

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YAPI ELEMANLARININ DİNAMİK TESTLERİNDE
YER DEĞİŞTİRMELERİN İZLENEBİLMESİ İÇİN
VIDEOGRAMETRİK BİR SİSTEM TASARIMI**

**DOKTORA TEZİ
Y. Müh. Ferruh YILMAZTÜRK**

Anabilim Dalı : JEODEZİ VE FOTOGRAMETRİ MÜHENDİSLİĞİ

Programı : JEODEZİ VE FOTOGRAMETRİ MÜHENDİSLİĞİ

MART 2008

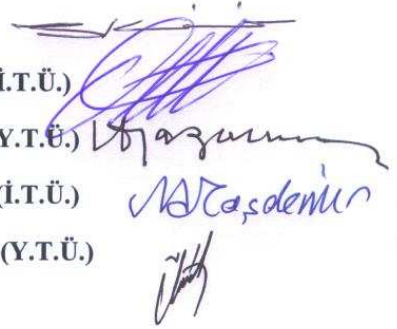
İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YAPI ELEMANLARININ DİNAMİK TESTLERİNDE
YER DEĞİŞTİRMELERİN İZLENEBİLMESİ İÇİN
VİDEOGRAMETRİK BİR SİSTEM TASARIMI**

**DOKTORA TEZİ
Y. Müh. Ferruh YILMAZTÜRK
(501002311)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 9 Ocak 2008
Tezin Savunulduğu Tarih : 21 Mart 2008**

Tez Danışmanı : Prof.Dr. Sıtkı KÜLÜR
Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. M. Orhan ALTAN (İ.T.Ü.)
Prof.Dr. Ahmet YAŞAYAN (Y.T.Ü.)
Prof.Dr. M. Ali TAŞDEMİR (İ.T.Ü.)
Y. Doç.Dr. Ümit GÜMÜŞAY (Y.T.Ü.)



MART 2008

ÖNSÖZ

Yapı elemanlarının dinamik testlerinde yer değiştirmelerin izlenebilmesi için videogrametrik bir sistem tasarımı konulu tez çalışmam süresince birçok kişiden yardımlar aldım. Bu uzun ve meşakkatli süreçte, danışman hocam sayın Prof. Dr. Sıtkı KÜLÜR, yardım ve katkılarını esirgemedi. Kendisine teşekkür ederim. Yine, çalışmam süresince hocam sayın Prof. Dr. Orhan ALTAN'ın desteğini sürekli yanımda hissettim. Kendisine de teşekkür ediyorum.

Deneysel çalışmalarımın büyük bölümü Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Geoteknik Anabilim Dalı Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerin yapılmasında bana yardımcı olan sayın Dr. Niyazi TERZİ'ye ve yine deney aşamasında yardımlarını esirgemeyen sayın Yard. Doç. Dr. B. Özden ÇAĞLAYAN'a ve donanımsal yardımları olan sayın Prof. Dr. Muhittin GÖKMEN'e teşekkürlerimi sunuyorum.

Ve son olarak, Doktora eğitimim süresince bana hep destek olan, güç veren ve sabır gösteren annem Fatmana, eşim Tuğba ve kızım F. Beyza YILMAZTÜRK'e en içten teşekkürlerimi sunuyorum.

Mart 2008

Ferruh YILMAZTÜRK

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	ix
ÖZET	x
SUMMARY	xii
1. GİRİŞ	1
1.1. İnşaat Mühendisliği Malzeme Testlerinde Dijital Fotogrametrinin Kullanım Olanakları	2
1.2. Çalışmanın Amacı	4
1.3. Tezin Yapısı	5
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI	6
2.1. Dijital Yakın Resim Fotogrametrisinin Gelişimi	6
2.2. Yakın Resim Fotogrametrisinin Yapı Mühendisliğindeki Uygulamaları	7
2.2.1. Standart fotogrametrik uygulamalar	7
2.2.2. Dinamik yük uygulamaları	9
2.2.2.1. Fotogrametrik değerlendirmenin sonradan yapıldığı uygulamalar	9
2.2.2.2. Online sistemlerin kullanıldığı uygulamalar	10
3. TEMEL KAVRAMLAR	12
3.1. Fotogrametrinin Matematik Modeli	12
3.2. Ağ Tasarımı	15
3.3. Video Kameraların Temelleri	20
3.3.1. CCD kamera çeşitleri	20
3.3.2. CCD ve algılayıcı teknolojisi	20
3.3.3. Video standartları	21
3.3.4. CCD görüntülerin yakalanması ve iletilmesi	22
3.3.4.1. Analog video sinyali	22
3.3.4.2. FrameGrabber	24
3.3.4.3. IEEE–1394 kamera sistemleri	25
3.4. Videogrametrik Sistemler	26
3.4.1. Gerçek zamanlı sistemlerin özellikleri ve konfigürasyonları	27
3.4.2. Gerçek zamanlı ölçmeler	27
4. SİSTEM TASARIMI	29
4.1. Görüntülerin Elde Edilmesi	29
4.2. Sistem Kalibrasyonu	32

4.2.1. Self kalibrasyon	33
4.2.2. Kaba hata testi	43
4.3. İlk Yaklaşık Değerlerin Hesabı	44
4.3.1. DLT-direkt lineer transformasyon	45
4.3.2. DLT parametrelerinden kamera parametrelerine dönüşüm	48
4.4. Kullanılan Hedef Görüntüler	49
4.5. Sıfır Okuması	50
4.5.1. Tanımlı hedef görüntü için görüntülerin taranması	50
4.5.1.1. Görüntü bölümlenmesi	51
4.5.1.2. Çapraz korelasyon	53
4.5.2. Hedef nokta görüntülerinin resim koordinatlarının hesaplanması	56
4.5.2.1. Ön işleme	56
4.5.2.2. Hedef görüntünün ana görüntü bölgesinin test edilmesi	59
4.5.2.3. Geometrik test	60
4.5.3. Piksel altı konum belirleme	61
4.5.4. Görüntü eşleme- karşılıklı görüntü noktalarını belirleme	64
4.5.4.1. Eşleme belirsizliklerinin çözümü	66
4.5.5. Uzaysal ileriden kestirme dengelemesi	71
4.6. Online Fotogrametrik İşlem Aşaması	74
5. UYGULAMA	78
5.1. Sistemin Ölçme Doğruluğunun Test Edilmesi	79
5.2. İnşaat Mühendisliğinde Örnek Uygulamalar	80
5.2.1. Serbest basınç deneyi	80
5.2.2. Gömülü esnek boruların yük testi deneyleri	84
5.2.3. Çelik kirişin yük testi deneyleri	93
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	95
KAYNAKLAR	98
EKLER	104
ÖZGEÇMİŞ	119

KISALTMALAR

LVDT	: Lineer Variable Differential Transducer
CCD	: Charge Couple Device
CAD	: Computer Aided Designed
WDM	: Windows Driver Model
DLT	: Direct Linear Transform
SBD	: Serbest Basınç Deneyi
KOH	: Karesel Ortalama Hata
ISPRS	: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing
CCIR	: Comite Consultatif International des Radiocommunications

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 3.1	Farklı kameralar kullanılarak elde edilen oransal doğruluklar..... 17
Tablo 4.1	Epipolar düzlem açıları..... 69
Tablo 4.2	Olası noktalara ait üç boyutlu cisim koordinatları..... 70
Tablo 4.3	İzdüşürülen olası noktalara ait piksel koordinatları..... 70
Tablo 5.1	Serbest basınç deneyleri özet bilgisi..... 82
Tablo 5.2	Görüntülerin elde edildiği kamera düzenlemesi..... 85
Tablo 5.3	Fotogrametrik sistem ölçmeleriyle LVDT okumalarının kıyaslanması..... 88
Tablo 5.4	Çelik kirişin yükleme deneyleri özet bilgisi..... 94

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 3.1 : Fotogrametrinin matematik modeli.....	12
Şekil 3.2 : Resim ve piksel koordinat sistemleri.....	14
Şekil 3.3 : Açısal ölçme hatası.....	15
Şekil 3.4 : Kamera yerleştirme sınırlamaları etkisinin gösterimi.....	17
Şekil 3.5 : Kısıtlamalarının bir fonksiyonu olarak görünürlük.....	19
Şekil 3.6 : Tek bir yatay video satırı için analog sinyal.....	23
Şekil 3.7 : RS-170 standardına göre bileşik video sinyali.....	24
Şekil 3.8 : IEEE-1394 Ara yüz kartı.....	25
Şekil 3.9 : Gerçek zamanlı videogrametrik bir uygulama.....	27
Şekil 3.10 : Ölçme çubuğu.....	28
Şekil 4.1 : Görüntü elde etme sistemi.....	30
Şekil 4.2 : Video kameralardan alınan görüntü dizilerinin yazılım görüntüsü	31
Şekil 4.3 : Test alanı.....	32
Şekil 4.4 : Yazılıma ait kamera parametreleri diyalog penceresi.....	33
Şekil 4.5 : Demet dengelemesi kontrol elemanları.....	42
Şekil 4.6 : Tipik bir hedef görüntüsünün üç boyutlu görünümü.....	50
Şekil 4.7 : Hedef görüntüler ve bölümlene matrisi.....	53
Şekil 4.8 : Yazılımda hedef görüntü parametreleri.....	54
Şekil 4.9 : Arama penceresi.....	55
Şekil 4.10 : Artalan eşiklemeden sonra hedef görüntü.....	56
Şekil 4.11 : Hesap penceresi görüntüsü.....	58
Şekil 4.12 : Hesap pencere görüntüsüne ait piksel gri değerleri.....	58
Şekil 4.13 : Eşikleme işlemi sonrası hedef görüntünün gri değerleri.....	59
Şekil 4.14 : Tarama işlemi sonrası yazılım görüntüsü.....	62
Şekil 4.15 : İşaretli hedef noktaların Piksel Altı Konumlarının Hesabı.....	63
Şekil 4.16 : Epipolar Geometri.....	64
Şekil 4.17 : Epipolar plan açısı geometrisi.....	65
Şekil 4.18 : Eşleme parametreleri.....	68
Şekil 4.19 : Üçüncü görüntü kullanılarak eşleme belirsizliğinin çözümü.....	69
Şekil 4.20 : Eşleme işlemi sonrası yazılım görüntüsü.....	71
Şekil 4.21 : Uzaysal İleriden Kestirme Geometrisi.....	71
Şekil 4.22 : Uzaysal ileriden kestirme dengelemesi kontrol elemanları.....	74
Şekil 4.23 : Online ve offline hesap aşamasıyla ilgili hesap sırası.....	76
Şekil 4.24 : Online uygulama diyalog penceresi.....	77
Şekil 4.25 : Zamana bağlı yer değiştirmeler.....	77
Şekil 5.1 : Kamera yerleşim düzeni.....	78
Şekil 5.2 : Hesaplanan ve bilinen koordinatlar arasındaki farklar.....	80
Şekil 5.3 : Serbest basınç deney aleti.....	80
Şekil 5.4 : Serbest basınç deneyi.....	81

Şekil 5.5	: Nokta koordinatlarının ortalama prezisyon değerleri.....	82
Şekil 5.6	: Zemin Numunesi 2'ye ait ölçme sonuçlarının kıyaslanması.....	83
Şekil 5.7	: Zemin Numunesi 3'e ait ölçme sonuçlarının kıyaslanması.....	83
Şekil 5.8	: Zemin Numunesi 6'ya ait ölçme sonuçlarının kıyaslanması.....	83
Şekil 5.9	: Deney kutusu ve esnek boru.....	84
Şekil 5.10	: Çok ortamlı geometrinin düzeltilmesi için radyal öteleme.....	86
Şekil 5.11	: 312 mm çaplı esnek boruya ait ölçme sonuçları karşılaştırması..	89
Şekil 5.12	: 242 mm çaplı esnek boruya ait ölçme sonuçları karşılaştırması..	89
Şekil 5.13	: 110 mm çaplı esnek boruya ait ölçme sonuçları karşılaştırması..	89
Şekil 5.14	: Yer değiştirme vektörlerinin yazılım görüntüsü.....	91
Şekil 5.15	: Nokta koordinatlarının ortalama prezisyon değerleri.....	92
Şekil 5.16	: Camın kırılma etkisinin ölçme sonuçları üzerindeki etkisi.....	92
Şekil 5.17	: Düşey yöndeki yer değiştirmelerin yüke bağlı değişimleri.....	93
Şekil A.1	: Proje ana menüsü.....	104
Şekil A.2	: Proje görüntülerini yükleme diyalog penceresi.....	105
Şekil A.3	: Kamera parametreleri diyalog penceresi.....	105
Şekil A.4	: İç yöneltme aşaması.....	106
Şekil A.5	: Ölçme ana menüsü ve alt menüleri.....	107
Şekil A.6	: Resim ve cisim koordinatları diyalog penceresi.....	107
Şekil A.7	: Yaklaşık değerlerin hesabı diyalog penceresi.....	108
Şekil A.8	: Demet dengelemesi diyalog penceresi.....	108
Şekil A.9	: Sonuçlar ana menüsü ve alt menüleri.....	109

SEMBOL LİSTESİ

X, Y, Z	: Cisim koordinatları
x_p, y_p	: Ana nokta koordinatları
c	: Odak uzaklığı
X_0, Y_0, Z_0	: İzdüşüm merkezinin cisim uzay koordinatları
ω, ϕ, κ	: Dönüklük açıları
r_{ij}	: Dönüklük matrisinin elemanları
k_1, k_2, k_3	: Radyal distorsiyon katsayıları
p_1, p_2	: Teğetsel distorsiyon katsayıları
b_1, b_2	: Ölçek ve büzülme katsayıları
$\Delta x, \Delta y$: Toplam resim koordinat düzeltmeleri
W_i	: Ağırlıklar
$\sigma_{X_i}, \sigma_{Y_i}, \sigma_{Z_i}$: Cisim nokta koordinatlarının standart sapmaları
$\sigma_X, \sigma_Y, \sigma_Z$: Cisim nokta koordinatlarının ortalama prezisyonu
L_1, L_2, L_3, \dots	: DLT parametreleri
r	: Korelasyon katsayısı
u, v	: Piksel koordinatları
x_0, y_0	: Piksel altı ağırlık merkezi koordinatları
v	: Hata vektörü
Φ	: Epipolar düzlem açısı
Q	: Kovaryans matrisi
μ_X, μ_Y, μ_Z	: Cisim nokta koordinatlarının doğruluk ölçütü

YAPI ELEMANLARININ DİNAMİK TESTLERİNDE YER DEĞİŞTİRMELERİN İZLENEBİLMESİ İÇİN VİDEOGRAMETRİK BİR SİSTEM TASARIMI

ÖZET

Farklı yükleme koşulları altında yapı ya da yapı bileşenlerinin test edilmesi ve izlenmesi standart bir mühendislik uygulamasıdır. Geometrik ölçmeler, teorilerin ya da mekanik modellerin doğrulanması için veya test cisminin davranışının belirlenmesi için uygulanır. Bu genellikle statik, yarı statik ya da dinamik kısa ve uzun süreli yük deneyleri ile test objeleri üzerinde gerçekleştirilir. Yük testleri boyunca, genellikle LVDT'ler, extensometreler ve gerilimölçerler tarafından ölçülen deformasyon, gerilme ve yer değiştirme gibi etki ve parametrelerin belirlenmesi amaçlanır. Bu araçlar, yüksek geometrik doğruluk ve güvenilirlikle online sonuçlar verirler. Bu yöntemlerin genel bir dezavantajıysa noktasal ve tek boyutlu ölçme yeteneklerinin olmasıdır. Söz konusu teknikler, cisim yüzeyi üzerindeki çok sayıda ölçme noktasının gerekli olduğu ya da komple yüzey ölçmeleri için uygun değildir.

Bu durumda, dijital fotogrametrik teknikler, güçlü ve esnek bir ölçme sisteminin tasarımı için uygun bir seçenek olarak karşımıza çıkar. Bir test cismi üzerindeki işaretlenmiş noktaların hareketi ve mutlak koordinatlarının ölçmesi ticari fotogrametrik yazılımlar tarafından çözülürken, standart olmayan izleme uygulamaları ya da gerçek zamanlı veya gerçek zamana yakın sonuçlar isteyen uygulamalar için bu amaca yönelik özel yazılım araçlarının geliştirilmesi gerekir.

Bu çalışmada, hem dinamik hem de statik yük testleri süresince yapı bileşeni üzerindeki işaretli hedef noktaların koordinatlarını ölçmek için videogrametrik bir sistem geliştirilmiştir. Sistem, yazılım ve donanım olmak üzere iki bileşenden oluşmaktadır. Borland C++ Builder programlama dili kullanılarak geliştirilen yazılım, görüntü alma, hedeflerin resim koordinatlarını piksel altı doğrulukta ölçme, görüntü eşleme, ek parametrelerle demet dengelemesi ve yer değiştirmeleri ölçme gibi birçok fonksiyon sunar. Sistemin donanım bileşeni ise, üç adet Basler A302fc video kamera, PCI IEEE 1394 arabirim kartı, bağlantı kabloları ve kalibrasyon cismini içermektedir.

Sistemin bütün ölçme işlemi, başlangıç offline aşaması ve online fotogrametrik aşama olmak üzere iki işlem adımından oluşur. Offline fotogrametrik işlem aşaması, görüntü elde etme sistemindeki bütün bileşenlerin kalibrasyon ve yöneltmesi olarak tanımlanan sistem kalibrasyonu ve bir sıfır okumasını içermektedir. Kamera kalibrasyonu, tek kameraların iç geometrisini tanımlayan parametrelerle optik sistem ve diğer kaynaklar tarafından neden olunan sistematik hataları modelleyen diğer parametrelerin belirlenmesi olarak tanımlanır. Kamera yöneltmesi ise 3B uzayda kamera konum ve kamera eksenlerini tanımlamak için dış yöneltme parametrelerinin belirlenmesini içerir. Yöneltme işleminden sonra bütün ölçme işlemi süresince kameraların sabit konumda kalması gerekir. Sıfır okumasında, ilk olarak üzerinde işaretli hedef noktaları bulunan test cisminin görüntüleri elde edilir. Sonra, bütün hedeflerin resim koordinatları piksel altı doğrulukta yoğunluk ağırlıklı merkez

belirleme yöntemiyle otomatik olarak ölçülür. Daha sonra, çoklu görüntülerde karşılıklı noktaları belirlemek için görüntü eşleme işlemi uygulanır. Son olarak eşlenmiş noktaların üç boyutlu koordinatları, uzaysal ileriden kestirme dengelemesiyle kalibrasyon sonuçları kullanılarak hesaplanır.

Online veri işleminin temel amacı geçerli yüklemeye ilgili her bir ölçme oturumunda yer değiştirme değerlerinin belirlenmesidir. Yük testi uygulamasında, online fotogrametrik işlem aşaması aşağıdaki üç işlem adımından oluşur; tanımlanan zaman aralıklarında yada yük uygulamasından sonra yapı elemanının görüntülerinin eşzamanlı olarak alınması; sıfır ölçmesinde etiketlenen hedeflerin resim koordinatlarının piksel altı doğrulukta ölçülmesi ve resim koordinatları ölçülen noktaların 3B koordinatlarının hesaplanmasıdır. Sistem kalibrasyonundan sonra, görüntülerin elde edilmesinden 3B koordinatların hesaplanmasına kadar bütün işlem adımlarını içeren online işlem aşaması gerçek zamana yakın olarak sistem tarafından çözümlenebilmektedir.

Geliştirilen sistemin işlevselliğini göstermek için serbest basınç deneyleri, gömülü esnek borular ve çelik bir kirişin yük testi deneyleri olmak üzere üç farklı uygulama yapılmıştır. Bu deneylerde sistem, LVDT ve ekstonsametre gibi klasik ölçme araçlarıyla birlikte kullanılmış ve elde edilen sonuçlar kıyaslanmıştır.

Yük testleri süresince yapı bileşenlerindeki yer değiştirme ölçmelerini belirlemek için geliştirilen sistemin başarılı bir şekilde kullanılabileceği gösterilmiştir. Sistemin ölçme doğruluğu, test alanının ölçülen ve bilinen XYZ koordinatları arasındaki farkları kullanılarak X ve Z doğrultularında 18, 14 mikron ve Y doğrultulanda da 35 mikron olarak hesaplanmıştır. Bütün deneylerde, önemli bir kalite göstergesi olan resim koordinat düzeltmelerinin KOH değerleriyse 0.02 pikselle 0.06 piksel aralığında belirlenmiştir.

A VIDEOGRAMMETRIC SYSTEM DESIGN FOR MONITORING DISPLACEMENTS OF STRUCTURAL ELEMENTS IN DYNAMIC TESTS

SUMMARY

The testing and monitoring of structures and structural components under different loading conditions are a standard engineering application. Geometrical measurements are performed for the examination of the behavior of test objects and for the verification of theories or mechanical models. This is often realized by static, quasi-static, or dynamic short and long time load experiments on test objects. In these tests, it is demanded to determine parameters and effects such as the changes in shape, load and strain which are commonly measured by LVDTs, extensometers and strain gauges. These devices provide on-line results with a high geometric precision and reliability. A general disadvantage of these techniques, however, is their point wise and only one-dimensional measurement capability. The techniques are generally not suited for tasks requiring a large number of measurement points distributed over an object surface or for complete surface measurements.

In these cases, techniques of digital photogrammetry depict a valuable option for the design of powerful and flexible measurement tools. However, while the measurement of the absolute coordinates and the movement of signalized targets on an object can be solved by commercial software packages, non standard monitoring tasks or applications with real time or near real time requirements will often necessitate the development of customized software tools.

In this study, a videogrammetric system is developed to measure the coordinates of signalized targets on structural components during both dynamic and static load tests. The system consists of two basic components: hardware and software. The software which was developed by using Borland C++ builder programming language presents many functions such as acquisition multi-images sequences, the measurement of image coordinates of the signalized targets with sub-pixel accuracy, image matching, bundle adjustment with additional parameters and computation of displacements. The hardware component of the system comprises of 3 Basler A302fc video cameras, PCI IEEE-1394 interface card, connecting cables and calibration object.

The entire measurement process is realized as a two-stage process which are a preliminary offline phase and online photogrammetric process. Offline photogrammetric processing stage includes system calibration which is defined as the calibration and orientation parameters of all the components involved in the acquisition system and a zero measurement. Camera calibration refers to the determination of the parameters describing the internal geometry of the individual imaging devices and other parameters modeling the systematic errors caused by the optical system and other sources. Camera orientation includes the determination of the parameters of exterior orientation to define the camera station and camera axis in the 3D space. After orientation procedure, it is required that the cameras ought to stable during the entire measurement process. For zero measurement, images of the test object on which the signalized targets are placed are acquired firstly. Then, the

image coordinates of all targets are measured with sub-pixel accuracy automatically via intensity weighted centroiding. Afterward, matching process is implemented to establishment of correspondences in the multi-images. Finally the 3-D coordinates of the matched points are computed by forward ray intersection using the results of the calibration process.

The main aim of on-line data processing was the determination of the displacement values at each measurement epoch associated with the current loading. Online photogrammetric processing stage in loading test application is composed of three steps as follows; the simultaneously acquisition of multi-image sets of the structural element at defined time intervals or after load applications; the measurement of the image coordinates of targets which are labeled in the zero measurement and computation of the 3D coordinates of the points whose image coordinates are measured. After the system calibration, online photogrammetric stage includes the entire process from acquisition multi image sets to computation of 3D object coordinates, are solved by the system at near real time.

Unconfined compression tests, the loading experiments of the buried flexible pipes and a steel beam are three different experiments which are realized to demonstrate the functionality of the developed system. In these experiments, the system was used together with the classical measurement tools such as LVDT and extensometers and obtained results were compared.

This study has been shown that the developed system was successfully employed to determine the displacement measurements in structural components during loading tests. The measurement accuracy of the system was calculated as 18, 14 microns in the X and Z directions and 35 microns in the Y direction using differences between measured and known XYZ coordinates of the test field. In all experiments, the RMS value of image co-ordinate residuals which are important quality indicators was determined between 0.02 and 0.05 pixel.

1. GİRİŞ

Bilgisayar tabanlı veri işleme sistemleri ve özellikle CCD kameralarda sağlanan gelişmelerle, yüksek doğruluk isteyen üç boyutlu endüstriyel ya da mühendislik ölçme uygulamaları için dijital yakın resim fotogrametrisi 1993'lü yıllarda uygulanabilir bir yöntem olmuş ve günümüze kadar birçok farklı çalışmada başarıyla kullanılmıştır.

Farklı ölçme gereksinimlerini karşılamak için değişik fotogrametrik sistem konfigürasyonları geliştirilmiştir. Bu sistemler, iki boyutlu görüntü ölçmelerinden üç boyutlu cisim koordinatlarının hesaplanması temel özellikleri olmasına karşın, doğruluk, otomasyon derecesi ve ölçme esnekliği açısından farklı özellikler gösterirler. Bu özelliklerine bağlı olarak endüstriyel fotogrametrik sistemler, online ve offline sistemler olmak üzere iki kategoriye ayrılmıştır.

Offline terimi, görüntülerin ardışık olarak elde edilmesi ve daha sonra görüntü ölçme ve veri işleme adımlarından oluşan bir ölçme senaryosunu belirtmek için kullanılır. Böylece, bütün cisim nokta koordinatları, tek bir CCD kameradan elde edilen görüntülerle eş zamanlı olarak belirlenebilir. Diğer taraftan gerçek zamanlı dijital yakın resim fotogrametrisi, başlangıç dış yöneltme hesabından sonra senkronize edilmiş kameraların görüntüleri kayıt ettiği anda genel olarak az sayıdaki cisim noktası için uzaysal ileriden kestirmeyi kullanan online bir görüntüleme konfigürasyonundan oluşur. Bu durumda görüntü elde etme işlemi boyunca cismin sabit olmasına gerek yoktur.

Videogrametri ise son yirmi yıldır kullanılan bir terimdir ve video kameralar kullanılarak görüntülerin eş zamanlı olarak kayıt edilmesi ve fotogrametrik sistem ve algoritmalarla kayıt edilen görüntü verisinin işlenmesi olarak tanımlanır. Gerçek zamanlı fotogrametri ya da online sistemlerle gerçek zamanlı videogrametri terimleri eş anlamlı olarak kullanılır. Bu teknikler, dijital görüntünün elde edilmesine bağlıdır

ve dijital görüntülerin doğası nedeniyle veri işlemenin otomasyonu bahsedilen yöntemlerde temel bir sistem özelliği olmuştur.

Fotogrametrik ya da videogrametrik olarak isimlendirilen bir sistemin,

- Üç boyutlu yeniden oluşturma fonksiyonları ile ilgili olarak esneklik,
- Yüksek doğruluk ve güvenilirlik,
- Ölçme ve sonuçları üzerinde kalite kontrolü

şartlarını sağlaması istenir (Grüen, 1997).

Bir bilgisayara bağlı tek bir kameradan oluşan sistem hızlı sonuçlar verebilir ancak gerçek zamanlı değildir. Online sistemler gerçek zamanlı ya da gerçek zamana yakın üç boyutlu cisim nokta konumu verebilen ileri bilgisayar teknolojileri ile birleştirilmiş çoklu video kameralardan oluşur.

Endüstriyel denetim, kalite kontrolü, robotik uygulamalar, navigasyon, tıp ve biyomekanik (insan hareketlerinin belirlenmesi), mühendislik ölçmeleri, mimari ve diğer birçok farklı alanda, dijital yakın resim fotogrametrisinin başarılı ve çeşitli uygulamaları bulunabilir.

Dijital fotogrametrik yöntemlerin yapı mühendisliği ölçme uygulamalarında kullanımı ise çok yaygın değildir. Fakat bu alanda yapılan çalışmalar büyük bir gelişme potansiyeli göstermektedir. Bu çalışmalar, yapı ya da yapı bileşenlerinin test edilmesi ve izlenmesini, baraj, köprü, bina ve diğer yapıların deformasyon ölçülerini içerir.

1.1 İnşaat Mühendisliği Malzeme Testlerinde Dijital Fotogrametrinin Kullanım Olanakları

İnşaat mühendisliği malzeme testlerinde, değişen koşullar altında test cisminin geometrik şeklinin izlenmesi istenir. Geometrik ölçmeler, teorilerin ya da mekanik modellerin doğrulanması için veya test cisminin davranışının belirlenmesi için uygulanır. Bu genellikle statik, yarı statik ya da dinamik kısa ve uzun süreli yük deneyleri ile laboratuvar koşullarında gerçekleştirilir. Yük testleri boyunca,

deformasyon, gerilme ve yer değiştirme gibi etki ve parametrelerin belirlenmesi amaçlanır.

Malzeme testlerinde, yer değiştirme ölçmeleri genel olarak gerilimlerler (*strain gauges*) ya da doğrusal değişimli fark transformatörleri (LVDT- *Lineer Variable Differential Transducer*) gibi klasik lme araçları ile yapılır. Bu lme araçlarının çalışma prensibi, mekanik deformasyon altındaki malzemenin elektriksel direncinin değiştiği ilkesine dayanır. Klasik lme sistemleri yüksek geometrik doğruluk ve güvenilirlikle online sonuçlar verirler. En önemli dezavantajları ise noktasal ve tek boyutlu lme yeteneklerinin olmasıdır.

Söz konusu teknikler, cisim yüzeyi üzerindeki çok sayıda lme noktasının gerekli olduğu ya da komple yüzey ölçmeleri için uygun değildir. Bu durumda, dijital fotogrametrik teknikler, güçlü ve esnek bir lme sisteminin tasarımı için uygun bir seçenek olarak karşımıza çıkar.

Farklı zamanlarda ya da farklı yükleme koşulları altında, yapı üzerinde istenen noktaların 3 boyutlu koordinatları fotogrametrik teknikler kullanılarak hesaplanır ve noktaların hareketinin büyüklüğünü ve yönünü veren yer değiştirmeler, koordinat değişimlerinden belirlenebilir.

Yapı mühendisliği lme uygulamalarında dijital fotogrametrik teknikler kullanmanın bazı avantajları aşağıdaki şekilde sıralanabilir;

- Tam otomasyon gerçekleştirilebilir. Veri toplama gerçek zamanlı görüntü işlemeyi mümkün kılacak kadar hızlı olabilir (Albert ve diğ., 2002).
- Hem statik hem de dinamik ölçmeler mümkündür (Woodhouse ve diğ., 1999).
- İşlem dokunmasızdır yani test edilecek cisim lme aracı tarafından etkilenmez.
- Yapı ya da yapı bileşenleri üzerindeki çok sayıdaki noktanın üç boyutlu deformasyon ya da yer değiştirmeleri eş zamanlı olarak belirlenip, kayıt edilebilir (Albert ve diğ., 2002).
- Yükleme testi uygulamalarında, yapı elemanı kırılmadan önce klasik lme araçlarının zarar görmelerini engellemek için kaldırılmaları gerekir. Oysa

fotogrametrik metotlar, tüm test işlemini baştan sona kayıt eder ve kırılma anına kadar bütün yer değiştirmeleri belirleyebilir.

- Fotogrametrik tekniklerin kullanıldığı test düzeneklerini hazırlamak hızlı ve ekonomiktir. Birçok uygulama için yapı yüzeyi üzerindeki doğal detaylar fotogrametrik analizler için hedef noktası olarak kullanılabilir.
- Görüntüler hassas lokal bilgiler sağlarlar ve daha ileri analizler için bir kaynak olarak hizmet verebilirler. Fotogrametrik değerlendirmenin tekrarı ya da düzeltilmesi her zaman mümkündür.
- Ölçme sonuçları çoğu diğer klasik ölçme metotlarında olduğu gibi belirleyici olmak yerine güçlü bir istatistiksel analize dayalıdır ve hataların komple bir analizi ölçmelerin güvenilirlik aralığını verir.

Özetle, yapı ya da yapı elemanlarının test edilmesi ve izlenmesinde, çok sayıda noktanın yer değiştirmeleri ya da deformasyonları belirlenmek istenirse ya da erişebilirlik, maliyet ve diğer kısıtlayıcı engellerin olması durumunda, dijital yakın resim fotogrametrisi çok etkili bir yöntem olarak kullanılabilir.

1.2 Çalışmanın Amacı

Bir test cismi üzerindeki işaretlenmiş noktaların hareketi ve mutlak koordinatlarının ölçmesi ticari fotogrametrik yazılımlar tarafından çözüldükçe, standart olmayan izleme uygulamaları ya da gerçek zamanlı veya gerçek zamana yakın sonuçlar isteyen uygulamalar için bu amaca yönelik özel yazılım araçlarının geliştirilmesi gerekir (Maas ve Hampel, 2006).

Sunulan tez çalışmasında, yapı elemanlarının dinamik yük testlerinde yer değiştirmelerin izlenmesinde kullanılmak üzere videogrametrik bir sistem geliştirilmesi ve görüntülerin elde edilmesinden 3 boyutlu koordinatların hesaplanmasına kadar bütün işlemlerin tek bir sistem içerisinde ve gerçek zamana yakın çözülmesi amaçlanmıştır.

Tasarlanan sistem, yazılım ve donanım olmak üzere iki bileşenden oluşmaktadır. Borland C++ Builder programlama dili kullanılarak geliştirilen yazılımda, video

kameralarından görüntü alma, tanımlanmış özel hedef için görüntüleri tarama ve bulunan hedefleri piksel altı doğrulukta ölçme, görüntü eşleme, demet dengelemesi, kalibrasyon gibi birçok fonksiyon sunulmuştur.

Sistemin donanım bileşeni ise, üç adet Basler A302fc video kamera, PCI IEEE 1394 arabirim kartı, bağlantı kabloları ve kalibrasyon cismini içermektedir.

1.3 Tezin Yapısı

Dijital fotogrametrik yöntemlerin yapı mühendisliği ölçme uygulamalarında kullanımına ilişkin bir literatür özeti Bölüm 2’de verilecektir. Bölüm3’de, tez çalışmasında kullanılan fotogrametrinin temel prensipleri, videogrametrik sistemler ve video kameralarla ilgili temel bilgiler anlatılacaktır. Sistem kalibrasyonu, görüntülerin elde edilmesinden 3 boyutlu cisim koordinatların hesaplanmasına kadar işlemlerin sistem içerisinde nasıl yapıldığı, kullanılan algoritmalar Bölüm 4’de tanımlanacaktır. Sistemin test edilmesi amacıyla yapılan ve zemin numunelerinin dinamik bir hareket gösterdiği serbest basınç deneyleri ve gömülü esnek borularla çelik kirişin statik yük testi deneyleri Bölüm 5’de anlatılacak ve son olarak Bölüm 6’da sonuçlar ve öneriler verilecektir.

2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

2.1 Dijital Yakın Resim Fotogrametrisinin Gelişimi

Mikro-elektronik ve yarı iletken teknolojisindeki son gelişmelerle yakın resim fotogrametrisi tamamen dijital yöntemlere dönüşmüştür. Grünen (1996)'ya göre, dijital yakın resim fotogrametrisinin tarihi, dört döneme ayrılabilir. 1964'den 1984'e kadar devam eden ilk dönemde, bilim ve teknolojinin farklı alanlarındaki çok sayıda gelişme günümüz sistemlerinin temelini kurmaya yardımcı olmuştur. Bu dönem boyunca geliştirilen teoriler, görüntü işleme algoritmalarını, uzaysal ağ analizlerini (sistemik hataların belirlenmesi, kaba hata testi ve güvenilirlik), CCD kameraları ve en küçük kareler görüntü ve kalıp eşleme algoritmalarını içerir.

1984'den 1988'e kadar devam eden ikinci dönemde, büyük ölçüde bir prototip olarak kalan ve gerçek uygulamalarda çok seyrek kullanılan dijital fotogrametrik ölçme sistemlerinin yavaş fakat kararlı bir şekilde ortaya çıkışı gözlenmiştir. Sistem tasarımı, kalibrasyon ve kullanımı ile ilgili kazanılan tecrübeler, daha ileri araştırma ve geliştirme çalışmaları için çok önemli bir kaynak olmuştur. Bu hızlı gelişen dönem boyunca, ISPRS'in beşinci komisyonunun ismi "*yakın resim fotogrametrisi ve makine görüşü*" olarak yeniden adlandırılmıştır.

1988'den 1992'e kadar devam eden üçüncü dönem, hızla büyüyen ve çeşitlenen uygulamalar ile araştırma çalışmalarını içerir. Bu dönemde, çalışmalar, tam otomatik ve gerçek zamanlı sistemlerin geliştirilmesi üzerine yoğunlaşmış, geniş bir uygulama aralığında yüksek doğruluklu yakın resim fotogrametri ölçmeleri yapılabilmektedir.

1992'den günümüze kadar devam eden son dönem ise, dijital yakın resim fotogrametrisinin durmadan geliştiği bir dönemdir. Kamera teknolojisindeki son gelişmeler online terimini yeniden tanımlamıştır. Akıllı kamera olarak isimlendirilen gelişme ile optik algılayıcı, bir mikroişlemci ve iletişim teknolojisi, tek bir aygıtta

birleştirilmiştir. Görüntü elde etme, işleme ve hedeflerin bulunup ölçülmesi kameranın kendi içerisinde yapılmaktadır (Ganci ve Brown, 2002).

Diğer gelişmeler fotogrametrik işlemin otomasyonundaki enstrümantallerde olmuştur. Bunlar, görüntüler arasındaki karşılıklı noktaların belirlenmesi, kodlanmış hedefler ve dış yöneltme araçlarının kullanımını içerir (Fraser ve Shao, 1997). Kodlanmış hedefler, görüntü işleme teknikleri kullanılarak otomatik olarak bulunur, tanınır ve ölçülür. Dış yöneltme aracı, cisim nokta alanının ön bilgisi gerekmeksizin görüntü yöneltmesini otomatik olarak yapabilir. Böyle araçlar, bilinen rölatif konumları ile görüntülerde otomatik olarak bulunabilen kodlanmış hedefler gibi uygun bir hedef kalıbından oluşur. Eşleme problemi için genel yaklaşım epipolar geometriye dayanır.

2.2 Yakın Resim Fotogrametrisinin Yapı Mühendisliğindeki Uygulamaları

Malzeme testi uygulamalarında, zaman, maliyet ve diğer deneysel sınırlamalar nedeniyle bütün bir yapı yerine genellikle yapı bileşenlerinin testleri yapılmıştır. Görüntülerin elde edilmesinde ve bu görüntülerin fotogrametrik olarak değerlendirilmesinde, test cisminin özelliklerine bağlı olarak farklı sistem ve yöntemler kullanılmıştır.

2.2.1 Standart fotogrametrik uygulamalar

Cismin statik olduğu standart fotogrametri uygulamalarında, görüntüler genellikle en az iki farklı konumdan aynı kamera ile ya da en az iki farklı kamerayla sıralı olarak alınır. Büyük su toplama barajlarının mevsimsel deformasyonlarının izlenmesi (Maas, 1998), beton kirişlerin yük altında iki boyutlu deformasyonlarının belirlenmesi (Psaltis ve Ionnadis, 2006) ve kompleks binaların yapısal sapmalarının ölçmesi (Fraser ve diğ., 2003) gibi farklı yapı ya da yapı elemanlarının test edilmesi ve izlenmesini amaçlayan, görüntülerin tek kamerayla farklı konumlardan alındığı birçok uygulama vardır.

Beton parçaların yaklaşık 5 ay süren kuruma işlemi süresince oluşan deformasyonların ölçülmesi için bir çalışma Niederöst ve Maas (1997) tarafından yapılmıştır. İki konvergent şerit şeklinde düzenlenen 28 görüntülük bir blok, Kodak

DCS 200 (1524x1012 piksel) dijital kamerası ile 6 ölçme oturumunda alınmıştır. İşaretlenmiş noktalar ve kodlanmış hedefler kullanılarak tekrarlanan ölçmelerdeki veri akışı büyük ölçüde otomatikleştirilmiştir. Kamera, her ölçme oturumunda fotogrametrik self kalibrasyon teknikleri kullanılarak kalibre edilmiştir. En büyük boyutu 80 cm olan beton parça üzerinde X,Y ve Z koordinatlarında sırasıyla 3,3 ve 6 mikronluk bir prezisyon elde edilmiştir.

Yılmaztürk ve diğ. (2004), tarafından yapılan benzer bir uygulamada 4x4x22 cm boyutlarındaki taze beton numunenin yaklaşık 24 saat süren kuruma işlemi süresince oluşan deformasyonların belirlenmesi için bir çalışma yapılmıştır. Çalışmada iki adet Basler A302fs video kamera kullanılmış ve kameralar bütün çalışma boyunca sabit konumda kalmıştır. Beton numune yerleştirilmeden önce bir kalibrasyon cisminin görüntüleri elde edilerek dış yöneltme elemanları belirlenmiş ve bu değerler kullanılarak beton numune üzerindeki noktaların 3 boyutlu koordinatlar hesaplanmıştır. Çalışmada ortalama 0,1 mm karesel ortalama konum doğruluğu elde edilmiştir.

Ergün (2002), iki adet zemin numunesi (1x1x0.30 m) üzerinde yüke bağlı deformasyonların fotogrametrik olarak belirlenmesi için bir çalışma yapmıştır. Çalışmada, iki adet Basler A302fs video kamera kullanılmış ve kameralar bütün çalışma boyunca sabit konumda kalmıştır. Kameraların dış yöneltme elemanları deneyin başlangıcında belirlenmiş ve her yükleme aşamasında bu değerler kullanılarak zemin numunesine ait ölçmeler yapılmıştır.

Whiteman ve Lichti (2002) tarafından yapılan çalışmada kontrollü yük altında beton kirişin düşey hareketlerinin belirlenmesi için iki video kameralı (JAI-CV-M50) bir sistem kullanılmıştır. Bütün yük testi boyunca kameralar sabit konumda kalmış ve görüntüler kameranın kendi yazılımıyla istenen yük değişimlerinde sıralı olarak kayıt edilmiştir. Yükleme testi sonrası, sabit ve her ölçme oturumu için beton kiriş üzerindeki yer değiştirmeye konu olan hedef noktaların resim koordinat ölçmeleri ve bütün oturumlara ait görüntü koordinat ölçmelerinin kullanıldığı tek demet dengelemesi Australis 5.02 yazılımı kullanılarak yapılmıştır.

Mills ve diğ. (2001), yük altında yol kaplamasının deformasyonlarının belirlenmesi için bir çalışma yapmıştır. Yükleme, laboratuvar koşullarında, deney için uyarlanmış

bir tanker kullanılarak yapılmıştır. Her ölçme oturumunda, metrik film kamera (Wild P32) ve metrik olmayan dijital kamera (Kodak DCS 200) ile alınan görüntülerden sayısal yükseklik modeli üretmek için hem analitik hem de dijital metotlar kullanılmıştır. Fotogrametrik ölçme sonuçları, LVDT ölçme sonuçları ile karşılaştırılmış ve fotogrametrik değerlendirmenin doğruluğu test edilmiştir.

Beton elemanların yük testi boyunca deformasyonlarının izlenmesi için Tournas ve diğ. (2006) tarafından yapılan çalışmada, görüntülerin sıralı olarak elde edilmesi için düşük maliyetli iki CCD kameralı (Nikon 5700) bir sistem kullanılmış ve fotogrametrik değerlendirme ayrı bir işlem olarak sonradan yapılmıştır.

2.2.2 Dinamik yük uygulamaları

Üç boyutlu yer değiştirmelerin beklendiği ve dinamik sürecin bir parçası olan çoklu noktaların izlenmesinin istendiği dinamik ölçü testi uygulamalarında görüntüler, senkronize edilmiş en az iki video kamerayla eş zamanlı olarak kayıt edilmiştir. Bir ya da iki boyutlu yer değiştirmelerin beklendiği uygulamalarda ise izlenecek yapı boyutlarının da uygun olması durumunda tek kameralı sistemler yeterli olmuştur. Elde edilen görüntülerin fotogrametrik değerlendirmesi ise gerçek zamanlı ya da ayrı bir işlem olarak sonradan yapılmıştır.

2.2.2.1 Fotogrametrik değerlendirmenin sonradan yapıldığı uygulamalar

Farklı yol kaplamalarının dinamik yük altında davranışlarının belirlenmesi için tek kameranın kullanıldığı bir çalışma Hampel ve Maas (2006) tarafından yapılmıştır. Deformasyonun düzleme dik doğrultuda olan bileşeninde çok küçük değerler beklendiği için düzlemdeki iki bileşenin ölçülmesi yeterli görülmüştür. İki boyutlu deformasyon bilgileri görüntü dizilerinin sonradan analizi ile elde edilmiştir. Görüntü düzleminden cisim uzayına dönüşüm, temel olarak bir düşeye çevirme işlemi olarak ele alınmıştır.

Hampel ve Maas (2003) tarafından yapılan farklı bir çalışmada, güçlendirilmiş beton numune üzerindeki çatlakların dinamik yük testi boyunca davranışlarının belirlenebilmesi için senkronize edilmiş iki dijital kameradan (Kodak Megapluş 2.0i) oluşan bir sistem kullanılmıştır. Çatlağın konumu ve kalınlığının ölçülmesi için iki boyutlu ölçüler yeterli olmuş ve kenar belirleme teknikleri kullanılmıştır.

Benning ve diğ. (2004)'nin yaptığı benzer bir çalışmada, yapı elemanlarının ve üzerinde oluşacak çatlakların dinamik yük altındaki davranışlarının belirlenmesi için üç kameralı (Kodak DCS Pro) bir sistem kullanılmıştır. Test objesinin üzerine 5 mm aralıklı düzenli gridler şeklinde hedef işaretleri yapıştırılmış ve görüntüler 10 saniye aralıklarla eş zamanlı olarak elde edilmiştir. Görüntülerin değerlendirilmesi ayrı bir işlem olarak, dijital fotogrametrik sistem PHIDIAS kullanılarak yapılmıştır. Başlangıçta, taşınabilir bir test alanı kullanılarak sistem kalibre edilmiş ve dış yöneltme elemanları belirlenmiştir. Bu değerler sabit tutularak, her ölçme oturumunda yapı elemanı üzerindeki hedef noktalarının üç boyutlu koordinatları uzaysal ileriden kestirmeyle hesaplanmıştır. Çatlaklar, iki ölçü oturumunun farklarından elde edilen yer değiştirmeler kullanılarak elde edilmiştir.

Roncella ve diğ. (2004) tarafından yapılan çalışmada, eğimli bir düzlem boyunca kayan kum numunesinin iki boyutlu düzlemi üzerine yerleştirilmiş hedef noktalarının hareketleri izlenmiştir. Deney 4 m uzunluğunda 50 cm genişliğinde ve 15 cm yüksekliğinde bir kanalet içerisinde gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, üç boyutlu hareketlerin belirlenebilmesi için senkronize edilmiş 2 video kameralı (Basler AF 101) bir sistem kullanılmış ve fotogrametrik değerlendirme ayrı bir işlem olarak sonradan yapılmıştır. 40 noktalı referans ağının koordinatları deney öncesinde fotogrametrik olarak belirlenmiştir. Küre şekilli hedef noktalarının hareketlerini izlemek için izlenen strateji; görüntü işleme operatörleri kullanılarak her görüntüde hedeflerin belirlenmesi, hedeflerin etiketlenmesi ve uzaysal ileriden kestirmeyle cisim koordinatlarının hesabı şeklinde özetlenebilir.

2.2.2.2 Online sistemlerin kullanıldığı uygulamalar

Yakın resim fotogrametrisi kullanılarak çelik kirişlerin termal deformasyonlarının izlenmesi için Fraser ve Riedel (2000) tarafından yapılan bir çalışmada, hem sabit referans noktalarını, hem de konumsal yer değiştirmeye konu olan hedef noktalarının cisim koordinatlarını ölçmek için 3 CCD video kameradan oluşan online bir konfigürasyon kullanılmıştır. Ölçüler, her kiriş için yaklaşık 90 dakika ila iki saat arasında değişen çeliği soğutma işlemi (1100 C'den oda sıcaklığına kadar) süresince 70–80 ölçme oturumunda tamamlanmıştır. Her bir ölçme oturumunda görüntüler sıralı olarak alınmış ve 0,2 saniyelik süre içerisinde bilgisayara kayıt edilmiştir. İlk

40 ölçme oturumu 15 saniye aralıklarla, sonraki oturumlarsa 5–20 dakikalık aralıklarla uygulanmıştır.

Online fotogrametrik veri işleme sistemi, offline dijital yakın resim fotogrametri yazılımı Australis üzerinde bazı değişiklikler yapılarak geliştirilmiştir. Çok oturumlu veri işleme ve bütün görüntü noktalarının otomatik ölçüsünü yapabilmesi için yazılıma bazı ek özellikler eklenmiştir. Geçerli oturumdaki görüntü ölçmelerini yapmak için bir önceki oturumun görüntü ölçüleri kullanıldığı için, otomatik ölçü işlemi kolay bir işlem olmuştur.

Online veri işlemenin temel amacı, geçerli sıcaklık derecesi ile ilgili deformasyon parametrelerinin her ölçme oturumunda belirlenmesidir. Online uygulamanın temel farkı, yalnız son üç resmi kullanarak demet dengelemesi yapmak yerine en son ölçme oturumuna kadar kayıt edilmiş bütün resim koordinat ölçmelerinin demet dengelemesinde kullanılması olmuştur.

Ağır kamyonların neden olduğu yük altındaki köprünün deformasyon ölçüleri için tek video kameralı online bir sistem Albert ve diğ. (2002) tarafından geliştirilmiştir. Video kamera, görüntü düzlemi köprüye paralel olacak şekilde konumlandırılmış ve yer değiştirmeler, obje üzerindeki iki hedefin bilinen uzaklığından belirlenen ölçek faktörü ve resim koordinat ölçmelerinden yararlanılarak hesaplanmıştır.

Woodhouse ve diğ.(1999) farklı yüksek mukavemete sahip beton kolonların yük testlerini yapmak için dört kameralı online bir sistem tasarlamıştır. Sistem, görüntüleri eşzamanlı ve otomatik olarak her yükleme aşamasında uzaktan kontrolle kayıt edip ölçü ve analizlerini yapacak şekilde tasarlanmıştır. Testlerin amacı, yüksek mukavemetli beton kolonlar üzerinde, çelik güçlendirmenin etkisini belirlemektir.

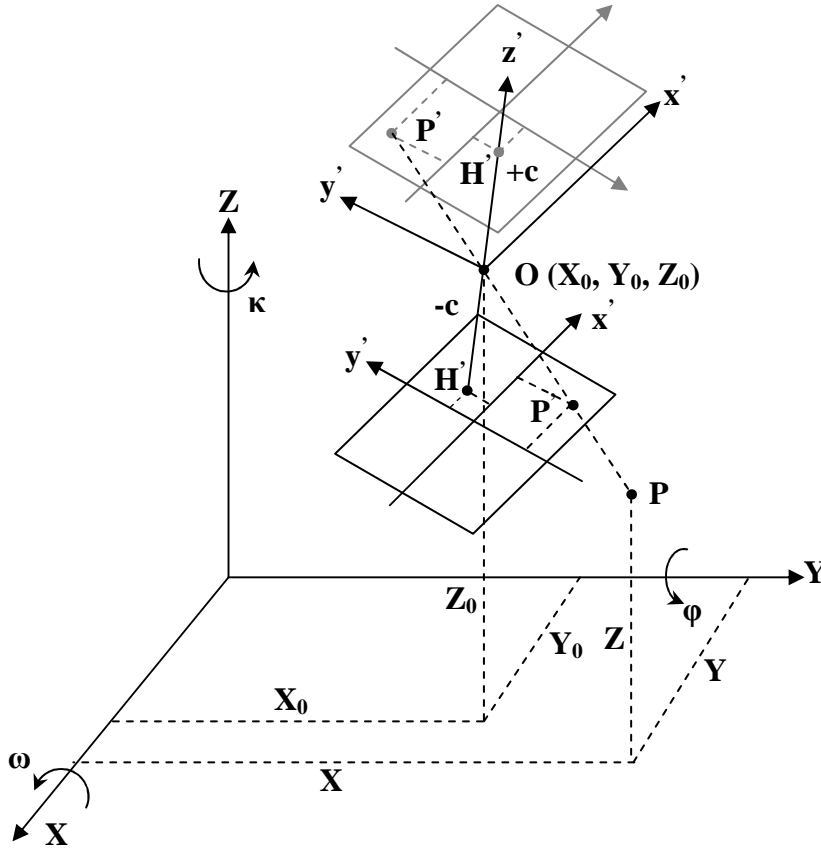
Söz konusu sistemde otomatik dinamik ölçü, hedef izleme algoritması kullanılarak yapılmıştır. Aerodinamik tünelde uzay modeli izlemek için NASA- Langley Araştırma Merkezi tarafından geliştirilen bu algorithmada, her yeni ölçme oturumunda hedefin tahmini konumunu belirlemek için, aynı hedefin önceki üç ölçüsünü kullanan lineer olmayan ekstrapolasyon yöntemi kullanılmıştır (Shortis ve Snow, 1997). Hesaplanan yeni cisim uzayı konumu, görüntülerde hedef arama penceresini konumlandırmak için kullanılır.

3. TEMEL KAVRAMLAR

3.1 Fotogrametrinin Matematik Modeli

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

Doğrusallık koşuluna göre, cisim uzayındaki noktaları gösteren ışınlar resim çekme makinesinin izdüşüm merkezinden geçerek görüntü düzlemine bir doğru boyunca izdüşürülür (Şekil 3.1).



Şekil 3.1: Fotogrametrinin matematik modeli

Matematiksel olarak bu koşul,

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \lambda \cdot R \begin{bmatrix} x' - x_p \\ y' - y_p \\ -c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

eşitliği ile ifade edilir. Bu eşitlikte;

X, Y, Z : P noktasının cisim uzay koordinatlarını,

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

x_p, y_p : Ana nokta koordinatlarını,

c : Kamera sabitini,

M : Görüntü ve cisim uzayı koordinat sistemleri arasındaki dönüşüm matrisini,

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

λ : Her bir ışın için ölçek faktörünü gösterir.

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

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

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\omega \cdot \cos\kappa & -\cos\varphi \cdot \sin\kappa & \sin\varphi \\ \cos\omega \cdot \sin\kappa + \sin\omega \cdot \sin\varphi \cdot \cos\kappa & \cos\omega \cdot \cos\kappa - \sin\omega \cdot \sin\varphi \cdot \sin\kappa & -\sin\omega \cdot \cos\varphi \\ \sin\omega \cdot \sin\kappa - \cos\omega \cdot \sin\varphi \cdot \cos\kappa & \sin\omega \cdot \cos\kappa + \cos\omega \cdot \sin\varphi \cdot \sin\kappa & \cos\omega \cdot \cos\varphi \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

eşitliği ile verilir.

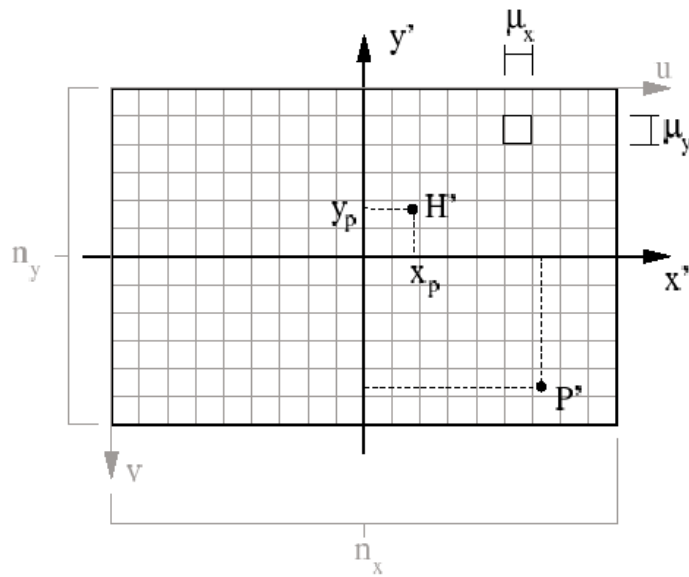
3.1 denklem sistemi fiziksel durumu tanımlayan üç eşitlik üretir. Her bir ışın için ayrı ayrı belirlenmesi gereken λ ölçek katsayısı, birinci ve ikinci eşitlikler üçüncü eşitliğe bölünerek elimine edilirse,

$$x' = x_p - c \cdot \frac{r_{11} \cdot (X - X_0) + r_{21} \cdot (Y - Y_0) + r_{31} \cdot (Z - Z_0)}{r_{13} \cdot (X - X_0) + r_{23} \cdot (Y - Y_0) + r_{33} \cdot (Z - Z_0)} \quad (3.3a)$$

$$y' = y_p - c \cdot \frac{r_{12} \cdot (X - X_0) + r_{22} \cdot (Y - Y_0) + r_{32} \cdot (Z - Z_0)}{r_{13} \cdot (X - X_0) + r_{23} \cdot (Y - Y_0) + r_{33} \cdot (Z - Z_0)} \quad (3.3b)$$

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

Dijital fotogrametride, matematiksel modelin tanımı için son eşitlik görüntü düzlemi üzerindeki metrik koordinat sistemi ile piksel görüntü koordinat sistemi arasındaki dönüşümdür (Şekil 3.2). Bu bir afin dönüşüm olarak tanımlanır (Dappuzo, 2003, Remondio, 2000).



Şekil 3.2: Resim ve piksel koordinat sistemleri

$$x' = \left(u - \frac{\eta_x}{2}\right) \cdot \mu_x \quad (3.4a)$$

$$y' = -\left(v - \frac{\eta_y}{2}\right) \cdot \mu_y \quad (3.4b)$$

Burada,

u, v : Piksel koordinatlarını,

η_x, η_y : Görüntü boyutlarını (piksel olarak),

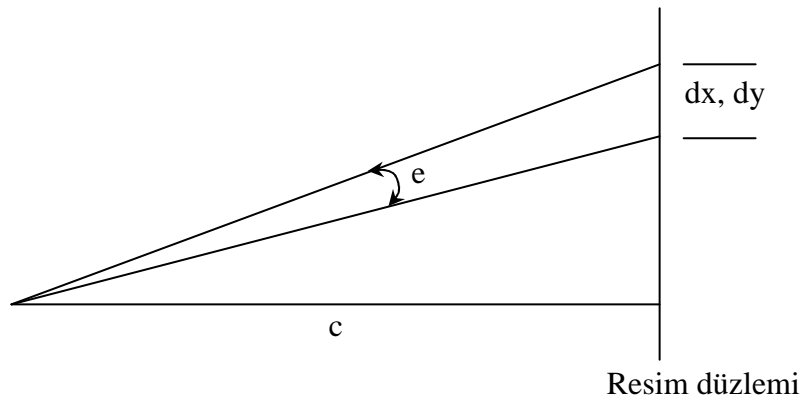
μ_x, μ_y : Piksel boyutlarını gösterir.

3.2 Ağ Tasarımı

Yakın resim fotogrametrisi ve özellikle sınırlı çalışma alanlarındaki karmaşık cisimlerin yüksek presizyonlu fotogrametrik ölçmeleri için ağ tasarımı oldukça önemlidir. Kabul edilen kamera istasyon geometrisi fotogrametrik ölçme işlemlerinin hem doğruluk hem de güvenilirliğini belirleyen en önemli etkendir (Saadatseresht ve diğ., 2004).

Herhangi bir fotogrametrik triyagülasyon sisteminin doğruluğu, açısal ölçme çözünürlüğü, kesişen ışınların geometrisi, kesişen ışınların sayısı ve görüntü ölçeğinin bir fonksiyonuyla belirlenir.

Açısal çözünürlük (e), görüntü koordinat ölçmesinin standart hatasına karşılık gelen açı olarak tanımlanır (Şekil 3.3). Örneğin, 20 mm odak uzaklığına sahip ve bir pikselinin boyutu 8 mikron olan bir CCD kamera ile 1 mikronluk (0.15 piksel) xy ölçme doğruluğu 10 saniyelik açısal ölçme hatasıyla sonuçlanır.



Şekil 3.3: Açısal ölçme hatası

Bir film kamerası için çözünürlük aslında xy sayısallaştırıcısı ya da komparatörünün doğruluğuyla belirlenirken görüntü koordinatlarını belirlemek için kullanılan sayısal görüntü işleme algoritmalarının prezisyonu, CCD kameranın ölçme çözünürlüğünü verir.

Daha uzun odak uzaklığı daha küçük açısal ölçme hatasına neden olur. Fakat daha uzun odak uzaklığı daha küçük alan derinliği anlamına da gelir. Dolayısıyla yeterli görüş alanını elde etmek için odak uzaklığı ve format olarak adlandırılan dijital algılayıcı boyutunun iyi seçilmesi gerekmektedir. Bir mercek sistemi için, algılayıcı boyutu ne kadar büyük olursa görüş alanı da o kadar büyük olacaktır.

Bir konvergent, çok istasyonlu fotogrametrik ağda triyngülasyonun prezisyonunun göstergesi aşağıdaki eşitlikle verilir (Atkinson, 1996).

$$\bar{\sigma}_c = \frac{q}{\sqrt{k}} \sigma S = \bar{\sigma}_c = \frac{q}{\sqrt{k}} \sigma \cdot \frac{d}{f} \quad (3.5)$$

Burada,

$\bar{\sigma}_c$: XYZ koordinat standart hatalarının karesel ortalama hatasını,

d : Kamera istasyonundan cisme olan mesafeyi,

q : Geometri için deneysel bir katsayıyı (güçlü konvergent ağlar için 0.6 değerinden zayıf konvergent konfigürasyonlar için 1' e kadar değerler alır),

k : İstasyon başına görüntü sayısını (örneğin, 6 istasyon ve 24 görüntü durumunda k=4 olur),

S : Ölçek sayısını (ölçek=1/S =f/d ya da odak uzaklığı/cisim mesafesi),

σ : xy resim koordinat ölçmesinin standart hatasını gösterir.

Ağ tasarımında, $\bar{\sigma}_c$, genellikle bilinen hedef fonksiyonudur. Diğer bilinen değerler ise σ , f ve varsayılan q parametreleridir. Bu durumda temel bilinmeyenler S ve k parametreleri olur. Dolayısıyla amaç, k=1ve S için en uygun değerle tasarım amaç fonksiyonunu sağlamak olacaktır. Yeterli doğruluk elde edilemezse, daha çok görüntü alınmalı ve ölçülmelidir.

Günümüz dijital kameraları 2.8–9 mikron aralığında bir piksel boyutuna sahiptir. Genellikle kullanılan hedef ve görüntü ölçme yaklaşımına bağlı olarak resim

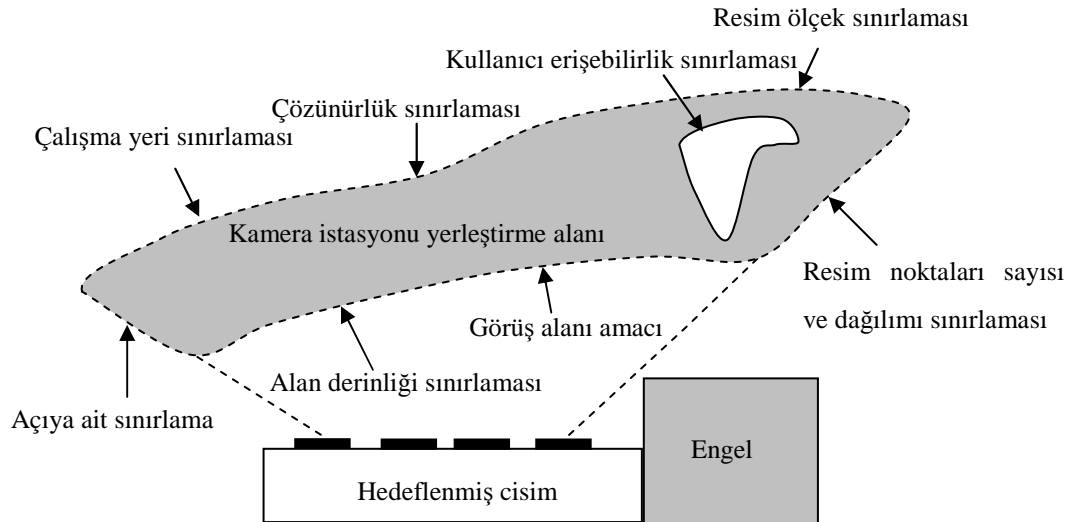
koordinat ölçmesinin standart hatasını (σ) tahmin edebiliriz. Merkez belirleme ya da en küçük kareler kalıp eşlemesiyle iyi kalitede hedeflerin resim koordinat ölçmelerinde σ , 0.03 ila 0.05 piksel aralığında, manüel ölçmeyle 0.3 ila 1 piksel aralığında elde edilir.

35^0 - 50^0 aralığında görüş alanına sahip ve bir pikselinin boyutu 9 mikron olan farklı tip dijital kameralara ait oransal triyagülasyon doğrulukları aşağıdaki tabloyla verilmiştir (Fraser, 2001).

Tablo 3.1: Farklı kameralar kullanılarak elde edilen oransal doğruluklar

Görüntü Çözünürlüğü	Odak uzaklığı	Görüş alanı (Maks.)	Oransal doğruluk ($\sigma=1/30$ için)	Oransal doğruluk ($\sigma=1/3$ için)
4K x 4K	40 mm	48^0	1:200 000	1:20 000
3K x 2K	28 mm	50^0	1:140 000	1:14 000
2K x 2K	20 mm	48^0	1:100 000	1:10 000
1.5K x 1K	18 mm	40^0	1:85 000	1:8500
1K x 1K	14 mm	36^0	1:70 000	1:7000

Bilgisayarlı görüş, algılayıcı yerleştirme olarak da isimlendirilen ağ tasarımı farklı görme sınırlamaları altında görüntü alma geometrisinin optimizasyonunu içerir. Mason (1995) tarafından hazırlanan şekil, algılayıcı yerleştirme sınırlamalarının farklı gruplara ayrılmış sembolik bir gösterimini verir (Şekil 3.4).



Şekil 3.4: Kamera yerleştirme sınırlamaları etkisinin gösterimi

Görüntü ölçek sınırlaması: Triyagülasyonun prezisyonu, görüntü ölçeği ile doğru orantılı olarak değişir. Tasarlanan bir doğruluk toleransı verilmesi durumunda 3.5 eşitliği tekrar düzenlenerek kabul edilebilir maksimum kamera cisim mesafesi (d_{\max}) hesaplanabilir.

$$d_{\max} = \frac{\bar{\sigma}_c f \sqrt{k}}{q \cdot \sigma} \quad (3.6)$$

Çözünürlük sınırlaması: Görüntüdeki cismin çözünürlüğü, istenen doğrulukta (σ) görüntü ölçmesi yapabilmek için yeterli olmalıdır. Bundan, hem yapay hedeflerin kullanıldığı hedef tasarımı hem de görüntü ölçek seçimi etkilenir.

Çalışma alanı sınırlaması: Çalışma alanındaki engeller, ışın kesişim geometrisinin optimizasyonundan daha çok görüntü ölçek seçimine göre kamera istasyonlarının optimal konumlarıyla uyuşmalıdır.

Alan derinliği sınırlaması: Görüntü ölçme doğruluğu özellikle manüel ölçme, mercek odaklanması tarafından önemli derecede etkilenir. Bir görüntüde manüel ölçmeler için alan derinliğiyle ilgili kabul edilmiş tolerans 0.1 mm çapında bir dairedir. Sayısal görüntü ölçme teknikleri kullanıldığı zaman bu limite ilgili esneklik gösterilebilir. Yinede alan derinliği hem görüntü ölçeği hem de algılayıcı konfigürasyon geometrisini sınırlayan bir faktör olarak kalır.

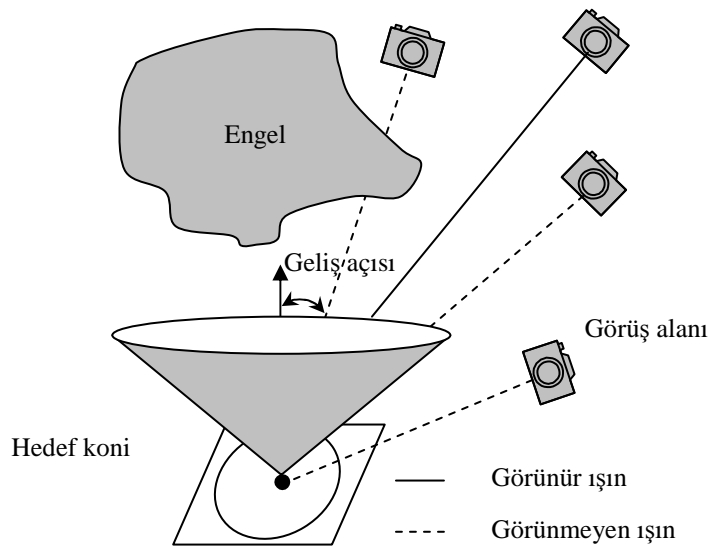
Gelen açı sınırlaması: Şekil 3.5’de gösterilen koninin ekseni hedef yüzeyine diktir. Geliş açısı, yaklaşık olarak dairesel hedefler için 200 ve geri yansıtmalı hedefler içinse 300 olan değer altına düşerse, düzlemsel hedeflerin görüntü ölçmesinin güvenilirliği de azalır. Bu yüzden, ağ tasarımcıları kabul edilebilir geliş açılarını elde etmek için yakınsamanın derecesini belirlemede oldukça zorlanırlar. Farklı hedef özellikleri, malzemeleri ve şekilleri, minimum kabul edilebilir geliş açısını etkiler. Diğer taraftan, küre şekilli hedeflerin geliş açısı sınırlaması yoktur. Düzleme yakın cisimler için, alan derinliği sınırlaması, minimum geliş açısından genellikle daha kısıtlayıcıdır.

Görüntü noktaları sayısı ve dağılımı sınırlaması: Dış yöneltmeyi belirlemek için her bir görüntüde yeterli sayıda olmak şartıyla bir ağ içerisindeki noktaların

sayısının, cisim nokta triyagölasyonunun doğruluğu üzerinde küçük bir etkisi olur. Diğer taraftan, fazladan hedef noktaları kullanılarak serbestlik derecesi ve dolayısıyla fotogrametrik yönelmenin istatistiksel güvenilirliği artırılabilir. Görüntü noktalarının sayısı ve dağılımı, self kalibrasyonla belirlenen kamera kalibrasyon parametrelerinin doğruluğunu önemli ölçüde etkiler.

Görüş alanı: Her bir kamera istasyonu görüş alanında bulunan bütün cisim hedef noktalarını elde etmek genellikle mümkün olmasa da görüş alanı sınırlaması oldukça yararlıdır. Bu tasarımı kolaylaştırabilir ve triyagölasyon doğruluğunun homojenliğini ve ekonomiyi arttırabilir. Bir cismin üç boyutlu özelliğinden dolayı her bir pozlandırmada hedeflerin önemli bir kısmının görüntülenmesinin mümkün olmadığı durumlarda tasarım problemi iki adımda çözülebilir. Deneysel ağlar, hedeflerin uygun alt gruplarıyla kurulur ve sonra ekstra kamera istasyonları ve/veya hedefler yeterli geometrik güçle birlikte bu ağları birbirlerine bağlamak için kullanılır.

Görünürlük: Çalışma alanındaki engeller kameranın görüş alanı içerisindeki ilgili tüm noktaların görüntülenmesine mani olur. Görünürlük sınırlaması, bir cisim noktasındaki triyagölasyon doğruluğunu iki şekilde etkileyebilir. Kesişim geometrisinin gücü, eğer ışınların sayısı esas deneysel ağıncından daha aşağı düşerse tehlikeye girebilir. Yoksa standart hata üzerindeki etki \sqrt{k} faktörüne göre olacaktır.



Şekil 3.5: Kısıtlamalarının bir fonksiyonu olarak görünürlük

3.3 Video Kameraların Temelleri

Bir makine görme sistemi tasarımında kamera seçimi en temel adımlardan biridir. Neyse ki, günümüz makine görme kameraları oldukça gelişmiştir ve zamanlamanın tam kontrolü, yüksek hızda pozlama, duyarlık ve kompaktlık gibi birçok farklı özellik sunarlar.

Video kameraların amacı, bir mercek sistemi yardımıyla algılayıcıya iz düşürülen görüntüleri depolamak, analiz ve/veya göstermek için bilgiyi yorumlayabilen bir makineye aktarmaktır. Bu, görüntüleri göstermek için basit bir monitör, görüntüleri depolamak için bant kayıt sistemleri ya da görüntüleri gösteren, depolayan ve işleyen bilgisayar sistemleri biçiminde olabilir.

3.3.1 CCD kamera çeşitleri

CCD Kameraların alan taramalı ve satır taramalı olmak üzere iki tipi vardır. Satır tarama kavramı bir cisim üzerinden lineer bir hareketle geçen doğru algılayıcı (lineer dizi) kullanılarak görüntünün oluşturulmasını ifade eder. Lineer diziler bir anı taramak için kullanılır ve zamana bağımlı geometri ortaya koyar.

Alan tarama terimi ise tek bir çizgi yerine bir alanı kaplayan kamera algılayıcısından bahseder. Alan taramalı kamera bir alanın görüntüsü üretir. Genişliğin yüksekliğe oranını klasik olarak 4:3 kabul eden yayın formatları, vidikon tüpler ve yayın özelliklerinden kalma bir alışkanlık olarak hala kullanılmaktadır.

Modern kamera algılayıcıları ışık fotonlarını elektriksel yüke çevirmek için ışığa duyarlı materyalleri kullanan CCD'lerden yapılmıştır. Işığa duyarlı diyotların binlercesi matris dizisi içerisinde çok doğru bir şekilde konumlandırılır ve her pikseldeki yük (elektronlar) bir video sinyaline dönüştürülür.

3.3.2 CCD ve algılayıcı teknolojisi

Piksel konum belirleme, algılayıcı özellikleri ile birlikte genel olarak CCD'nin tipi tarafından tanımlanır. CCD'nin temel parametreleri doluluk oranı, kapasite, poz süresi ve piksel boyutudur.

Doluluk oranı fiilen ışığa duyarlı piksel alanının yüzdesi olarak ifade edilir. İdeal durum aktif piksellerin algılayıcı alanının %100'nü kapladığı durumdur. Bununla beraber, okuma yazmacı (readout register- algılayıcı üzerinde yüklerin kayıt edildiği yer) ve anti-taşma (anti-blooming- parlaklığın taşarak diğer piksellere sıçramasının engellenmesi) gibi devreler bu oranı bazen %30'lara kadar düşürebilir. Bu da daha düşük duyarlık ve örtüşme etkileriyle sonuçlanır. Bu etkileri gidermek için, düşük doluluk oranına sahip çoğu algılayıcı, doluluk oranını artırarak her pikseli kapsayacak ince mercekler kullanılır.

CCD pikselin diğer bir önemli parametresi ise kapasitesidir. Bu, pikselin tutabildiği yükün miktarının bir ölçüsüdür ve algılayıcının dinamik aralığını verir. Genel olarak, daha büyük piksel ve doluluk oranı CCD'yi daha duyarlı ve daha yüksek kapasiteli yapar. Kapasite, genellikle CCD kameranın dinamik alanını tanımlamada sınırlayıcı bir faktördür.

Farklı CCD tipleri vardır. Temel farklar CCD piksel yüklerinin dönüştürülmesi yönteminde. İnterline transfer tipi CCD'ler en yaygın olanlardır ve genellikle fotodiodlar kullanılır. Işıklandırma periyodu boyunca algılayıcı elemanlarının kolonlarında toplanan yükler transfer elemanlarının kolonlarına kaydırılır ve son olarak ta satır satır yatay okuma kayıtçalarına iletilir. Bu tip CCD'lerin en önemli avantajı hızlı pozlamadır. Daha düşük bir doluluk oranına ve görüntü kalitesini bozan daha düşük bir kapasiteye (dinamik aralık) sahiptirler.

Frame transfer tipi CCD'ler aktif piksel alanından ayrı ışığı depolama alanına sahiptir. Dolayısıyla, daha büyük doluluk oranı ve daha yüksek kapasiteye sahip olurlar.

3.3.3 Video standartları

Kameradan TV monitörleri, video framegrabber'leri gibi diğer aygıtlara video sinyalini iletmek için farklı standartlar kullanılır.

Her standart bir görüntüdeki piksellerin sayısı/yöneltmesi ve video sinyalinin zamanlamasını tanımlar. Avrupa'daki en genel standart CCIR ve Pal standartlarıdır. Kuzey Amerika'da ise RS-170 ve NTSC standartları kullanılır. CCIR ve RS-170 tek renkli videolar, PAL ve NTSC ise renkli videolar için kullanılan standarttır.

Interlace tarama, temel olarak mevcut sinyal bant genişliğinde görüntü kalitesini iyileştirmek için televizyon yayın standardının bir parçası olarak geliştirilmiştir.

CCIR ve PAL formatlarında, görüntüler saniyede 25 frame oranında yakalanır. Interlace taramalı video görüntüsü, tekli alan (tek sayılı yatay video satırları) ve çiftli alan (çift sayılı yatay video satırları) olmak üzere iki yatay alandan oluşur. Interlace tarama terimi, önce tekli alan daha sonra çiftli alan olmak üzere bu yatay alanların sıralı olarak taranmasından bahseder. Saniyede 25 frame yakalanabilmesi için alanların saniyede 50 hızında taranması gereklidir.

Çoğu makine görüşü uygulamasında, cisimler genellikle hızlı hareket ederler. Interlace taramalı kameraları kullanıldığı zaman yakalanan iki yatay alan arasında cisim hareket eder ve görüntü iki defa pozlanmış gibi bulanık olur. Tam düzey çözünürlüğün gerekli olduğu hareket eden cisim uygulamalarında, progressive taramalı kameralar kullanılır.

Progressive taramalı kameralar görüntüyü ya satır satır tarayarak ya da tam frame görüntü olarak dönüştürüp yakalayabilir. Elde edilen görüntü karesinin her biri bir alandan oluşur ve yarım yükseklikli ve interlaced modunun iki katı bir güncelleştirme oranıyla görüntü elde edilir.

Hızlı hareket eden cisimlerin görüntüleri progressive taramalı kameralar kullanıldığında bile genellikle bulanık olur. Bu, pozlandırma süresi olarak bilinen zaman periyodu boyunca video görüntüsü toplandığı için olur. Bulanıklığı düşürmek için pozlandırma süresi obtüratör yardımıyla kısaltılabilir. Obtüratör hızı arttırıldığı için, poz süresi kısaltılarak cisim dondurulur. Daha küçük pozlandırma süresi algılayıcı üzerine düşen ışığı azalttığı için daha düşük duyarlık anlamına gelmesine rağmen çoğu makine görme uygulaması bu tekniği kullanır (Dappuzo, 2003, Atkinson, 1996).

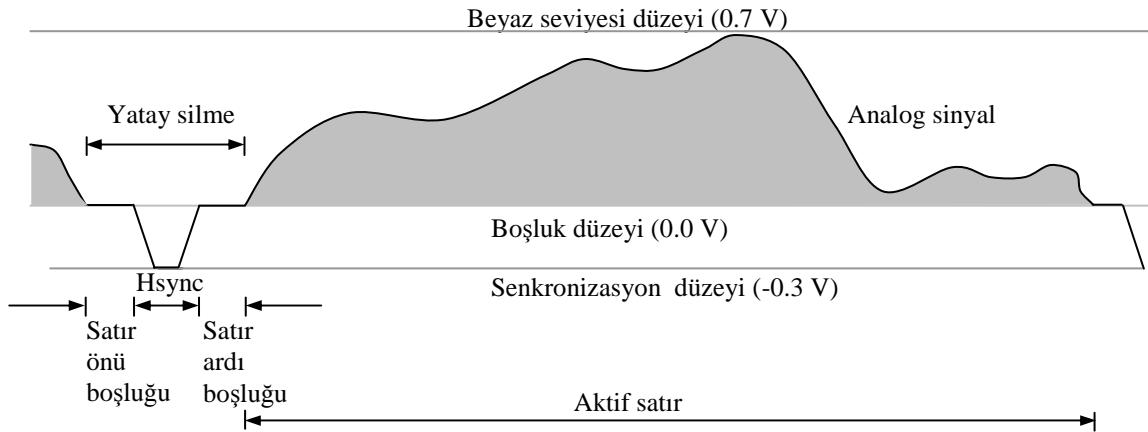
3.3.4 CCD görüntülerinin yakalanması ve iletilmesi

3.3.4.1 Analog video sinyali

Video kameralardan görüntülerin iletimi televizyon yayın endüstrisi tarafından kullanılan analog video sinyaliyle yönetilir. Adından anlaşılacağı üzere analog video

sinyali koaksiyal kablo ya da hava yoluyla radyo frekansında yayılan sürekli bir sinyaldir.

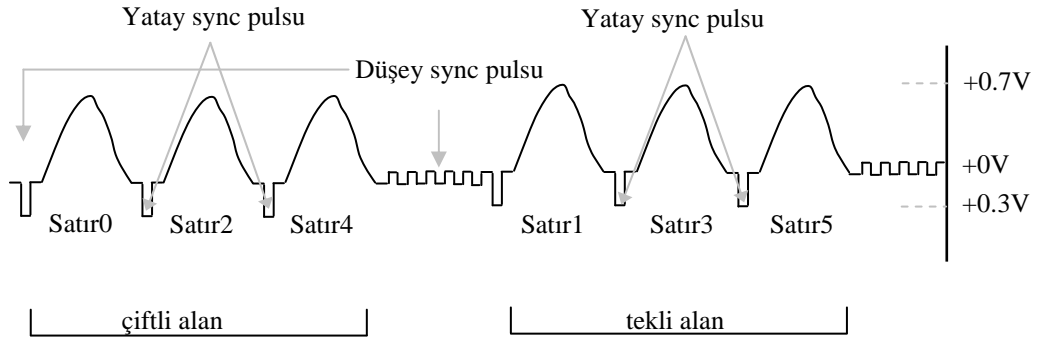
Bir analog video sinyali, monitörün sinyalle senkronize kalmasını sağlayan zaman bilgisi ile her satır için yoğunluk bilgisi içeren düşük voltajlı bir sinyalden oluşur (Şekil 3.6). Tek bir yatay video satırı için sinyal, aşağıdaki gibi, yatay senkronizasyon sinyali, satır ardı boşluğu, aktif piksel bölgesi ve satır önu boşluğunu içerir.



Şekil 3.6: Tek bir yatay video satırı için analog sinyal

Yatay senkronizasyon pulsu (hsync) her bir yeni video satırının başlangıcını belirler. Boşluk düzeyi görüntüde siyaha eşit sıfır voltaj düzeyini gösterir. Senkronizasyon minimumu 0.3 voltken beyaz seviyesi düzeyi 0.7 volta eşit olur. Analog sinyal, kameranın elektronik bileşenleri kenetleme (clamping) ve kırpma (clipping) devreleri tarafından voltajların beyazla siyah aralığında kaydırılır.

Video sinyalin bir diğer bileşeni de düşey senkronizasyon pulsudur (vsync). Bu aslında düşey tekrarlar için monitörü sinyalleyen alanlar arasında bulunan pulsların bir serisidir ve yeni alanı tarama için hazırlar. Yeni algılayıcı teknolojileri ek pulsların bazılarında olan ihtiyacı elimine etmesine rağmen, bu pulslar televizyon yayınlarının ilk zamanlarda tanımlanmıştır ve o zamandan beri standartların bir parçası olarak kullanılmaktadır. Düşey senkronizasyon pulsları içeren birleşik bir RS-170 interlaced sinyali aşağıda gösterilmiştir (Şekil 3.7). Basitleştirme için 6 satırlı bir frame kullanılmıştır (Atkinson, 1996).



Şekil 3.7: RS-170 standardına göre bileşik video sinyali

Kameraların hepsinin yatay ve düşey senkronizasyon puslarının birbiriyle senkronize olması için çoğu makine görme video kamerası harici olarak senkronize edilir. Bu işlem için teknik terim harici senkronizasyon ya da genlock olarak bilinir. En basit metot bir kameranın video çıktısını sonraki kameranın senkronizasyon girişi olarak kullanan bir senkronizasyon zinciri oluşturmaktır. Bununla beraber, senkronizasyonun çok doğru olması gerekiyorsa, ekstra bir senkronizasyon üretici kullanılmalıdır.

3.3.4.2 Framegrabber

Framegrabber'ler kameranın analog video sinyalini okur ve onu dijital görüntü dizisine dönüştürür. Framegrabber'de ilk olarak yatay ve düşey senkronizasyon pulsarı, yeni satır ve yeni alanın başlangıcını gösteren gelen video sinyalinden ayrılır. Bu işlem biraz zaman (genellikle birkaç frame) alabilir, bununla beraber kameraların hepsinin bütün yatay ve düşey senkronizasyon sinyalleri framegrabber'le senkronize olduğu için video kaynaklarının dıştan senkronizasyonu gerekli olmayabilir. Elde edilen satır ve frame'lerin stabil senkronizasyonu yapıldığında bir görüntü elde etme işleminin sonraki adımı piksellerin üretilmesiyle ilgilidir. Video standartlarına göre, framegrabber'in örnekle ve tut bileşeni, satır başına 767 pikseli sayısallaştırarak en az bir tam çerçeveyi depolayan görüntü geçici belleğinde (CCIR için) toplar. Bilgisayar bağlantı bant genişliği, bilgisayarın ana hafızasına sayısal video veri akışını kayıpsız iletecek kadar büyükse kullanılır (Dappuzo, 2003).

3.3.4.3 IEEE–1394 (FireWire) kamera sistemleri

IEEE–1394, Apple tarafından geliştirilen, bilgisayara çevre birimlerin bağlanmasında kullanılan yüksek hızlı bir ara yüz bağlantısıdır. IEEE–1394, firewire olarak da bilinir. Saniyede 400 Mbit hızında veri transferini destekler.

Bazı ana kartlarda onboard olarak bulunur. Eğer yoksa firewire içeren bir PCI kartla bilgisayara firewire portu eklenebilir (Şekil 3.8).



Şekil 3.8: IEEE–1394 ara yüz kartı

Görüntünün güvenilir iletimini ve kamera parametreleri üzerinde yazılım kontrolünü sağlayan IEEE–1394 ara yüzü yoluyla bilgisayar kameralarla dijital olarak iletişim kurar.

Genellikle, pozlama zamanı ve yük okuma IEEE 1394 ara yüzü yoluyla kameranın kontrol yazmaçlarına iletilen değerlerle kontrol edilir. Komut yazmaçları pozlama zamanını ve frame oranını ayarlamak için kullanılır. Tek frame, çoklu frame ve sürekli frame yakalamak için kamerayı ayarlayan başka komut yazmaçları da vardır.

Pozlama zamanı harici olarak oluşturulan bir tetikleme sinyali yoluyla da kontrol edilebilir. Harici sinyal pozlamanın periyodik ya da periyodik olmayan başlangıcını belirler. Pozlama başlangıcı harici sinyalle kontrol edildiğinde, tetikleme sinyali düştüğü zaman pozlama başlar ve önceden programlanan zaman periyodu boyunca devam eder. Programlanan pozlama zamanı sona erdiğinde toplanan yükler okunur.

3.4 Videogrametrik Sistemler

Bilgisayarlı görüş, makine görüş, robot görüş, dijital yakın resim fotogrametrisi ve videogrametri, çok benzer teknik ve uygulamalar oldukları için sıkça eş anlamlı olarak kullanılmaktadır. Bilgisayarlı görme, görüntü ve içeriğinin analizlerinin teori ve temel algoritmik konuları ile ilgilenirken, makine görme, algılayıcı modelleri ve sistem yönünü (donanımı içeren) düşünür. Robot görme bir bakıma makine görmenin bir alt sınıfıdır ve zaman sınırlamalı çözümler için makine görme prensiplerinden yararlanır. Fotogrametri ve videogrametri ise video kameralarla elde edilen çoklu görüntülerden hassas ve güvenilir üç boyutlu bilgi elde etmeyi amaçlar (Grüen, 97).

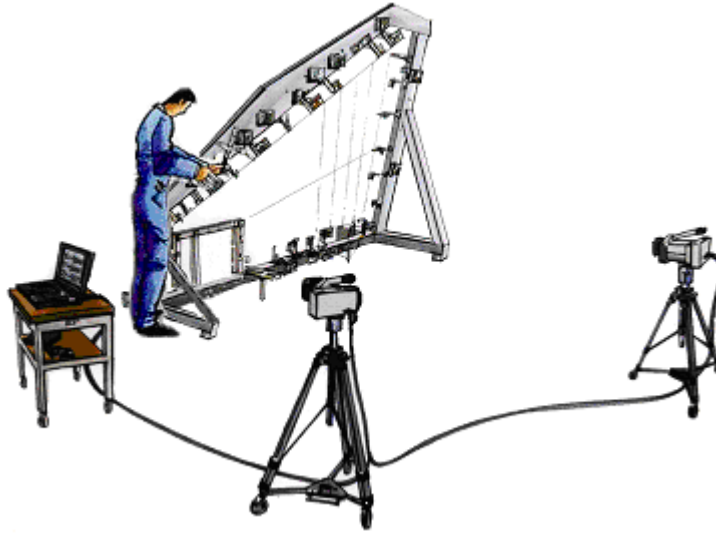
Hem fotogrametri hem de makine görmenin alt kategorisi olan videogrametri görüntü elde etmek için, CCD kameralar, video kayıt üniteleri ve görüntü yakalama kartları (framegrabber) gibi video bileşenlerini kullanır. Videogrametri terimi, ölçme amaçları için video kameraların kullanımını vurgulamaktadır.

Videogrametrik ya da online sistemler çok sayıda algılayıcıdan oluşan bir ağ konfigürasyonunda senkronize edilmiş CCD kameralar kullanarak eş zamanlı veri kaydı yaparlar. Böyle konfigürasyonlar, zaman sınırlamalı ve hatta gerçek zamanlı fotogrametrik triyagülasyonla birleştirildiği zaman, geniş bir uygulama arlığına sahip üç boyutlu ölçme uygulamaları için çözümler üretir. Konum belirleme ve izleme, boyutsal kontrol, CAD, bir cisim ve onun CAD modeli arasındaki sapmaların belirlenmesi, tersine mühendislik, dinamik olayların izlenmesi, deformasyon ölçmeleri, parça tanıma, birleştirme, sıralama gibi üretim uygulamalarında kalite kontrolü ve yüzey davranışlarının belirlenmesi bu uygulamalara örnek olarak verilebilir (McGlone, 2004, Atkinson, 1996).

Gerçek zaman terimiyle ilgili ise genel kabul görmüş bir tanım yoktur. Bilgisayar biliminde gerçek zaman, sonuç elde etmek için sisteme giren verinin işlenmesinin neredeyse veriyi üreten olayla eşzamanlı olması olarak anlaşılır. Görüntü elde etme ve onun işlenmesi açısından ise, işlemin 1/30 ya da 1/25 saniye olan bir video çeviriminin içinde olması gerektiği şeklinde yorumlanır. Gerçek zaman performansı, verinin miktarı yanında, verinin karmaşıklığına, gerekli sonuçların yapısına, kullanılan donanım ve algoritmalara da bağlıdır (McGlone, 2004) .

3.4.1 Gerçek zamanlı sistemlerin özellikleri ve konfigürasyonları

Endüstriyel ölçmelerin uygulama alanları çok geniş olduğu için farklı gerçek zamanlı sistemler geliştirilmiştir. Bu sistemler, bazı temel konfigürasyonları ve fonksiyonel bileşenleri paylaşırlar. Bir çalışma ünitesi düzenlemesi iki ya da daha fazla senkronize edilmiş dijital görüntüleme algılayıcısından oluşur (Şekil 3.9). Kameraların bindirmeli görüş alanı tarafından tanımlanan alan ölçme hacmi olarak isimlendirilir. Algılayıcılar, hızlı bir dijital arabirim, eşleme hattı ve elektriksel gücü içeren kablolar tarafından ana bilgisayara bağlanırlar.



Şekil 3.9: Gerçek zamanlı videogrametrik bir uygulama

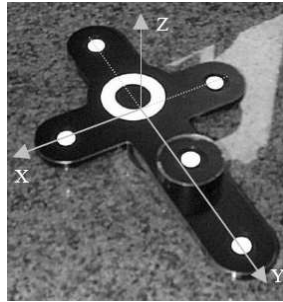
Ticari olarak mevcut gerçek zamanlı sistemlerin iki temel tipi vardır. İlk sistem, özel amaçlı ölçmelerin yapılabilmesi için tasarlanmıştır. Ölçülecek cismin çalışma ünitesine taşınması ve ölçme hacmi içerisine yerleştirilmesi gerekir. İkinci sistem ise kolaylıkla taşınarak ölçülecek cismin çevresine yerleştirilebilir.

3.4.2 Gerçek zamanlı ölçmeler

Genellikle online sistemler için iki tür ölçme uygulaması vardır. Birinci tür uygulamada, kinematik işlemin bir parçası olan çoklu noktaların izlenmesi istenir. Gerçek zamanlı ölçmeler dış yöneltmeden sonra yapılır. Ölçülecek cisim yansıtımlı hedeflerle ya da yapısal ışık yansıtımı ile ışıklandırılarak üzerinde işaretli noktalar oluşturulur. Bütün algılayıcılar, üzerinde işaretli noktalar bulunan cismin görüntülerini eşzamanlı olarak alır. Hedefler otomatik olarak bulunur ve her

görüntüde ölçülür. Eşleme, görüntüler arasındaki karşılıklı noktaları bulmak için yapılır. Sonuçta, bütün hedeflerin üç boyutlu koordinatları sabit kamera pozisyonundan uzaysal ileriden kestirmeyle hesaplanabilir.

İkinci tür uygulamada ise, tek noktalar hedef işaretleri kullanılmadan ölçülür. Enteraktif ölçme için, kenar, delik ve yüzeyler gibi üzerine hedef yapıştırılmayan detaylar için elde taşınan ölçme çubukları kullanılır. Çubuklar ayrıca kamera görüşünde gizli kalan detayların ölçümü içinde kullanışlıdır. Ölçme çubuklarını kullanan sistemler taşınabilir bir dijital koordinat ölçme makinesi gibi çalışır. Bir ölçme çubuğu, ölçme ucu ve üzerinde hedefler olan artı ya da T şekilli araçlardır (Şekil 3.10). Hedefler çubuğun iç tarafına ve uçlarına yerleştirilir. Hedefler ve ölçme ucu arasındaki geometrik ilişki kalibrasyonla hassas olarak belirlenmiştir. Ölçme çubuğunun ucu ilgili nokta üzerine tutulur ve bütün kameralar eşzamanlı olarak çubuğun görüntülerini alır. Üç boyutlu hedef koordinatları ileriden kestirmeyle belirlenir ve ölçme ucunun konumu onun hedeflerle bilinen geometrik ilişkisinden hesaplanır (Atkinson, 1996, McGlone, 2004).



Şekil 3.10: Ölçme çubuğu

4. SİSTEM TASARIMI

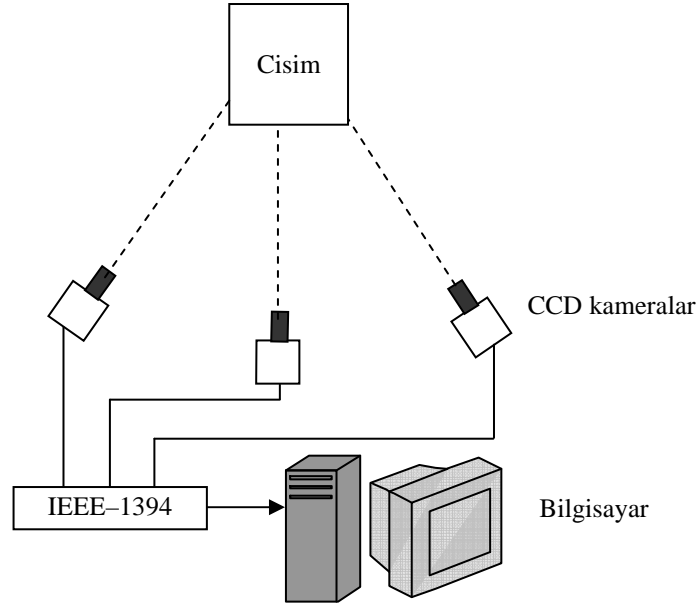
Geliştirilen sistem yazılım ve donanım olmak üzere iki bileşenden oluşmaktadır. Donanım bileşeni kısaca görüntü elde etme sistemini, yazılım bileşeni de elde edilen görüntü verisinin fotogrametrik olarak değerlendirilmesini içerir. Görüntülerin elde edilmesinden 3 boyutlu cisim koordinatların hesaplanmasına kadar işlemlerin sistem içerisinde nasıl yapıldığı bu bölümde anlatılacaktır.

4.1 Görüntülerin Elde Edilmesi

Kalite ve performans açısından, çok görüntülü video dizilerinin elde edilmesi için en iyi görüntü elde etme aracı, alan taramalı CCD kameralardır. Alan taramalı kameralar tam bir görüntü karesini (frame) hareket eden cisimlerle bile algılayıcı tam çözünürlüğünde elde edebilir. Ancak bu tip kameralar pahalıdır ve özel framegrabber'ler isteyebilir. Kullanılan kamera sayısına bağlı olarak bir ya da daha fazla framegrabber, çoklu görüntü dizilerinin sayısallaştırılmasında kullanılır.

Son zamanlarda geliştirilen alan taramalı kameralar ise IEEE-1394 portu kullanmaktadır. Geliştirilen sistemde de Framegrabber gerektirmeyen bu tür kameralar kullanılmıştır. Kamera-bilgisayar bağlantısını sağlayan IEEE-1394 ara yüzü, bazı kamera parametrelerinin yazılımla kontrolü kadar görüntülerin dijital iletimine de izin verir. Şekil 4.1 alan taramalı CCD kameralar kullanılarak oluşturulan görüntü elde etme sistemini göstermektedir.

Yazılımda CCD kameralara bağlanmak ve görüntü verisini elde etmek için DirectShow filtreleri kullanılmıştır. DirectShow'un temel ilkesi olan filtreler aslında birer yazılım bileşenleridir. DirectShow multimedya verinin işlenmesini farklı adımlara böler ve her filtre bir işlem adımını gösterir. DirectShow filtreleri, kaynak filtreler, dönüşüm filtreleri ve sunma filtreleri olmak üzere üç gruba ayrılır (Pesce, 2003).



Şekil 4.1: Görüntü elde etme sistemi

Bir video ya da ses akışı (stream) üreten herhangi bir DirectShow filtresi kaynak filtre olarak bilinir. DirectShow video kaynak filtresi, bir WDM (Windows Sürücü Modeli) sürücü olarak da kullanılabilir ve duraksız video aktarımı ve editleme yazılımı, görüntü işleme yazılımı, video yakalama araçları gibi DirectX/DirectShow uygulamaları için kameralara bağlantıyı sağlar. DirectShow Video kaynak filtresi, kullanılan kameraya ait runtime sürücünün bir parçasıdır ve sürücü paketiyle birlikte ücretsiz olarak Basler kamera firmasının WEB sayfasından indirilebilmektedir.

Dönüşüm filtreleri, kaynak filtreden giriş video akışını alır, akış üzerinde bazı işlemler yapar ve başka bir filtreye gönderir. Video akışları üzerinde düşünülebilecek her türlü işlem dönüşüm filtreleri içerisinde yapılır. Dönüşüm filtresi veri akışını yorumlar, onu kodlar ya da kodunu çözer ya da video dizileri üzerine bir tekst kaplama ekleyebilir.

Sunma filtreleri ise bir DirectShow akışını bazı çıkış formatlarına dönüştürür. Temel bir sunma filtresi video akışını disk üzerindeki bir dosyaya yazdırabilir. Diğer sunma filtreleri ses akışlarını hoparlöre ya da video akışlarını bilgisayarın masaüstünde bir pencereye gönderebilir.

Bütün DirectShow filtreleri bu üç tip filtrenin birleşiminden oluşur ve her bir DirectShow filtre grafiği en az bir tane hedef filtre, bir tane sunma filtresi ve farklı

dönüşüm filtreleri içerir. Şekil 4.2 yazılım üzerinde, üç farklı kameradan elde edilen video görüntülerini gösterir.



Şekil 4.2: Video kameralardan alınan görüntü dizilerinin yazılım görüntüsü

Hareketli bir cismi kayıt etmek için çoklu kamera sistemlerinin senkronize edilmesi gerekir. Senkronizasyonunun doğruluğu görüntüler kullanılarak elde edilecek ölçme doğruluğu üzerinde cismin hareket hızına bağlı olarak önemli bir etkiye sahip olabilir. Diğer taraftan durağan cisimleri kayıt etmek için çoklu görüntülerin farklı zamanlarda elde edilmesinin doğruluk üzerinde bir etkisi olmaz.

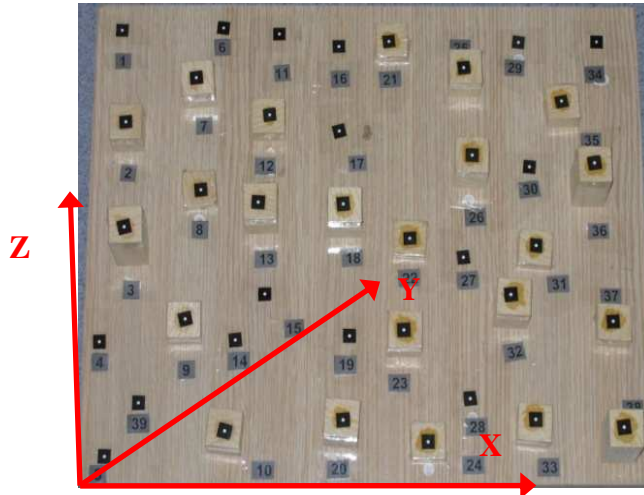
Sistemde kullanılan kameralar elektronik olarak senkronize edilmediği için, görüntülerin bilgisayar belleğine kayıtları arasında ortalama 15 milisaniyelik bir zaman farkı elde edilmiştir. Bu değer, çok hızlı hareket etmeyen cisimlerin fotogrametrik ölçme uygulamalarında yeterlidir. Bellekteki görüntüler sonra bilgisayar diskine kaydedilir.

4.2 Sistem Kalibrasyonu

Çoklu kamera sistemi özellikleri, uygun kamera kalibrasyon yönteminin seçimi için temel bir öneme sahiptir. Bu özellikler; rölatif konumları değişmeksizin çoklu kamera sisteminin birlikte hareket etmesi ve kameraların çok sık kalibre edilmesi gerekliliğidir. Dolayısıyla çoklu kameraların eş zamanlı kalibrasyonu daha uygun bir yöntem olarak kabul edilmiştir.

Sistemin tümü bir ölçü aracı olarak düşünüldüğünde, bütün kameralara ait kalibrasyon ve yöneltme bilinmeyenlerinin belirlenmesi sistem kalibrasyonu olarak tanımlanır (Godding,2002).

Kalibrasyon ve yöneltme amacıyla üç boyutlu koordinatları önceden hassas olarak belirlenmiş, siyah arka plan üzerinde beyaz dairesel hedeflerden oluşan bir test alanı kullanılmıştır (Şekil 4.3).



Şekil 4.3: Test alanı

Yazılım bu tür hedeflerin resim koordinat ölçmelerini otomatik olarak yapmaktadır. Test alanına ait 6 noktanın resim koordinat ölçmelerini gerektiren dış yöneltme parametrelerinin ilk yaklaşık değerleri hesabından sonra, diğer hedef noktaları geriye hesap yöntemiyle otomatik olarak ölçülmektedir. Kalibrasyon modülü, ek parametrelerle demet dengelemesi kalibrasyon yöntemine dayanır. Geliştirilen yazılımın kullanıldığı bir kalibrasyon uygulamasında, kamera parametreleri diyalog penceresinde (Şekil 4.4) hepsi serbest seçeneği işaretlenerek tüm kalibrasyon parametrelerinin demet dengelemesinde hesaplanması sağlanır.

	Değerler	Sigma	
c (mm)	13.722182	1000	<input checked="" type="checkbox"/> Hepsi Serbest
Xo	-0.029739	1000	<input type="checkbox"/> Hepsi Sabit
Yo	4.3749E-01	1000	<input type="checkbox"/>
K1	3.9938E-04	1000	<input type="checkbox"/>
K2	-1.8827E-05	1000	<input type="checkbox"/>
K3	6.1615E-07	1000	<input type="checkbox"/>
P1	1.5716E-04	1000	<input type="checkbox"/>
P2	-2.0401E-04	1000	<input type="checkbox"/>
B1	-5.6150E-05	1000	<input type="checkbox"/>
B2	1.7782E-04	1000	<input type="checkbox"/>

Şekil 4.4: Yazılıma ait kamera parametreleri diyalog penceresi

4.2.1 Self kalibrasyon

Kalibrasyon işlemin sonucunda, ana mesafe ve ana nokta koordinatlarından oluşan kamera iç yöneltme parametreleri ile kolinearite modelden olan farklı sapmaları karşılayan resim koordinat düzeltmeleri belirlenir. Bütün bu parametrelerin hesaplanması, yüksek doğruluklu ölçü sonuçları elde etmek için gereklidir.

Doğada fiziksel olan kolinearite koşulunun ideal geometrisinden olan sapmaların 4 ana kaynağı vardır. Bunlar sistematik radyal distorsiyon, teğetsel distorsiyon, görüntü düzleminin düz olmaması ve düzlemdeki görüntü distorsiyonudur. Herhangi bir görüntü noktasının teorik konumundan olan ötelenme bu kaynakların her birinin etkisinin toplamı kadar olacaktır (Fraser,1995, Habib ve Morgan, 2003). Böylece resim koordinat düzeltmeleri,

$$\Delta x = \Delta x_r + \Delta x_d + \Delta x_u + \Delta x_f \quad (4.1)$$

$$\Delta y = \Delta y_r + \Delta y_d + \Delta y_u + \Delta y_f \quad (4.2)$$

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

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

$$\Delta r = k_1 r^3 + k_2 r^5 + k_3 r^7 \quad (4.3)$$

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

$$r^2 = \bar{x}^2 + \bar{y}^2 = (x - x_p)^2 + (y - y_p)^2 \quad (4.4)$$

x, y resim koordinatları için gerekli düzeltmeler $\Delta x_r = \bar{x}\Delta r / r$ ve $\Delta y_r = \bar{y}\Delta r / r$ eşitlikleri ile verilir. k1 terimi, çok yüksek ölçme doğruluğu gerektirmeyen uygulamalarda tek başına yeterlidir. k2 ve k3 terimleri ise yüksek doğruluk gerektiren ölçme uygulamalarında ve geniş açılı merceklerin kullanılması durumunda gereklidir.

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

$$\Delta x_d = p1.(r^2 + 2.\bar{x}^2) + 2.p2.\bar{x}.\bar{y} \quad (4.5)$$

$$\Delta y_d = 2.p1.\bar{x}.\bar{y} + p2.(r^2 + 2.\bar{y}^2) \quad (4.6)$$

Görüntü düzleminin düz olmaması nedeniyle oluşan sistematik resim koordinat hataları fotogrametrik triyagülasyonun doğruluğunu sınırlayabilir. Radyal görüntü ötelenmesi Δr_u görüntü ışınının geliş açısının bir fonksiyonudur. Dolayısıyla, düzlem dışı görüntü deformasyonları, dar açılı ve uzun odak uzaklığına sahip mercekleri geniş açılı ve kısa odak uzaklığına sahip merceklerden daha az etkiler. Bu etkiyi modellemek için görüntü düzleminin topoğrafik olarak ölçülmesi gerekir. Ondan sonra, bir üçüncü ya da dördüncü dereceden polinomla resim koordinat ötelenmelerini modellenebilir.

Düzlemdeki distorsiyonlar, genellikle x ve y resim koordinatları arasındaki ölçekleme farkından ya da resim koordinat eksenlerinin birbirine dik olmamasından kaynaklanır. Bu distorsiyonlar genellikle afin deformasyonlar gösterir ve 4.7 eşitliğine göre matematiksel olarak modellenebilir (Fraser,1997).

$$\Delta x_f = b1.\bar{x} + b2.\bar{y} \quad (4.7)$$

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

$$\Delta x = -x_p - \frac{\bar{x}}{c} \Delta c + \bar{x}.r^2 k1 + \bar{x}.r^4 k2 + \bar{x}.r^6 k3 + (r^2 + 2.\bar{x}^2) p1 + 2.p2.\bar{x}.\bar{y} + b1.\bar{x} + b2.\bar{y} \quad (4.8)$$

$$\Delta y = -y_p - \frac{\bar{y}}{c} \Delta c + \bar{y}.r^2 k1 + \bar{y}.r^4 k2 + \bar{y}.r^6 k3 + 2.p1.\bar{x}.\bar{y} + (r^2 + 2.\bar{y}^2) p2 \quad (4.9)$$

$$\begin{aligned} r &= \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2} \\ \bar{x} &= x - x_p \\ \bar{y} &= y - y_p \end{aligned} \quad (4.10)$$

olmak üzere genişletilmiş kolinearite model,

$$x + \Delta x = -c \frac{X'}{Z'} \quad (4.11)$$

$$y + \Delta y = -c \frac{Y'}{Z'} \quad (4.12)$$

eşitliği ile verilir. Bu denklem çiftleri her görüntü noktası için elde edilir.

Eşitlikler, bilinmeyenlere göre lineer olmayan bir denklem sistemidir. En küçük kareler yöntemiyle çözüm için, bu denklem sistemleri yaklaşık değerleri yakınında Taylor serisine açılıp, ikinci dereceden itibaren terimler ihmal edilirse lineer biçime getirilmiş aşağıdaki denklem sistemleri elde edilir (Külür, 1985).

$$\begin{aligned} v_x + b_{11}\Delta\omega + b_{12}\Delta\varphi + b_{13}\kappa - b_{14}\Delta X_0 - b_{15}\Delta Y_0 - b_{16}\Delta Z_0 + b_{14}\Delta X + b_{15}\Delta Y \\ + b_{16}\Delta Z + a_{11}\Delta c + a_{12}\Delta x_p + a_{13}\Delta y_p + a_{14}\Delta k_1 + a_{15}\Delta k_2 + a_{16}\Delta k_3 + a_{17}\Delta p_1 \\ + a_{18}\Delta p_2 + a_{19}\Delta b_1 + a_{110}\Delta b_2 = \ell_x \end{aligned} \quad (4.13)$$

$$\begin{aligned} v_y + b_{21}\Delta\omega + b_{22}\Delta\varphi + b_{23}\kappa - b_{24}\Delta X_0 - b_{25}\Delta Y_0 - b_{26}\Delta Z_0 + b_{24}\Delta X + b_{25}\Delta Y \\ + b_{26}\Delta Z + \\ a_{21}\Delta c + a_{22}\Delta x_p + a_{23}\Delta y_p + a_{24}\Delta k_1 + a_{25}\Delta k_2 + a_{26}\Delta k_3 + a_{27}\Delta p_1 + a_{28}\Delta p_2 \\ + a_{29}\Delta b_1 + a_{210}\Delta b_2 = \ell_y \end{aligned} \quad (4.14)$$

Burada $b_{11} \dots b_{26}, a_{11} \dots a_{210}$ bilinmeyen parametrelere göre kısmi türevleri, $\Delta\omega \dots \Delta b_2$ 'ler bilinmeyen parametrelerin yaklaşık değerlerine getirilecek düzeltmeleri ve v_x, v_y 'lerde ölçülen resim koordinat düzeltmelerini gösterir.

$$\begin{aligned} \hat{B} &= \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & -b_{14} & -b_{15} & -b_{16} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & -b_{24} & -b_{25} & -b_{26} \end{bmatrix} \\ \hat{B} &= \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} & a_{17} & a_{18} & a_{19} & a_{110} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} & a_{27} & a_{28} & a_{29} & a_{210} \end{bmatrix} \\ \ddot{B} &= \begin{bmatrix} b_{14} & b_{15} & b_{16} \\ b_{24} & b_{25} & b_{26} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.15)$$

$$\hat{\delta} = [\Delta\omega \quad \Delta\varphi \quad \Delta\lambda \quad \Delta X \quad \Delta Y \quad \Delta Z]^T$$

$$\ddot{\delta} = [\Delta X \quad \Delta Y \quad \Delta Z]^T \quad (4.16)$$

$$\hat{\delta} = [\Delta c \quad \Delta x_p \quad \Delta y_p \quad \Delta k1 \quad \Delta k2 \quad \Delta k3 \quad \Delta p1 \quad \Delta p2 \quad \Delta b1 \quad \Delta b2]^T$$

$$v = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

$$f = \begin{bmatrix} l_x \\ l_y \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

olmak üzere, 4.13 ve 4.14 eşitlikleri matris formunda ifade edilirse,

$$v + \hat{B}\hat{\delta} + \hat{B}\ddot{\delta} = f \quad (4.19)$$

biçimine dönüşür. Bu denklem, ölçülen resim koordinatlarının genel düzeltme denklemleridir.

Ölçülen resim koordinatlarının ağırlık matrisi 2x2 boyutunda ve bir noktanın x,y resim koordinatları arasındaki korelasyonu da içeren dolu bir matristir.

$$W = \sigma_0^2 \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xy} \\ \sigma_{yx} & \sigma_y^2 \end{bmatrix}^{-1} \quad (4.20)$$

Burada, σ_0^2 referans varyansını, σ_x^2, σ_y^2 x ve y'nin varyansını ve $\sigma_{xy} = \sigma_{yx}$ ise x ile y'nin kovaryansını gösterir. Referans varyansı, 1 olarak kabul edilebilecek keyfi bir parametredir ve resim koordinatlarının kovaryansı genellikle sıfıra eşit olur. Bu durumda resim koordinatları için ağırlık matrisi aşağıdaki biçime dönüşür.

$$W = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma_x^2} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma_y^2} \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

Geliştirilen yazılımda demet dengelemesinde hesaba katılacak diğer ölçmeler ise dengelenecek parametrelerin ilk yaklaşık değerleri olarak düşünülür. Bu değerlere ait düzeltme denklemleri yazılırsa,

$$\dot{X} = \dot{v} + \dot{X}^{\text{öLÇ}} = \dot{X}^0 + \dot{\delta}$$

$$\hat{X} = \hat{v} + \hat{X}^{\text{öLÇ}} = \hat{X}^0 + \hat{\delta} \quad (4.22)$$

$$\ddot{X} = \ddot{v} + \ddot{X}^{\text{öLÇ}} = \ddot{X}^0 + \ddot{\delta}$$

eşitlikleri elde edilir. Burada,

\dot{X} : Görüntü (dış yönelme) parametrelerinin dengelenmiş değerler vektörünü,

\hat{X} : Kamera parametrelerinin dengelenmiş değerler vektörünü,

\ddot{X} : Cisim koordinatlarının dengelenmiş değerler vektörünü,

$\dot{X}^{\text{öLÇ}}$: Görüntü parametrelerinin ilk yaklaşık değerler vektörünü,

$\hat{X}^{\text{öLÇ}}$: Kamera parametrelerinin ilk yaklaşık değerler vektörünü,

$\ddot{X}^{\text{öLÇ}}$: Cisim koordinatlarının ilk yaklaşık değerler vektörünü,

\dot{v} : Görüntü parametreleri düzeltme vektörünü,

\hat{v} : Kalibrasyon parametreleri düzeltme vektörünü,

\ddot{v} : Cisim koordinatları düzeltme vektörünü,

\dot{X}^0 : Başlangıçta $\dot{X}^{\text{öLÇ}}$ 'la aynı olan görüntü parametreleri için yaklaşık değerler vektörünü,

\hat{X}^0 : Başlangıçta $\hat{X}^{\text{öLÇ}}$ 'la aynı olan kamera parametreleri için yaklaşık değerler vektörünü,

\ddot{X}^0 : Başlangıçta $\ddot{X}^{\text{öLÇ}}$ 'la aynı olan cisim nokta koordinatları için yaklaşık değerler vektörünü,

$\dot{\delta}$: Görüntü parametreleri düzeltme vektörünü,

$\hat{\delta}$: Kamera parametreleri düzeltme vektörünü,

Bu ölçüler için ağırlık matrisleri ise,

$$\dot{W} = \sigma_0^2 \dot{\Sigma}^{-1}$$

$$\hat{W} = \sigma_0^2 \hat{\Sigma}^{-1} \quad (4.23)$$

$$\ddot{W} = \sigma_0^2 \ddot{\Sigma}^{-1}$$

eşitlikleri ile verilir. Burada,

\dot{W} : Görüntü parametreleri için ağırlık matrisini,

\hat{W} : Kamera parametreleri için ağırlık matrisini,

\ddot{W} : Cisim nokta koordinatları için ağırlık matrisini,

σ_0^2 : Birim ağırlığın öncül varyansını,

$\dot{\Sigma}$, : Dengelenebilir görüntü parametreleri için öncül hata kovaryans matrisini,

$\hat{\Sigma}$, : Dengelenebilir kamera parametreleri için öncül hata kovaryans matrisini,

$\ddot{\Sigma}$, : Cisim nokta koordinatları için öncül hata kovaryans matrisini gösterir.

Görüntü parametreleri, kamera parametreleri ve cisim nokta koordinatları için oluşturulan düzeltme denklemlerinin de sisteme dâhil edilmesiyle, üç bilinmeyen grubunu içeren lineer denklem sistemi elde edilir.

$$\begin{bmatrix} \dot{N} & \ddot{N} & \ddot{N} \\ \ddot{N}^T & \hat{N} & \ddot{N} \\ \ddot{N}^T & \ddot{N}^T & \ddot{N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\delta} \\ \hat{\delta} \\ \ddot{\delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{t} \\ \hat{t} \\ \ddot{t} \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{B}^T W \dot{B} + \dot{W} & \dot{B}^T W \hat{B} & \dot{B}^T W \ddot{B} \\ \dots & \hat{B}^T W \hat{B} + \hat{W} & \hat{B}^T W \ddot{B} \\ \dots & \dots & \ddot{B}^T W \ddot{B} + \ddot{W} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\delta} \\ \hat{\delta} \\ \ddot{\delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{B}^T W f - \dot{W} \dot{f} \\ \hat{B}^T W f - \hat{W} \hat{f} \\ \ddot{B}^T W f - \ddot{W} \ddot{f} \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

İndirgenmiş normal denklemler, $\ddot{\delta}$ elimine edilerek elde edilir. Bu durumda denklem sistemi,

$$\ddot{\delta} = \ddot{N}^{-1} (\ddot{t} - \ddot{N}^T \dot{\delta} - \ddot{N}^T \hat{\delta}) \quad (4.26)$$

olmak üzere,

$$(\dot{N} - \bar{N}\ddot{N}^{-1}\bar{N}^T)\dot{\delta} + (\tilde{N} - \bar{N}\ddot{N}^{-1}\tilde{N}^T)\hat{\delta} = \dot{i} - \bar{N}\ddot{N}^{-1}\dot{i} \quad (4.27)$$

$$(\tilde{N}^T - \tilde{N}\ddot{N}^{-1}\bar{N}^T)\dot{\delta} + (\hat{N} - \tilde{N}\ddot{N}^{-1}\tilde{N}^T)\hat{\delta} = \hat{i} - \tilde{N}\ddot{N}^{-1}\dot{i} \quad (4.28)$$

biçimine dönüşür. Elde edilen sistem yalnız kalibrasyon ($\hat{\delta}$) ve görüntü parametrelerini ($\dot{\delta}$) içerir. Bu algoritma özellikle cisim noktalarının sayısı görüntü sayısını aştığı zaman faydalıdır. Farklı matris çözüm teknikleri olmakla birlikte yazılımda çözüm indirgenmiş normal denklem sisteminin inversi parçalara ayrılarak elde edilmiştir.

$$N_i = \begin{bmatrix} \dot{N} - \bar{N}\ddot{N}^{-1}\bar{N}^T & \tilde{N} - \bar{N}\ddot{N}^{-1}\tilde{N}^T \\ \tilde{N}^T - \tilde{N}\ddot{N}^{-1}\bar{N}^T & \hat{N} - \tilde{N}\ddot{N}^{-1}\tilde{N}^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

olmak üzere, normal denklem sisteminin inversi,

$$N_i^{-1} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

$$B_{11} = A_{11}^{-1} + A_{11}^{-1}A_{12}K^{-1}A_{21}A_{11}^{-1}$$

$$B_{12} = A_{11}^{-1}A_{12}K^{-1}$$

$$B_{12} = B_{21}^T$$

$$B_{22} = K^{-1}$$

$$K = A_{22} - A_{21}A_{11}^{-1}A_{12} \quad (4.31)$$

eşitlikleri ile verilir. Bu durumda bilinmeyen parametreler,

$$X_i = \begin{bmatrix} \dot{\delta} \\ \hat{\delta} \end{bmatrix}, \quad n = \begin{bmatrix} \dot{i} - \bar{N}\ddot{N}^{-1}\dot{i} \\ \hat{i} - \tilde{N}\ddot{N}^{-1}\dot{i} \end{bmatrix} \quad (4.32)$$

olmak üzere,

$$X_i = N_i^{-1} n \quad (4.33)$$

eşitliğiyle hesaplanır. Kalibrasyon ($\hat{\delta}$) ve görüntü parametrelerinin (δ) çözümünden sonra bu değerler, 4.26 eşitliğinde yerlerine konularak nokta koordinatları için düzeltmeler elde edilir.

Lineer olmayan demet dengelemesi problemi lineer problemlerin bir dizisi olarak çözülür. Her iterasyonda bir düzeltme vektörü kestirilir ve bu değerler yaklaşık değerlere eklenerek parametreler güncellenir (Mikhail ve diğ., 2001, Wolf ve Dewit, 2000).

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \hat{X} \\ \ddot{X} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{X}^0 \\ \hat{X}^0 \\ \ddot{X}^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta \\ \hat{\delta} \\ \ddot{\delta} \end{bmatrix} \quad (4.34)$$

Yazılımda iterasyonu durdurma kriteri olarak, ardışık iterasyonlar arasında birim ağırlıklı ölçünün ortalama hata değerleri (σ_0) arasındaki fark için girilen bir sınır değeri kullanılmıştır. Bu sınır değeri birlikte maksimum iterasyon sayısı, görüntü koordinatlarını ölçme presizyonu ve kaba hata ölçü testinde kullanılacak yöntemin belirlenmesinden oluşan dengeleme kontrol elemanları dengeleme öncesi demet dengelemesi diyalog penceresinde tanımlanır (Şekil 4.5). Dengeleme sonrası sonuçları, yine bu diyalog penceresi üzerinde özet olarak gösterilirken dengeleme sonuçlarının ayrıntılı gösterimi bir tekst dosya biçiminde bilgisayarın proje klasörü içine yazdırılır. Geliştirilen yazılımla bir kalibrasyon uygulamasının nasıl yapılacağına dair yazılımın kullanım bilgileri ek A'da verilmiştir. Dengeleme sonuçlarına ait bir örnek çıktı da ek B'de verilmiştir.

Dengeleme sonunda, varyans faktörü aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanır,

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{v^T W v}{n - u} \quad (4.35)$$

Burada v ölçü düzeltmelerini, n ölçü sayısını, u 'da bilinmeyen sayısını gösterir.

Şekil 4.5: Demet dengelemesi kontrol elemanları

Dengeleme sonuçlarının istatistikî değerlendirmesinde farklı ölçütler kullanılmıştır. Bu ölçütlerden ilki, ideal olarak 0.03 pikselle 0.05 piksel aralığında olması istenen resim koordinat düzeltmelerinin karesel ortalama hata değerleridir. Resim koordinat düzeltmeleri ya da düzeltmelerin karesel ortalama hata değerleri birçok fotogrametrik yazılımda da önemli bir kalite göstergesi olarak kabul edilir. Bir diğer ölçütse presizyon değerleridir. Presizyon, en küçük kareler dengelemesiyle kestirilen parametrelerin istatistikî değişkenliğini tanımlar. Kestirilen parametrelerin standart sapmaları, varyans faktörü ve normal denklem matrisinin inversiyle hesaplanmaktadır. Örneğin cisim nokta koordinatlarının standart sapmaları,

$$\hat{\sigma}_{X_i} = \hat{\sigma}_0 \sqrt{Q_{X_i X_i}}, \quad \hat{\sigma}_{Y_i} = \hat{\sigma}_0 \sqrt{Q_{Y_i Y_i}}, \quad \hat{\sigma}_{Z_i} = \hat{\sigma}_0 \sqrt{Q_{Z_i Z_i}} \quad (4.36)$$

eşitlikleri ile hesaplanır. Burada, $Q_{X_i X_i}, \dots$, normal denklem matrisinin inversinin bilinmeyen parametre konumundaki diyagonal elemanını gösterir. Cisim nokta koordinatlarının ortalama presizyonu ise aşağıdaki eşitlikler kullanılarak hesaplanır.

$$\hat{\sigma}_X = \sqrt{\frac{\sum \hat{\sigma}_{X_i}^2}{n_X}}, \quad \hat{\sigma}_Y = \sqrt{\frac{\sum \hat{\sigma}_{Y_i}^2}{n_Y}}, \quad \hat{\sigma}_Z = \sqrt{\frac{\sum \hat{\sigma}_{Z_i}^2}{n_Z}} \quad (4.37)$$

Burada, n_X , n_Y ve n_Z , cisim nokta koordinatlarının sayısını göstermektedir (Beyer, 1992, Remondino, 2000).

4.2.2 Kaba hata testi

Yanlış ölçüler (ya da yanlış görüntü eşlemeleri) tamamıyla yanlış sonuçlara neden olur ve hatta dengelemenin yakınsamasını da engelleyebilir. Dolayısıyla en küçük kareler dengelemesi, sağlam bir kestirim tekniği olarak düşünülmez. Bu nedenle, dengelenmiş değerler vektörü (X) ya da düzeltmeler (v) üzerinde bir hata test yöntemi kullanılarak resim koordinat ölçmelerinde olabilecek kaba hatalar kontrol edilmelidir. İki vektör için beklenen değerlerin test edilmesi gerekir. Çözüm vektörü için beklenen değer genellikle bilinmediği için düzeltme denklemi kullanılır.

Ölçmelerdeki kaba hataları belirlemek için genel yaklaşım güvenilirlik teorisine ya da Barda (1968) tarafından geliştirilen data-snooping tekniğine dayanır. Barda'nın data snoopingi fotogrametride ilk olarak bağımsız modellerle dengelemede ve daha sonra Grün (1978a) ve Torlergard (1981) tarafından demet dengelemesi için kullanılmıştır.

Ölçmelerin normal dağılımda oldukları sıfır hipotezi altında, her bir i ölçmesi için w_i katsayısı,

$$w_i = \frac{-v_i}{\sigma_0 \sqrt{q_{v_i v_i}}} = \left| \frac{-v_i}{\sigma_{v_i}} \right| < N_{1-\alpha/2} \quad (4.38)$$

eşitliği ile hesaplanır. B katsayılar matrisi olmak üzere, Q_{vv} matrisinin i 'ci elemanı,

$$Q_{vv} = W_{ll}^{-1} - B(B^T W_{ll} B)^{-1} B^T \quad (4.39)$$

eşitliğiyle hesaplanır.

Kaba hata yakalama tekniği güvenilir bir teorik formülasyona sahip olmakla birlikte eğer gerçekleştirilmezse başarısız sonuçlara yol açabilecek bazı varsayımlara dayanır. Bu varsayımlar,

- Ölçmelerde yalnız bir kaba hata bulunur ya da birden çok kaba hata olması durumunda birbirlerini etkilemezler.
- Önsel varyans faktörü bilinen bir değerdir.

Bu kabuller fotogrametride nadiren karşılanır. Bu nedenle daha pratik bir formülasyon Pope (1975) tarafından önerilmiştir.

$$w_i = \frac{v_i}{\hat{\sigma}_0 \sqrt{q_{v_i v_i}}} = \left| \frac{v_i}{\hat{\sigma}_{v_i}} \right| < \tau_{r, 1-\alpha/2} \quad (4.40)$$

Eğer sıfır hipotezi $E(v)=0$ doğruysa, w_i 'nin τ -dağılımında olduğu kabul edilir. Sistemde fazla ölçü sayısı (r) yeterince büyük olursa τ dağılımı yerine t dağılımı da kullanılabilir.

Geliştirilen yazılımda kaba ölçü testi için Pope yöntemi kullanılmıştır. Her bir resim koordinat ölçmesine ait w_i katsayıları hesaplanarak test büyüklüğüyle ($\tau_{r, 1-\alpha/2}$) karşılaştırılır. Test büyüklüğünden daha büyük w_i katsayıları varsa bu değerlerden en büyük olana dolayısıyla istatistiksel anlamda en büyük düzeltmeye sahip resim koordinat ölçüsünde kaba ölçü hatası olduğu kabul edilir ve söz konusu ölçü atılarak dengeleme tekrarlanır. Bu işlem kaba hatalı ölçü kalmayıncaya kadar devam eder.

4.3 İlk Yaklaşık Değerlerin Hesabı

Demet dengelemesinde kullanılan matematik model bilinmeyen parametrelere göre lineer olmayan bir denklem sistemidir. En küçük kareler yöntemiyle çözüm için, sistem lineer biçime getirilir ve dolayısıyla sistem bilinmeyenleri için yaklaşık değerler gerekli olur.

Geriden kestirme, cisim koordinat sistemine göre resmin konum ve yöneltme parametrelerinin belirlenmesidir. Standart durumda, parametreler izdüşüm

merkezinin cisim uzay koordinatları ve resim koordinat sistemine göre cisim koordinat sisteminin yöneltmesini tanımlayan ω, φ, κ açılarından oluşur.

Yalnız bir görüntü düşünüldüğünde, uygun bir çözüm, kapalı form (closed-form) uzay geriden kestirme (Zheng ve Wang, 1992) ile ya da 4 görüntü noktası ve ilgili cisim koordinatlarını düzenleyen kolineariteye bağlı klasik bir lineer olmayan geriden kestirme hesabıyla elde edilebilir. Diğer taraftan en az 6 noktanın üç boyutlu koordinatlarının bilinmesi durumunda, DLT metodu (Abdel-Aziz ve Karara, 1971) kullanılarak bütün görüntü parametreleri belirlenebilir.

Kapalı form (closed-form) çözümler, daha düşük yoğunluklu hesapsal işlemler gerektirdiği için oldukça hızlıdır ve dış yöneltme elemanları için ilk yaklaşık değerler istememesi avantajı vardır. Yöntem, bilgisayarlı görme uygulamalarında oldukça yaygın kullanılmaktadır. Fakat en doğru çözümleri, kapalı form çözümlere uygulanamayan ve fazla ölçü sayısı ve en küçük kareler yöntemlerinin kullanımını gerektiren yöntemler verir.

Geliştirilen yazılımda dış yöneltme elemanlarının ilk yaklaşık değerlerinin hesabı iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada, üç boyutlu koordinatları bilinen en az altı noktanın resim koordinat ölçülerinden DLT eşitlikleri kullanılarak yaklaşık değerler direkt çözüm yöntemiyle hesaplanmış, ikinci aşamada ise genişletilmiş kolinearite modeli kullanılarak iteratif bir çözüm sonucu dış yöneltme elemanlarının ikinci yaklaşık değerleri belirlenmiştir.

4.3.1 DLT-direkt lineer transformasyon

Abdel-Aziz ve Karara (1971) tarafından önerilen Direkt Lineer Transformasyon (DLT) yöntemi, resim koordinat sistemi ile cisim koordinat sistemi arasındaki dönüşümü lineer bir fonksiyon olarak ele alınır. Metodun temel avantajları, kalibre edilmiş bir kamera istememesi ve parametreler için ilk yaklaşık değerler olmadan da çözümü sağlayabilmesidir.

DLT, standart kolinearite eşitliklerinden ya da projektif geometrinin genel teorisinden elde edilebilir. Çözümü lineer olmayan bir probleme dönüştürmesine rağmen, sistematik hata düzeltmeleri de dönüşümün bir parçası olarak ele alınabilir.

Üç boyutlu koordinatları bilinen ve düzlemsel olmayan en az altı kontrol noktası, lineer çözüm için gereklidir.

Kolinearite eşitlikleri DLT eşitliklerini elde etmek için kullanılırsa:

$$x - \delta_x = x_p - c_x \cdot \frac{r_{11} \cdot (X_p - X_0) + r_{21} \cdot (Y_p - Y_0) + r_{31} \cdot (Z_p - Z_0)}{r_{13} \cdot (X_p - X_0) + r_{23} \cdot (Y_p - Y_0) + r_{33} \cdot (Z_p - Z_0)} \quad (4.41)$$

$$y - \delta_y = y_p - c_y \cdot \frac{r_{12} \cdot (X_p - X_0) + r_{22} \cdot (Y_p - Y_0) + r_{32} \cdot (Z_p - Z_0)}{r_{13} \cdot (X_p - X_0) + r_{23} \cdot (Y_p - Y_0) + r_{33} \cdot (Z_p - Z_0)} \quad (4.42)$$

eşitlikleri elde edilir. Burada, δ_x ve δ_y resim koordinatlarındaki sistematik hataları, c_x ve c_y de x ve y doğrultularındaki ana mesafeleri gösterir.

Kamera, koordinat sisteminin orijinine yerleştirilmediği sürece kolinearite eşitlikleri DLT eşitliklerine aşağıdaki gibi dönüştürülür:

$$x - \delta_x = \frac{L_1 \cdot X_p + L_2 \cdot Y_p + L_3 \cdot Z_p + L_4}{L_9 \cdot X_p + L_{10} \cdot Y_p + L_{11} \cdot Z_p + 1} \quad (4.43.a)$$

$$y - \delta_y = \frac{L_5 \cdot X_p + L_6 \cdot Y_p + L_7 \cdot Z_p + L_8}{L_9 \cdot X_p + L_{10} \cdot Y_p + L_{11} \cdot Z_p + 1} \quad (4.43.b)$$

Burada;

$$L = \frac{1}{(r_{31} \cdot X_0 + r_{32} \cdot Y_0 + r_{33} \cdot Z_0)} \quad (4.44)$$

$$L_1 = L \cdot (x_p \cdot r_{31} - c_x \cdot r_{11}) \quad (4.45)$$

$$L_2 = L \cdot (x_p \cdot r_{32} - c_x \cdot r_{12}) \quad (4.46)$$

$$L_3 = L \cdot (x_p \cdot r_{33} - c_x \cdot r_{13}) \quad (4.47)$$

$$L_4 = x_p + L \cdot c_x \cdot (r_{11} \cdot X_0 + r_{12} \cdot Y_0 + r_{13} \cdot Z_0) \quad (4.48)$$

$$L_5 = L.(y_p \cdot r_{31} - c_y \cdot r_{21}) \quad (4.49)$$

$$L_6 = L.(y_p \cdot r_{32} - c_y \cdot r_{22}) \quad (4.50)$$

$$L_7 = L.(y_p \cdot r_{33} - c_y \cdot r_{23}) \quad (4.51)$$

$$L_8 = y_p + L.c_y (r_{21} \cdot X_0 + r_{22} \cdot Y_0 + r_{23} \cdot Z_0) \quad (4.52)$$

$$L_9 = L. r_{31} \quad (4.53)$$

$$L_{10} = L. r_{32} \quad (4.54)$$

$$L_{11} = L. r_{33} \quad (4.55)$$

$L_1, L_2, L_3, \dots, L_{11}$ katsayıları DLT parametreleri olarak adlandırılır ve cisim uzay referans düzlemi ile görüntü düzlemi arasındaki ilişkiyi yansıtır.

Elde edilen denklemler direkt metotla ya da iteratif olarak çözülebilir. Direkt metot ölçüler yani resim koordinatları için düzeltmelerin çok küçük olduğunu ve ihmal edilebileceğini kabul eder. Bütün cisim nokta koordinatlarının bilindiği ve hatasız oldukları varsayılırsa, bu metot için radyal mercek distorsiyonunun ilk terimini de kullanan denklem sistemleri:

$$L_1 X + L_2 Y + L_3 Z + L_4 - x X L_9 - x Y L_{10} - x Z L_{11} - x K_1 r^2 A - x = v_x \quad (4.56)$$

$$L_5 X + L_6 Y + L_7 Z + L_8 - y X L_9 - y Y L_{10} - y Z L_{11} - y K_1 r^2 A - y = v_y$$

$$A = L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1 \quad (4.57)$$

olarak elde edilir. DLT parametreleri, lineer en küçük kareler yöntemiyle direkt olarak çözülebilir.

İteratif çözüm metodu ise standart kolinearite çözümüne benzer. DLT eşitlikleri parametrelere göre lineer hale getirilir ve çözüm iteratif bir şekilde en küçük kareler yöntemiyle elde edilir. Kolinearite eşitliklerinin kullanımına benzer olarak koordinatları bilinmeyen noktalar blok dengeleme içinde kullanılabilir.

4.3.2. DLT parametrelerinden kamera parametrelerine dönüşüm

Fiziksel kamera parametreleri aşağıdaki eşitlikler kullanılarak DLT parametrelerinden elde edilebilir:

$$L = \frac{-1}{\sqrt{L_9^2 + L_{10}^2 + L_{11}^2}} \quad (4.58)$$

$$x_p = (L_1 \cdot L_9 + L_2 \cdot L_{10} + L_3 \cdot L_{11}) L^2 \quad (4.59)$$

$$y_p = (L_5 \cdot L_9 + L_6 \cdot L_{10} + L_7 \cdot L_{11}) L^2 \quad (4.60)$$

$$c_x = \sqrt{[(L_1^2 + L_2^2 + L_3^2) L^2 - x_p^2]} \quad (4.61)$$

$$c_y = \sqrt{[(L_5^2 + L_6^2 + L_7^2) L^2 - y_p^2]} \quad (4.62)$$

$$\varphi = \sin^{-1}(L_9 \cdot L) \quad (4.63)$$

$$\omega = \tan^{-1}\left(\frac{-L_{10}}{L_{11}}\right) \quad (4.64)$$

$$r_{11} = \frac{L(x_p L_9 - L_1)}{c_x} \quad (4.65)$$

$$\kappa = \cos^{-1}\left(\frac{r_{11}}{\cos \varphi}\right) \quad (4.66)$$

Kamera konumu ise,

$$\begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} L_1 & L_2 & L_3 \\ L_5 & L_6 & L_7 \\ L_9 & L_{10} & L_{11} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} L_4 \\ L_8 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.67)$$

eşitliğinden hesaplanır.

Yazılımda bilinmeyen cisim nokta koordinatları için yaklaşık değerler ise DLT metodu kullanılarak direkt çözüm yöntemiyle hesaplanmıştır. m tane görüntü için ayrı ayrı uzaysal geriden kestirme uygulandıktan sonra, DLT metodu kullanılarak uzaysal illerden kestirme basit bir yolla her bir nokta için formüle edilebilir.

$$\begin{bmatrix} v_x^1 \\ v_y^1 \\ v_x^2 \\ v_y^2 \\ \vdots \\ v_x^m \\ v_y^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1^1 - x^1 L_9^1 & L_2^1 - x^1 L_{10}^1 & L_3^1 - x^1 L_{11}^1 \\ L_5^1 - y^1 L_9^1 & L_5^1 - y^1 L_{10}^1 & L_5^1 - y^1 L_{11}^1 \\ L_1^2 - x^2 L_9^2 & L_1^2 - x^2 L_{10}^2 & L_1^2 - x^2 L_{11}^2 \\ L_5^2 - y^2 L_9^2 & L_5^2 - y^2 L_{10}^2 & L_5^2 - y^2 L_{11}^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ L_1^m - x^m L_9^m & L_1^m - x^m L_{10}^m & L_1^m - x^m L_{11}^m \\ L_5^m - y^m L_9^m & L_5^m - y^m L_{10}^m & L_5^m - y^m L_{11}^m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_1 - L_4 \\ y_1 - L_8 \\ x_2 - L_4 \\ y_2 - L_8 \\ \vdots \\ x_m - L_4 \\ y_m - L_8 \end{bmatrix} \quad (4.68)$$

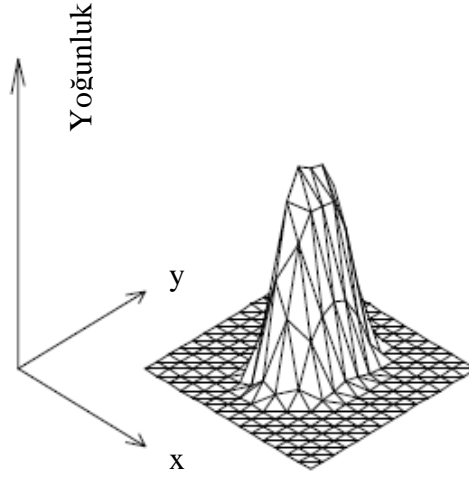
Burada X, Y ve Z, yeni noktanın yaklaşık koordinatlarını, L_1, L_2, \dots, L_{11} , DLT parametrelerini, x ve y'de resim koordinat ölçülerini gösterir.

4.4 Kullanılan Hedef Görüntüler

Brown (1984), film tabanlı fotogrametrik metotlar için hedeflerin şekil ve boyutunu incelemiş ve siyah bir arka plan üzerinde beyaz bir benek ve arka plan için beyaz benekten 5 kat daha büyük bir yarıçap ve 20 ila 30 kat bir büyütmede film negatif üzerindeki hedefin optimum çapı için 40 ila 80 μm arasında bir değer önermiştir.

Dijital fotogrametrik yöntemler için ise optimum boyut ve maksimum yoğunluk, cisim üzerinde kullanılacak hedefin boyutunu yönlendirmek için belirlenir. Optimum boyut 6 ya da daha fazla piksel olan bir çapla tanımlanmıştır (Clarke, 1994). Böyle bir hedef görüntüsü için maksimum yoğunluk konum belirleme doğruluğunu da etkiler. Örneğin, hedef görüntü yoğunluğunu iki katına çıkarmak hedef konum doğruluğunda iki kat bir artışla sonuçlanır. Tipik bir hedef görüntünün üç boyutlu görünümü Şekil 4.6'da gösterilmiştir.

Hem test alanı hem de üzerinde ölçme yapılacak cisimler için siyah artalan ve ortasında beyaz benekler bulunan ve beneklerin görüntü üzerinde yaklaşık 7x7 piksellik bir alana karşılık geleceği kâğıt hedefler tasarlanmıştır.



Şekil 4.6: Tipik bir hedef görüntüsünün üç boyutlu görünümü

4.5 Sıfır Okuması

Sistem kalibrasyonu yani kameralara ait kalibrasyon ve yöneltme bilinmeyenleri belirlendikten sonra kinematik işlemin bir parçası olan çoklu noktaların izlenmesi aşamasına geçilebilir. Bu amaçla ilk olarak, yük uygulaması yapılacak yapı elemanı henüz statik konumdayken üzerine yapıştırılmış hedef noktalarına ait bir sıfır okuması yapılır yani noktaların tümünün başlangıç üç boyutlu cisim koordinatları hesaplanır.

Sıfır okumasında, ilk olarak sabit konumdaki yapı elemanı görüntüleri elde edilerek bu görüntüler tanımlı hedef görüntü için taranır ve bütün işaretli hedef görüntülerinin resim koordinatları piksel altı doğrulukta ölçülür. Daha sonra, karşılıklı hedef görüntü noktalarının belirlenmesi için görüntü eşleme işlemi yapılır. Eşleme işlemiyle belirlenen nokta numaraları tüm yükleme deneyi süresince sabit kalacağından sonraki ölçme oturumlarında tekrar bir görüntü eşleme işlemi daha uygulanmaz. Son işlem aşaması ise eşlenmiş noktaların üç boyutlu cisim koordinatlarının uzaysal ileriden kestirme dengelemesiyle kalibrasyon sonuçları kullanılarak hesaplanmasıdır.

4.5.1 Tanımlı hedef görüntü için görüntülerin taranması

Hedef görüntülerinin piksel altı doğrulukta konumlarının hesaplanması, hedef tanıma ve konum belirleme olmak üzere iki aşamada gerçekleştirilir. Hedef görüntülerinin tanınması, görüntü üzerinde hassas bir şekilde konumunun belirlenebilmesi için

gereklidir. Hedef konumunun belirlenmesi genellikle ikinci bir aşamadır. Görüntüde hedeflerin otomatik tanınması ve ölçümü için birçok yöntem önerilmiştir. Bu tekniklerin çoğu, kodlanmış özel hedefler ve görüntünün filtrelenmesi kombinasyonunu kullanarak, karışık bir arka plandan hedef görüntülerin hassas bir şekilde çıkarılmasını amaçlar (Shortis ve diğ., 1994, Clarke ve diğ., 1993). Bu hedefler, tek bir hedefle ilişkilendirilen ve farklı görüntülerde aynı hedef görüntülerin belirlenmesini sağlayan hedef belirteçleri içerir.

Bir diğer yöntem ise, görüntüdeki objeleri daha karanlık ya da daha parlak yaparak hedef görüntülerin kolaylıkla belirlenmesini sağlamaktır. Endüstriyel fotogrametride sıkça kullanılan bu yöntem de, kontrollü aydınlatma şartları ve geri-yansıtılmalı hedefler kullanılır. Genellikle, hedef tanıma dışında artalanla çok az ilgilenildiği için, çoğu durumda artalan karışıklığı, pozlama altında önemli ölçüde düşürülebilir. Stabil ortamlarda, geri yansıtılmalı hedeflerin, ilki aydınlatılmalı ve sonra aydınlatmasız görüntüleri birbirinden çıkarılarak artalanın etkisi büyük ölçüde giderilir. Yüksek kontrastlı pasif hedefler kullanılması durumunda ise hedef ve artalan arasındaki yoğunlukların maksimum aralığı araştırılmalıdır (Shortis ve diğ., 1994). Bir yoğunluk histogramının analizinden otomatik olarak ya da bir operatör tarafından enteraktif olarak ayarlanabilen global bir eşik değeri, bütün bir sayısal görüntü karesinin bölümlenmesi ve hedef görüntülerini ayırmak için kullanılabilir. Eşik değeri üzerindeki gri düzey değerleri dijital görüntüde aynı kalır ya da görüntü daha hızlı işlemler için ikili görüntülere dönüştürülür.

Hedef bulma, satır taramalı arama ya da görüntü korelasyonları gibi birkaç yöntem kullanılarak yerine getirilir. Satır taramalı yaklaşımlar öncül bir bilgi gerektirmezken korelasyon yöntemlerinde şablon görüntünün önceden tanımlanması zorunludur.

4.5.1.1 Görüntü bölümlenmesi

Genel bir teorisi olmadığı ve genellikle belirli bir amaç için tasarlandıkları için görüntü bölümlenmesinin sınıflandırılması şüphesiz subjektif bir konudur. El hakim (2001) bölümlenme tekniklerini eşikleme, kenar belirleme ve alan ya da bölge bölümlenmesi olmak üzere üç kategoriye ayırmıştır. Bu kategorilerin her biri için yüzlerce teknik sayılabilir. Ayrıca, bazı metotlar eşikleme ve kenar belirleme gibi sınıfların birlikte kullanılmasını da gerektirebilir. Burada örnek olarak yakın resim

fotogrametri yazılımı Australis tarafından kullanılan satır-taramalı görüntü bölümlenme algoritması anlatılacaktır.

Algoritma, hedef tanıma kriteri olarak gradyentleri kullanır. Matematiksel olarak gri değer gradyenti, yoğunlukların birinci türevleri yoluyla ifade edilir. Görüntünün iki boyutlu ayrık bir fonksiyon olarak yorumlanması ile x satır ve y kolon doğrultularındaki iki boyutlu gradyent bileşenleri,

$$\begin{aligned} g_{i,j}^x &= g_{i,j+1} - g_{i,j} \\ g_{i,j}^y &= g_{i+1,j} - g_{i,j} \end{aligned} \quad (4.69)$$

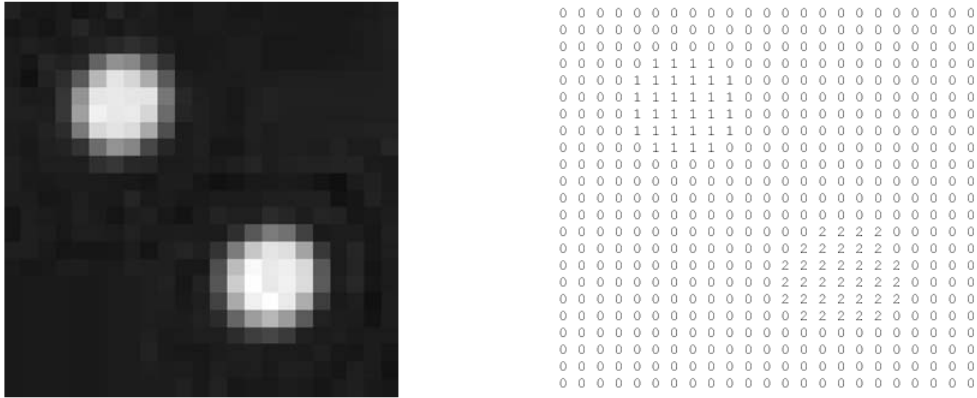
eşitlikleri ile verilir. Literatürde, belirli bir konumdaki gradyenti hesaplamak için iki komşu pikselden daha fazlasını kullanan farklı operatörlerde tanımlanmıştır (Gonzalez ve Woods, 1992). Fakat yalnız komşu iki piksel değerini kullanan algoritmalar daire şekilli hedefler için oldukça uygundur. Çevresi karanlık alanlar tarafından çevrilen parlak bölgeler daima hedef gibi tanıyacağı için, düşük kaliteli görüntüler kullanılması durumunda gradyent kriteri tek başına yetersiz görüntü bölümlenme sonuçları verebilir. Bu problemi azaltmak için, hedef bölgelerini tanımda minimum gri düzey eşik değeri ve gradyentin her ikisini de kullanan genişletilmiş bir bölümlenme algoritması kullanılır.

Sabit bir gradyent eşik değeri düşük kaliteli görüntüler kadar ikili görüntüler içinde uygundur. Fakat minimum gri düzey eşik değeri görüntü histogramları kullanılarak her bir görüntü için ayrı ayrı seçilmek zorundadır.

Satır yöneltmeli tarama algoritması aşağıdaki gibi çalışır. İşlem görüntünün ilk piksel satırında başlar ve satırın her pikselinde devam eder. Eğer geçerli piksel pozisyonu hem gradyent hem de gri düzey eşik değerini sağlıyorsa, hedef bölgesinin başlangıcı belirlenmiş olur. Hedef bölgesinin sonu ise piksel gri düzeyinin minimum eşik değerinin altında olmasıyla ya da gradyent eşik değerinin negatif doğrultuya geçmesiyle belirlenir. Eğer negatif gradyent kriteri çoklu konumlarda belirlenirse, en son konum hedefin sonu olarak alınır. Hedef görüntünün başlangıcı belirlenmeden bu koşul sağlanabilir. Bu durumda geçerli piksel gri düzeyi minimum eşik değerinin altında ise hedef bölgesinin başlangıcı kaçırılmıştır. Bu bölgenin başlangıcını

belirmek için piksel gri düzeyi minimum eşik değerinin altına düşünceye kadar geriye doğru arama yapılır.

Tarama süresince bir görüntü bölümlenme matrisi ve bölge objelerin bir dizisi oluşturulur. Hedefin başlangıç ve bitiş pikselleri görüntü satırında (sıra ve sütün) belirlendiği zaman, yeni bir piksel bölgesi elde edilmiş olur. Bu bölge, iki kenar pikseli ve aralarındaki bütün pikselleri içerir. Daha sonra, sonraki satırlardan gelen bütün piksel bölgeleri birleştirilir. Eğer bir piksel bir bölgeye eklenirse, bölge etiketi görüntü bölümlenme matrisindeki konumunda da ayarlanır. Bu komşu satırlar arasındaki yeni piksellerin hızlı belirlenmesine sağlar. Şekil 4.7, küçük bir test görüntüsünü ve onun bölümlenme matrisini gösterir.



Şekil 4.7: Hedef görüntüler ve bölümlenme matrisi

4.5.1.2 Çapraz korelasyon

Geliştirilen yazılımda ise hedef tanıma kriteri olarak çapraz korelasyonla görüntü eşleştirme yöntemi kullanılmıştır.

Bu tip eşleştirmede temel düşünce, aynı olayı tanımlayan iki görüntü penceresindeki gri düzey değerleri arasında hesaplanan korelasyon katsayılarının en büyüğü ile benzerliği bulmaktır. Bu pencerelerden ilki şablon pencere diye adlandırılan referans görüntü, diğer ise bu şablon pencerenin akıştırılacağı arama penceresidir (Kraus, 1997).

Korelasyon katsayısı her iki görüntüdeki gri düzey değerleri arasındaki kovaryans ve görüntülerin gri değerlerinin standart sapmalarından hesaplanır.

$$r = \frac{\sigma_{12}}{\sigma_1 \cdot \sigma_2} = \frac{\sum (g_1 - \bar{g}_1)(g_2 - \bar{g}_2)}{\sqrt{(g_1 - \bar{g}_1)^2 (g_2 - \bar{g}_2)^2}} \quad ; -1 \leq r \leq 1 \quad (4.70)$$

Burada,

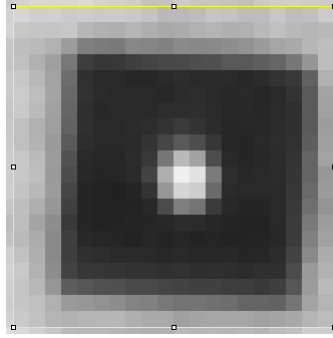
- r : Korelasyon Katsayısını,
- σ_1 : Referans görüntünün gri düzey değerlerinin standart sapmasını,
- σ_2 : arama görüntünün gri düzey değerlerinin standart sapmasını,
- σ_{12} : İki görüntünün gri düzey değerleri arasındaki kovaryansı
- g_1 : Referans görüntünün gri düzey değerlerini,
- g_2 : Arama görüntüsünün referans görüntüye karşılık gelen parçasının gri düzey değerlerini,
- \bar{g}_1 : Referans görüntünün gri düzey değerlerinin aritmetik ortalamasını,
- \bar{g}_2 : Arama görüntüsünün referans görüntüye karşılık gelen parçasının gri düzey değerlerinin aritmetik ortalamasını gösterir.

Yazılımın hedef belirleme algoritması aşağıdaki gibi çalışır. Görüntülerden direkt olarak elde edilen şablon pencere, geçerli görüntü üzerinde piksel piksel kaydırılır ve her konumdaki korelasyon katsayısı hesaplanır. Şekil 4.8, geliştirilen yazılımda hedef görüntü ve hedef parametreleri girişini göstermektedir. Hesaplanan değer hedef parametrelerinde tanımlanan minimum korelasyon katsayısından büyükse söz konusu konumda hedef görüntüsü olduğu düşünülür.



Şekil 4.8: Yazılımda hedef görüntü parametreleri

Hedef görüntü tanındıktan sonraki aşama, hedef görüntü konumunun en yüksek korelasyon katsayısıyla belirlenmesi ve hedef görüntünün etiketlenmesi aşamasıdır. Bu amaçla yazılım parametrelerinden girilen arama penceresi boyutlarında ve hesaplanan ilk yaklaşık piksel koordinatları ortalamayan bir arama penceresi görüntüsü geçerli görüntüden çıkarılarak (Şekil 4.9) ikinci kez korelasyon katsayı hesabı yapılır. Her konum için hesaplanan korelasyon katsayılarından en büyük olanı, hedef görüntünün aranan piksel konumunu gösterir.



Şekil 4.9: Arama penceresi (20x20 piksel)

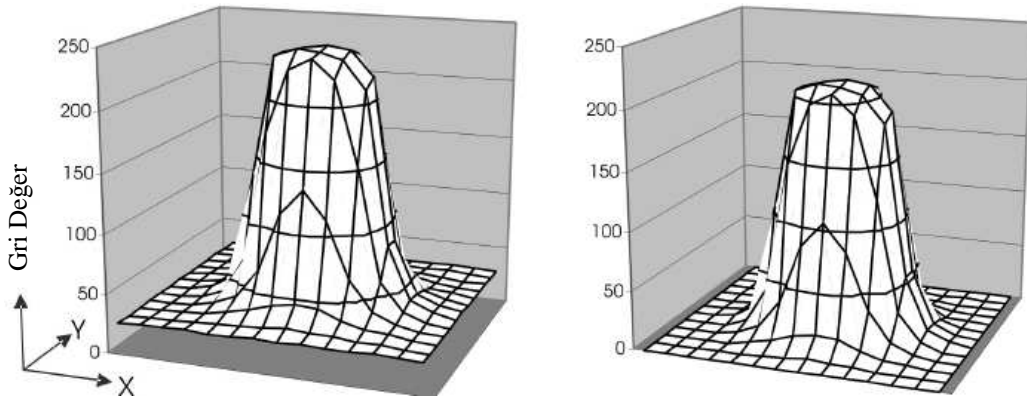
Geçerli görüntü üzerindeki tanımlı hedef görüntüyü arama işleminde, aynı hedef görüntüsü için minimum korelasyon katsayısından büyük birden çok değer hesaplanabilir. Bu durumda, hedef görüntüsünün minimum korelasyon katsayısından büyük her değeri için, ikinci korelasyon hesabıyla elde edilen hedef görüntü merkezinin yaklaşık piksel koordinatları aynı olacaktır. Dolayısıyla geçerli görüntü üzerindeki her hedef görüntüsü merkezi için yalnız bir piksel koordinat çifti elde edilerek hedef görüntüler etiketlenmiş olur. Yazılımda bu amaçla önce bir piksel koordinat dosyası oluşturulur. Geçerli hedef görüntünün minimum korelasyon katsayısından büyük her değeri için ikinci korelasyon hesabıyla belirlenen yaklaşık piksel koordinatları, piksel koordinat dosyasında sorgulanır. Kayıt yoksa hedef görüntünün yeni hedef olduğu düşünülür ve etiketi yani nokta numarası ile yaklaşık piksel koordinatları dosyaya kayıt edilerek piksel altı konum belirleme işlemine geçilir. Koordinatlarının daha önceden kaydı varsa söz konusu hedef görüntü geçilerek geçerli görüntü üzerinde tanımlı hedef görüntüyü arama işlemine devam edilir.

4.5.2 Hedef nokta görüntülerin resim koordinatlarının hesaplanması

Yazılımda hedef görüntü merkezinin yaklaşık piksel koordinatları belirlenir belirlenmez geçerli görüntü üzerinde hedef görüntünün piksel altı doğrulukta konumunun belirlenmesi için ikinci bir hesap işlemi uygulanır. Bu hesaplama, ön işlem aşaması ve gerçek merkez hesabı olmak üzere iki aşamada gerçekleştirilir.

4.5.2.1 Ön işleme

Hedef konum belirleme işleminde ilk adım, pikselleri hedef bilgisi ya da artalan gürültüsü olarak sınıflandıran bir eşikleme işlemidir. Eşikleme işleminde Şekil 4.10' da görüleceği gibi hedefin yoğunluk görüntüsünden belirli bir artalan yoğunluğu çıkarılır.



Şekil 4.10: Artalan eşiklemeden sonra hedef görüntü

Eşik çıkarma, her dijital görüntüde artalan gürültüsünün olacağı fikrine dayanır. İstenmeyen artalan aydınlatması, düşük düzeyli elektronik etkiler ve görüntü kayıt ortamından ileri gelen yeniden örnekleme etkileri, artalan gürültüsüne neden olur. Dolayısıyla hedef görüntü sinyalini ayırmak için artalan gürültüsünün kaldırılması gerekir (Shortis ve diğ., 1994).

Global eşik değerleri, özellikle geri yansıtımlı hedefler yada yüksek kontrastlı hedeflerin görüntülerini tanıma işleminin bir parçası olarak da ayarlanabilir. Fakat, hedef konumları için eşik değerleri hedef görüntüyü çevreleyen dijital görüntü karesi üzerindeki bir pencere içerisinde lokal olarak belirlenir.

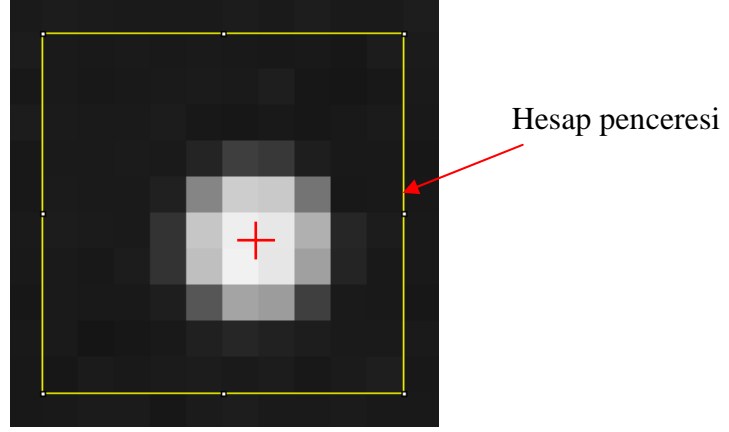
Lokal eşik değerleri birkaç yöntem kullanılarak hesaplanabilir. Pasif hedeflerle de başarılı bir şekilde kullanılan yöntemlerden biri, eşik değerini, penceredeki piksellerin minimum ve ortalama yoğunluğun ortalaması olarak hesaplar. Bu eşik değeri, penceredeki bütün pikselleri hesaba katar. Piksel yoğunlukları histogramının hesap ve analizi daha doğru bir değer ortaya çıkarabilir, fakat hesap yükü büyük ölçüde artar.

Penceredeki bütün piksellerin göz önünde tutan yönteme alternatif bir yaklaşım yalnız pencerenin kenarındaki pikselleri değerlendirmektir. Burada, hesap penceresinin hedef görüntüyü ortaladığı ve dolayısıyla pencere kenar piksellerinin artalan gürültüyü temsil ettiği kabul edilir. Bu yöntemde, hedef görüntünün dış kenarındaki sinyal ve gürültü arasındaki geçiş bölgesi belirsizliğinin eşik değer hesabı üzerinde hiç bir etkisi olmaz. Tekniğin dezavantajı ise hedef görüntü pencerede merkezlenmediği ve pencere kenarında aykırı pikseller olması durumunda ek hesaplar gerektirmesidir.

Kritik konu ayarlanacak eşik değerinin düzeyinin belirlenmesidir. Çok düşük bir eşik değeri, gürültünün hedef görüntülerin konumlarını gereğinden fazla etkilemesini sağlar. Çok yüksek olan eşik değeri de hedef görüntüye ait piksellerin bazılarını elimine edebilir. Her iki durumda da hedef görüntülerin konumları, ya sistematik hatalar ya da konumun abartılı prezisyonunu tarafından etkilenir.

Pencere kenar piksellerini kullanan algoritmalar farklı zorluk derecelerine sahiptir. En basit metot, pencere kenarındaki maksimum yoğunluğa genellikle birkaç gri düzey olan keyfi bir sabit eklemektir. Bu teknik bütün artalan gürültüsünün elimine edilmesini sağlar fakat hedef görüntüye ait bazı pikseller de kaybolabilir.

Geliştirilen yazılımda da kullanılan daha karmaşık bir yaklaşım ise kenar piksellerin gri değerlerinin dağılımının istatistiksel analizidir. Bu amaçla ilk olarak yazılımda hedef görüntüsü parametrelerinden girilen hesap penceresi boyutlarında ve ikinci korelasyon hesabı kullanılarak elde edilen hedef görüntü merkezinin piksel koordinatlarını ortalayan hesap penceresi görüntüsü geçerli görüntüden çıkarılır (Şekil 4.11). Şekil 4.12, bu görüntüye ait piksellerin gri değerlerini göstermektedir.



Şekil 4.11: Hesap penceresi görüntüsü

36	35	35	39	37	38	38	35	37	35
37	33	35	38	41	43	39	38	34	34
33	33	38	43	51	53	49	40	36	35
34	34	39	50	70	81	69	50	37	34
34	34	41	60	132	171	127	60	38	35
34	37	43	88	206	237	190	72	40	33
33	35	40	83	189	212	173	62	34	33
34	34	40	50	108	131	86	40	33	34
35	34	34	39	44	45	38	34	34	33
33	35	36	37	36	35	34	35	31	33

Şekil 4.12: Hesap pencere görüntüsüne ait piksel gri değerleri

Kenar pikseller belirlendikten sonra piksel gri değerlerinin ortalama ve standart sapmaları aşağıdaki eşitlikler kullanılarak hesaplanır.

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i = 34.86 \quad (4.71)$$

$$m = \sqrt{\frac{(V^T V)}{n-1}} = 1.73 \quad (4.72)$$

$$e = \bar{X} + 3m = 41 \quad (4.73)$$

Burada, \bar{X} , hesap penceresi kenar piksellerinin gri değerler ortalamasını, n, kenar piksel sayısını, m, standart sapmayı ve e'de beklenen maksimum eşik değeri gösterir.

Eşik değer, hedef parametrelerinde tanımlanan hedef görüntünün minimum gri değer aralığına bağlı olarak beklenen maksimum yoğunluk değeri için kritik bir değer

belirlendikten sonra hesaplanır. İstatistiksel metot, global bir limit ayarlamasını, pencerenin hedef görüntü üzerinde merkezlendirilmesini ve iteratif bir eşik değeri hesabını gerektirir. Bu önlemler olmadan, örneğin pencere kenarına giren başka bir hedef görüntünün etkisi altında yanlış eşik değeri hesaplanabilir.

Şekil 4.13, eşikleme işlemi sonrasında elde edilen hedef görüntüye ait gri değerleri göstermektedir.

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	2	0	0	0	0
0	0	0	2	10	12	8	0	0	0
0	0	0	9	29	40	28	9	0	0
0	0	0	19	91	130	86	19	0	0
0	0	2	47	165	196	149	31	0	0
0	0	0	42	148	171	132	21	0	0
0	0	0	9	67	90	45	0	0	0
0	0	0	0	3	4	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Şekil 4.13: Eşikleme işlemi sonrası hedef görüntünün gri değerleri

4.5.2.2 Hedef görüntünün ana görüntü bölgesinin test edilmesi

Yüksek kontrastlı hedefler için eşik değeri belirleme algoritmalarının hepsi, aykırı pikseller riskini göze almalıdır. Böyle pikseller, eşik değerinin üstünde yoğunluk değerlerine sahiptir fakat hedef görüntünün ana görüntü bölgesine ait bir parça değildir. Konu dışı artalan detaylar ya da diğer hedef görüntülerin geçerli pencereye girmesi aykırı piksellere neden olur. Aykırı piksellerin kaldırılması, pencere merkezinin en azından yaklaşık olarak bilinen hedef görüntü üzerinde merkezlendirilmesi düşüncesine dayanır. İlk konum çapraz korelasyonla hesaplanmıştır. Aykırılığın kaldırılması işlemi hedef ana görüntü bölgesinin kenarlarının belirlenmesiyle kontrol edilir. Kenar belirleme kriteri, eşik değeri altındaki piksel yoğunluğunun ilk değeridir. Pencere boyutunun yeterince büyük olduğu varsayımı altında pikseller hedef görüntü merkezinden dışı doğru taranarak hedef görüntü kenarı belirlenir. Görüntü kenarı belirlenince, pencere kenarına doğru karşılaşılan bütün sonraki gelen pikseller hedefin ana görüntüsüne ait olmayan pikseller olarak düşünülür ve yoğunlukları sıfıra ayarlanır. Aykırılık için tarama,

görüntü tarama satırları boyunca ve karşısında olmak üzere iki dik doğrultuda yerine getirilir.

Tarama tekniği genellikle aykırılıkları kaldırmak için başarılıdır. Fakat en yakındaki hedef görüntüleri tarafından geçerli pencereye büyük girmeler varsa, ya da hedefin kısmen kapalı olması gibi hedef görüntüsünde süreksizlikler varsa, teknik başarısız olabilir. İlk durumda azaltılmış bir pencere boyutuyla iteratif bir çözüm bu girmeyi elimine edebilir, sonraki durumda ise hedef görüntü geçerli bir konum olarak ret edilir.

4.5.2.3 Geometrik test

Hedef görüntünün piksel altı konumunun belirlenmesinden önce hedef olmayan bölgelerin elimine edilmesi gerekir. Fakat hedef ve hedef olmayan bölgeleri 100% ayırt etmeyi amaçlayan stratejileri oluşturmak hem çok zordur hem de oldukça büyük hesapsal güç ve zaman gerektirir. Bununla birlikte hedef doğrulama ve hedef görüntünün piksel altı konumunu belirlemede yapılan kaba hatalar önemli ölçüde göz ardı edilebilir çünkü böyle ölçü hataları demet dengelemenin kaba hata testiyle belirlenip elimine edilebilmektedir. Dolayısıyla, bütün uygun hedef bölgeleri kabul edilirken, hedef olmayan bölgelerin 90-95% oranında elimine eden hızlı doğrulama metotlarını tasarlamak yeterlidir.

Hedef tanıma kriteri olarak çapraz korelasyon yöntemini kullanan yazılımda minimum korelasyon katsayısı için yüksek bir değer (<0.80) girilirse hedef olmayan bölgelerin hedef bölgesi gibi tanınması çok sınırlı sayıda olacaktır. Fakat korelasyon katsayısı için düşük değerler girilmesi durumunda ek kriterler gerekli olur.

Yazılımda iki test kriteri kullanılmıştır. Bunlardan ilki, minimum değer altında, maksimum değer üstündeki hedefleri ret eden boyut aralığı kriteridir. Bu yolla parlak alan bölgeleri ve yansıyan küçük ışık benekleri elimine edilebilmektedir.

İkinci test kriteri olarak ise, doğrultulardan biri için tarama satır eksenini kullanan iki dik doğrultudaki uzunlukların oranı kullanılmıştır.

Literatürde, farklı birçok test yöntemi daha önerilmiştir. Yoğunluğu sifıra eşit olmayan piksellerin sayısının hedef görüntüyü çevreleyen olası en küçük pencere

alanına oranı, çevre uzunluğunun hedef görüntüsünün ana görüntü bölgesinin alanına oranı gibi benzer testler doğru şekle sahip olmayan hedef görüntüleri elimine etmek için tasarlanmıştır. Fakat aralık ve uzunluk oranı kriteri en yaygın kullanılan test kriterleri olmuştur.

4.5.3 Pksel altı konum belirleme

Hedef görüntünün geçerli görüntü üzerindeki konumunu piksel altı doğrulukta belirleyebilmek için farklı yöntemler kullanılabilir. Fakat yoğunluk ağırlıklı merkez belirleme metodu basit, hızlı ve doğru bir hesap yöntemi olması nedeniyle endüstriyel fotogrametri uygulamalarında en çok kullanılan yaklaşım olmuştur. Geliştirilen yazılımda da kullanılan bu yöntemde x_0 , y_0 piksel altı ağırlık merkezi koordinatları;

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m g_{ij} \begin{bmatrix} x_{ij} \\ y_{ij} \end{bmatrix}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m g_{ij}} \quad (4.74)$$

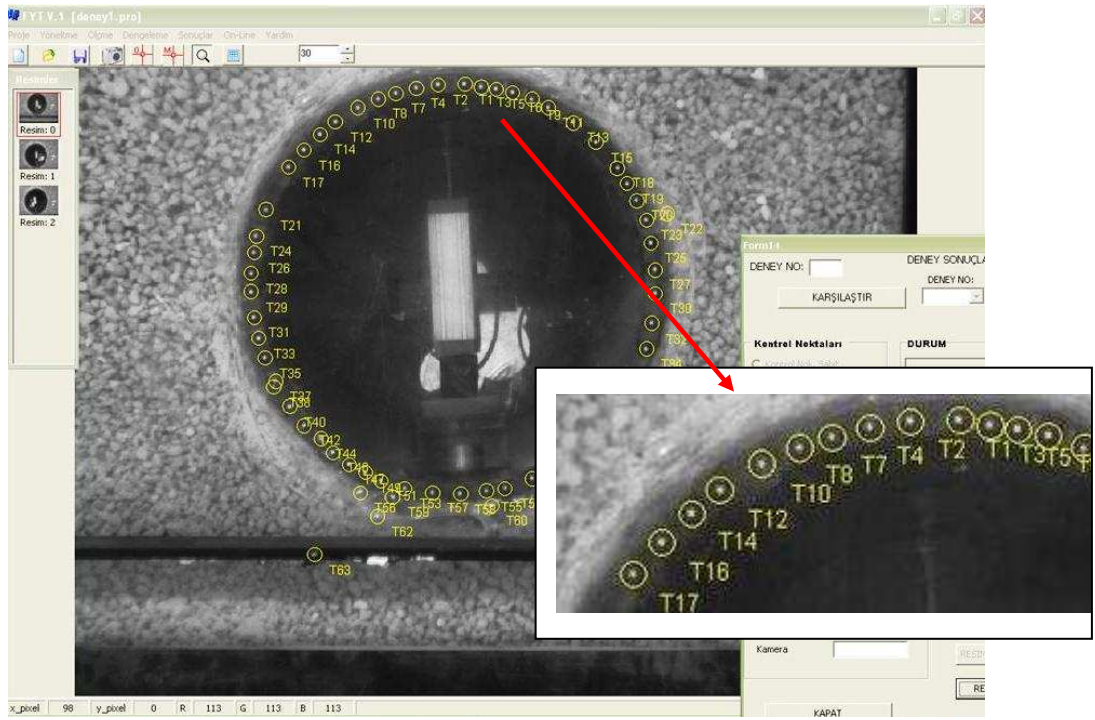
eşitliği ile hesaplanır. Burada, x_{ij} ve y_{ij} hedef şeklin içerisindeki piksellerin satır ve sütun koordinatlarını, g_{ij} 'de karşılık gelen gri değeri gösterir (Otepka ve diğ., 2002). Yüksek kontrastlı görüntülerde bu teknik kullanılarak, piksel boyutunun %2'sine varan bir ölçü doğruluğuna ulaşılabilmektedir (Fraser, 1997).

Hedef görüntünün geçerli görüntü üzerindeki konumu piksel altı doğrulukta belirlendikten sonra bu değerler kullanılan algoritma gereği eşik değeri belirlenmesinde kullanılan hedef görüntü merkezinin piksel koordinatları ile karşılaştırılır. Koordinat farkları 0,5 pikselden küçükse hesaplanan piksel altı koordinatlar doğru kabul edilir.

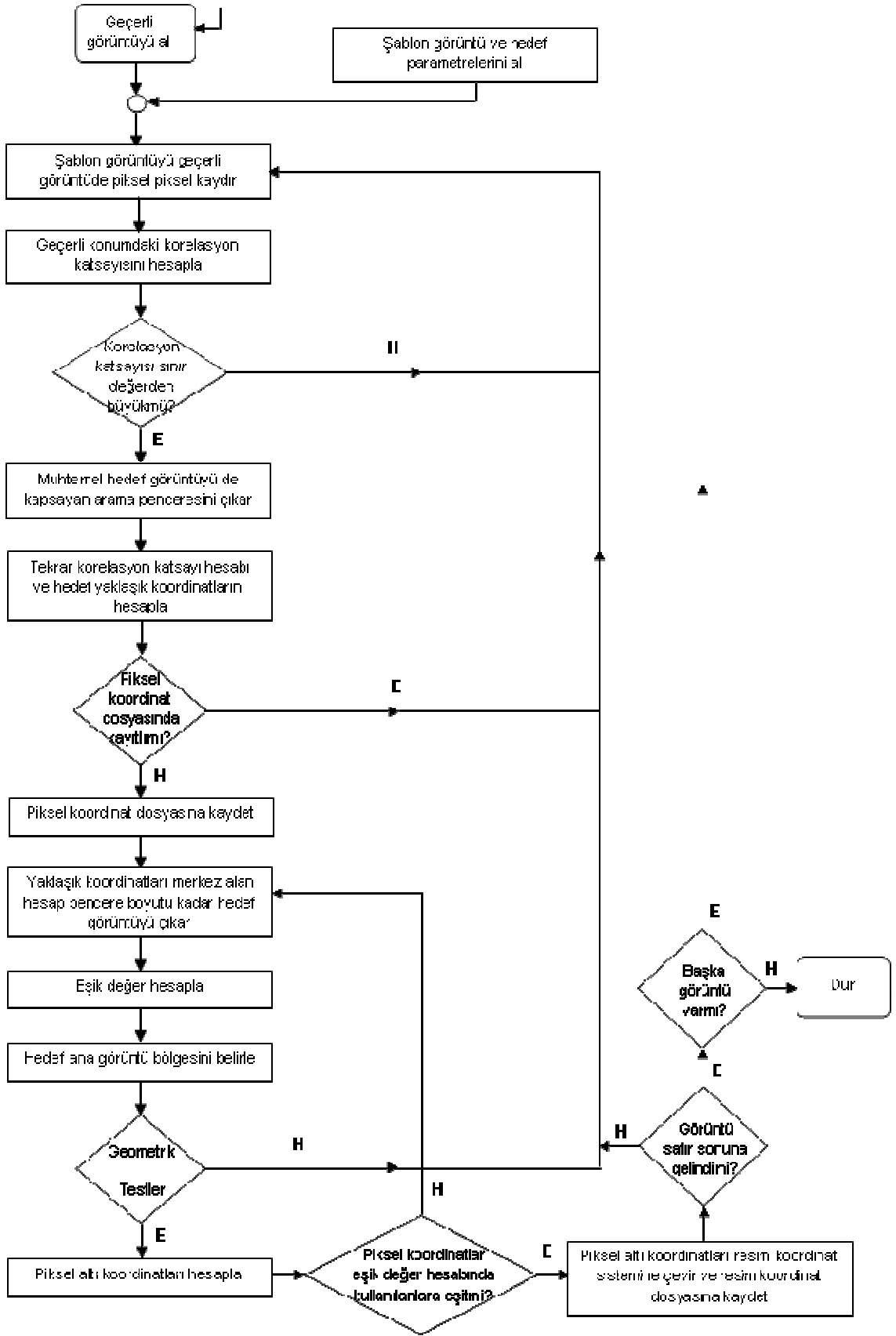
Koordinat farklarından birinin ya da her ikisinin 0.5 pikselden büyük olması durumunda ise hedef görüntü merkezinin yeni piksel koordinatları piksel altı koordinatların tam değerlere yuvarlanmasıyla elde edilir. Bu değerleri merkez alan hesap penceresi görüntüsünün kenar pikselleri kullanılarak eşik değeri hesabı ve dolayısıyla eşikleme işlemi, doğrulama, geometrik testler ve hedef görüntünün

geçerli görüntü üzerindeki piksel altı doğruluktaki konum hesabı tekrarlanır. Bu işlem eşik değer hesabında kullanılan hedef görüntünün merkez koordinatları ile yoğunluk ağırlıklı merkez belirleme metodu kullanılarak elde edilen piksel altı koordinatlar arasındaki farklar 0.5 pikselden küçük oluncaya kadar devam eder.

Son işlem aşaması, her bir hedef görüntüsünün geçerli görüntü üzerindeki piksel altı konumunun 3.4 eşitlikleri yardımıyla resim koordinat sistemine dönüştürülerek resim koordinat dosyasına kayıt edilmesidir. Şekil 4.14, örnek bir uygulamada tanımlı hedef görüntüyü arama işlemi sonucu piksel altı konumları belirlenen noktaların yazılım görüntüsünü verir. Yazılımın hedef tanıma ve piksel altı konumunu belirleme algoritmasının akış diyagramı ise Şekil 4.15’de verilmiştir.



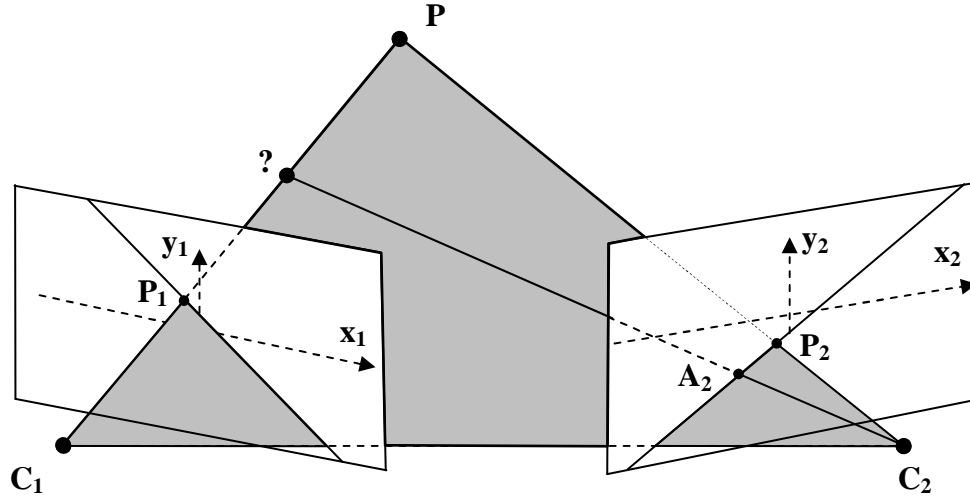
Şekil 4.14: Tarama işlemi sonrası yazılım görüntüsü



Şekil 4.15: İşaretili hedef noktaların piksel altı konumlarının hesabı

4.5.4 Görüntü eşleme – karşılıklı görüntü noktalarını belirleme

Çok görüntülü fotogrametrik ağlarda homolog noktaların yerini belirlemek için epipolar geometri kullanılır. Şekil 4.16, yakın resim fotogrametrisinde, klasik iki görüntü durumunu göstermektedir. P_1 , P_2 görüntü ışınları ve iki izdüşüm merkezi arasındaki baz çizgisi epipolar düzlem olarak isimlendirilen bir düzlem tanımlar. Bu düzlem, epipolar çizgisi olarak isimlendirilen bir doğru boyunca görüntü düzlemini keser.



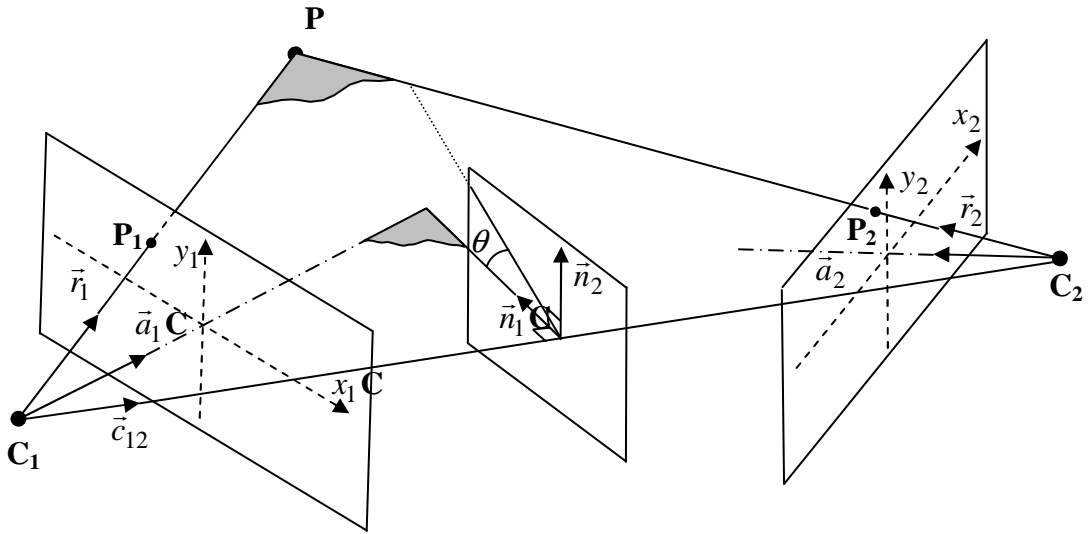
Şekil 4.16: Epipolar geometri

Bu bilgi karşılıklı görüntü noktalarının belirlenmesinde kullanılır. Görüntü üzerinde seçilen bir noktanın homolog görüntü noktası diğer resmin ilgili epipolar çizgisi üzerinde olmak zorundadır. Bu koşul arama alanını oldukça düşürür. Bununla beraber, şekilde görülebileceği gibi tek bir çözümü garanti etmez. İkinci görüntünün epipolar çizgisi üzerinde bulunan bütün görüntü noktaları aranan cisim noktası için muhtemel çözümler olabilir.

Mercek distorsiyonlarını hesaba katma zorunluluğu ve dış yöneltme elemanlarının yalnız yaklaşık değerlerinin biliniyor olması problemi gerçekte daha karmaşık yapar. Bilgisayarlı görme ve yakın görüntü fotogrametrisinde kullanılan modern kameraların standart mercekleri için mercek distorsiyonunun kaçınılmaz olduğu ve görüntü formatının kenarlarına doğru 20 piksel ya da daha fazla olabileceği göz önüne alındığında epipolar çizgi, epipolar eğriye dönüşür.

Literatürde, karşılıklı görüntü noktalarının belirlenmesi için epipolar geometriyi kullanan farklı birçok yöntem bulunabilir (Furnee ve diğ., 1997, Chen ve diğ., 1993). Geliştirilen yazılım için kabul edilen teknik Sabel (1999) tarafından önerilen epipolar plan açıları yöntemidir. Bu yöntem hızlıdır ve dijital kameralar kullanıldığı zaman homolog noktaların belirlenmesinde oldukça etkili olan mercek distorsiyonlarını da hesaba katar.

Epipolar plan açıları yönteminin esası, Şekil 4.17' de gösterildiği gibi homolog görüntü noktaları ışınlarının herhangi bir epipolar düzlemlerle aynı açıları oluşturmasına dayanır (Sabel 1999, Otepka ve diğ., 2002, Otepka, 2001). Her iki resmin görüntü noktaları için gerekli açıları hesaplamada, ilk olarak keyfi bir epipolar düzlem tanımlanır. Tanımlanan düzlem, iki izdüşüm merkezi ve üçüncü bir noktayı içermelidir. Genellikle üçüncü nokta olarak görüntü 1'in ana noktası alınır. Bu üç nokta bir doğru üzerindeyse yani a_1 , baz çizgisi c_{12} ye paralel düzlemi tanımlamak için ek bilgiler gerekli olur. Bu durumda baz çizgisi tarafından içirilmeyen herhangi bir noktayı, üçüncü nokta olarak almak yeterlidir.



Şekil 4.17: Epipolar plan açı geometrisi

n_1 ve n_2 vektörleri ve baz çizgisi birbirlerine dik ve tanımlanan epipolar düzlemin n_1 vektörünü de içermesi koşulu ile,

$$\bar{a}_1 = R_1 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (4.75)$$

$$\bar{n}_2 = \bar{c}_{12} \times \bar{a}_1 \quad (4.76)$$

$$\bar{c}_{12} = \frac{C_2 - C_1}{|C_2 - C_1|} \quad (4.77)$$

$$\bar{n}_1 = \bar{n}_2 \times \bar{c}_{12} \quad (4.78)$$

normalize vektörler n_1 ve n_2 hesaplanır. Burada, R_1 , Görüntü1'in dönüklük matrisini gösterir. Bu vektörler şimdi her iki görüntüdeki her görüntü noktası için epipolar plan açılarını hesaplamak için kullanılabilir. Aşağıdaki eşitlik her iki görüntü içinde aynıdır.

$$\bar{v}_i = R \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ -c \end{bmatrix} \quad (4.79)$$

Burada, R , geçerli görüntü için dönüklük matrisini, x_i ve y_i , görüntü noktasının düzeltilmiş resim koordinatlarını, c 'de kullanılan kameranın odak uzaklığını gösterir.

Her iki görüntüdeki her bir görüntü noktası için epipolar düzlem açıları ise aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanır.

$$\theta = \arctan(\bar{n}_2 \cdot \bar{v}_i, \bar{n}_1 \cdot \bar{v}_i) \quad (4.80)$$

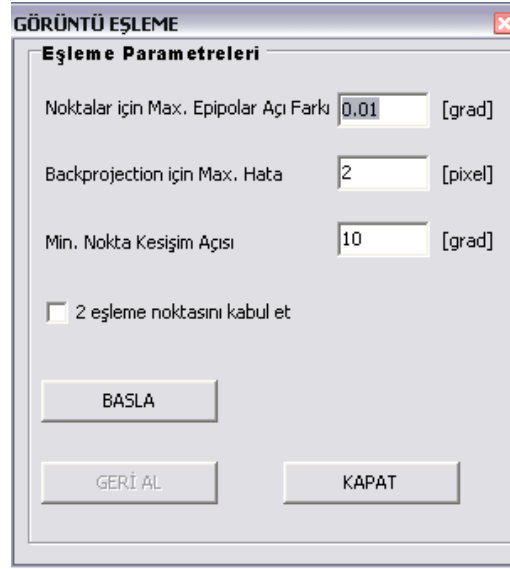
Epipolar düzlem açıları belirlendikten sonra, eşleme parametrelerinde tanımlanan bir tolerans içinde aynı θ açısına sahip olacaklarından homolog görüntü noktaları kolayca belirlenebilir.

4.5.4.1 Eşleme belirsizliklerinin çözümü

Bir görüntü noktası, ikinci görüntüde aynı epipolar plan açısına sahip sonsuz sayıda homolog noktasına sahip olabilir. Dolayısıyla homolog nokta belirlemedeki

belirsizliklerin çözümü ya da büyük ölçüde düşürülmesi için üçüncü bir resmin kullanılması gerekir.

Karşılıklı görüntü noktaları için maksimum epipolar düzlem açısı farkı, hesaplanan ve ölçülen koordinatlar arasında maksimum piksel farkı, minimum nokta kesişim açısı ve 2 noktalı eşlemelerin kabul edilip edilmeyeceği bilgisi eşleme parametreleri diyalog penceresinde (Şekil 4.18) belirlendikten sonra eşleme işlemine başlanır. Yazılımda kullanılan eşleme algoritması aşağıdaki gibi çalışır.



Şekil 4.18: Eşleme parametreleri

İki görüntüdeki her bir görüntü noktası için epipolar düzlem açıları, 4.80 eşitlikleri kullanılarak hesaplandıktan sonra eşleme parametrelerinde belirlenen bir toleransla aynı açı değerlerine sahip görüntü noktaları saptanır. Referans alınan görüntüdeki geçerli görüntü noktası, ikinci görüntüde tek bir görüntü noktasıyla aynı epipolar düzlem açısına sahipse ve eşleme parametrelerinde verilen minimum nokta kesişim açısı şartı da sağlanırsa bu durumda bu iki görüntü noktasının homolog noktalar olduğu düşünülür.

Sonraki aşama, iki homolog noktaya ait cisim noktası koordinatlarının, üç boyutlu uzayda iki doğrunun kesişim noktası olarak hesaplanmasıdır. Bu amaçla ilk olarak izdüşüm ışınlarının cisim uzayındaki doğrultusu aşağıdaki eşitlikler kullanılarak hesaplanır.

$$\bar{v}_1 = R_1 \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ -c_1 \end{bmatrix} \quad (4.81)$$

$$\bar{v}_2 = R_2 \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ -c_2 \end{bmatrix} \quad (4.82)$$

Burada c_1 ve c_2 ilgili görüntülerin odak uzaklıklarını, x_i ve y_i 'de, görüntü noktasının düzeltilmiş resim koordinatlarını gösterir. v_1 ve v_2 'ye dik bir vektörün $\bar{n} = \bar{v}_1 \times \bar{v}_2$ eşitliğiyle hesabından sonra iki doğrunun kesişim eşitliği,

$$(\bar{C}_1 + \lambda \cdot \bar{v}_1) + \kappa \cdot \bar{n} = (\bar{C}_2 + \mu \cdot \bar{v}_2) \quad (4.83)$$

olarak düzenlenir. 3 boyutlu uzayda doğrular genellikle kesişmediği için κ terimine ihtiyaç duyulur. 4.83 eşitliği matris notasyonunda tekrar düzenlenirse,

$$\begin{bmatrix} \bar{v}_1 & -\bar{v}_2 & \bar{n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda \\ \mu \\ \kappa \end{bmatrix} = [\bar{C}_2 - \bar{C}_1] \quad (4.84)$$

eşitliğine dönüşür. Bu eşitlik 3 parametresi ile lineer bir denklem sistemidir ve kolayca çözülebilir. λ ve μ , 0'dan büyük olmak zorundadır. Yoksa kesişim ilgili resmin arkasında olacaktır.

Son olarak cisim noktası koordinatları aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanır.

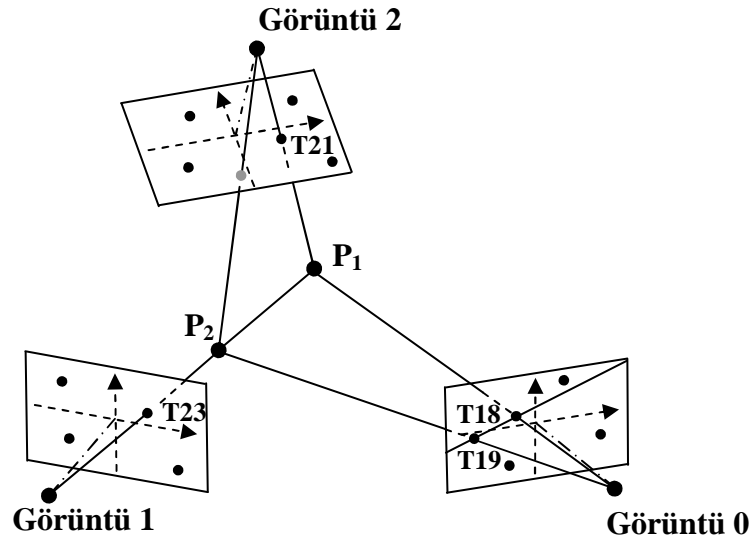
$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \bar{C}_1 + \lambda \cdot \bar{v}_1 + \frac{\kappa}{2} \bar{n} = \bar{C}_2 + \mu \cdot \bar{v}_2 - \frac{\kappa}{2} \bar{n} = \frac{1}{2} (\bar{C}_1 + \lambda \cdot \bar{v}_1 + \bar{C}_2 + \mu \cdot \bar{v}_2) \quad (4.85)$$

Noktanın cisim koordinatları hesaplandıktan sonra üçüncü görüntü üzerine standart kolinearite eşitlikleri kullanılarak izdüşürülür ve yine eşleme parametrelerinde belirlenen bir tolerans içinde izdüşürülen bu görüntü noktasıyla çakışan bir nokta olup olmadığı üçüncü resme ait taranmış piksel koordinat değerleri arasında aranır.

Çakışan nokta bulunursa bu durumda bu üç noktanın eşlenik noktalar olduğu kabul edilerek bu noktalara aynı etiket değerleri verilir.

Üçüncü görüntüde çakışan nokta bulunamazsa bu durumda aynı epipolar düzlem açısına sahip nokta sayısı iki olacaktır. Eşleme parametrelerinden belirlenen 2 eşleme noktasını kabul et parametresi onaylanmışsa bu görüntü noktaları eşlenik nokta olarak kabul edilir ve aynı etiket değeri verilir.

Şekil 4.19 göz önüne alınırsa, görüntü1'deki T_{23} noktasına ait epipolar düzlem açısı ile görüntü0'ın ilgili epipolar çizgi üzerinde bulunan iki muhtemel homolog noktaya (T_{18} , T_{19}) ait epipolar düzlem açıları için eşleme parametrelerinde verilen bir tolerans içinde aynı değerler hesaplanmıştır (Tablo 4.1). İki nokta da minimum nokta kesişim açısı şartını sağlamaktadır. Böyle durumlarda, eşleme belirsizliklerinin çözümü için ilk olarak görüntü1'deki T_{23} noktasıyla görüntü0'daki muhtemel noktalara (T_{18} , T_{19}) ait cisim noktası koordinatları 4.85 eşitliği kullanılarak hesaplanır (Tablo 4.2).



Şekil 4.19: Üçüncü görüntü kullanılarak eşleme belirsizliğinin çözümü

Tablo 4.1: Epipolar düzlem açıları

Epipolar Düzlem Açısı [radyan]	Görüntü No	Nokta No
0.079018	Görüntü 1	T23
0.079031	Görüntü 0	T18
0.078911	Görüntü 0	T19

Tablo 4.2: Olası noktalara ait üç boyutlu cisim koordinatları

	görüntü noktaları	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	Kesişim Açıları (grad)
Aday 1	T23 ve T18	2328.321	4547.204	292.5121	10.46368
Aday 2	T23 ve T19	2471.869	4162.742	330.1724	15.59022

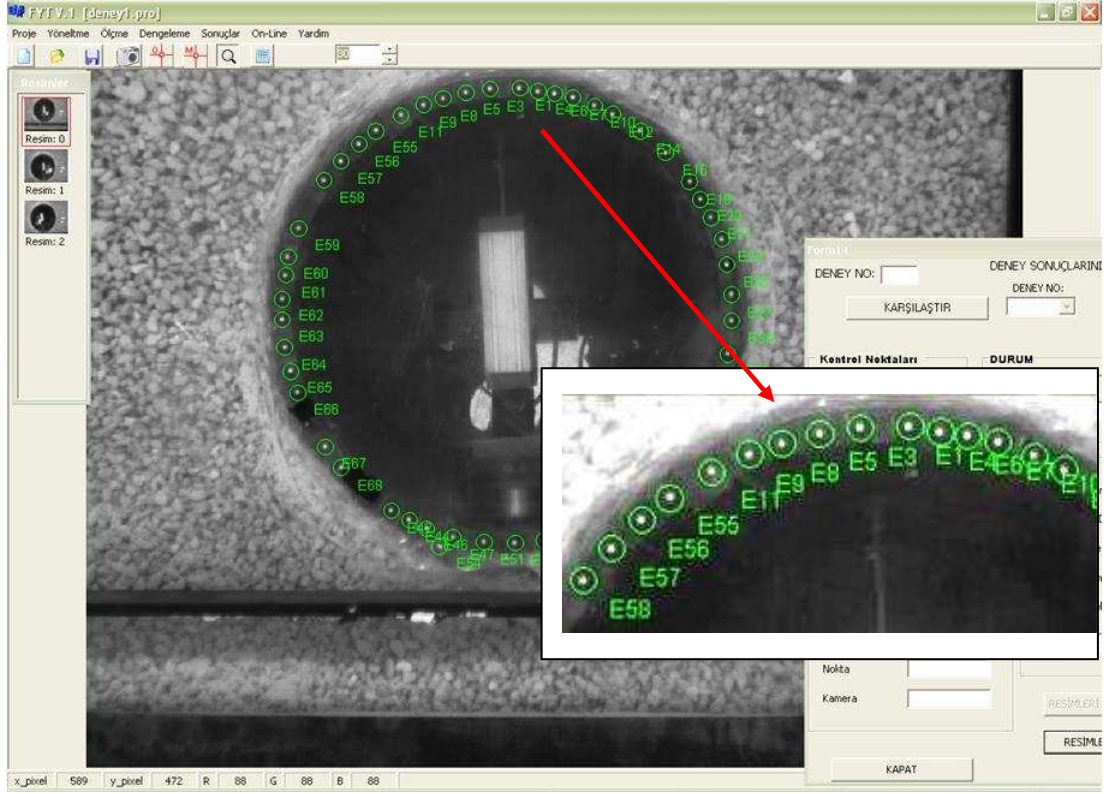
Sonraki aşama bu cisim koordinatlarının üçüncü görüntü üzerine standart kolinearite eşitlikleri kullanılarak izdüşürülmesidir (Tablo 4.3). Eğer bu izdüşürülen noktalardan biri, eşleme parametrelerinde verilen tolerans içinde üçüncü resme ait bir görüntü noktasının piksel koordinatları ile aynı olursa (T21) eşlemedeki belirsizlik çözülmüş olur ve P1 noktası o zaman doğru cisim noktası olarak alınır.

Tablo 4.3: İzdüşürülen olası noktalara ait piksel koordinatları

	x_hesap [piksel]	y_hesap [piksel]	x_Görüntü 2 [piksel]	y_Görüntü 2 [piksel]	Nokta No
Aday 1	287.74	213.26	287.72	213.26	T21
Aday 2	586.41	204.04	-	-	-

Cisim noktasının görüntü düzlemi üzerine izdüşürülmesiyle hesaplanan resim koordinatları mercek distorsiyonu içermez. Hesaplanmış koordinatlar ölçülmüş koordinatlarla karşılaştırılacağından mercek distorsiyonu her ölçülmüş görüntü noktasından kaldırılmalı ya da hesaplanmış koordinatlara ters bir fonksiyonla mercek distorsiyonu eklenmelidir.

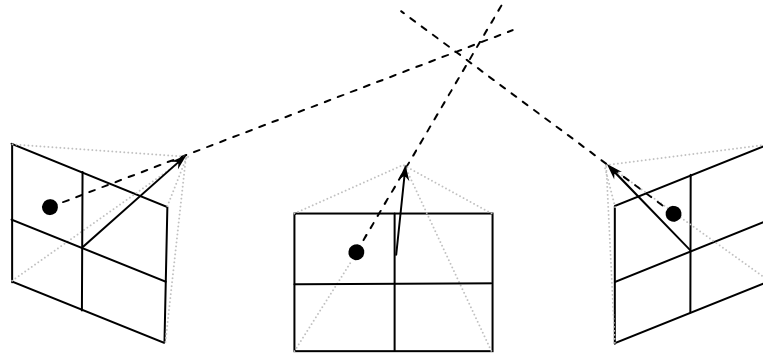
İki görüntüdeki her bir görüntü noktası için epipolar düzlem açısı hesabı, aynı açıya sahip noktaların belirlenmesi, bu görüntü noktalarına ait cisim noktası koordinatlarının hesaplanması ve hesaplanan cisim noktası ya da noktalarının diğer görüntü ya da görüntüler üzerine izdüşürülerek varsa eşleme belirsizliklerinin çözülmesi ve bu görüntülerdeki ilgili görüntü noktalarının belirlenmesi işlemi, görüntülerin tüm ikili kombinasyonları için uygulanır. Bu işlem boyunca geçerli görüntü kombinasyonundan önce belirlenen homolog noktalar hesaplamaya dâhil edilmez. Şekil 4.20, örnek bir uygulamada karşılıklı hedef görüntülerin belirlenmesi işlemi sonucu eşlenen noktaların yazılımdaki gösterimini verir.



Şekil 4.20: Eşleme işlemi sonrası yazılım görüntüsü

4.5.5 Uzaysal ileriden kestirme dengelemesi

Şekil 4.21, yakın resim fotogrametrisinde, klasik üç görüntü durumunu göstermektedir. İç ve dış yöneltme elemanları bilinen görüntülerin her birinde aynı cisim noktasının görüntü noktaları bulunmaktadır.



Şekil 4.21: Uzaysal ileriden kestirme geometrisi

Kameraların kusursuz kalibrasyonu durumunda bu üç ışın ortak bir noktada yani cisim noktasında kesişecektir. Ancak bu genellikle mümkün olmaz ve üç ışın tam olarak bir noktada kesişmez. Dolayısıyla bütün ışınlara olan mesafeyi minimize edecek hayali bir kesişime noktası hesaplanır. Bu işlem uzaysal ileri kestirme (*forward ray intersection*) olarak isimlendirilir (Dappuzo, 2003).

Cisim uzayının görüntü düzlemine projeksiyonunu tanımlayan matematik model burada da kullanılmıştır. Standart kolinearite eşitliklerine distorsiyon etkilerinin de eklenmesiyle,

$$x' = x_p - c \cdot \frac{r_{11} \cdot (X - X_0) + r_{21} \cdot (Y - Y_0) + r_{31} \cdot (Z - Z_0)}{r_{13} \cdot (X - X_0) + r_{23} \cdot (Y - Y_0) + r_{33} \cdot (Z - Z_0)} + \bar{d}x' \quad (4.86)$$

$$x' = \bar{x}' + \bar{d}x'$$

$$y' = y_p - c \cdot \frac{r_{12} \cdot (X - X_0) + r_{22} \cdot (Y - Y_0) + r_{32} \cdot (Z - Z_0)}{r_{13} \cdot (X - X_0) + r_{23} \cdot (Y - Y_0) + r_{33} \cdot (Z - Z_0)} + \bar{d}y' \quad (4.87)$$

$$y' = \bar{y}' + \bar{d}y'$$

genişletilmiş model elde edilir. Uzaysal ileriden kestirme problemi en küçük kareler kestirimi ile çözülebilir. Bu durumda, ölçüler, farklı görüntülerdeki karşılıklı noktaların resim koordinatları, bilinmeyenlerde ölçülen noktaların cisim uzay koordinatları olur.

En küçük kareler yöntemiyle çözüm için, bilinmeyenlere göre lineer olmayan bu denklem sistemleri yaklaşık değerleri yakınında Taylor serisine açılıp, ikinci dereceden itibaren terimler ihmal edilirse lineer biçime getirilmiş aşağıdaki denklem sistemleri elde edilir.

$$v_x + b_{14}\Delta X + b_{15}\Delta Y + b_{16}\Delta Z = \ell_x \quad (4.88)$$

$$v_y + b_{24}\Delta X + b_{25}\Delta Y + b_{26}\Delta Z = \ell_y \quad (4.89)$$

Burada b_{14}, \dots, b_{26} , bilinmeyen parametrelere göre kısmi türevleri, $\Delta X, \Delta Y$ ve ΔZ bilinmeyen parametrelerin yaklaşık değerlerine getirilecek düzeltmeleri ve v_x, v_y 'lerde ölçülen resim koordinatlarının düzetmelerini gösterir. Her birinde aynı

cisim noktasının görüntü noktaları bulunan n görüntü olması durumunda, katsayılar matrisi, ölçü vektörü ve bilinmeyenler vektörü,

$$A = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial \bar{x}'}{\partial X}\right)_1 & \left(\frac{\partial \bar{x}'}{\partial Y}\right)_1 & \left(\frac{\partial \bar{x}'}{\partial Z}\right)_1 \\ \left(\frac{\partial \bar{x}'}{\partial X}\right)_1 & \left(\frac{\partial \bar{x}'}{\partial Y}\right)_1 & \left(\frac{\partial \bar{x}'}{\partial Z}\right)_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \left(\frac{\partial \bar{x}'}{\partial X}\right)_n & \left(\frac{\partial \bar{x}'}{\partial Y}\right)_n & \left(\frac{\partial \bar{x}'}{\partial Z}\right)_n \\ \left(\frac{\partial \bar{x}'}{\partial X}\right)_n & \left(\frac{\partial \bar{x}'}{\partial Y}\right)_n & \left(\frac{\partial \bar{x}'}{\partial Z}\right)_n \end{bmatrix} \quad (4.90)$$

$$x = [\Delta X \quad \Delta Y \quad \Delta Z]^T \quad (4.91)$$

$$\ell = [x'_1 - \hat{x}'_1 \quad y'_1 - \hat{y}'_1 \quad \cdots \quad x'_n - \hat{x}'_n \quad y'_n - \hat{y}'_n] \quad (4.92)$$

olarak elde edilir. x bilinmeyenler vektörünün kestirimi için en küçük kareler yöntemine göre gauss-Markoff modeli ile çözüm,

$$\hat{x} = (A^T A)^{-1} A^T \ell \quad \text{Çözüm vektörü} \quad (4.93)$$

$$v = AX - \ell \quad \text{Hata vektörü} \quad (4.94)$$

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{v^T v}{2n - 3} \quad \text{Varyans faktörü} \quad (4.95)$$

$$Q = \hat{\sigma}_0^2 \cdot (A^T A)^{-1} \quad \text{Kovaryans matrisi} \quad (4.96)$$

$$\hat{\sigma}_i^2 = Q_{ii} \quad \text{Bilinmeyenlerin varyans faktörü} \quad (4.97)$$

eşitliklerinden elde edilir. Sistem iteratif olarak çözülür. Ardışık iterasyonlar arasında birim ağırlıklı ölçünün ortalama hata değerleri (σ_0) arasındaki fark için girilen bir sınır değer, yazılımda iterasyonu durdurma kriteri olarak kullanılmıştır. Bu sınır değerle birlikte maksimum iterasyon sayısı, resim koordinatlarını ölçme prezisyonu ve kaba hata ölçü testinde kullanılacak yöntemin belirlenmesinden oluşan dengeleme kontrol elemanları dengeleme öncesi uzaysal ileriden kestirme diyalog penceresinde

tanımlanır (Şekil 4.22). Dengeleme sonrası sonuçlar, yine bu diyalog penceresi üzerinde özet olarak gösterilirken dengeleme sonuçlarının ayrıntılı gösterimi bir tekst dosya biçiminde bilgisayarın proje klasörü içine yazdırılır.

Kestirilen parametrelerin eşitlik 4.97 kullanılarak hesaplanan prezisyonu ($\hat{\sigma}_i$), hesaplanan cisim koordinatlarının teorik prezisyonunu ifade eder.

The screenshot shows a software dialog box titled "UZAYSAL İLERİDEN KESTİRME". It is divided into several sections:

- DENGEME KONTROL**: Includes input fields for "Yaklaşma Limiti" (0.0001), "Max. İterasyon" (20), and "Resim Kordinat Sigma" (0.0015). It also has radio buttons for "Uyumsuz Ölçü Testi" with options "Pope" and "t Dağılımı".
- DURUM**: Displays "DENGEME BAŞARILI...!" and "İterasyon" (2).
- ÖZET**: Summary section with fields for "Resim" (9), "Nokta" (35), and "Kamera" (3).
- İSTATİSTİK**: Statistics section with fields for "m0" (0.174), "Serbestlik Derecesi" (427), "KOH (Düzeltilmeler)" (0.234), "Kabul Edilmeyen Nok. Sayısı" (0), and "Objeler KOH" (X: 0.018, Y: 0.051, Z: 0.011).

Buttons for "DENGEME" and "KAPAT" are located at the bottom of the dialog.

Şekil 4.22: Uzaysal ileriden kestirme dengelemesi kontrol elemanları

4.6 Online Fotogrametrik İşlem Aşaması

Kalibrasyon parametreleriyle yöneltme bilinmeyenlerinin belirlendiği sistem kalibrasyonu ve başlangıç sıfır okumasını içeren offline fotogrametrik işlem aşamasından sonra yük altındaki yapı elemanı üzerindeki işaretli hedef noktaların izlenmesi yani online fotogrametrik işlem aşamasına geçilebilir.

Online fotogrametrik işlem aşaması kısaca,

- Yük testi süresince istenen zaman aralıklarında otomatik olarak ya da her yüklemeye sonra kullanıcı müdahalesiyle test malzemesinin görüntülerinin eşzamanlı olarak alınması,

- Sıfır ölçmesinde etiketlenen ya da karşılıklı olarak belirlenen hedef noktaların resim koordinatlarının yoğunluk ağırlıklı merkez belirleme metoduyla piksel altı doğrulukta otomatik olarak ölçülmesi,
- Bu noktaların üç boyutlu cisim koordinatlarının sabit kamera pozisyonlarından kalibrasyon parametreleri kullanılarak uzaysal ileriden kestirme dengelemesiyle belirlenmesi işlem adımlarından oluşur. Offline ve Online fotogrametrik işlem aşamalarıyla ilgili hesap sırası Şekil 4.23’de gösterilmiştir.

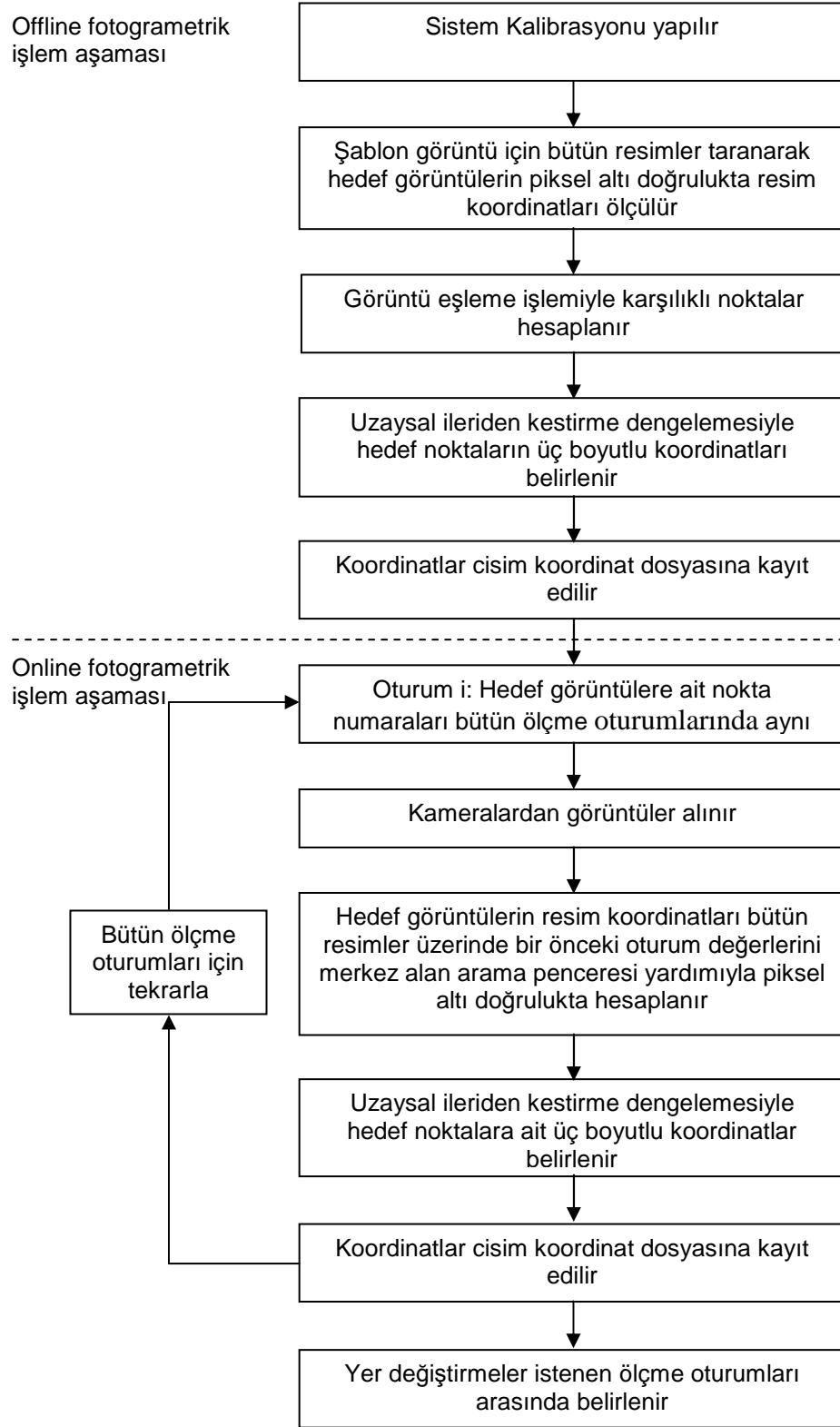
Dinamik yük deneylerinde yazılımın online uygulama kontrol parametrelerinde tanımlanan bir zaman aralığında sistem sürekli görüntüler alarak ölçmeler yapar. Örneğin 5 sn olarak girilen bir zaman aralığında sistem her 5 sn de bir görüntüler alarak yapı elemanı üzerindeki hedef noktaların üç boyutlu cisim koordinatlarını hesaplayabilir. Statik yük deneylerinde ise yük uygulamasından sonra görüntülerin alınıp hedef noktaların üç boyutlu koordinatlarının hesaplanması kullanıcı müdahalesiyle tek butona tıklamak suretiyle yapılmaktadır.

Yazılım tarafından geçerli ölçme oturumuna ait hedef görüntülerin piksel altı konumlarının belirlenmesinde bir önceki ölçme oturumuna ait aynı hedef noktaların piksel koordinatlarını merkez alan arama penceresi kullanılmıştır. Şekil 4.14’de verilen ve geçerli görüntü üzerinde işaretli hedef noktaların piksel altı konumlarının hesaplanmasını gösteren akış diyagramı, “hedef görüntüyü de kapsayan arama penceresini çıkar” işlem adımından itibaren burada da geçerlidir.

Bir ölçme uygulamasında ölçme oturumlarına ait uzaysal ileriden kestirme dengeleme kontrol parametreleri dengeleme öncesi online uygulama diyalog penceresinde tanımlanır ve dengeleme sonrası dengeleme sonuçları yine bu diyalog penceresi üzerinde özet olarak gösterilir (Şekil 4.24). Dengeleme sonuçlarının ayrıntılı gösterimi ise bir tekst dosya biçiminde yazılım tarafından otomatik olarak oluşturulan online klasörü içerisine yazdırılmaktadır. Bu sonuçlara ait bir örnek dengeleme çıktısı ek C’de verilmiştir.

Geliştirilen yazılımla deney sonuçlarını görsel olarak değerlendirmekte mümkündür. Zemin numunesi üzerine yapıştırılan tüm noktaların istenen ölçme oturumları arasındaki hareketi vektörsel ya da grafiksel olarak ya da istenen noktanın tüm deney süresince zamana ya da yüke bağlı olarak yer değiştirmesi verilebilmektedir. Bir

yükleme deneyi sonrasında numune üzerindeki hedef noktasının düşey yöndeki yer değiştirmesinin zamana bağlı değişimlerinin yazılım çıktısı Şekil 4.25’de gösterilmiştir.



Şekil 4.23: Online ve offline hesap aşamalarıyla ilgili hesap sırası

ONLINE UYGULAMA

DENEY NO: 16 DENEY SONUÇLARINI KARŞILAŞTIRMA

KARŞILAŞTIR DENEY NO: DENEY NO:

Kontrol Noktaları

Kontrol Nok. Sabit

Diş Yönelme Aracı

DURUM

DENGELEME BAŞARILI...!

İterasyon 2

DENGELEME KONTROL

Yaklaşma Limiti 0.0001

Max. İterasyon 20

Resim Kordinat Sigma 0.0015

Nokta İşaret ve Koordinatlarını Göster

Resim Koordinatlarını Kaydet

Resimleri Kaydet

İSTATİSTİK

m0 0.246

Serbestlik Derecesi 87

KOH (Düzeltilmeler) 0.261

Kabul Edilmeyen Nok. Sayısı 0

Obje Noktaları KOH

X	Y	Z
0.028	0.120	0.025

ÖZET

Resim 3

Nokta 29

Kamera 3

Zaman Aralığı 5000 (ms)

KABA ÖLÇÜ TESTİ

Test Uygulama

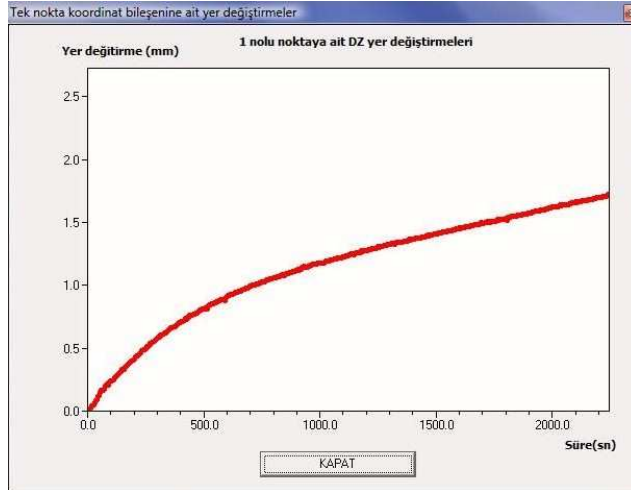
Pope Testi

t Testi

RESİMLERİ GÜNCELLE RESİMLERİ ÖLÇ VE DENGELE

KAPAT SONLANDIR

Şekil 4.24: Online uygulama diyalog penceresi



Şekil 4.25: Zamana bağlı yer değiştirmeler

5. UYGULAMA

Tasarlanan sistem, yük altındaki yapı elemanlarının davranışlarını belirlemek için farklı deneylerde kullanılarak test edilmiştir. Deneylerde, tripod üzerine monte edilen alüminyum bir parça üzerinde farklı konumlara yerleştirilmiş üç adet alan taramalı Basler A302fs kamerası kullanılmıştır (Şekil 5.1). Maksimum 780x582 piksel çözünürlüğe sahip olan kameraların bir pikselinin boyutu 8.3 μm ve maksimum frame oranı da 30'dur.

Kenarlardaki kameralarda 16 mm sabit odak uzaklıklı mercek, ortada bulunan üçüncü kamerada ise minimumu 12.5 mm ve maksimumu 70 mm olmak üzere değişken odak uzaklıklı mercek kullanılmıştır.



Şekil 5.1: Kamera yerleşim düzeni

Kamera bilgisayar bağlantısı IEEE-1394 ara yüzü yoluyla sağlanmış ve bilgisayar olarak da Pentium 4 2.0 Ghz işlemcili, 768 MB ram ve 128 MB ekran kartına sahip ortalama bir masaüstü bilgisayardan yararlanılmıştır.

5.1 Sistemin Ölçme Doğruluğunun Test Edilmesi

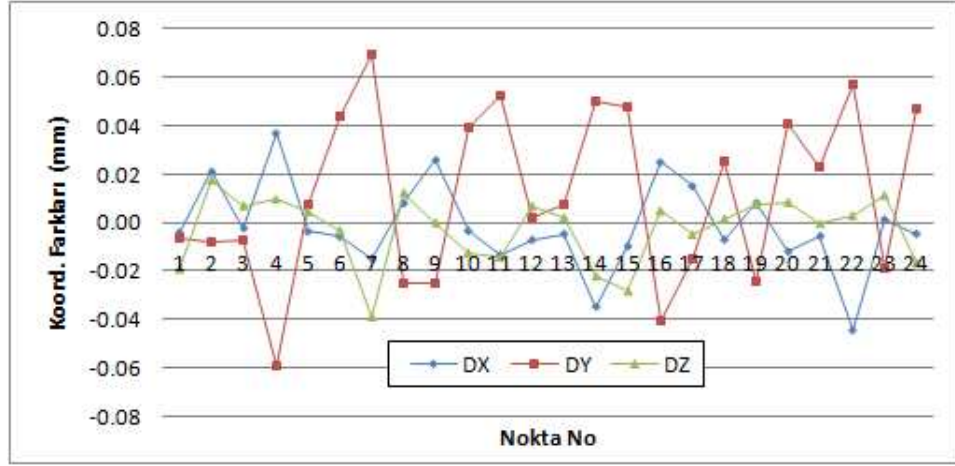
Doğruluk, kestirilen parametrelerin gerçek değerlere ne kadar yakın olduğunu belirler ve ampirik bir ölçüt hassas referans değerlerle karşılaştırılarak,

$$\mu_X = \sqrt{\frac{\sum (X_i^r - X_i)^2}{n_{rX}}}, \quad \mu_Y = \sqrt{\frac{\sum (Y_i^r - Y_i)^2}{n_{rY}}}, \quad \mu_Z = \sqrt{\frac{\sum (Z_i^r - Z_i)^2}{n_{rZ}}} \quad (5.1)$$

eşitlikleri ile elde edilir. Burada X^r, Y^r ve Z^r check noktalarının yani koordinatları bilinen fakat dengelemeye bilinmeyen olarak giren noktaların referans koordinatlarını, n_{rX}, n_{rY}, n_{rZ} 'lerde check nokta koordinatlarının sayısını göstermektedir (Beyer, 1992).

Sistemden elde edilen doğruluğun sınanması ve elde edilen kalibrasyon değerlerinin test edilmesi amacıyla deneylerde uygulanan yöntem benzer yolun izlendiği bir uygulama yapılmıştır. Görüntüler, kenarlardaki kameraların cisim-kamera mesafesinin yaklaşık 134 cm (görüntü ölçeği 1:80), ortadaki kameranın yaklaşık 125 cm (görüntü ölçeği 1:80) olduğu bir kamera düzenlemesiyle elde edilmiştir. İlk olarak test alanının uygun dağılımlı 8 noktasının kullanıldığı ve kamera parametrelerinin sabit tutulduğu bir demet dengelemesi yapılarak yöneltme bilinmeyenleri hesaplanmıştır. Sonra tanımlı hedef görüntü için görüntüler taranarak demet dengelemesinde kullanılmayan diğer test alanı noktalarının resim koordinatları otomatik olarak piksel altı doğrulukta ölçülmüş ve görüntü eşleme işlemi yapılarak karşılıklı görüntü ya da hedef noktaları belirlenmiştir. Son olarak sabit kamera pozisyonundan uzaysal ileriden kestirme dengelemesiyle sanki yeni noktaymış gibi noktaların üç boyutlu koordinatları hesaplatılmıştır.

Sistemin doğruluğu, 5.1 eşitlikleri kullanılarak X ve Y doğrultularında 18 ve 35 mikron ve Z doğrultusunda da 14 mikron olarak hesaplanmıştır. Şekil 5.2, hesaplanan koordinatlarla bilinen koordinatlar arasındaki farkları göstermektedir. Cisim noktalarının ortalama prezisyonu ise, 4.37 eşitlikleri kullanılarak X ve Y doğrultularında 21 ve 54 mikron ve Z doğrultusunda da 15 mikron olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.2: Hesaplanan ve bilinen koordinatlar arasındaki farklar

5.2 İnşaat Mühendisliğinde Örnek Uygulamalar

Geliştirilen sistemin test edilmesi amacıyla zemin numunelerinin dinamik bir hareket gösterdiği serbest basınç deneyleri ve gömülü esnek borularla çelik kirişin statik yük testi deneyleri olmak üzere üç farklı uygulama yapılmıştır.

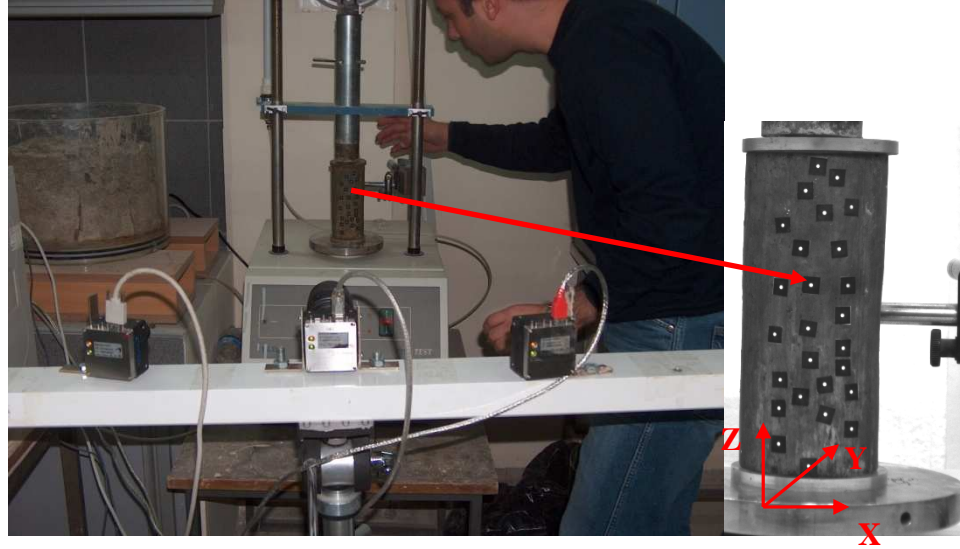
5.2.1 Serbest basınç deneyi

Serbest basınç deneyi (SBD), yanal bir gerilme uygulanmadan sadece eksenel yükleme altında zemin numunesine ait gerilme-şekil değiştirme ilişkisinin belirlendiği deney olarak bilinir. Bu deneylerde, zemin numunesi, SBD aletinin (Şekil 5.3) biri sabit, diğeri düşey yönde hareket edebilen iki yuvarlak plakası arasına yerleştirilmekte ve düşey yükte zemin numunesinin düşey eksenel boy kısılması, deney aleti üzerindeki deformasyon saatlerinden manuel olarak ölçülmektedir.



Şekil 5.3: Serbest basınç deney aleti

Y.T.Ü. Geoteknik Anabilim Dalı laboratuvarında, geliştirilen sistemin kullanıldığı 6 farklı zemin numunesinin yük altındaki davranışlarını inceleyen serbest basınç deneyleri yapılmıştır (Şekil 5.4). Sistem kalibrasyonundan sonra, deneylerin ilk üçünde 5 saniye diğer deneylerde ise 15 saniye aralıklarla görüntüler alınarak numune üzerindeki hedef noktalara ait üç boyutlu koordinat değerleri, sabit kamera pozisyonlarından uzaysal ileriden kestirme dengelemesiyle otomatik olarak hesaplatılmıştır. Sistem kalibrasyonunda kullanılan test alanı, görüntü alam eksenini yönündeki koordinat bileşeni Y eksenine olacak şekilde deney düzeneğine yerleştirilmiştir. Üç kameralı sistemin kullanıldığı bu deneylerde, kenarlardaki kameraların zemin numunesine olan mesafeleri yaklaşık 90 cm (görüntü ölçeği 1:50) iken, ortadaki kameranın cisim-kamera mesafesi yaklaşık 80 cm (görüntü ölçeği 1:55) civarında olmuştur. Numune üzerindeki siyah arka plan üzerinde beyaz dairesel şekillerden oluşan hedef noktaları, görüntüler üzerinde yaklaşık 6x6 piksellik bir alan kaplamaktadır. Her biri 4.5 dakika ila 37 dakikalık bir zaman aralığında gerçekleştirilen deneylere ait özet bilgi tablo 5.1’ de verilmiştir.



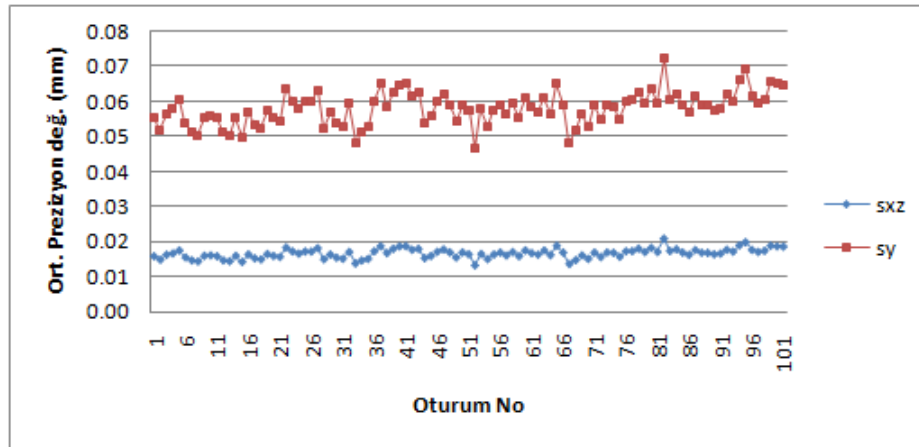
Şekil 5.4: Serbest basınç deneyi

Tablonun beşinci sütunu, her bir deney için ölçme oturumlarına ait resim koordinat düzeltmelerinin karesel ortalama hata değerlerinin ortalamasını gösterir. Koordinat düzeltmelerinin karesel ortalama hata değerleri, tüm ölçme oturumları için 0.02 pikselle 0.05 piksel aralığında elde edilmiştir. Tablonun altıncı, yedinci ve sekizinci sütunlarında ise, her bir deneye ait ölçme oturumları için hesaplanan cisim nokta koordinatlarının ortalama prezisyon değerlerinin o deney için hesaplanan

ortalamaları verilmiştir. Ortalama prezisyon değerleri, tüm deney boyunca neredeyse yatay bir hareket göstermektedir. Örneğin aşağıdaki grafik, 3 numaralı zemin numunesinin basınç deneyinde bütün ölçme oturumları için hesaplanmış nokta koordinatlarının ortalama prezisyon değerlerinin grafiksel gösterimini verir (Şekil 5.5). Benzer grafikler diğer deneyler içinde elde edilmiştir.

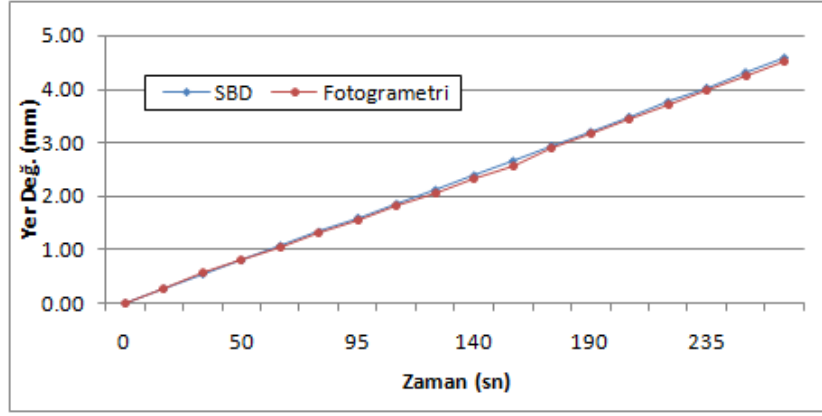
Tablo 5.1: Serbest basınç deneyleri özet bilgisi

Deney grubu	Toplam süre [sn]	Oturum sayısı	Hedef nokta sayısı	Koordinat düzeltmeleri K.O.H. [μm]	σ_x [mm]	σ_y [mm]	σ_z [mm]
Num.1	2230	448	22	0.35	0.024	0.098	0.021
Num.2	270	55	26	0.37	0.020	0.083	0.019
Num.3	500	101	23	0.27	0.016	0.058	0.017
Num.4	870	59	27	0.20	0.012	0.044	0.013
Num.5	420	29	21	0.18	0.010	0.036	0.011
Num.6	465	32	17	0.23	0.015	0.053	0.015

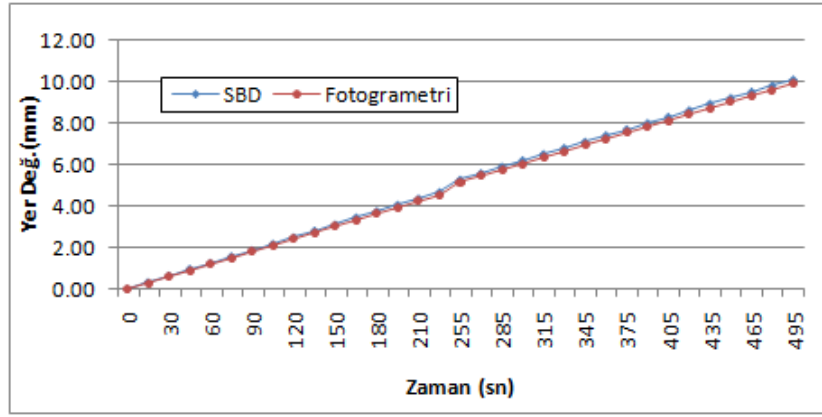


Şekil 5.5: Nokta koordinatlarının ortalama prezisyon değerleri

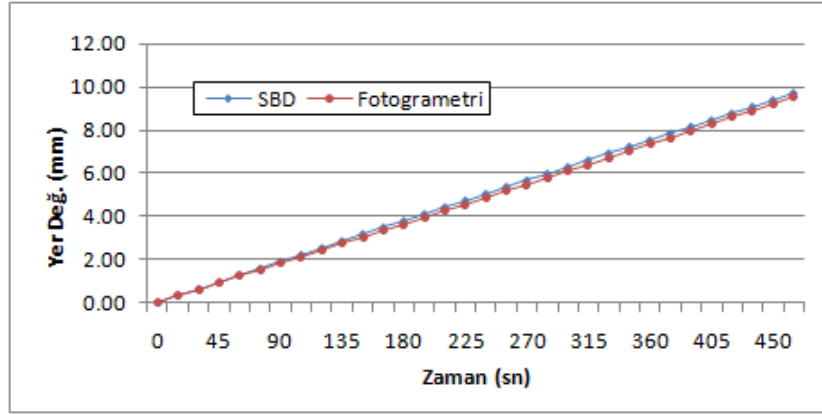
Numunenin düşey aksenal boy kısılması 3 deneyde belirli zaman aralıklarıyla serbest basınç deney aletinden de okunmuş ve numunenin en ucuna yapıştırılan hedef noktalara ait fotogrametrik sistemle elde edilen ölçme değerleriyle karşılaştırılarak (Şekil 5.6, Şekil 5.7, Şekil 5.8) ölçme değerlerinin uygunluğu görülmüştür.



Şekil 5.6: Zemin numunesi 2'ye ait ölçme sonuçlarının kıyaslanması



Şekil 5.7: Zemin numunesi 3'e ait ölçme sonuçlarının kıyaslanması



Şekil 5.8: Zemin numunesi 6' ya ait ölçme sonuçlarının kıyaslanması

Serbest basınç deneyleri sonucunda, düşey eksen yönündeki en büyük boy kısalması, yaklaşık 141 mm uzunluğundaki 4 numaralı zemin numunesinin basınç deneyinde, toplam 174 kpa yük altında 16.50 mm, en küçük boy kısalması ise yine yaklaşık aynı

boylardaki 2 numaralı zemin numunesinin deneyinde, toplam 100 kpa yük altında 4.50 mm olarak hesaplanmıştır.

5.2.2 Gömülü esnek boruların yük testi deneyleri

Y.T.Ü. Geoteknik Anabilim Dalı laboratuvarında gerçekleştirilen bir diğer çalışma gömülü esnek boruların yük altındaki davranışları üzerine olmuştur. Deneylerde klasik ölçme aracı doğrusal değişimli fark transformatörleri ile fotogrametrik sistem birlikte kullanılmış ve ölçme sonuçları karşılaştırılmıştır.

İçine esnek boruların yerleştirildiği deney kutusunun boyutları 500x700 mm'dir (Şekil 5.9). Fotogrametrik ölçmeler yapılabilmesi için kutunun ön yüzüne 20 mm kalınlığında pleksiglas cam yerleştirilmiştir. Yükleme için hava basıncı ile çalışan membran yastıklar kullanılmış ve kutu kapağı ve iki yan duvarında bu yastıklarla yüklemelerin yapılabilmesi için delikler açılarak farklı yükleme biçimlerinin uygulanabilmesi sağlanmıştır. Deneyler, üç farklı çapta boru (110 mm, 242 mm ve 312 mm) ve kum ve çakıldan oluşan iki farklı zemin malzemesi üzerine olmuştur.



Şekil 5.9: Deney kutusu ve esnek boru

Deneylerde, genellikle borunun içerisine yaklaşık yatay ve düşey konumlarda borunun çapını gösterecek biçimde yerleştirilen iki tane LVDT kullanılmış ve aşamalı yüklemeler altında kullanıcı müdahalesi ile LVDT ölçme okumaları yapılarak online olarak bilgisayar üzerinde bir tekst dosyaya kaydedilmiştir.

Fotogrametrik sistemle elde edilen ölçme değerleri serbest basınç deneyinden farklı olarak LVDT okumalarının da yapıldığı yükleme sonrası kullanıcı müdahalesiyle elde edilmiştir. Görüntülerin elde edildiği kamera düzenlemesiyle ilgili bilgiler yani kamera-cisim mesafeleri ve görüntü ölçeği bilgileri tablo 5.2’de verilmiştir. Tablonun ikinci sütunu, üç kameralı sistemin kenarlardaki kameralarının yaklaşık kamera-cisim mesafesini, dördüncü sütunda ortadaki kameranın yaklaşık mesafesini göstermektedir. Üçüncü ve beşinci sütunlarsa kenar ve ortadaki kameralarla elde edilen görüntülerin yaklaşık görüntü ölçeğini verir.

Tablo 5.2: Görüntülerin elde edildiği kamera düzenlemesi

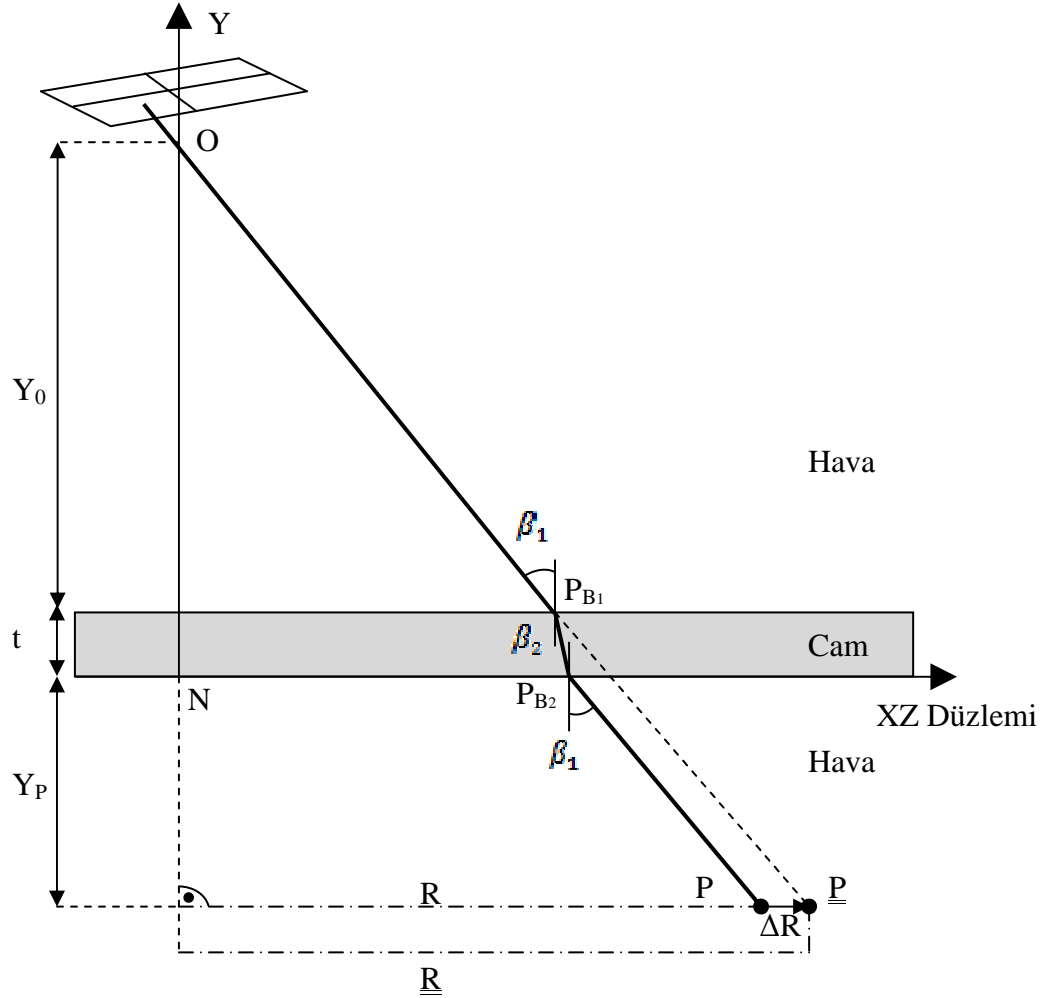
Deney grubu	Mesafe	Görüntü ölçeği	Mesafe	Görüntü ölçeği
312 mm	135	1:85	125	1:100
242 mm	125	1:75	110	1:85
110 mm	95	1:60	85	1:60

Gömülü esnek boruların yük testleri süresince sistemden elde edilen ölçme değerlerlerinde camın kırılma etkisi dikkate alınmamış daha sonra bu etkiyi gidermek için bütün deneyler için ayrı bir değerlendirme daha yapılmıştır.

Cisim noktasından çıkan ışının farklı kırılma indislerine sahip ortamlardan geçerek kameraya geldiği fotogrametri uygulamalarına literatürde çok ortamlı fotogrametri (multimedia photogrammetry) denmektedir. Maas (1995) tarafından cismin sıvıda, kameranın havada konumlandırıldığı ve bu iki ortamın düzlemsel ve paralel yüzlü bir camla bölüdüğü çok ortamlı fotogrametrinin standart durumuyla sınırlı bir çözüm önerilmiştir. Koordinat sisteminin XZ düzlemi, hava-cam ya da cam-sıvı ara yüzüne paralel olacak şekilde uygun lokal bir koordinat sisteminin seçilmesiyle oldukça basit bir çözüm mümkün olur. Çözümde kameranın nadir noktasına göre her cisim noktası için radyal bir ötelenme hesaplanır ve bu değerler kolinearite eşitliklerinde bir düzeltme terimi olarak kullanılır.

Geliştirilen yazılımda camın kırılma etkisini gidermek için bu yönteme benzer bir algoritma kullanılmış ve deneylerde test alanı pleksiglas cama paralel konumda yerleştirilmiştir. Algoritmanın çalışma prensibi şekil 5.10’da gösterilmiştir. Eğer cisim uzayındaki P (X, Y, Z) noktası, \underline{P} (\underline{X} , \underline{Y} , \underline{Z}) noktasına ötelenirse kolinearite eşitlikleri, ötelenmiş \underline{P} noktası cisim koordinatları kullanılarak P noktası için

uygulanabilir. Ancak XZ düzlemine paralel olan ΔR ötelemesi her kameranın nadir noktasına göre her nokta için hesaplanmak zorundadır.



Şekil 5.10: Çok ortamlı geometrinin düzeltilmesi için radyal öteleme

Şekil 5.10'dan,

$$Y_0 \cdot \tan \beta_1 + t \cdot \tan \beta_2 + Y_p \cdot \tan \beta_1 = R \quad (5.2)$$

$$(Y_0 + t + Y_p) \cdot \tan \beta_1 = \underline{\underline{R}} \quad (5.3)$$

ve Snell yasasına göre,

$$n_1 \cdot \sin \beta_1 = n_2 \cdot \sin \beta_2 \quad (5.4)$$

eşitlikleri ile çok ortamlı geometriyi tanımlayan sistem tamamlanır. 5.2, 5.3 ve 5.4 eşitlikleri trigonometrik fonksiyonlar nedeniyle iteratif olarak çözülür. \underline{P} noktası için ilk yaklaşık değer olarak P noktası seçilirse,

$$R_{(0)} = \sqrt{(X_P - X_0)^2 + (Z_P - Z_0)^2} \quad (5.5)$$

olur. İlk iterasyonda n_1 yani hava ortamındaki geliş açısı,

$$\beta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{R_{(0)}}{Y_0 + t + Y_P} \right) \quad (5.6)$$

eşitliği ile hesaplanır. Snell yasasına göre cam ortamındaki geliş açısı ise,

$$\beta_2 = \sin^{-1} \left(\frac{n_1}{n_2} \cdot \sin \beta_1 \right) \quad (5.7)$$

ve $R_{(0)}$ için düzeltme,

$$\Delta R = \frac{t \cdot \sin(\beta_1 - \beta_2)}{\cos \beta_1 \cdot \cos \beta_2} \quad (5.8)$$

$$\underline{R} = R_{(0)} + \Delta R \quad (5.9)$$

eşitlikleri ile hesaplanır. 5.5 ve 5.9 eşitlikleri ardışık ΔR değerleri arasında önceden belirlenen bir eşik değer (0.001 mm) kalıncaya kadar iteratif olarak kullanılır. Hesaplamalarda havanın kırılma indisi 1.00029, pleksiglas camın kırılma indisi ise 1.49 olarak alınmıştır. Son olarak ötelenmiş P noktasının cisim koordinatları,

$$\underline{X}_P = X_0 + (X_P - X_0) \cdot \underline{R}/R \quad (5.10)$$

$$\underline{Z}_P = Z_0 + (Z_P - Z_0) \cdot \underline{R}/R \quad (5.11)$$

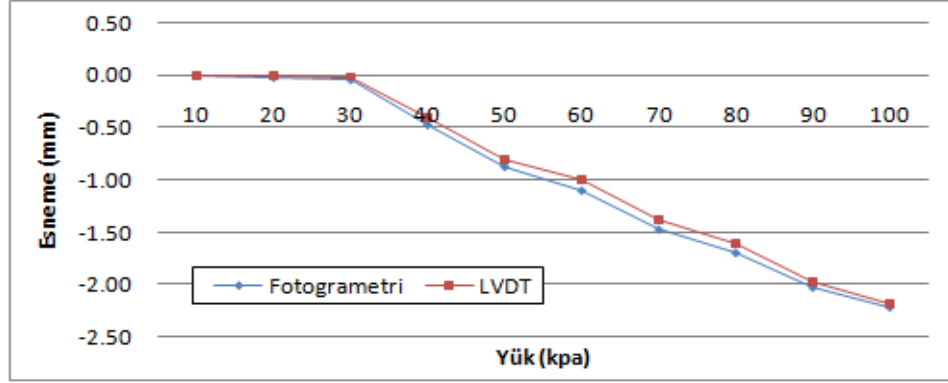
eşitlikleri ile hesaplanır. Artık kolinearite koşulu $P(X, Y, Z)$ noktası yerine radyal olarak ötelenmiş $\underline{P}(\underline{X}, \underline{Y}, \underline{Z})$ noktası ile kullanılacaktır.

Toplam 27 adet deney ve deneylerde her biri 10 kPa'lık en az 9 yükleme yapılmıştır. Yük uygulamaları, yanal yükleme yapılan bir deney dışında düşey yükleme biçiminde uygulanmıştır. Boruların yük altındaki davranışlarının belirlenmesi amacıyla düşey ve yatay yönde yapılan LVDT ölçme okumalarıyla, fotogrametrik sistemin ölçme sonuçlarından elde edilen karşılaştırma değerleri ve deney bilgileri tablo 5.3'de verilmiştir. Karşılaştırma değerleri, LVDT'lerin yerleştirildiği konumları ya da boruların yaklaşık yatay ve düşey çaplarını gösteren hedef noktaların düşey ve yatay yönlü koordinat değerlerinin yüklemeler arasındaki farkları kullanılarak elde edilmiştir.

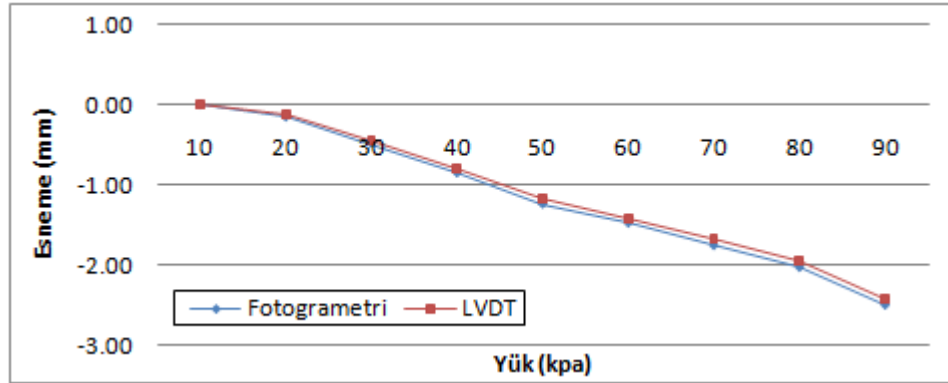
Tablo 5.3: Fotogrametrik sistem ölçmeleriyle LVDT okumalarının kıyaslanması

Boru çapı [mm]	Zemin	Yükleme tipi	Toplam yükleme [kPa]	LVDT düşey okuma [mm]	ΔZ koordinat farkları [mm]	LVDT yatay okuma [mm]	ΔX koordinat farkları [mm]
312	Kum	Düşey	110	2.99	2.97	2.23	3.03
312	Kum	Düşey	110	1.59	1.65	1.15	1.73
312	Kum	Düşey	120	1.28	1.24	0.74	1.13
312	Kum	Düşey	120	2.47	2.51	2.04	2.60
312	Kum	Düşey	120	1.30	1.34	0.89	1.28
312	Kum	Düşey	180	1.89	1.71	1.25	1.76
312	Çakıl	Düşey	100	2.18	2.21	1.48	2.19
312	Çakıl	Düşey	110	1.16	0.94	0.46	0.94
312	Çakıl	Düşey	140	1.69	1.46	0.76	1.46
312	Çakıl	Düşey	150	1.42	1.31	0.63	1.28
312	Çakıl	Düşey	140	1.27	1.12	0.43	1.16
312	Çakıl	Düşey	150	1.11	0.98	0.30	1.00
242	Kum	Düşey	110	2.56	2.48	1.96	2.46
242	Kum	Düşey	100	0.92	0.93	0.41	0.88
242	Kum	Düşey	90	0.70	0.73	0.26	0.72
242	Çakıl	Düşey	90	2.42	2.49	1.47	2.48
242	Çakıl	Düşey	100	0.71	0.62	1.03	0.60
242	Çakıl	Düşey	150	0.91	0.93	1.49	0.87
242	Çakıl	Yanal	90	-	-	3.66	3.66
110	Kum	Düşey	150	1.54	1.53	-	1.57
110	Kum	Düşey	120	1.22	1.16	-	1.16
110	Kum	Düşey	160	1.02	1.05	-	1.05
110	Kum	Düşey	150	1.21	1.22	-	1.18
110	Çakıl	Düşey	90		1.37	-	1.39
110	Çakıl	Düşey	110		0.84	-	0.87
110	Çakıl	Düşey	120		0.66	-	0.67
110	Çakıl	Düşey	120		0.89	-	0.87

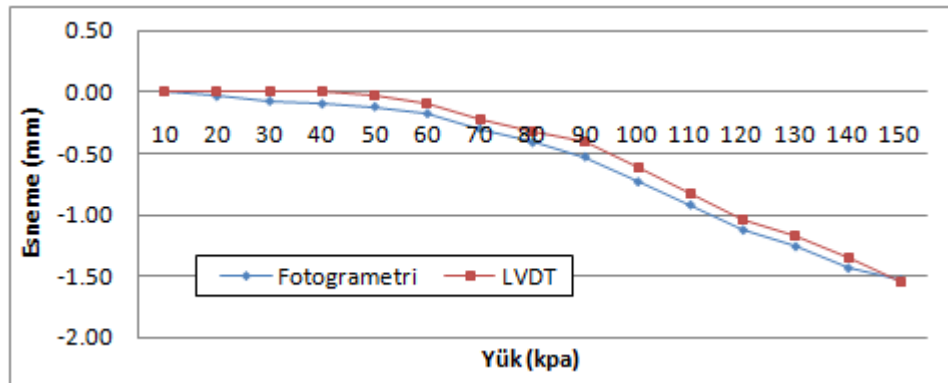
Düşey konumlu LVDT okumalarıyla fotogrametrik sisteme ait ölçme sonuçlarının kıyaslanması için örnek grafikler aşağıda verilmiştir (Şekil 5.11 Şekil 5.12, Şekil 5.13). Benzer grafikler farklı zemin malzemelerinin kullanıldığı üç farklı çaptaki borunun bütün yük testi deneyleri için elde edilebilir.



Şekil 5.11: 312 mm çaplı esnek boruya ait ölçme sonuçları karşılaştırması



Şekil 5.12: 242 mm çaplı esnek boruya ait ölçme sonuçları karşılaştırması



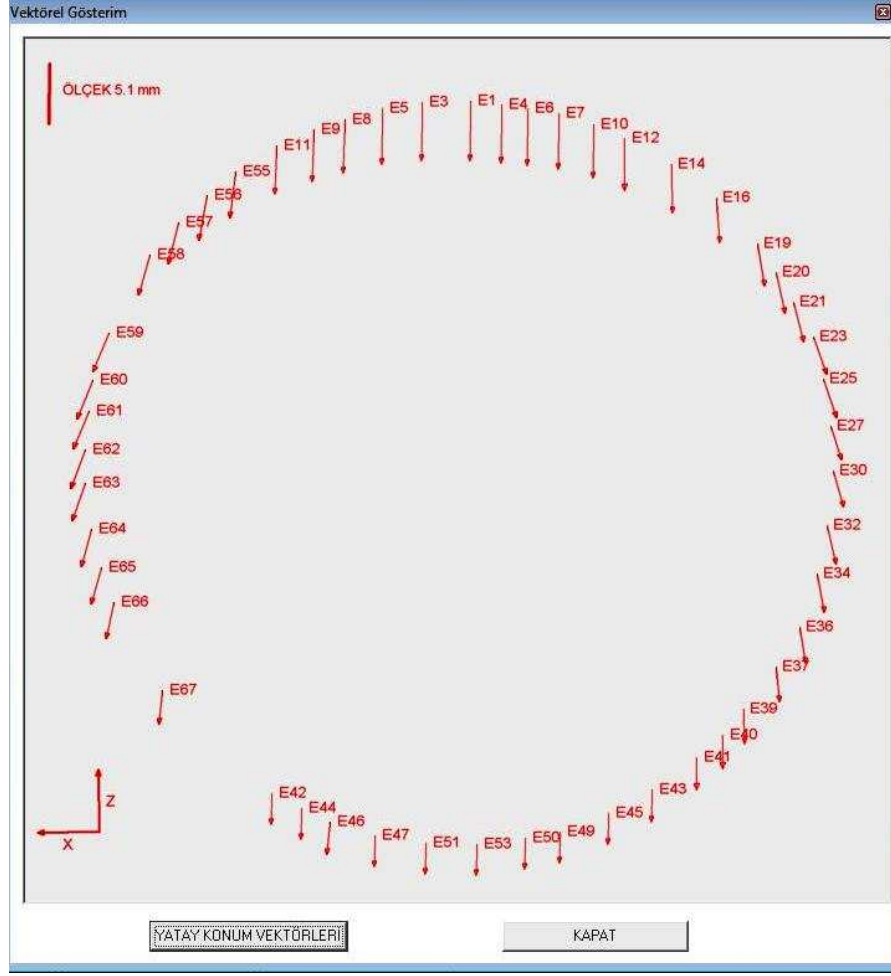
Şekil 5.13: 110 mm çaplı esnek boruya ait ölçme sonuçları karşılaştırması

DüŖey konumda yerleŖtirilen LVDT okumaları, fotogrametrik sistem ölçmeleriyle çok yüksek oranda çakışırken, aynı deneylerde yatay yöndeki LVDT okumalarının fotogrametrik sistem ölçmeleriyle büyük oranda uyuşmadığı görülmüştür. Dolayısıyla iki LVDT'nin böyle deneylerde birlikte kullanılmasının çok sağlıklı olmadığı düşünülmektedir.

DüŖey yük altında kalan gömülü esnek borular, neredeyse eşit değerlerde düŖey ekseninde kılalma ve yanal ekseninde uzama biçiminde ovalleşerek Ŗekil değiştirmektedir. Örneğin, zemin malzemesi olarak çakılın kullanıldığı 312 mm çaplı gömülü silindirik borunun birinci düŖey yükleme deneyinde, boru üzerine yapıştırılan hedef noktaların fotogrametrik sistemle belirlenen ilk ve son ölçme oturumlarına ait XZ düzlemindeki yer değiştirme vektörleri Ŗekil 5.14'de gösterilmiştir. Yer değiştirme vektörlerini gösteren benzer Ŗekiller, yazılımın deney sonuçlarını değerlendirme modülüyle kayıt edilmiş deney sonuçları dosyası kullanılarak bütün deneyler için elde edilebilir. Yanal yükleme altında ise gömülü esnek boru düŖey yüklemelerin tersine düŖey ekseninde uzama ve yanal ekseninde kılalma biçiminde ovalleşerek Ŗekil değiştirmektedir.

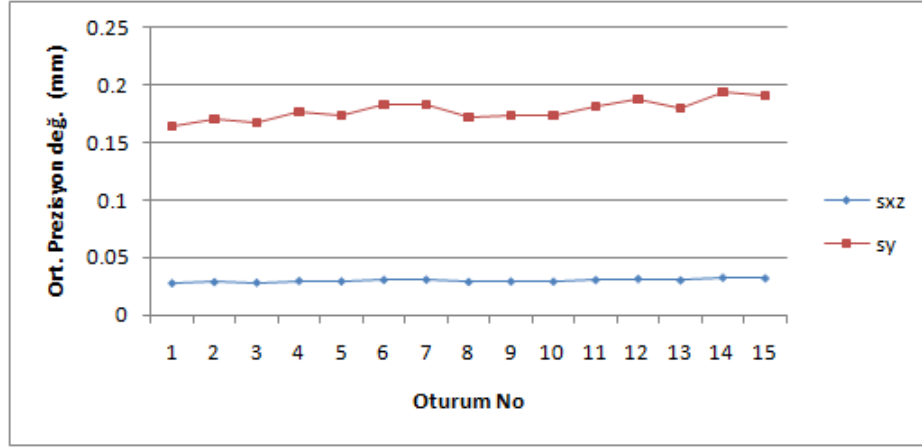
DüŖey yük deneylerinde, esnek borular üzerine yapıştırılan hedef noktaların Z koordinat bileşenindeki en büyük yer değiştirmeleri, boruların en üst bölümlerinde, en küçük yer değiştirmelerse boruların en alt bölümlerinde gözlenmiştir. Bütün deneyler sonrasında, kum zemin malzemesinin kullanıldığı 300 mm çaplı esnek borunun yük testi deneyinde, toplam 130 kpa yük altında 8.18 mm olarak belirlenen yer değiştirme ölçmesi, en büyük ölçme değeri olmuştur. Farklı zemin malzemeleri kullanılmasının esnek boruların yük altındaki esneme değerleri üzerinde çok anlamlı bir etkisi olmadığı görülürken yer değiştirmelerin kum zemin malzemesinin kullanıldığı deneylerde daha büyük değerlerde olduğu belirlenmiştir.

Fotogrametrik değerlendirmelerde, üç farklı çaptaki borunun bütün yük testi deneylerinde, her bir ölçme oturumu için resim koordinat düzeltmelerinin karesel ortalama hata değerleri, 0.02 pikselle 0.06 piksel aralığında elde edilmiştir.



Şekil 5.14: Yer değiştirme vektörlerinin yazılım görüntüsü

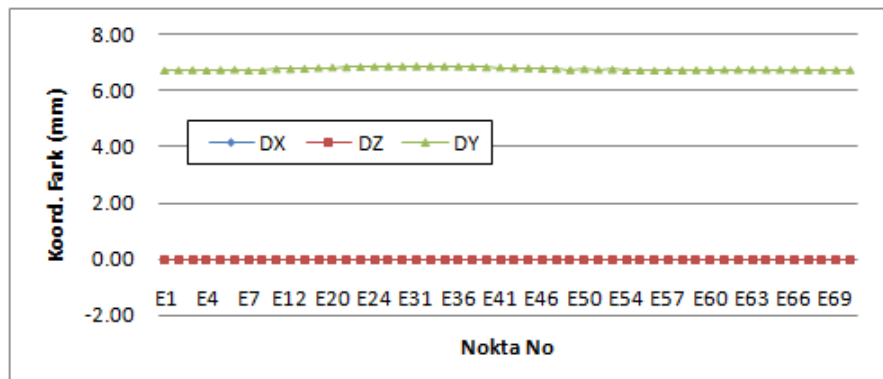
312 ve 242 mm çaplı esnek boruların deneylerinde, yine her bir ölçme oturumu için cisim nokta koordinatlarının ortalama prezisyon değerleri, X doğrultusunda 20-39 mikron, Y doğrultusunda 96-222 mikron ve Z doğrultusunda da 21-66 mikron aralığında hesaplanmıştır. 110 mm çaplı esnek borunun yük testi deneylerindeyse, ölçme oturumları için cisim nokta koordinatlarının ortalama prezisyon değerleri, X ve Z doğrultularında 13-24 mikron, Y doğrultusunda da 66-106 mikron aralığında hesaplanmıştır. Ölçme oturumlarına ait ortalama prezisyon değerleri, tüm deney boyunca neredeyse yatay bir hareket göstermektedir. Örneğin, çakıl zemin malzemesinin kullanıldığı 312 mm çaplı gömülü silindirik borunun düşey yükleme deneyinde, bütün ölçme oturumları için hesaplanan nokta koordinatlarının ortalama prezisyon değerlerinin grafiksel gösterimi Şekil 5.15’de verilmiştir. Benzer grafikler diğer deneyler içinde elde edilmiştir.



Şekil 5.15: Nokta koordinatlarının ortalama prezisyon değerleri

Esnek boruların yük testi deneylerinde, özellikle koordinat sisteminin Y koordinat bileşenindeki ortalama prezisyon değerleri, sistemden beklenen değerlere göre daha kaba çıkmıştır. Bu sonuca, deney kutusu içerisinde kullanılan zemin malzemesinin yükleme testleri boyunca pleksiglas camı çizmesi ve görüntü kalitesinin camdan etkilenmesi, camın kırılma etkisinin modellenmesinde kullanılan pleksiglas camla test alanının paralel olma şartından sapmalar olması ve pleksiglas camın kırılma indisinin bütün cam yüzeyi boyunca homojen olmaması gibi olumsuz etkilerin sebep olduğu düşünülmektedir.

Camın kırılma etkisinin ölçme sonuçları üzerindeki etkisini belirleyebilmek için örnek bir uygulamada camın kırılma etkisinin hesaba katıldığı ve katılmadığı fotogrametrik değerlendirmeler arasındaki farklara bakılmıştır (Şekil 5.16).



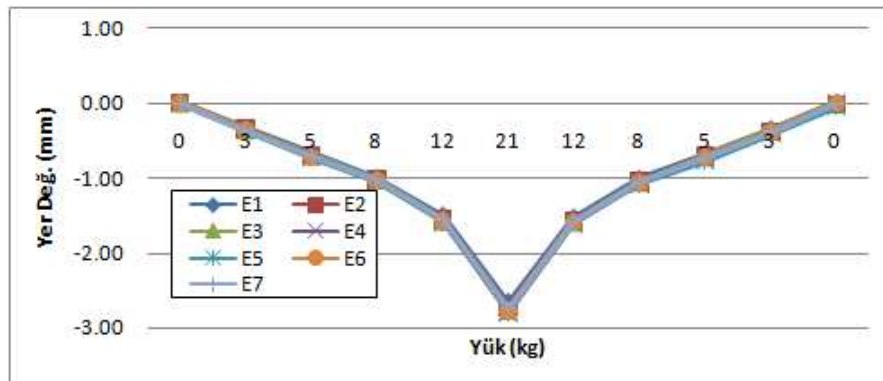
Şekil 5.16: Camın kırılma etkisinin ölçme sonuçları üzerindeki etkisi

Şekil 5.16'dan de görüleceği gibi koordinat sisteminin X ve Z bileşenleri yönündeki farklar neredeyse 0'a eşittir. Asıl etki koordinat sisteminin Y yani görüntü alma eksenini yönündeki koordinat bileşeninde olmaktadır. Deneylerde Y koordinat bileşeninde yaklaşık 7 mm'lik farklar elde edilmiştir. Dolayısıyla camın kırılma etkisi dikkate alınmadığında nokta olması gereken konumdan yaklaşık 7 mm daha geride hesaplanmaktadır.

5.2.3 Çelik kirişin yük testi deneyleri

İ.T.Ü. Yapı Anabilim Dalı laboratuvarında gerçekleştirilen son çalışma ise yaklaşık 2.40 m boyutlarında çelik bir kirişin yaklaşık orta bölümünün yük altındaki davranışlarının belirlenmesi üzerine olmuştur. Kirişin bu bölümünde, yaklaşık 6 cm aralıklı 7 hedef noktası kullanılmış ve toplam 3 deney yapılmıştır.

Görüntü alma eksenini yönündeki koordinat bileşeni Y eksenini olacak şekilde yerleştirilen test alanını kullanarak yapılan sistem kalibrasyonundan sonra 5 farklı ağırlık sırayla kiriş üzerine yerleştirilmiş ve her yük uygulamasından sonrada fotogrametrik sistemle ölçmeler gerçekleştirilmiştir. Deneylerde, kenarlardaki kameraların çelik kirişe olan mesafeleri yaklaşık 110 cm (görüntü ölçeği 1:70), ortadaki kamerasına yaklaşık 105 cm (görüntü ölçeği 1:60) olacak biçimde bir kamera düzenlemesiyle görüntüler elde edilmiştir. İlk iki deneyde, en son yerleştirilen ağırlık ilk kaldırılan ağırlık olacak biçimde bir sıralamayla ağırlıklar kaldırılarak tersine bir yükleme daha uygulanmıştır. Çelik kiriş üzerine yapıştırılan hedef noktaların ikinci yükleme deneyine ait düşey yöndeki yer değiştirmelerinin yüke bağlı değişimleri Şekil 5.17'de gösterilmiştir.



Şekil 5.17: Düşey yöndeki yer değiştirmelerin yüke bağlı değişimleri

Deneylere ait özet bilgiler tablo 5.4’ de verilmiştir. Tablonun üçüncü ve dördüncü sütunları, her bir deney için ölçme oturumlarına ait resim koordinat düzeltmelerinin karesel ortalama hata değerlerinin ortalamasını gösterir. Resim koordinat düzeltmelerinin karesel ortalama hata değerleri, tüm ölçme oturumları için 0.03 pikselle 0.04 piksel aralığında elde edilmiştir. Tablonun beşinci, altıncı ve yedinci sütunlarında ise, her bir deneye ait ölçme oturumları için hesaplanan cisim nokta koordinatlarının ortalama prezisyon değerlerinin o deney için hesaplanan ortalamaları verilmiştir.

Tablo 5.4: Çelik kirişin yükleme deneyleri özet bilgisi

Deney no	Oturum sayısı	x koordinat düzeltmeleri K.O.H. [μ m]	y koordinat düzeltmeleri K.O.H. [μ m]	σ_x [mm]	σ_y [mm]	σ_z [mm]
Deney1	12	0.29	0.29	0.019	0.069	0.020
Deney2	11	0.29	0.26	0.019	0.072	0.020
Deney3	6	0.34	0.29	0.021	0.076	0.022

Fotogrametrik sistemin test edilmesi amacıyla birinci deneyde klasik deformasyon ölçme aleti ekstansometre de kullanılmış ve söz konusu aletle çelik kirişin yaklaşık orta noktasının düşey yönlü yer değiştirmesi 2.90 mm olarak ölçülürken fotogrametrik sistemle yine aynı konumdaki hedef noktasının yer değiştirmesi 2.87 mm olarak ölçülmüştür. Üç deneyde de hedef noktalarının tümünün düşey yönlü hareketleri neredeyse birbirlerine eşit değerlerde elde edilmiştir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çalışmada, yük testleri süresince konumsal yer değiştirmeye konu olan hedef noktaların fotogrametrik teknikler yardımıyla otomatik olarak ölçülmesi ve izlenmesi için geliştirilen sistem ve kullanılan yöntemler sunulmuştur. Görüntülerin elde edilmesinden üç boyutlu cisim koordinatlarının hesabına kadar bütün işlem aşamaları geliştirilen sistem içerisinde çözümlenebilmektedir.

Sistemle gerçekleştirilen ölçme işlemi, başlangıç offline aşaması ve online fotogrametrik aşama olmak üzere iki işlem adımından oluşmaktadır. Offline fotogrametrik işlem aşaması, kalibrasyon parametreleriyle yöneltme bilinmeyenlerinin belirlendiği sistem kalibrasyonu ve bir başlangıç sıfır okumasını içerir. Sıfır okumasından, noktaların etiketlenmesi ve başlangıç üç boyutlu cisim koordinatlarının hesabı işlemi anlaşılmalıdır. Online fotogrametrik işlem aşamasındaysa sistem, yazılım parametreleriyle tanımlanan bir zaman aralığında kullanıcı müdahalesi olmadan sürekli ölçmeler ya da statik yük deneylerinde her yükleme sonrası tek butona tıklamak suretiyle bir oturumluk ölçmeler yapar.

Geliştirilen sistemin işlevselliğini göstermek için üç farklı uygulama yapılmıştır. Bunlar, yapı bileşenin dinamik bir hareket gösterdiği serbest basınç deneyleri ve gömülü esnek borularla çelik kirişin statik yük testi deneyleridir. Serbest basınç deneyleri gibi dinamik yük deneylerinde yapı elemanları üzerindeki hedef noktaların doğru bir şekilde ölçülebilmesi için görüntülerin eş zamanlı alınması zorunludur. Sistemde kullanılan kameralarla görüntüler eşzamanlı alınmasına rağmen kameralar elektronik olarak senkronize edilemediği için elde edilen görüntüler arasında bir zaman gecikmesi (maksimum 46 ms) oluşmaktadır. Dolayısıyla sistemin kullanılacağı dinamik uygulamalarda bu fark göz önüne alınmalı ya da kameraların elektronik olarak senkronizasyonu (donanımsal olarak) sağlanmalıdır.

Kameraların kalibrasyonu eş zamanlı olarak yapılmış ve yöntem olarak da ek parametrelerle demet dengelemesi yöntemi kullanılmıştır. Bir kalibrasyon uygulamasında, kamera yöneltme bilinmeyenlerinin ilk yaklaşık değerlerinin hesaplanabilmesi için her görüntüde test alanının uygun dağılımlı 6 noktasının resim koordinatlarının ölçülmesi gerekmektedir. Aslında kalibrasyon işleminde zaman harcanan kısımda bu aşamadır. Daha sonra geriye hesap yöntemiyle diğer test alanı noktaları yazılım tarafından otomatik olarak ölçülmekte ve ek parametrelerle demet dengelemesi çok kısa bir sürede tamamlanabilmektedir.

Sistemin kullanıldığı ölçme uygulamalarında özel tasarlanmış yani siyah arka plan üzerinde beyaz benek bulunan hedef nokta işaretleri kullanılmıştır. Geliştirilen yazılımla bu biçimdeki hedef noktalara ait resim koordinatlarının piksel altı doğrulukta otomatik olarak ölçülmesi, yoğunluk ağırlıklı merkez belirleme metoduyla basit ve hızlı bir şekilde yapılabilmektedir. Örneğin, üç görüntüden (780x582 piksel) oluşan bir projede, tanımlı hedef görüntü için görüntü tarama işlemi sonucunda toplam 100 (36+32+32) görüntü noktasına ait piksel altı doğrulukta resim koordinat ölçmeleri 7.98 saniye gibi kısa bir sürede gerçekleştirilebilmiştir. Bu işlem sonucunda görüntüler üzerindeki tüm hedef görüntülere ait konum bilgileri belirlenirken yalnız bir ölçme hedef görüntüsüne ait değildir.

Uygulanan otomatik eşleme işleminin amacı ise ilgili yapı elemanını kapsayan çoklu görüntülerdeki karşılıklı noktaların belirlenmesidir. Kabul edilen teknik Sabel (1999) tarafından önerilen epipolar plan açıları yöntemi olmuştur. Bu yöntem hem çok hızlıdır hem de dijital kameralar kullanıldığı zaman karşılıklı noktaların belirlenmesinde olumsuz etkileri olan mercek distorsiyonlarını hesaba katmaktadır.

Üç boyutlu cisim koordinatlarının hesaplanması ve noktaların izlenmesi amacıyla uzaysal ileriden kestirme dengelemesi kullanılmıştır. Bu yöntemde kamera yöneltme ve kalibrasyon parametreleri sabit kabul edilir. Sistem kalibrasyonu ve sıfır okumasından sonra, yük altındaki yapı elemanının görüntülerin elde edilmesi, işaretli hedef noktaların resim koordinatlarının ölçmesi ve bu noktaların üç boyutlu cisim koordinatları hesabı işlemini içeren online fotogrametrik işlem aşaması gerçek zamana yakın çözümlenebilmektedir. Örneğin, 3 kameralı sistemimizde, görüntülerin elde edilmesini de içeren 20 hedef noktasına ait üç boyutlu koordinatların hesabı işlemi 0.5 saniyede gerçekleştirilebilmiştir. Her bir ölçme oturumunda bir önceki

oturuma ait hedef noktaların resim koordinatlarından yararlanılmıştır. İzleme algoritmasının doğru çalışabilmesi için hedef noktalardaki hareketin bir önceki ölçme oturumuna ait aynı hedef görüntü noktasını merkez alan arama penceresi sınırları içinde olması gerekmektedir. Dolayısıyla noktaların büyük sıçramalar ya da hareketler gösterdiği dinamik uygulamalarda hedef noktaların cisim koordinatlarını ölçmek için yazılımda tanımlan zaman aralığı çok kısa tutulmalıdır.

Sistem bundan sonra yapılacak çalışmalarda hem yazılım hem donanım açısından geliştirilmeye uygundur. Ölçülecek cismin boyutuna bağlı olarak istenen görüntü derinliğinin sağlanabilmesi için farklı odak uzaklığına sahip mercekler ya da farklı kameralar sistemde kullanılabilir veya sisteme eklenebilir. Üstelik günümüzde bazı markalara ait alan taramalı video kameralar (Dragonfly) birbirleriyle otomatik olarak senkronize de olabilmektedir.

Daha gelişmiş kamera ve bilgisayarların kullanılması, kameraların donanımsal olarak senkronizasyonunun sağlanmasıyla insan hareketlerinin modellenmesinden çok hızlı gelişen dinamik olayların izlenmesine kadar birçok bilgisayarlı görüş uygulamasında geliştirilen sistemin kullanılabileceği düşünülmekte ve bu alanlarda çalışmalar yapılması planlanmaktadır.

KAYNAKLAR

- Abdel-Aziz, Y. I. and Karara, M.,** 1971. Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry, *American Society of Photogrammetry Symposium on Close-Range Photogrammetry*, pp. 420-475.
- Albert J., Maas H.-G., Schade, A. and Schwarz, W.,** 2002. Pilot studies on photogrammetric bridge deformation measurement, *Proceedings of the 2nd IAG Commission IV Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering*, Berlin, Germany.
- Atkinson, K.B.,** 1996. Close Range Photogrammetry and Machine Vision. Whittles Publishing, Scotland, 384 pages.
- Benning, W., Lange, J., Schwermann, R., Effkemann, C. and Görtz S.,** 2004. Monitoring crack origin and evolution at concrete elements using photogrammetry, *XXth congress of ISPRS*, Istanbul, ISPRS proceedings XXXV Part B, pp. 678-683.
- Beyer, H. A.,** 1992. Accurate calibration of CCD cameras, *Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR '92*, pp. 97-101, Champaign, USA.
- Chen, J., Clarke, T.A. and Robson, S.,** 1993. An alternative to the epipolar line method for automatic target matching in multiple image 3-D measurement, *Optical 3-D Measurement Techniques II*, (Gruen, A., Kahmen, H., eds.), Wichmann, Karlsruhe, pp. 197-204.
- Clarke, T.A.,** 1994. An analysis of the properties of targets uses in digital close range photogrammetric measurement, *Videometrics III*. Boston, SPIE Vol. 2350, pp. 251- 262.

- Clarke, T.A., Cooper, M.A.R. and Fryer, J.G.,** 1993. An estimator for the random error in subpixel target location and its use in the bundle adjustment, *Optical 3-D measurements techniques II*, Pub. Wichmann, Karlsruhe, pp. 161-168.
- D'Apuzzo, N.,** 2003. Surface measurement and tracking of human body parts from multi station video sequences, *Ph.D. Thesis*, Nr. 15271, Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH Zurich, Switzerland.
- Ergün, B. ,** 2003. Yakın resim fotogrametrisinde mikro-fotogrametrik uzman sistem tasarımı, tesisi ve kalibrasyonu; *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Fraser, C. S., Shortis, M. R. and Ganci, G.,** 1995. Multi-sensor system self-calibration, *In Video-metrics IV*, pages 2–18. SPIE.
- Fraser, C. S.,** 1997. Digital camera self-calibration“, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **52**, No. 4, pp.149-159.
- Fraser, C.S. and Shao, J.,** 1997. An Image mensuration strategy for automated vision metrology, *Optical 3D Measurement Techniques IV*, Heidelberg, Germany, Wichmann Verlag, 187-197.
- Fraser, C. S. and Riedel, B.,** 2000. Monitoring the thermal deformation of steel beams via vision metrology, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **55**(4), 268-276
- Fraser, C.S.,** 2001. Automated offline digital close-range photogrammetry: Capabilities and applications, *3rd International Image Sensing Seminar on New Development in Digital photogrammetry*, Gifu, Japan.
- Fraser, C. S. and Brizzi, D.,** 2003. Photogrammetric monitoring of structural deformation, The federation square atrium Project, *Proceedings of Optical 3D Measurement Techniques*, Vol 1, 22-25 September, Zurich, Switzerland, pp 89-96.

- Furnee, E.H., Jobbagy, A. and Sabel, J.C.,** 1997. Marker-referred movement measurement with grey-scale coordinate extraction for high-resolution real-time 3D at 100 Hz, *SPIE Proceedings*, Vol. 3173, pp 357-369.
- Ganci, G. and Brown, J.,** 2002. Developments in non-contact measurement using videogrammetry, *Boeing Large Scale Metrology Seminar*.
- Godding, R.,** 1999. Geometrical calibration and orientation of digital imaging systems, AICON GmbH, Germany.
- Gonzalez, R.C. and Woods, R.E.,** 1992. Digital image processing, Addison-Wesley, pp 418-423.
- Gruen, A.,** 1997. Fundamentals of videogrammetry—a review, *Human Movement Science*, **16**, pp. 155–187.
- Habib, A. and Morgan, M.,** 2003. Automatic calibration of low-cost digital cameras, *Journal of Optical Engineering*, **42(4)**, 948-955.
- Hampel, U. and Maas, H.-G.,** 2003. Application of digital photogrammetry for measuring deformation and cracks during load tests in civil engineering material testing, *6th Conference on Optical 3-D Measurement Techniques*, Swiss Federal Institute of Technology, Zürich, 22-25.9., Vol. II, pp. 80-88.
- Külür, S.,** 1985. Fotogrametrik ve Fotogrametrik Olmayan ölçmelerin ortak değerlendirilmesi, *Doktora Tezi*, İTÜ İnşaat Fakültesi Matbaası, 1985.
- Kraus, K.,** 1997. Photogrammetry, vols 1, Bonn, Dümmler, ISBN 3-427-78686-6, 78653-6.
- Maas, H.-G.,** 1995. New developments in multimedia photogrammetry, *Optical 3-D Measurement Techniques III* (Eds.: A. Grün, H. Kahmen), Wichmann Verlag, Karlsruhe.
- Maas, H.-G., and Niederöst, M.,** 1997. The accuracy potential of large format still video cameras, *Videometrics V*, SPIE Proceedings Series, Volume 3174.

- Maas, H.-G.**, 1998. Photogrammetric techniques for deformation measurements on masonry reservoir walls, *The Proceedings of the IAG Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering*, Eisenstadt, Austria, pp. 319–324.
- Maas, H.-G. and Hampel, U.**, 2006. Photogrammetric Techniques in Civil Engineering Material Testing and Structure Monitoring, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. **72**, No. 1, pp. 39-45.
- Mason, S.**, 1995. Conceptual model of the convergent multistation network configuration task, *Photogrammetric Record*, **15**(86), 277–299.
- McGlone, J.**, 2004. Manual of Photogrammetry, 5 th Edition, American Society of Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, Maryland, USA, 1151 pages.
- Mikhail, E., Bethel, J. and M. J.C.**, 2001. Introduction to Modern Photogrammetry, John Wiley & Sons, Inc., 479 p.
- Mills, J. P., Newton, I. and Peirson, G. C.**, 2001. Pavement deformation monitoring in a rolling load facility, *Photogrammetric Record*, **17**(97), 7-24.
- Niederöst, M. and Maas, H.-G.**, 1997. Automatic deformation measurement with a digital still video camera, *Optical 3-D Measurement Techniques IV*, Wichmann Verlag, Karlsruhe, pp 266-271.
- Otepka, J.**, 2001. Algorithms and their implementation in an automated close-range photogrammetric system, *Diploma thesis*, Vienna University of Technology.
- Otepka, J.O., Hanley, H.B., ve Fraser, C.S.**, 2002. Algorithm developments for automated offline vision metrology, *Proceedings of the ISPRS Commission V Symposium*, ISPRS, Corfu, Greece, September 1-2, pp. 60-67.

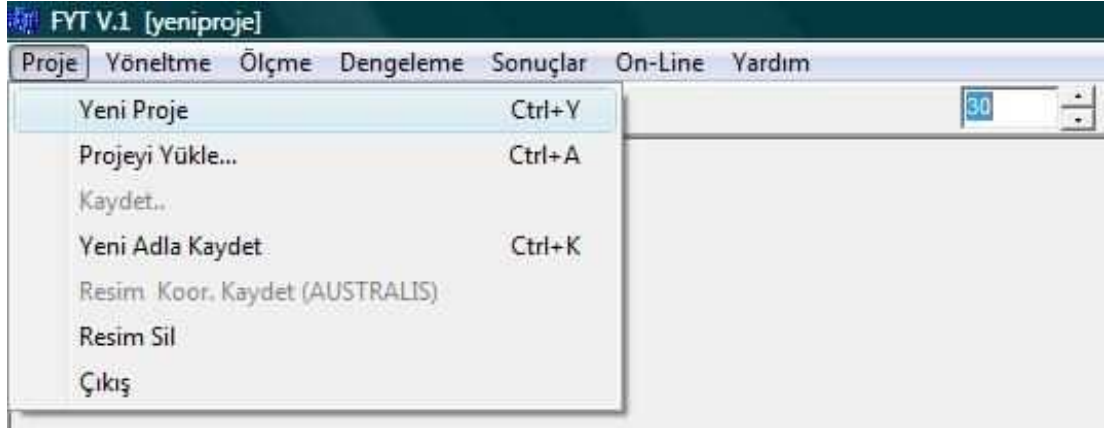
- Pesce, M.**, 2003. Programming Microsoft DirectShow for digital video and television, Microsoft Press.
- Psaltis, C. and Ionanidis, C.**, 2006. An automatic technique for accurate non-contact structural deformation measurements, *ISPRS Commission V Symposium*, Dresden.
- Remondino, F.**, 2002. 3-D reconstruction of articulated objects from uncalibrated images, *Three-Dimensional Image Capture and Application V*, SPIE Electronic Imaging, Vol.4661, pp. 148-154, San Jose (California), USA.
- Remondino, F.**, 2000. Investigation and calibration of digital Camera Sony DCS F505 Cybershot, *Internal technical report at IGP*, ETH, Zurich.
- Roncellaa, R., Scaionib, M. and Forlania, G.**, 2004. Application Of digital photogrammetry in geotechnics, *XX. ISPRS Congress*, Istanbul, Proceeding XXXV B5 Com.V.
- Saadatseresht, M., Fraser, C.S. and Samadzadegan, F.**, 2004. Visibility analysis in vision metrology network design, *The photogrammetric Record*, Vol.19(107), pp. 219-236.
- Shortis, M.R., Clarke, T.A. and Short, T.**, 1994. Comparison of some techniques for the subpixel location of discrete target images, *SPIE Proceedings*, Vol. 2350, P. 25.
- Shortis, M. R. and Snow, W. L.**, 1997. Videometric tracking of wind tunnel aerospace models at NASA Langley Research Centre, *The Photogrammetric Record*, **15(85)**, 673-689.
- Tournas, L., Tsakiri, M. and Kattis, M.**, 2006. Displacement monitoring at the micron level using digital photogrammetry, *Proc. of the 12th FIG Int. Symp. on deformation measurements & 3rd IAG Symp*, On geodesy for geotechnical and structural engineering, Baden, Austria.

- Whiteman, T., D. and Lichti, D.D.**, 2002. Measurement of deflections in concrete beams by close range photogrammetry, *ISPRS Commission IV Symposium, Geospatial Theory, Processing and Applications, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume XXXIV, Part 4.*
- Wolf, P.R. and Dewitt, B.A.**, 2000. Elements of photogrammetry with applications in GIS, Boston, McGraw-Hill, Boston, 3rd ed.
- Woodhouse, N.G., Robson, S. and Eyre, J.**, 1999. Vision metrology and three dimensional visualisation in structural testing and monitoring, *Photogrammetric Record, XVI(94)*, 625-642. ISSN: 0031-868X.
- Yilmaztürk, F., Külür, S., ve Pekmezci, B. Y.**, 2004. Measurement of shrinkage in concrete samples by using digital photogrammetric methods, *XX. ISPRS Congress, Istanbul, Proceeding XXXV B5 Com.V.*
- Zeng, Z. and Wang, X.**, 1992. A general solution of a closed-form space resection, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 58(3)*, 327-338.

EKLER

EK A. KALİBRASYON UYGULAMASI

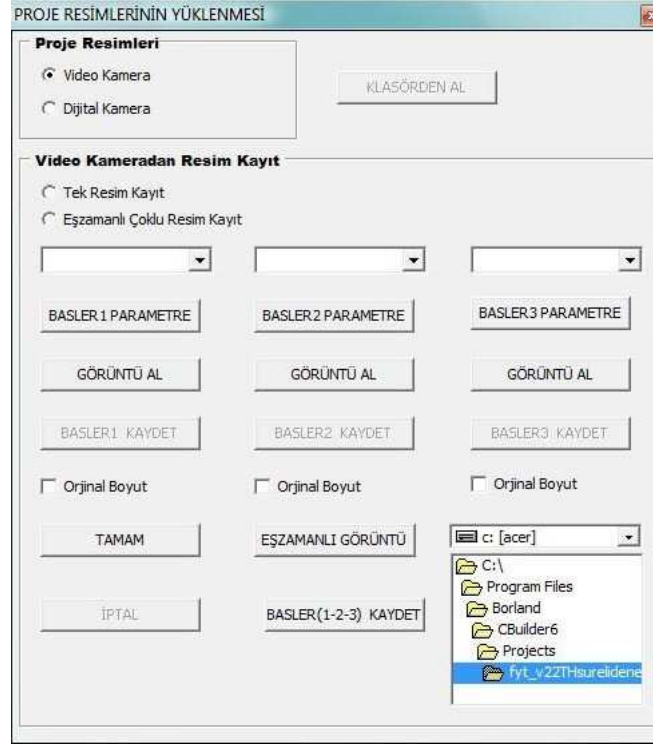
Bu bölümde kısaca geliştirilen yazılımla bir kalibrasyon uygulamasının nasıl yapılacağına dair bilgiler verilecek, işlem adımları anlatılacaktır. Yazılım, hem online hem de offline çalışmalarda kullanılabilir şekilde geliştirilmiştir. Yedi ana menüden oluşur. Proje ana menüsünden yeni projeye başlanabilir, proje kayıt edilir ya da kayıtlı proje yüklenebilir (Şekil A1).



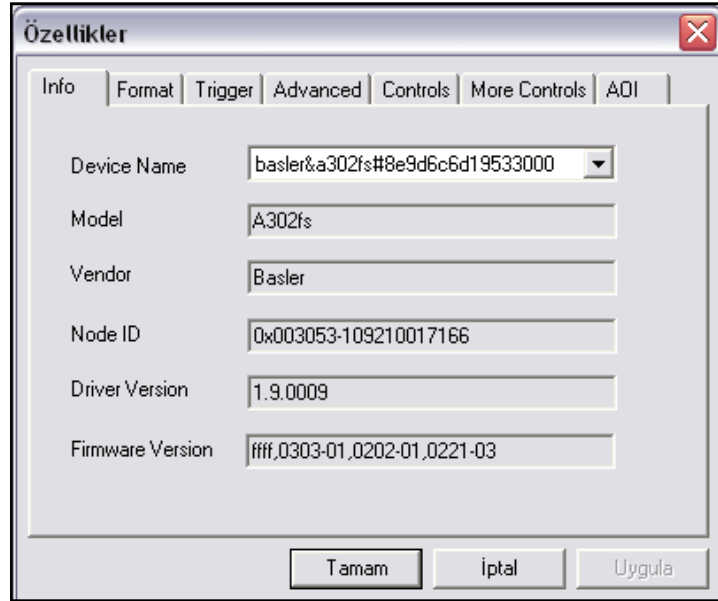
Şekil A.1: Proje ana menüsü

Projeden yeni proje alt menüsünün seçilmesi durumunda, çıkan diyalog menüsünden video kamera ya da dijital kamera seçenekleriyle uygulamanın online yada offline olacağı belirlenir (Şekil A.2).

Video kameralar seçeneğinin işaretlenmesi durumunda, sistemde kullanılan üç kameraya ait parametre butonları aktif duruma geçer ve parametre butonuna tıklanarak kamerayla ilgili ayarların yapılacağı diyalog penceresi açılır (Şekil A.3). Kamerayla ilgili gerekli ayarlamalar yapıldıktan sonra Şekil A.2' de gösterilen proje resimlerinin yüklenmesi diyalog penceresinden görüntü al butonuna tıklanarak görüntü alma işlemi başlatılır. Bu işlem diğer iki kamera içinde tekrarlanır.



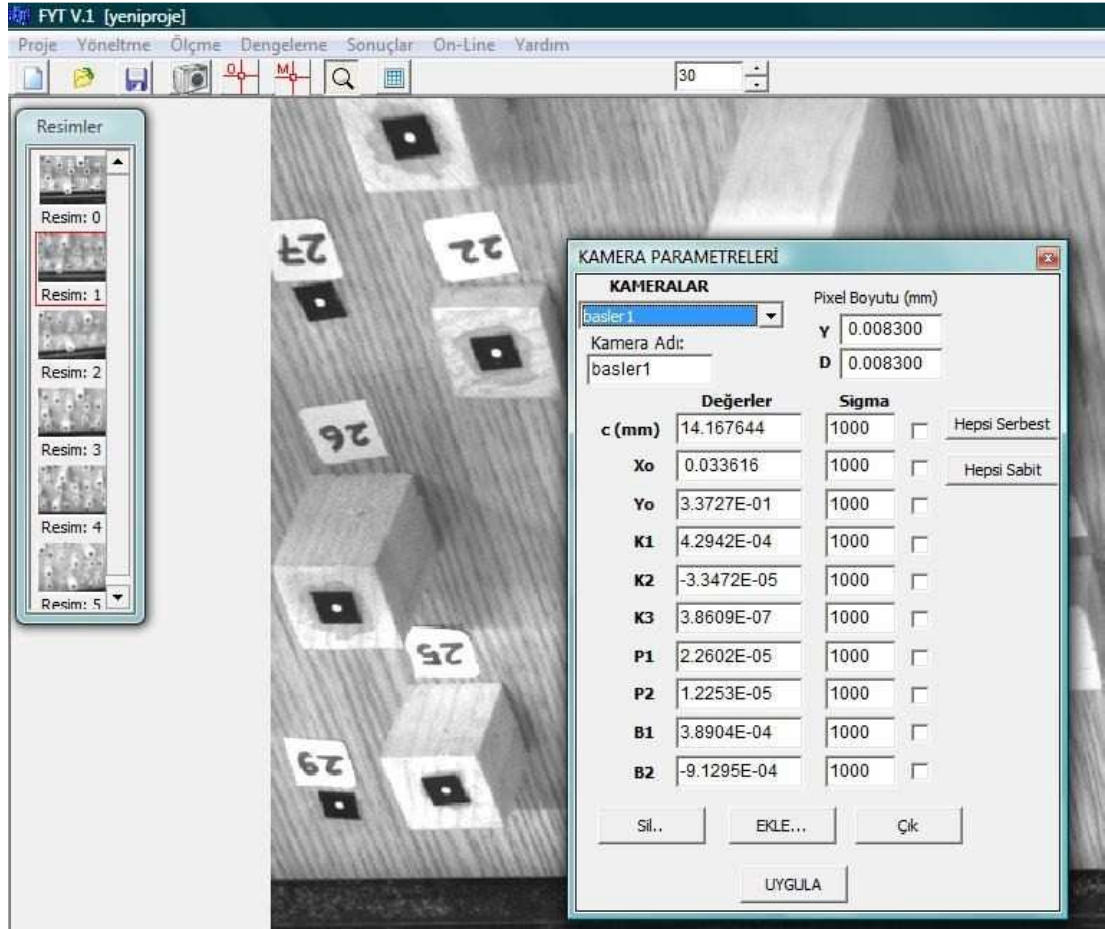
Şekil A.2: Proje görüntülerini yükleme diyalog penceresi



Şekil A.3: Kamera parametreleri diyalog penceresi

Üç kameradan da görüntü akışı sağlandıktan sonra kalibrasyon amacıyla yine proje görüntülerinin yüklenmesi diyalog penceresinden BASLER(1-2-3) KAYDET butonuyla test alanının görüntüleri tanımlanan dizin içerisine resim0, resim1 ve resim2 olarak kayıt edilir ve kameraların görüntü alması İPTAL butonuyla sonlandırılır. Test alanının görüntüleri elde edildikten sonra, kalibrasyon hesabı aşamasına geçilebilir. Bu amaçla ilk olarak yine proje görüntülerinin yüklenmesi

diyalog penceresinden proje görüntüleri bölümünde dijital kamera seçeneği işaretlenerek ilgili klasörden test alanının görüntüleri projeye dahil edilir.



Şekil A.4: İç yöneltme aşaması

Test alanı görüntüleri projeye dahil edildikten sonra iç yöneltme aşamasına geçilir. Bu amaçla yöneltme ana menüsünden iç yöneltme seçeneği seçilerek kamera parametreleri diyalog penceresi açılır (Şekil A.4). Yazılımın sol taraftaki resimler diyalog penceresinden ilgili görüntü seçilir ve kamera parametreleri diyalog penceresinde hangi kameranın kullanıldığı işaretlenir. UYGULA butonuyla iç yöneltme aşaması o görüntü için sağlanır. Bu işlem projeye dahil edilen bütün görüntü için tekrarlanır.

İç yöneltme işleminden sonra dış yöneltme aşamasına geçilir. Yazılımın ölçme ana menüsünden resim ve cisim koordinatları alt menüsü seçilir (Şekil A.5). Resim ve cisim koordinatları diyalog penceresinden yükle... butonuyla test alanının 3B koordinatları projeye dahil edilir. Bütün görüntüler üzerinde 3B koordinatları bilinen uygun dağılımlı en az altı hedef noktasının resim koordinatları ölçülür. Bu işlem sonrası elde edilen program görüntüsü Şekil A.6'da gösterilmiştir. Resim koordinat ölçme işlemine başlanmadan önce ölçme ana menüsünden hedef özellikleri alt menüsü seçilerek kalıp hedef tanımlanmalıdır. Bu işlem otomatik ölçmeler için gereklidir.

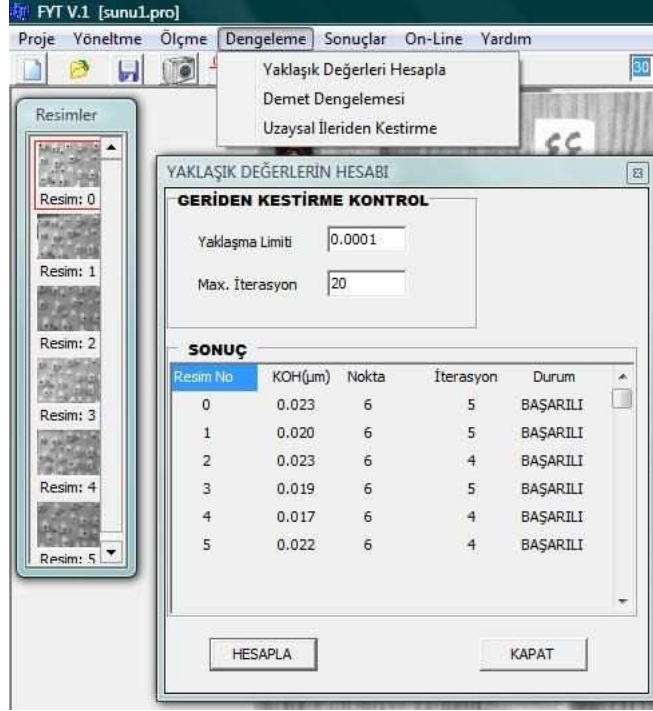


Şekil A.5: Ölçme ana menüsü ve alt menüleri



Şekil A.6: Resim ve cisim koordinatları diyalog penceresi

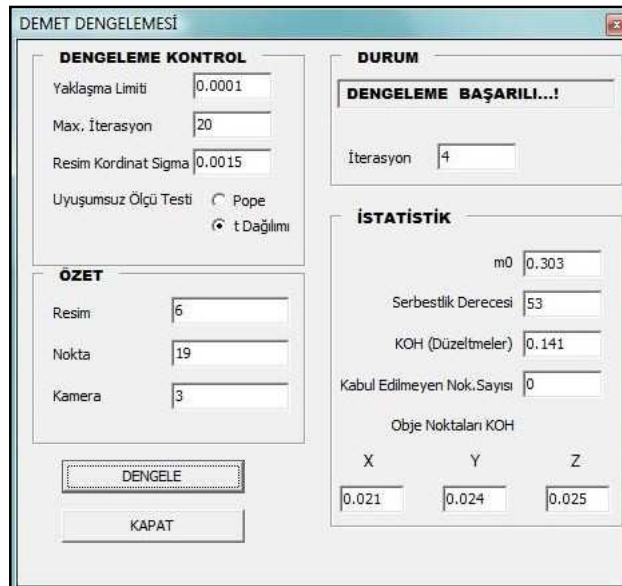
Gerekli sayıda resim ölçmesinden sonra dış yöneltme elemanlarının yaklaşık değerlerini hesaplama aşamasına geçilir. Dengeleme ana menüsünden Yaklaşık Değerleri Hesapla alt menüsü seçilir. Yaklaşık değerlerin hesabı diyalog penceresinden HESAPLA butonuyla yaklaşık değerler hesaplanır (Şekil A.7).



Şekil A.7: Yaklaşık değerlerin hesabı diyalog penceresi

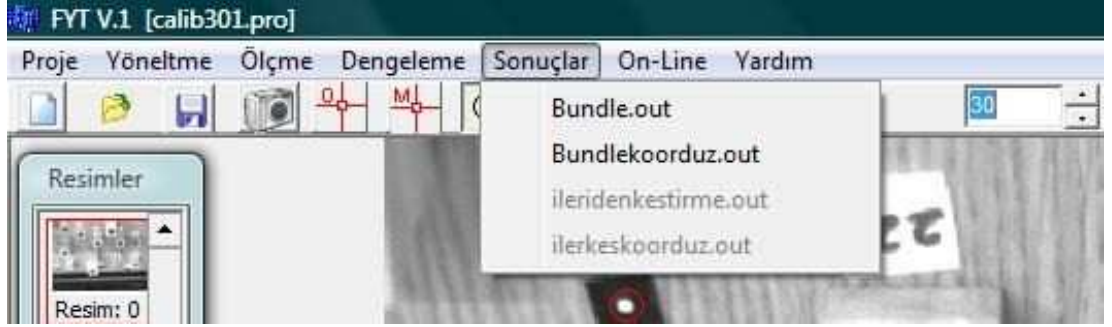
Dış yöneltme elemanlarının yaklaşık değerlerinin belirlenmesinden sonra test alanının resim koordinatları ölçülmemiş hedef noktalarını ölçme aşamasına geçilir. Resimler diyalog penceresinden resim seçilir ve Şekil A.5’de gösterilen Ölçme ana menüsünden geriye hesap alt menüsü seçilerek noktaların resim koordinatlarının otomatik ölçülmesi sağlanır.

Bütün resim koordinat ölçmelerinden sonra kalibrasyonun belirleneceği ek parametrelerle demet dengelemesi aşamasına geçilir. Şekil A.7’de gösterilen Dengeleme ana menüsünden demet dengelemesi alt menüsü seçilir. Demet dengelemesi diyalog penceresinden DENGELER butonuyla demet dengelemesi gerçekleştirilir (Şekil A.8).



Şekil A.8: Demet dengelemesi diyalog penceresi

Demet dengelemesi sonuçları proje klasörü içerisine otomatik olarak yazdırılır. Dengeleme sonuçlarını görmek için sonuçlar ana menüsünden Bundle.out dosyası seçilir.



Şekil A.9: Sonuçlar ana menüsü ve alt menüleri

EK B. ÖRNEK KALİBRASYON UYGULAMASI (DEMET DENGELMESİ) ÇIKTISI

FYT Bundle dengeleme sonuçları: Bundle.out
10.07.2007 16:03:19
PROJE: calib.pro
Birim: mm
Nokta Sayısı: 28
Resim Sayısı: 6
Kamera Sayısı: 3
İterasyon Sayısı: 8

KAMERA PARAMETRELERİ:

basler1 için sonuç değerler:

	Sensör Boyutu	Piksel Boyutu		
Y	780	0.008		
D	582	0.008		
Kam. Par.	Sonuç Değer	Toplam Düzeltme	Başlangıç Değer	Karesel O. Hata
C	17.6501	4.6450	13.0050	3.3927E-02
x0	0.0279	0.0128	0.0151	2.6602E-02
y0	0.2139	-0.1246	0.3386	1.8647E-02
k1	-2.0652E-04	-8.3261E-04	6.2609E-04	1.3722E-04
k2	-2.9242E-05	-1.9865E-05	-9.3767E-06	2.0988E-05
k3	7.4120E-07	7.6467E-07	-2.3469E-08	9.6691E-07
p1	-4.4709E-05	-1.1622E-04	7.1512E-05	3.0750E-05
p2	2.8012E-04	1.5504E-04	1.2508E-04	2.2066E-05
b1	1.6528E-04	4.8946E-04	-3.2418E-04	8.2677E-05
b2	1.8284E-04	3.9889E-05	1.4295E-04	8.7023E-05

basler2 için sonuç değerler:

	Sensör Boyutu	Piksel Boyutu		
Y	780	0.008		
D	582	0.008		
Kam. Par.	Sonuç Değer	Toplam Düzeltme	Başlangıç Değer	Karesel O. Hata
C	16.1681	-0.0983	16.2664	2.4663E-02
x0	0.0280	-0.0973	0.1253	2.2322E-02
y0	-0.0061	-0.0082	0.0021	1.6014E-02
k1	3.4855E-04	-1.8983E-04	5.3838E-04	1.0041E-04
k2	1.4522E-05	1.7968E-05	-3.4454E-06	1.5618E-05
k3	-2.5255E-07	-5.8938E-07	3.3683E-07	7.2323E-07
p1	-5.1682E-05	-1.1077E-05	-4.0605E-05	3.1785E-05
p2	-3.3736E-05	-6.5208E-05	3.1472E-05	2.3290E-05
b1	-1.8868E-04	-1.9604E-04	7.3622E-06	9.1671E-05
b2	-1.8729E-04	-2.5947E-04	7.2181E-05	9.0047E-05

basler3 için sonuç değerler:

	Sensör Boyutu	Piksel Boyutu		
Y	780	0.008		
D	582	0.008		
Kam. Par.	Sonuç Değer	Toplam Düzeltme	Başlangıç Değer	Karesel O. Hata
C	16.1705	-0.1890	16.3595	2.3981E-02
x0	0.1499	-0.0087	0.1586	2.3157E-02
y0	-0.0434	0.0240	-0.0675	1.6135E-02
k1	3.3906E-04	-2.7190E-04	6.1096E-04	1.0664E-04
k2	2.1507E-05	3.0364E-05	-8.8568E-06	1.7751E-05
k3	-7.4729E-07	-1.2412E-06	4.9390E-07	8.8409E-07
p1	-6.2305E-05	-3.3895E-05	-2.8410E-05	3.1655E-05
p2	2.1726E-05	7.2420E-06	1.4484E-05	2.3683E-05
b1	2.0260E-04	-3.6659E-04	5.6919E-04	9.5582E-05
b2	-4.5741E-05	3.7447E-04	-4.2021E-04	9.5446E-05

DENGELENMİŞ DIŞ YÖNELTME ELEMANLARI: (Açılar grad,XYZ ler mm'dir.)

Resim 0 için sonuç değerler:

Parametre	Sonuç Değer	Toplam Düzeltme	Başlangıç Değer	Karesel O. Hata
X	2474.0973	28.6461	2445.4512	3.7149E-01
Y	3566.7716	-265.5426	3832.3143	1.8906E+00
Z	364.6421	39.2388	325.4033	4.6122E-01
Omega	79.8661	1.1747	78.6914	1.0344E-03
Phi	7.1321	-0.2959	7.4280	1.4898E-03
Kapa	-179.4114	-0.1565	-179.2550	1.2973E-04

R0 Dönüşüm matrisi:

-0.99221	-0.12402	0.01173
0.01019	-0.17468	-0.98457
0.12416	-0.97678	0.17459

Resim 1 için sonuç değerler:

Parametre	Sonuç Değer	Toplam Düzeltme	Başlangıç Değer	Karesel O. Hata
X	2800.3879	-0.2549	2800.6427	6.6905E-01
Y	3609.0159	6.7044	3602.3115	1.4341E+00
Z	343.4060	0.3370	343.0690	3.6382E-01
Omega	79.4339	-0.0375	79.4715	1.0520E-03
Phi	24.2555	-0.2083	24.4638	1.3376E-03
Kapa	-176.2036	0.0108	-176.2144	4.5043E-04

R1 Dönüşüm matrisi:

-0.90972	-0.41510	0.01008
0.06037	-0.15623	-0.98587
0.41081	-0.89626	0.16718

Resim 2 için sonuç değerler:

Parametre	Sonuç Değer	Toplam Düzeltme	Başlangıç Değer	Karesel O. Hata
X	2187.0656	1.5438	2185.5218	3.0344E-01
Y	3474.1666	11.9228	3462.2438	1.5841E+00
Z	338.1056	-1.3322	339.4378	3.5781E-01
Omega	80.0853	-0.1220	80.2073	9.5329E-04
Phi	-7.6849	-0.0315	-7.6534	1.4363E-03
Kapa	179.8106	0.0029	179.8077	1.6837E-04

R2 Dönüşüm matrisi:

-0.99101	0.13230	-0.01977
-0.00328	-0.17175	-0.98514
-0.13372	-0.97622	0.17064

Resim 3 için sonuç değerler:

Parametre	Sonuç Değer	Toplam Düzeltme	Başlangıç Değer	Karesel O. Hata
X	2481.1026	34.5892	2446.5134	3.4146E-01
Y	3573.5177	-260.5741	3834.0919	1.8805E+00
Z	165.7025	-17.4294	183.1319	2.6647E-01
Omega	91.5433	1.3824	90.1610	1.0435E-03
Phi	6.5777	0.4012	6.1765	1.4892E-03
Kapa	179.6840	-0.2126	179.8966	1.3100E-04

R3 Dönüşüm matrisi:

-0.99340	-0.11466	0.00243
-0.00548	0.02630	-0.99964
0.11455	-0.99306	-0.02676

Resim 4 için sonuç değerler:

Parametre	Sonuç Değer	Toplam Düzeltme	Başlangıç Değer	Karesel O. Hata
X	2807.4202	-1.5531	2808.9733	6.4981E-01
Y	3615.6554	5.2935	3610.3619	1.4162E+00
Z	148.4805	1.5109	146.9697	2.4564E-01
Omega	91.3947	-0.0378	91.4325	1.0428E-03
Phi	23.6973	-0.2996	23.9969	1.3660E-03
Kapa	-177.1937	-0.0025	-177.1912	4.4385E-04

R4 Dönüşüm matrisi:

-0.91458	-0.40011	-0.05871
0.04483	0.04398	-0.99803
0.40190	-0.91541	-0.02229

Resim 5 için sonuç değerler:

Parametre	Sonuç Değer	Toplam Düzeltme	Başlangıç Değer	Karesel O. Hata
X	2192.7559	2.0556	2190.7003	3.0819E-01
Y	3490.4726	11.4037	3479.0688	1.5443E+00
Z	126.2220	0.9430	125.2789	2.4698E-01
Omega	91.5382	-0.1200	91.6582	9.3479E-04
Phi	-8.2402	-0.0060	-8.2342	1.4295E-03
Kapa	178.9003	-0.0011	178.9014	1.7573E-04

R5 Dönüşüm matrisi:

-0.98949	0.14273	0.02303
-0.01899	0.02959	-0.99938
-0.14332	-0.98932	-0.02657

DENGELEME SONUCU HESAPLANAN KOORDİNATLAR:

NOKTA NO	X	Y	Z	mX	mY	mZ	KOH	Işın S.	Resimde
102	2580.0291	4563.7477	119.0727	0.0134	0.0170	0.0131	0.2	2	HHHHEE
103	2576.7763	4548.1013	222.2375	0.0140	0.0172	0.0130	0.1	3	HEHHHE
106	2493.4139	4565.6883	18.7508	0.0140	0.0175	0.0137	0.1	2	HHEHHE
107	2518.5990	4547.7605	80.8362	0.0110	0.0161	0.0106	0.1	6	EEEEEE
108	2508.2389	4580.2472	166.7020	0.0097	0.0158	0.0090	0.2	6	EEEEEE
109	2517.6805	4587.0556	279.3069	0.0119	0.0162	0.0116	0.2	6	EEEEEE
111	2441.3378	4557.8257	24.2327	0.0118	0.0164	0.0119	0.1	3	HEEHHE
112	2449.9490	4550.3682	107.9210	0.0096	0.0155	0.0092	0.1	6	EEEEEE
113	2459.4394	4545.1864	191.9481	0.0107	0.0158	0.0094	0.1	6	EEEEEE
114	2471.1519	4601.7907	287.7322	0.0112	0.0161	0.0111	0.2	6	EEEEEE
115	2446.4258	4592.1843	249.8046	0.0099	0.0158	0.0094	0.2	6	EEEEEE
116	2385.5726	4550.2856	35.5788	0.0106	0.0156	0.0107	0.1	4	HEEHHE
117	2383.4568	4561.1193	110.8131	0.0103	0.0159	0.0108	0.2	5	EEHHEE
118	2384.5595	4532.9173	193.4779	0.0105	0.0158	0.0101	0.2	6	EEEEEE
119	2370.3174	4584.6261	284.4504	0.0100	0.0157	0.0100	0.2	6	EEEEEE
121	2340.9938	4532.9710	36.6858	0.0106	0.0155	0.0107	0.1	4	HEEHHE
122	2319.8016	4554.8616	207.8926	0.0099	0.0156	0.0093	0.1	6	EEEEEE
123	2328.2847	4547.2862	292.5116	0.0102	0.0155	0.0100	0.1	6	EEEEEE
125	2276.5684	4505.8966	72.1393	0.0112	0.0156	0.0108	0.1	4	HEEHHE
126	2270.9387	4507.7847	152.4799	0.0111	0.0156	0.0094	0.1	6	EEEEEE
127	2269.6097	4558.1951	219.3134	0.0104	0.0157	0.0092	0.2	6	EEEEEE
129	2218.5151	4521.5939	31.6367	0.0120	0.0159	0.0117	0.1	4	HEEHHE
130	2209.4223	4536.6522	142.0575	0.0105	0.0155	0.0093	0.2	6	EEEEEE
131	2206.7575	4536.7885	214.0261	0.0109	0.0156	0.0100	0.1	6	EEEEEE
132	2237.3717	4519.2531	268.0415	0.0118	0.0160	0.0115	0.1	6	EEEEEE
134	2145.4260	4509.1499	31.0195	0.0160	0.0174	0.0150	0.0	2	HEHHHH
135	2185.1916	4504.1152	95.7323	0.0112	0.0163	0.0108	0.1	4	EEEHHE
136	2168.2366	4472.2692	169.4631	0.0145	0.0178	0.0132	0.1	2	HHEHHE

RESİM KOORDİNATI DÜZELTMELERİ ÖZETİ: (Birimler mikrometre'dir.)

Resim Koordinatı Düzeltmeleri KOH'sı

Resim No	x	y	xy	Nokta Sayısı
Resim 0	0.14	0.23	0.19	18
Resim 1	0.14	0.16	0.15	25
Resim 2	0.11	0.10	0.10	25
Resim 3	0.10	0.25	0.19	17
Resim 4	0.16	0.16	0.16	23
Resim 5	0.13	0.14	0.13	27

Toplam Düzeltme (KOH)

x	y	xy
0.13	0.17	0.15

BİRİM AĞIRLIĞIN STANDART SAPMASI:

mo	Serbestlik Derecesi	Ölçüler	Bilinmeyen Sayısı	Koşul
0.1797	120	270	150	0

EK C. ÖRNEK İLERİDEN KESİRME DENGELEME ÇIKTISI

FYT ONLINE Uzaysal İleriden Kestirme Dengeleme Sonuçları:

05/12/2006 16:35:00

PROJE: deney5.pro
Birim: mm
Nokta Sayısı: 17
Resim Sayısı: 3
Süre: 0 sn 468 ms
İterasyon Sayısı: 2

Resim No	X	Y	Z	Omega	Phi	Kappa
Resim 0	2533.8283	3681.7586	288.2354	80.0133	14.6310	3.0904
Resim 1	2777.1154	3647.2239	313.3681	78.5122	25.7926	3.6518
Resim 2	2313.4430	3579.5313	290.6716	80.6261	-1.1593	2.2693

RESİM KOORDİNATI DÜZELTMELERİ ÖZETİ: (Birimler mikrometre'dir.)

Resim Koordinatı Düzeltmeleri KOH'sı

Resim No	x	y	xy	Nokta Sayısı
Resim 0	0.18	0.19	0.19	17
Resim 1	0.11	0.34	0.25	16
Resim 2	0.12	0.25	0.20	16

Toplam Düzeltme (KOH)

x	y	xy
0.14	0.27	0.21

NOKTA NO	X	Y	Z	mX	mY	mZ	KOH	Işın S.	Resimde
E1	2376.0976	4446.2859	197.3558	0.0125	0.0435	0.0105	0.4	3	EEE
E2	2389.3843	4449.7754	197.0656	0.0121	0.0436	0.0106	0.3	3	EEE
E3	2381.5911	4444.0733	180.1576	0.0124	0.0433	0.0110	0.2	3	EEE
E4	2375.8062	4440.8726	164.9460	0.0125	0.0432	0.0115	0.1	3	EEE
E5	2391.7658	4444.4439	160.4981	0.0121	0.0434	0.0117	0.2	3	EEE
E6	2375.8442	4438.2111	150.2666	0.0125	0.0431	0.0120	0.2	3	EEE
E7	2392.9789	4442.3032	145.1392	0.0120	0.0433	0.0122	0.1	3	EEE
E8	2367.7633	4435.9210	130.7486	0.0128	0.0432	0.0127	0.1	3	EEE
E9	2383.4397	4435.4537	129.2323	0.0123	0.0429	0.0127	0.1	3	EEE
E10	2397.4551	4442.7402	128.5211	0.0265	0.0805	0.0207	0.3	2	EEH
E11	2373.8807	4431.8152	111.7994	0.0126	0.0428	0.0134	0.2	3	EEE
E12	2393.1356	4435.6874	108.0998	0.0120	0.0430	0.0135	0.2	3	EEE
E13	2375.4834	4428.3541	92.5957	0.0125	0.0426	0.0141	0.2	3	EEE
E14	2389.2853	4430.5665	90.4221	0.0121	0.0427	0.0142	0.1	3	EEE
E15	2372.9902	4425.7941	75.6417	0.0126	0.0426	0.0149	0.3	3	EEE
E16	2387.7912	4427.4071	74.2102	0.0121	0.0425	0.0149	0.1	3	EEE
E17	2366.5625	4444.5311	179.3298	0.0132	0.0794	0.0153	0.0	2	EHE

BİRİM AĞIRLIĞIN STANDART SAPMASI:

mo	Serbestlik Derecesi	ölçüler	Bilinmeyen Sayısı	Koşul
0.2042	47	98	51	0

ÖZGEÇMİŞ

1971 yılında Konya’da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Konya-Seydişehir’de tamamladı. 1989 yılında S.Ü. Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümünü kazandı ve 1993 yılında bu bölümden mezun oldu. 1996 yılında, N. Ü. Aksaray Mühendislik Fakültesi Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü Fotogrametri Anabilim Dalına Araştırma görevlisi olarak atandı. 1997 yılında, S.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Yüksek Lisans programına girdi ve bu programı 1999 yılında tamamladı. 2001 yılında, YÖK Kanununun 35. maddesi uyarınca Doktora yapmak üzere kadrosu İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü kadrosuna nakledildi ve aynı yıl İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Anabilim Dalı, Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği programında doktora eğitimine başladı.

Halen İ.T.Ü. Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Fotogrametri Anabilim Dalında Araştırma Görevlisi olarak görevini sürdürmektedir. Evli ve bir çocuk babasıdır.