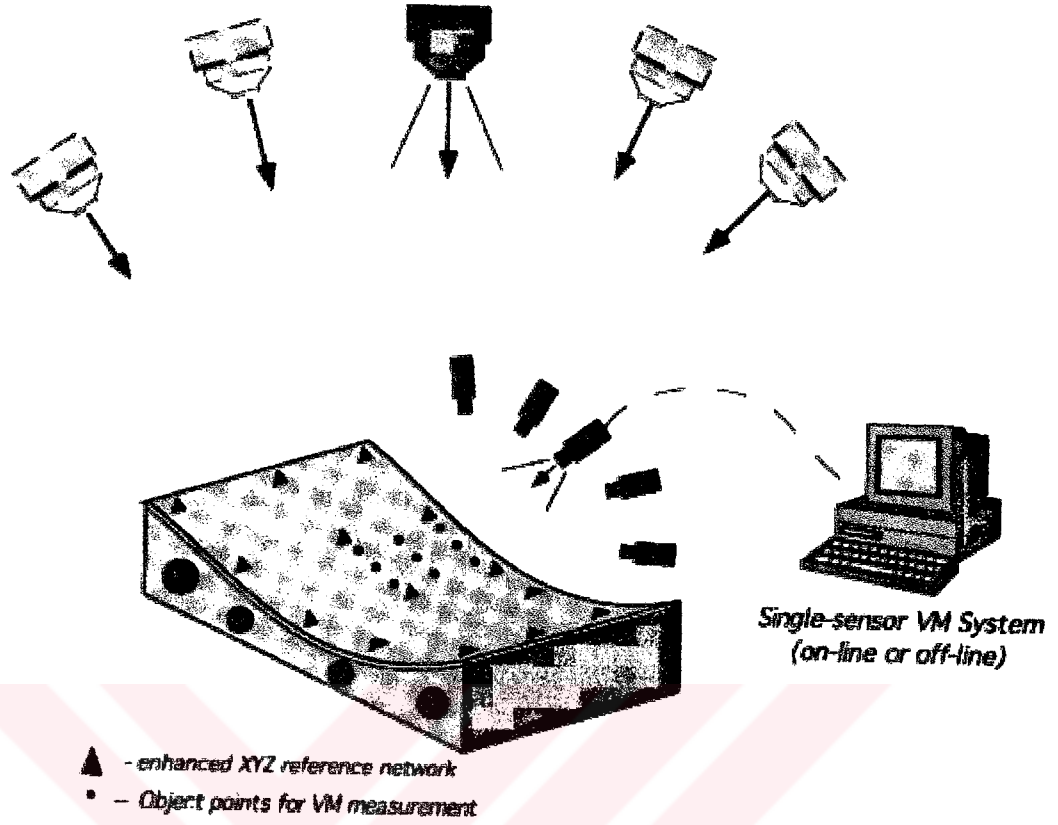
Bağımsız sistemler görüntü ölçmelerinde veri elde edilmesi ve verilerin işlenmesi olarak iki bölüme ayrılır. Bütünleşik sistemlerde ise gerçek zamanlı veya gerçek zamana yakın olarak ölçüm sonuçları elde edilir. Bütünleşik sistemler özel dijital görüntüleme sensörlerinden, bağımsız sistemler ise film tabanlı veya dijital kameralardan oluşur. Bazı konfigürasyonlarda bağımsız ve bütünleşik sistemlerin arasında fazla bir fark yoktur. Örneğin, bir sistem bütünleşik olarak bir bilgisayara bağlanan bir CCD kameranın resim ölçmelerini ve daha sonraki fotogrametrik değerlendirmeleri yapmasından oluşur. Kurulacak olan sistemle sonuçlar ölçme esnasında veya birkaç saniye içerisinde elde edilebilir. Ancak tam veri toplama işlemi anlık bir olay olduğundan fotogrametristler böyle bir bağımsız sistemin kurulmasının tercih etmezler.

3.1.1 Bağımsız Sistemler

Şimdiye kadar geniş endüstriyel çevrelerce kabul gören bir tane endüstriyel fotogrametrik sistem yapısı bulunmaktaydı. Bu sistem ayırık bir yapı örneği sergilemekte olup geniş ve orta açılı resim çekme kameraları, çok istasyonlu monoskopik konvergent ağlarla örülmüş kendi kendine kalibrasyon yapma özelliğine sahip otomatik ve analitik olarak değerlendirme yapan bir sistemdir. Rollei-Metric System ve Geodetic Service'nin ürünü olan Stars bu tür sistemlere örnek olarak gösterilebilir.

1993'ten bu yana bağımsız tek algılayıcı sistemler CCD görüntüleyiciler alanında geniş bir kullanım alanı bulmuştur. Özellikle Kodak Megaplug serisi kameralar bu sistemlerde kullanılır oldu.

Endüstriyel yakın mesafe fotogrametrisinde kullanılan bağımsız sistemlerin en önemli özelliği birbirinden bağımsız olarak görüntü alan kamera yapısının üç boyutlu koordinatları çok presizyonlu olarak hesaplanmış bir çerçeve yapısı ile birlikte kullanılmasıdır. Bu yapıda üç boyutlu olarak boyutları belirlenecek cisim bu çerçeve üzerinde görüntülenerek gerekli ölçmelerin fotogrametrik olarak yapılması esasına dayanmaktadır.(Şekil3.1)



Şekil 3.1 (Bağımsız sistemler)

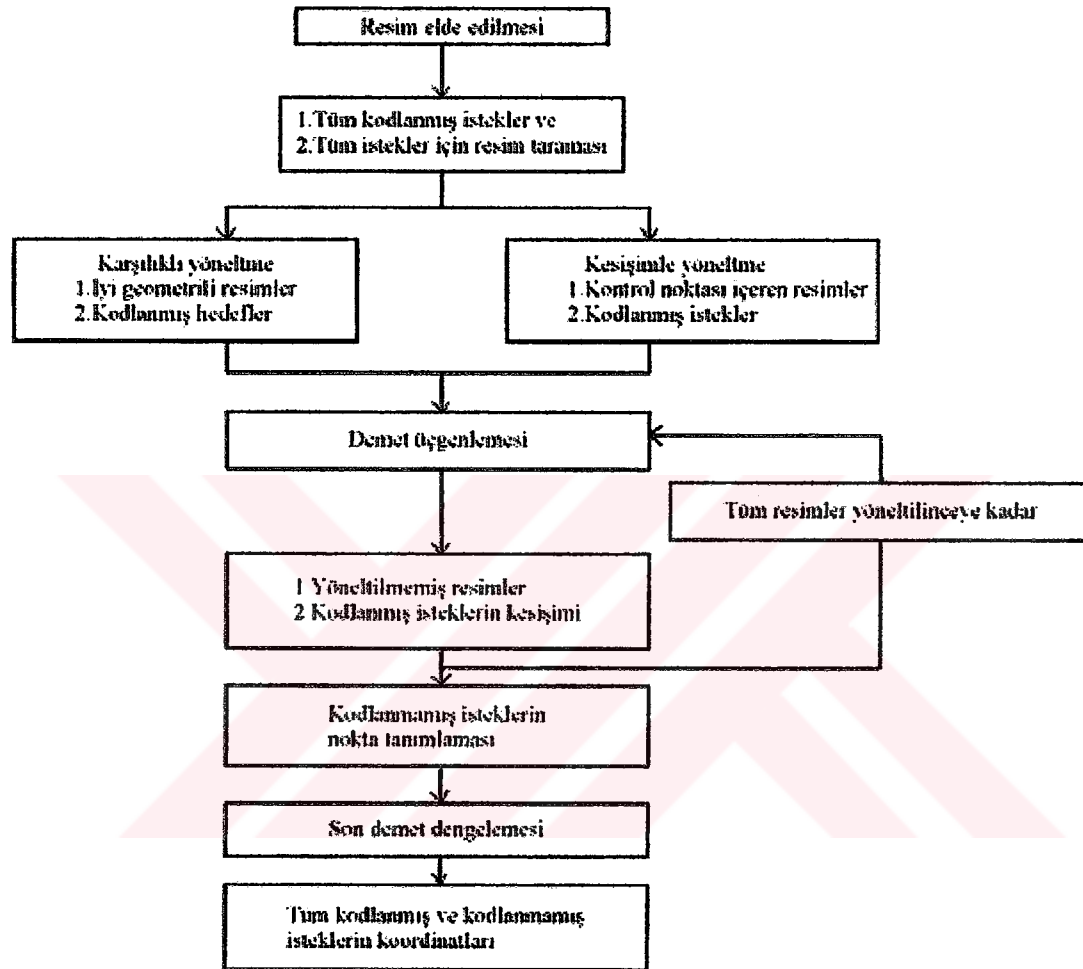
Bağımsız ölçme sistemlerinde resimler ardışık olarak elde edilirler. Bu durumda ölçülen cisim, elde edilen tüm resimlerdeki tüm periyotlar için sabit olmalıdır. Genel olarak, bağımsız sistemlerin kullanımı 2 farklı uygulamaya ayrılabilir.

1.tür uygulama ölçülen cismin bulunduğu yere operatörün girebildiği sistemdir. Operatör elle tutulan kamera kullanır ve farklı yerlerden resim elde edilir. Bu durumda kamera-bilgisayar bağlantı kablosuna gerek duymamak için kameranın arttırılabilir resim kaydetme disketine sahip olması gerekir. Sonuç olarak operatör resim elde etmek için ideal yerlerin seçiminde tamamen serbesttir.

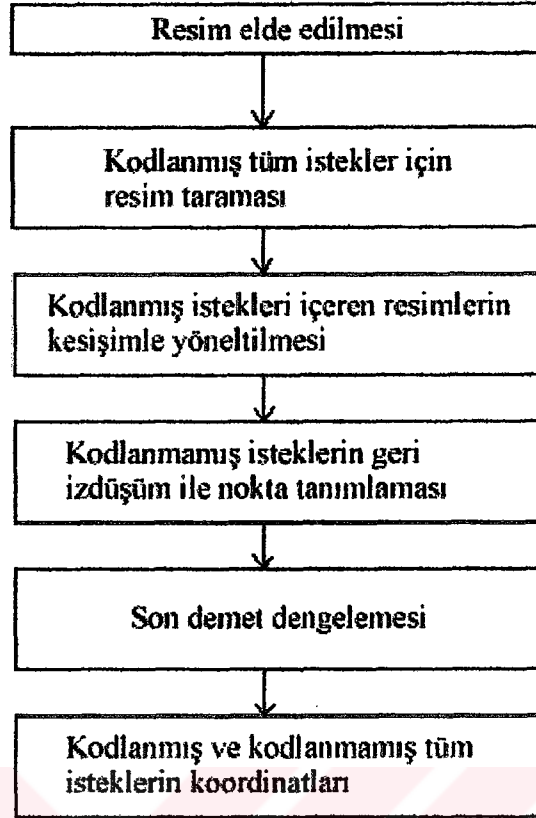
2.tür uygulama, operatörün ölçülen cismin bulunduğu alana girişinin mümkün olmadığı uygulamalardır. Örnek olarak nükleer çevreler, basınç ve sıcaklık odaları veya operatörün üretim işlemini kesebileceği üretim alanlarıdır. Bu durumlarda resim elde etme işlemi uzaktan yapılmalıdır. Bu işlem için kameranın yerleştirilmesinde operatörün yerine robot kullanılmalıdır. Bu seçenek kameranın ve robotun tamamen uzaktan kontrolünü gerektirir.

3.1.1.1 Bağımsız Sistemlerde İşlemin Gerçekleştirilmesi

Bağımsız işlemler için fotogrametrik ölçme işlemi çok sayıda uygulama alanı için tamamen otomatikleştirilmiştir. Genel olarak ilk ölçme (başlangıç bilgisi mevcut olmayan) işleminin akışı (Şekil 3.2) ve tekrarlı ölçme işleminin akışı (Şekil3.3) birbirlerinden biraz farklıdır.



Şekil 3.2 (İlk Ölçme İçin Mevcut Olan İşlem Akış Şeması)

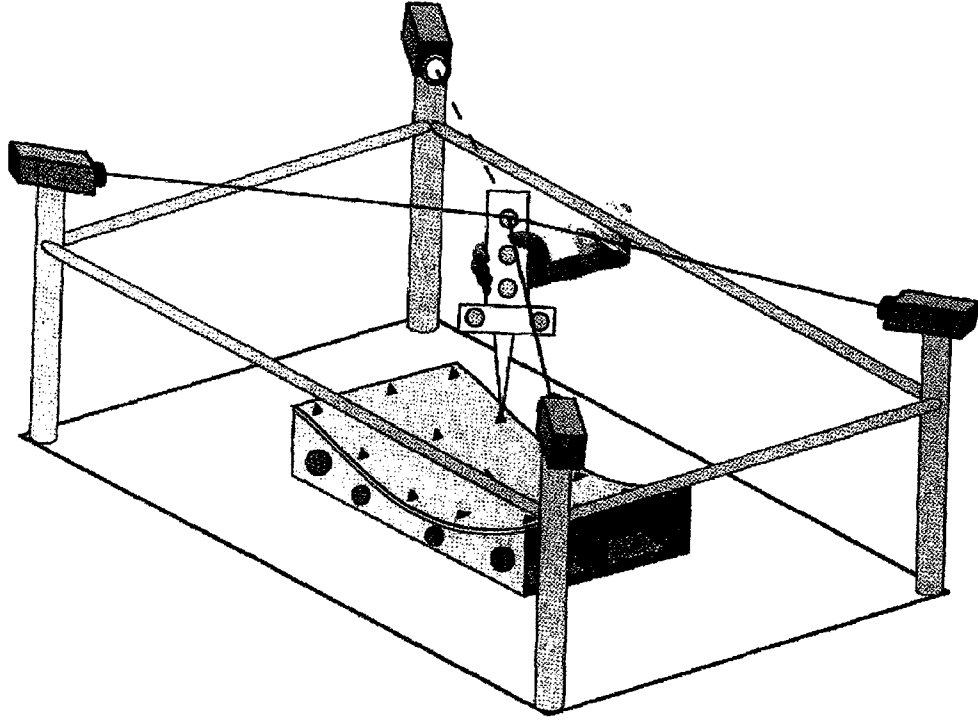


Şekil 3.3 (Tekrarlı Ölçme İçin Mümkün Olan İşlem Akış Şeması)

3.1.2 Bütünleşik Sistemler

Bu tür sistemler tipik olarak senkronize olmuş çok sayıdaki sensörlerden oluşan ağ konfigürasyonlarındaki CCD kameralarıyla veri kaydı yapan sistemlerdir. Bu sistemlerde aynı anda farklı kameralardan gelen cisim görüntüleri ve çerçeve yapısına ait görüntüler bilgisayar ortamında yönlendirilerek cisme ait üç boyutlu koordinat yapısının aynı anda hızlı bir şekilde belirlenebilmesi sağlanmakta ve bu üç boyutlu koordinat bilgisinin bir CAD sisteminde işlenmesine ait gereken veri elde edilebilmektedir. (Şekil 3.4)

Bu tür sistemler gerçek zamanlı (video kayıtlarıyla) fotogrametrik ölçmelerle geniş bir uygulama alanı bulunan 3 boyutlu ölçmelere çözümler üretir.



Şekil 3.4 (Bütünleşik Sistemler)

Bu sistem, çok algılayıcıli sistemlerin gelişen teknolojiyle birlikte CCD video kameralarında sistem içine eklenmesi gerçek zamanlı bir 3 boyutlu cisim modellerinin belirlenmesine yönelik son derece hızlı ve yüksek doğruluk veren sistemler olmuştur. Bu sistemler günümüzde özellikle uzay teknolojisi üreten firmaların tek kontrol sistemlerini oluşturmaktadır. Özellikle yüksek doğruluk gerektiren bu tür sanayi içinde dijital bütünleşik sistemler en çok kullanılan ve en uygun olan sistemlerdir.

Bütünleşik ölçme sistemiyle resimler farklı kameralardan eş zamanlı olarak elde edilirler. Bu durumda resim elde etme esnasında cismin sabit olması gerekmez. Genelde bütünleşik sistemler için de 2 tür uygulama vardır.

1. tür uygulamada, hedef kullanılmaksızın tek nokta ölçülür. Bu işlem için özellikle gizli noktaların ölçülmesi gerektiği durumlarda ölçme araştırması son derece kullanışlıdır. Araştırma çoklu hedef ve tek uca sahiptir. İki veya daha fazla kamera misafir bilgisayara kablo ile bağlanır ve ölçülen cismin önünde uygun bir yerde yerleştirilir. Her ne zaman ki operatör inceleme ucuyla ölçme noktasına dokunursa tüm kameralar eş zamanlı olarak kayıt ederler. Sonuç olarak tüm kameralar hedefi

görmek zorundadırlar. Üçgenleme ile hedeflerin uzaysal koordinatları incelemede hesaplanabilir ve hedeflerin kalibre edilmiş konumlarından inceleme ucunun konumu elde edilebilir. Eğer kontrol noktası alanı cisme eklenirse kameranın veya cismin ne titreşimi ne de hareketinin ölçme doğruluğuna etkisi vardır. Kameranın resim elde ettiği her anda kamera ile cisim arasındaki karşılıklı yöneltme tekrar hesaplanmalıdır. İncelemeyle birlikte klasik ölçme hızı yaklaşık olarak bir cisim noktası için 2sn'dir. Bu teknik genelde otomotiv endüstrisinde montajlama işlemlerinin veya araba gövdesinin kontrolünde kullanılır.

2.tür bütünleşik uygulamada, kinematik işlemin parçası olan çoklu noktalar izlenmelidir. Bunun klasik uygulamaları termal ve basınç odalarında dinamik anten deformasyonlarının izlenmesini içerir. Bu uygulamalarda farklı anten yöneltmeleri veya çevre koşullarının sebep olduğu şekil deformasyonlarının miktarları ölçülebilir.

Diğer bir uygulama hareketli objenin elde edilmesidir. Burada fotogrametrik ölçme sistemleri ile "part to part", "part to robot", "robot to robot" 'un karşılıklı konuları desteklenmelidir. Ölçme sistemi, her iki cisimdeki çoklu noktaları izlemeli ve sonuç olarak 2 cisim arasındaki tüm 6 serbestlik derecesini belirleyebilmelidir.

3.1.2.1 Bütünleşik Sistemlerde İşlemin gerçekleştirilmesi

Şu anki mevcut bütünleşik fotogrametrik ölçme sistemleri 2 farklı modda kullanılabilir.

a) Sabit mod,

b) Hareketli mod,

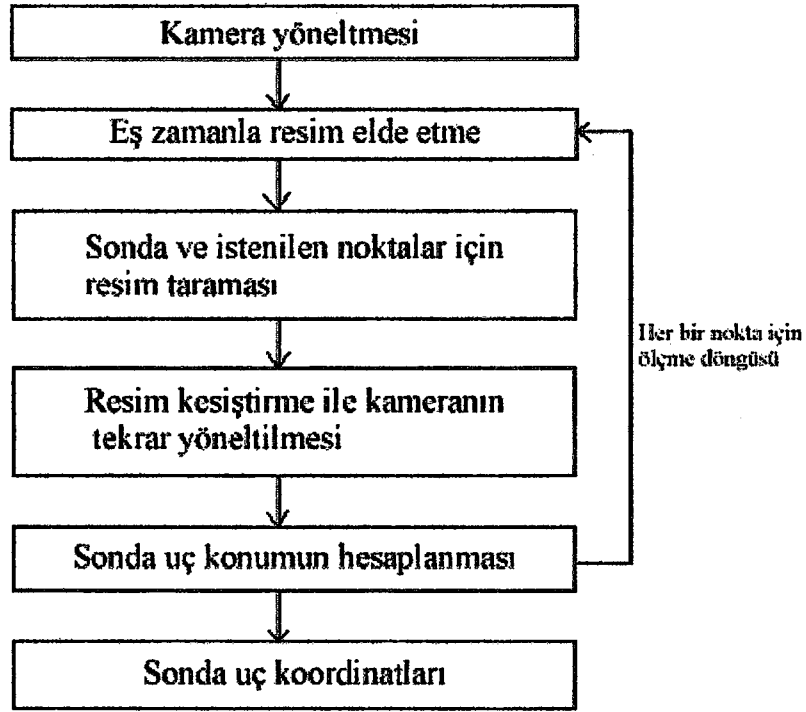
Sabit modda yöneltme çubuğu olarak bilinen alet kullanılarak kamera yöneltmesi gerçekleştirilir. Yöneltme çubuğu en az 2 hedefe sahiptir. Bu hedefler arasındaki uzaklık kalibre edilmiştir. Bu çubuk görünen ölçme alanında birkaç yere taşınır. Tüm kameraların görüntü alanlarının üst üste getirilmesiyle veya yaygınlaşmasıyla tanımlanır. Her ne zaman yöneltme çubuğu konumlandırılırsa, tüm kameralar aynı anda resim elde etmeye başlar ve yöneltme çubuğunun konumu her resimde resmin işlenmesiyle elde edilir. Yöneltme çubuğu yeterli sayıdaki konumda yerleştirildikten sonra her kamera tüm çubuk konumlarının resim koordinatlarını bir sanal resme birleştirir. Sonuç olarak demet dengelemesi her bir kamera için sanal bir resim alır ve tüm kameraların yöneltmelerini hesaplar. Ölçekleme için yöneltme çubuğu

hedefleri arasındaki kalibre edilmiş uzaklık kullanılır. Bu yöneltme işleminden sonra incelemenin kullanıldığı (şekil 3.5) veya çoklu kinematik hedeflerin izlendiği tüm ölçme işlemleri için kameraların sabit kalması gerekmektedir.



Şekil 3.5 (Sabit modda akış şeması)

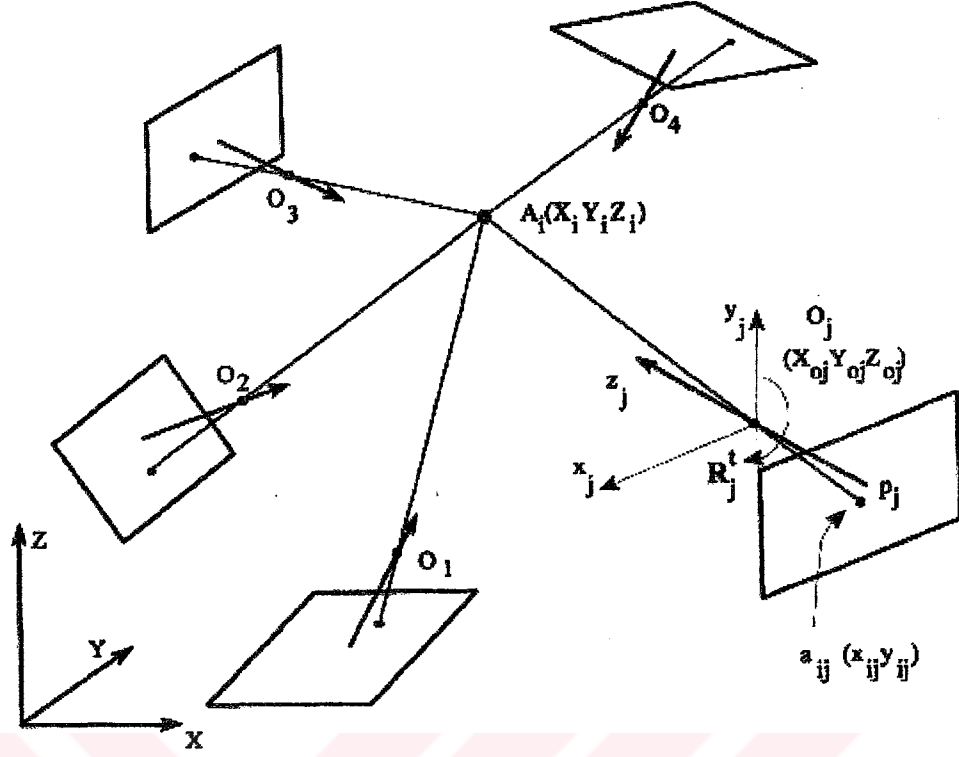
Eğer titreşimli çevrelerde ölçme yapılacaksa, bütünleşik sistem sabit olmayan moda olmalıdır. Bu durumda birkaç kodlanmış hedefler klasik olarak ölçülen cisme eklenmelidir. Kodlanmış hedeflerin koordinatları bütünleşik ölçme sistemi işleminde tanımlandığı gibi tek kamera kullanarak tamamen otomatik olarak belirlenebilir. Kamera yönetmesi için daha hızlı yol bütünleşik kullanımdan birkaç resim elde eder. Bu resimler kullanarak demet üçgenlemesiyle tüm kodlanmış hedeflerin koordinatları elde edilir. Tüm ardışık bütünleşik inceleme ölçmeleri için her kamera yöneltmesi kontrol noktası olarak kodlanmış hedefler kullanılarak tekrar hesaplanır. (Şekil 3.6)



Şekil 3.6 (Haraketli Modta Akış Seması)

Fotogrametride digital resim uygulamaları genelde üç değişik yöntem içinde kullanılır. (Şekil 3.7)

1. Fotogrametrik değerlendirmede kolaylık açısından operatöre daha iyi bir görüntü sağlanması yani görüntünün iyileştirilmesi için kullanılır.
2. Resim eşleme ile ortak bölgelerdeki ortak noktaların belirlenmesi ve ölçülmesi için resim eşleştirme işlemi kullanılır.
3. Dijital resimlerin yorumlanmasına yani otomatik ölçme ve yorumlamanın yapılmasına yönelik çalışmalardır.



Şekil 3.7 (Yakın Resim Fotogrametrisinde Multi Konvergent Durumun Gösterimi)

3.2 Uygulama Alanları

Fotogrametri farklı yöntemlerde bir çok alanda uygulama imkanı bulmuştur. Bu alanlar başlıca 3 grupta toplanabilir.

1. Mimari ve arkeolojik amaçlı uygulamalar,
2. Tıp alanındaki uygulamalar,
3. Fotogrametrinin sanayi uygulamaları,

3.2.1 Fotogrametrinin Mimarlık ve Arkeolojik Amaçlı Uygulamaları

Mühendislik ve mimarlık çalışmalarında varolan bina ve alanların 3 boyutlu modellerinin oluşturulması amacıyla kullanılır. Mimari ve tarihi bakımdan değerli eserler ve binaların korunması ve tekrar aslına uygun olarak inşa edilmesi için binaların rölevelerinin çıkarılması gerekmektedir. Bu işlemde fotogrametrik yöntem sonsuz boyutsal büyüklüklerin ölçülmesi için büyük bir imkan sağlar. Yeterli veri,

tarihi bina ve eserlerin resimlerinden, bilgisayar ortamındaki 3 boyutlu koordinatlarından tekrar inşası, koruma veya restorasyon amaçları için elde edilir.

Fotogrametrik yöntemle elde edilen resimler karışık yapı taşlarını içeren yüzeylerin yenilenmesi veya tamir edilmesini içeren mimarlık projelerinde ve diğer alanlardaki projelerde ne kadar önemli olduğunu ispatlamıştır. Fotogrametri çoğunlukla tarihi ve eski binalarda kullanılmakla beraber modern yapıların ölçümlerinde de kullanılmaktadır.

Mimarlık fotogrametrisinin çalışma alanı içine sadece binaların çizimi ile ilgili çalışmalar girmemektedir. Aynı zamanda binaların çeşitli hasarlardan sonra yenilenmesi, deformasyon değişikliklerinin ve restorasyon çalışmalarındaki ölçmelerin elde edilmesi de mimarlık fotogrametrisinin içinde yer almaktadır. Günümüzde fotogrametri bütün mimarlık çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca yersel fotogrametrinin ilk uygulamaları mimarlık fotogrametrisinde önemli yer tutar.

Mimarlık fotogrametrisinde elde edilen 3 boyutlu modeller;

1. Yapıların imalat sonrası ölçümünün yapılması (as-built projesinin hazırlanması),
2. Yeni yapılar içeren alanların planlanması amacıyla,
3. Mevcut temel planların değiştirilmesi ve geliştirilmesi amacıyla,
4. Oluşturulan 3 boyutlu modellerle modelin üzerinden uçarak veya içinde gezerek yapılan animasyon amacıyla,
5. Verilen CAD ve mühendislik yazılımlarına DXF ve IGES dosyası olarak dönüştürmek amacıyla,

kullanılmaktadır.

Dijital fotogrametrinin mimari çalışmalara sağlamış olduğu katkılardan bazıları şunlardır:

1. Bina cepheleri üzerindeki detaylı yüzeylerin geniş ve bağımsız olmasının sağlar.
2. Yüzeylerin belirlenebilir tüm inceliklerini ortaya çıkarır. Sağlamış olduğu doğruluk bakımından diğer yöntemlere göre daha ekonomiktir.
3. Yüzey fotoğrafları ve kontrolüne yönelik uygulamalar küçük hatalar içerir.

4. Bina yapısı ve benzeri ileri çalışmalarda hızlı sonuç verir. Elle yapılan çalışmalarla karşılaştırıldığında geniş hacimli temel veriler daha hızlı elde edilir.
5. Bu yöntem elle yapılan araştırmalara göre daha güvenlidir. Uzaktan algılamayla veri elde etme önemli bir unsurdur.
6. Elde edilen verileri direkt olarak CAD sistemlerine aktarmada ideal bir yöntemdir. Kompleks veri tabanları çizim fiyatını artırmaz.
7. Üç boyutlu verilerin direkt olarak elde edilmesini sağlar. Bu durum CAD alanındaki önemini gittikçe artırmaktadır.
8. Stereophotography verilerinin doğru olarak elde edilmesinde çok önemli kaynaktır. Dijital fotogrametri geleneksel yöntemlerle fotografcılığa göre daha çok bilgi edinilmesini sağlar ve ihtimallerin değerlendirilebilme imkanı sunar.

Tüm bu avantajlarının yanında bazı projelerde fotogrametrik ürünlerin kullanımı sınırlandırabilecek çeşitli dezavantajlar bulunmaktadır. Bunlar:

1. Karışık bir teknik olup, özel girdiler ister. Küçük uygulamalar için pratik değildir.
2. Bazı mimari yapıların çizimi olmayabilir.
3. Ayrıntıların standartı ve ürünlerin kalitesi çok iyi olabilir. Fakat bu değerler söz konusu proje için çok yüksek olabilir. Ürünün parasal değeri yeterli olsa bile projenin tümüyle karşılaştırıldığında gerçek fiyat daha yüksek çıkabilir.
4. Bazı çalışmalarda fotogrametrik teknikleri uygulamak mümkün değildir veya kullanılan teknikler projenin tümünde uygulanabilir.
6. Bugünkü teknolojiyle heykeltraşlığa ait bazı özellikler ve deformasyonlar tam olarak ifade edilememektedir.

3.2.1.1 Arkeolojik Amaçlı Çalışmalarda Kullanılması

3 boyutlu fotogrametrik veriler arkeolojistler ve antropolojistler için kazılardan çıkarılan eserlerin korunması amacıyla şu şekilde kullanılır.

1. Kazı alanlarının ve kazıdan çıkan araçların fotoğrafları 3 boyutlu bilgisayar modeline dönüştürülür.

2. Fotografik yazılımlar kullanılarak kazıdan çıkarılan eserler doğru olarak ölçülendirilir.
3. Elde edilen 3 boyutlu modeller animasyon amaçlı kullanılabilir. (Bilgisayar ortamında kazı alanının üzerinden uçuş yaparak veya içinde gezinerek izlenilebilmesi)

3.2.2 Tıp Alanındaki Uygulama Alanları

Tıp alanında fotogrametrinin kullanımı fotogrametrinin tarihine dayanmaktadır. Son yüzyılda ve daha önceleri analog, analitik ve dijital fotogrametri gövde, baş, yüz, kol, göğüs, ayak, deri, göz ve dişler gibi insan bedeninin şekil ve boyutlarıyla ilgili geniş uygulama alanlarına yönelik çalışmalarda kullanılmaktadır. Diğer bir takım çalışmalarla birlikte hastalığın tedavisi ve diğer durumlar için yapılan çalışmaların yanısıra anatomik çalışmaları ilerletmek amacıyla bazı çalışmalar yapılmıştır. Ölçmeler ilk olarak;

1. Bireysel hastalıkların incelenmesi veya gövde izlenmesiyle tıbbi durumların tesbiti,
2. İnsan vücudunun mekanik, çalışma ve diğer görünüşleri,
3. Hastalıkların araştırılması ve onların durumlarının tesbiti'nde yarar sağlar.

Fotogrametrik ölçmeler ilk olarak ortopedik ve anatomiyle ilgili olmasına rağmen nöroloji, diş, mesleki terapi, ergonomik çalışmalar ve diğer bir çok insan vücuduyla ilgili çalışmalarda katkıda bulunmaktadır.

Fotogrametri bir tıbbi ölçme aracı olarak hızlı, uygun ve güvenli olarak özel noktaların durumlarının zamanında kayıt edilmesine imkan sağladığından farklı bir öneme sahiptir. Fotogrametriyle yaralanma, enfeksiyonel etki riskiyle hastaya dokunmaktan kaçınılabilir. Bununla birlikte fotogrametri ölçülen yüzeyi bozmaz.

İnsan vücudunun durumunun teşhis ve tedavisi ve biomedikal araştırmalar için kendi ayırt edici özellikleriyle birlikte yakın resim fotogrametrisi sınıfını oluşturur.

3.2.3 Fotogrametrinin Sanayideki Uygulama Alanları

3.2.3.1 Trafik Kazaları ve Suç Anlarının 3 Boyutlu Olarak Bilgisayar Ortamında Elde Edilmesinde Kullanımı

Kaza ve suç anında çekilen fotoğraflar ve videolar 3 boyutlu model üretmek ve doğru ölçüler elde etmek için kullanılır. 3 boyutlu model mahkemede sunum yapmak ve analiz amaçlarıyla etkili simulasyon oluşturmak için animasyon yazılımlarıyla birlikte kullanılabilir. Animasyon mahkemede yargılama esnasında güçlü bir iletişim tekniği sağlayabilir. Bu konuda 3 boyutlu fotogrametrik veriler bize şu avantajlar sağlar.

1. Uzman kanıtı eğer görsel olarak sunulacak olursa iyi anlaşılabilir.
2. Kazaya veya suça sebep olan olaylar dizisi simule edilebilir, gösterilebilir.
3. Olayların yavaş çekim animasyonları daha iyi analiz sağlayacak ve daha doğru analiz etme imkanı sağlayacaktır.

3.2.3.2 Animasyon Amaçlı Kullanımı

Web sitesi dizaynında 3 boyutlu model oluşturmada, eğitim ve bilgisayar eğitiminde film ve videolarla animasyon dizisi kullanılır. Bunların yanında animasyon amaçlı olarak fotogrametrik uygulamalar şunlardır:

1. Direkt olarak çekilen fotoğraflar 3D Studio, Wave Front, STL, Inventor&VRML formatlarına dönüştürülerek 3 boyutlu modeller oluşturulabilir.
2. Gerçek cisimlerden veya kil modellerden yararlanarak bilgisayarda 3 boyutlu modeller oluşturulabilir.
3. Üç boyutlu modelleri “STL” (Stereo-lithography) formatına dönüştürmek suretiyle gerçek ölçekte modeller oluşturulabilir. STL dosyası daha sonra stereolithography makinesi kullanılarak gerçek cisme tabaka tabaka dönüştürülebilir.

3.2.3.3 Eğitim Amaçlı Çalışmalarda Kullanımı

Günümüzde bir çok teknik okul, kolejlerle ve üniversitelerin mühendislik, mimarlık ve tasarım bölümlerinde eğitim amacıyla kullanılabilir. Aynı zamanda multimedia ve web sitesi tasarım kurslarında da yararlanılır. Kullanım kolaylığı, hızlı sonuç alma

ve cisimlerin yapısal özelliklerinin çizilmesi öğrencilere öğrenmede hızlı bir adım sağlar.

Fotografi çekilen her bir cismin kil modellerinden gerçek binalara, şehirlere, insanlara hayvanlara ve makinelere dönüştürülebilir.

3.2.3.4 Bina İç Tasarım Uygulamalarında Kullanımı

İç mimarlar mevcut binaların ve yapıların fotoğraflarının kendi iç tasarımlarına temel oluşturacak şekilde kullanırlar. Bunun yanında mobilya ve aksesuarların ayrıntılı olarak tasarımlarını kapsayacak şekilde modellenmesini sağlar.

3.2.3.5 Makine Mühendisliği Uygulamalarında Kullanımı

Makine mühendisleri şu amaçlar için fotogrametrik verilerden yararlanırlar.

1. Mevcut cisimlerin doğru olarak ölçülendirilmesini sağlamak,
2. Animasyon, simulasyon ve analiz için 3 boyutlu modeller oluşturmak,
3. Mevcut cisimlere dayanan ek tasarımlar oluşturmak için,
4. STL makineleriyle protipler oluşturmak için kullanılan STL(Stereo-lithograph) dosyasına dönüştürmek.

3.2.3.6 Kalite Kontrol Amacıyla Kullanımı

Fabrikalarda elde edilen ürünün kalitesinin kontrolü amacıyla fotogrametriden yararlanılır. Elde edilen üründe herhangi bir hata olması durumunda anında müdahale etme imkanı sağlar.

3.2.3.7 Uçak Endüstrisinde Kullanımı

Uçak endüstrisinde fotogrametrinin birkaç temel uygulama olanağı vardır. 10 yıldan bu yana fotogrametrinin kullanılmasıyla uçak firmaları periyodik muayenelerinde ölçekli olarak kullanılmaktadır. Ayrıca uçak endüstrisinde, araçların ölçeğe dayalı olarak imal edilmesinde ve kablo yolları, ekipmanları ve ölçek düzenleyicilerin modellenmesi için CAD öncesi asıl modellerin kayıt edilmesinde kullanılmaktadır.

3.2.3.8 Otomotiv Endüstrisinde Kullanımı

Fotogrametri otomotiv endüstrisinde, araç kasalarının tasarımı ve 3 boyutlu olarak modellenmesinde yaygın olarak kullanılır. Ayrıca diğer otomotiv parçalarının

tasarım ve üretiminde önemli yer oynar. Bunların yanında araçların imalat sonrası çarpma testlerinin yapılmasında ve muayenesinde de kullanılmaktadır.

3.2.3.9 Nükleer Güç Santrallerinde Kullanılması

Nükleer güç endüstrisindeki fotogrametrik otomatik ölçme yöntemlerini kullanmak radyasyon alanındaki süreyi kısaltarak ertelemeyi ve tekrar çalışmayı en aza indirmek için doğru bilgilerin temin edilmesiyle işçilerin radyasyona maruz kalmalarının en aza indirir.

Fotogrametri, yüksek radyasyon alanındaki bileşenlerin ve boruların imalat boyutlarının kaydetmek için kullanılır.

3.2.3.10 Petrokimyasalları İşleme ve Üretim Fabrikalarında Kullanımı

Boru döşemesi, ekipmanlar, kanallar ve tesisat güncellemesinin görsel olarak veri tabanına çizilmesi fotogrametrik uygulamalardır. Fotogrametrinin bileşenleri hareketli ve titreşim halindeyken ölçebilmesi çok önemlidir. İşleme ve üretim endüstrisinde otomatik ölçme teknolojisinin kullanımı ürün çeşitleri kadar çoktur. Bunlar;

1. Görsel veri tabanının oluşturulması için as-built projesinin oluşturulması,
2. Üretimi biten ürünlerin ve parçaların muayenesi,
3. Robot kalibrasyon yöntemi,
4. Hacimsel modellerin miktarının hesaplanması için hacimsel ölçüm yapılması,
5. Cisimlerin ve tesisatların belgelendirilmesi ve çizimin güncellenmesi için yerinde ölçülmesi,

3.2.3.11 Kağıt Üretim Sektöründe Kullanımı

Yukarıdaki uygulama alanlarına ek olarak kağıt sektöründe de fotogrametrik yöntemler kullanılmaktadır. Fotogrametri bu sektörde,

1. Planlama, eğitim ve tasarım için mevcut tesisatın belgelendirilmesinde,
2. Dokuma desenlerinin muayenesi ve çeşitli kağıt derecelerinde kullanılan kumaş şeklinin belirlenmesinde,

kullanılır.

4. FOTOGRAMETRİK VERİ ELDE ETME SİSTEMLERİNİN KALİBRASYON YÖNTEMLERİ

4.1 Kalibrasyonun Tanımı ve Amacı

Kamera kalibrasyonu, kamera sistemini en iyi şekilde ifade eden parametrelerin bulunması olarak ifade edilir. Bu parametreler bilindiği üzere resim çekme merkezin uzaklığı (odak uzaklığı, c), resim koordinat sistemi eksenlerinin yönleri ve dönüklükleri ile distorsiyon parametreleridir. Aynı zamanda bir resim çekme makinesinin kalibrasyonu fotogrametrik nokta belirleme işleminin tersi olarak da ifade edilebilir. Fotogrametrik nokta belirlemesinde iç yöneltme elemanları bilinir ve cisim noktalarının koordinatları istenir kalibrasyonda ise cisim noktalarının koordinatları bilinir ve iç yöneltme elemanları aranır.

4.1.1 Resim Çekme Makinelerinin İç Yöneltme Elemanları ve Hata Kaynakları

Fotogrametride resim çekimi sırasında resim çekim makinesinin mercekleri fiziksel bir takım özelliklere sahiptir. Optik izdüşüm merceklerin fiziksel yapısı ile ilgili olarak resim düzleminin (merkezi izdüşüm düzlemi) değişik yerlerinde değişik etkilere sebep olur. Merceklerin izdüşümdeki bu fiziksel etkilerine genel olarak distorsiyon adı verilir. Kamera kalibrasyonu ile distorsiyonun resim koordinat sistemi olan resim düzlemine etkisi belirlenerek kolinerite (doğrusallık) koşulunda doğru lineer transformasyon parametrelerinin kullanılması sağlanır. Bu distorsiyon iki çeşit olabilir. Bunlar:

1. Radyal Distorsiyon
2. Teğetsel Distorsiyon

4.1.1.1 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.

$$\delta r = K_1 r^3 + K_2 r^5 + K_3 r^7 \quad (4.1)$$

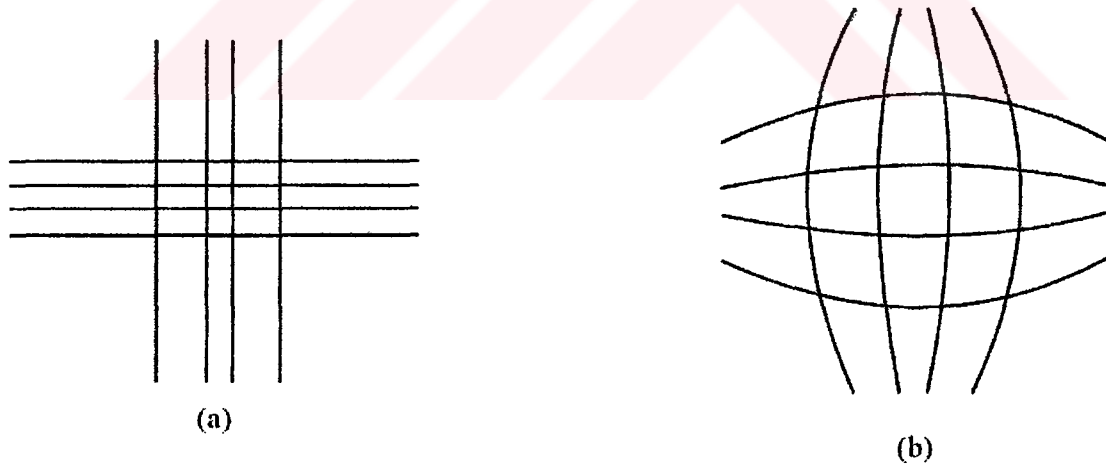
Bu açısal değişimin etkisinin resim koordinat sistemi içerisinde x ve y yönlerindeki bileşenleri ise;

$$\delta r_x = \delta r(x-x_0)/r \quad \delta r_y = \delta r(y-y_0)/r \quad (4.2)$$

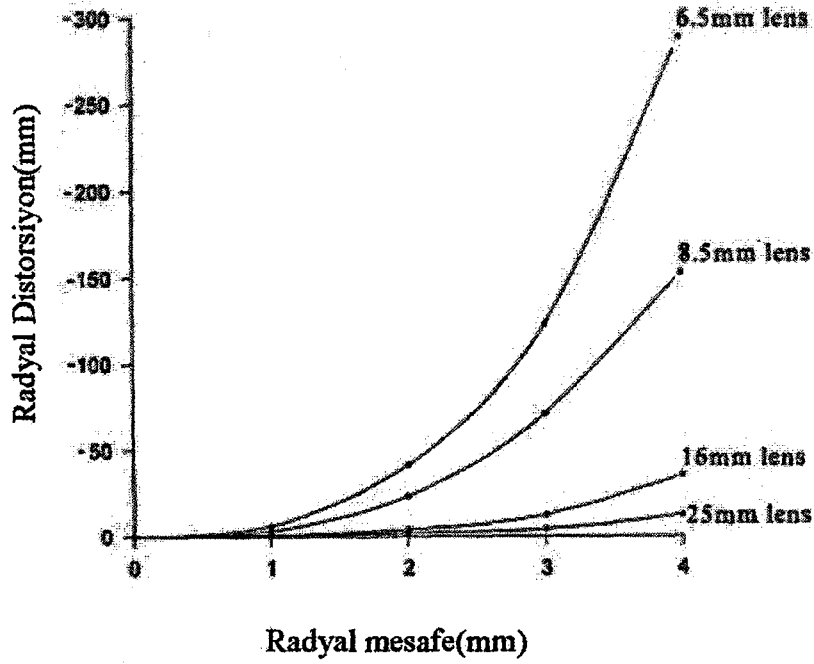
Genelde distorsiyon fonksiyonu radyal elemanların özellikle de radyal fonksiyonun ilk teriminin etkisi altındadır. Bir resmin gerçek koordinatları (u,v), distorsiyona uğramış koordinatları (u',v') ve gerçek normalleştirilmiş resim koordinatları (x,y) olmak üzere bu koordinatlar arasında şu bağıntılar yazılabilir.

$$u' = u + k(u-u_0)(x^2+y^2) \quad v' = v + k(v-v_0)(x^2+y^2) \quad (4.3)$$

Distorsiyon merkezi ana noktayla aynıdır. Yukarıdaki değerler kalibrasyonla bulunarak distorsiyon düzeltilebilir. Gerçekte düz çizgiler distorsiyon sonucunda resim üzerine parabolik olarak izdüşer. (Şekil 4.1)



Şekil 4.1 ((b), (a)'da gösterilen düz çizgilerin distorsiyon etkisiyle aldıkları durumu gösterir)



Şekil 4.2 (Çeşitli kamera lenslerine açısız distorsiyon etkisini göstermektedir.)

Geniş formatlı uzak mesafe kameraları (odak uzaklığı 150 mm olan kameralar için) mercek gücüne bağılı distorsiyon değeri 10-20 mikron arasında değişir. (Şekil 4.2)

4.1.1.2 Teğetsel Distorsiyon

Radyal distorsiyonun azaltılması, uygun büyütme ve filtreleme amacıyla resim çekme makineleri, genelde değişik mercek yapılarının bir arada kullanılması ile oluşturulur ve özellikle bu yapı seçilir. Bu çeşit resim çekme makinelerinde kullanılan çoklu mercek yapısını oluşturan merceklerin optik eksenlerinin tam olarak aynı doğru üzerinde oluşmaması sebebi ile mercek merkezleri aynı doğru üzerinde bulunmazlar.

Bu sebepten oluşan görüntü kayması yine resim düzleminin koordinat eksenlerine göre bileşkeleri ile ifade edilecek olursa ;

$$\delta x = P_1(r^2 + 2(x-x_0)^2) + 2P_2(x-x_0)(y-y_0) \quad (4.4)$$

$$\delta y = P_2(r^2 + 2(y-y_0)^2) + 2P_1(x-x_0)(y-y_0) \quad (4.5)$$

elde edilir.

4.2 Resim Çekme Makinelerinin Kalibrasyon Yöntemleri

4.2.1 Klasik Yöntemler

4.2.1.1 Çekim Sırasında Kalibrasyon Yöntemi

Adından da anlaşılacağı gibi fotogrametrik resim çekimi ve yöneltme için gerekli olan kontrol noktalarının, değerlendirme aşamasında resim çekim merkezi (izdüşüm merkezi) koordinatlarının (dış yöneltme parametreleri) hesaplanabilmesi için gerektiğinden fazla kontrol noktası kullanılması ve resim çekimi sırasında hedeflerin oluşturduğu çerçevenin konumunun hassas bir şekilde klasik jeodezik ölçmeler ile tespit edilmesidir. Bu tip bir kalibrasyon çalışmasında önemli olan hedeflerin oluşturduğu şeklin hacimsel yapısı yani resim çekim noktası ile resim çekilen obje arasındaki yatay uzunluk ve kontrol noktalarının birbirleri ile aralarındaki derinlik oranının hassas bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir ki bu ancak kullanılan kontrol noktalarının üç boyutlu koordinatlarının doğruluğuna bağlı olacaktır.

Yöntemin matematik modeli ise yöneltme için kullanılan demet dengelemesi işleminde resim çekim merkezi üç boyutlu koordinatlarının yardımı ile iç yöneltme parametrelerinin dengelemeye bilinmeyen olarak katılması sonucu artacak olan bilinmeyen sayısının doğruluğu yüksek bir şekilde bilinen kontrol noktalarındaki fazla resim koordinatı ölçmesi sonucu örtebilmek ve resim çekim merkezi koordinatların yüksek bir doğrulukla hesaplama algoritmasıdır.

Çekim sırasında kalibrasyonun en önemli avantajı çekim işleminin kalibrasyonun yenilenerek daha sağlıklı sonuçlar elde edilmesidir. İkinci olarak ise çeşitli kameraların ve hatta normal profesyonel kameraların bile bu şekilde fotogrametrik amaçlar ile kullanılabilmesi bir avantaj olacak gösterilebilir.

Bu yöntemin en önemli dezavantajı ise fotoğraf çekimi ve arazi çalışması için gerekli olan zaman ve kullanılacak jeodezik malzemenin fazla ve yeterli doğruluğu verebilmesi gerekliliğidir.

4.2.1.2.Kendine Özgü Kalibrasyon Yöntemi

Kendine özgü kalibrasyon yöntemi aslında çekim sırasında kalibrasyonun doğal bir uzantısıdır. Kullanılan matematik model tamamen aynı olmasına karşın uygulanan yöntem farklıdır. Bu yöntemde fotoğraf çekiminden önce resim çekme makinesi laboratuvar ortamında üç boyutlu, koordinatları yüksek doğrulukla bilinen bir test alanında ve yine koordinatları test alanı ile aynı sistemde ve aynı doğrulukta bilinen noktalardan yapılan resim çekimleri ile kalibre edilir. Yapılan kalibrasyon sonucunda hesaplanan iç yönlendirme değerleri mercek sisteminin distorsiyon değerlerini de içermektedir. Burada önemli olan daha önceden mercek sistemleri oluşturulurken optik esaslar ile belirlenirler. Elde olan bu değerler de demet dengelemesine yaklaşık değer olarak alınır. Ayrıca bu yöntemde hiç cisim uzayına ait etkili bir kontrol tekniğinin kullanılmasına gerek duyulmaması ve resim çekim noktalarında tam olarak hedeflerden gelen ışınların kesişmesinin sağlanmasındaki doğruluğun belirlenebilmesidir. Bu ise tamamen laboratuvar ortamında sağlanabilen, resim çekim merkezleri ve test alanının birbirleri arasındaki geometrik yapının doğru olarak kurulabilmesi ile mümkündür.

Bu yöntemin avantajları ise, gerçekten doğruluğu yüksek bir kalibrasyon sonucu sağlanmasıdır. Buna karşılık zaman ve laboratuvar ortamı gerektirmesinden kaynaklanan dezavantajlara sahiptir.

4.2.1.3 Geometrik Özellikleri Kullanarak Kalibrasyon Yöntemi

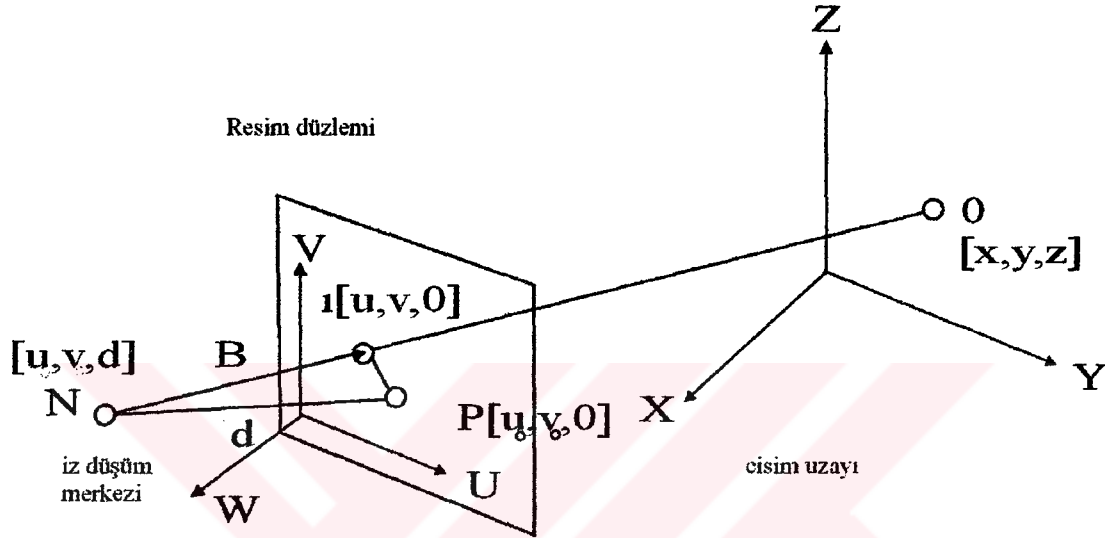
Bu yöntemi kendine özgü kalibrasyondan farklı yapan özellik laboratuvar ortamında hazırlanan ve bir doğru oluşturan kontrol noktalarının oluşturduğu düzleme tam olarak dik bir düzlem üzerinde bulunan bir resim çekme merkezi kullanılması, bu şekilde mercek sistemindeki radyal ve teğetsel distorsiyonların yüksek doğrulukla belirlenebilmesidir. Bununla birlikte kamera sabiti ve ana noktanın koordinatları bu yöntem ile belirlenemez ki bu yöntemin diğer kalibrasyon yöntemlerine olan gereksiniminin açık bir kanıtıdır. Kalibrasyon yöntemleri içinde ise video kameraların kalibrasyonunda kullanılabilmesi ve hızı en büyük avantajıdır.

Tüm bu anlatılan kalibrasyon yöntemleri aslında bütün fotogrametristlerin bildiği gibi, resim çekim merkezinin üç boyutlu koordinatları (X_0, Y_0, Z_0) ile iç yönlendirme elemanları (x_0, y_0, z_0) arasında güçlü bir geometrik korelasyon vardır. Bu sebeple uygulanan kalibrasyon yöntemi ile öncelikle radyal ve teğetsel distorsiyon

belirlendikten sonra kestirme yardımıyla resmin izdüşüm merkezi koordinatları belirlenmeli ve demet dengelemesinin son adımında da bu parametrelere ve iç yöneltmenin yaklaşık değerlerine bağlı olarak ana nokta koordinatları ve kamera sabiti (odak uzaklığı) karesel ortalama hataları ile beraber hesaplanmalıdır.

4.2.2 Lineer Transformasyon ile Kalibrasyon Yöntemleri

4.2.2.1 Direkt Lineer Transformasyon Yöntemi



Şekil 4.3 (Resim koordinat sistemi ile cisim koordinat sistemi arasındaki geometrik ilişkiyi gösterir.)

Şekil 4.3'te gösterilen resim koordinat sistemi ile cisim koordinat sistemi arasındaki ilişki matematiksel olarak şu şekilde ifade edilir.

$$\begin{aligned} u - u_0 &= -\frac{d}{\lambda_u} \frac{r_{11}(x - x_0) + r_{12}(y - y_0) + r_{13}(z - z_0)}{r_{31}(x - x_0) + r_{32}(y - y_0) + r_{33}(z - z_0)} \\ v - v_0 &= -\frac{d}{\lambda_v} \frac{r_{21}(x - x_0) + r_{22}(y - y_0) + r_{23}(z - z_0)}{r_{31}(x - x_0) + r_{32}(y - y_0) + r_{33}(z - z_0)} \end{aligned} \quad (4.6)$$

Burada,

u_0, v_0 noktanın resim noktaları

u, v ana noktanın resim koordinatları

r_{ij} dönme matrisi elemanları

x, y noktanın cisim koordinatları

λ_u, λ_v birim dönüşümü katsayıları

d ise ölçek faktörüdür.

(4.6) 'nın yeniden düzenlenmesiyle,

$$\begin{aligned} u &= \frac{L_1 x + L_2 y + L_3 z + L_4}{L_9 x + L_{10} y + L_{11} z + 1} \\ v &= \frac{L_5 x + L_6 y + L_7 z + L_8}{L_9 x + L_{10} y + L_{11} z + 1} \end{aligned} \quad (4.7)$$

Burada,

$$\begin{aligned} L_1 &= \frac{u_0 r_{31} - d_u r_{11}}{D} & L_2 &= \frac{u_0 r_{32} - d_u r_{12}}{D} & L_3 &= \frac{u_0 r_{33} - d_u r_{13}}{D} \\ L_4 &= \frac{(d_u r_{11} - u_0 r_{31})x_0 + (d_u r_{12} - u_0 r_{32})y_0 + (d_u r_{13} - u_0 r_{33})z_0}{D} \\ L_5 &= \frac{v_0 r_{31} - d_v r_{21}}{D} & L_6 &= \frac{v_0 r_{32} - d_v r_{22}}{D} & L_7 &= \frac{v_0 r_{33} - d_v r_{23}}{D} \\ L_8 &= \frac{(d_v r_{21} - v_0 r_{31})x_0 + (d_v r_{22} - v_0 r_{32})y_0 + (d_v r_{23} - v_0 r_{33})z_0}{D} \\ L_9 &= \frac{r_{31}}{D} & L_{10} &= \frac{r_{32}}{D} & L_{11} &= \frac{r_{33}}{D} \\ D &= -(x_0 r_{31} + y_0 r_{32} + z_0 r_{33}) \\ d_u &= \frac{d}{\lambda_u} & d_v &= \frac{d}{\lambda_v} \end{aligned} \quad (4.8)$$

(4.7) ve (4.8) eşitliklerindeki $L_1, L_2, L_3, \dots, L_{11}$ katsayıları direk lineer transformasyon (DLT) parametreleri olarak adlandırılır. Bunlar cisim uzayı referans düzlemi ile resim düzlemi arasındaki ilişkiyi yansıtır.

a) Üç Boyutlu DLT Metodu

Yukarıdaki (4.7) eşitliği 3 boyutlu DLT eşitliğidir. Fakat bu eşitlik kamera lenslerinin optik distorsiyonlarından dolayı hatalar içermektedir. Bu hatalar dikkate alınırsa eşitlik aşağıdaki gibi düzenlenir.

$$\begin{aligned}
u - \Delta u &= \frac{L_1 x + L_2 y + L_3 z + L_4}{L_9 x + L_{10} y + L_{11} z + 1} \\
v - \Delta v &= \frac{L_5 x + L_6 y + L_7 z + L_8}{L_9 x + L_{10} y + L_{11} z + 1}
\end{aligned} \tag{4.9}$$

Burada Δu ve Δv optik distorsiyon nedeniyle oluşan hatalardır.

Bu eşitliğin 3 boyutlu direkt lineer transformasyon (DLT) metodunda kullanılmasının 2 yolu vardır. Bunlar;

- Kamera kalibrasyonu
- Ham koordinat hesaplaması

(4.9) eşitliği DLT parametreleri dikkate alınarak tekrar düzenlenecek olursa;

$$\begin{bmatrix} x & y & z & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -ux & -uy & -uz \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x & y & z & 1 & -vx & -vy & -vz \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi r^2 R & \xi r^4 R & \xi r^6 R & \xi \eta R & (r^2 + 2\xi^2)R \\ \eta r^2 R & \eta r^4 R & \eta r^6 R & \eta \xi R & (r^2 + 2\eta^2)R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ \vdots \\ L_{15} \\ L_{16} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \tag{4.10}$$

Burada;

$$\begin{aligned}
\Delta u &= \xi(L_{12}r^2 + L_{13}r^4 + L_{14}r^6) + L_{15}\xi\eta + L_{16}(r^2 + 2\xi^2) \\
\Delta v &= \eta(L_{12}r^2 + L_{13}r^4 + L_{14}r^6) + L_{15}\xi\eta + L_{16}(r^2 + 2\eta^2) \\
\xi &= u - u_0 \\
\eta &= v - v_0 \\
r^2 &= \xi^2 + \eta^2 \\
R &= L_9 x + L_{10} y + L_{11} z + 1
\end{aligned} \tag{4.11}$$

(4.10) ve (4.11)'de gösterilen ek parametreler arasındaki L_{12}, L_{13}, L_{14} optik distorsiyonla ilgili, L_{15}, L_{16} ise merkezi distorsiyonla ilgili parametrelerdir (Walton 1981). Bu parametrelerin kamera kalibrasyonuna dahil edilmesi isteğe bağlıdır.

Kalibrasyonda 16 parametreden daha az parametre kullanılması durumunda, (4.10)'daki parametreler matrisinden satırlar ve katsayılar matrisinden de kullanılmayan kollar çıkarılır.

(4.10) eşitliği DLT parametreleri (L_1-L_{11}) ve ek parametreler ($L_{12}-L_{16}$) 'in bilinmeyen olarak kabul edilmesine dayanır. Fakat (x,y,z) cisim koordinatları bilinmektedir. Bu durumda (x,y,z) koordinatları önceden bilinen kontrol noktalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Genelde kontrol noktalarını biz işaretler ve çerçeve koyarız. Bu çerçeveye kalibrasyon çerçevesi veya kontrol objeleri denilmektedir. Bu kontrol noktalarının aynı düzlemde bulunmamasına dikkat edilmelidir. Diğer bir deyişle kontrol noktaları arasında bir hacim oluşmalıdır. Oluşan bu hacme kontrol hacmi adı verilir.

(4.10) eşitliğini n kontrol noktası için genişletip tekrar düzenleyecek olursak,

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_1x_1 & -u_1y_1 & -u_1z_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_1 & y_1 & z_1 & 1 & -v_1x_1 & -v_1y_1 & -v_1z_1 \\ & & & : & & & & & : & & \\ x_n & y_n & z_n & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_nx_n & -u_ny_n & -u_nz_n \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_n & y_n & z_n & 1 & -v_nx_n & -v_ny_n & -v_nz_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_1 r_1^2 R_1 & \xi_1 r_1^4 R_1 & \xi_1 r_1^6 R_1 & \xi_1 \eta_1 R_1 & (r_1^2 + 2\xi_1^2)R_1 \\ \eta_1 r_1^2 R_1 & \eta_1 r_1^4 R_1 & \eta_1 r_1^6 R_1 & \eta_1 \xi_1 R_1 & (r_1^2 + 2\eta_1^2)R_1 \\ & & : & : & : \\ \xi_n r_n^2 R_n & \xi_n r_n^4 R_n & \xi_n r_n^6 R_n & \xi_n \eta_n R_n & (r_n^2 + 2\xi_n^2)R_n \\ \eta_n r_n^2 R_n & \eta_n r_n^4 R_n & \eta_n r_n^6 R_n & \eta_n \xi_n R_n & (r_n^2 + 2\eta_n^2)R_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ : \\ L_{15} \\ L_{16} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ : \\ u_n \\ v_n \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

En küçük kareler yöntemi kullanılarak DLT parametrelerini ve ek parametreleri elde etmek için, (4.12)'de denklem sayısının bilinmeyen sayısından büyük olması gerekmektedir. Her bir kontrol noktası 2 denklem sağlar ve (4.12)'yi çözmek için gerekli olan minimum kontrol noktası sayısı parametre sayısına bağlı olarak aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 4.1 (Parametre sayısına bağılı olarak gerekli olan minimum kontrol noktası sayısı)

PARAMETRE SAYISI	MINIMUM KONTROL NOKTASI SAYISI
11	6
12	6
14	7
16	8

(4.12)'deki katsayılar matrisinde 12. ve 16. kolonlar arasındaki tüm kolonlar L_9, L_{10}, L_{11} 'in fonksiyonu olan R_i 'yi içerir. Sonuç olarak bu sistemi direkt olarak çözmek mümkün değildir ve iteratif yaklaşım kullanılmalıdır. Bu katsayılar matrisindeki R_i 'yi hesaplamak için bir önceki iterasyondan L_9-L_{12} kullanılır ve (4.12) tekrar elde edilir. İterasyon bu şekilde devam eder.

(4.12) basit olarak ,

$$XL = Y \quad (4.13)$$

şeklinde ifade edilir. (4.13) dahada genişletilecek olursa,

$$\begin{aligned} (X^T X)L &= X^T Y \\ (X^T X)^{-1}(X^T X)L &= (X^T X)^{-1}(X^T Y) \\ L &= (X^T X)^{-1}(X^T Y) \end{aligned} \quad (4.14)$$

Burada $()^T$ transpose $()^{-1}$ ise ters matrisdir.

DLT parametrelerinin ve ek parametrelerin en küçük kareler tahmini (4.14) 'te tanımlanan matrisden elde edilir. Bu konu daha geniş olarak en küçük kareler metodunda açıklanacaktır.

(x,y,z) için (4.9)'un tekrar düzenlenmesiyle,

$$\begin{bmatrix} L_1 - \alpha L_9 & L_2 - \alpha L_{10} & L_3 - \alpha L_{11} \\ L_5 - \beta L_9 & L_6 - \beta L_{10} & L_7 - \beta L_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_4 - \alpha \\ L_8 - \beta \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

Burada,

$$\begin{aligned}
\alpha &= u - \Delta u \\
\beta &= v - \Delta v \\
\Delta u &= \xi(L_{12}r^2 + L_{13}r^4 + L_{14}r^6) + L_{15}\xi\eta + L_{16}(r^2 + 2\xi^2) \\
\Delta v &= \eta(L_{12}r^2 + L_{13}r^4 + L_{14}r^6) + L_{15}\eta\xi + L_{16}(r^2 + 2\eta^2) \\
\xi &= u - u_0 \\
\eta &= v - v_0 \\
r^2 &= \xi^2 + \eta^2
\end{aligned} \tag{4.16}$$

(4.15) 'in m ($m>2$) kamera sayısı için genişletilmesiyle,

$$\begin{bmatrix} L_1^{(1)} - \alpha^{(1)}L_9^{(1)} & L_2^{(1)} - \alpha^{(1)}L_{10}^{(1)} & L_3^{(1)} - \alpha^{(1)}L_{11}^{(1)} \\ L_5^{(1)} - \beta^{(1)}L_9^{(1)} & L_6^{(1)} - \beta^{(1)}L_{10}^{(1)} & L_7^{(1)} - \beta^{(1)}L_{11}^{(1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ L_1^{(m)} - \alpha^{(m)}L_9^{(m)} & L_2^{(m)} - \alpha^{(m)}L_{10}^{(m)} & L_3^{(m)} - \alpha^{(m)}L_{11}^{(m)} \\ L_5^{(m)} - \beta^{(m)}L_9^{(m)} & L_6^{(m)} - \beta^{(m)}L_{10}^{(m)} & L_7^{(m)} - \beta^{(m)}L_{11}^{(m)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_4^{(1)} - \alpha^{(1)} \\ L_8^{(1)} - \beta^{(1)} \\ \vdots \\ L_4^{(m)} - \alpha^{(m)} \\ L_8^{(m)} - \beta^{(m)} \end{bmatrix} \tag{4.17}$$

elde edilir.

(4.12) ve (4.13)'te açıklanan en küçük kareler yöntemi uygulanarak cisim yüzeyindeki işaretleyicilerin üç boyutlu koordinatları hesaplanabilir.

(4.8) eşitliğinden;

$$L_1x_0 + L_2y_0 + L_3z_0 = -L_4$$

$$L_5x_0 + L_6y_0 + L_7z_0 = -L_8$$

$$L_9x_0 + L_{10}y_0 + L_{11}z_0 = -1$$

$$\begin{bmatrix} L_1 & L_2 & L_3 \\ L_5 & L_6 & L_7 \\ L_9 & L_{10} & L_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L_4 \\ -L_8 \\ -1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 & L_2 & L_3 \\ L_5 & L_6 & L_7 \\ L_9 & L_{10} & L_{11} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -L_4 \\ -L_8 \\ -1 \end{bmatrix} \tag{4.18}$$

eşitliği elde edilebilir. Yine benzer olarak (4.8)'den

$$\begin{aligned}
L_9^2 + L_{10}^2 + L_{11}^2 &= \frac{1}{D^2} [r_{31}^2 + r_{32}^2 + r_{33}^2] = \frac{1}{D^2} \\
(DL_1)(DL_9) + (DL_2)(DL_{10}) + (DL_3)(DL_{11}) &= u_0 [r_{31}^2 + r_{32}^2 + r_{33}^2] - d_u [r_{11}r_{31} + r_{12}r_{32} + r_{13}r_{33}] = u_0 \\
(DL_5)(DL_9) + (DL_6)(DL_{10}) + (DL_7)(DL_{11}) &= v_0 \\
u_0 &= D^2 [L_1L_9 + L_2L_{10} + L_3L_{11}] = \frac{L_1L_9 + L_2L_{10} + L_3L_{11}}{L_9^2 + L_{10}^2 + L_{11}^2} \\
v_0 &= D^2 [L_5L_9 + L_6L_{10} + L_7L_{11}] = \frac{L_5L_9 + L_6L_{10} + L_7L_{11}}{L_9^2 + L_{10}^2 + L_{11}^2} \quad (4.19)
\end{aligned}$$

Bu eşitlik R transformasyon matrisinin ortogonalite koşuluna dayanılarak türetilmiştir.

$$\begin{aligned}
\sum_{j=1}^3 r_{ij}r_{kj} &= \delta_{ik} \\
\sum_{i=1}^3 r_{ij}r_{ik} &= \delta_{jk} \quad (4.20)
\end{aligned}$$

Burada j,k =1...3' tür. (4.14) eşitliği ile en küçük kareler yöntemi deneysel hatalar nedeniyle ortogonalite koşulunu otomatik olarak garantilemez. Bu durum DLT metodunun iç yönlendirme problemlerinden bir tanesidir. Değiştirilmiş DLT metodu bu problemin çözümünde kullanılabilir. Bu metod ileride daha detaylı olarak anlatılacaktır.

Kosinüsler için (4.8)'i genişletecek olursak;

$$\begin{aligned}
r_{31} &= DL_9 & r_{32} &= DL_{10} & r_{33} &= DL_{11} \\
r_{11} &= \frac{D[u_0L_9 - L_1]}{d_u} & r_{12} &= \frac{D[u_0L_{10} - L_2]}{d_u} & r_{13} &= \frac{D[u_0L_{11} - L_3]}{d_u} \\
r_{21} &= \frac{D[v_0L_9 - L_5]}{d_v} & r_{22} &= \frac{D[v_0L_{10} - L_6]}{d_v} & r_{23} &= \frac{D[v_0L_{11} - L_7]}{d_v} \quad (4.21)
\end{aligned}$$

elde edilir.

Tüm doğrultu kosinüslerini elde etmek için (4.21)'deki d_u ve d_v 'nin bilinmesi gerekmektedir. (4.20) ve (4.21)'den;

$$r_{11}^2 + r_{12}^2 + r_{13}^2 = \frac{D^2 [(u_0L_9 - L_1)^2 + (u_0L_{10} - L_2)^2 + (u_0L_{11} - L_3)^2]}{d_u^2} = 1$$

$$r_{21}^2 + r_{22}^2 + r_{23}^2 = \frac{D^2[(v_0 L_9 - L_5)^2 + (v_0 L_{10} - L_6)^2 + (v_0 L_{11} - L_7)^2]}{d_v^2} = 1$$

$$d_u^2 = D^2[(u_0 L_9 - L_1)^2 + (u_0 L_{10} - L_2)^2 + (u_0 L_{11} - L_3)^2]$$

$$d_v^2 = D^2[(v_0 L_9 - L_5)^2 + (v_0 L_{10} - L_6)^2 + (v_0 L_{11} - L_7)^2] \quad (4.22)$$

elde edilir.

Üç euler açısını 9 doğrultu kosinüslerinden hesaplayabiliriz.

b) İki Boyutlu DLT Metodu

2 boyutlu analiz yapılması durumunda cisim uzayı düzlemi referans düzleminden resim referans düzlemine aktarma işlemi;

$$u = \frac{L_1 x + L_2 y + L_3}{L_7 x + L_8 y + 1}$$

$$v = \frac{L_4 x + L_5 y + L_6}{L_7 x + L_8 y + 1} \quad (4.23)$$

eşitliğine indirgenir. Çünkü bu durumda daima $z=0$ 'dır. (4.23) eşitliği n kontrol noktası ve m kamera sayısına göre genişletilecek olunursa;

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -u_1 x_1 & -u_1 y_1 \\ 0 & 0 & 0 & x_1 & y_1 & 1 & -v_1 x_1 & -v_1 y_1 \\ & & & : & & & : & \\ x_n & y_n & 1 & 0 & 0 & 0 & -u_n x_n & -u_n y_n \\ 0 & 0 & 0 & x_n & y_n & 1 & -v_n x_n & -v_n y_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ : \\ L_7 \\ L_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ : \\ u_n \\ v_n \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

ve

$$\begin{bmatrix} L_1^{(1)} - u^{(1)} L_7^{(1)} & L_2^{(1)} - u^{(1)} L_8^{(1)} \\ & L_5^{(1)} - v^{(1)} L_8^{(1)} \\ & : \\ L_1^{(m)} - u^{(m)} L_7^{(m)} & L_2^{(m)} - u^{(m)} L_8^{(m)} \\ L_4^{(m)} - v^{(m)} L_7^{(m)} & L_5^{(m)} - v^{(m)} L_8^{(m)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_3^{(1)} - u^{(1)} \\ L_6^{(1)} - v^{(1)} \\ : \\ L_3^{(m)} - u^{(m)} \\ L_6^{(m)} - v^{(m)} \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

eşitlikleri elde edilir.

İki boyutlu kamera kalibrasyon işleminin çözümü için en az 4 kontrol noktası ve 1 kamera gerekmektedir.

c) Kalibrasyon Hatası

(4.12)'ye dayanan normal sayıdaki DLT ve ek parametreleri belirlemek için iteratif yaklaşım kullanılır. Kamera kalibrasyonu üç boyutlu kamera kalibrasyonundaki 11,12,14 ve 16. parametrelerle gerçekleştirilebilir (iterasyon limiti 20'dir.) 5. iterasyondan sonraki her bir iterasyon, hesaplanan parametreler (4.17) kullanılarak kontrol noktalarının cisim uzayı düzlemindeki koordinatlarının tekrar elde etmek için resim koordinatlarına uygulanır. Kontrol noktalarının cisim koordinatlarının artık hataları ölçülen ve tekrar elde edilen koordinatlarından hesaplanır. Maksimum sayıdaki parametre kontrol noktası sayısına dayanarak hesaplanır ve 11,12...16 parametreleri için belli aralıklarda kalibrasyon gerçekleştirilir.

Yapılan deneylerle DLT metodu için şu önemli sonuçlar elde edilmiştir.

1. Kontrol nesnesi hareket alanını kaplamak için yeterince geniş olmalıdır. Eğer oldukça küçükse koordinat tahmini için tehlikeli durum vardır ve sonuçta doğru olmayan koordinatlar hesaplanır.
2. Kamera kalibrasyonu esnasında bir kez kayıt yapıldığında kamera ayarları değiştirilmemelidir.
3. Mümkün olduğunca çok sayıda kontrol noktası kullanılmalı ve bu kontrol noktaları kontrol alanı içinde mümkün olduğunca düzenli olarak dağıtılmalıdır. Bu şekilde sistemin serbestliği artırılabilecek ve sonuçta kalibrasyon duyarlılığı artacaktır.
4. Karmaşık hareketlerin analizinde sistemin duyarlılığını artırmak için mümkün olduğunca fazla kamera kullanılmalıdır. Ancak kameraların karşılıklı olarak birbirlerine bakacak şekilde yerleştirilmesinden kaçınılmalı veya en azından bu durumla karşılaşıldığında bu kamera kombinasyonu koordinat hesaplamasında kullanılmamalıdır.
5. Kontrol cisimleri eksenlerin hareketi ile olan ilişkisinin iyi olması için özellikle hizalı şekilde kurulmalıdır. Eğer yatay ekseni 3 boyut analizinde hizalamak zor ise en azından z ekseni dik konumda tutulmalıdır.

4.2.2.2 Ağırlıkların Dikkate Alınmasıyla En Küçük Kareler Yöntemi

DLT metodunda yer alan gerçek en küçük kareler metodu algoritması eşitlik (4.14)'te gösterilenden daha karmaşıktır. Klasik en küçük kareler yöntemi daha kararlı kök kümeleri elde etmek için ağırlıkları içermektedir. DLT metodundaki (4.13) ve (4.14) no'lu eşitlikler ;

$$XL=Y$$

$$WXL=WL$$

$$(X'WX)L = X'WY$$

$$(X'WX)^{-1}(X'WX)L = (X'WX)^{-1}(X'WY) \quad (4.26)$$

$$L = (X'WX)^{-1}(X'WY)$$

olarak genişletilebilir. Buradaki W ortogonal ağırlık matrisi olup,

$$W = \begin{bmatrix} W_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & W_2 & 0 & 0 & 0 \\ . & . & . & . & . \\ 0 & 0 & . & W_{n-1} & 0 \\ 0 & 0 & . & 0 & W_n \end{bmatrix} \quad (4.27)$$

n ise sistemde yer alan eşitlik sayısıdır.

Kamera kalibrasyonunda (4.26)'da gösterilen X,Y ve L matrisleri;

$$X = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_1x_1 & -u_1y_1 & -u_1z_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_1 & y_1 & z_1 & 1 & -v_1x_1 & -v_1y_1 & -v_1z_1 \\ : & : & : & : & : & : & : & : & : & : & : \\ x_n & y_n & z_n & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_nx_n & -u_ny_n & -u_nz_n \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_n & y_n & z_n & 1 & -v_nx_n & -v_ny_n & -v_nz_n \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \xi_1 r_1^2 R_1 & \xi_1 r_1^4 R_1 & \xi_1 r_1^6 R_1 & \xi_1 \eta_1 R_1 & (r_1^2 + 2\xi_1^2) R_1 \\ \eta_1 r_1^2 R_1 & \eta_1 r_1^4 R_1 & \eta_1 r_1^6 R_1 & \eta_1 \xi_1 R_1 & (r_1^2 + 2\eta_1^2) R_1 \\ : & : & : & : & : \\ \xi_n r_n^2 R_n & \xi_n r_n^4 R_n & \xi_n r_n^6 R_n & \xi_n \eta_n R_n & (r_n^2 + 2\xi_n^2) R_n \\ \eta_n r_n^2 R_n & \eta_n r_n^4 R_n & \eta_n r_n^6 R_n & \eta_n \xi_n R_n & (r_n^2 + 2\eta_n^2) R_n \end{bmatrix}$$

$$L = \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ \vdots \\ L_{15} \\ L_{16} \end{bmatrix} \quad Y = \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ \vdots \\ u_n \\ v_n \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

'dir.

$$\xi = u - u_0$$

$$\eta = v - v_0$$

$$r^2 = \xi^2 + \eta^2$$

$$R = L_9x + L_{10}y + L_{11}z + 1 \quad (4.29)$$

DLT metodundaki (4.10) eşitliğinin (x,y,z) için tekrar düzenlenmesiyle, u ve v koordinatlarının içerdiği rasgele hatalar;

$$\begin{aligned} \delta_u &= u - [L_1 - uL_9]x - [L_2 - uL_{10}]y - [L_3 - uL_{11}]z - \Delta uR \\ \delta_v &= v - [L_5 - vL_9]x - [L_6 - vL_{10}]y - [L_7 - vL_{11}]z - \Delta vR \end{aligned} \quad (4.30)$$

şeklindedir. Burada, ϵ_{uu} , ϵ_{vv} en küçük kareler tahminin içerdiği rasgele hatalardır ve

$$\begin{aligned} \Delta u &= \xi(L_{12}r^2 + L_{13}r^4 + L_{14}r^6) + L_{15}\xi\eta + L_{16}(r^2 + 2\xi^2) \\ \Delta v &= \eta(L_{12}r^2 + L_{13}r^4 + L_{14}r^6) + L_{15}\xi\eta + L_{16}(r^2 + 2\eta^2) \end{aligned} \quad (4.31)$$

bağımsız oldukları varsayılırsa,

$$\begin{aligned} \sigma^2(\delta_u) &= \sigma^2(u) + [L_1 - uL_9]^2 \sigma^2(x) + [L_2 - uL_{10}]^2 \sigma^2(y) + [L_3 - uL_{11}]^2 \sigma^2(z) \\ \sigma^2(\delta_v) &= \sigma^2(v) + [L_5 - vL_9]^2 \sigma^2(x) + [L_6 - vL_{10}]^2 \sigma^2(y) + [L_7 - vL_{11}]^2 \sigma^2(z) \end{aligned} \quad (4.32)$$

elde edilir. Burada, $\sigma^2(\epsilon_{uu})$ ve $\sigma^2(\epsilon_{vv})$ u,v koordinat hesabının varyanslarıdır. $\sigma^2(u)$ ve $\sigma^2(v)$ resim koordinatlarının varyanslarıdır. Kontrol noktalarının sayısallaştırılmasıyla $\sigma^2(u)$ ve $\sigma^2(v)$ belirlenebilir. $\sigma^2(x)$, $\sigma^2(y)$ ve $\sigma^2(z)$ ise cisim koordinatlarının varyansları olup kalibrasyonu yapan kişi tarafından verilir.

Varyansın iki tarafta da ağırlıklı olarak kullanılması yaygın bir uygulamadır.

$$W = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma^2(\delta u_1)} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma^2(\delta v_1)} & 0 & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & \cdot & \frac{1}{\sigma^2(\delta u_n)} & 0 \\ 0 & 0 & \cdot & 0 & \frac{1}{\sigma^2(\delta v_n)} \end{bmatrix} \quad (4.33)$$

(4.26), (4.28) ve (4.33) kullanılarak iteratif yaklaşımla kalibrasyon gerçekleştirilir. Yaygın olarak kullanılan bu yaklaşım şu şekilde gerçekleştirilir.

1. İlk iterasyonda (4.31)'deki R hesaplanamaz. Çünkü L_9 , L_{10} ve L_{11} mevcut değildir. Ana nokta koordinatları (u_o, v_o) da mevcut değildirler. Sonuçta 11 DLT parametresiyle standart DLT metodu kullanılabilir. Özdeşlik matrisi ağırlık matrisi olarak kullanılır.
2. İkinci iterasyonda bir önceki iterasyondan elde edilen L_9 , L_{10} ve L_{11} kullanılarak R hesaplanır. (u_o, v_o) 'da önceki iterasyondan elde edilen L'lere dayanılarak elde edilir. Bu işlem için DLT metodundaki (4.19) kullanılır. ξ, η ve r hesaplanır. Normal eşitlik (4.26)'de gösterildi. $L_1 \dots L_{16}$ için sistem çözülür.
3. Bu işlemler ;
 - a) Tüm L'ler yeterince birbirine yaklaşıncaya kadar,
 - b) Karesel ortalama hata (MSE) yeterince birbirine yaklaşıncaya kadar devam eder.

Her iki durumda da yaklaşım kontrolü için bir tolerans değeri belirlenmelidir. Ana nokta koordinatları daha sonra işaretleyici koordinatlarının hesaplanmasında kullanmak için kaydedilir.

Parametrelerin varyans-kovaryans matrisleri;

$$\sigma^2(L) = MSE [X'WX]^{-1}$$

$$MSE = \frac{Y'WY - L'X'WY}{2n - 6} \quad (4.34)$$

olarak yazılabilir. Burada MSE en küçük kareler yaklaşımında ortalama standart hatadır.

Kontrol noktası iki eşitliği sağladığında ortalama standart hata (MSE) için serbestlik derecesi (4.34)'te gösterildiği gibi $2n-16$ 'dır. Parametrelerin varyans-kovaryans matrisi (11x11) boyutunda simetrik kare matristir.

$$\sigma^2(L) = \begin{bmatrix} \sigma(L_1, L) & \sigma(L_1, L_2) & \cdot & \sigma(L_1, L_{10}) & \sigma(L_1, L_{11}) \\ \sigma(L_2, L) & \sigma(L_2, L_2) & \cdot & \sigma(L_2, L_{10}) & \sigma(L_2, L_{11}) \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \sigma(L_{10}, L_1) & \sigma(L_{10}, L_2) & \cdot & \sigma(L_{10}, L_{10}) & \sigma(L_{10}, L_{11}) \\ \sigma(L_{11}, L_1) & \sigma(L_{11}, L_2) & \cdot & \sigma(L_{11}, L_{10}) & \sigma(L_{11}, L_{11}) \end{bmatrix} \quad (4.35)$$

Matrisdeki köşegen elemanlar varyanslar diğerleri ise kovaryanslardır.

İşaretleyici konumunun hesaplanmasında (1) 'deki X, Y ve L matrisleri;

$$X = \begin{bmatrix} L_1^{(1)} - \alpha^{(1)} L_9^{(1)} & L_2^{(1)} - \alpha^{(1)} L_{10}^{(1)} & L_3^{(1)} - \alpha^{(1)} L_{11}^{(1)} \\ L_5^{(1)} - \beta^{(1)} L_9^{(1)} & L_6^{(1)} - \beta^{(1)} L_{10}^{(1)} & L_7^{(1)} - \beta^{(1)} L_{11}^{(1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ L_1^{(m)} - \alpha^{(m)} L_9^{(m)} & L_2^{(m)} - \alpha^{(m)} L_{10}^{(m)} & L_3^{(m)} - \alpha^{(m)} L_{11}^{(m)} \\ L_5^{(m)} - \beta^{(m)} L_9^{(m)} & L_6^{(m)} - \beta^{(m)} L_{10}^{(m)} & L_7^{(m)} - \beta^{(m)} L_{11}^{(m)} \end{bmatrix}$$

$$L = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad Y = \begin{bmatrix} L_4^{(1)} - \alpha^{(1)} \\ L_8^{(1)} - \beta^{(1)} \\ \vdots \\ L_4^{(m)} - \alpha^{(m)} \\ L_8^{(m)} - \beta^{(m)} \end{bmatrix} \quad (4.36)$$

$$\alpha = u - \Delta u$$

$$\beta = v - \Delta v$$

$$\Delta u = \xi(L_{12}r^2 + L_{13}r^4 + L_{14}r^6) + L_{15}\xi\eta + L_{16}(r^2 + 2\xi^2)$$

$$\Delta v = \eta(L_{12}r^2 + L_{13}r^4 + L_{14}r^6) + L_{15}\eta\xi + L_{16}(r^2 + 2\eta^2)$$

$$\xi = u - u_0$$

$$\eta = v - v_0$$

$$r^2 = \xi^2 + \eta^2$$

(4.37)

Bu problemin çözümü için (4.26) kullanılır. Ağırlık matrisi (4.32)'dekine benzer olmasına rağmen ağırlıkların hesaplama yöntemi (4.31) 'dekinden farklıdır. L'ler için

DLT metodunun tekrar düzenlenmesiyle u,v koordinatlarının içerdiği rastgele hatalar için ,

$$\begin{aligned}\delta_u &= u - xL_1 - yL_2 - zL_3 - L_4 + uxL_9 + uyL_{10} + uzL_{11} - \Delta uR \\ \delta_v &= v - xL_5 - yL_6 - zL_7 - L_8 + vxL_9 + vyL_{10} + vzL_{11} - \Delta vR\end{aligned}\quad (4.38)$$

elde edilir.

Burada,

$$\begin{aligned}\sigma^2(\delta_u) &= \sigma^2(u) + \sum_{i,j} U_i U_j \sigma(L_i, L_j) \\ \sigma^2(\delta_v) &= \sigma^2(v) + \sum_{i,j} V_i V_j \sigma(L_i, L_j)\end{aligned}\quad (4.39)$$

ε_u ve ε_v nun varyansları ,

$$R = L_9x + L_{10}y + L_{11}z + 1 \quad (4.40)$$

Burada, $\sigma(\varepsilon_{uu})$ ve $\sigma(\varepsilon_{vv})$ resim koordinatlarının (u & v), $i \& j = 1 \dots 11$ varyansları, $\sigma(L_i, L_j)$ ise parametrelerin varyans-kovaryanslarıdır. Ve

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \\ U_5 \\ U_6 \\ U_7 \\ U_8 \\ U_9 \\ U_{10} \\ U_{11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -x \\ -y \\ -z \\ -1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ ux \\ uy \\ uz \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \\ V_7 \\ V_8 \\ V_9 \\ V_{10} \\ V_{11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -x \\ -y \\ -z \\ -1 \\ vx \\ vy \\ vz \end{bmatrix} \quad (4.41)$$

(4.40)' da $L_1 \dots L_{11}$ lerin birbirleriyle bağımlı oldukları varsayılarak ham koordinat hesaplamasındaki ağırlık matrisi,

$$W = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma^2(\delta u^{(1)})} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma^2(\delta v^{(1)})} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\sigma^2(\delta u^{(m)})} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\sigma^2(\delta v^{(m)})} & 0 \end{bmatrix} \quad (4.42)$$

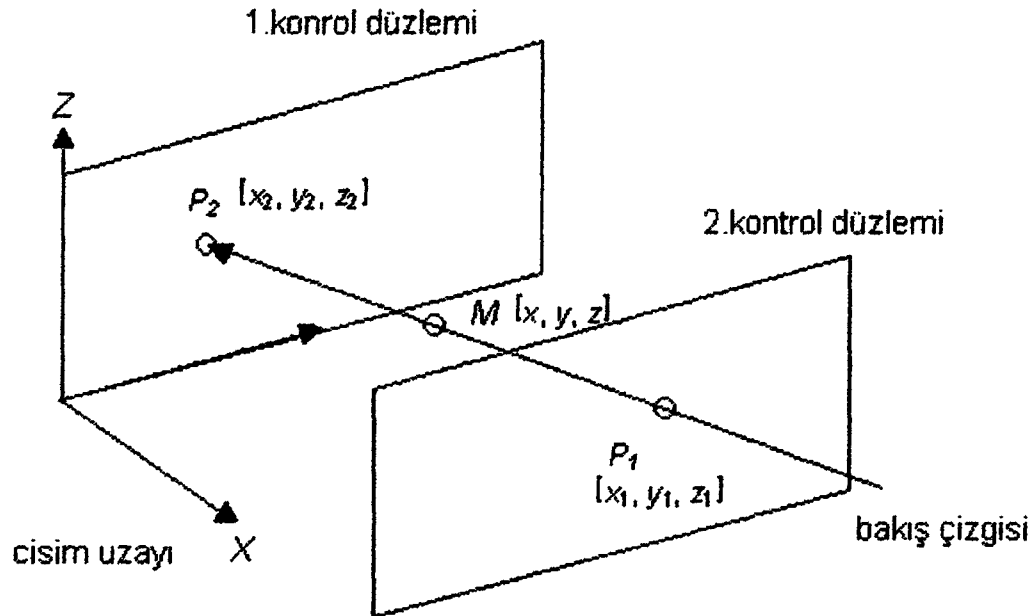
Burada m kamera sayısıdır.

(4.26), (4.27) ve (4.42) kullanılarak iteratif yaklaşım sistemin çözümü için kullanılır.

1. İlk iterasyonda özdeşlik matrisi (4.26) ağırlıklı matris olarak kullanılır. x,y ve z için sistem çözülür.
2. İkinci iterasyonda sistemi çözmeden önce ağırlık vektörü (4.42) hesaplanır. Ağırlıkların hesaplanmasında önceki iterasyonda bulunan x,y,z kullanılır.
3. x,y,z yeterince birbirine yaklaşıncaya iterasyon durdurulur. Bunun için özel tolerans değeri belirlenir.

4.2.2.3 Çift Düzlem Yöntemi

Bir tür DLT metodudur. Bu metod iki boyutlu DLT metoduna dayanır ve iki paralel kontrol düzlemini içerir (Şekil 4.4).



Şekil 4.4 (Çift düzlemlerin gösterimi)

Şekilde M noktası işaretleyici noktasıdır. Bu işaretleyici noktası bakış çizgisinin her iki kontrol düzleminden geçmesi için kamera ile gözlenir. P_1 ve P_2 noktaları M noktasının kontrol düzlemlerindeki izdüşüm noktalarıdır. Her iki düzlemde de görünecek şekilde kontrol noktaları yerleştirilerek kamera kalibre edilir ve P_1 ve P_2 noktalarının $[y_1, z_1]$ ve $[y_2, z_2]$ iki boyutlu koordinatları 2 boyutlu DLT metoduna göre hesaplanır. İki düzlemde de x_1 ve x_2 koordinatları bilinir.

Bu üç nokta arasında kolinerite koşulu uygulanarak;

$$\frac{x - x_1}{x_2 - x_1} = \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} = \frac{z - z_1}{z_2 - z_1} \quad (4.43)$$

veya

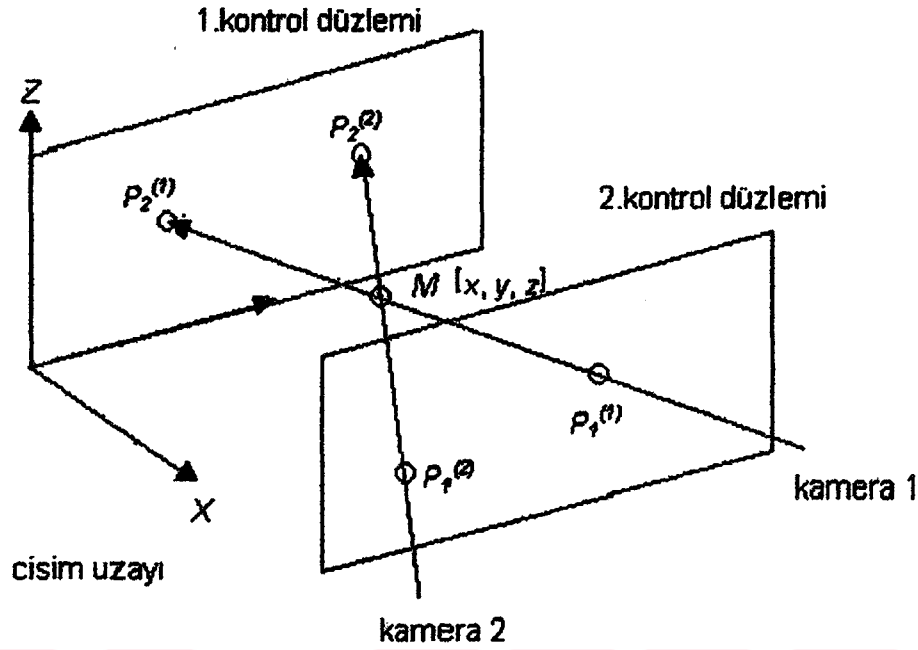
$$\begin{aligned} \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} &= \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} & \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} &= \frac{z - z_1}{z_2 - z_1} \\ (x - x_1)(y_2 - y_1) &= (y - y_1)(x_2 - x_1) \\ (x - x_1)(z_2 - z_1) &= (z - z_1)(x_2 - x_1) \\ (y_2 - y_1)x - (x_2 - x_1)y &= x_1(y_2 - y_1) - y_1(x_2 - x_1) \\ (z_2 - z_1)x - (x_2 - x_1)z &= x_1(z_2 - z_1) - z_1(x_2 - x_1) \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} y_2 - y_1 & -(x_2 - x_1) & 0 \\ z_2 - z_1 & 0 & -(x_2 - x_1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1(y_2 - y_1) - y_1(x_2 - x_1) \\ x_1(z_2 - z_1) - z_1(x_2 - x_1) \end{bmatrix} \quad (4.44)$$

eşitlikleri elde edilir.

(4.44) eşitliğinde de görüldüğü gibi her bir kamera iki denklem sağladığından, işaretleyicinin x, y, z koordinatlarını hesaplamak için en az iki kamera gerekmektedir (Şekil.4.5). (4.44) eşitliği n kamera için genişletilecek olursak;

$$\begin{bmatrix} y_2^{(1)} - y_1^{(1)} & -(x_2^{(1)} - x_1^{(1)}) & 0 \\ z_2^{(1)} - z_1^{(1)} & 0 & -(x_2^{(1)} - x_1^{(1)}) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ y_2^{(n)} - y_1^{(n)} & -(x_2^{(n)} - x_1^{(n)}) & 0 \\ z_2^{(n)} - z_1^{(n)} & 0 & -(x_2^{(n)} - x_1^{(n)}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1^{(1)}(y_2^{(1)} - y_1^{(1)}) - y_1^{(1)}(x_2^{(1)} - x_1^{(1)}) \\ x_1^{(1)}(z_2^{(1)} - z_1^{(1)}) - z_1^{(1)}(x_2^{(1)} - x_1^{(1)}) \\ \vdots \\ x_1^{(n)}(y_2^{(n)} - y_1^{(n)}) - y_1^{(n)}(x_2^{(n)} - x_1^{(n)}) \\ x_1^{(n)}(z_2^{(n)} - z_1^{(n)}) - z_1^{(n)}(x_2^{(n)} - x_1^{(n)}) \end{bmatrix} \quad (4.45)$$



Şekil.4.5 (Çift kamera ile çift düzlem yönteminin gerçekleştirilmesi)

Bu (4.45) eşitliği en küçük kareler yaklaşımı kullanılarak çözülebilir.

4.2.2.4 Ölçme Yöntemi

DLT metodunda kamera kalibrasyon doğruluğu, cisim uzay düzlem koordinatlarının doğruluğu veya kontrol noktalarının iki boyutlu cisim koordinatları ve hesaplama hatalarıyla bulunur. Kontrol noktaları normal olarak sabit bir kalibrasyon çerçevesinde düzenlenmiştir. Kullanılmak istenen kontrol alanının boyutu temel olarak kalibrasyon çerçevesinin boyutuyla sınırlandırılmıştır. Kontrol alanı dışındaki cisim uzay koordinatlarını tekrar elde etmek mümkündür. DLT algoritmasının temel problemlerinden dolayı önceden tahmin etme yöntemi tavsiye edilmez.

Geniş kontrol alanı gerektiği zaman normal sabit çerçeve yaklaşımı sonuç vermez. Buna alternatif olarak ölçme yöntemi önerilmiştir. Bu methodda alan direkleri kullanılır. Alan direklerinin numara ve boyutlarının değiştirilmesiyle farklı boyutlarda kontrol alanı oluşturulabilir. Kontrol alanı şekli önceden düzenlenmediğinde, her zaman kontrol noktalarının cisim uzay koordinatlarını hesaplamak gerekmez. Direklerin yatay açısal konumlarının ve direkler üzerinde

işaretlenen kontrol noktalarının da düşey açısal konumunun ölçülmesi gerekir. Kontrol noktalarının cisim uzayı koordinatları açısal verilerden hesaplanır.

Ölçme metodunun sağladığı avantajlar şunlardır.

1. Yüksek esneklik: Direklerin yerlerinin, boyutlarının ve numaralarının serbestçe değiştirilmesi mümkündür.
2. Geniş kontrol alanı: Geniş kontrol alanı oluşturmak mümkündür. Bu özellikle video fotoğraflarının sürüklenmesi işleminde önemlidir.
3. Basit eksen hizalaması: İki direk (orijin ve X direği) kullanarak eksen yönünün belirlenmesi oldukça kolaydır.
4. Kolay hesaplama: Kontrol noktaları direkler üzerinde tamamen işaretlendiğinde onların hesaplanması kolaylaşır.
5. Kolay işleme tarzı: Direklerin taşınması, toplanması veya çıkarılması oldukça kolaydır.
6. Esnek yazılım desteği: Ölçme programında açı ölçmelerinin tekrarlanması, kayıp nokta işlemi, eksen hizalanması gibi kullanışlı seçenekleri içermesi

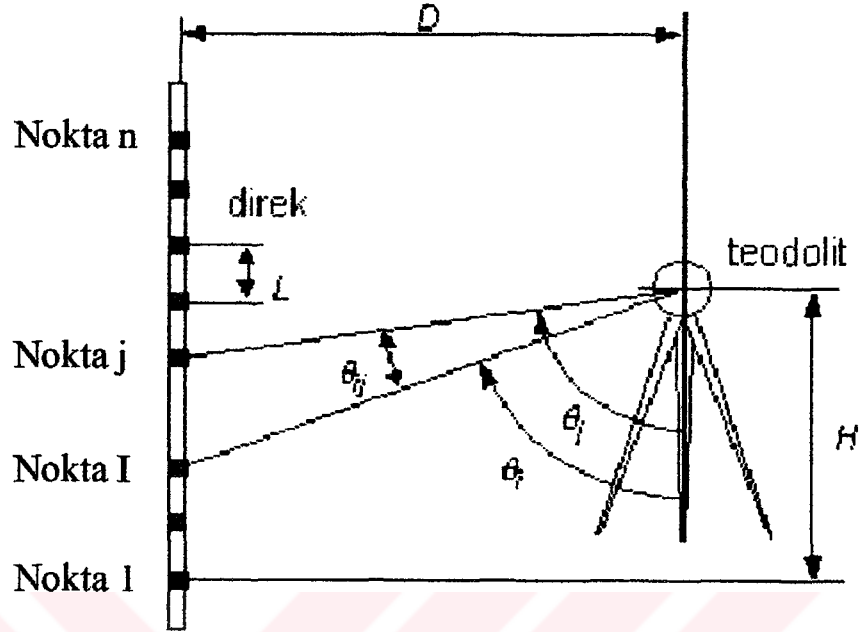
Ölçme yönteminin aynı zamanda bazı dezavantajları bulunmaktadır. Bunlar;

1. Kontrol noktalarının cisim uzayı koordinatları her deney için hesaplanmalıdır.
2. Direklerin kontrol noktalarının açısal konumlarının ölçülmesinde teodolit kullanılmalıdır. Cisim uzay koordinatlarının doğruluğu açı doğruluğuna bağlı olduğundan teodolit dikkatlice tutulmalıdır.
3. Kontrol noktaları kontrol alanı içinde düzenli olarak dağılmayabilirler.

Kontrol noktalarının koordinatları şu varsayımlara dayanılarak hesaplanır.

1. Tüm direkler dikey olarak kurulmalı,
2. Komşu noktalar arasındaki mesafe sabit olmalı,
3. Kontrol noktalarının düşey açısal konumları Z koordinatlarının hesaplamasında kullanılırken direklerin yatay açısal konumları kontrol noktalarının (X,Y) koordinatlarının hesaplanmasında kullanılır.

Direk üzerinde işaretlenen kontrol noktalarının düşey açısal konumlarından, direğin yükseklik-mesafe faktörleri hesaplanabilir. Herhangi iki nokta kombinasyonu için şu ilişki elde edilir (Şekil 4.6).



Şekil 4.6 (Kontrol noktalarının açısal konumlarının ölçümü)

$$D_{ij} = \frac{(j-i)L}{\cot\theta_i - \cot\theta_j}$$

$$H_{ij} = D_{ij} \cdot \cot\theta_i + (i-1)L \quad (4.46)$$

Burada D_{ij} ve H_{ij} , i ve j'nin kombinasyonundan elde edilen yükseklik-mesafe faktörüdür. Her iki nokta kombinasyonu D_{ij} ve H_{ij} çiftini sağlarsa, direk üzerinde işaretlenen n kontrol noktasından en az (n-1)! çift elde edilir. Sonuç olarak;

$$D = \frac{\sum_{ij} D_{ij}}{N}$$

$$H = \frac{\sum_{ij} H_{ij}}{N} \quad (4.47)$$

Burada; D ve H ortalama yükseklik- mesafe faktörü,
N toplam ikili nokta kombinasyonu sayısı'dır.

i kontrol noktasının 3 boyutlu koordinatları:

$$x_i = D \cdot \cos \phi$$

$$y_i = D \cdot \sin \phi$$

$$z_i = (i-1)L + (H - H_1) \quad (4.48)$$

$[x_i, y_i, z_i]$: kontrol noktasının 3 boyutlu koordinatları,

H_1 : 1 nolu direğin yükseklik faktörü,

(4.48) no'lu eşitlikte direklerin yükseklik faktörlerindeki farklar dikkate alınır. Koordinat sisteminin i noktasındaki orijini direğin ilk noktasının yüksekliğinde teodolitın sağ alt tarafına yerleştirilmiştir. X eksen yatay 0° yönünde hizalanmıştır.

Orijin direğinin ilk noktasının koordinatları $[x_0, y_0, z_0]$ ve X eksen direğinin yatay koordinatları $[x_x, y_x]$ olsun. Sonuç olarak,

$$\begin{bmatrix} \xi_i \\ \psi_i \\ \zeta_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & 0 \\ f_{21} & f_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i - x_0 \\ y_i - y_0 \\ z_i - z_0 \end{bmatrix} \quad (4.49)$$

Bu eşitlikte;

$$f_{11} = f_{22} = \frac{x_x - x_0}{\sqrt{(x_x - x_0)^2 + (y_x - y_0)^2}}$$

$$f_{12} = -f_{21} = \frac{y_x - y_0}{\sqrt{(x_x - x_0)^2 + (y_x - y_0)^2}} \quad (4.50)$$

ve $[\xi_i, \psi_i, \zeta_i]$ ise i noktasının kullanıcı koordinat sistemindeki koordinatlarıdır.

Bu ölçme metoduyla kalibrasyonda şu ek işlemler gerçekleştirilebilir.

1. Açısal konum ölçmesinin tekrarlanabilmesi: Direğin yatay açısal konumu ve noktanın düşey açısal konumu gibi her bir açısal değer ölçümü 3 defaya kadar tekrarlanabilir.
2. Kayıp noktalar: Açısal konum ölçmesinde herhangi bir kontrol noktası ihmal edilebilir. Programla her bir direk için en azından iki nokta ölçüldüğü müddetçe kayıp kontrol noktalarının 3 boyutlu koordinatları bulunabilir. Bu durum ölçmenin

mümkün olduğunca hızlı yapılmasını gerektiren rekabet ortamlarında son derece kullanışlıdır. Sadece ilk ve son noktalar ölçülebilir fakat direktte bulunan tüm kontrol noktalarının koordinatları hesaplanır. Bazı durumlarda bu seçenek isteğe bağlı olarak kullanılabilir. Komşu noktalar arasındaki mesafe çok kısa veya teodolitin direktten çok uzak kurulması durumunda paralaks açısı (θ_{ij}) küçük olur ve açı ölçmesindeki küçük hata yükseklik-mesafe faktörünü ciddi olarak etkiler. Bu durumda 2. bir nokta ölçülebilir.

4.2.2.5 Değiştirilmiş Direkt Lineer Transformasyon (MDLT) Yöntemi

a) Değiştirilmiş Direkt Lineer Transformasyon

Standart DLT eşitlikleri (4.7) gerçekte 11 değil de 10 bağımsız parametre ($x_o, y_o, z_o, u_o, v_o, d_u, d_v$ ve 3 Euler açısı) içermektedir. Çünkü ana uzaklık (d) ve ölçek faktörleri (λ_u ve λ_v) karşılıklı olarak birbirleriyle bağımlıdır ve 2 bağımsız parametreye (d_u & d_v)'ya indirgenir.

Burada DLT metodundaki ana problem ortaya çıkmaktadır. DLT eşitlikleri sistem sadece 10 bağımsız bilinmeyene sahip iken 11 DLT parametresi içerir. Yani fazladan 1 DLT parametresi vardır ve bu problemin çözümü için lineer olmayan bir sınırlama eklememiz gerekmektedir. Standart 11 DLT parametresinde en küçük kareler metodu kullanılarak 11 parametre bağımsız olarak hesaplanır. Bu işlemde 10 bağımsız faktör arasındaki bağıntı cisim uzayı düzleminden resim düzlemine ortogonal olmayan dönüşüm sonucunda bulunur.

Değiştirilmiş direkt lineer transformasyon (MDLT) metodunda parametrelerden birisi diğer 10 parametre ile ifade edilir. Bu durumda DLT metodundaki (4.8), (4.19) ve (4.20) no'lu eşitliklerden;

$$\begin{aligned}
 (DL_1)(DL_5) + (DL_2)(DL_6) + (DL_3)(DL_7) \\
 &= u_o v_o r_{31}^2 - u_o d_v r_{21} r_{31} - v_o d_u r_{11} r_{31} + d_u d_v r_{11} r_{21} \\
 &+ u_o v_o r_{32}^2 - u_o d_v r_{22} r_{32} - v_o d_u r_{12} r_{32} + d_u d_v r_{12} r_{22} \\
 &+ u_o v_o r_{33}^2 - u_o d_v r_{23} r_{33} - v_o d_u r_{13} r_{33} + d_u d_v r_{13} r_{23} \\
 &= u_o v_o [r_{31}^2 + r_{32}^2 + r_{33}^2] - u d_v [r_{21} r_{31} + r_{22} r_{32} + r_{23} r_{33}] \\
 &- v_o d_u [r_{11} r_{31} + r_{12} r_{32} + r_{13} r_{33}] + d_u d_v [r_{11} r_{21} + r_{12} r_{22} + r_{13} r_{23}] \\
 &= u_o v_o
 \end{aligned}$$

$$[L_1L_5 + L_2L_6 + L_3L_7][L_9^2 + L_{10}^2 + L_{11}^2] = [L_1L_9 + L_2L_{10} + L_3L_{11}][L_5L_9 + L_6L_{10} + L_7L_{11}] \quad (4.51)$$

Bu eşitlikte 11 DLT parametresi arasındaki lineer olmayan ilişki gösterilmiştir. Bu "Lineer olmayan kısıtlama lineer DLT sistemine nasıl katılır?" sorusunu akla getirmektedir.

Bunun için şu iteratif yaklaşım kullanılabilir.

1. İlk iterasyonda 11 DLT parametresi klasik olarak hesaplanır.
2. İkinci iterasyonda, bir önceki iterasyondan elde edilen değerler kullanılarak parametrelerden biri örneğin L_1 çıkartılır ve sistem 10 parametreye indirgenmiş olur (L_2, L_{11}). Sistem geriye kalan 10 parametre için tekrar çözülür. Elimine edilen L_1 parametresi (4.51) eşitliğinden tekrar hesaplanır.
3. İkinci adım sabit bir yaklaşım değeri veya sabit bir çözüm kümesi elde edilinceye kadar sürdürülür.

b) Lineer Olmayan Değiştirilmiş Direkt Transförmasyon

DLT metodundaki (4.6) ve (4.11) eşitliklerinden;

$$\begin{aligned} u - u_0 - \Delta u &= -\frac{d}{\lambda_u} \frac{r_{11}(x - x_0) + r_{12}(y - y_0) + r_{13}(z - z_0)}{r_{31}(x - x_0) + r_{32}(y - y_0) + r_{33}(z - z_0)} \\ v - v_0 - \Delta v &= -\frac{d}{\lambda_v} \frac{r_{21}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{23}(Z - Z_0)}{r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \end{aligned} \quad (4.52)$$

veya

$$\begin{aligned} \xi [1 - L_{12}r^2 - L_{13}r^4 - L_{14}r^6] - L_{15}\xi\eta - L_{16}[r^2 + 2\xi^2] &= \frac{N_1x + N_2y + N_3z + N_4}{N_9x + N_{10}y + N_{11}z + 1} \\ \eta [1 - L_{12}r^2 - L_{13}r^4 - L_{14}r^6] - L_{15}\xi\eta - L_{16}[r^2 + 2\eta^2] &= \frac{N_5x + N_6y + N_7z + N_8}{N_9x + N_{10}y + N_{11}z + 1} \end{aligned}$$

$$\xi = u - u_0$$

$$\eta = v - v_0$$

$$r^2 = \xi^2 + \eta^2 \quad (4.53)$$

elde edilir. Burada,

$$\begin{aligned}
N_1 &= -\frac{d_u r_{11}}{E} & N_2 &= -\frac{d_u r_{12}}{E} & N_3 &= -\frac{d_u r_{13}}{E} & N_4 &= \frac{d_u [r_{11}x_0 + r_{12}y_0 + r_{13}z_0]}{E} \\
N_5 &= -\frac{d_v r_{21}}{E} & N_6 &= -\frac{d_v r_{22}}{E} & N_7 &= -\frac{d_v r_{23}}{E} & N_8 &= \frac{d_v [r_{21}x_0 + r_{22}y_0 + r_{23}z_0]}{E} \\
N_9 &= \frac{r_{31}}{E} & N_{10} &= \frac{r_{32}}{E} & N_{11} &= \frac{r_{33}}{E} \\
E &= -[r_{31}x_0 + r_{32}y_0 + r_{33}z_0]
\end{aligned} \tag{4.54}$$

(4.51)'de eşitliğin sağ tarafında u_0 ve v_0 bulunmaktadır. Bunlar eşitliğin sol tarafında ξ formunda yazılmıştır. Diğer bir deyişle eşitliğin sağ tarafı 8 bağımsız parametre (x_0, y_0, z_0, d_u, d_v ve 3 Euler açısı) içerirken sol tarafı 7 parametre (u_0, v_0 ve $L_{12}, \dots, L_{16}$) içermektedir. Lineer olmayan değiştirilmiş direkt lineer transformasyon metodunda (MDLT) metodunda 15 lineer olmayan parametre bulunmaktadır.

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1 & N_2 & N_3 \\ N_5 & N_6 & N_7 \\ N_9 & N_{10} & N_{11} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -N_4 \\ -N_8 \\ -1 \end{bmatrix} \tag{4.55}$$

$$\begin{aligned}
E^2 &= \frac{1}{N_9^2 + N_{10}^2 + N_{11}^2} \\
d_u^2 &= E^2 [N_1^2 + N_2^2 + N_3^2] \\
d_v^2 &= E^2 [N_5^2 + N_6^2 + N_7^2]
\end{aligned} \tag{4.56}$$

$$\begin{aligned}
r_{11} &= -\frac{EN_1}{d_u} & r_{12} &= -\frac{EN_2}{d_u} & r_{13} &= -\frac{EN_3}{d_u} \\
r_{21} &= -\frac{EN_5}{d_v} & r_{22} &= -\frac{EN_6}{d_v} & r_{23} &= -\frac{EN_7}{d_v} \\
r_{31} &= EN_9 & r_{32} &= EN_{10} & r_{33} &= EN_{11}
\end{aligned} \tag{4.57}$$

elde edilir.

3 Euler açısı doğrultu kosinüslerinden hesaplanabilir.

DLT metodundaki (4.6), (4.7) ve (4.20) eşitliklerinden,

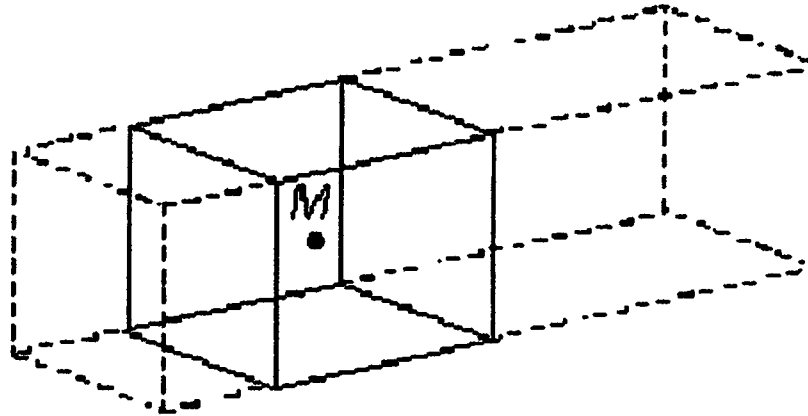
$$\begin{aligned}
r_{11} &= -\frac{EN_1}{d_u} & r_{12} &= -\frac{EN_2}{d_u} & r_{13} &= -\frac{EN_3}{d_u} \\
r_{21} &= -\frac{EN_5}{d_v} & r_{22} &= -\frac{EN_6}{d_v} & r_{23} &= -\frac{EN_7}{d_v} \\
r_{31} &= EN_9 & r_{32} &= EN_{10} & r_{33} &= EN_{11}
\end{aligned} \tag{4.58}$$

elde edilir. Bu eşitlik N_1 - N_{11} parametreleri arasındaki bağıntıyı gösterir. (4.58) eşitliği ortogonalitesi sağlamak için $N_1, N_2, \dots, N_5$ 'in modelden çıkarılması için kullanılır.

15 bağımsız parametre ($u_0, v_0, N_3 - N_4, N_6 - N_{11}, N_3 - N_4, N_6 - N_{11}$ ve $L_{12} - L_{16}$) için (4.53) eşitliğini çözmek için lineer olmayan yaklaşım kullanılmalıdır.

4.2.2.6 Sınırlandırılmış Direkt Lineer Transformasyon Yöntemi

Refraksiyonun lineer olmayan yapısından dolayı kontrol alanı daha küçük alt alana bölmek avantajlıdır. Kontrol alanının bölünmesi, kamera kalibrasyonunun sınırlandırılması ve alt alanlar elde etmek kontrol noktalarının ifade edilen koordinatları arasındaki lineersizliği azaltır. Örneğin (Şekil 4.7)'de görüldüğü gibi alt hacimlere ait M işaretleyici noktasının cisim koordinatlarının tekrar elde edilmesinde tüm alan parametreleri yerine sadece alt hacmin resim çekme makinesi parametreleri ($L_1 - L_{11}$) kullanılabilir. Bu işaretleyici (M) ait olduğu alt hacmin elde edilmesi ve kamera kalibrasyonunun sınırlandırılmasına lokalizasyon veya sınırlandırılmış kalibrasyon ve tekrar elde etme olarak adlandırılır.



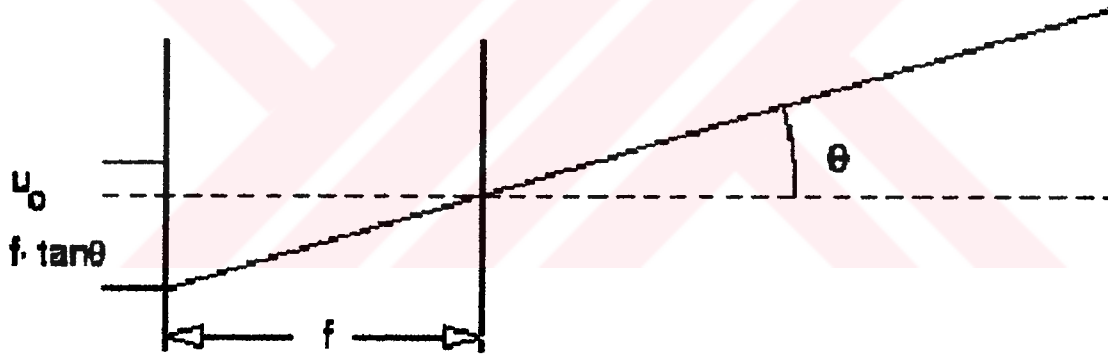
Şekil 4.7 (Kalibrasyon alanının alt alanlara bölünmesi)

4.2.3 Bilinen Yıldız Konumlarından Yararlanılarak Kalibrasyon Yöntemi

Bu yöntemde gökyüzündeki konumları bilinen sabit yıldızlardan yararlanılmıştır. Bu yöntem tam olarak aynı rotasyonla birlikte aynı koşullarda atmosferik çalışmalar için uygundur.

Resim çekme doğrultusunun 0.02cm doğruluğunda elde etmek için yıldızların gökyüzündeki konumlarının 0.02cm doğruluğunda bilinmesi gerekmektedir. Bu doğruluk gereksinimleri yıldızların gökyüzündeki konumlarının yıldız kataloglarından hesaplandığında hassasiyet bakımından düzeltilmesi gerekir. Piksel görüş çizgilerinin belirlenmesiyle ilerlemek için resimdeki çok sayıdaki yıldızın tanımlanmasının yapılması gerekmektedir. Bu yıldız pikselleri için görüş çizgileri istenilen doğrulukta bilinmelidir.

Bilinen yıldızlar, yıldızların hesaplanan doğruluklarının resim üzerindeki kendi izdüşüm merkezlerine izdüşürmek için optik transfer fonksiyonu parametrelerinin ayarlanması için kullanılır.



Şekil.4.8 (Pinhole kamera modeli)

Optik transfer fonksiyonunun ilk yaklaşım değeri için pratik olan çalışma pinhole kamera modelidir (Şekil.4.8). $e(\vec{\phi}, \theta)$ uzayındaki doğrultuda yayılan ışık resim koordinatlarına şu şekilde izdüşürülür.

$$u = f_u \cdot \tan(\theta) \cdot \sin(\phi) + u_0$$

$$v = f_v \cdot \tan(\theta) \cdot \cos(\phi) + v_0 \quad (4.59)$$

Burada;

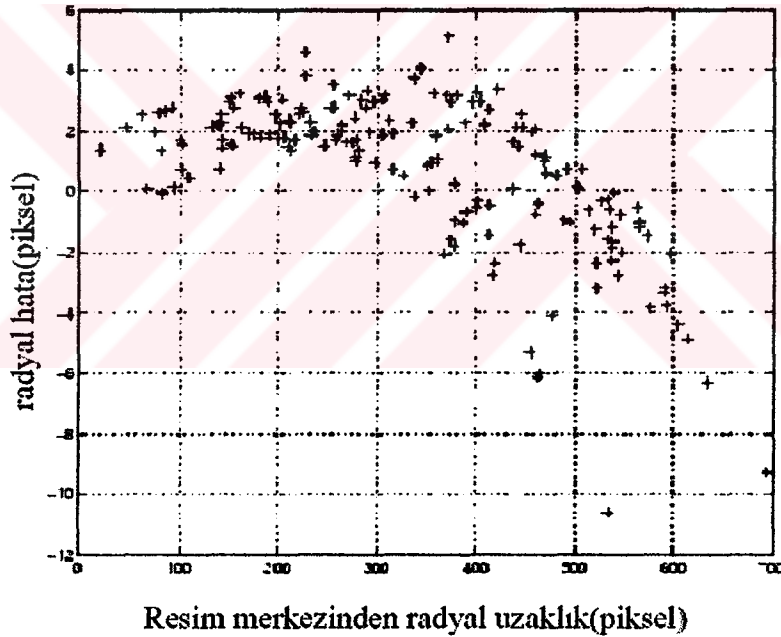
u, v :resim koordinatları

f_u, f_v :yatay ve düşey odak uzaklıkları

u_0, v_0 :optik eksenin yatay ve düşey izdüşümü

θ ve ϕ :optik eksen etrafındaki azimutal açı ve optik eksenle bağlantılı kutupsal açı

Birkaç resim üzerinde çok sayıdaki yıldızın dikkatlice tanımlanmasıyla optimizasyon sırasında kalan önemli sistematik hatalar bulunur. Radyal hata $((u' - u_0)^2 + (v' - v_0)^2)^{1/2} - ((\tilde{u} - u_0)^2 + (\tilde{v} - v_0)^2)^{1/2}$ (şekil 4.9)'da gösterildiği gibi radyal konuma $((u' - u_0)^2 + (v' - v_0)^2)^{1/2}$ karşı gelmektedir. Burada $(\tilde{u}, \tilde{v})$ hesaplanan konumların resim koordinatları ve (u', v') ise yıldızların belirlenmiş resim koordinatlarıdır.

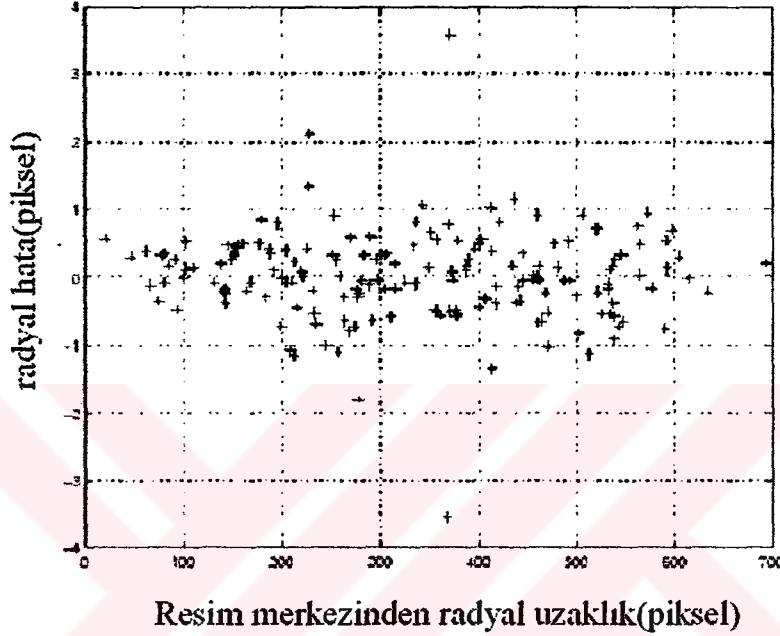


Şekil 4.9 (Tüm optik parametrelerin optimizasyonu sonrasında pinhole modeli için radyal hata)

(Şekil 4.9)'da da kolayca görüldüğü gibi radyal yönde önemli sistematik hatalar bulunmaktadır. Ayrıca, pinhole kamera harita ışıkları küçük radyal mesafeler için resim merkezine çok yakın, daha büyük açılar içinse ondan çok uzaktadır. Radyal doğrultudaki hataları karşılamak için optik eksene ilişkin kutupsal açıda lineer terimi dahil etmek yeterlidir. Böylece optik transfer fonksiyonu,

$$\begin{aligned}
u &= f_u \cdot ((1 - \alpha) \tan(\theta) + \alpha \cdot \theta) \cdot \sin(\phi) + u_0 \\
v &= f_v \cdot ((1 - \alpha) \cdot \tan(\theta) + \alpha \cdot \theta) \cdot \cos(\phi) + v_0
\end{aligned} \tag{4.60}$$

olur. Değiştirilen optik model için optik parametrelerin yeniden elde edilmesinden sonra sistematik hataların ortadan kalktığı görülecektir (Şekil 4.10).



Şekil 4.10 (Tüm optik parametrelerin optimizasyonu sonrasında değiştirilen pinhole modeli için radyal hata (Burada radyal yönde herhangi bir sistematik hatanın olmadığı görülmektedir.))

Cisimlerin konumlarını 15-500m arası yükseklikten belirlemeye yönelik atmosferik çalışmalar için gerekli parametreler ışığın atmosferde izlediği yoldur.

Yükseklikle birlikte yoğunluk ve sıcaklığın değişmesinden dolayı atmosferik yansıtma indeksi serbest boşlukta 1'den deniz seviyesinde 1.0003'e değişir. Bu yansıtma indeksindeki değişiklik atmosferin dışındaki cismin, zenite olduğundan daha yakın gözükmesine neden olur.

Atmosfere paralel düzgün yüzeyler için zenit açısındaki toplam değişiklik Snell'in kanunuyla kolayca açıklanabilir. Buna göre;

$$n_0 \sin(\theta_0) = n_1 \sin(\theta_1) = \dots = n_\infty \sin(\theta_\infty) \tag{4.61}$$

Burada n_i : yansıtma indeksi

θ_i ise i. yükseklikteki yansıtma açısı'dır.

$$\theta_0 = \arcsin\left(\frac{n_\infty}{n_0} \sin \theta_\infty\right) \quad (4.62)$$

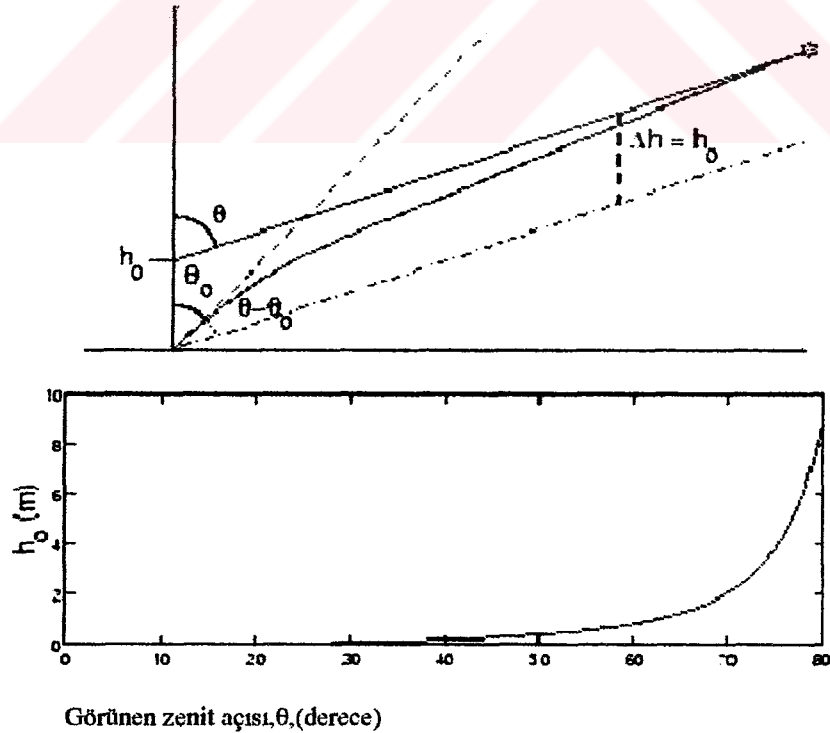
Eşitlikten, gerçek zenit açısı (θ_∞) ile görünen zenit açısı (θ_0) arasındaki fark hesaplanır.

Bu basit ilişki zenit açısının 60'a kadar olduğu durumlarda 0.001 doğruluğundadır.

Atmosferdeki ışık yolunun belirlenmesinde 3 yol vardır.

1. Görünen zenit açısını kullanmak ve ışığın gerçek yolunu hesaplamak için yolun izlenmesini gerçekleştirmek,
2. Görünen zenit açısını kullanmak ve ışığın düzgün bir yol izlediğini varsaymak,
3. Görüş çizgisini hesaplamak için gerçek zenit açısının kullanmak,

Eğer ışık ışınının zenit açısı olarak gerçek zenit kullanılacak olursak atmosferdeki refraksiyon etkisinden dolayı (Şekil 4.11)'da görüldüğü gibi ışığın yolu ile ışın arasında hata olabilir.



Şekil 4.11 (Atmosferden geçen ışın yolu ve gerçek zenit görüş çizgisi arasındaki yükseklik düzeltmesi)

Hata gözleme alanının yüksekliğinin yükselmesi ile dengede olacaktır. Bu gözleme alanının yüksekliğindeki yer değiştirme hatası h_0 ,

$$h_0 = R_0 \left(\frac{n_0 \sin z_0}{\sin(z_0 + (n_0 - 1) \tan z_0)} - 1 \right) \quad (4.62)$$

olarak açıklanabilir.

Eğer görünen zenit açısı kullanılmış olsaydı ışığın gerçek yolu ile sonuçtaki yolu arasındaki hata;

$$\Delta r = |r| (\theta_0 - \theta_\infty) \quad (4.63)$$

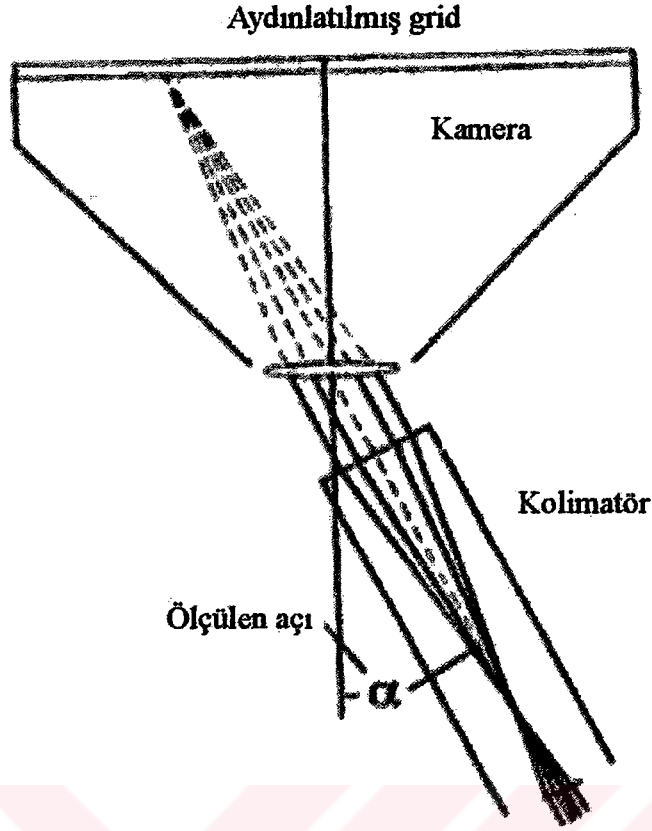
olacaktır. Zenit açısının 45° olduğunda görünen zenit ile gerçek zenit arasındaki fark yaklaşık olarak 1° lik yay olacaktır ki bu 200km'lik mesafede yaklaşık olarak 60m dir. Burada gerçek zenit açısının kullanılması ve ışık yolunun düzgün çizgi yaklaşımının kullanılmasıyla kabul edilebilir doğrulukta hatalar vereceği sonucuna varılır.

4.2.4 Goniometrelerle Kalibrasyon Yöntemleri

Cisim uzayındaki demete uygun olmak koşulu ile bir fotoğraf ışın demeti mesafesi üretir. Diğer yandan, eğer cisim uzayı tanımlanmışsa buradan iç yöneltme elemanlarını üretebiliriz. Bu durum cisim uzayı demeti merkezi ile cisim tarafındaki optik merkezin çakışması olarak tanımlanabilir. Demete bağlı olarak görüntünün davranışı kolimatör gözlemleriyle tanımlanır. Bu metod sadece laboratuarda kullanılır.

4.2.4.1 Goniometre ile Kalibrasyon Metodu

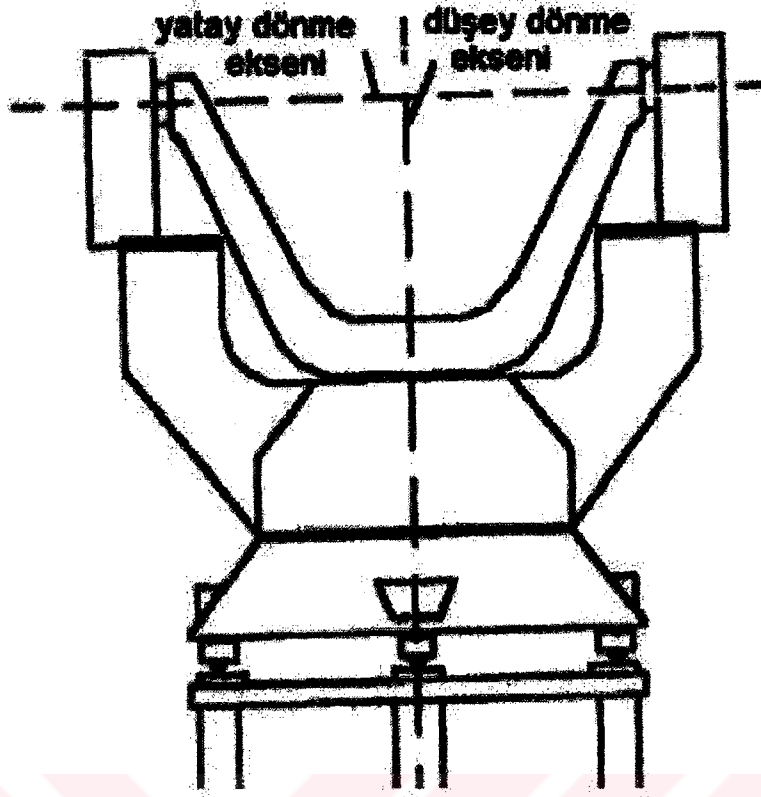
Kamera mercekleri genelde merceklerin ön düğüm noktaları etrafında döndürülen kolimatörler kullanılarak sonsuz odakta kalibrasyon işlemi yapılır. Otokolimasyon prensibi ana nokta konumu için tanımlanır. Haller 1960'de goniometre prensibini tanımlamıştır. Hassas grid, 10mm boşluklu düzenli çizgi dizisi ile kullanılır. Grid aydınlatılır. Normalde olarak aydınlatma tek renkli bir aydınlatmadır. Teleskop sonsuza odaklanmış kamera merceğine doğru yönlendirilir. Grid teleskobun kolimasyon işaretine izdüşürülür.



Şekil 4.12 (Kolimatörle kalibrasyonunu genel yapısı)

(Şekil 4.12)'ye göre teleskop eksen üzerinde döndürülerek açılar ölçülebilir. Seçilmiş kesişim noktalarında açıların kaydedilmesiyle ve grid mesafesinin bilinmesiyle diğer tüm kamera iç yöneltme parametrelerinin hesaplanması mümkündür.

Çoğu goniometreler merceğin ana nokta ile yatay olarak monte edilmesi ve istenilen 2 dönme eksenini gerçekleştirmek için kameranın döndürülmesi gerekmektedir. Alternatif goniometre konfigürasyonu teodolite benzemektedir (Şekil 4.13). Bu teodolit yatay ve düşey eksenler karşılıklı olarak birbirine dik olan eksenlerdeki nokta açılarının ölçülmesi için kullanılır.

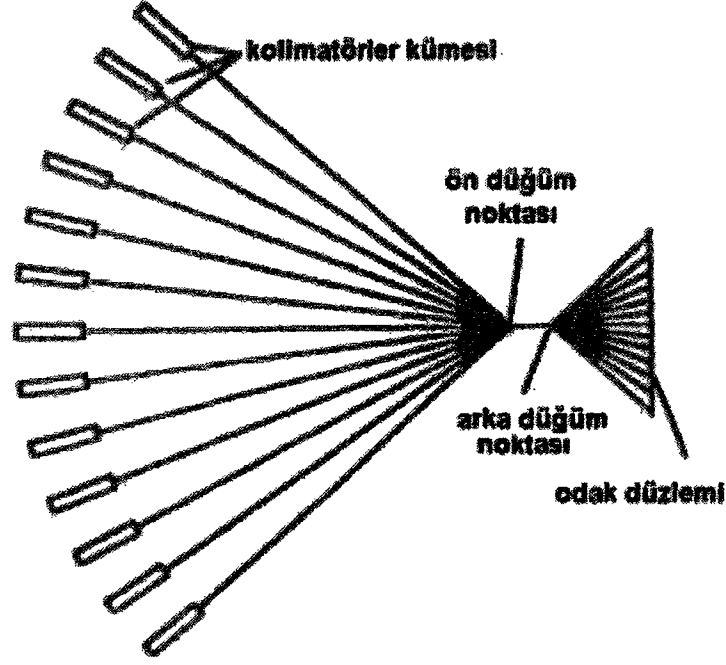


Şekil 4.13 (Teodolite benzeyen alternatif goniometre sistemi)

Bu sistemde ayna dizileri kullanıcının aletin yanında kalmasını sağlar ve kolimatör merceğin izdüşüm düzleminde monte edilen grid üzerinde verilen çapraz bir çizgi şeklinde kurulur, sonra açı diğer gözle okunur.

4.2.4.2 Çoklu Kolimatör Işınlarıyla Kalibrasyon

Belirli konumlarda dizilmiş kolimatör dizileri kullanılarak yapılan kamera kalibrasyonu, sonsuz odakta hava kameralarının kalibrasyonu için geliştirilmiş bir kalibrasyon metodudur.



Şekil 4.14 (Çoklu kolimatörler metodunun şematik gösterimi)

(Şekil 4.14)'te şekilde görüldüğü gibi her bir kolimatörün her bir kolimatör resim düzleminde aydınlatılmış çapraz ışınları sonsuzda resim üretir.

90/32°'lik açısal boşluğuyla sonsuzda 42 hedef üretmek için kolimatörlerin kullanılmasıyla 1969'da bu metod geliştirilmiştir. Bu methodda renksel hataları gidermek için dış eksenli parabolik aynalar kullanılır. Kolimatörle tanımlanan yön (poz aralığı çapı 63mm) ışınlarının içinden geçtiği kamera poz aralığıyla tanımlanan mercek kesitlerinin bağımsız olduğunu göz önünde bulundurmalıdır. Bu açılar 0.5sn'lik radyal ve teğetsel yay açısıyla bilinir. Fotogrametrik resimler herhangi bir pozisyonda 1µm'lik sabit doğrulukla ölçüldü. Ölçmelerin %99'u için sabit kalibrasyon doğruluğu $\pm 3\mu$ metod olarak hesaplandı. USA Geological Survey 1953'te kamera lenslerini çapraz konumda monte edilmiş 53 kolimatörden oluşmuş bu methodla kalibre etmiştir.

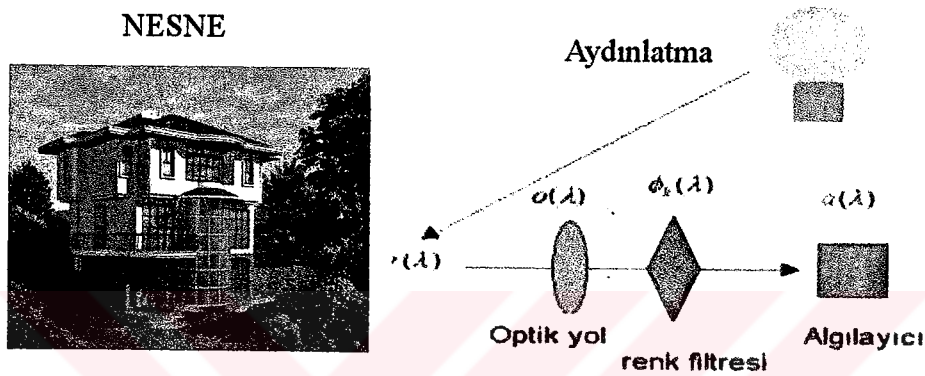
Bu yöntemde resim çekme makinesi şu şekilde kalibre edilir:

Merceklerin düğüm noktası 53 kolimatörün kesişim noktası olarak ayarlanır ve izdüşüm merkezi kolimatöre dik olacak şekilde kurulur. Son olaraksa kamera, resme paralel düzlemin otomatik kolimatör teleskobu eksenlerine dik olacak şekilde eğilerek ayarlanır.

4.2.5 Dijital Resim Çekme Makinelerinin Kalibrasyonu

4.2.5.1 Dijital Kamera Modeli

Dijital kamera ile resim elde etme işleminin ana bileşenleri (Şekil4.15)'te gösterildiği gibidir. (Şekil4.15)'te aydınlatma $I_R(\lambda)$ olarak, cisim yüzeyinin yansıtması $r(\lambda)$, detektörün önündeki optik sistemin spektral geçirgenliği $O(\lambda)$, k. optik filtrenin geçirgenliği $\phi_k(\lambda)$ ve CCD (Charge Couple Device) dizilerinin spektral duyarlılığı $a(\lambda)$ olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.15 (Dijital kameralarla resim elde etme işleminin gösterimi)

Resim elde etme yönteminin transfer fonksiyonunun lineer olduğu varsayılırsa, kameranın resim pikseline yanıtı C_k ,

$$C_k = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} I_R(\lambda) r(\lambda) o(\lambda) \phi_k(\lambda) a(\lambda) d\lambda + \varepsilon_k = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} r(\lambda) o(\lambda) W_k(\lambda) d\lambda + \varepsilon_k \quad (4.64)$$

eşit olur. Burada, $W_k(\lambda) = I_R(\lambda) o(\lambda) \phi_k(\lambda) a(\lambda)$ k. kanalın spektral duyarlılığını gösterir. ε_k ise ek noise hatasıdır.

Bununla birlikte gerçek sistemler için uygun, lineer olmayan gama düzeltmesi gibi düzeltmeler gerekebilir.

Işımı düzenli olarak N eşit dalga boyu aralıklarında örnekleyerek (4.64) eşitliği $C_{k,p} = R' w_k + \varepsilon_k$ olarak tekrar yazılabilir. Burada W_k k. kanalın spektral duyarlılığını içeren vektördür ve r ise örneklenmiş ışıdır.

4.2.5.2 Spektral Özellikler

Kameranın spektral duyarlık fonksiyonunu elde etmenin 2 yolu vardır. Birinci yol, tek renkli (monokromatik) ışığı emen aletler kullanılarak direkt olarak spektral ölçmelere dayanır. Diğer yol ise bilinen yansıtma ve geçirme ışınları ile örneklerin elde edilmesine dayanır. Bilinen değerler kullanılarak kamera çıktılarının gözlenmesiyle kamera duyarlılığını elde edebiliriz.

W_k 'nın elde edilmesi için, bilinen yansıtma r_p ile P renk parçalarının seçiminin yerini tutan kamera tepkisi $C_{k,p}$, $p=1, \dots, p$ ölçülür. $R = [r_1 r_2 \dots r_p]$ tüm parçaların yansıtmasıdır. k . kanalın p . örneğe kamera tepkisi,

$$C_{k,p} = R^t w_k + \varepsilon_k \quad \text{olarak yazılabilir.}$$

Burada W_k 'nın bulunması için birkaç yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemler aşağıda açıklanmıştır.

a) Pseudoinverse tahmin yöntemi (PI)

$$\hat{W}_k = (RR^t)^{-1} R C_{k,p} = R^{t-} C_{k,p} \quad (4.65)$$

Burada R^{t-} karesel ortalama hata $\|w_k - \hat{w}_k\|$ 'nın minimum olmasını sağlayan R^{t-} 'nin Moore-pseudoinversi yerini tutar.

Eğer rank (en azından $P \geq N$ olması gerekir) ve noise hatası olmaksızın $(R) \geq N$ ise bu çözüm çalışma hassasiyetine tam olarak uygundur. Gerçek durumlarda bunun yanında bu sistemin tersi mümkün değildir.

b) Temel Eigen Vektör (PE) Metodu

Temel Eigen Vektör (PE) metodu, aynı zamanda eksik rank pseudoinversi olarak bilinir, en önemli tekil değerlere uyan tekil vektörlerin dikkate alınmasıyla sistemin noise duyarlılığını azaltır. R rankının $(N \times R)$ boyutundaki R matrisini bilinmektedir.

$$R = UWV^t \quad \text{için}$$

$(N \times R)$ ve $(P \times R)$ birim V matrisi mevcuttur. Burada W_i , $i = 1, \dots, R$

Eğer noise ε bağımsız ise ve σ varyansı ile hesaplama hatası olacaktır.

c) En Önemli Hedef Parçalarının Seçilmesi Yöntemi (SPE)

Güvenilir sonuçlar elde etmek için PE metodunda çok sayıda hedef noktaya ihtiyaç duyulur ki bu pratik uygulamalar için ciddi bir kısıtlamadır. J.Y Harderberg kameranın spektral duyarlılığını tahmin etmek için tüm kümelerin yerine bazı en önemli örnekler seçen algoritma önermiştir.

Bu algoritmada ilk adım, en büyük karekök karesel ortalama hata değerine sahip r_{s1} 'in seçilmesidir.

$$\|r_{s1}\| \geq \|r_P\| \quad (4.66)$$

Daha sonra $[r_{s1}, r_{s2}]$ 'nin en küçük değerinin en büyük tekil değerine oranını maksimum yapan r_{s2} seçilir.

$$\frac{W_{\min}([r_{s1}, r_{s2}])}{W_{\max}([r_{s1}, r_{s2}])} \geq \frac{W_{\min}([r_{s1}, r_P])}{W_{\max}([r_{s1}, r_P])} \quad (4.67)$$

Aynı kurala göre bir çok örnek eklenebilir.

$$\frac{W_{\min}([r_{s1}, r_{s2}, \dots, r_{si}])}{W_{\max}([r_{s1}, r_{s2}, \dots, r_{si}])} \geq \frac{W_{\min}([r_{s1}, r_{s2}, \dots, r_{si-1}, r_P])}{W_{\max}([r_{s1}, r_{s2}, \dots, r_{si-1}, r_P])} \quad (4.68)$$

$$p \notin \{S_1, S_2, \dots, S_{i-1}\}$$

Bu yöntemle spektral duyarlık hesaplaması için en önemli yansıtma örnekleri elde edilir.

Bu bölümde iki bölümlü olan durgun alanlı CDD (Charge Coupled Device) kameralar bugünkü teknoloji ile 3000x3000 piksele kadar geliştirilebilmektedir. Her ne kadar bu CDD kameralar profesyonel dijital kamera olarak tanımlansa da fotogrametri için gerekli özelliklere tam olarak sahip değildir. Dolayısıyla fotogrametrik açıdan bu kameralar dijital amatör kameralardır.

Dijital resim çekme makinelerinin çok fazla hareketli olmalarından dolayı sık sık test alanında kalibre edilmeleri gerekmektedir. Ek olarak imkan olması durumunda çalışma esnasında kalibrasyonda önerilir.

4.3 Diğer Fotogrametrik Sistemlerin Kalibrasyonu

4.3.1 Tarayıcıların Kalibrasyonu

Eğer fotoğraflar konvansiyonel bir kamera ile çekilirler ve ayrıca dijital bir işleme tabi tutulacaklarsa bunlar öncelikle sayısallaştırılmalıdırlar. Bu ara seviye için geometrik ve radyometrik kalibrasyonlar açıkça gereklidir. Mekanik sistemin kalibrasyonuna ek olarak dedektörlerin özellikleri de kontrol edilmelidir.

4.3.2 Mekanik Sistemlerin Kalibrasyonu

Reseau prensibine göre çalışan foto tarayıcılar fotogrametrik bir proje gibi kalibre edilirler. Reseau ideal koordinasyonları sağlar. Reseau'nun dijital resimlerle otomatik olarak ölçülmesinden sonra reseau resimlerinin içerikleri doğrulanır. (Örneğin iki boyutlu bir transformasyonla veya uygun bir enterpolasyon fonksiyonuyla) bu resim düzeltilmesi benzetme yolu ile gerçekleştirilir. Geometrik çapa noktaları olmayan tüm resim formatlarını tarayan foto tarayıcılarının mekanik sistemleri belli zaman aralıklarında kalibre edilmelidirler. Aşağıda söylenenler Zeiss/Intergraph fototarayıcı PSie içindir.

Mekanik sistemin ızgarasını taşıyan cam, bir tarağın taranmasıyla kalibre edilir. Grid artı işaretlerinin ideal koordinatları $\pm 2\text{mm}$ veya daha iyi bir prezisyonla bilinmelidir. Grid artı işaretlerinin otomatik ölçümlerinden sonra 3,4,6 veya 8 parametre dönüşümü uygulanır. Grid noktaları üzerinde kalmış hatalar cihazın geometrik durumu üzerindeki bilgiyi sağlar. Eğer sınırlı toleranslar aşılsa tarayıcının mekanik sistemi tekrardan ayarlanmalıdır. Toleranslar düzenlenirse dönüştürülmüş parametreler kalibrasyon dosyasına girilir. Böylece bu veriler kişisel sayısallaştırılmış görüntünün geometrik düzeltmesinde kullanılır. Sayısallaştırılacak görüntünün ölçmeye ait noktaları varsa ideal koordinatları bilinen ölçmeye ait noktaların ideal koordinatlar yerleşmesi ve kafes plağından geometrik düzeltmeyi önlemek tek bir işlemde birleştirilir.

Tarayıcının fonksiyonel parametreleri taranmış kafes plağının görüntüleri ile kontrol edilebilir. Mesela bir dedektör sırası tarama yönüne dik değilse kafes doğrularının yer değişimi şerit kenarlarında görülür. Böylece bir yer değişimin yarısı bir dedektör sırasında küçük bir çevrim yaparak giderilmelidir.

4.3.3 Foto Dedektörlerin Kalibrasyonu

Geometrik çözünürlükle zıt transferin daha yüksek parçasıyla başlanır. Daha sonra dedektörlerin radyometrik ve spektral özelliklerini kabul edilir.

4.3.3.1 Geometrik Çözünürlük ve Zıt Transfer

Geometrik çözünürlük dedektörlerin boyutuyla fazlasıyla etkilenir. Dijitalleştirilmiş görüntülerin küçük ayrıntılarını algılayabilmek için dedektörün alanı mümkün olduğunca küçük olmalıdır. Bu boyut dijitalleştirilmiş sınırlarla karıştırılmamalıdır. Üreticiler genellikle piksel boyu gibi sadece sayısallaştırılmış sınırları aktarırlar.

Test örnekleri çözünürlüğü belirlemek için taranır. Tarandıktan sonra ne kadar çözündüğünü belirlemek için kontrol edilir. Çözünürlük için en uygun durum 7,5mm aralıkta sayısallaştırma için 10mm genişliğindeki barlar sayısallaştırılmış görüntüde belirir.

Bu sonuç çok yüksek kontrast ile ortaya çıkarılır. Geometrik çözünürlük kontrast azaltılarak zayıflatılır. Bu çözünürlük azalması ampirik olarak kontrol edilebilir. Sayısallaştırılacak test örneğinin kontrastını aydınlatma azaltılarak değiştirildikten sonra yukarıda tanımlanan test tekrarlanır.

Geometrik çözüm sadece sınırlı koşullarda çözüm verir. Kullanıcı için bar aralığının fonksiyonlarına test düzenlerine ne kadar kontrast düştüğü ile ilgilidir. Farklı bar genişliklerinde yoğunluk ölçer ile eklenmiş parçanın düzenlerini ve orijinal ölçülmüş kontrast yoğunluk ölçerle karşılaştırılarak tanımlanabilir. Parçalı dijitalleşen aralıklar ve orijinaldeki parçalı kontrastı için kontrast fonksiyonunu elde edilir. Tarayıcının bu özelliklerinin tam tanımlanabilmesi için orijinal içindeki farklı kontrastları ve farklı dijitalleşen aralıklar için kontrast transfer fonksiyonunu tanımlamak gereklidir.

4.3.3.2 Radyometrik Özellikler

Birçok dedektörü olan tarayıcılardaki en önemli kabul sürgü alanı olsa bile bu dedektörlerin hepsinin verilen alanın yoğunluğu için ayrı ayrı tonu çıkarabilmesidir.

Basit dedektörler ve bağımsız detektörler arasındaki duyarlılığın ve voltaj farklılığının sonucu olarak kısa zaman aralıklarında ayarlanması gereklidir. Bu dengeleme örneğin yoğunluğu bilinen açık ve koyu bir şeritle yapılabilir. Dedektörler için ölçek faktörü ve 0 noktası çakışması okuması ideal karşılaştırmadır. Kalibre

edilmiş tarayıcı bu yolla mutlaka radyometrik özelliklerinin belirlenmesi için ileri testlere tabi tutulmalıdır.

Karakteristik her ayırım parazitlenmedir. Bu anlamda parazitlenme dijital homojen test alanında gerçek değerine standart sapmayı determine eder. Bu yolla elde edilen standart sapma dedektörlerinin verimsizliği anlamına gelmez ancak hala parazit fotoğrafta bulunur.

Ek olarak esas ilgili alanın bireysel adımlarının gri kamalı gerçek değerleridir. Bu gerçek değerlerin orijinaler ile karşılaştırması gri tonlar için bir bakıma el tablosu oluşturmaya yönlendirir. Eğer gri kama transmisyon modunda sayısallaştırılmış ise orijinal şeffaflığının ölçüldüğü ve gözlemlendiği gri tonlar şeffaflık arasında bir lineer kombinasyon olmalıdır. Eğer gri ama yoğunluk modunda sayısallaştırılmış ise orijinalin şeffaflığın ölçen şeffaf ve sayısallaştırılmış gri ton arasında algoritmik bir kombinasyon olmalıdır. Bu bağıntılar el tablosuna özenle girilmeli ve böylece orijinali taranırken doğrulamalar otomatik uygulanabilmelidir.

4.3.3.3 Spektral Özellikler

Fotogrametrik film üzerinde tekrar renklendirme yapmak oldukça karmaşıktır. Renkler spektral duyarlılıkla tekil tabakaların duyarlılıklarına bağlıdır. Orijinal renklerde tarama yapmak ileri aşamada belirsizlik getirir. Renkli orijinaler üç aşamada taranır; mavi, yeşil, kırmızı filitre.

Tarayıcının spektral kalitesi aynı zamanda onun renk kalitesidir. Dijitalleştirme işleminde orijinalden değişmemiş renkleri andıran dereceyle ifade edilir. Her bir renk yelpazesi için üç ana rengin bilindiği renk tabloları ile renk bağlılığı kontrol edilir. Bu üç renk ile dijitalleştirme, tüm tekil renklerin yelpazesi için orijinal renkleri ürün olarak verir. Tüm değişiklikler el tablosunda bulunur. Renk kalibrasyonu gri kama kalibrasyonu ile aynıdır.

5. UYGULAMA

5.1 Amaç

Dijital fotogrametrinin fotogrametriye kazandırmış olduğu özellikler ele alındığı zaman fotogrametrik çalışmalarda dijital fotoğraf kullanmanın yararları şunlardır:

1. Optik-mekanik gereksinim olmaksızın dijital resimler bilgisayar ortamında ölçülebilir ve değerlendirilebilir.
2. Dijital ölçme sistemleri kalibrasyon gerektirmeyen değişmez sistemlerdir.
3. Bu sistemlerde resim kalitesi artırılabilir.
4. Bu sistemler kullanıcıya otomasyon olanağı sağlamaktadır.
5. Uygulamalar gerçek zamanlı veya çok yakın zamanlı olarak yapılabilir.
6. Bir projenin değerlendirme ve uygulama aşamasında dijital resimlerin kullanılması proje hızını artırmaktadır.

Dijital resim çekme makineleri fazla hareketli olmalarından dolayı sık sık test alanında kalibre edilmeleri gerekmektedir. Yersel fotogrametride ve yakın resim fotogrametrisinde çalışma esnasında kalibrasyon önerilmektedir. Bu tür kalibrasyon yapılan projelerde daha güvenilir sonuçlar elde edilir.

Bir resim çekme makinasının kalibrasyonu fotogrametrik konum belirleme işleminin tersi olarak kabul edilir. Fotogrametrik konum belirlemede iç yöneltme elemanları bilinmekte olup cisim noktalarının koordinatları aranır. Kalibrasyonda ise cisim noktalarının koordinatları bilinmekte olup resim iç yöneltme elemanlarının koordinatları aranmaktadır. Resim iç yöneltme elemanları izdüşüm merkezinin resim orta nokta bulucuları ile belirlenmiş koordinat sistemindeki x_0 , y_0 ve c koordinatlarıdır.

Bu uygulama çalışmasında test alanı üzerinde çoklu konverget resim çekimi ile 28mm odak uzaklıklı KODAK DCS200 ve 7-21mm zoom özellikli NIKON 950

CCD resim çekme makinelerinin test alanında geometrik koşullar kullanılarak demet dengelemesi ile kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir.

Fotogrametride CCD (Charge Coupled Device) gibi stabil olmayan resim çekme makineleriyle çalışıldığında kalibrasyon ve resim çekme işlemleri ya aynı anda olmalı ya da arada çok kısa bir zaman farkı olmalıdır.

Bu uygulamada kalibrasyon işlemi, çekim sırasında kalibrasyon yöntemiyle yapılmıştır. Bu yöntemle test alanının yüksek doğrulukla elde edilen üç boyutlu cisim koordinatları yardımıyla iç yöneltme parametrelerinin demet dengelemesine bilinmeyen olarak katılması sonucu resim çekim merkezi koordinatları ve objektifin odak uzaklığı yüksek doğrulukla hesaplanabilmektedir.

5.2 Kullanılan Araç ve Test Alanı

Bu kalibrasyon çalışmaları İ.T.Ü. İNŞAAT FAKÜLTESİ Fotogrametri Laboratuvarındaki test alanında gerçekleştirildi. Test alanı 4.5x2x1.1m³'lük bir hacim toplamakta ve 36 noktadan oluşmaktadır. Test alanının 3 boyutlu koordinatları WILD Theomat T2002 elektronik teodelit ile jeodezik yöntemlerle lokal olarak hesaplandı ve nokta konum doğrulukları sıfır olarak kabul edildi.

Değerlendirme işlemi bir digital görüntü işleme programı olan PICTRAN-D (3 boyutlu değerlendirme) ve PICTRAN-B (demet dengelemesi) yazılımları kullanılarak yapıldı. Program sistemi resimlerin yönetilmesinden elde edilen 3 boyutlu koordinatların bilgisayar destekli çizim programlarına aktarımına kadar olan tüm işlemleri gerçekleştirmektedir.

Pictran-D (3 boyutlu değerlendirme) Modülü çekilen cisimlerin bir takım işlemler sonucu bilgisayar ortamında yeniden modellendirilmesini sağlar. Modeli oluşturan bölge üzerinde yapılan 3 boyutlu nokta ölçümü esnasında kullanılan resimlerde uzaysal doğrultular oluşturur. Bu sayede nokta ölçümünün hassas olması sağlanır. Uzaysal ışınlar kesiştirilerek noktaların 3 boyutlu koordinatları elde edilir. Ayrıca seçilecek düzlem üzerinde noktaların konumları ilişkilendirilebilir.

Pictran-B modülü Pictran programının dengeleme modülüdür. Demet dengelemesi yapan modülde iç yöneltmesi yapılan resimleri oluşturan proje kapsamında kontrol noktalarıyla dış yöneltmeye tabi tutulurlar. Dengeleme esnasında resim çekim noktasının koordinatlarına ve dönüklük değerlerine ihtiyaç yoktur. Bu değerler

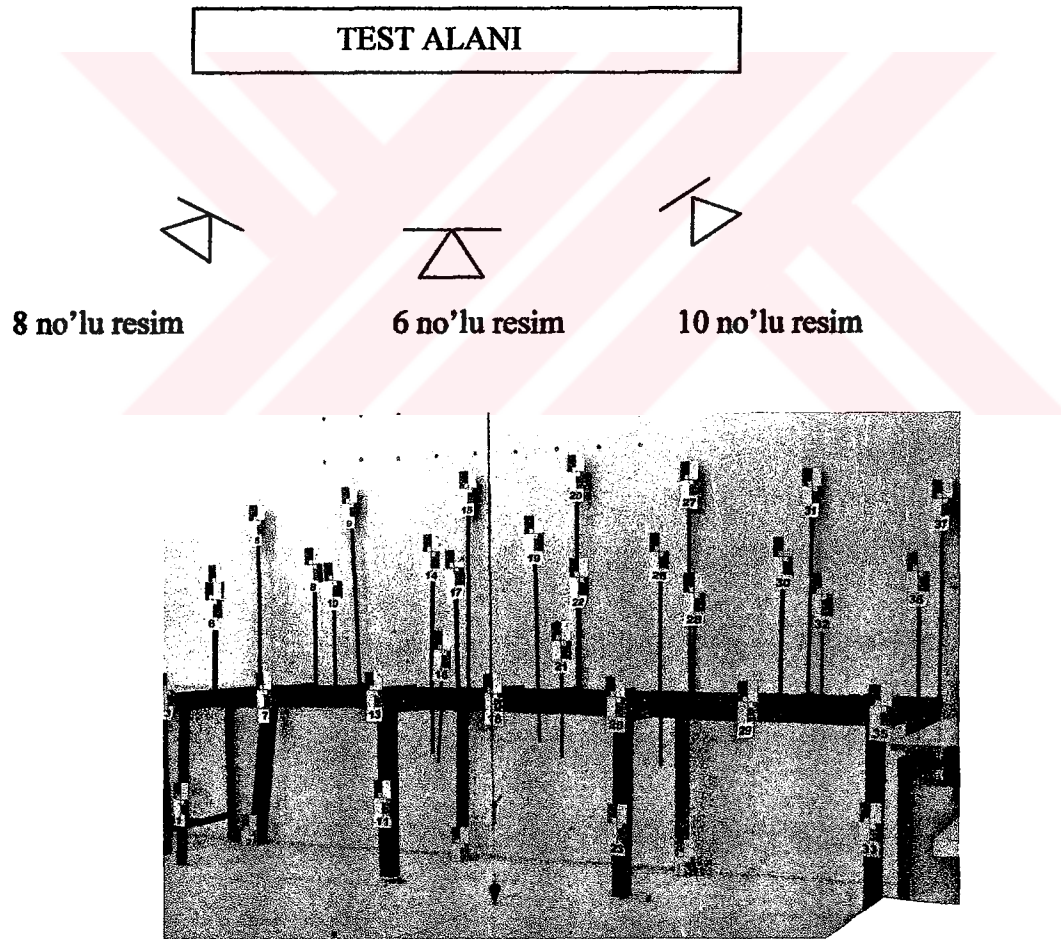
dengeleme esnasında Pictran-B tarafından hesaplanmaktadır. Bu özellik Pictan-B'nin en önemli özelliğidir. Ayrıca dengelemede cisim üzerinden herhangi ölçü veya koordinat parametre olarak girilebilir.

5.3 Yapılan Çalışmalar

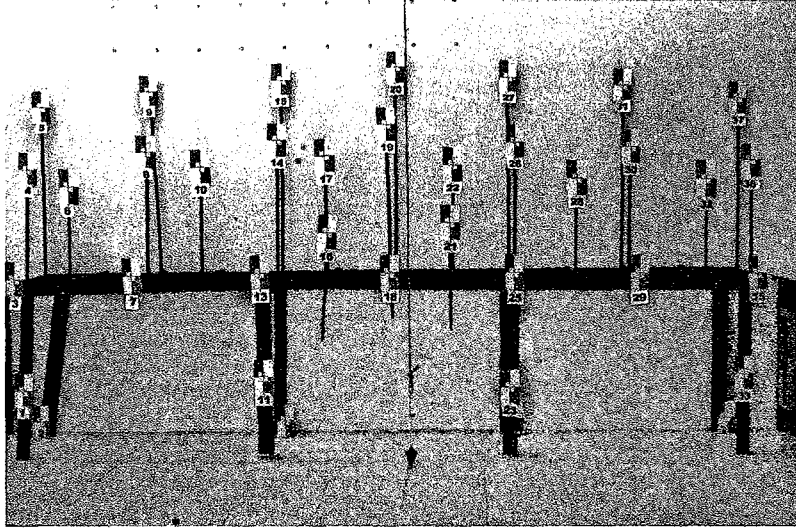
Her iki resim çekme makinesiyle test alanında homojen olarak 3 istasyon noktasından (test alanının karşı, karşı-solu ve karşı-sağ tarafından) çoklu konvergent olarak 3'er adet resim çekimi yapılmıştır. Resim çekimlerinde ilave aydınlatma donanımıyla test alanı aydınlatılmıştır.

Test alanında yapılan resim çekim planı aşağıdaki gibidir.

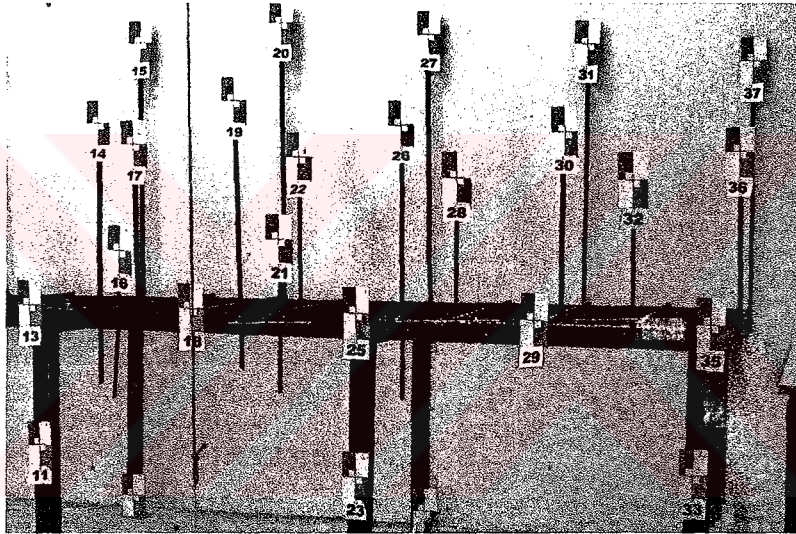
KODAK DCS 200 için yapılan resim çekim planı ve elde edilen resimler



Resim No: 8



Resim No: 6



Resim No: 10

5.3.1 Nikon 950 Resim Çekme Makinesinin 7mm ve 21mm Zoomlarında Kalibre Edilmesi

Bu çalışmanın amacı geometrik konvergent metod kullanılarak teorik ve pratik yaklaşımlarla Nikon950 zommlu dijital resim çekme makinasının 7mm ve 21mm zoomlarında kalibre edilmesidir. Kalibrasyon test alanı için çoklu konvergent kalibrasyon algoritması kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kullanılan bu yaklaşım büyütmeli dijital profesyonel kameraların iç yöneltme elemanları (x_0, y_0, c) 'nin polinom fonksiyonlarını belirlemek için sabit odak uzaklıklı dijital kameralarla karşılaştırılmıştır. Resim çekme makinelerinde büyütme fonksiyonu farklı çözünürlüklerde resimler elde etmek için kullanılır. Geometrik olarak kalibrasyonun

odaklanmasının gösterimi, farklı uzaklıklardan cisim üzerine odaklanmak veya odaklanamamaktan kaynaklanan derinliğin hesaplanmasında kullanılır.

Bu tür resim çekme makinelerinin kalibrasyonu zordur. Bunun iki sebebi vardır.

1. İç yöneltme parametrelerinin her zaman değişmesi,
2. Metrik basit mercekli sistemler için kullanılan pinhole kalibrasyon modeli bu tür sistemlerde distorsiyon nedeniyle uygulanamaz.

Kalibrasyon alanı için farklı farklı büyütme resim çekimi ile farklı çözünürlük faktörlerini elimine etmek için kullanılan her resimdeki herbir piksel için 7.9mikron boyut ve 1600x1200 çözünürlüğünde dosya formatı elde etmek için sabit piksel numarası kullanıldı.

Kalibrasyondaki temel hata kaynaklarından birisi de ölçme hatalarıdır. Bu tür hataların elimine edilebilmesi için ölçü sayısının yükseltilmesi gerekir. Bu da iç yöneltme parametrelerini değiştirmeksizin aynı veya farklı konumlardan aynı resim çekme makineleriyle birkaç resim çekilmesi ile olur. Bu durumda iç yöneltme parametreleri tüm resimler için aynı olur. Bu en küçük kareler yönteminin serbestlik derecesini artırır. Ve sonuç olarak çözümün güvenilirliği artmaktadır.

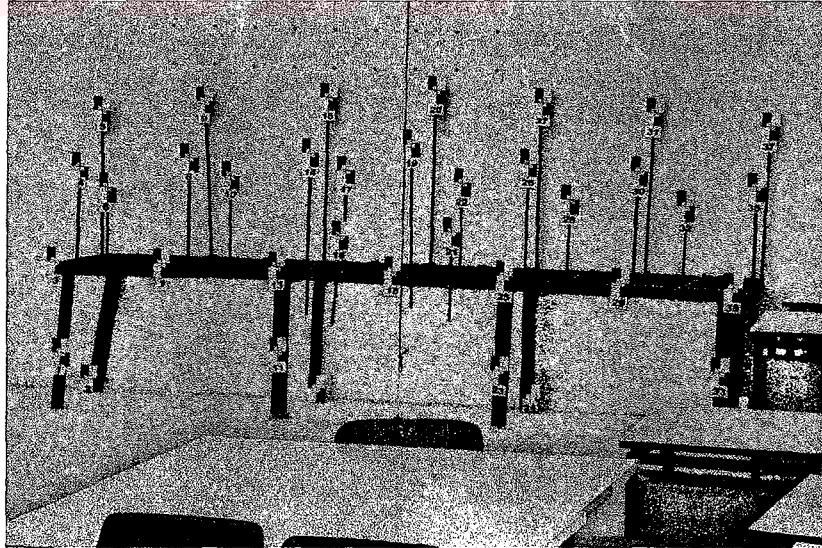
Bu uygulama çalışması prezisyonlu olarak 3 boyutlu koordinatları ölçülen duvar üzerinde düzenlenmiş olan İ.T.Ü İnşaat Fakültesi Fotogrametri Laboratuvarında bulunan test alanında gerçekleştirildi. Bu test alanı 36 noktadan oluşmakta olup noktaların 3 boyutlu koordinatları prezisyonlu (0.01mm) olarak klasik jeodezik yöntemlerle teodolitle ölçüldü.

Pinhole kamera modelinde resim merkezi veya ana nokta, resim düzlemi ile optik eksenin kesişim noktasıdır. Eğer merceğin optik eksenini resim düzlemine dik ve optik eksen büyütme anında değişmiyorsa bu kesişim noktasının konumu değişmez. Bu varsayımlarla odaklama ve büyütme zamanında aynı cisme ait resim noktaları bu kesişim noktasından geçerek çizgi boyunca açısal olarak hareket edecektir ki bu yayılma merkezi olarak adlandırılır. Birçok noktanın havada izlediği yolların izlediği çizgiler yayılma merkezi gibi yaygın noktalarda kesişeceklerdir. Yukarıdaki varsayım ele alındığında yayılma merkezi ana nokta ile kesişecektir. Bu yolla ana nokta hesaplanabilmektedir. Bu ideal durumdur. Gerçekte büyütme mercekli sistemlerin optik eksenleri odaklama ve büyütme anında değişebilir. Bu nedenle iki

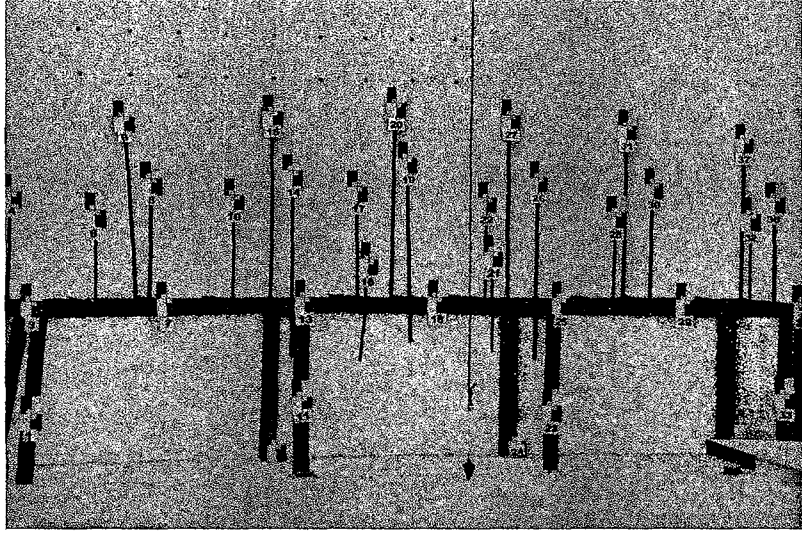
resim arasındaki yayılma merkezi değişir. Diğer yandan değişme önemli miktarda değilse yayılma merkezlerinin ortalamasını ana nokta olarak alabiliriz.

En küçük kareler yöntemi resimde ölçme hatalarını en aza indirmek ve ayrıca iç ve dış yöneltme parametrelerini radyal ve teğetsel distorsiyon parametreleriyle birlikte eş zamanlı olarak hesaplamak için uygulanır. En küçük kareler tekniği kendi kendine kalibrasyon tekniği ile birlikte kullanılmıştır. En küçük kareler yönteminin matematiksel modeli klasik olarak uygulanmıştır. Ancak stokastik modelin ağırlık matrisi parametreleri demet dengelemesinden önce hesaplanmıştır. Bu parametreler iç yöneltme parametrelerinin sıfır olarak alınmasıyla elde edilen parametrelerdir. Bunun anlamı hesaplama prosedüründe iç yöneltme parametrelerinin varyanslarının da sıfır alınması demektir.

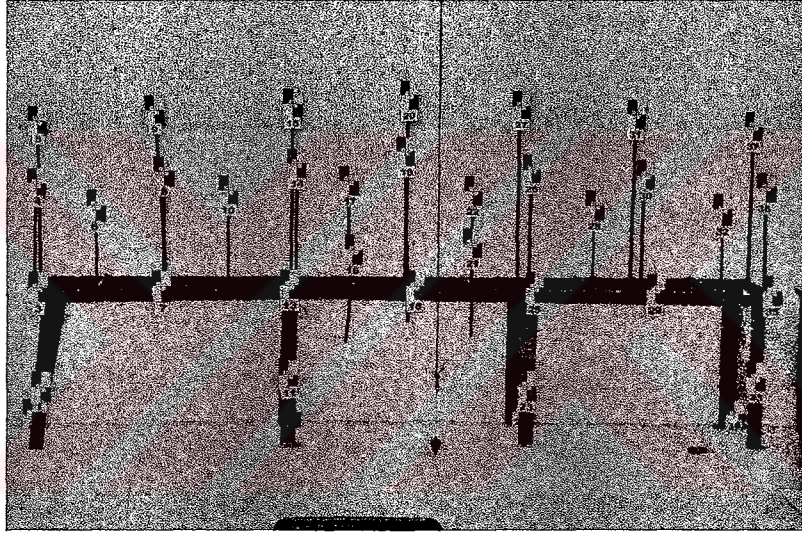
Nikon 950 ile 7mm zomunda çekim planı ve elde edilen resimler



Resim No: 156



Resim No: 151



Resim No: 153

Nikon 950 ile 21mm zommunda çekim planı ve elde edilen resimler

TEST ALANI



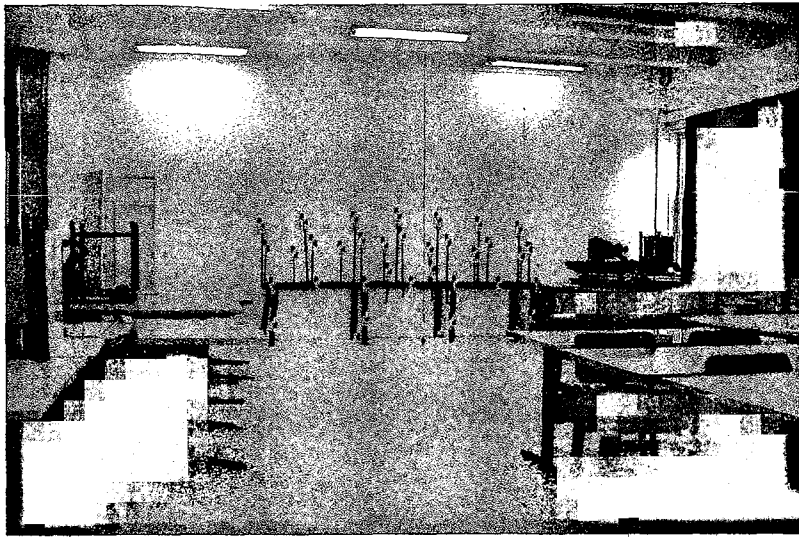
152 no'lu resim



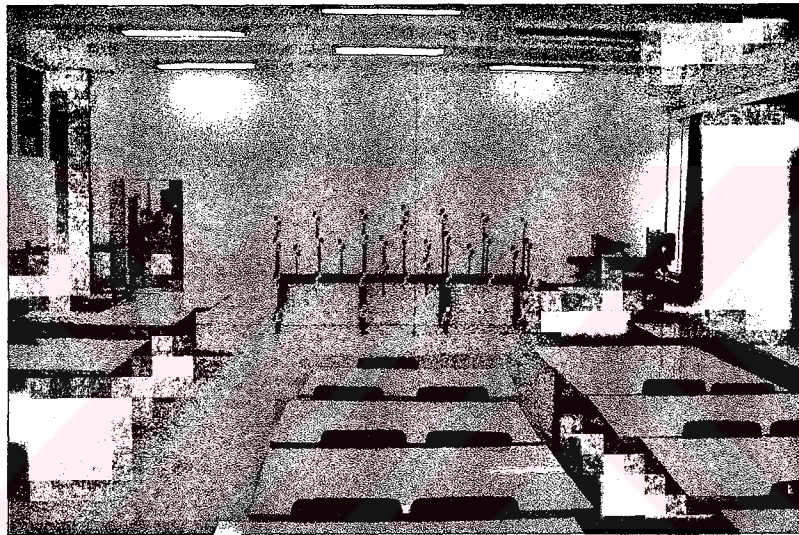
154no'lu resim



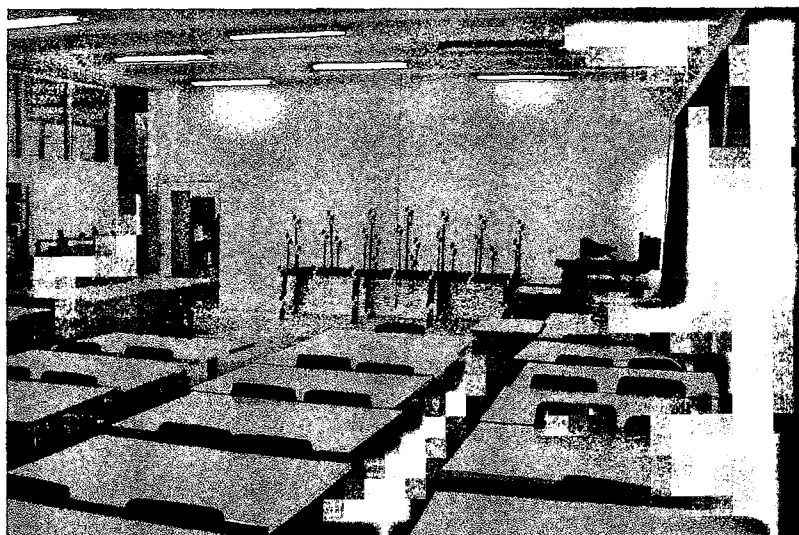
157 no'lu resim



Resim No: 152



Resim No: 154



Resim No: 157

Resim çekim işlemlerinden sonra Pictran-D ve Pictran-B değerlendirme işlemlerine başlamış ve her iki resim çekme makinası için kalibrasyon sonuçları elde edilmiştir.

Pictran B ve D programı çalışma ortamı Ek.A'da verilmiştir.

5.4 Sonuçlar

Pictran-D programlarıyla tüm resimlerin iç yönlendirmeleri (Digital kameralarda Reseu plakaları ve orta nokta bulucuları olmadığından) 4 köşe noktasından yapıldı. İç yönlendirme işleminden sonra Pictran-B ile demet dengelemesine geçildi. Demet dengelemesinde ilk değerler her iki kamera için sıfır (0) alındı.

Odak uzaklığı (c) Kodak DCS 200 için yaklaşık değeri olan 28mm ve Nikon 950 için 7mm ve 21 mm olarak alındı. Bu yaklaşık değerlerin program içindeki statüleri ölçme değeri olacak şekilde girildi.

Verilen bu ilk yaklaşık değerlerle iterasyon başlatıldı. x_0 , y_0 ve c'nin sonuç değerleri Kodak DCS200 için 12 iterasyon sonucunda, Nikon 950 için 7mm zommda 14 iterasyon sonucunda, 21mm zommda 11 iterasyon sonucunda elde edilmiştir. Demet dengelemesi sonucu elde edilen sonuç değerleri Ek.B,C ve D'de verilmiştir. Her iki kamera için kalibre edilmiş resim değerleri aşağıdaki tablolarda verilmiştir.

Tablo 5.1 (Kodak DCS200 için kalibre edilmiş kamera değerleri)

Resim Ana Nokta Koordinatları ve Odak Uzaklığı		Radyal Distorsiyon Değerleri	
X_0	-1.047108	A1	0.00333591
Y_0	0.751462	A2	-0.0000183928
C	29.704863	A3	-0.0286810
		A4	0.0386470

Tablo 5.2 (Nikon 950 ile 7mm zomunda kalibre edilmiş kamera değerleri)

Resim Ana Nokta Koordinatları ve Odak Uzaklığı		Radyal Distorsiyon Değerleri	
X_0	-0.145654	A1	0.0314350
Y_0	-0.163644	A2	-0.00813027
C	7.099923	A3	0.0432141
		A4	0.00654960

Tablo 5.3 (Nikon 950 ile 21mm zomunda kalibre edilmiş kamera değerleri)

Resim Ana Nokta Koordinatları ve Odak Uzaklığı		Radyal Distorsiyon Değerleri	
X_0	-0.137959	A1	0.00603377
Y_0	0.023840	A2	-0.000129897
C	21.040940	A3	-0.00936064
		A4	-0.00231491

Tablolardaki A1, A2, A3 ve A4 değerleri resimlerin iç yöneltmesinde ölçülen köşe noktalarındaki distorsiyon değerleridir. Bu distorsiyon değerlerinin hesaplanmasında şu formüller kullanmıştır.

$$\begin{aligned}
 x_{neu} &= x_{alt} - x_{alt} \cdot (R^2 - R_0^2) \cdot A1 \\
 y_{neu} &= y_{alt} - y_{alt} \cdot (R^2 - R_0^2) \cdot A1 \\
 x_{neu} &= x_{alt} - x_{alt} \cdot (R^2 - R_0^2) \cdot A2 \\
 y_{neu} &= y_{alt} - y_{alt} \cdot (R^2 - R_0^2) \cdot A2
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

Ayrıca yapılan demet dengelemesi sonucunda radyal distorsiyon değerleri ve iç yöneltme parametreleri arasındaki korelasyon değerleri bulunmuştur. Değerleme öncesinde demet dengelemesinin temel prensibi gereği iç yöneltme ve distorsiyon değerlerinin birbiriyle korelasyonsuz oldukları yani bağımsız oldukları düşünülmüştür.

Demet dengelemesi sonucunda birbirleri ile korelasyonlu ve korelasyonsuz değerler aşağıdaki tablolarda verilmiştir.

Tablo 5.4 (Kodak DCS200 için korelasyonlu ve korelasyonsuz değerler)

Nokta No	Teğetsel Distorsiyon (MA)	Radyal distorsiyon (A)	Statüleri
1	0.00333591	0.001064	1
2	-0.0000183928	0.000006316	1
3	-0.0286810	0.01162	1
4	0.0386470	0.01364	1

Tablo 5.5 (Nikon 950 ile 7mm zomu için korelasyonlu ve korelasyonsuz değerler)

Nokta No	Teğetsel Distorsiyon (MA)	Radyal distorsiyon (A)	Statüleri
1	0.0314350	0.01330	1
2	-0.00813027	0.002196	1
3	0.0432141	0.008911	1
4	0.00654960	0.007093	1

Tablo 5.6 (Nikon 950 ile 21mm zomu için korelasyonlu ve korelasyonsuz değerler)

Nokta No	Teğetsel Distorsiyon (MA)	Radyal distorsiyon (A)	Statüleri
1	0.00603377	0.001163	1
2	-0.000129897	0.00003110	1
3	-0.00936064	0.003539	1
4	0.00231491	-0.003056	1

Sonuç olarak teğetsel distorsiyon değerleri ile iç yöneltme parametrelerinin birbirleriyle dengeleme sonrasında korelasyon değerleri bulunmuştur. Dengeleme öncesi ise demet dengelemesinin temeli gereği iç yöneltme bilinmeyenleri ve distorsiyonlar birbirlerinden bağımsız olarak düşünülmüştür.

6. SONUÇLAR

Fotogrametri bilimi günümüze kadar bir çok evreden geçmiştir. Bu evrelerde fotogrametri birtakım değişiklikler göstermiştir. En önemli değişiklikler dijital fotogrametriye geçiş evresinde gerçekleşmiştir. Gelişen teknolojiyle birlikte yersel fotogrametri birçok mühendislik alanlarında ve sanayii alanlarında uygulama imkanı bulmuş ve bu alanlarda büyük önem kazanmıştır.

Yersel fotogrametrik çalışmalarda fotogrametrik veri elde etmede resim çekme makinelerine, değerlendirme alet ve donanımlarına gereksinim vardır. Diğer jeodezik ölçmelerde olduğu gibi fotogrametrik ölçmelerde de doğruluk ve hassasiyet çok önemlidir. Bu nedenle fotogrametrik çalışmalarda doğru ve güvenilir sonuçlar elde etmek için fotogrametrik sistemlerin kalibre edilmesi gerekmektedir. Fotogrametrik bir sistemin kalibrasyonu sistemi en iyi şekilde ifade eden parametrelerin bulunmasıdır. Bu parametreler; resim çekim merkezinin odak uzaklığı (c), resim koordinat sistemi eksenlerinin yönleri ve dönüklükleri ve distorsiyon parametreleridir.

Bu uygulama çalışmasında Kodak DCS200 ve NIKON 950 7-21mm zoom özellikli dijital resim çekme makinelerinin test alanında, çekim sırasında kalibrasyon yöntemiyle kalibrasyonları gerçekleştirilmiştir. Test alanının yüksek doğrulukta elde edilen üç boyutlu cisim koordinatlarının demet dengelemesine bilinmeyen olarak katılmasıyla resim çekim merkezi koordinatları ve odak uzaklığı yüksek doğrulukta elde edildi. Değerlendirme işlemi bir dijital görüntü işleme programı olan Pictran D (üç boyutlu değerlendirme) ve Pictran B (demet dengelesi) yazılımları ile gerçekleştirildi. Resimlerin iç yönelmeleri dijital resim çekme makinelerinde reseu plakaları ve orta nokta bulucuları olmadığından resimlerin 4 köşe noktalarından Pictran D programıyla gerçekleştirildi.

Demet dengelemesi Pictran D programıyla ilk değerler her iki resim çekme makinesi için sıfır alınarak gerçekleştirildi. Odak uzaklığı (c), Kodak DCS200 için yaklaşık

değeri olan 28mm ve Nikon 950 içinse 7mm ve 21mm olarak alınarak bu yaklaşık değerlerle iterasyon başlatıldı. Ayrıca bu yaklaşık değerlerin program içindeki statüleri ölçme değeri olacak şekilde girildi.

Değerlendirme öncesinde demet dengelemesinin temel prensibi gereği iç yöneltme elemanları ile distorsiyon değerlerinin birbirleriyle korelasyonsuz oldukları halde demet dengelemesi sonucunda radyal distorsiyon değerleri ve iç yöneltme elemanları arasında korelasyon olduğu görülmüştür.



KAYNAKLAR

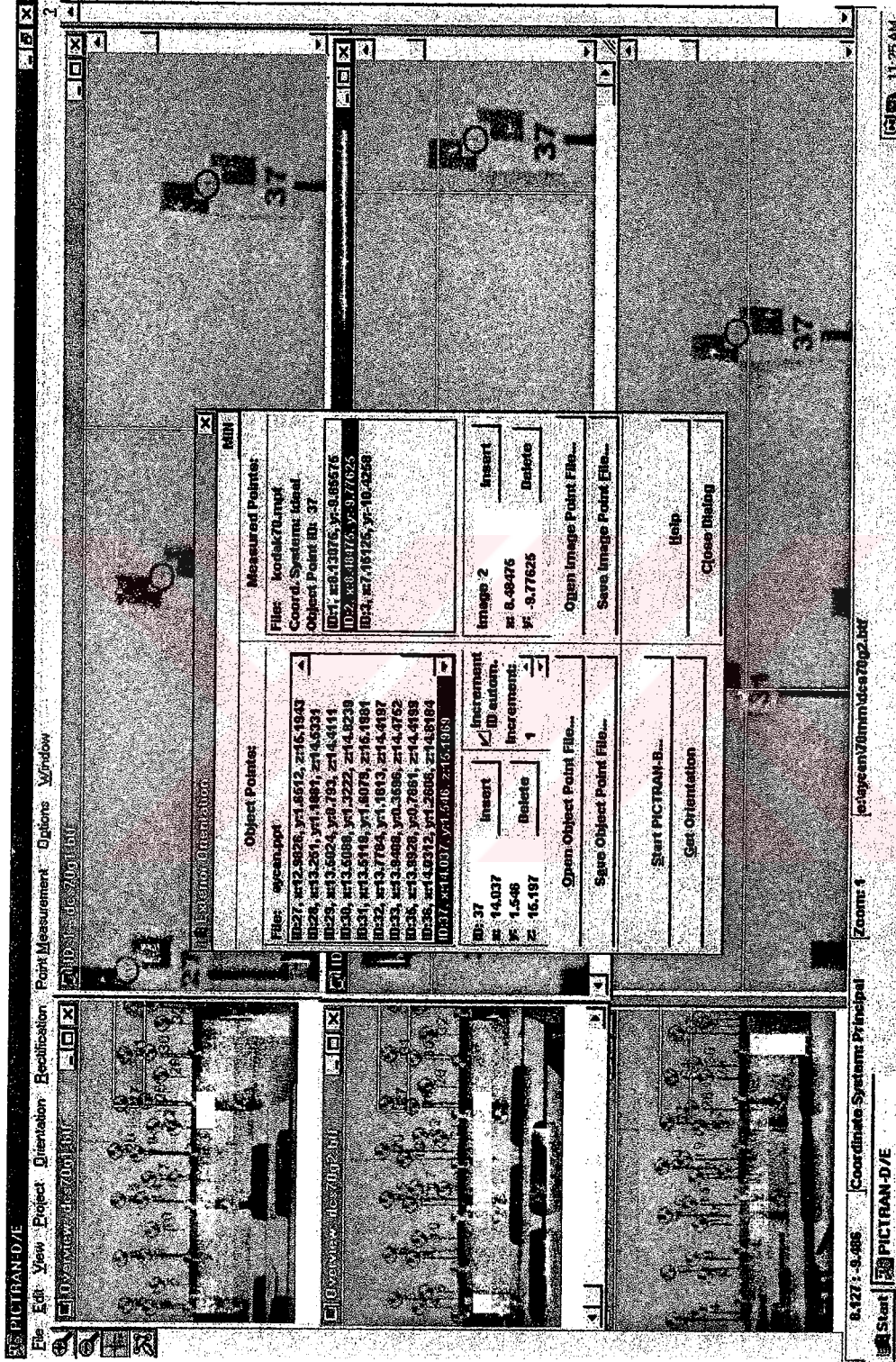
- Altan M.Orhan, 1998. ‘‘Symposium on Digital Photogrammetry’’
- Beyer, H.A, May 1992. ‘‘Geometric And Radiometric Analysis Of A CCD-Camera Based Photogrammetric Close Range System’’, *Phd Thesis, Instute Fur Geodasie Und Photogrammetrie*, Nr 51, Eth, Zurich
- Dowman, I. J, 1996. ‘‘Fundamentals of Digital Photogrammetry’’ *Close Range Photogrammetry and Machine Vision*, Scotland: Whittles Publishing
- Ergün, B., 1999. ‘‘Üç Boyutlu Otomobil Yüzeyinin Dijital Fotogrametrik Yöntemle Modellenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- Fraser, C.S, 1996. ‘‘Industrial Measurement Applications’’, *Close Range Photogrammetry And Machine Vision*, Scotland: Whittles Publishing
- Fritch, D., Ebner.H, And Heipke, C, 1991. ‘‘Digital Photogrammetric System’’
- H.A. Beyer, 1990., ‘‘Linejitter And Geometric Calibration of CCD Cameras,’’ *ISPRS J. Photogrammetry And Remote Sensing*, Vol. 45, pp. 17-32
- Heipke, C., January 1995. ‘‘State and The Art of Digital Photogrammetric Workstations for Topografic Applications’’, *Photogrammetric Engineering And Remote Sensing*, Vol 61.
- J. Weng, P.Cohen, and M.Herniou, Oct.1992. ‘‘Camera Calibration with Distortion Models And Accuracy Evaluation,’’ *IEEE Trans. Pattern Analysis And Machine Intelligence*, Vol. 14, No.10, pp.965-980
- Kraus, K., 1997. *Photogrammetry Volume I-II, Dümmlers Verlag*, Germany
- Külür, S. ‘‘Kalibrierung Und Geneuigkeitsuntersuching Eines Digitalen Bildaufnahme Systems’’, *Vortage Der 16. Jahrestagarc Der Deutschern Gesellschaft Für Photogrammetrie Und Fernerkundung*, 1998 München
- Li, M. And Lavest, J.M., Feb. 1995. ‘‘Some Aspects of Zoom-Lens Camera Calibration’’, *Tecnical Report ISRN KTH/NH/P-95/03-SE, Dep. Of Numerical Analysis And Computing Science, Kth (Royal Ins. Of Technology)*
- Li, M., May 1994. ‘‘Camera Calibration of A Head-Eye System For Active Vision’’, *Proc. Third European Conf. Computer Vision*, J.O. Eklundh, Ed., pp. I:543-554, Stochholm,

- Newton, I. And Mitchell, H.L., 1996, "Medical Photogrammetry" *Close Range Photogrammetry and Machine Vision* , Scotland: Whittles Publishing**
- Schenk, T., June 1996. "Current Status And Future Directions of Digital Photogrammetry: A Personel View", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 54**
- Y.I. Abdel-Aziz and Karara, Jan.1971. "Direct Linear Tarasformation Into Object Space Coordinates In Close Range Photogrammetry," *Proc. Symp. Close Range Photogrammetry*, Pp. 1-18**

İnternet Siteleri

- <http://www.city.ac.uk/omc/camera.hym1>**
- <http://www.cs.umd.edu/~adeli/calib.html>**
- <http://www.earthmapping.com/dpapplications.html>**
- <http://www.inria/pes.fr/mavi/people/sturn/abstracts.html>**
- <http://www.irf.se/~bjorn/thesis/node17.html>**
- <http://www.ise.stanford.edu/class/psych221/99/fxiao>**
- <http://www.kwon3d.com/theory/calib.html>**
- <http://genex.hgv.rrc.ac.uk/documantation/tecnical/cameracalib/node3.html>**
- <http://sbeck.www.media.mit.edu/people/sbeck/results/distortion/distortoin.html>**

(Ek:A) (Pictran B ve D programı çalışma ortamı)



Şekil A.1 (Pictran-D ve B değerlendirme programlarının çalışma ortamının görüntüsü)

Pictran - B Sisteminin Bunbil Modulünün çıkış dosyası
(Ek:B) (Kodak DCS200 Kalibrasyon Projesinin son iterasyonu)

DATE: 07/11/20 14:56:26

PAGE:

1

PROGRAM SYSTEM PICTRAN-B (VERSION 3.3 (C) TECHNET 1995-1997)

OUTPUT OF MODULE BUNBIL

BUNDLE ADJUSTMENT

TECHNET GMBH
PESTALOZZISTRASSE 8
D-70563 STUTTGART

TEL.: +49711/9018297 FAX.: +49711/9018296

PROJECT: DCS200

DATE : 07/11/20 14:56:27	BUNBIL-OUTPUT	PAGE: 13
PROJECT: DCS		

CAMERANAME	PRINCIPAL POINT AND FOCAL LENGTH																																																										
	X0	Y0	C	BEOBX0	BEOBY0	BEOBC	VX0	VY0	VC	MFVX0	MFVY0	MFVC	EVX0	EVY0	EVC	GFX0	GFY0	GFC	EGX0	EGY0	EGKC	GRZX0	GRZY0	GRZWC	EGKX0	EGKY0	EGKC	MX0	MY0	MC	STAX0	STAY0	STAC																										
dcs201	-1.047108			-1.047108			0.0000	0.0000		0.0001	0.0001	0.000	0.000																																														
	0.751462			0.751462			0.0000	0.0000		0.0001	0.0001	0.000	0.000																																														
	29.704863			29.704863			0.0000	0.0000		0.0001	0.0001	0.000	0.000																																														
UNCONTROLLED																																																											
UNCONTROLLED																																																											
UNCONTROLLED																																																											
UNCONTROLLED																																																											
UNCONTROLLED																																																											
UNCONTROLLED																																																											
UNCONTROLLED																																																											
UNCONTROLLED																																																											
UNCONTROLLED																																																											
UNCONTROLLED																																																											
UNCONTROLLED																																																											
UNCONTROLLED																																																											
UNCONTROLLED																																																											
UNCONTROLLED																																																											
UNCONTROLLED																																																											
UNCONTROLLED																																																											
UNCONTROLLED																																																											
UNCONTROLLED																																																											
UNCONTROLLED																																																											
UNCONTROLLED																																																											
UNCONTROLLED																																																											
UNCONTROLLED																																																											
UNCONTROLLED																																																											
UNCONTROLLED																																																											
UNCONTROLLED																																																											
UNCONTROLLED																																																											
UNCONTROLLED																																																											
UNCONTROLLED																																																											
UNCONTROLLED																																																											
UNCONTROLLED																																																											
UNCONTROLLED																																																											
UNCONTROLLED																																																											
UNCONTROLLED																																																											
UNCONTROLLED																																																											
UNCONTROLLED																																																											
UNCONTROLLED																																																											
UNCONTROLLED																																																											
UNCONTROLLED																																																											
UNCONTROLLED																																																											
UNCONTROLLED																																																											
UNCONTROLLED																																																											
UNCONTROLLED																																																											
UNCONTROLLED																																																											
UNCONTROLLED																																																											
UNCONTROLLED																																																											
UNCONTROLLED																																																											
UNCONTROLLED																																																											
UNCONTROLLED																																																											
UNCONTROLLED																																																											
UNCONTROLLED																																																											
UNCONTROLLED																																																											
UNCONTROLLED																																																											
UNCONTROLLED																																																											
UNCONTROLLED																																																											
UNCONTROLLED																																																											
UNCONTROLLED																																																											
UNCONTROLLED																																																											
UNCONTROLLED																																																											
UNCONTROLLED																																																											
UNCONTROLLED																																																											
UNCONTROLLED																																																											
UNCONTROLLED																																																											
UNCONTROLLED																																																											
UNCONTROLLED																																																											
UNCONTROLLED																																																											
UNCONTROLLED																																																											
UNCONTROLLED																																																											
UNCONTROLLED																																																											
UNCONTROLLED																																																											

CAMERANAME		PARAMETERS OF DISTORTION																
A1	A2	A3	A4	A5	A6	R00	MA1	MA2	MA3	MA4	MA5	MA6	STAA1	STAA2	STAA3	STAA4	STAA5	STAA6

DATE : 07/11/20 14:56:27	BUNBIL-OUTPUT	PAGE: 13
PROJECT: DCS		

CAMERANAME		PARAMETER1	PARAMETER2	CORRELATION
		CORRELATION BETWEEN INTERIOR ORIENTATION PARAMETERS		
X0		Y0		0.0000
X0		C		0.0000
X0		A1		0.0000
X0		A2		0.0000
X0		A3		0.0000
X0		A4		0.0001
X0		C		-0.0001
Y0		C		0.0000
Y0		A1		0.0000
Y0		A2		0.0001
Y0		A3		0.0001
Y0		A4		0.0000
C		A1		0.0000
C		A2		0.0000
C		A3		0.0000
C		A4		0.0000
A1		A2		-0.9959
A1		A3		0.0612
A1		A4		0.5819
A2		A3		-0.0952
A2		A4		-0.5355
A3		A4		0.0035

TOTAL		IMAGE COORD	PROJ.CENT	OBJECT COORD	DIS	DIF	PLANE PO	PLANE PARAM	PRINC PO+C
REDUNDANCY	73.999937	67.452010	0.000000	6.547926	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
SIGMA	1.025893	1.019612	1.000000	1.088487	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.169598
VTPV	77.881716	70.123705	0.000000	7.758011	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000

TERMINATION LIMIT NOT REACHED	FINAL OBSERVATIONS
TOTAL TIME OF CALCULATION [min]	0.0
MAXIMUM NORMALIZED RESIDUAL AT:	OBJECT COORDINATES
POINT NU.:	23
NORMALIZED RESIDUAL (NV):	2.34

Pictran - B Sisteminin Bunbil Modulünün çıkış dosyası
(Ek:C) (Nikon 950 7mm zoomda Kalibrasyon Projesinin son iterasyonu)

DATE: 07/18/20 13:45:44

PAGE:

1

PROGRAM SYSTEM PICTRAN-B (VERSION 3.3 (C) TECHNET 1995-1997)

OUTPUT OF MODULE BUNBIL

BUNDLE ADJUSTMENT

TECHNET GMBH
PESTALOZZISTRASSE 8
D-70563 STUTTGART

TEL.: +49711/9018297 FAX.: +49711/9018296

PROJECT: NIKON07

DATE :	07/18/20 13:45:46	PAGE:	18
PROJECT:	NIKON07	BUNBIL-OUTPUT	

CAMERANAME	PRINCIPAL POINT AND FOCAL LENGTH															
	X0	Y0	C	BEOBX0	BEOBY0	BEOBC	VX0	VFVX0	EVX0	GFX0	EKX0	NVX0	GRZWX0	EGKX0	MX0	STAX0
ni7	-0.145654	-0.163644		-0.145654	-0.163644		0.0000	0.0001	0.000						0.0001	2
	-0.163644			-0.163644			0.0000	0.0001	0.000						0.0001	2
	7.099923			7.099923			0.0000	0.0001	0.000						0.0001	2
												UNCONTROLLED				
												UNCONTROLLED				
												UNCONTROLLED				

CAMERANAME	PARAMETERS OF DISTORTION											
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	R00	MA1	MA2	MA3	MA4	MA5
ni7	0.314350D-01	-0.813027D-02	0.432141D-01	0.654960D-02	0.000000D+00	0.000000D+00	0.000000D+00	0.1330D-01	0.2196D-02	0.8911D-02	0.7093D-02	

ni7	0.314350D-01	0.1330D-01	1
	-0.813027D-02	0.2196D-02	1
	0.432141D-01	0.8911D-02	1
	0.654960D-02	0.7093D-02	1
	0.000000D+00	-	0
	0.000000D+00	-	0
	0.000000D+00		

----- CORRELATION BETWEEN INTERIOR ORIENTATION PARAMETERS -----

CAMERANAME	PARAMETER1	PARAMETER2	CORRELATION
ni7	X0	Y0	0.0000
	X0	C	0.0000
	X0	A1	0.0006
	X0	A2	-0.0008
	X0	A3	-0.0002
	X0	A4	-0.0008
	Y0	C	0.0000
	Y0	A1	0.0001
	Y0	A2	-0.0003
	Y0	A3	0.0001
	Y0	A4	0.0000
	C	A1	0.0000
	C	A2	0.0000
	C	A3	0.0000
	C	A4	0.0000
	A1	A2	-0.9908
	A1	A3	-0.2757
	A1	A4	0.0121
	A2	A3	0.2118
	A2	A4	-0.0236
	A3	A4	0.0107

----- CONTROL OF THE ADJUSTMENT -----

TOTAL	IMAGE COORD	PROJ.CENT	OBJECT COORD	DIS	DIF	PLANE PO	PLANE PARAM	PRINC PO+C
REDUNDANCY	176.000010	176.000005	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000005
SIGMA	0.749072	0.749072	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	0.499196
VTPV	98.755128	98.755127	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000001

===== FINAL OBSERVATIONS =====

TERMINATION LIMIT NOT REACHED

TOTAL TIME OF CALCULATION [min] 0.0

MAXIMUM NORMALIZED RESIDUAL AT: IMAGE COORDINATES

SYSTEM NU.: 7

POINT NU.: 5

NORMALIZED RESIDUAL (NV): 2.58

Pictran - B Sisteminin Bunbil Modulünün çıkış dosyası
(Ek:D) (Nikon 950 21mm zoomda Kalibrasyon Projesinin son iterasyonu)

DATE: 07/18/20 12:58:47

PAGE:

1

PROGRAM SYSTEM PICTRAN-B (VERSION 3.3 (C) TECHNET 1995-1997)

OUTPUT OF MODULE BUNBIL

BUNDLE ADJUSTMENT

TECHNET GMBH

PESTALOZZISTRASSE 8

D-70563 STUTTGART

TEL.: +49711/9018297 FAX.: +49711/9018296

PROJECT: NIKON21

----- CORRELATION BETWEEN INTERIOR ORIENTATION PARAMETERS -----

CAMERANAME	PARAMETER1	PARAMETER2	CORRELATION
ni21	X0	Y0	0.0000
	X0	C	0.0000
	X0	A1	0.0010
	X0	A2	-0.0012
	X0	A3	0.0002
	X0	A4	0.0006
	Y0	C	0.0000
	Y0	A1	-0.0003
	Y0	A2	0.0003
	Y0	A3	0.0002
	Y0	A4	-0.0001
	C	A1	0.0000
	C	A2	0.0000
	C	A3	0.0000
	C	A4	0.0000
	A1	A2	-0.9842
	A1	A3	-0.1360
	A1	A4	0.0706
	A2	A3	0.0752
	A2	A4	-0.0673
	A3	A4	0.0037

----- CONTROL OF THE ADJUSTMENT -----

	TOTAL	IMAGE COORD	PROJ.CENT	OBJECT COORD	DIS	DIF	PLANE PO	PLANE PARAM	PRINC PO+C
REDUNDANCY	80.000012	79.999995	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000017
SIGMA	0.495393	0.495393	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	0.628567
VTPV	19.633142	19.633135	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000007

===== FINAL OBSERVATIONS =====

TERMINATION LIMIT NOT REACHED

TOTAL TIME OF CALCULATION [min] 0.0

MAXIMUM NORMALIZED RESIDUAL AT: IMAGE COORDINATES

SYSTEM NU.: 1

POINT NU.: 19

NORMALIZED RESIDUAL (NV): 1.49

ÖZGEÇMİŞ

1977 yılında Kütahya Gediz'de doğdu. İlköğretimi ve orta öğretimini Gediz'de tamamladı. 1994 yılında İ.T.Ü İnşaat Fakültesi Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği bölümünü kazandı. 1998 yılında bu bölümden mezun olarak mühendislik ünvanını elde etti. Halen özel sektörde Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisi olarak görev yapmaktadır.

