YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ULTRACAM$_X$ SAYISAL FOTOGRAMETRİK HAVA KAMERASININ GEOMETRİK DOĞRULUĞUNUN ARAŞTIRILMASI

Harita Müh. Temel DURĞUT

FBE Harita Müh. Anabilim Dalı Uzaktan Algılama ve CBS Programında Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı **:** Doç. Dr. Naci YASTIKLI

İSTANBUL, 2010

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ v

KISALTMA LİSTESİ vi

ŞEKİL LİSTESİ vii

ÇİZELGE LİSTESİ x

ÖNSÖZ xi

ÖZET xii

ABSTRACT xiii

1. GİRİŞ 1

1.1 Fotogrametri ve Hava Kameralarındaki Gelişmeler 1
1.2 Sayısal Fotogrametrik Yöntemlerdeki Gelişmeler 3
1.2.1 Pasif gözlüklü polarize sistemler 4
1.2.2 Aktif gözlüklü frekans koordineli sistemler 5
1.3 GPS/IMU Sistemlerindeki Gelişmeler 5

2. ANALOG HAVA KAMERALARI 8

2.1 Analaog Hava Kameraları 8
2.1.1 Çekim yöntemine göre 8
2.1.2 Görüş açısına göre 9
2.1.3 Odak uzaklığına göre 10
2.1.4 Objektif sayılarına göre 10
2.2 Analaog Hava Kameralarının Distorsiyon Hataları 10
2.2.1 Çapsal ve teğetsel distorsiyon 11
2.2.2 Distorsiyon eğrisi 11
2.2.3 Distorsiyonda simetri 13
2.3 Analaog Hava Kameralarının Kalibrasyonu 14

3. SAYISAL HAVA KAMERALARI 16

3.1 Sayısal Hava Kameralarının sağladığı üstünlükler 17
3.2 Sayısal Hava Kameralarının Sınıflandırılması 19
3.2.1 Çerçeve görüntüleme sistemleri (Frame kameralar) 23
3.2.1.1 Dönen ışınlı vidikon (RBV) kameralar 24
3.2.1.2 Video kameralar 24
3.2.1.3 Çerçeve CCD (Charge Coupled Device) kameralar 25
3.2.2 Tarayıcı sistemler (Line kameralar) 27
3.2.2.1 Optik - mekanik satır tarayıcılar 27
3.2.2.2 Optik - mekanik çerçeve tarayıcılar 28
3.2.2.3 Doğrusal dizili (Pushbroom) tarayıcılar 28

3.3 Yüksek Çözünürlüklü Sayısal Hava Kameralarının İncelenmesi 29
3.3.1 Z/I Imaging Digital Mapping Camera (DMC) 32
3.3.1.1 Sistem bileşenleri 33
3.3.1.2 Sistem özellikleri 33
3.3.1.3 Teknik özellikler 38
3.3.2 Leica ADS40 39
3.3.2.1 Sistem bileşenleri 40
3.3.2.2 Sistem özellikleri 41
3.3.2.3 Teknik özellikler 46
3.3.3 Vexcel UltraCam$_D$ 49
3.3.3.1 Sistem bileşenleri 50
3.3.3.2 Sistem özellikleri 51
3.3.3.3 Teknik özellikler 53
4. ULTRACAM$_X$ SAYISAL FOTOGRAMETRİK HAVA KAMERASI 55
4.1 Sistem Bileşenleri 56
4.2 Sistem Özellikleri 56
4.3 Kamera Görüntüsü ve Görüntü Alım Aşamaları 57
4.4 Teknik Özellikler 60
4.5 Kamera Kalibrasyonu 62
5. UYGULAMA 66
5.1 Test Alanı 66
5.2 Çalışmada Kullanılan Donanımlar 67
5.2.1 Algılayıcı birimi (SX) 67
5.2.2 Hesaplama birimi (CX) 68
5.2.3 Kamera işletim arayüzü (IPX) 68
5.2.4 Veri depolama birimi (DX) 69
5.2.5 Veri transfer birimi (DKX) 69
5.2.6 İnersiyal navigasyon sistemi (Inertial Navigation System-INS) 70
5.3 Çalışmada Kullanılan Yazılımlar 71
5.3.1 Ofis veri işleme yazılımı (OPC) 71
5.3.2 Uçuş planlama yazılımı 71
5.3.3 Navigasyon sistemi yazılımı 71
5.3.4 GPS ve IMU Ölçümlerini işleme yazılımı (AeroOffice) 71
5.3.5 Softplotter 3.0 yazılımı 71
5.4 Birinci Test Alanında Yapılan Çalışmalar 72
5.4.1 Blok dengeleme 72
5.4.2 Boresight kalibrasyonu 73
5.4.3 Doğrudan yöneltme (Direct georeferencing) 73
5.4.4 Geometrik doğruluğun araştırılması 74
5.4.5 Birinci test alanı sonuçlarının değerlendirilmesi 81
5.5 İkinci Test Alanında Yapılan Çalışmalar 83
5.5.1 Blok dengeleme 83
5.5.2 Boresight kalibrasyonu 84
5.5.3 Doğrudan yöneltme (Direct Georeferencing) 85
5.5.4 GPS verilerinin PPP ile çözümü 85
5.5.5 Geometrik doğruluğun araştırılması 86
5.5.6 İkinci test alanı sonuçlarının değerlendirilmesi 89
6. SONUÇ VE ÖNERİLER 90

KAYNAKLAR 92

ÖZGEÇMİŞ 94

SİMGE LİSTESİ

f	Odak uzaklığı
Δr	Distorsiyon hatası
δr	Çapsal distorsiyon
γ	Görüş açısı
X_0,Y_0,Z_0	Fotoğraf izdüşüm merkezinin referans koordinat sistemindeki koordinatları
ω,φ,κ	Fotoğraf koordinat sisteminin referans koordinat sistemi X, Y, Z koordinat eksenleri etrafındaki dönüklükleri
$d\omega,d\varphi,d\kappa$	Fotoğraf koordinat sisteminin referans koordinat sistemi X, Y, Z koordinat eksenleri etrafındaki dönüklüklerinin farkları
dx,dy,dz	Sürüklenme parametreleri
Φ , Θ , Ψ	Fotoğraf çekim anındaki platform koordinat sistemi ile referans koordinat sistemi arasındaki dönüklükler

KISALTMA LİSTESİ

YKN	Yer kontrol Noktası
GCP	Ground Control Point
IMU	Inertial Measurement Unit
GPS	Global Positioning System
INS	Inertial Navigation System
PPP	Precise Point Positioning
FMC	Forward Motion Compensation
ADC	Analog/Digital Converter
DGPS	Differential GPS
ADS	Airborne Digital Sensor
DMC	Digital Mapping Camera
SCU	System Calculating Unit
KOH	Karesel Ortalama Hata
GSD	Ground Sample Distance
CCD	Charge Coupled Device
SU	Sensor Unit
SCU	Saving/Calculating Unit
CDU	Central Display Unit
CCU	Central Computer Unit
3B	Üç Boyutlu
3D	Three Dimensions
JPEG	Joint Photographic Experts Group
TIFF	Tagged Image File Format
WGS	World Geodetic System
RGB	Red Green Blue
SAM	Sayısal Arazi Modeli
OEEPE	Organisation for European Experimental Photogrammetry Explorations

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 1930: 4 x RMK C/1 4-mercekli kamera (a) ve görüntüsü (b) (Hoban 2004). 1
Şekil 1.2 USC&GS9 kamerası (a) ve New York şehrinin birleştirilmiş görüntüsü (b) 2
Şekil 1.3 Hava kameralarının gelişimi (Heier 2001) 3
Şekil 1.4 Pasif gözlüklü polarize sistemin bileşenleri 4
Şekil 1.5 Aktif gözlüklü frekans koordineli sistemin bileşenleri 5
Şekil 2.1 Analog hava kamerası operatörü (a) ve fotoğraf alımında kullanılan uçak (b) 8
Şekil 2.2. Δr : Distorsiyon hatası 11
Şekil 2.3 Distorsiyon (Δr:pp') ve Radyal (çapsal, ışınsal) distorsiyon (δr) 11
Şekil 2.4 Distorsiyon eğrisi 12
Şekil 2.5 PO ışını, sanki $\overline{O}$ dan geliyormuş gibi p′ noktasını oluşturur. 12
Şekil 2.6 Distorsiyon eğrisi (a) ve dağılımı düzenlenmiş distorsiyon eğrisi (b) 14
Şekil 2.7 Dağılımı düzenlenmiş distorsiyon hatası 14
Şekil 3.1 Klasik hava fotoğrafı ve sayısal kamera görüntüsü 19
Şekil 3.2 Görüntü oluşturan sistemlerin sınıflandırılması 20
Şekil 3.3 Tarayıcı sistemlerle elde edilen ham (a) ve işlenmiş görüntü (b) 23
Şekil 3.4 Dönen ışınlı vidikon (RBV) tüpü 24
Şekil 3.5 Vidikonun çalışma esası 25
Şekil 3.6 CCD görüntüleme sistemi 26
Şekil 3.7 Çerçeve (matris) CCD mimarisi 27
Şekil 3.8 Optik mekanik satır tarayıcı 28
Şekil 3.9 Doğrusal dizili (Pushbroom) tarayıcının çalışma esası 29
Şekil 3.10 ADS40 kamera (a), algılayıcıların yerleşimi (b), görüntüleme prensibi (c) 31
Şekil 3.11 DMC kamera (a), objektif yerleşimi (b), görüntüleme prensibi (c) 32
Şekil 3.12 UltraCamD kamera (a), objektif yerleşimi (b), görüntüleme prensibi (c) 32
Şekil 3.13 Z/I Imaging Digital Mapping Camera (DMC) 33
Şekil 3.14 DMC kamera kafası 34
Şekil 3.15 Bağımsız kamera kafalarının DMC kamera objektifi içerisine yerleşimi 35
Şekil 3.16 Bağımsız kamera objektifleri ve merkezi izdüşüm ile görüntü alımı 36
Şekil 3.17 Bağımsız, sekiz ayrı kamera modülü 36
Şekil 3.18 Ana kamera objektifi ve bağımsız kamera kafalarının yerleşimi 37
Şekil 3.19 Görüntü Sürüklenmesi Önleyici Sistem 38
Şekil 3.20 Leica ADS40 (Airborne Digital Sensor) 40
Şekil 3.21 Leica ADS40 hava kamerasının sistem bileşenleri 41

Şekil 3.22 ADS40'ın Cessna uçağına yerleşimi (a) ve CASA 212 uçağına yerleşimi (b) 41
Şekil 3.23 Üçlü algılayıcı tasarımı 42
Şekil 3.24 Pankromatik ve RGB CCD satırların yerleşimi ve bakış açıları 43
Şekil 3.25 Üç farklı CCD satırı üzerine görüntünün farklı açılarla düşürülmesi 44
Şekil 3.26 Alan ve satır tarayıcı tabanlı algılayıcılar için görüntü geometrisi kavramı 45
Şekil 3.27 Üç görüntüde homolog noktaların ölçülmesi (Hinsken ve ark. 2002) 46
Şekil 3.28 Ötelenmiş sıralı CCD satırları 46
Şekil 3.29 Ötelenmiş CCD satırı (a) ve tek CCD satırı (b) 47
Şekil 3.30 Kesintisiz nadir siyah/beyaz kolon görüntüsü 48
Şekil 3.31 Vexcel UltraCamD geniş formatlı sayısal hava kamerası 50
Şekil 3.32 Uçuş esnasında uçuş yönetim sistemi ile bütünleşik olarak kullanılan sistemler .. 51
Şekil 4.1 UltracamX sayısal fotogrametrik hava kamerası 55
Şekil 4.2 UltraCamX hesaplama işlemleri 57
Şekil 4.3 UltracamX hava kamerasının objektifleri 58
Şekil 4.4 3 numaralı objektifin görüntü alımı 58
Şekil 4.5 0 numaralı objektifin görüntü alımı 58
Şekil 4.6 2 numaralı objektifin görüntü alımı 59
Şekil 4.7 1 numaralı objektifin görüntü alımı 59
Şekil 4.8 Bir pankromatik görüntünün tamamı 59
Şekil 4.9 Bir pankromatik görüntünün tamamı 59
Şekil 4.10 Renkli ve IR (Multispektral) objektiflerin görüntü alımı 60
Şekil 4.11 Pankromatik ve multispektral kameranın özellikleri. 62
Şekil 4.12 Tek pankromatik objektif verisi 63
Şekil 4.13 Artık hata diyagramı 63
Şekil 4.14 Level 3 görüntü koordinat sistemi 64
Şekil 4.15 Asal noktanın level 3 görüntü koordinat sistemindeki yeri 64
Şekil 4.16 Lens ayırma gücü 65
Şekil 5.1 Birinci test alanı 66
Şekil 5.2 İkinci test alanı 67
Şekil 5.3 UltracamX algılayıcı birimi (SX) 68
Şekil 5.4 Hesaplama birimi (CX) 68
Şekil 5.5 Kamera işletim arayüzü (IPX) 69
Şekil 5.6 Veri depolama birimi (DX) 69
Şekil 5.7 Veri transfer birimi (DKX) 70
Şekil 5.8 İnersiyal navigasyon sistemi (INS) 70

Şekil 5.9 Blok Dengeleme sonucunda elde edilen karesel ortalama hatalar 72
Şekil 5.10 Doğrudan yöneltme sonucunda elde edilen karesel ortalama hatalar 74
Şekil 5.11 1:8.000 ölçekli fotoğraflar (115 fotoğraf) 75
Şekil 5.12 1:20.000 ölçekli fotoğraflar (16 fotoğraf) 75
Şekil 5.13 1:8.000+1:20.000 ölçekli fotoğraflar (131 fotoğraf) 75
Şekil 5.14 Ana ve alt bölgeler 77
Şekil 5.15 1:8.000 ölçekli projede uygulanan yaklaşımlar KOH'lar 78
Şekil 5.16 1:20.000 ölçekli projede uygulanan yaklaşımlar ve KOH'lar 79
Şekil 5.17 1:8.000+1:20.000 ölçekli projede uygulanan yaklaşımlar ve KOH'lar 79
Şekil 5.18 BLUH ek 12 parametrenin fotoğraf koordinatlarına etkileri 80
Şekil 5.19 BLUH ek 12+8 (42-49) ölçek parametrelerinin fotoğraf koordinatlarına etkileri. 80
Şekil 5.20 BLUH ek 12+32 (42-73) parametrelerinin fotoğraf koordinatlarına etkileri 80
Şekil 5.21 Ek parametrelerin dengelemeye etkisi (1:8.000) 82
Şekil 5.22 Ek parametrelerin dengelemeye etkisi (1:20.000) 82
Şekil 5.23 YKN sayısının ve çapraz kolonların yöneltmeye etkisi (Self Kalibrasyonlu) 84
Şekil 5.24 YKN sayısının ve çapraz kolonların yöneltmeye etkisi (Self Kalibrasyonsuz) 84
Şekil 5.25 Doğrudan yöneltme ve blok dengelemelerin karşılaştırması 86
Şekil 5.26 1:60.000 ölçekli fotoğraflar (575 fotoğraf) 87
Şekil 5.27 1:60.000 ölçekli projede uygulanan yaklaşımlar ve KOH'lar 88
Şekil 5.28 BLUH ek parametrelerinin fotoğraf koordinatlarına etkileri 88
Şekil 5.29 Ek parametrelerin dengelemeye etkisi (1:60.000) 89

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1 Görüş açısına göre kameralar 9
Çizelge 2.2 Bazı analog hava kamerası objektifleri ve max distorsiyonları 15
Çizelge 3.1 Pasif elektro-optik sistemlerin genel özellikleri 20
Çizelge 3.2 Fotogrametrik sayısal hava kamerası sistemlerinin bileşenleri ve fotogrametrik sistem performansını etkileyen faktörler 21
Çizelge 3.3 Piyasadaki kameralar ve temel görüntüleme özellikleri (Cramer 2003) 31
Çizelge 3.4 Farklı DMC 2001 konfigürasyonlarının teknik özellikleri 39
Çizelge 3.5 ADS40 sayısal hava kamerasının algılayıcı parametreleri 48
Çizelge 3.6 ADS40 sayısal hava kamerasının teknik özellikleri 49
Çizelge 3.7 UltraCam$_D$ sayısal hava kamerası görüntü oluşum seviyeleri 52
Çizelge 3.8 Ultracam$_D$ sayısal fotogrametrik hava kamerasının teknik özellikleri 53
Çizelge 4.1 UltraCam$_X$ sayısal hava kamerası görüntü oluşum seviyeleri 60
Çizelge 4.2 Ultracam$_X$ sayısal fotogrametrik hava kamerasının teknik özellikleri 61
Çizelge 5.1 Boresight kalibrasyon sonuçları 73
Çizelge 5.2 BLUH ek parametre listesi 76
Çizelge 5.3 BLUH standart 12 ek parametre formülleri 76
Çizelge 5.4 Blok dengeleme sonuçları 78
Çizelge 5.5 Ölçek ve yer örnekleme aralığı ilişkisi 81
Çizelge 5.6 Match-AT blok dengeleme projeleri 83
Çizelge 5.7 Boresight kalibrasyon sonuçları 85
Çizelge 5.8 Blok dengeleme sonuçları 87

ÖNSÖZ

Bu çalışmada, Fotogrametri alanındaki gelişmeler, analaog ve sayısal hava kameraları, bu kameraların özellikleri, distorsiyon hataları ve kalibrasyon raporları hakkında özet bilgiler verilmiş, Ultracam$_X$ sayısal fotogrametrik hava kamerasının teknik özellikleri incelenerek, geometrik doğruluğunun araştırılması için uygulamalar gerçekleştirilmiştir.

Uygulama bölümünde, Harita Genel Komutanlığı tarafından, envantere yeni alınan Ultracam$_X$ hava kamerasının testlerinin yapılması amacıyla, Ankara üzerinde belirlenen bir test bölgesine ait farklı çözünürlük ve ölçeklerde yapılan görüntü alım uçuşları sonucunda elde edilen veriler kullanılmıştır. Bu çalışmada; sayısal fotogrametrik hava kameralarının harita üretimi açısından potansiyelinin incelenmesi, özellikle Ultracam$_X$ sayısal fotogrametrik hava kamerasının geometrik doğruluğunun araştırılması, GPS/IMU sistemleri ile birlikte kullanılarak doğrudan yöneltme doğruluk potansiyelinin araştırılması, elde edilen sonuç ve deneyimlerin ülkemizdeki diğer sivil ve kamu kurumundaki harita üreticisi kurumlarla paylaşılması amaçlanmıştır.

Çalışmamda konusunda uzmanlığı ve engin bilgi hazinesiyle bana yol gösteren danışmanım Doç.Dr. Naci YASTIKLI'ya, yardımlarını hiçbir zaman eksik etmeyen Harita Yük.Müh. Tuncer ÖZERBİL'e teşekkürlerimi ve desteğini her zaman hissettiğim aileme ve biricik eşime sevgilerimi sunarım.

ÖZET

Gelişen bilgisayar ve 3 boyutlu (stereo) görüntüleme teknolojileri sayesinde, fotogrametrik veri değerlendirme işlemlerinin bilgisayar ortamında daha pratik, zahmetsiz ve hızlı bir şekilde yapılması mümkün hale gelmiş ve söz konusu teknolojiler analog aletlerin yerini kaçınılmaz olarak almıştır. Bu durum, fotogrametrik harita üreten kurumların, foto-laboratuar işlemleri ve analog görüntülerin sayısal hale getirilmesi gibi üretim adımlarını ortadan kaldırılmakta ve fotogrametrik harita üretim süreci daha da hızlanmaktadır.

Bu çalışmada, sayısal fotogrametrik yöntemlerdeki gelişmeler, analaog ve sayısal hava kameraları, bu kameraların özellikleri, distorsiyon hataları, kalibrasyon raporları, birbirlerine nazaran üstünlük ve sınırlamaları özetlenmiştir. Bu çalışmada kullanılan Ultracam$_X$ sayısal fotogrametrik hava kamerasının teknik özellikleri detaylı bir şekilde incelenmiş ve geometrik doğruluk potansiyeli araştırılmıştır. Bu çalışmanın uygulama aşamasında, iki farklı test alanında yapılan uçuşlar sonucunda sayısal hava kamerası ile farklı ölçeklerde çekilen görüntüler kullanılmıştır. Test alanlarından ilki 6 km^2 lik bir alanı kapsamakta ve içerisinde 4 adet YKN bulunmaktadır. Farklı ölçeklerdeki uçuşların sonucunda oluşturulan fotoğraf bloklarının fotogrametrik blok dengelemesi yapılmış, boresight kalibrasyonu sonrasında doğrudan yöneltme gerçekleştirilerek sonuçları karşılaştırılmıştır. Klasik hava kamerasındaki fotoğraf ölçeği ile sayısal hava kamerasındaki yer örnekleme aralığı ilişkisi farklı ölçekteki uçuşlar kullanılarak incelenmiştir. Ultracam$_X$ sayısal fotogrametrik hava kamerasının geometrik doğruluğunun araştırılması amacıyla blok dengelemelere ek parametreler ilave edilerek sistematik hatalar belirlenmiş ve bu kameraya hangi ek parametrelerin kullanımının uygun olacağı araştırılmıştır. 3600 km^2 lik, 20 YKN yi kapsayan ikinci test alanında ise 1:25.000 ölçekli topoğrafik harita üretimi için 1:60.000 ölçekli çekilen görüntüler kullanılmıştır. İlk test alanında yapılan boresight kalibrasyonunun kontrolü ve güvenilirliğinin tespiti için yeni boresight parametreleri, doğrudan yöneltme ve GPS verilerinin Precise Point Positioning (PPP) ile çözümü yapılmış, yine farklı yaklaşımlardaki blok dengelemelere ek parametreler ilave edilerek sistematik hatalar incelenmiştir.

Elde edilen sonuçlar, sonuç ve öneriler kısmında detaylı bir biçimde irdelenmiştir. Doğrudan yöneltme için yapılan projedeki boresight kalibrasyonunun oldukça kritik olduğu, aynı boresight kalibrasyonunun farklı projelerde kullanılmasının ise hassasiyeti azalttığı görülmüştür. Doğrudan yöneltme sonucunda elde edilen doğruluk henüz fotogrametrik harita üretim standardını sağlamamaktadır. Elde edilen sonuçlar bu yöntemin ortofoto üretiminde kullanılabileceğini göstermektedir. Yapılan farklı ölçeklerdeki fotogrametrik blok dengelemeleri, sistematik hataların dengelemeye dahil edilen ek parametreler (Self kalibrasyon parametreleri) kullanılarak belirlenmesi gerektiğini göstermiştir. Standart 12 adet ek parametrenin kullanımının önemli ölçüde katkılar sağladığı, sayısal hava kameralarının alt çerçeve görüntü kaydından kaynaklanan hatalar için öteleme, ölçek vb. ek parametrelere ihtiyaç olmadığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Fotogrametri, Boresight Kalibrasyonu, Self Kalibrasyon, Kamera Kalibrasyonu, GPS, IMU, Doğrudan Yöneltme, Blok Dengeleme, Geometrik Doğruluk, Ek Parametre.

ABSTRACT

Owing to developing computer and 3D visualization technologies, photogrammetric data collecting operations have become more practical, easier and faster in course of time and these technologies have sit in for analogue devices unavoidably. This situation removes the production steps like photo-laboratory works and transfering analogue photos to digital images and photogrammetric map production process is becoming faster.

In this study, progresses in digital photogrammetric methods, analogue and digital aerial cameras, features of these cameras, distortion errors, calibration reports, advantages and disadvantages between each other are summarized. Technical features of Ultracam$_X$ digital photogrammetric aerial camera that used in this study are analyzed in detail and the geometric accuracy potential of the camera is investigated. In the execution chapter of this study the different scale images which were captured within the flights in two different test areas by digital aerial camera were used. The first test area has a 6 km^2 surface and including 4 GCP. Block adjustments of image blocks which were generated at the end of the different scale flights were evaluated, after the boresight calibration, direct georeferencing results were made and the results are compared. Photo scale of analogue aerial camera and the relation of scale-ground sampling interval of digital aerial camera are analyzed by using different scale flights. For the purpose of investigation of geometric accuracy of Ultracam$_X$ digital photogrammetric aerial camera, systematical errors are determined by adding additional parameters to block adjustments and the parameters that is suitable fort his camera are investigated. 1:60.000 scale images which were captured for 1:25.000 scale map production were used in the second test area which has a 3600 km^2 surface and including 20 GCP. For checking the boresight calibration made in the first test area, new boresight parameters were used in direct georeferencing and solution of GPS data with PPP and again systematical errors are analyzed by adding additional parameters to block adjustments in different approaches.

Obtained results are presented in detail in the conclusion chapter. It was seen that direct georeferencing in the projects in which a boresight calibration is made are more accurate but, using the same boresight calibration in different projects decreases the accuracy. The accuracy which obtained by direct georeferencing does not provide efficiency for photogrammetric map production standard yet. Results show that this method could be used in orthophoto production. Different scale photogrammetric block adjustments showed that systematical errors should be determined with additional parameters (Self calibration parameters) which could be added to adjustment. It is determined that using standard 12 parameter provides important accuracy uplift and there is no need for drift, scale etc. parameters for errors derived from sub frame image record of digital aerial cameras.

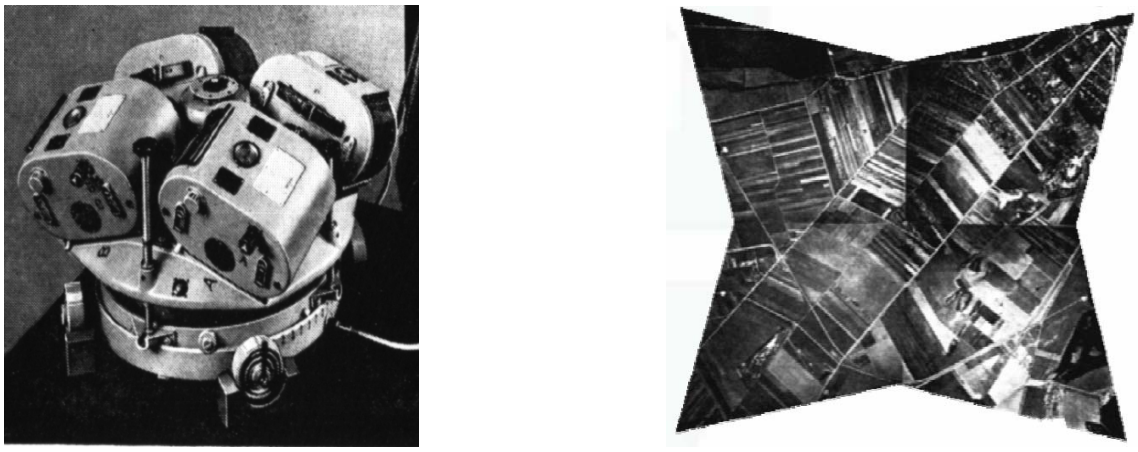
Keywords: Photogrammetry, Boresight Calibration, Self Calibration, Camera Calibration, GPS, IMU, Direct Georeferencing, Block Adjustment, Geometric accuracy, Additional parameter.

1. GİRİŞ

1.1 Fotogrametri ve Hava Kameralarındaki Gelişmeler

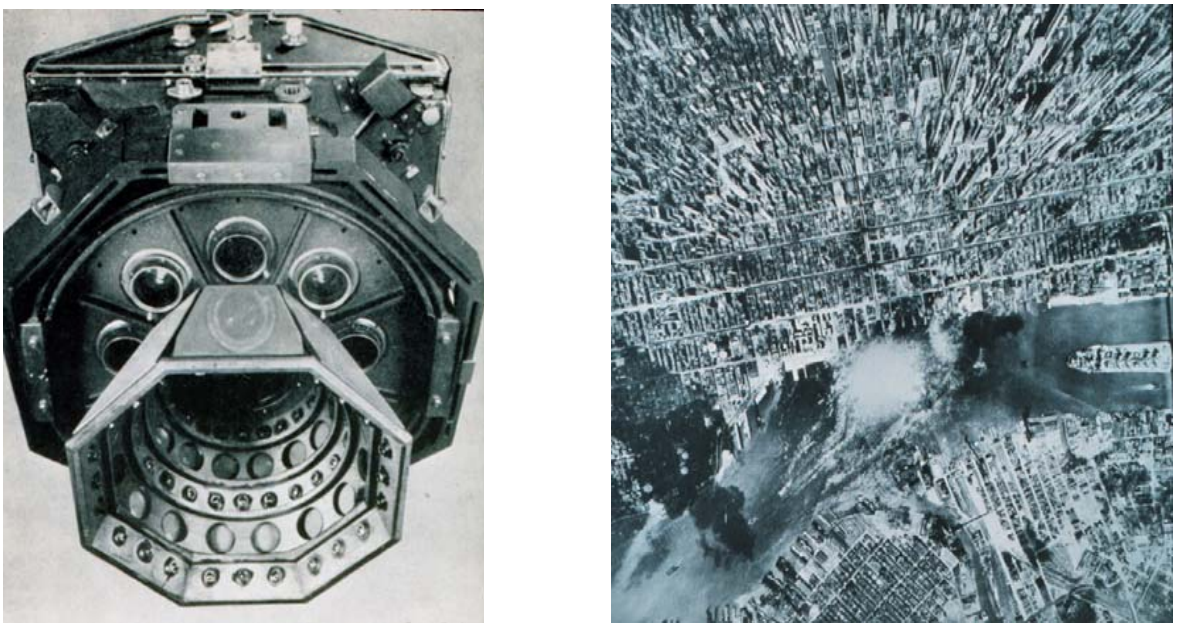
Fotoğraf 1839 yılında keşfedilmiş olmakla beraber, bunun topoğrafik harita üretiminde kullanımı, 1800'lü yılların sonuna kadar düşünce olmaktan ileri gidememiştir. Konu ile ilgili çalışmalar 1890'lı yıllarda, stereo ölçme tekniği üzerinde yoğunlaşmıştır. 1903 yılında Prof.Dr.C.Pulfrich'in stereo fotogrametrinin esaslarını ortaya koyması ve kendi adıyla anılan ilk stereo komparatoru yapması ile dünyada fotogrametri alanındaki gelişmeler hız kazanmış ve özellikle geçtiğimiz yüzyılın son çeyreğinde bilgisayar teknolojisinin de desteğini arkasına alarak büyük bir atılım yapmıştır (Önder 2002).

Amerika'da hava kameralarına ve havadan fotoğraf alımına olan ilgi 2'nci Dünya Savaşı yıllarında artış göstermiştir. İlk kullanılan hava kameraları çok mercekli sisteme sahip olan kameralardı (Şekil 1.1). 1904 yılı içerisinde Austrian Scheimpflug balonda kullanılabilen ve merkezde bulunan bir merceğin etrafına grup olarak yerleştirilmiş yedi adet eğik mercekten oluşan bir kamera imal etmiştir (Luhman 2004). Bu çok mercekli hava kameralarından Yüzbaşı O.S.Reading'in A.B.D. Kıyı ve Jeodezik Ölçüm Dairesi için geliştirmiş olduğu 9 mercekli hava kamerası o dönem için eşsiz bir hava kamerası örneğidir. Bu hava kamerasının en önemli avantajı geniş yer kaplama alanına sahip olmasıdır. (Şekil 1.2) (Gruner 1977).



(a) (b)

Şekil 1.1 1930: 4 x RMK C/1 4-mercekli kamera (a) ve görüntüsü (b) (Hoban 2004).



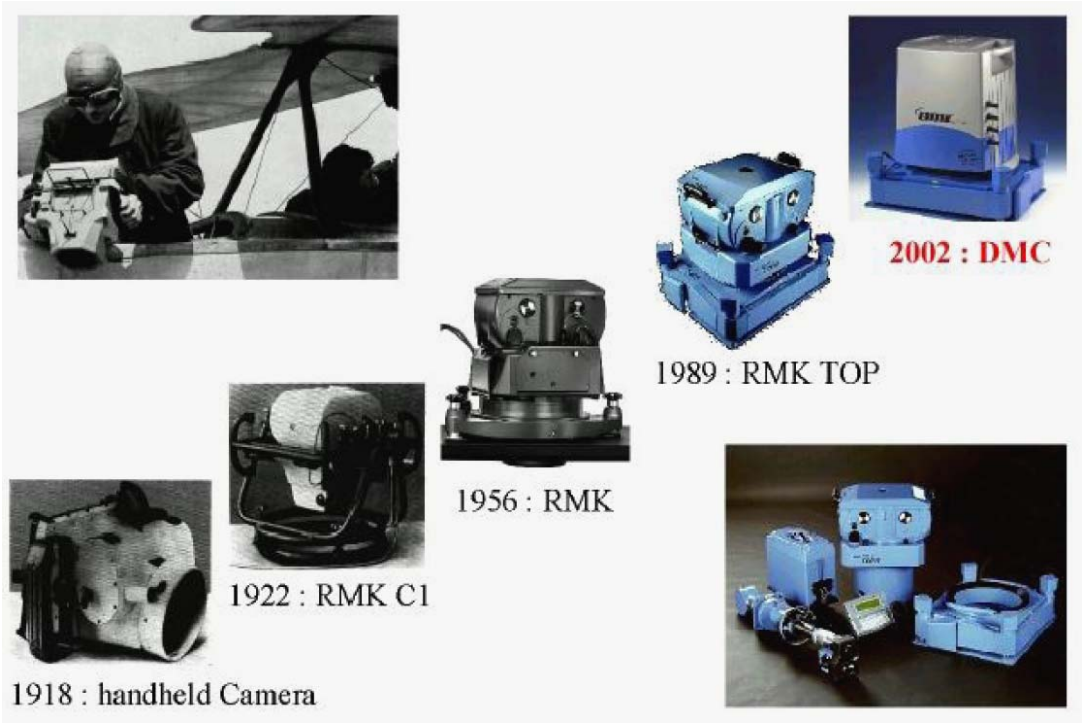
(a) (b)

Şekil 1.2 USC&GS9 kamerası (a) ve New York şehrinin birleştirilmiş görüntüsü (b)

Amerika Birleşik Devletleri'nde geliştirilen ilk tek mercekli hava kamerası 1938 yılında 6 inç odak uzaklığı ve 93^{o}'lik görüş açıklığına sahip Type T-5'tir. Sonrasında yerini Sherman Fairchild'ın geliştirdiği Type-11'e bırakmıştır. (Hoban 2004).

Sherman Fairchild aynı zamanda hem bir iş adamı hem de havacılık endüstrisinin bir öncüsüydü. İş adamı olarak yıldızı 1'inci Dünya Savaşı yıllarında hava kameralarındaki distorsiyon problemine çözüm olarak keşfetmiş olduğu obtüratördeki döner bıçak sistemiyle parlamıştı. 1'inci Dünya Savaşı yıllarından sonra ise enerjisini havacılık sektörüne ve özellikle hava fotogrametrisine de uygun olan uçak üretimine yönlendirmiş havacılık endüstrisinde bir öncü olmuştur. 1'inci Dünya Savaşı yıllarında edinmiş olduğu tecrübeler sonucu çift kanatlı uçakların tasarımlarının fotogrametrik uygulamalar için uygun olmadığını görmüş ve sonrasında kendine ait Fairchild Uçak Üretim Şirketini kurmuştur. İlk olarak hava fotogrametrisi uygulamalarına uygun kabin üstü tek ve kolay yükleme için katlanabilir kanatlı FC-1 ve hemen sonrasında FC-2 uçaklarını üretmiştir.

Harita üretim amaçlı hava kameralarının el kamerasından, sayısal hava kamerasına olan tarihsel gelişimi Şekil 1.3'de gösterilmiştir.



Şekil 1.3 Hava kameralarının gelişimi (Heier 2001)

1.2 Sayısal Fotogrametrik Yöntemlerdeki Gelişmeler

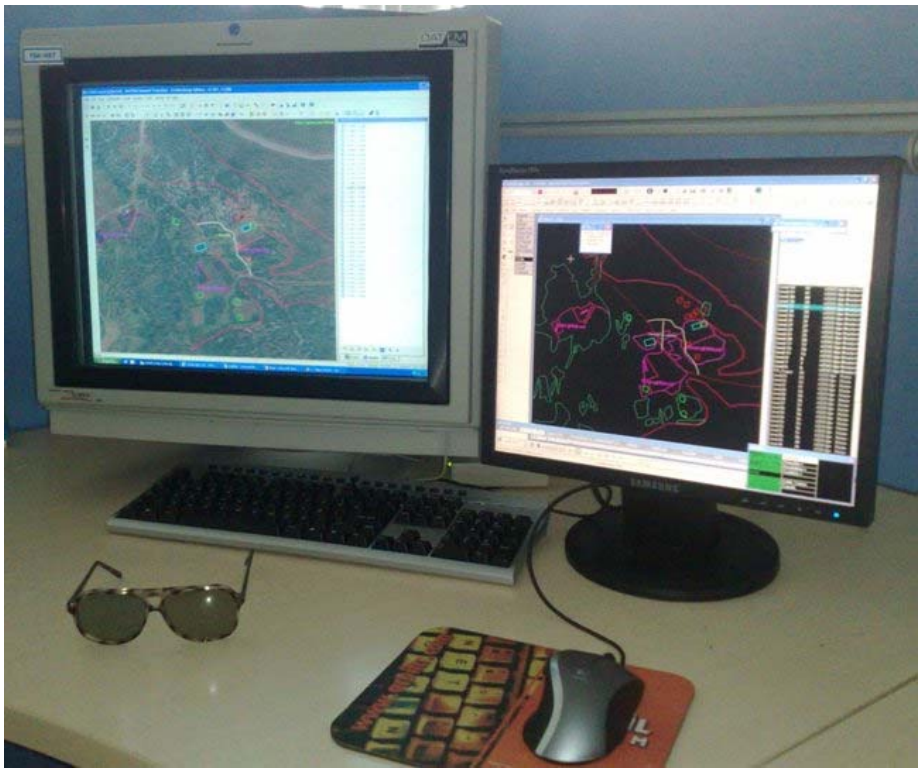
Analaog fotogrametrik değerlendirme aletlerinin kullanımının yaygın olduğu yıllarda söz konusu aletler ile değerlendirme yapmak için çekilen görüntülerin pozitif baskılarına ihtiyaç duyulmakta ve analog hava kameraları ile çekilen görüntü rulolarının banyo işleminden sonra baskıları yapılarak bu ihtiyaç giderilmekteydi. Gelişen bilgisayar ve 3 boyutlu (stereo) görüntüleme teknolojileri sayesinde değerlendirme işlemleri zamanla bilgisayar ortamında daha pratik, zahmetsiz ve hızlı hale gelmiş ve söz konusu sayısal sistemler analog aletlerin yerini kaçınılmaz olarak almıştır. Sayısal fotogrametrik değerlendirme aletlerinde, çekilen hava fotoğraflarının kullanımı için sayısal ortama aktarılması gerekmekte ve bunun için de ayrıca fotogrametrik tarayıcı sistemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Fotogrametrik tarayıcılardaki teknolojik gelişmeler tarama işlemlerine daha hızlı ve pratik çözümler bulmuş olsa bile bu her zaman ek bir maliyet ve zaman gerektiren bir işlem olarak kurumların planlamalarında yer almaktadır. Bu durum son yıllarda yapılan araştırmaları sayısal görüntüleme teknolojilerindeki ilerlemelerle birlikte sayısal fotogrametrik hava kameraları üretimine yoğunlaştırmıştır. Geliştirilen sayısal fotogrametrik hava kameraları ile, fotogrametrik yöntemlerle harita üretimi yapan kurumların, görüntülerini analog ortamdan sayısal ortama aktarma darboğazı, ortadan kaldırılmakta ve fotogrametrik iş akış adımları daha da

hızlanmaktadır.

Günümüzde, sayısal fotogrametrik yöntemler gelişimini hızla sürdürmekte, 3 boyutlu stereo görüş için yeni teknolojiler ve yazılımlar fotogrametrik işlemlerde yerini almaya devam etmektedir. Sayısal ortamda stereo görüş için geliştirilen teknolojileri pasif gözlüklü polarize sistemler ve aktif gözlüklü frekans senkronizeli (koordineli) sistemler olarak ikiye ayırabiliriz.

1.2.1 Pasif gözlüklü polarize sistemler

Pasif gözlüklü polarize sistemlerdeki temel esas; sayısal değerlendirme yazılımı tarafından stereo modeli oluşturan fotoğrafların ekrana koordineli olarak belirli frekansta ardışık olarak gönderilip, ekranın önüne takılan ve yazılım ile koordineli olarak çalışan bir filtre yardımı ile bu fotoğraflardan birinin dikey diğerinin ise yatay olarak polarize edilmiş olarak filtrelenmesi ve kullanıcıya gönderilmesi esasına dayanır. Bu durumda kullanıcının gözüne sol fotoğraf dikey polarize, sağ fotoğraf ise yatay polarize filtrelenmiş olarak gelmektedir. İnsan gözü bu polarizasyonu ayırt edemeyeceğinden sol camı dikey polarize ışınları geçiren, sağ camı da yatay polarize ışınları geçiren polarize filtreli pasif bir gözlük kullanılır ve kullanıcının sağ gözü stereo modelin sağ resmini, sol gözü ise modelin sol resmini görmüş olur ve stereo görüş sağlanır. Şekil 1.4'de kullanılan sistemlerden bir örnek gösterilmektedir.



Şekil 1.4 Pasif gözlüklü polarize sistemin bileşenleri

1.2.2 Aktif gözlüklü frekans koordineli sistemler

Aktif gözlüklü frekans koordineli sistemlerdeki temel esas ise; sayısal değerlendirme yazılımı tarafından stereo modeli oluşturan fotoğrafların ekranda koordineli olarak belirli frekansta ardışık olarak gösterilip, yazılım ile koordineli olarak çalışan aktif bir gözlüğün sağ fotoğraf gösterildiğinde sol gözlük camını karartması, sol fotoğraf gösterildiğinde ise sağ gözlük camını karartması esasına dayanır. Bu durumda kullanıcının sağ gözü sadece sağ fotoğrafı, sol gözü ise sadece sol fotoğrafı görür ve stereo görüş sağlanmış olur. Şekil 1.5'de kullanılan sistemlerden bir örnek gösterilmektedir.



Şekil 1.5 Aktif gözlüklü frekans koordineli sistemin bileşenleri

1.3 GPS/IMU Sistemlerindeki Gelişmeler

GPS ve IMU istemlerinin birlikte kullanımı ile oluşan GPS/IMU sisteminin temeli navigasyon sistemlerine dayanmaktadır. Navigasyon, uzak mesafelere güvenli ve planlı bir şekilde gitmek ve dönmek olarak tanımlanabilir. Bu nedenle, yüzyıllar boyu hem sivil hem de askeri açıdan insanlık tarihi için önemli rol oynamıştır. Bilimsel açıdan navigasyon kavramı:

- bilinen bir koordinat sisteminde konum ve hız vektörlerinin belirlenmesi,
- daha önce belirlenen iki konum arasında gerekli zorunlu manevraların planlanması ve planlanan şekliyle gerçekleştirilmesi

olarak tanımlanmaktadır. Navigasyon sistemleri özellikle ‘‘Inertial Navigation Systems’’(INS), askeri ve bilimsel uygulamaların önemli bir parçası olmuştur (Farrell ve Barth, 1999). IMU ve INS sistemleri birçok literatürde birbirinin yerine kullanılmaktadır. INS sistemleri, IMU sistemini ölçme birimi olarak içermekte ve buna ek olarak konum ve yönlendirme fonksiyonları genellikle bir yazılımla gerçekleştirilmektedir (Yastıklı, 2003).

INS sistemi ilk defa 1949 yılında C.S. Draper tarafından geliştirilmiştir. Daha sonraki yıllarda Amerika Birleşik Devletleri Hava Kuvvetleri askeri navigasyon uygulamalarında kullanılmak üzere standart GPS/INS üretimini gerçekleştirmiştir. Harita üretim kurumları 1970’li yıllarda INS sistemini ölçme aleti olarak görmüşlerdir. Bu yıllarda INS sistemi uçakta kullanılan uzaktan algılama sistemlerinde, örnek olarak çok bantlı tarayıcılarda dönüklük açılarının ölçümünde kullanılmıştır. Büyük boyutlu, ağır ve özellikle pahalı olması nedeniyle ölçme uygulamalarında çok fazla kullanılamamıştır. Sonraki yıllarda 1975-1985 yılları arasındaki gelişmeler, özellikle lazer jiroskopların üretilmesi ile bu sınırlamaları ortadan kaldırılmıştır. Bugünkü anlamda ilk IMU’nun üretilmesindeki temel amaç, silah sistemlerinin özellikle kısa menzilli füze sistemlerinin yönlendirilmesiydi. Bu nedenle geliştirilecek IMU, havadaki füze sisteminde taşınacak olması nedeniyle hafif, müşteri bulabilmesi için ucuz olması gerekiyordu. Bu zorunluluklar uzaktan algılama sisteminde kullanılan IMU’ların sınırlamalarının tamamen ortadan kaldırılmasına yardım etti. Sonuç olarak, GPS ve IMU’nun birlikte kullanılması ile, uzaktan algılama uygulamalarında doğrudan yöneltme yaklaşımının gerçekleştirilmesi mümkün olmuştur (Yastıklı, 2003).

İlk deneysel çalışmalar Ohio State Üniversitesi ve Calgary Üniversitesinde 1980’li yılların sonları ve 1990’li yılların başlarında gerçekleştirilmiştir. Ohio State Üniversitesi "Center for Mapping" öncülüğünde yerde hareket halindeki araç üzerinde bulunan algılama sisteminden doğrudan sayısal görüntü elde edilmesi üzerine çalışmalar yapılmıştır. Daha sonraki yıllarda Calgary Üniversitesi Coğrafi Bilgi Sistemi uygulamaları için karada hareketli ölçme sistemi VISAT’ı geliştirmiştir (El-Sheimy, 1996). Bu deneysel çalışmalarla birlikte doğrudan yöneltme yaklaşımı, hareket halindeki algılayıcının konum ve dönüklük verilerinden oluşan dış yöneltme elemanlarının belirlenmesi üzerine yoğunlaşmıştır (Schwarz vd., 1993, Schwarz vd., 1994a, Schwarz, Wei 1994, Schwarz 1995). Günümüze kadar yapılan deneysel çalışmalar ve test projeleri, GPS ve IMU verilerinin sinyal işleme teknikleri kullanılarak iyileştirilmesi ve bu verilerin Kalman Filtreleme yöntemi ile birleştirilmesi (Skaloud , 1999, Skaloud, Schwarz 2000, Mohamed, 1999), klasik fotogrametrik kameralar kullanılarak doğrudan yöneltme yaklaşımı (Skaloud vd., 1996, Scherzinger, 1997, Abdullah, Tuttle 1999, Cramer

1999, Jacobsen 2000), sayısal kameralar kullanılarak doğrudan yöneltme yaklaşımı (Mostafa, 1999, Toth 1999) ve uçakta kullanılan tarayıcı sistemler kullanılarak doğrudan yöneltme yaklaşımı (Burman 2000, Haala vd., 2000) konularında yapılmıştır.

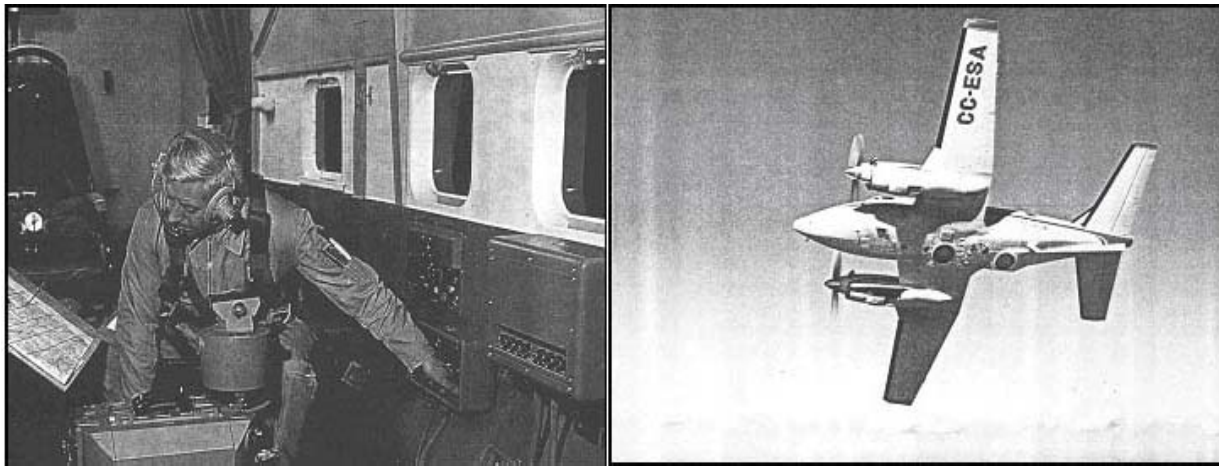
Yapılan bu deneysel çalışmalar ve test projeleri dışında GPS/IMU verileri yardımıyla doğrudan yöneltme yaklaşımının pratik kullanımına örnek olarak sayısal kameralar kullanılarak ortofoto üretimi (Kinn, 2002) ve 11 Eylül 2001'de Dünya Ticaret Merkezi'ne yapılan terörist saldırı sonrası arama kurtarma çalışmalarını yönlendirmek amacıyla bölgenin haritalarının yapımı (Hiatt M., E., 2002, Aslaksen M., Bailey J., 2002) verilebilir. İkinci örnek uygulama, gerek güncel olması, gerekse hiç yer kontrol noktası kullanmadan GPS/IMU verileri kullanılarak afet bölgesinin sayısal kamera ve termal kamera kullanılarak elde edilen görüntüleri ve lazer tarayıcı sistemlerle elde edilen verilerin doğrudan yöneltilmesi nedeniyle oldukça ilginçtir. Yapılan deneysel çalışmalar, test projeleri ve uygulamalar doğrudan yöneltme yaklaşımının dolaylı yöntem olarak isimlendirilen fotogrametrik nirengi yöntemine ciddi bir alternatif olabileceğini göstermiştir (Yastıklı, 2003).

Doğrudan yöneltme yaklaşımı ile ilgili olarak yapılan yayınlarda, bu yeni yaklaşımın dayandığı temel prensipler, test projeleri ile elde edilen veriler kullanılarak irdelenmektedir. Kullanılan yaklaşım ile elde edilen sonuçlardan yola çıkılarak büyük ölçekli harita üretimi amaçlı uygulamalarda doğrudan yöneltme yaklaşımının patrik olarak kullanılabilirliği tartışılmaktadır. Doğrudan yöneltme işleminde farklı yaklaşımların bir arada kullanılarak dış yöneltme elemanlarının belirlenmesi, belirlenen dış yöneltme elemanları ile harita üretimine ilişkin doğruluk analizlerinin yapılması ve elde edilen sonuçların klasik fotogrametrik nirengi ve GPS destekli fotogrametrik nirengi sonuçları ile karşılaştırılarak bu yeni teknolojinin doğruluk potansiyelinin ortaya konulması konusunda kapsamlı bir araştırmanın eksikliği görülmektedir (Yastıklı, 2003).

2. ANALOG HAVA KAMERALARI

Analog hava kameraları her şeyden önce metrik kameralardır. Başlıca özellikleri iç yöneltme elemanlarının bilinmesidir. Hava kamerası objektifleri, çok sayıda mercekten oluşan bir sistemdir. İzdüşüm merkezinden geçen ışın sapmadan fotoğraf düzlemine ulaşır. Modern hava kameralarında kamera distorsiyon hatası 5µ dan daha küçüktür (Yaşayan 1997).

Hava fotogrametrisi için fotoğraf çekiminde kullanılan kameralar (hava kameraları), görüntü düzlemi sabit olan yani mesafe ayarı yapılamayan kameralardır. Objektifleri hassas, ayırma gücü yüksek ve distorsiyonları küçüktür. Özel yapıdaki bir uçağa, bir helikoptere ve bazen bir uyduya monte edilerek kullanılırlar (Şekil 2.1)) (Yaşayan 1997).



(a) (b)

Şekil 2.1 Analog hava kamerası operatörü (a) ve fotoğraf alımında kullanılan uçak (b)

2.1 Analaog Hava Kameraları

Analog hava kameraları çeşitli yönlerden aşağıdaki şekilde sınıflandırılabilir.

2.1.1 Çekim yöntemine göre

- Metrik Kameralar
- Panoramik Kameralar
  - Doğrudan tarayanlar
  - Döner ayna ile tarayanlar
  - Optik çubuk türü olanlar

Fotoğrafik harita yapımımla metrik kameralar kullanılır. Özel amaçlar dışında fotoğraflar film üzerine çekilir. Filmler 60-120 m lik rulolar halinde 19 cm veya genellikle 24 cm enindedirler. Bir rulodaki filmin uzunluğu, inceliği ile de ilgilidir.

Özel işlerde ve özellikle bilimsel inceleme ve araştırma amacıyla kullanılacak fotoğraflar cam üzerine çekilirler. Ancak genleşmesi az polyester bazlı filmlerin geliştirilmesi, camların ve cam kameralarının kullanılmasını daha da azaltmıştır.

Metrik kameralar, tek tek ya da seri şekilde resim çekebilirler. Bunlardan seri çekim yapanlar (seri kameralar), ayarlanabilen belirli zaman aralıklarında (t) (cycling time), art arda otomatik olarak resim çekerler. Hava fotogrametrisinde genellikle seri kameralar kullanılır (Gürbüz 1997).

2.1.2 Görüş açısına göre

Görüş açısına göre kameralar;

- Dar açılı (DA),
- Normal açılı (NA),
- Yarı geniş açılı (ara açılı) (YGA),
- Geniş açılı (GA) ve
- Çok geniş açılı (ÇGA)

Şeklinde sınıflandırılır. Bunların her birinin odak uzaklığı resim boyutları ve görüş açıları Çizelge 2.1'de görülmektedir.

Çizelge 2.1 Görüş açısına göre kameralar

Özellikleri / **Kamera Çeşidi**	**Görüş Açısı** (γ^0)	**Odak Uzaklığı**(f_{mm})	**Resim Boyutları (s cm)**
Dar açılı kameralar	<50	610	23
Normal açılı kameralar	56-60	305	23
Yarı geniş açılı kameralar	70-75	210	23
Geniş açılı kameralar	85-95	152	23
Çok geniş açılı kameralar	110-130	80-90	23

Harita yapım amacı için ülkemizde genellikle f = 152 mm ve 300 mm geniş açılı kameralar kullanılır.

2.1.3 Odak uzaklığına göre

- Kısa odak uzaktılar ($f \leq 150$ mm).
- Normal odak uzaktılar ($150 \text{ mm} < f \leq 300$ mm)
- Uzun odak uzaktılar ($f > 300$ mm)

olmak üzere gruplandırılabilir .

2.1.4 Objektif sayılarına göre

- Tek objektifliler
- Çok objektifliler

olmak üzere iki gruba ayrılabilir. Bunlardan çok bantlı (multi-band) kameralarla aynı yerin, değişik dalga boylu ışın aralıkları (bantlar) kullanılarak 4 ya da 5 fotoğrafını aynı anda çekilir.

Çok bantlı kameraların eski tiplerinde her bant için bir objektif ve önünde o banda ait süzgeç bulunur. Yeni türlerinde ise tek mercek bulunmaktadır. Merceğin arkasına bir ışın ayırıcı prizma (beam-splitler prizma) takımı konulmuştur. Gelen ışın objektiften geçtikten sonra bu prizma takımı yardımıyla mavi, yeşil, kırmızı ve kızıl ötesine ayrılır. Bunlardan her biri dört magazindeki özel emülsiyonlu filmlere kaydedilir (Gürbüz, 1997).

2.2 Analaog Hava Kameralarının Distorsiyon Hataları

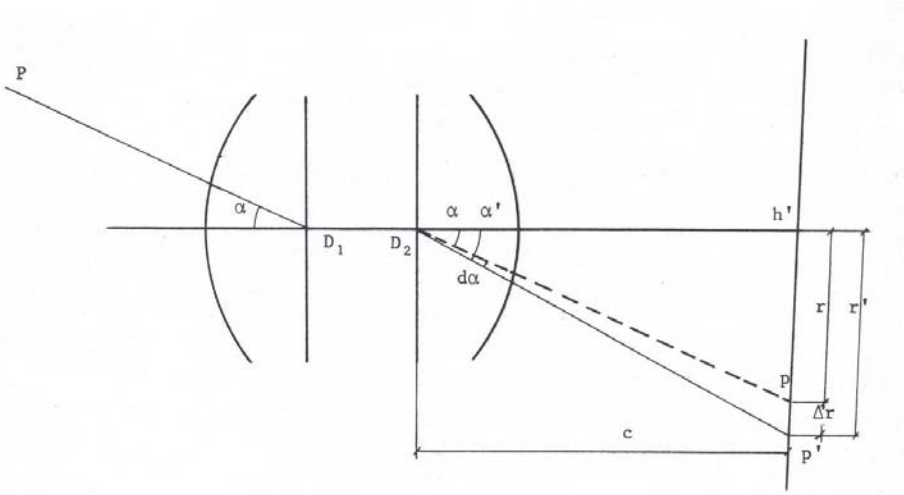
Analog hava kameralarının objektifleri birden fazla mercekten oluşan optik sistemlerdir. Geometrik açıdan tek bir nokta olarak düşünülen izdüşüm merkezi, bu sistemlerde birisi cisim, öbürü görüntü tarafında olmak üzere iki tanedir (Şekil 2.2). Geometrik optiğe göre ışın, bu iki merkez (düğüm noktası) arasında optik eksene paralel olarak gider (Gürbüz 2006).

Cisimden gelen bir ışın optik eksenle α açısını yapıyorsa, çeşitli mercek hatalarından dolayı, objektiften çıkışta optik eksenle α' açısını yapacaktır (Şekil 2.2). Böylece P noktasının görüntüsü, merkezsel izdüşüme göre olması gereken yerden (p noktasından) Δr kadar farklı bir yerde (p′ noktasında) meydana gelecektir. İşte pp′ = Δr görüntü kayıklığına distorsiyon hatası denilir (Gürbüz 2006).

$$\Delta r = r' - r \tag{2.1}$$

$$\Delta r = r' - c \cdot \tan\alpha \tag{2.2}$$

yazılabilir. Burada r′ ölçülebilir. Esas uzaklığı belli olan bir objektife, laboratuarda herhangi α açıları altında ışın gönderilebilir. Yani bir objektif için Δr hesaplanabilir.

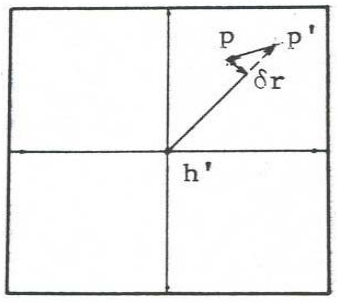


Şekil 2.2. Δr : Distorsiyon hatası

(2.2) bağıntısından da görüleceği gibi distorsiyon hatası, r′ ve α geliş açısına bağlı olarak değişmektedir. Yukarıda değinildiği gibi, r′ ve α nın bilinmesi durumunda, o noktadaki distorsiyon belirlenebilir.

2.2.1 Çapsal ve teğetsel distorsiyon

Distorsiyon hatasından ileri gelen pp′ kayıklığı, çap doğrultusunda (δr) ve buna dik doğrultuda olmak üzere iki bileşene ayrılabilir. Bunlardan birincisine çapsal veya ışınsal (radyal) distorsiyon, buna dik olan bileşene de teğetsel distorsiyon adı verilir (Şekil 2.3).

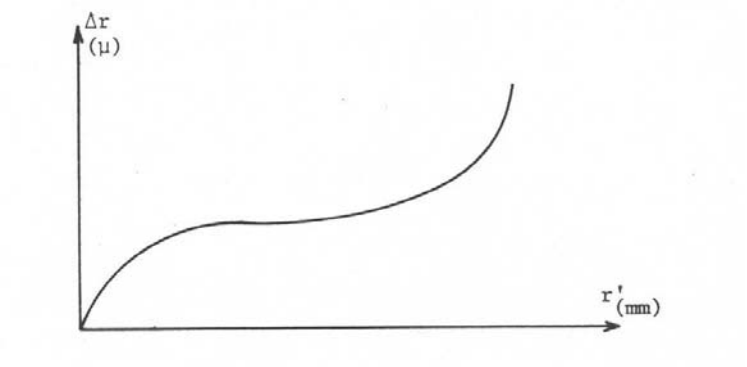


Şekil 2.3 Distorsiyon (Δr:pp') ve Radyal (çapsal, ışınsal) distorsiyon (δr)

2.2.2 Distorsiyon eğrisi

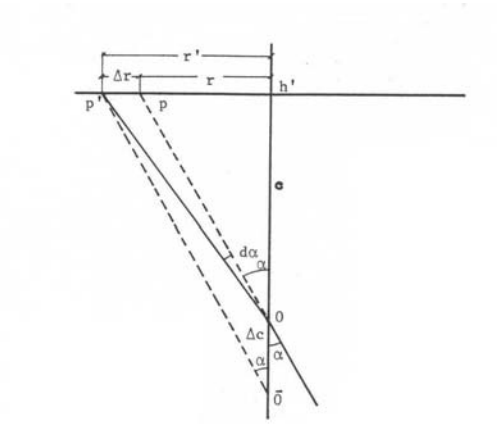
Objektiflerin distorsiyon hatalarının değişimi özel laboratuarlarda belirlenir. Değişik açılar α_i altında gönderilen ışınlar için distorsiyonları hesaplamak üzere, bu ışınların meydana getirdiği görüntü noktasının resim asal noktasından uzaklıkları r_i' ölçülür. Hesaplanan Δr_i lerin, r_i' lere

göre değişimi bir eksen üzerinde gösterilir. Buna distorsiyon eğrisi adı verilir (şekil 2.4).



Şekil 2.4 Distorsiyon eğrisi

Her objektifin özel distorsiyon eğrisi vardır. (Şekil 2.4)'deki eğri, resmin kenarlarına doğru artan bir distorsiyon değişimi göstermektedir. Bu istenmeyen bir durumdur. Özel laboratuarlarda, c esas uzaklığında yapılan küçük değiştirme ile, distorsiyon hatasının fotoğraf üzerindeki dağılımı istenilen biçimde düzenlenebilir (Gürbüz 2006).



Şekil 2.5 PO ışını, sanki $\overline{O}$ dan geliyormuş gibi p´ noktasını oluşturur.

Şekil 2.5'deki $\overline{O}\ p'h'$ üçgeninden;

$$r' = (c + \Delta c) \cdot \tan\alpha \tag{2.3}$$

veya

$$r' = c \cdot \tan\alpha + \Delta c \cdot \tan\alpha \tag{2.4}$$

yazılabilir. oph' üçgeninden de yararlanarak,

$$r' = r + \Delta c \cdot \tan\alpha \tag{2.5}$$

ve bu (2.1)'de yerine konularak,

$$\Delta r = \Delta c \cdot \tan\alpha \tag{2.6}$$

bağıntısı bulunur. (2.6)'dan da görüldüğü gibi Δr distorsiyon hatası, esas uzaklıkta yapılacak küçük değişikliklere (Δc) bağlıdır.

Bu özellik yardımıyla kalibrasyon merkezlerinde bu yöntem kullanılarak distorsiyonun değişimi istenilen şekilde ayarlanabilir (Şekil 2.6).

Böylece distorsiyon hatasının fotoğraf içinde daha homojen olarak dağılımı sağlanmaktadır. Resmin bir bölgesinde (örneğin kenarlarda) büyük bir hata birikimi yerine, diğer bölgelere de dağıtılmış ve etkisi azaltılmış bir dağılım elde edilebilmektedir.

Bu eğri yardımıyla, istenirse distorsiyonun değişim fonksiyonu da bulunabilir. Distorsiyon hatası,

$$\Delta r = f(r') \tag{2.7}$$

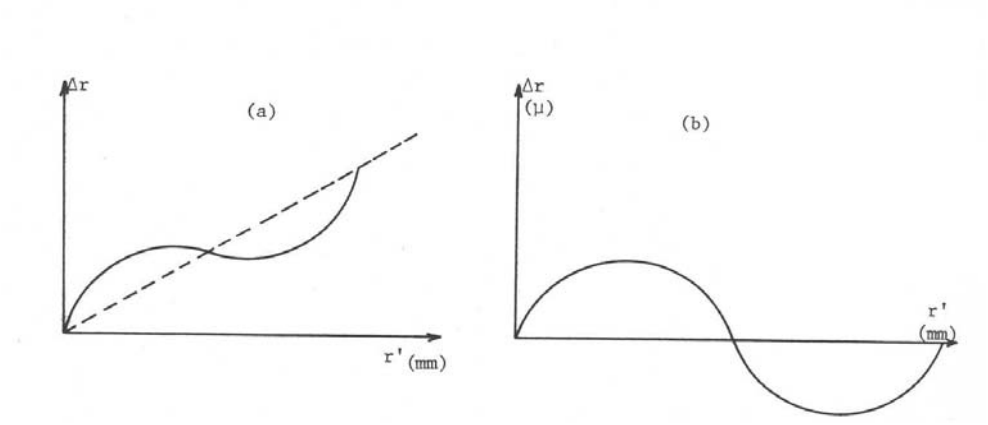
$$\Delta r = k_0 + k_1 r' + k_2 r'^3 + k_3 r'^5 + k_4 r'^7 + \ldots \tag{2.8}$$

şeklinde ifade edilebilir.

2.2.3 Distorsiyonda simetri

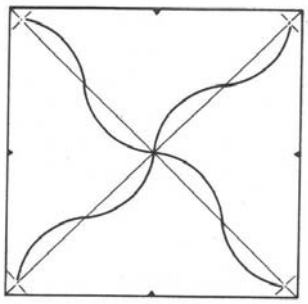
(2.2) bağıntısından görüleceği gibi distorsiyon r´ ve α ya bağlı olarak değişmektedir. Yani asal noktadan eşit uzaklıktaki noktalarda (r´ ve α aynı olan noktalarda) distorsiyon eşit olmaktadır. Başka bir deyişle, distorsiyonun bir yarı köşegen boyunca değişimi, diğer yarı köşegenler boyunca değişiminin aynıdır. Bu nedenle distorsiyon eğrisinin, sadece bir yarı köşegen boyunca değişimi gösterilir. Dağılımı düzenlenmiş distorsiyon hatasının r´ ve α ya bağlı olarak köşegenler boyunca simetrisi Şekil 2.7'de gösterilmektedir (Gürbüz 2006).

Bir objektifin distorsiyon eğrisi verilirse, fotoğraf üzerinde herhangi bir noktadaki distorsiyon hatası, yönü ve değeri ile bulunabilir.



(a) (b)

Şekil 2.6 Distorsiyon eğrisi (a) ve dağılımı düzenlenmiş distorsiyon eğrisi (b)



Şekil 2.7 Dağılımı düzenlenmiş distorsiyon hatası

2.3 Analaog Hava Kameralarının Kalibrasyonu

Analog hava kameraları belirli zaman aralıklarında, ayarları yenilenmek üzere yapımcı firmaların laboratuarlarına götürülürler. Orada özel aletlerle yapılan test ölçmeleri ile,

- Kameranın düzeltilmiş odak uzaklığı (0.01 mm incelikle),
- Fotoğraflarda görüntülenen dört köşe noktası arasındaki uzaklıklar (1μm incelikle),
- Fotoğraf orta noktası (m), simetri noktası (s) ve asal noktasının (h) koordinatları (1μm hassasiyetle),
- İstenirse, fotoğraf dört köşe noktasının, (varsa diğer referans noktalarının) fotoğraf koordinat sistemine göre koordinatları (1μm hassasiyetle),
- Ayırma derecesi (γ geliş açısına bağlı olarak),
- r'ye bağlı olarak distorsiyon listesi,
- Distorsiyon eğrisi,
- İstenirse, distorsiyon eğrisinin denklemi (fonksiyonu)

belirlenerek kalibrasyon raporu oluşturulur.

Bazı objektiflerin isimleri ve özellikleri ile distorsiyon hataları Çizelge 2.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.2 Bazı analog hava kamerası objektifleri ve max distorsiyonları

Yapan firma	**Objektifin adı**	**f (mm)**	**Resim boyutu (cm)**	**Görüş açısı (γ°)**	Δr_{max} **(μm)**
C.Zeiss	Telikon	610	23×23	30	50
"	Topar A	305	"	56	3
"	Pleogon A	153	"	93	2
"	Süper Pleogon	85	"	125	7
C.Zeiss (Jena)	Lamegon p_1	305	"	54	2
"	Lamegon p_1	152	"	92	3
"	Süper Lamegon	89	"	121	5
Leica (Wild)	Aviotar	300	"	60	3
"	Universal Avigon	152	"	90	1
"	Süper Aviagon	88.5	"	120	5

3. SAYISAL HAVA KAMERALARI

Sayısal hava kameraları ve özelliklerinden bahsetmeden önce "fotoğraf" ve "görüntü" terimleri arasındaki farklılığın açıklanması gerekmektedir. Fotoğraf deyimi, genellikle fotoğrafik teknikler kullanılarak film üzerine yapılan kaydı ifade eder. Görüntü ise bir algılama sistemi kullanılarak kayıt işleminin doğrudan sayısal olarak yapıldığını, yada analog fotoğrafın hassas tarayıcılar ile taranarak sayısal ortama aktarılmış halini ifade eder. Bu nedenle, orijinal kayıt donanımı, mercek ve fotoğrafik emülsiyondan çok kristal veya silikon dedektör kullanımını gerekli kıldığından, normalde görüntü olarak tanımlanan tarayıcı verileri, fotoğrafik ürün oluşturmada kullanılabilmektedir.

Günümüzde Jeodezi, Fotogrametri ve Uzaktan Algılama bilimleri birbirinden bağımsız disiplinler olarak değil, aksine birbiri ile bütünleşik, ortak verileri kullanan, "Geomatik" olarak adlandırılan yeni ve çok disiplinli bir bilim olarak görülmektedir. Geomatik bilimi içerisinde sayısal uygulamaların yeri ve önemi giderek artmaktadır.

Son yıllarda, fotogrametri de neredeyse tamamı sayısal uygulamalardan oluşan bir bilim dalı haline gelmiştir. Fotogrametrik yazılım ve donanımlar, teknolojik gelişmelere paralel olarak her geçen gün yenilenmekte ve özellikle düşük maliyetli yazılım ve donanım seçenekleri ile çok çeşitli alternatifler ortaya çıkmaktadır.

Sayısal görüntüler, temel olarak klasik hava fotoğraflarının hassas fotoğraf tarayıcılar ile taranarak sayısal forma dönüştürülmesine dayanır. Bu durumda üreticiler için elde edilecek olan sayısal görüntünün radyometrik ve geometrik doğruluğu büyük önem kazanmaktadır. Ancak, mevcut teknolojiler ve gelişmeler göz önüne alındığı zaman, görüntülerin birçok ara işleme ihtiyaç duyulmadan doğrudan sayısal olarak elde edilmesi en mantıklı sonuç olarak görülmektedir.

Fotogrametrik üretim aşamaları düşünüldüğünde, üretimin ilk adımı olan hava fotoğrafı ve özellikle sayısal görüntünün elde edilmesi en kritik aşamadır. Bu aşamada ister klasik yöntemle elde edilen fotoğrafların taranarak sayısal forma çevrilmesi olsun, isterse doğrudan sayısal formda veri toplanması olsun, maliyet olarak toplam üretim maliyetinin önemli bir kısmını oluşturmaktadır.

Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) uygulamalarındaki sayısal 3 boyutlu veriye olan ihtiyaç, sayısal harita üretim teknolojileri sayesinde oldukça hızlı ve ekonomik bir biçimde giderilebilmektedir. Ortofoto haritalar ve orto görüntüler CBS uygulamaları yanında 3B görselleştirme ve analiz işlemlerinde vazgeçilmez bir ürün haline gelmiştir. Bu tür

uygulamalar için elde edilen görüntünün geometrik ve radyometrik kalitesi kritik derecede önemlidir ve sayısal görüntülere olan ihtiyaç giderek artmaktadır. Kamera Üreten firmalar bu konu ile ilgilenmekte ve kullanıcılara daha ekonomik ve işlevsel çözümler sunmak için yenilikler yapmaktadırlar. Günümüzde fiyatları oldukça yüksek olmasına rağmen, sayısal kameraların bu sınırlamasını, sağladığı yenilikler ve sunduğu geniş yelpazeli ürünler nedeniyle biraz olsun hafiflemektedir. Sayısal kameraların çalışma prensipleri, hassas fotoğraf tarayıcıların çalışma prensipleri ile benzerlik göstermektedir. Sayısal kamera kullanımı ile film kullanımı, foto-laboratuar işlemleri, fotoğraf tarama işlemleri gibi zaman alan ve maliyet oluşturan işlemler ortadan kalkmıştır. Bunlara ek olarak, elde edilen görüntülerin fotoğraf alımını müteakip kısa bir veri işleme sonrasında doğrudan kullanıma hazır hale getirilebilmesi ve ayrıca görüntü kalitesindeki önemli ölçüdeki artış sayısal kameraları çok cazip hale getirmiştir.

Sayısal hava kameraları, yüksek performanslı film kameraları pazarında yer edinebilmeleri ve kullanışlı olabilmeleri için, aşağıdaki özelliklere sahip olmalıdır:

- İyi bir lens ve odak plakası,
- Geniş görüş açısı,
- Etkili bir resim alımı için yüksek seviyede çözünürlük,
- Yüksek geometrik doğruluk,
- Yüksek radyometrik çözünürlük ve doğruluk,
- Renkli ve çok bantlı alım imkânı,
- Tekrarlanabilen alım özellikleri,
- Görüntü yürümesini önleyici sistem (TDI).

3.1 Sayısal Hava Kameralarının sağladığı üstünlükler

Uzaktan Algılama alanında uzun süredir başarıyla kullanılmakta olan sayısal kameraların, uçaklara monte edilerek Fotogrametri alanında da kullanılmasının bu kadar gecikmesinin başlıca nedeni üretim maliyetinin çok yüksek olmasıdır. Son yıllarda, üretim maliyetlerinde büyük düşüşler olmasına rağmen, şu anda piyasalarda bulunan sayısal kameraların fiyatları, klasik kameralar ile karşılaştırıldığında hala yüksektir. Yüksek fiyatları ve henüz tam olarak gelişmelerini tamamlamamış olmaları, kullanıcıların sayısal kameralara olan bakış açısının ancak ilgi düzeyinde kalmasına neden olmaktadır. Ancak, gelecekte sayısal kameraların fiyatlarının düşeceği ve kullanımının çok yaygınlaşacağı değerlendirilmektedir.

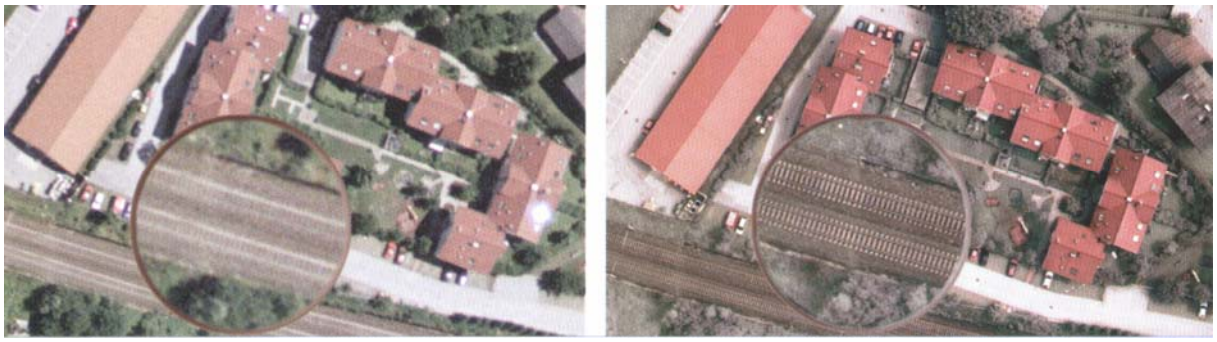
Sayısal kameraların genel yapısı, klasik kameralar ile benzerlik göstermektedir. Bunun en büyük nedeni, sayısal kamera üreten firmaların büyük bölümünün daha önce klasik kamera üreticisi olmalarıdır. Ayrıca, sayısal hava kameralarının, halen kullanılan klasik kameraların

yerine kullanılmaları durumunda, mümkün olan en az tadilat ile veya doğrudan uçaklara monte edilerek kullanılabilir olmalarına özen gösterilmesidir. Sayısal kameraların klasik kameralara olan benzerliği sadece görünümde kalmıştır. İşlevsellik ve kullanım olarak oldukça farklılıklar göstermektedir. Sayısal kameraların sağladığı üstünlüklerden bazılarını aşağıdaki şekilde sıralamak mümkündür.

- Film kullanımı ve buna bağlı olarak foto-laboratuar ve hassas fotoğraf tarama işlemleri ortadan kalkmıştır. Özellikle, foto-laboratuar aşamasında film banyosu sırasında ve tarama sonrasında ortaya çıkabilecek görüntü kalitesindeki azalma önlenmektedir.
- Çekim anında eş zamanlı olarak pankromatik, renkli ve kızılötesi görüntülerin elde edilmesi ile geniş bir ürün yelpazesine sahip olunmaktadır. Aynı bölgeye ait bu değişik özellikli görüntüler, çok çeşitli kullanım alanlarını da beraberinde getirmektedir.
- Proje planında foto-laboratuar, fotoğrafların gibi iş adımlarının ortadan kalkması ile birlikte, bu işlem aşamalarında harcanan zaman ve maliyette kayda değer bir düşüş sağlanmaktadır.
- Radyometrik çözürlüğünün hava filmlerindeki gibi 8 bit yerine 8-12 bit olarak elde edilmesi, görüntünün kalitesini oldukça yükseltmiştir. Ayrıca, radyometrik çözünürlüğünün yüksek olması, hava şartlarından daha az etkilenmesi anlamına geldiği için uçuşa elverişli zaman diliminin genişlemesine imkân sağlamaktadır.
- Sayısal görüntünün, filmlerdeki gibi grenli yapıda olmaması nedeniyle görüntü kalitesi oldukça yüksektir. Bu kalite; daha iyi stereo görüntü elde edilmesine, buna bağlı olarak daha iyi detay yorumlamaya ve otomatik işlemlerde (nirengi, nokta seçim, sınıflandırma, değişikliklerin belirlenmesi vb) daha iyi sonuç elde edilmesine olanak sağlamaktadır.
- GPS/IMU sistemleri ile sayısal hava kameralarının birlikte kullanımı teorik olarak fotoğraf alımı ve alınan fotoğrafların yöneltilmesi aşamalarının tamamen sayısal ortamda yapılmasına imkan sağlamıştır ve tekrarlamalı işlemlerde (revizyon, takip, kontrol vb) büyük kolaylıklar sağlanmaktadır. Doğrudan yöneltme yaklaşımı ile teorik olarak fotogrametrik nirengiye ihtiyaç olmadan modeller oluşturulup stereo değerlendirmeye geçilebilir.
- Sayısal kameraların geometrik doğrulukları filmlerden elde edilen sayısal görüntülere göre oldukça yüksektir.
- Kaliteli görüntülerin elde edilmesi ile birlikte otomatik işlemlerin sonuç kalitesinin artması ve bu sayede bu görüntüleri kullanarak elde edilen ürünlerin (Ortofoto, dem, vectör vb) de kaliteli olmasını sağlamaktadır.
- Klasik filmlerin arşivlenmesi, arşivlenen filmlerin gerektiğinde tekrar kullanılabilir hale gelmesi gibi zaman ve maliyet gerektiren işlemler ortadan kalkar. Ayrıca, uygun yazılımlar kullanılarak sayısal olarak elde edilen görüntülerin arşivlenmesi ve tekrar kullanılabilmesi klasik filmlere nazaran oldukça kolay işlemler olmaktadır.

Şekil 3.1'de verilen örnekte aynı bölgeye ait klasik bir filmden hassas fotoğraf tarayıcı ile taranmış görüntü ile sayısal kamera ile alınmış bir görüntü karşılaştırılmıştır. Sol tarafta yer alan film 15 cm yer çözünürlüğüne sahiptir ve 12 mikron çözünürlüğünde ile taranmıştır. Sayısal kamera ile alınan görüntü ise 16 cm çözünürlüğüne sahiptir. Her iki görüntüde bir demiryoluna ait aynı yerler 2 kat büyütülmüştür. İkisi arasındaki farklılık açıkça görülmektedir. Sayısal kameradan alınan görüntüden demiryolu raylarının detayları ayrıntılı

olarak tanımlanabilmektedir.



Şekil 3.1 Klasik hava fotoğrafı ve sayısal kamera görüntüsü

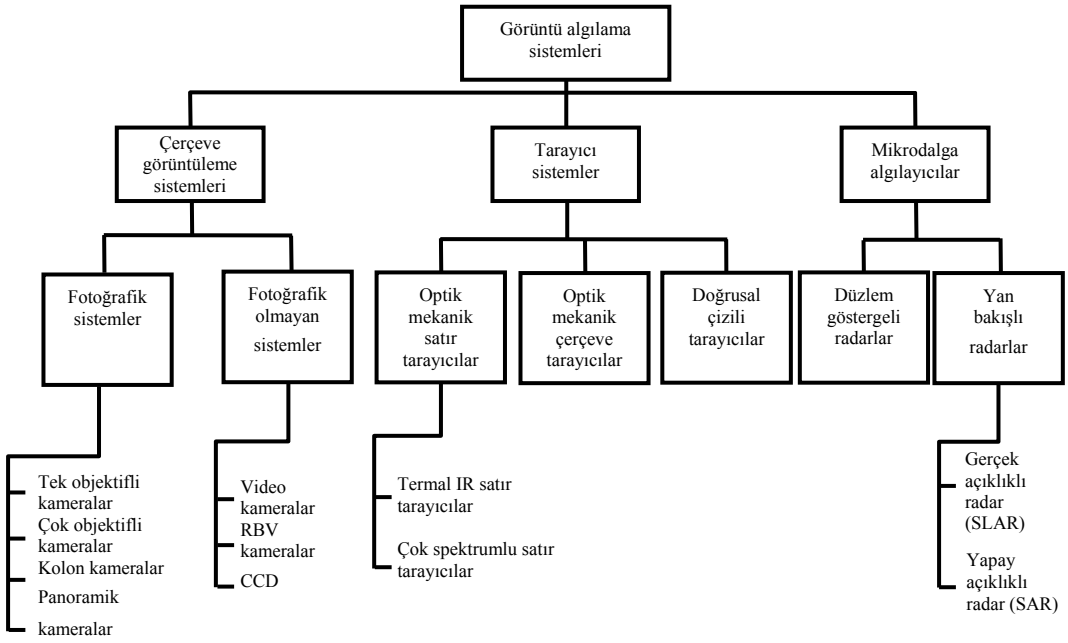
Sayısal kameralardan elde edilen görüntülerin formatları klasik filmlere göre biraz küçüktür. Görüntü formatının küçük olması bir sınırlama gibi görünse de kolay elde edilebilir olması ve doğrudan kullanıma hazır olması bu sınırlamayı ortadan kaldırmaktadır.

3.2 Sayısal Hava Kameralarının Sınıflandırılması

Sayısal görüntü oluşturan sistemler, çalışma biçimi ve çalıştığı spektral alanı esas alan iki temel ölçüte göre aşağıdaki şekilde sınıflandırılabilir:

- Çerçeve Görüntüleme Sistemleri : Aynı anda tüm görüntü çerçevesinin görüntü kaydı sırasında görünür ve yakın kızılötesi bölgede yansıyan enerjinin kayıt edildiği sistemler.
- Tarayıcılar : Görüntü tarayarak çalışan ve kristal dedektör elemanları aracılığı ile elektromanyetik spektrumun görünür ve yakın kızılötesi bölgedeki ışımayı kayıt eden sistemler.
- Mikrodalga Algılayıcılar : Aktif olarak algılayıcı tarafından oluşturulup yeryüzüne gönderilen ve buradan yansıyan mikrodalga enerjinin kaydedildiği sistemler.

Çerçeve görüntüleme sistemleri ve Tarayıcılar pasif, Mikrodalga algılayıcılar ise aktif sistemler olarak değerlendirilmektedir. Aşağıdaki şekilde (Şekil 3.2) görüntü oluşturan sistemlerin sınıflandırılması şematik olarak gösterilmiştir. Burada, çerçeve görüntüleme sistemleri ve tarayıcı sistemler incelenecek olup mikrodalga algılayıcılardan bahsedilmeyecektir.



Şekil 3.2 Görüntü oluşturan sistemlerin sınıflandırılması

Pasif elektro-optik sistemlerin genel özellikleri çerçeve görüntüleme sistemleri ve tarayıcı sitemlere göre değişiklik göstermekle birlikte Çizelge 3.2'deki gibidir (Honkavaara, 2008).

Çizelge 3.1 Pasif elektro-optik sistemlerin genel özellikleri

Özellikler	**Seçenekler**
Algılayıcı	CCD, CMOS
Görüntü Formatı	Dikdörtgen dizilişli (küçük-, orta- veya büyük-format), satır dizilişli
Görüntü Geometrisi	Çerçeve, satır (pushbroom), panoramik, nokta (whiskbroom)
Kapsama Alanı	Dar, orta, geniş-açılı, vb.
Spektral Duyarlılık	Monokromatik, renkli, renkli-kızılötesi (CIR), termal, multispektral (4-10 kanallı) ve hiper-spektral (örn.: 200 veya daha fazla kanallı)
Radyometri	Lineer, non-lineer (lineer olmayan), kalibre edilmiş, kalibre edilmemiş
Konumsal Çözünürlük	Yer örnekleme mesafesi (yer çözünürlüğü): cm, dm ve m sınıflandırması
Geometri	Metrik, metrik olmayan, kalibre edilmiş, kalibre edilmemiş, doğruluk potansiyeli: cm, dm ve m sınıflandırması

Entegrasyon	Büyük formatlı görüntü sağlayan çok mercekli kameralar; farklı multispektral kanallara sahip çok mercekli kameralar; görüntülenecek olan yüzeyin farklı görüntülerini sağlayacak eğik ve dik (düşey) kameralar; Kameralar ve lazer tarayıcılar; Görüntüleme sistemleri ve GPS/IMU sistemleri

Fotogrametrik sayısal hava kamerası sistemlerinin bileşenleri ve fotogrametrik sistem performansını etkileyen faktörler Çizelge 3.2'de sunulmuştur (Honkavaara, 2008).

Çizelge 3.2 Fotogrametrik sayısal hava kamerası sistemlerinin bileşenleri ve fotogrametrik sistem performansını etkileyen faktörler

Sistem	Algılayıcı	Mercekler, CCD, Filtreler, sinyal bölücü (beam splitter), obtüratör
	Diğer sistem bileşenleri	Kamera mauntu, kamera penceresi, doğrudan konumlana sistemi (GPS/IMU), uçak
	Kalibrasyon	Modeller, parametreler ve geometri, konumsal çözünürlük ve radyometri metotları
	Veri işleme yazılımı	Görüntü işleme, doğrudan coğrafi konumlama işlemleri, coğrafi konumlama (georeferencing)*, görüntünün yeniden oluşturulması (restoration)*, radyometrik düzeltmeler*
Fotogrametrik Ağ	Blok yapısı	Uçuş kolonu sayısı, görüntü (fotoğraf) sayısı, ileri ve yan bindirmeler, rölatif yöneltmeler
	Kontrol	Yer Kontrol Noktaları*, doğrudan konumlama ölçümleri, GPS yer istasyonları, atmosferik gözlemler*, yerinde (arazide) yansıyan ve yayılan ışık ölçümleri, yansıma referans hedefleri*,konumsal çözünürlük referans hedefleri*
Durum (Şartlar)	Sistem ayarları	Diafram açıklığı, pozlama zamanı, FMC, uçuş esnasında veri işleme (Örn. sıkıştırma),
	Sistemi etkileyen çevresel etkenler	Uçağın irtifası, titreşim ve salınımı, hızı, ısı, basınç, nem
	Atmosfer	Refraksiyon, Mie ve Rayleigh saçılımı (görünürlük), soğurma, türbülans, bulut oranı, ısı, basınç, nem
	Yansıma	Direk gün ışığı, karışık ışık, güneşin açısı, ışığın spektral dağılımı

Cisim (Hedef)		Yapısı, kontrastı, anizotropisi (eşyönsüzlüğü) ve komşu cisimler

Sayısal kameralar genel olarak çerçeve görüntüleme sistemlerini veya tarayıcı sistemlerini kullanmaktadır. Bu tür kameralar genellikle CCD (Charge-Coupled Devices) kameralardır. Bu kameralar ile görüntü verileri genellikle yüksek kapasiteli disklere sayısal olarak kayıt edilir.

Çerçeve görüntüleme sistemi, görüntü alım anında tüm görüntü çerçevesinin aynı anda kaydedildiği sistemlerdir. Bu tür sistemlerin en ayırt edici özelliği, tüm görüntülerin perspektif geometriye sahip olmaları ve analiz işleminde geleneksel fotogrametrik ölçme tekniklerinin kullanılabilmesidir. Böyle bir çerçeve kameranın en belirgin avantajı tüm pikseller aynı anda görüntüleme yapacağı için anlık platform hareketleri görüntü geometrisi açısından fotoğrafik çerçeve kameralar ile aynı olacaktır ve bu sayede geometrik doğruluk oldukça yüksek olacaktır.

Tarayıcı sistemlerin temel esası ise, uçuş yönüne dik bir hat boyunca yer alan arazinin, bir ucundan diğer ucuna belli bir açı altında tarama işlemi, ya mekanik olarak dönen ya da sarkaç gibi salınan ayna yardımı ile gerçekleştirilir. Her satır elektronik olarak taranır, taranan değerler sistemin parçası olan veya özel olarak tasarlanmış bir yüksek kapasiteli depolama diskine kaydedilir. Görüntünün geometrik kalitesinde ortaya çıkabilecek azalmayı önlemek için her bir dedektör elemanının kalibrasyonuna özen göstermek gerekmektedir.

Geometrik doğruluk açısından, çerçeve görüntüleme sistemi ile çalışan görüntü algılayıcıların özellikle X-Y doğrultularındaki kararlı yapıları nedeniyle bir üstünlüğü söz konusudur. Tarayıcı sistemlerde Şekil 3.3'de verilen örnekte olduğu gibi ham görüntü belirli bir işlemden sonra kullanılabilir hale gelmektedir. Bu işlem sırasında kaliteli bir görüntü elde edebilmek için özellikle sensörlerin kalibrasyonu ve GPS/IMU ile elde edilen yöneltme parametrelerinin doğruluğu önem kazanmaktadır. Ayrıca, bu işlem adımı görüntünün elde edilmesinden sonra kullanılabilmesi için belirli zaman sürecine ihtiyaç duyulmasına neden olmaktadır.



(a) (b)

Şekil 3.3 Tarayıcı sistemlerle elde edilen ham (a) ve işlenmiş görüntü (b)

3.2.1 Çerçeve görüntüleme sistemleri (Frame kameralar)

Aynı zaman diliminde, tüm görüntü çerçevesinin pozlandığı algılama sistemlerine çerçeve görüntüleme sistemleri adı verilir. En genel örneği hava kamerası olup, kamera obtüratörü (shutter) ile pozlanan her çerçeve, fotoğrafik emülsiyon üzerine kayıt edilir. Kayıt ortamı her zaman fotoğrafik olmayabilir. Bu tür sistemlerin en ayırt edici özelliği, tüm görüntülerin perspektif geometriye sahip olmaları ve analiz işleminde geleneksel fotogrametrik ölçme tekniklerinin kullanılmasıdır.

Hava fotogrametrisi ve optik uzaktan algılama metotları 1990'lı yıllardan itibaren film tabanlı optik algılayıcılardan multispektral kabiliyetlere de sahip olan bütünüyle sayısal elektro-optik algılayıcılara ve aktif elektronik algılayıcılara doğru bir evrim geçirmiştir. Çerçeve yapıda olan CCD algılayıcıların satır tarayıcı sistemlere nazaran kararlı geometrik yapıları nedeniyle, daha avantajlı bir durumda oldukları söylenebilir. CCD algılayıcıları yersel fotogrametride ilk olarak kullanan Kodak firması olsa da, uzaktan algılama uygulamaları ve hava fotogrametrisine uygun olan geniş alanlı 7000*9000 çözünürlüğe, 12 μm*12 μm piksel büyüklüğüne sahip ilk CCD tasarımını Philips Imaging Technology firması tarafından Einhoven/Hollanda'da gerçekleştirmiştir (Fritsch 1996).

Analitik fotogrametriden sayısal fotogrametriye geçiş esnasında, teknolojik gelişmenin en mantıksal sonucu, film bazlı fotoğrafların taranması yerine, direk olarak sayısal kamera kullanarak klasik hava kameraları ile benzer iç yöneltme, kaplama alanı ve çözünürlüğe sahip görüntü elde etme isteği olmuştur. Çerçeve (matris) CCD algılayıcıların en belirgin avantajları; tüm pikseller aynı anda görüntüleme yapacağı için anlık platform hareketleri

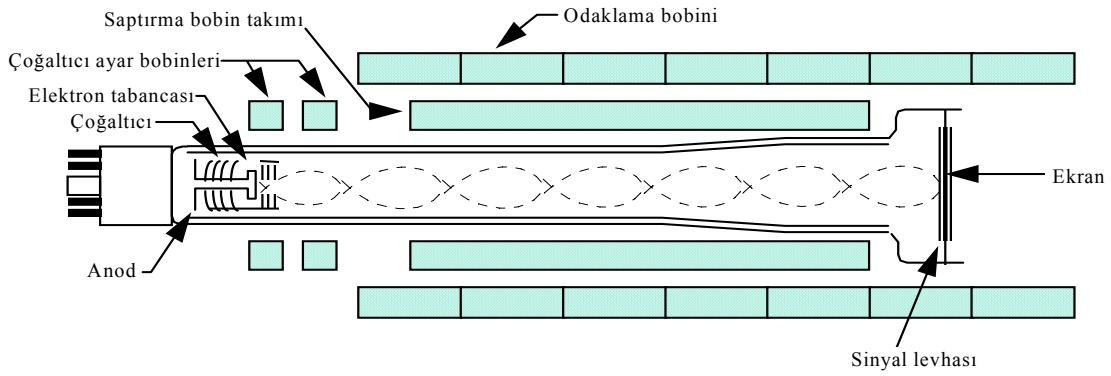
görüntü geometrisinin fotoğrafik (film tabanlı) çerçeve kameralar ile aynı olması, görüntü sürüklenmesini önleyici sistem (FMS), kare piksel yapısı, alışılmış merkezi izdüşüm kurallarına uygun görüntü kaydı ve mevcut yazılımların kullanılabilmesidir (Hinz 1999).

İlk zamanlarda sayısal hava kamaralarının küçük formatlı oluşu, bu kameraların topoğrafik harita üretiminde kullanılmalarını kısıtlamaktaydı. Gelişen teknolojiye paralel olarak büyük formatlı sayısal hava kameraları geliştirilmiş ve her ölçekte topoğrafik haritalama çalışmalarında kullanılabilir hale gelmiştir.

3.2.1.1 Dönen ışınlı vidikon (RBV) kameralar

RBV kameralar vidikon kameralara benzer tarzda çalışır. Ancak vidikondan farklı olarak, sinyal, elektron tabancasının açıklığına sürekli bir şekilde geri yansır. Bu tasarımın başlıca yararı, yüksek ayırma güçlü görüntü üretme ve ışığa duyarlı yüzeyi daha uzun süre için odaklanmış bırakma yeteneğine sahip olmaktır. RBV tüpünün esas özelliği; sinyalin, fotoiletkeni tekrar yüklemek için olan akım yerine, ekrandaki sinyal levhasında yansıtılan yükünü boşaltmış elektron ışınından elde edilmesidir (Şekil 3.4).

Bu elektron ışını, ekrandaki yük örneği ile değiştirilir ve tüpün arka ucundaki beş kademeli elektron çoğaltıcısının foto yayıcı plakasına geri gelir. Elektron ışınındaki bu değişiklik kayıt edilerek görüntü için veri elde edilir.

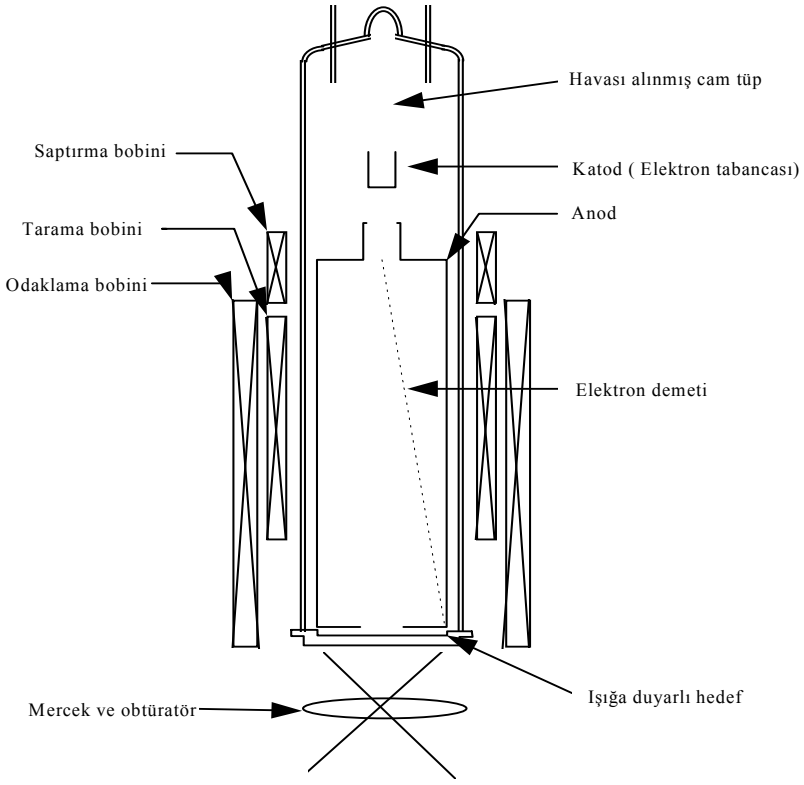


Şekil 3.4 Dönen ışınlı vidikon (RBV) tüpü

3.2.1.2 Video kameralar

Video kameradaki görüntüleme sistemi klasik mercek ve obtüratör düzeneğini esas alır. Ancak, fotoğrafik yöntemlerden farklı olarak video görüntü, gümüş tuzlu emülsiyon üzerine değil de ışığa duyarlı ekran üzerine düşürülerek oluşturulur (Şekil 3.5). Vidikon tübün

yüklenme (şarj) yüzeyine düşen ışın, parlaklığıyla orantılı bir pozitif yüklenmeye neden olur ve böylece yüklenme yüzeyinde bir görünmeyen görüntü (latent image) oluşur. Görünmeyen bu görüntüyü geliştirmek için bir elektron demeti, yüklenme yüzeyini raster tarzda tarar ve başlangıçtaki pozitif yüklenmeyi boşaltır.



Şekil 3.5 Vidikonun çalışma esası

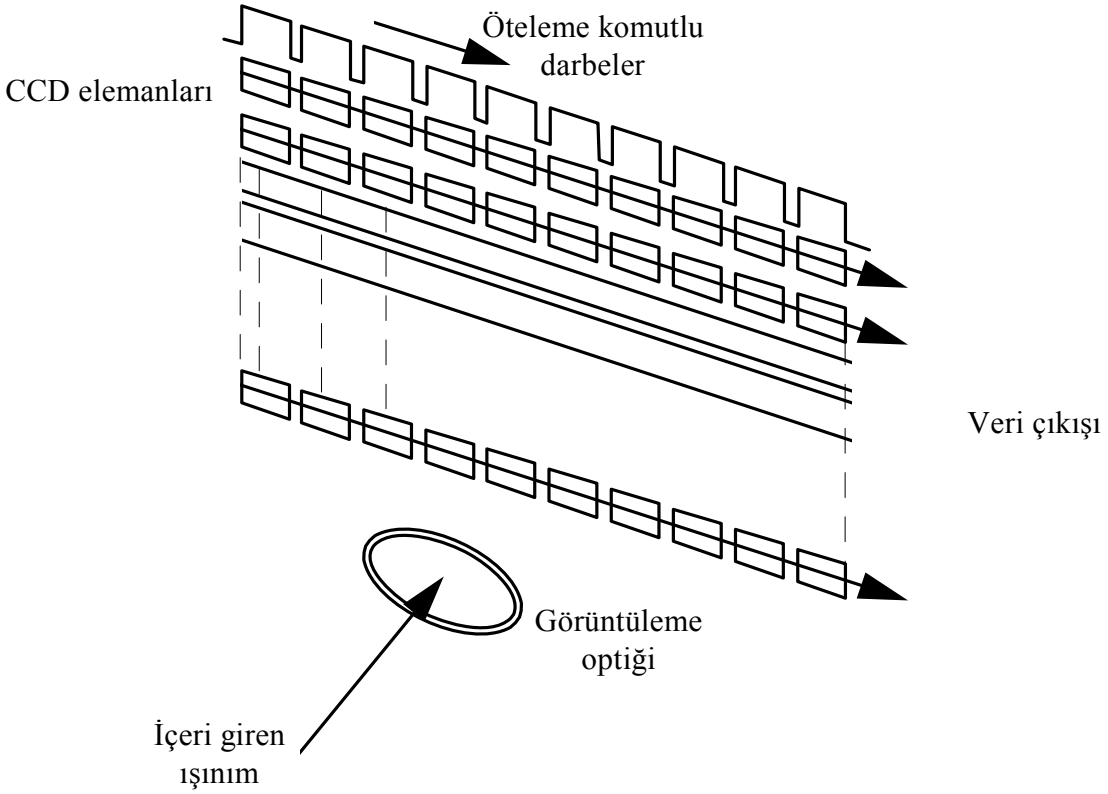
Video kameralarda kullanılan mercekler normal olarak çok kısa asal uzaklığa (8-35mm) sahiptir ve görüntü boyutları klasik fotoğrafik yöntemlerle kıyaslandığında oldukça küçüktür. Ardışık görüntü çerçeveleri ya U-Matic veya VHS video bantlar üzerine 25 ila 30 Hz arasındaki oranlarda kayıt edilir.

3.2.1.3 Çerçeve CCD (Charge Coupled Device) kameralar

Bu kamera sistemleri, elektron görüntülemedeki en son gelişmelerden biridir. Genellikle, bir dizi silisyum diyottan oluşan birleşik ışığa duyarlı yüzey obtüratörlü optik sistem arkasına yerleştirilmiştir.

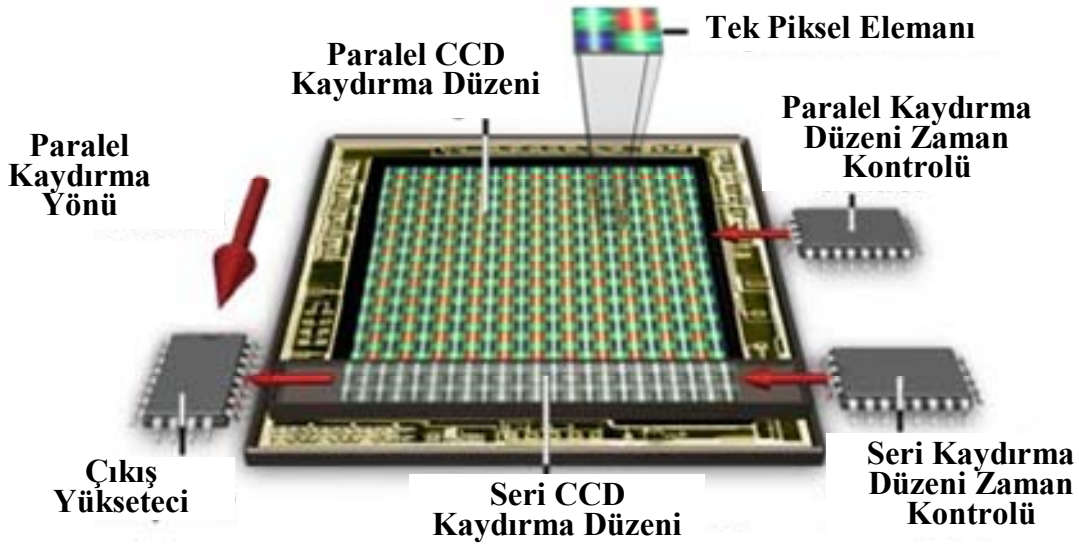
Her silisyum diyot Şekil 3.6'da görüldüğü gibi, bir dizi tüm devre MOS (Metaloksit -yarı iletkeni) düzenindeki yük (şarj) depolama hücresine bağlanmıştır. Işık, dizideki bir diyota çarptığında, çarpan ışıkla orantılı bir akım oluşturur ve bu akım, diyotun arkasındaki yük

hücresine geçirilir. Yük hücrelerinin hepsi, hücreleri ardışık biçimde okuması için uyarılabilen, bir elektronik ötelemeli kaydedicinin parçası olabilir. Çıkış sinyalleri, görüntüyü yeniden oluşturmak için öteleme darbeleri ile korelasyonludur.



Şekil 3.6 CCD görüntüleme sistemi

CCD'ler kararlı katı yapıda elektronik cihazlardır. Görüntü algılama ve kaydetme ile ilgili hemen her tür cihaz için kullanılır. CCD'nin yüzeyi binlerce bağımsız ışığa duyarlı pikselin birleşiminden meydana gelir. Pozlama sonrasında pikseller tarafından algılanan enerji CCD yüzeyinde iki yönlü olarak kayarak çıkış yükseltecine, buradan da depolama ünitesine aktarılır. Işık duyarlılığı filme nazaran 50-100 kat fazladır (Şekil 3.7).



Şekil 3.7 Çerçeve (matris) CCD mimarisi

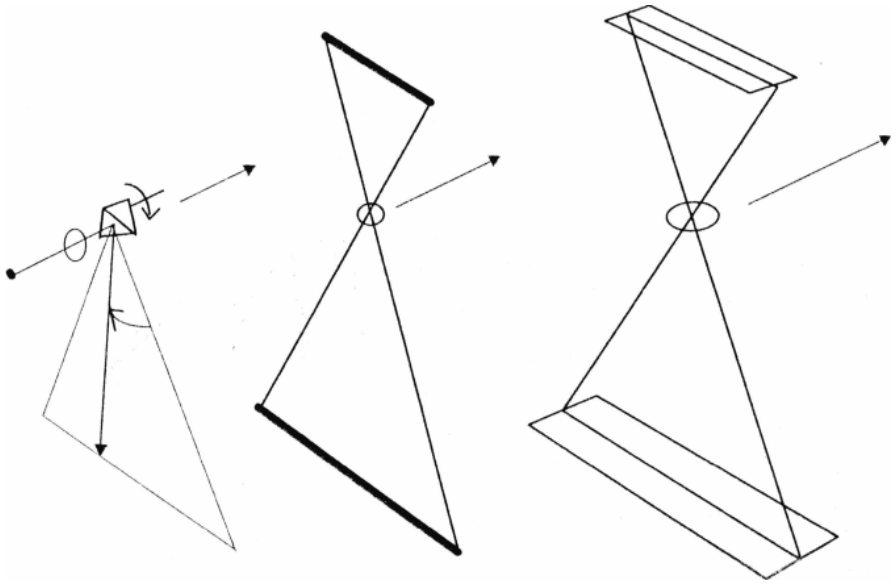
3.2.2 Tarayıcı sistemler (Line kameralar)

Tarayıcı sistemler çalışma ve görüntüleme prensipleri açısından, optik-mekanik satır tarayıcılar, optik-mekanik çerçeve tarayıcılar ve doğrusal dizili (pushbroom) tarayıcılar olmak üzere üçe ayrılırlar. Günümüzde piyasada olan sayısal hava kameralarında yaygın olarak kullanılanlar doğrusal dizili (pushbroom) tarayıcılardır.

3.2.2.1 Optik - mekanik satır tarayıcılar

Eşzamanlı, fotoğrafik (veya fotoğrafik olmayan) çerçeve görüntüleme tekniği ve ardışık satır tarama yaklaşımları arasındaki geometrik ayrım vardır. Bu gibi sistemler arasında kendine özgü diğer bir farklılık da; elektromanyetik spektrumun fotoğrafik emülsiyon üzerine kayıt edilemeyen, 0.4 mikron dalgaboyundan küçük morötesi ve 0.9 mikron dalga boyundan büyük kızılötesi bölgelerindeki ışınımı ölçme yeteneğine sahip olmalarıdır.

Satır tarayıcının temel esası; uçuş yönüne dik bir hat boyunca yer alan arazinin, bir ucundan diğer ucuna belli bir açı altında taranma işlemi sırasında, yeryüzündeki mevcut nesnelerden yansıyan veya yayılan ışınımın araştırılmasıdır. Söz konusu tarama işlemi, ya mekanik olarak dönen ya da sarkaç gibi salınan ayna yardımı ile gerçekleştirilir. (Şekil 3.8).



Şekil 3.8 Optik mekanik satır tarayıcı

Satır tarayıcılar, iki ayrı tasarım biçimi altında incelenebilirler. Bunlar; genellikle elektromanyetik spektrumun termal kızılötesi bölgesinde, termal tarayıcılar olarak da isimlendirilen ve sadece tek dalga bandını kayıt eden tarayıcılar ve görüntüleri çeşitli dalga bantlarında kayıt eden çok spektrumlu tarayıcılardır (MSS).

3.2.2.2 Optik - mekanik çerçeve tarayıcılar

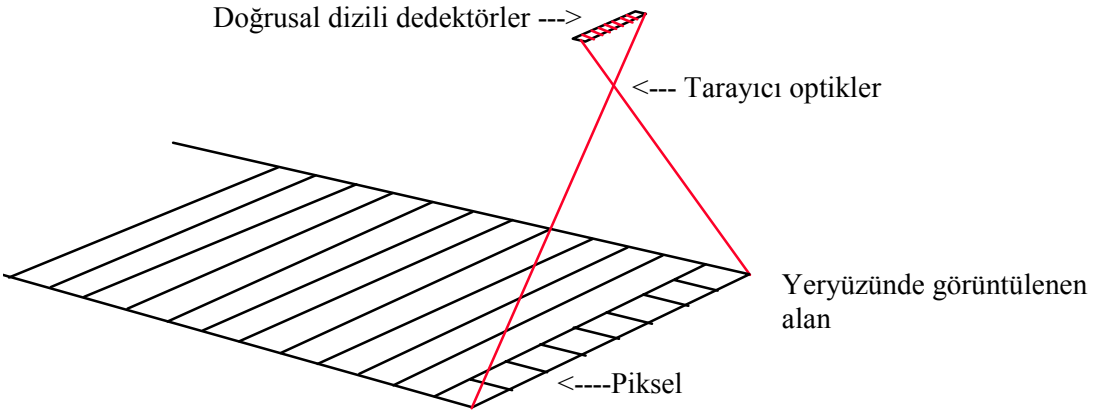
Uzaktan algılama yöntemi ile görüntü elde etmede kullanılan tarayıcıların en karmaşık optik-mekanik tasarımlı olanı çerçeve tarayıcılardır. Daha önce anlatılan satır tarayıcıların aksine, veriler bu kez çerçevenin tümünü kaplayacak biçimde toplanır. Bu tip algılayıcılar genellikle spektrumun termal bölgesinde çalışır ve termal video çerçeve tarayıcısı (TVFS) olarak da adlandırılırlar. Taşınabilir olmaları nedeniyle daha çok mühendislik uygulamalarında yararlanılır ve hafif uçaklarda kullanılabilir. Böylece çalışma maliyetinde de azalma sağlanmış olur.

3.2.2.3 Doğrusal dizili (Pushbroom) tarayıcılar

Doğrusal dizili ya da pushbroom tarayıcılar optik-mekanik tasarımlı tarayıcılardan önemli derecede farklılıklar gösterir. Gerçekte bu tür sistemler tarayıcı olarak isimlendirilmelerine karşın onları diğerlerinden ayıran başlıca özellik, görüntünün bilinen tarzda bir tarama işlemine uğramamasıdır. Görüntünün her satırı, sistemin odak düzlemine yerleştirilmiş CCD dedektörlerinin tek sıralı doğrusal dizisi üzerine doğrudan düşen ışınım ölçülerek elde edilir (Şekil 3.9). Daha sonra, her satır elektronik olarak taranır ve ışınım değerleri manyetik bant

üzerine veya sistem dahilinde bulunan bir depolama diskine kaydedilir. Evvelce olduğu gibi, uçak ya da uydunun ileri hareketi ile ardışık görüntü satırları oluşturulur.

Görüntünün geometrik kalitesinde ortaya çıkabilecek azalmayı önlemek için her bir dedektör elemanının kalibrasyonuna özen göstermek gerekmektedir.



Şekil 3.9 Doğrusal dizili (Pushbroom) tarayıcının çalışma esası

3.3 Yüksek Çözünürlüklü Sayısal Hava Kameralarının İncelenmesi

Bu bölümde günümüzde piyasada bulunan ve çoğunluğu faal olarak fotogrametrik harita üretim projelerinde kullanılan sayısal hava kameraları ve bu kameraların teknik özelikleri hakkında özet bilgiler verilecektir.

Günümüzde ticari alanda kullanılan sayısal hava kameraları (CCD algılayıcılı olanlar) tasarım ve çalışma prensipleri göz önüne alınarak iki ayrı kategoride incelenebilir. Satır tarayıcı ve çerçeve görüntüleme sistemleri:

- Doğrusal satır tarayıcı sistemler "push-broom" tarayıcılar olarak da adlandırılırlar. Bu görüntü alım sistemlerinde uçuş yapılan kolon boyunca sürekli ve kesintisiz bir görüntü elde edilir. Dolayısıyla tek ve bağımsız görüntülerden oluşan bir uçuş kolonu mevcut değildir. Doğrusal satır tarayıcı sistemler, uçağın ileri hareketi esnasında uçağa yerleştirilmiş olan bir veya daha fazla doğrusal satır algılayıcının arazi yüzeyini taraması ile görüntü alımı yapar (Trinder 2005). Genellikle, bu tür sayısal hava kameralarında kamera objektifi içerisine üç farklı doğrultuda (ileri, geri ve düşey) yerleştirilmiş, üç adet algılayıcı bulunur, bu sayede uçağın kolon üzerinde tek bir uçuşu ile üç ayrı bindirmeli görüntü elde edilebilir. Bu nedenle, oluşan görüntünün geometrisi perspektif projeksiyon (merkezi izdüşüm) kurallarına uygun değildir ve görüntünün işlenmesi için özel yazılımlar gerektirir. Yine bu tür kameralarda GPS/IMU sistemlerinin kullanımı bir kolaylık değil, zorunluluktur (Cramer 2004, Zakiewicz 2008). Jena Airborne Scanner (Jas 150s), Wehrli'nin 3-DAS-1 sistemi ve Leica-Geosystem firmasının ADS40 ve 2nci jenerasyon ADS40 sayısal hava kameraları "push-broom" teknolojisine örnek gösterilebilecek olan kameralardır (Lemmens 2008).

- Çerçeve CCD algılayıcılar, çerçeve görüntüleme sistemleri olarak adlandırılır ve geleneksel işlem adımlarına uygun olan çözümler sunarlar. Çerçeve yapıdaki görüntüler standart fotogrametrik yazılımlar kullanılarak işlenebilir. Teorik olarak, sayısal hava kameraları yüksek kaliteli bir GPS/IMU sistemi ile beraber kullanılırsa, fotogrametrik nirengi ve dengeleme işlemlerine ihtiyaç duyulmayacaktır. Applanix Digital Sensor System DSS (422 ve 439 modelleri), DIMAC Systems DiMAC 2.0, IGI Digi CAM, Intergraph Digital Mapping Camera (DMC), Microsoft/Vexcel Large Format Digital Aerial Frame Cameras: UltracamX ve UltraCamD, The Aerial Industrial Camera (AIC) from RolleiMetric aln dizi CCD algılayıcılı (çerçeve görüntüleme sistemine sahip) hava kameralarına örnek olarak verilebilir (Zakiewicz 2008).

Sayısal hava kameralarının film bazlı hava kameralarının yerine geçmeye başlaması Temmuz 2000 yılında LH-Systems firmasının (şimdiki adıyla Leica Geosystems) ADS-40 kamerasını, Z/I Imaging firmasının ise DMC kamerasını üretmesi ve piyasaya sürmesi ile olmuştur. Mayıs 2003 tarihinde ise $UltraCam_D$ geniş formatlı çerçeve görüntüleme sistemli sayısal hava kamerası piyasaya sürülmüştür. Bu kamera 90 Mpiksellik geniş formatlı ve film bazlı hava kameralarının birebir karşılığı olduğu düşünülen bir kamerasıdır ve film bazlı hava kameralarını birebir karşılaması için film bazlı çerçeve görüntüleme sistemli hava kameralarının geleneksel iyi bilinen iş akışı kullanılmıştır.

Bu kameranın ortaya koymuş olduğu ilk avantajlar, tüm sayısal iş akışında kolaylık, film, foto-laboratuar ve fotoğraf tarama işlemlerinin son bulmasıyla masraflardaki azalmadır.(Leberl ve Gruber 2003). Bu ilk avantajlardan öte, sayısal kameralar tüm fotogrametrideki mevcut durumu geliştirerek, fotogrametrik iş akışına sayısız seçenekler getirmiş ve diğer bir deyişle yaklaşımları "kökten" değiştirmiştir. Getirdiği en önemli yenilik, fotoğraf alımında herhangi bir fazladan maliyet gerektirmeksizin ileri bindirme oranının inanılmaz oranda artırılması ve fotogrametrik iş akışındaki yüksek seviyede otomasyondur. Ayrıca, fotogrametrik yazılımların, kullanılan mevcut stereo çözümlerden (2-ışınlı), çoklu ışınlı çözümlemelere cevap verecek şekilde uyarlanma gereksinimi de ortaya çıkmıştır.

Bunun yanında, çoklu ışın tasarımı sayısal kameralar için yüksek çözünürlüklü pankromatik görüntü kaydederken, aynı anda renkli ve infrared görüntü kaydedilmesine de imkân tanımaktadır. (Leberl ve Gruber 2003)

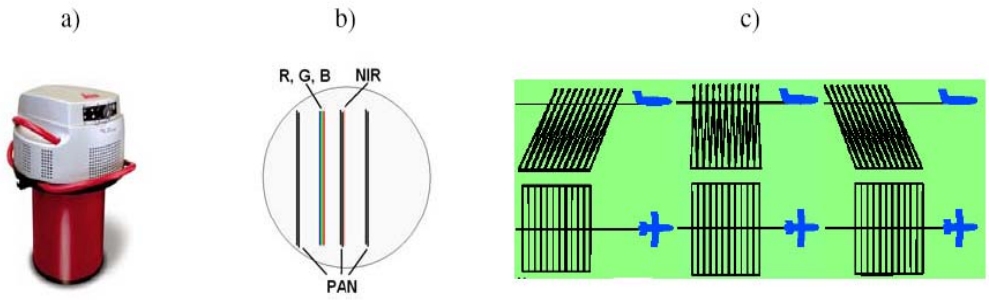
Piyasada çok çeşitli kameralar bulunmakla beraber, tümü hakkında açıklayıcı ve teknik bilgi vermek mümkün değildir. Sayısal kameralar temel olarak görüntüleme geometrisi, algılayıcı sayısı (kamera objektif sayısı veya CCD sayısı) ve görüntü kaydetme teknikleri açısından çeşitli farklılıklar göstermektedir. Piyasadaki kameralar ve temel görüntüleme özellikleri (Çizelge 3.3)'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.3 Piyasadaki kameralar ve temel görüntüleme özellikleri (Cramer 2003)

	Algılayıcı	Geometri		Algılayıcı Sayısı		Görüntü Kaydı	
		Satır	Çerçeve	Tek	Çoklu	Senkronize	Sintopik
1	ADS 40	X		X		X	
2	DMC		X		X	X	
3	Ultracam		X		X		X
4	DSS		X	X		X	
5	HRSC-A	X		X		X	
6	DIMAC		X	X		X	
7	IGN		X	X		X	

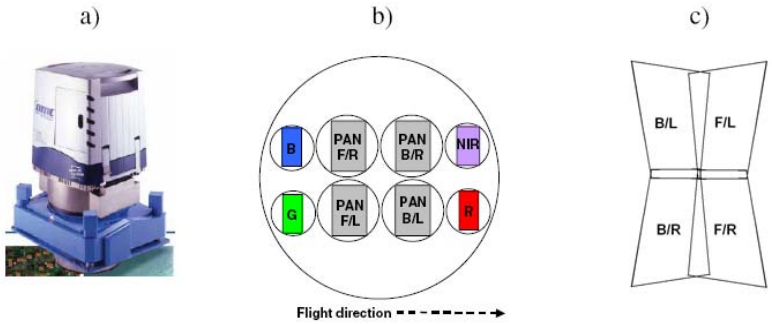
Bu bölümde günümüzde kullanımı diğerlerine nazaran yaygınlaşmış olan ve aynı zamanda topoğrafik harita (büyük ve orta ölçekli) üretim ihtiyaçlarına cevap verebileceği düşünülen Leica-Geosystems ADS40, Intergraph Digital Mapping Camera (DMC) ve Microsoft/Vexcel Geniş formatlı sayısal hava kamerası ($UltraCam_D$) sayısal hava kameraları incelenecektir. İncelenecek olan sayısal hava kameraları ve temel görüntüleme prensipleri aşağıda sıralanmıştır.

Leica ADS40 sayısal fotogrametrik hava kamerasının görüntüsü, algılayıcıların odak düzlemine yerleşimi, üç satırlı stereo görüntüleme prensibi Şekil 3.10'da gösterilmektedir (Fricker ve ark. 1999).



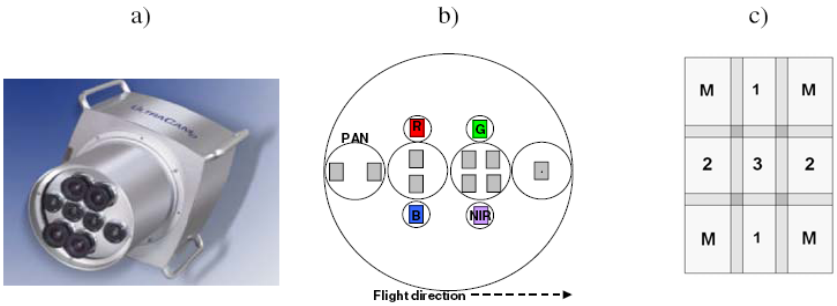
Şekil 3.10 ADS40 kamera (a), algılayıcıların yerleşimi (b), görüntüleme prensibi (c)

DMC (Intergraph) sayısal fotogrametrik hava kamerasının görüntüsü, sekiz adet kamera objektif yerleşimi (F, B, R, L sırasıyla ileri, geri, sağ ve sol konvergens açıları), dört adet eğik görüntüden büyük formatlı pankromatik görüntü oluşturma prensibi Şekil 3.11'de gösterilmektedir.



Şekil 3.11 DMC kamera (a), objektif yerleşimi (b), görüntüleme prensibi (c)

UltraCam$_D$ (© Microsoft) sayısal fotogrametrik hava kamerasının görüntüsü, sekiz adet kamera objektif yerleşimi, dokuz adet görüntü bileşeninden büyük formatlı pankromatik görüntü oluşturma prensibi Şekil 3.12'de gösterilmektedir (Honkavaara 2008).



Şekil 3.12 UltraCam$_D$ kamera (a), objektif yerleşimi (b), görüntüleme prensibi (c)

Uygulamada kullanılan Microsoft/Vexcel UltraCam$_X$ sayısal fotogrametrik hava kamerası ile ilgili olarak daha detaylı bilgi 4'üncü bölümde verilecektir.

3.3.1 Z/I Imaging Digital Mapping Camera (DMC)

Sayısal hava kameralarından beklenen, en az analog hava kamerası doğruluk kriterlerini karşılayabilir olmasıdır. Bu amaçla Z/I Imaging firması, 2003 yılı başlarında sayısal işlem akışı içerisindeki bütün ihtiyaçları karşılayacak şekilde çerçeve görüntüleme sistemi ile çalışan modüler bir sistem tasarlayarak piyasaya sunmuştur (Madani ve ark. 2004). Sistem, geniş bir alan için görüntü yorumlama, haritalama, sayısal görüntü transferi işlemlerine olanak sağlamaktadır (SAM, ortofoto üretimi, vs.) (Şekil 3.13).

Bütün sayısal hava kameralarının ortak bir özelliği olarak, sayısal hava kameralarının kullanılması ile klasik hava kameraları ile fotoğraf alımı esnasında ve sonrasında yapılması gereken birçok işlem adımı elimine edilebilir. Film, film banyo işlemleri, taranması ve

fotogrametrik nirengi çalışmaları film bazlı klasik uçuş görevlerinin temel giderlerini oluşturmaktadır. Sayısal hava kameralarının kullanılması ile filmin kendisi, zahmetli ve zaman alıcı banyo işlemleri ile film tarama işlemleri elimine edilir, maliyet ve zaman tasarrufu sağlanmış olur.



Şekil 3.13 Z/I Imaging Digital Mapping Camera (DMC)

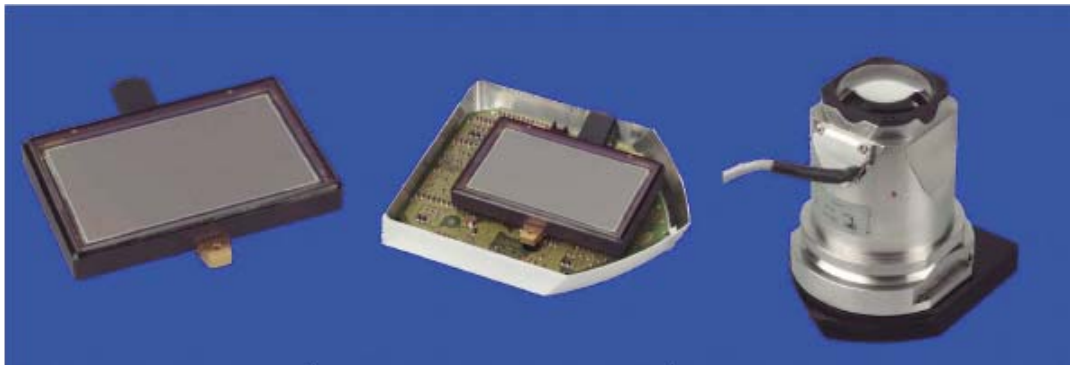
3.3.1.1 Sistem bileşenleri

- DMC ana kamera bileşenleri:
  - 4 adet yüksek çözünürlüklü 7k x 4k kamera kafası
  - 4 adet multispektral 3k x 2k kamera kafası
  - Kamera elektronik bileşeni
  - 3 adet her biri 576 GB ,toplamda 1.7 TerraByte (4400 görüntü depolama kapasitesine sahip) uçuş veri depolama diski
- Z/I Görev Yazılımı
- Z/I In-Flight yazılımı, hava algılayıcı yönetim sistemi ve uçuş yönetim sistemi olan ASMS'in yeni sürümüdür ve aşağıdaki bileşenlerden oluşmaktadır:
  - In-Flight çekirdek yazılımı
  - In-Fligh algılayıcı kontrol modülü (DMC için)
  - Geliştirilmiş bilgisayar sistemi (dizüstü bilgisayar ihtiyacını ortadan kaldırmaktadır)
  - Video kamera
  - Pilot ekranı
- T-AS Gyro sabitlenmiş kamera süspansiyon bağlantısı
- T-AS Adaptör uyarı kiti
- Yer bazlı post-proses sistemi içeriği (www.intergraph.co.za/downloads)

3.3.1.2 Sistem özellikleri

DMC kamerasında CCD'ler tam bir çerçeve yapısında, büyük optik kaplama alanı sağlayacak

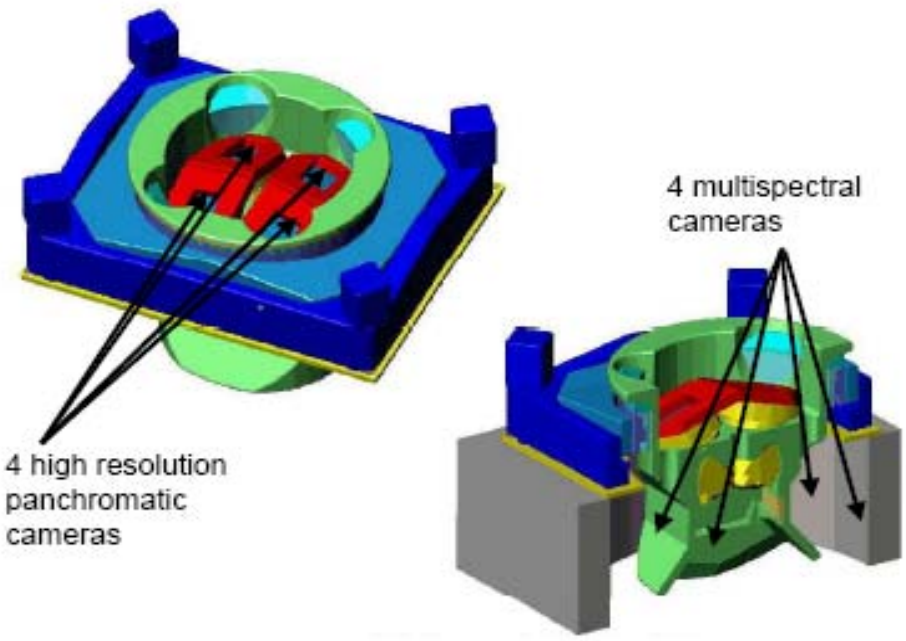
şekilde, yüksek hassasiyetle yerleştirilmiş ve Philips firması tarafından Eindhoven'da üretilmişlerdir. 12 bit'ten büyük yüksek lineer dinamik aralığa sahip olarak 12µm *12µm piksel boyutunda üretilmişlerdir. CCD'lerin mimarisi çipin dört köşesinde okuma yapabilmeyi mümkün kılar. Çerçeve algılama sisteminin (CCD), iki boyutlu olmasından dolayı, elde edilen görüntünün X ve Y doğrultusunda bilinen hassas bir geometrisi vardır. Oluşturulan bu algılayıcı mimarisi, her iki saniyede bir görüntü alma olanağı sağlar ki, bu da iyi bir sinyal/gürültü (S/N) oranı elde etmek için çok önemlidir. CCD kontrolünü ve sayısal sinyallerin okunmasını sağlayan, sinyal zamanlamasını ayarlayan ve en uçta bulunan elektronik devreler düşük gürültü performansı elde edebilmek için CCD'lerin hemen arkasına yerleştirilmişlerdir. CCD sinyallerinin sayısallaştırılması 12 bit çözünürlükle gerçekleştirilir (Şekil 3.14) (Hinz ve ark. 2001).



Şekil 3.14 DMC kamera kafası

DMC kamerası objektifi içerisinde dört pankromatik ve dört adet multispektral kamera modülü (kafası) mevcuttur. Pankromatik kamera modülleri maksimum kaplama alanı oluşturmak için hafifçe eğik bir vaziyette aşağı bakar bir şekilde yerleştirilmişlerdir (Şekil 3.15).

Yüksek çözünürlüklü RGB görüntünün elde edilebilmesi için ilk olarak, kameranın üretimi esnasında sekiz bağımsız kamera kafası laboratuar ortamında radyometrik ve geometrik olarak kalibre edilir. Bu kalibrasyon sırasında elde edilen bilgiler, fotoğraf alımı esnasında ve sonrasında bütünleşik, yüksek çözünürlüklü sonuç görüntünün elde edilmesi aşamasında dört pankromatik ve dört multispektral görüntünün birleştirilmesi amacıyla kullanılacaktır (Zeitler ve ark. 2002).



Şekil 3.15 Bağımsız kamera kafalarının DMC kamera objektifi içerisine yerleşimi

Pankromatik kamera kafalarının DMC kamera objektifi içerisine yerleşimleri, üçü projeksiyon merkezi (resim orta noktası) koordinatları (*xyz*) ve üçü bu kamera kafalarının kamera objektifi içerisindeki eğiklikleri (dönüklük parametreleri ($\omega\varphi\kappa$)) olan dört set altı adet dış yöneltme parametresi ile modellenir. DMC kamera objektifi içerisindeki pankromatik kamera kafalarının projeksiyon merkezlerinin koordinatları (*xyz*) hassas bir şekilde bilinirken, dönüklük açılarının gerekli hassasiyette tespiti mümkün olmamaktadır. Bu açıların hassas bir şekilde tespit edilmesi, dört CCD görüntüsünün birleşiminden oluşan tek ve büyük yüksek çözünürlüklü pankromatik görüntünün elde edilebilmesi için gereklidir. Bu açıların belirlenmesi işlemine *platform kalibrasyonu* adı verilir. Burada belirlenecek olan dönüklük parametrelerinin, kamera objektifinin iç geometrik kararlılığı için olduğu, kameranın yer koordinat sistemine göre olan konum ve dönüklükleri ile ilgisi olmadığı bilinmelidir (Zeitler ve ark. 2002).

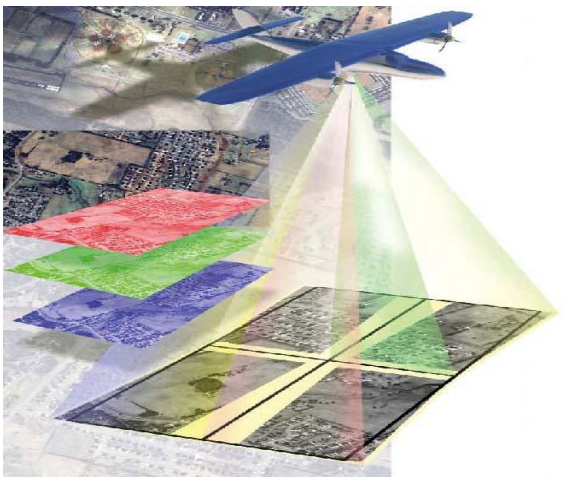
Platform kalibrasyonu için aşağıdaki veriler girdi olarak kullanılır:

- Dört pankromatik görüntü
- Dört pankromatik görüntüye ait mercek distorsiyon değerleri
- Kamera objektifi içerisindeki pankromatik kameralara ait projeksiyon merkezlerinin hassas konum bilgileri (resim orta nokta koordinatları)
- Yöneltme parametrelerinin (açılarının) yaklaşık değerleri (kamera kafası eğiklikleri)
- Pankromatik kamera kafalarının kalibre edilmiş odak uzaklıkları
- Yerden olan uçuş yüksekliği

DMC kamerasındaki sekiz ayrı kamera modülü bağımsız ünitelerdir ve merkezi izdüşüm ile kayıt yaparlar (Şekil 3.16).

Sonuç (bütünleşik) görüntü, sekiz ayrı kamera için ayrı mercek sistemleri kullanılmaya başlanmasından itibaren, tek ve büyük çaplı mercek sistemlerine nazaran daha hassas optik performans değerlerine ulaşmıştır. Yüksek çözünürlüklü pankromatik kanal, 120 mm odak uzaklıklı f/4 açıklığında yüksek performanslı mercek sistemine sahip, dört adet 7k*4k lık geniş çerçeve tipi CCD ile 120 lp/mm.lik bir optik çözünürlük sağlar.

Sonuç görüntü (pankromatik), aynı anda kayıt yapan, bu dört adet bağımsız kameradan elde edilen görüntülerin birleştirilmesi ile elde edilir. Kamera tasarımı, homojen, kesintisiz ve 7680 piksel uçuş doğrultusunda, 13824 piksel uçuş doğrultusuna dik istikamette yer çözünürlüğüne sahip yekpare bir görüntünün elde edilmesini sağlar (Neuman 2004) (Şekil 3.16 ve 3.17).



Şekil 3.16 Bağımsız kamera objektifleri ve merkezi izdüşüm ile görüntü alımı



Şekil 3.17 Bağımsız, sekiz ayrı kamera modülü

Renkli (true veya false) görüntülerin eşzamanlı alımı için dört multispektral kanal, kamera elektronik ünitesi (kamera objektifi) içerisinde birleştirilmiştir. Yüksek kalitede renk ayrımına ulaşabilmek için her ayrı renk kanalı, 25 mm. odak uzaklığı, f/4 maksimum açıklığı olan yüksek performanslı lens sistemine, her renk için bir adet 3k * 2k CCD çipine ve organik olmayan materyalden yapılmış yüksek performanslı kamera filtresine sahiptir.

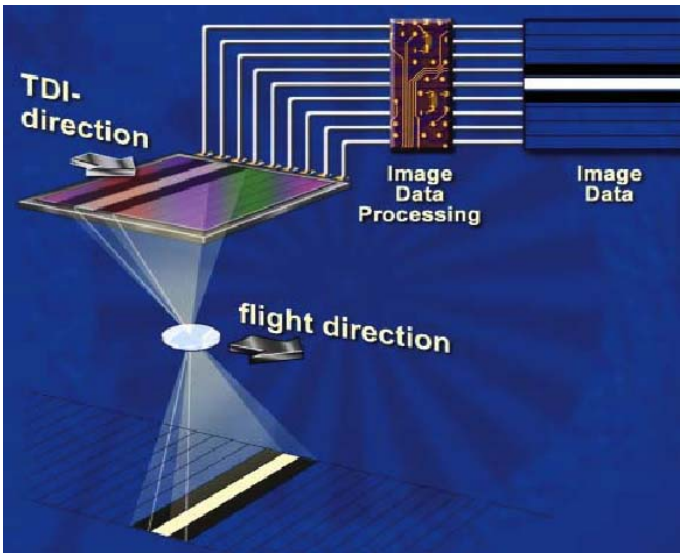
Kameralar özel olarak tasarlanmış, sağlam, sert ve stabil bir optik taşıyıcı sistem içerisine yerleştirilmiştir. Bu sistem her bir kamera ekseninin birbirlerine göre hassas kalibrasyonunu ve stabil olarak kalmasını sağlamaktadır. Kamera, sinyal işlemleri ile birlikte, öncül elektronik işlemler, analog-sayısal dönüşüm, CCD zamanlaması ve veri işleme direk olarak kamera modülü içerisinde gerçekleştirilecek şekilde entegre edilmiştir. Bu entegre tasarım tekniği, CCD için çok iyi bir S/N oranı sağlar ve sistem içerisinde oluşabilecek olan elektromanyetik karışmayı (paraziti) en aza indirir (Hinz ve ark. 2001) (Şekil 3.18).



Şekil 3.18 Ana kamera objektifi ve bağımsız kamera kafalarının yerleşimi

DMC kameralarında, distorsiyonsuz bir görüntü elde etmek için, aynı anda, bütün görüntü noktalarını aynı optik yolu kullanarak pozlamayı sağlayacak şekilde, kamera mercek merkezlerine elektromekanik bir obtüratör yerleştirilmiştir. Ayrıca, büyük ölçekli harita yapım işlerine de imkan sağlayacak şekilde görüntü sürüklenmesini önleyecek (Forward Motion Compensation (FMC) elektronik bir sistem vardır. FMC hava fotogrametrisinin en önemli kilometre taşlarından birisidir ve 1982 yılında Carl Zeis Jena tarafından ortaya konulmuştur. Çerçeve matris yapıdaki CCD algılayıcılarda bütünüyle elektronik temellere

dayalı olarak çalışan FMC sistemi vardır (Hinz 1999). Bu sistem aynı zamanda uzun pozlama zamanı sağlar ve görüntü sürüklenmesinden kaynaklanan bulanık görüntü oluşumunu da elimine eder (Şekil 3.19). Bu işlem yapılırken görüntü CCD'ler tarafından çerçeve şeklinde pozlanır, fakat satır satır aktarılır. Bu aktarma işlemi esnasında satırlar uçağın hızı dikkate alınarak yapılan hesaplamalar ile belirli bir oranda geciktirilerek (TDI (Time Delayed Integration)) düzenlenir ve kaydedilir (Hinz ve ark. 2001).



Şekil 3.19 Görüntü Sürüklenmesi Önleyici Sistem

3.3.1.3 Teknik özellikler

Fotoğraf alımı amaçlı uçuşlarda en yüksek verimi elde edebilmek için tek bir uçuş kolonu ile en fazla alanı fotoğraflayabilmek gereklidir. Film tabanlı analog hava kameraları genellikle 153 mm'lik odak uzaklığına sahip mercek kullanırlar. Bu kameralar ile 230 mm formatında film kullanıldığında 70° üzerinde bir kaplama alanı elde edilebilmektedir. Aynı zamanda, fotogrametrik uygulamalarda kaliteli fotoğraf elde etmek ihtiyaçtan ziyade bir zorunluluktur. Bu da iyi bir radyometrik ve geometrik çözünürlüğe sahip bir fotoğrafın yanı sıra çok iyi geometrik doğruluğa sahip fotoğraf elde edilmesini gerekli kılar.

Yukarıda sayılan bütün ihtiyaçları karşılayabilmek oldukça zor olmakla beraber sayısal hava kamerası üretim teknolojisi son yıllarda büyük aşama kaydetmiştir. İdeal çözüm tek ve geniş kaplama alanlı CCD çipi ile mevcut film tabanlı kamera formatlarına benzer görüntü alımı olsa da DMC bu problemi birkaç bağımsız kamera kafasını aynı kamera objektifi içerisinde birleştirerek ve yüksek çözünürlüklü sonuç görüntüyü bağımsız kamera görüntülerini birleştirerek elde etmiştir (Heier ve ark. 2001). Farklı DMC 2001 konfigürasyonlarının teknik

özellikleri sunulmuştur (Çizelge 3.4).

Çizelge 3.4 Farklı DMC 2001 konfigürasyonlarının teknik özellikleri

Konfigürasyon	**14k Yüksek Çözünürlük Multispektral**	**7k Renk**	**7k Tek Pan**	**3k Multispektral**
Görüş açısı (FOV) Uçuş Doğrultusu&Aksi İstikameti	74 * 44 (derece)	39 * 42 (derece)	39 * 23 (derece)	73 * 52 (derece)
Pankromatik : Çözünürlük Lens Sistemleri	13500 * 8000 piksel 4 * f =120mm/1:4.0	7000 * 7500 piksel 2 * f =120mm/1:4.0	7000 * 4000 piksel 1 * f =120mm/1:4.0	
Multispektral : Kanallar Çözünürlük Lens Sistemleri	4 * RGB & NIR 3000 * 2000 piksel 4 * f = 25 mm/1:4.0	3 * RGB 3000 * 2000 piksel 3 * f = 25 mm/1:4.0		4 * RGB & NIR 3000 * 2000 piksel 4 * f =25 mm/1:4.0
Objektif Kapağı& f-stop	Değişken	Değişken	Değişken	Değişken
Depolama Kapasitesi RAID Hard-Disk Düzeni	840 Gbyte 3000 Görüntü ölçek = 1:10 000 GSD = 12 cm stereo, 60% / %20 1.500 km*2	560 Gbyte 3700 Görüntü ölçek = 1:10 000 GSD = 12 cm stereo, 60% / %20 890 km*2	280 GByte 5000 Görüntü ölçek = 1:10 000 GSD = 12 cm stereo, 60% / %20 640 km*2	280 Gbyte 5800 Görüntü ölçek = 1:10 000 GSD = 12 cm 500 km*2
Çerçeveleme Oranı	2 sn / Görüntü	2 sn / Görüntü	2 sn / Görüntü	2 sn / Görüntü
Radyometrik Çözünürlük	12 bit	12 bit	12 bit	12 bit
Ağırlık	< 80 kg	< 65 kg	< 50 kg	< 50 kg

3.3.2 Leica ADS40

Ticari sayısal hava kamerası algılayıcı sistemlerinin tasarımı ve geliştirilmesi fikri ilk olarak 1994 yılında Paris'te yapılan OEEPE çalışmaları esnasında ortaya çıkmıştır. Bu çalışmalar esnasında ortaya konan hedef fotogrametri ve uzaktan algılama ihtiyaçlarını bütünüyle karşılayabilen bir kamera üretmektir. Bu amaçla, hem piyasa ihtiyaçları hem de teknolojik gelişmeler konusunda deneyimli iki ekip (firma), LH System ve Alman Uzay Merkezi (DLR)

bir araya gelmiştir. (Eckardt ve ark. 2000). Bu iki ekip 1999 ve 2000 yıllarında, sayısal stereo hava kamerası olan ADS40'ı geliştirmiştir (Şekil 3.20).



Şekil 3.20 Leica ADS40 (Airborne Digital Sensor)

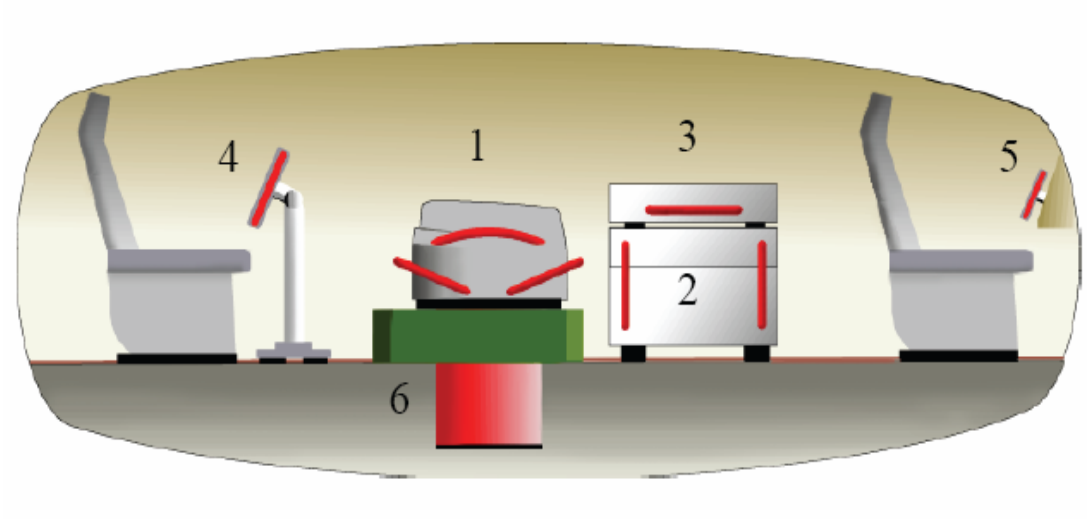
3.3.2.1 Sistem bileşenleri

ADS40 sistemi sadece algılayıcının kendisi olarak düşünülmemeli, sistemin ilave olarak IMU, platform, uçuş kontrol ve yönetim sistemleri, kamera bilgisayarı gibi ek modüller ihtiva ettiği dikkate alınmalıdır (Şekil 3.21). Uçağa montaj için ADS40, film kameralar ile birlikte de kullanılan PAV30 cayro-dengeli montaj aparatı (mount) kullanmaktadır. Uçağa monteli dâhili hafızaya sahip bir bilgisayar ve yüksek kapasiteli sarsıntıya karşı korumalı diskler yaklaşık olarak bir saatlik uçuş süresinde 100 GB'lık bir veri kaydı yapabilmektedir (Fricker 2001).

Şekil 3.20'de gösterilen Leica ADS40 hava kamerasının sistem bileşenleri;

- Algılayıcı Ünitesi SH40 (Sayısal optikler DO64 ve IMU) (1),
- Kontrol Ünitesi CU40 (konum ve irtifa bilgisayarı POS) (2),
- Ana (Taşınabilir) Disk MM40 (3),
- Operatör Arayüzü OI40 (4),
- Pilot Kılavuz Ekranı GI40 (5),
- Kamera Montaj Aparatı PAV30 (6)

olarak Şekil 3.21'de gösterilmektedir.



Şekil 3.21 Leica ADS40 hava kamerasının sistem bileşenleri

ADS40 sayısal hava kamerasının iki farklı tipteki uçağa monte edilmiş görüntüsü aşağıdadır (Şekil 3.22). Her iki uçakta da LH Systems firmasının RC30 film kamerasıyla da kullanılabilen PAV30 cayro-dengeli montaj aparatı kullanılmıştır (Fricker 2001).



(a) (b)

Şekil 3.22 ADS40'ın Cessna uçağına yerleşimi (a) ve CASA 212 uçağına yerleşimi (b)

3.3.2.2 Sistem özellikleri

ADS40 sayısal hava kamerasının yedi adet algılayıcı satırı vardır. Bu satır algılayıcılardan üçü pankromatik (ileri, nadir ve geri), üçü renkli (kırmızı, yeşil ve mavi) ve bir tanesi yakın kızılötesi satırdır ve hepsi de aynı kamera objektifi ve tek mercek sistemi içerisinde aynı odak düzlemine yerleştirilmişlerdir. Üç pankromatik algılayıcı satırı uçuş kolonu boyunca eş zamanlı olarak ileri, nadir ve geri bakış açılı kesintisiz görüntü sağlar. Her pankromatik satırda 12000 piksellik ve birbirine göre 0.5 piksel boyu kadar ötelenmiş iki dizi CCD bulunur (Tempelmann ve ark. 2000).

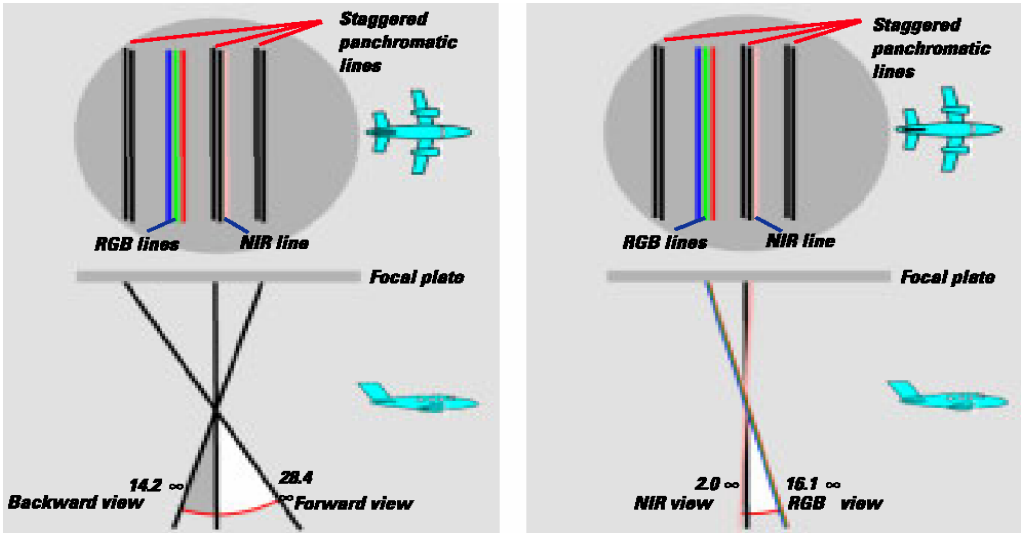
ADS40 sayısal hava kamerasında kullanılan CCD algılayıcılarının gelişmiş tasarımı fotogrametri ve uzaktan algılama ihtiyaçlarını karşılayabilmektedir. Algılayıcı parametreleri, tüm sistemin ihtiyaçlarını (boyut, düzlemsellik, dönüşüm faktörleri, doğrusallık ve elektronik arayüzler) karşılayabilecek şekilde tasarlanmıştır. Üçlü algılayıcı tasarımı Şekil 3.23'de görülmektedir. Üç algılayıcının her biri iki adet ötelenmiş 12k CCD satırımdan yani 24k CCD'den meydana gelmektedir. (Eckardt ve ark. 2000).



Şekil 3.23 Üçlü algılayıcı tasarımı

Aynı odak düzlemine nadir, ileri ve geri bakışlı olmak üzere üç değişik bakış açısı ile yerleştirilmiş üç pankromatik CCD satırı ile görüntüleme prensibi, O.Hofman'a atfedilen ve 1970'lerde Almanya'da yapılan çalışmalar sonucunda ortaya konulmuştur. Sonrasında aynı odak düzlemin üzerine algılayıcının nadire yakın bölgesine pankromatik satırlara ilave olarak renkli ve çok bantlı satırlar eklenmiştir. Bu CCD satır tarayıcı kameralar için büyük bir avantajdır ve tek bir lens ve bir odak plakası tüm gereksinimleri karşılayabilmektedir (Fricker ve ark. 2001).

Her bir CCD satırı ayrı bir bakış istikametine yönlendirilmiştir. Nadir ile ileri satır ve nadir ile geri satırlar arasındaki mesafeler eşit değildir. ADS40'ta ileri ve geri satırların bakış istikamet açıları da eşit değildir (Şekil 3.24). Her bir satırın yapmış olduğu tarama ayrı bir görüntü oluşturur. Oluşan bu görüntü çerçeve görüntü algılama sisteminin oluşturduğu görüntüye benzerdir. Çerçeve görüntüleme sistemlerinden farklı olan yanı ise oluşan görüntünün sürekli olmasıdır. ADS40'ta bütün satırlara ait görüntüler eş zamanlı olarak alınır ve kaydedilir (Hinsken ve ark. 2002).

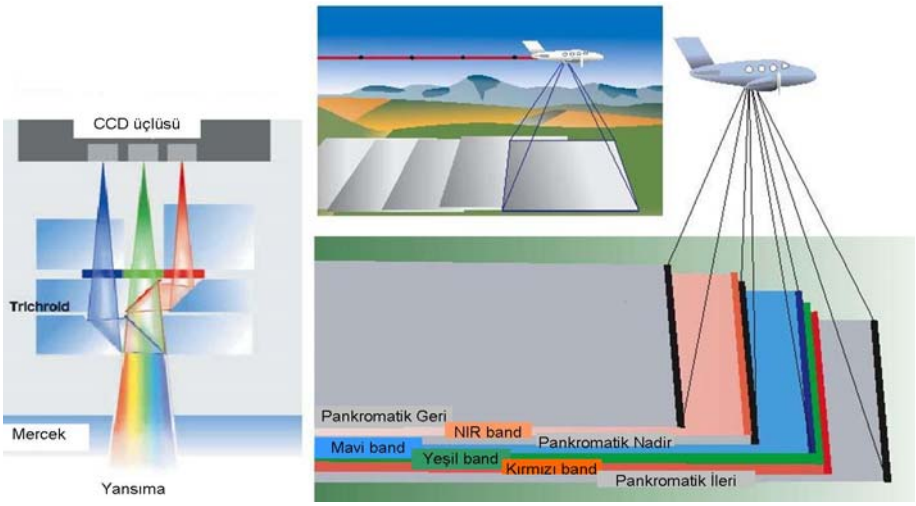


Şekil 3.24 Pankromatik ve RGB CCD satırların yerleşimi ve bakış açıları

ADS40 sayısal hava kamerasının odak plakasında 4 adet CCD yuvası bulunmaktadır. Bunlardan iki tekli, iki tanesi de üçlü satır konfigürasyonu içermektedir (Şekil 3.24). Sistem 14 bitlik bir radyometrik dinamik aralık ve 8 bit'ten daha iyi bir SNR (Signal Noise Ratio) ile veri kaydı yapabilmektedir. Odak düzlemi için sıcaklık dengeleme sistemi mevcuttur. CCD ve mercekler üzerindeki su buharının yoğunlaşmasını ve odak plakası deformasyonunu engellemek için plaka üzerine havalandırma ve kurutma sistemi monte edilmiştir (Reulke 2003).

Boyuna stereo kabiliyet üç sıralı CCD satırın farklı görüş açılarında (ileri, geri, nadir) kullanımı ile sağlanır. Satır tarayıcıların baz yükseklik oranlarını değiştirmek mümkün değildir. Bu nedenle, üç satır arasındaki stereo açılar esneklik sağlamak maksadıyla farklı değerlere ayarlanmıştır (Şekil 3.24 ve 3.25) (Reulke 2003).

Uçuş esnasında yerden yansıyan görüntü, özel bir trichroid ışın ayırıcısı ile düzenlenerek optik olarak ayrılır ve her biri 12000 pikselden oluşan 3 renkli CCD satırı üzerine düşürülür (Şekil 3.25). Bu yöntemin bir avantajı, hareket eden nesnelerin CCD satır tarayıcı sistemlerle görüntülenmesinde oluşabilecek olan renk kaymalarının önlenmesidir. Yakın kızılötesi kanallar, pankromatik nadir CCD satırlarına göre biraz daha ötelenmiş olarak yerleştirilmiştir. Parazit filtreleri doğrudan CCD'lerin üzerine yerleştirilmiştir. Kamera objektifi içerisindeki mercek sisteminin telesentrik optik tasarımı bu filtreler için gerekli olan optik düzeni temin eder (Reulke 2003).



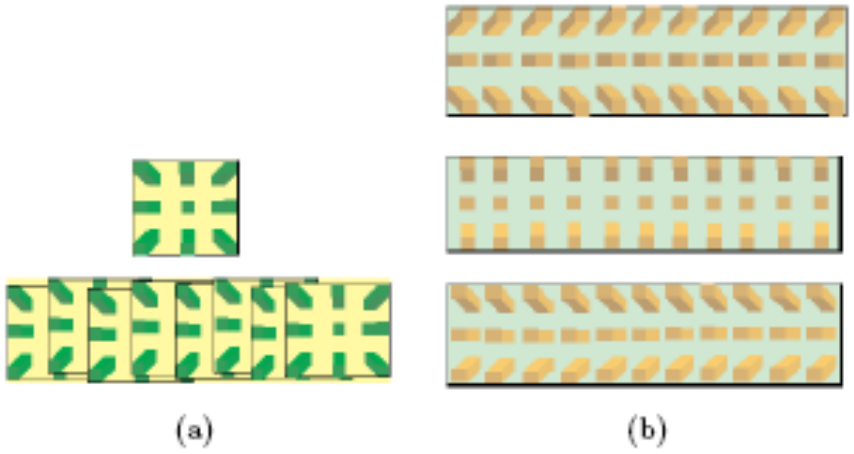
Şekil 3.25 Üç farklı CCD satırı üzerine görüntünün farklı açılarla düşürülmesi

Önceden de bahsedildiği üzere, günümüzde kullanılan büyük formatlı sayısal hava kameraları ikiye ayrılmaktadır: çerçeve (alan) dizi CCD kameralar ve doğrusal dizili (satır) pushbroom kameralar. Alan tabanlı kameralar iki kategoride incelenebilir: çoklu kafalı ve tek kafalı (objektifli) algılayıcılar. Yaklaşımlardaki ana fark, sonuç görüntü geometrisidir.

Alan tabanlı sayısal hava kameralarına ait görüntüler film tabanlı analog hava kameralarına ait görüntülere benzerler. Bu nedenle, elde edilen görüntüler merkezi izdüşüm prensiplerine sahiptir ve tüm değerlendirme işlem adımlarında analog hava kamerası görüntüleri için kullanılan geleneksel fotogrametrik iş akışı kullanılabilir. Görüntüler başlı başına geometrik bilgiler içerir, çünkü kararlı geometriye sahip bir CCD algılayıcı ile kaydedilir. Görüntü geometrisini oluşturmak veya tanımlamak için GPS gibi ek bir veri sağlayan bir cihazın ayrıca kullanılması zorunlu değildir. Epipolar geometri hesabı gibi klasik metotlar kullanılabilir. (Şekil 3.26 (a))'da alan tabanlı bir kamera ile görüntülenmiş bir fotoğrafın geometrisi temsil edilmektedir. Alan tabanlı görüntülerde rölyef deplasmanı, her bağımsız görüntü merkezi izdüşüme sahiptir ve bindirmeli görüntüler fotogrametrik bir kolon oluşturur. (Perko 2004).

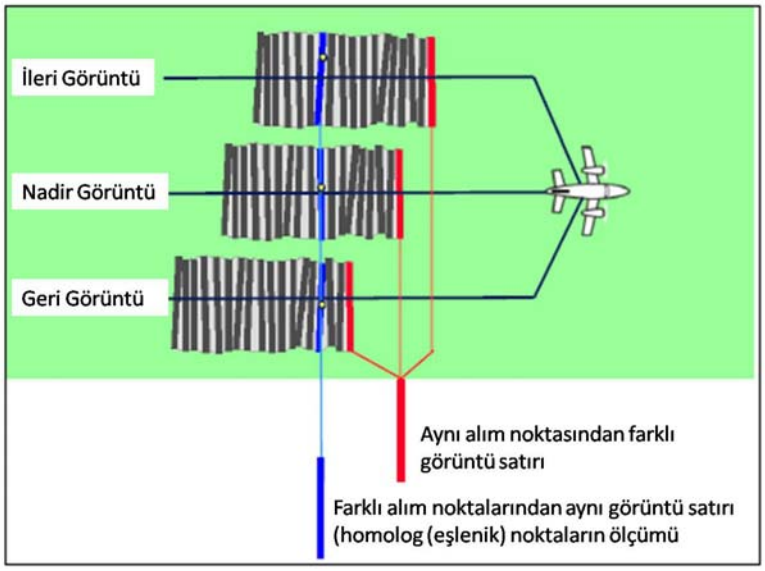
Satır tarayıcı tabanlı yaklaşımlarda sadece uçuş doğrultusuna dik istikamette her bir satır için ayrı ayrı merkezi perspektifte izdüşüm mevcutken, uçuş istikametinde merkezi izdüşüm söz konusu değildir ve üçlü satır tarayıcı sistemler için rölyef deplasmanı, İleri, nadir ve geri bakışlı üç ayrı kolon oluşur ve uçuş istikametine dik yönde merkezi perspektif mevcutken uçuş istikametinde mevcut değildir (Şekil 3.26 (b)). Bu çeşit veri ise standart fotogrametrik iş akışı içerisinde kullanılamaz. Örneğin; bu görüntülerde epipolar doğrular, zor geometrik yapılara sahip olan epipolar eğrilerdir. Bu yüzden, klasik epipolar parametrelerin görüntü

eşlemesinde kullanımı bu çeşit veriler için uygun değildir. Üçlü satır tarayıcı sistemler için kullanılan algoritmalar geliştirilmiştir ancak, yaygın olarak kullanılan fotogrametrik yazılımların çoğunda mevcut değildir. Alan tabanlı görüntüleme sistemlerinden farklı olarak satır tarayıcı sistemler ile elde edilen görüntü verisi geometrik bilgi içermez. Satır tarayıcı sistemler için konum ve yöneltme (dönüklük) ile ilgili geometrik veriler, sadece DGPS ve INS gibi ekstra sistem ve cihazların entegre olarak kullanımı ile elde edilebilir (Perko 2004). Ancak, doğruluğun geliştirilmesi amacıyla sonradan dengeleme (ışın demetleri yöntemi) uygulanabilir. Stereoskopik işlemler için dengeleme yapılması gereklidir çünkü, görüntüler dengeleme yapılmaksızın kullanılırsa y-paraksı değerleri tolerans değerlerin üzerine çıkar (Jacobsen 2005).



Şekil 3.26 Alan ve satır tarayıcı tabanlı algılayıcılar için görüntü geometrisi kavramı

Görüntülerdeki homolog noktaların ölçülmesi için ileri, nadir ve geri görüntülerdeki birbirlerine karşılık gelen detay ve satırların bulunması gereklidir. Görüntü eşleme işlem adımları mevcut görüntü eşleme işlemleri ile oldukça benzerdir. Level 0 görüntülerindeki, görüntü alımı esnasındaki uçak hareketlerinden (eğiklik ve dönüklükleri) kaynaklanan karmaşıklıktan ötürü, eşleme işlemlerini düzeltilmiş olan Level 1 görüntüleri ile gerçekleştirmek daha uygundur (Şekil 3.27) (Hinsken ve ark. 2002).



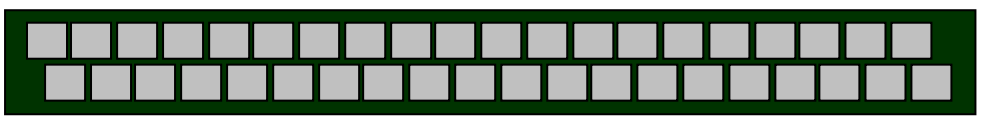
Şekil 3.27 Üç görüntüde homolog noktaların ölçülmesi (Hinsken ve ark. 2002)

3.3.2.3 Teknik özellikler

Satır tarayıcı sistemlerde tek bir CCD satırı elde edilmek istenilen görüntüdeki çözünürlük ihtiyaçlarını karşılayamamaktadır. CCD satırları ile kayıt yapan kameralarda kullanılan iki temel mantık, bütün algılayıcıların tek bir optik mercek sisteminin arkasına monte edilmesi veya daha pahalı bir çözüm olarak birden fazla kamera kafası (objektifi) kullanılmasıdır. Bu nedenle satır tarayıcı sistemlerde değişik yöntemler denenmiştir. Bu yöntemler aşağıdaki gibidir:

- Çapraz (butted) satırlar,
- Uçuş doğrultusundaki bindirme ve kaydırma,
- Ötelenmiş sıralı satırlar.

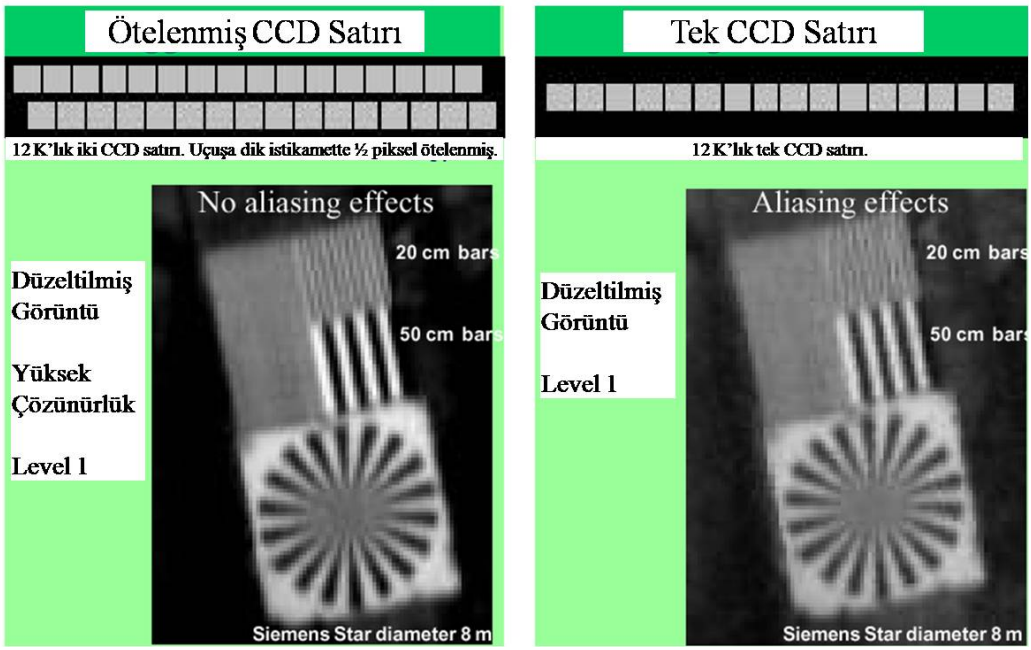
Birinci ve ikinci çözümler iki satır arasında boşluğa ya da ek bir stereo açıya neden olduğundan, ötelenmiş sıralı satırların çözüm için uygun olduğu net bir şekilde ortaya çıkmıştır. Bu dedektörler, uçuş istikametine dik istikamette yarım piksel boyu kaydırılmış ve birbirlerine çok yakın olacak şekilde yerleştirilmiş iki sıra 12k CCD satırı ihtiva etmektedir (Şekil 3.28).



Şekil 3.28 Ötelenmiş sıralı CCD satırları

Yapılan bir test ile lineer tek sıralı CCD satırı ve ötelenmiş sıralı CCD satırı karşılaştırılmıştır. Bu testte 8mx8m genişlikli farklı test barları ve 8m çapında bir Siemens yıldızı, bir tekli sıralı CCD satır (12 K) ile ötelenmiş sıralı CCD satırını (24 K) karşılaştırmak amacıyla kullanılmıştır. İki satırlı algılayıcının tek satırı kullanılarak tek satırlı bir algılayıcı bir görüntü verisi simule edilmiştir (Şekil 3.29).

Siemens yıldızı iki resimde de benzer sonuçlar vermiştir. Aslında optik sonuçlar 12 K algılayıcı için fazlasıyla iyidir. Çizgi desenlerinin karşılaştırılması ile 12 K yerine 24 K algılayıcı kullanılmasındaki gelişme görülebilir. En ilginç parça ise sağ üst parçadır. 12 K görüntüde düşük kontrastlık ve aliasing (çizgi desenlerdeki kırıklıklar) fark edilmektedir. Ötelenmiş sıralı CCD satırını için, konumsal frekans ve kontrastlık çok iyidir (Gervaix 2001).



(a) (b)

Şekil 3.29 Ötelenmiş CCD satırı (a) ve tek CCD satırı (b)

ADS 40 sayısal hava kamerasının (üçlü satır tarayıcı sistemlerin) çerçeve algılayıcı sistemlere nazaran en belirgin avantajı kolon görüntü işlenmesi ve değerlendirilmesidir (Şekil 3.30). Uçuş kolonu uzunluğu kadar oluşan sürekli stereo model, SYM ve ortofoto üretimi, blok dengeleme, otomatik görüntü eşleme ve görüntü rektifikasyonu (yöneltmesi) gibi fotogrametrik işlem adımlarının tümü için kullanılacak olan tek, kesintisiz ve sürekli bir görüntüden meydana gelir. Büyük bloklar için görüntüyü kesintisiz bir kolon olarak ele almak ve işlemek çok sayıda bağımsız görüntülerin sıkıcı mozaiklenmesi işlemlerini belirgin bir şekilde azaltacaktır. Böylece, büyük bloklar daha kolay, güvenilir ve daha kısa sürede mozaiklenebilecektir (Fricker ve ark. 2001).



Şekil 3.30 Kesintisiz nadir siyah/beyaz kolon görüntüsü

ADS40 sayısal hava kamerasına ait önemli algılayıcı parametreleri Çizelge 3.5'de, teknik özellikleri Çizelge 3.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 3.5 ADS40 sayısal hava kamerasının algılayıcı parametreleri

Odak Uzaklığı	62.5 mm.
Piksel Boyutu	6.5 μm.
Pankromatik Satır	2 * 12000 piksel
Renkli Satırlar	12000 Piksel
Görüş Açısı (Uçuş Doğrultusunda)	64°
Stereo Açılar	14°, 28°, 42°
Dinamik Açıklık	14 bit
Radyometrik Çözünürlük	8 bit
Yer Örnekleme Mesafesi (3000 m. Uçuş Yüksekliğinde)	16 cm.
Tarama Genişliği (3000 m. Uçuş Yüksekliğinde)	3.75 km.
Satır Okuma Frekansı	1 - 830 Hz.
Uçuş Depolama Kapasitesi	0.5 - 1 Tbyte

Çizelge 3.6 ADS40 sayısal hava kamerasının teknik özellikleri

ELEKTRONİK KARAKTERİSTİKLER	
Dinamik Aralık	12-Bit
Radyometrik Çözünürlük	8-Bit
Normalleştirme Biçimi	8-Bit Lineer
Veri Sıkıştırma Faktörü	2,5-25
Satır Başına Düşen Kayıt Aralığı	≥1,2 msec (800 Hz)
Spektral Aralık	Pankromatik, RGB ve İnfrared
	BAND (μm) Pankromatik 465-680(λ= 50%) Kırmızı 610-660 Yeşil 535-585 Mavi 430-490 İnfrared 835-885
MEKANİK BİLGİLER	
Algılayıcı Kafası SH40	Ağırlık: 66 kg, Çap: 59 cm, Yükseklik: 74 cm, PAV30
Kontrol Ünitesi CU40	Ağırlık: 43 kg ,19" Raf Takılabilir. Genişlik, Yükseklik: 34 cm, Derinlik: 52 cm
Temel Hafıza MM40	Ağırlık: 18 kg , Taşınabilir, 540 GB Kapasiteli Hard disk
Operatör Arayüzü	Ağırlık: 14 kg ; IS40 Standı RC30 NAV'a uygundur
IMU / GPS	SH40 İle Bütünleşmiş IMU , CU40 İle Bütünleşmiş GPS ve POS

3.3.3 Vexcel UltraCam$_D$

Avusturya Graz'da konuşlu bulunan Vexcel Imagings GmbH, fotogrametrik cihazların üretimi alanında iyi bilinen bir firmadır. Bu firma tarafından üretilen ilk ürün, Ultrascan5000 hassas film tarayıcısıdır. Firma tarafından, Mayıs 2003 yılında UltraCam$_D$ geniş formatlı sayısal kamerası (Şekil 3.31), üç yıl sonrasında ise Nevada Reno'daki ASPRS 06'da UltraCam$_D$'nin yeni versiyonu olan UltraCam$_X$ geniş formatlı sayısal hava kamerası uluslar arası haritacılık piyasasına sunulmuştur.

ISPRS 2000'e kadar geçen süre içerisinde ilk geniş formatlı sayısal hava kameraları piyasaya sunulmuş, fakat 2000 senesinden sonra geçen 3-4 yıl da dâhil olmak üzere, bu kameralar nispeten zayıf performanslı olmuşlardır. 2004 yılında geniş formatlı sayısal algılayıcıların sayısı 50 adede ulaşmış ve böylece, sayısal kameralar tüm dünyada fotogrametrik üretimde rol almaya başlamıştır (Gruber 2007).



Şekil 3.31 Vexcel UltraCam$_D$ geniş formatlı sayısal hava kamerası

3.3.3.1 Sistem bileşenleri

Bütünleşik uçağa takılı bir sistem olarak UltraCam$_D$ sayısal hava kamerası, algılayıcı birimi (SU), depolama/hesaplama birimi (SCU), arayüz paneli (IP) ve taşınabilir depolama biriminden oluşur. Bunlara ek olarak, inersiyal navigasyon sistemi (Inertial Navigation System-INS) kullanılır. IMU algılayıcı birimin içerisine yerleştirilmiş ve sabitlenmiştir. IMU'nun algılayıcı birimin ana çerçevesine sabitlenmesi optik sistemle aralarındaki ilişkinin kararlı, sürekli ve sağlam bir şekilde tanımlanmasını sağlar. Algılayıcı birim sistemin kalbidir ve 13 adet çerçeve (alan) CCD algılayıcı ihtiva eder. 90 Megapiksellik bir görüntünün bir saniyede algılanmasını sağlayacak şekilde yayılımlı paralel algılama prensibi kullanır. UltraCam$_D$ çoklu kamera sistemine sahiptir ve çerçeve görüntüleme sistemine göre çalışır. UltraCam$_D$ sayısal hava kamerasının ileri bir versiyonu olan UltraCam$_X$ kamerası ve bileşenleri hakkında 4'üncü bölümde ayrıntılı bilgi verilecektir.

CCNS fotogrametrik uçuş görevleri için kullanılan bir GPS ve cayro tabanlı kılavuz, konumlama ve algılayıcı yönetim sistemidir. Ana sistem, merkezi bilgisayar sistemi (CCU), en az bir adet komuta ve görüntüleme birimi (CDU) ve görev planlama yazılım paketinden (*WinMp*) oluşur. Algılayıcı sistemin konum ve irtifasının hassas olarak belirlenebilmesi için CCNS, bir GPS/IMU sistemi olan *AEROcontrol* ile birlikte kullanılabilir (Şekil 3.32) (Kremer ve Gruber 2004).



Şekil 3.32 Uçuş esnasında uçuş yönetim sistemi ile bütünleşik olarak kullanılan sistemler

3.3.3.2 Sistem özellikleri

UltraCam$_D$ geniş formatlı sayısal hava kamerası metrik bir kameradır ve hassas fotogrametrik uygulamalar için tasarlanmıştır. Kameranın pankromatik bölümü, geniş formatlı pankromatik görüntüyü oluşturacak şekilde 9 orta formatlı CCD algılayıcı seti birleşiminden oluşur. Multispektral kanallar ise bağımsız olarak eklenmiş 4 CCD algılayıcıdan oluşur. Bu 13 algılayıcının her biri bir dizi görüntüleme modülünün en ön parçasıdır. Algılayıcı modül, algılayıcı, algılayıcı elektronikleri, yüksek kapasiteli analog/sayısal dönüştürücü (ADC), hızlı sayısal sinyal işleyici (DSP), ve IEEE 1394 veri transfer ünitesinden oluşur (Kremer ve Gruber 2004).

Ham görüntü, IEEE 1394 arayüzü vasıtasıyla UltraCam$_D$'nin bağımsız depolama modülü olan Depolama ve Hesaplama Ünitesine aktarılır. Böylece kamera, paralel sistem mimarisinin avantajlarını kullanarak saniyede 1 çerçeveden daha yüksek bir görüntüleme hızı ile fotoğraf alımı yapabilir.

Pankromatik görüntü, uçuşa dik yönde 11500 piksel ve uçuş yönünde 7500 pikselden oluşur. Renkli görüntü ise 4000 piksele 2700 piksel boyutunda kırmızı yeşil, mavi ve kızılötesi kanallarda 4 objektif tarafından aynı anda kaydedilir (Kremer ve Gruber 2004).

Uçuş esnasında görüntü alınır, ilk işleme tabi tutulur ve dağıtım için hazır hale getirilebilir. Uçakta bulunan depolama ve hesaplama ünitesi çoklu işlemcili gelişmiş bir bilgisayar sistemine sahiptir. Hesaplama işlemleri, uçakta, park alanında veya ofiste tamamlanabilir (Şekil 4.2). Depolama ve hesaplama ünitesi 35 kg'dır ve portatiftir.

Vexcel UltraCam$_D$'nin algılayıcı ünitesi sekiz bağımsız kameradan (objektif) oluşur. Bunlardan dördü geniş formatlı 11500*7500 piksel boyutlarında pankromatik görüntü üretir. Diğer dördü ise multispektral kanallardan sorumlu olan kırmızı, yeşil, mavi ve yakın kızılötesi kanallardır.

UltraCam$_D$'nin Depolama ve Hesaplama Ünitesi (SCU) ham görüntünün depolanmasından sorumludur. Toplam depolama kapasitesi 2*780 GB ile 2692 görüntü yedekli olarak ayrı disklere çift olarak kaydedilir.

Sistem mimarisi paralel bir yapı gösterir, her kamera başlığına (algılayıcıya) ait CCD ünitesinin küçük bir bilgisayarını da içeren kendisine ait "özel" depolama ünitesi ve iki adet korumalı, aynı yapıda kayıt yapan sabit diski vardır.

UltraCam$_D$ sayısal hava kamerasının görüntüleme prensibi, objektiflerinin yerleşimi ve sayısı uygulamada kullanılan ve dördüncü bölümde detaylı olarak incelenen UltraCam$_X$ sayısal fotogrametrik hava kamerası ile aynı olduğu için bu bölümde aynı şekiller gösterilmemiştir. Aralarında görüntü geometrisi, radyometrisi, sistem bileşenleri ve teknik özellikler açısından belirli farklar bulunmaktadır ve ilgili bölümlerde söz konusu farklar açıklanmaktadır. UltraCam$_D$'nin görüntüleri sonuç ürün haline gelene kadar aşağıdaki seviyelerden geçerler (Çizelge 3.7) (Leberl ve ark 2003).

Çizelge 3.7 UltraCam$_D$ sayısal hava kamerası görüntü oluşum seviyeleri

SEVİYE 00	CCD lerden okunan ham görüntü birimleri, ayna görüntü vardır.
SEVİYE 0	Doğrulanmış görüntü birimleri, ayna depolama yoktur.
SEVİYE 1	Radyometrik olarak düzeltilmiş ve etkili birleştirme için yeniden düzenlenmiş görüntü birimleri
SEVİYE 2	Geometrik ve radyometrik olarak düzeltilmiş, birleştirilmiş görüntüler (renk katmanları ayrı durumdadır)
SEVİYE 3	Sonuç renkli görüntü

3.3.3.3 Teknik özellikler

$Ultracam_D$ sayısal fotogrametrik hava kamerasına ait teknik özellikler Çizelge 3.8'de gösterilmiştir (Leberl ve ark 2003).

Çizelge 3.8 $Ultracam_D$ sayısal fotogrametrik hava kamerasının teknik özellikleri

Görüntü Özellikleri	
Görüntü boyutları	23 cm x 15 cm boyutlarındaki film bazlı hava fotoğrafına benzerdir.
Görüntü İçeriği (Hava fotoğrafıyla karşılaştırılması)	15 µm piksel boyutu ile taranmış filminden daha iyidir.
Görüntü veri formatları	TIFF, JPEG, Tiled TIFF
Sayısal Kameraların Teknik Verileri	
Pankromatik görüntü boyutu	11,500 x 7,500 piksel
Pankromatik fiziksel piksel boyutu	9 µm
Odak düzleminin fiziksel boyutu	103.5 mm x 67.5 mm
Pankromatik lenslerin odak uzaklığı	100 mm (75 mm, 125 mm)
Lens Açıklığı	f = 1/5.6
Düşey Görüş Açısı, (cross track along track)	55º (37º)
Renk (multi-spektral yeteneği)	4 kanal -- RGB & NIR
Renkli görüntü boyutu	4,008 x 2,672 piksel
Renkli fiziksel piksel boyutu	9 µm
Renkli lens sistemlerinin odak uzaklığı	28 mm
Renkli lens aralığı	f = 1/4.0
Düşeyden renkli görüş alanı, (cross track along track)	65º (46º)
Resim çekiş hızı	1/500 to 1/60
Görüntü sürüklenmesi önleyici sistem (FMC)	TDI kontrollü
Maksimum FMC-yeteneği	50 piksel
500 m uçuş yüksekliğine göre yerdeki en küçük piksel (300 m)	5 cm (3 cm)
Saniyedeki Çerçeve hızı (minimum görüntü intervali)	1.3 çerçeve (0.75 saniyede)
Analog-sayısal dönüşümü	14 bit
Renk kanalları için radyometrik çözünürlük	>12 bit
Kamera ünitesinin fiziksel doğrultuları	45 cm x 45 cm x 60 cm
Ağırlık	< 30 kg
Tam performansta güç tüketimi	150 W
Kontrol Ünitesi, Veri Depolama ve İşlem Ünitesi	
Uçuş Süresince depolama kapasitesi	> 1 TB
Uçuş Süresince sıkışmamış görüntüleri depolama kapasitesi (resim sayısı)	> 1850
Depolama ve hesaplama konfigürasyonu	Çoklu CPU'larla ve disklerle paralel düzenlenmiş
Fazlalık	Çift disk ile yedeklenmiş görüntüler
Ofis ortamına veri transferi	Sökülebilir, taşınabilir, ofis işlemcisi olarak da kullanılabilir
Fiziksel ebatlar	40 cm x 55 cm x 65 cm
Ağırlık	< 35 kg
Tam performansta güç tüketimi	700 W
Güç Kaynağı (Opsiyonel)	

Batarya	24 V / 70 Ah
Çalışma süresi , bekleme zamanı, (Maksimum alım oranında çalışma)	10 saat (1.5 saat)
Fiziksel boyutları	45 cm x 30 cm x 50 cm
Ağırlık	2 x 35 kg
Operasyonel Özellikleri	
70% ileri bindirmeli maksimum alım periyodu, 20 cm yer çözünürlüğünde (GSD) (film ölçeği 1:10,000)	~ 6 saat
Alımı yapılan ham görüntü kolonlarının post-prosesi	SCU ile bir gecede
Uçaktan ofise veri transferi	Mobil bilgisayarla veya 35 kg'lık SCU ünitesinin taşınması ile
Post-proses sistemi	SCU ile veya ofis PC si ile
Kameranın Montajı	Mevcut film kameraları ile aynı
Uçuş planlaması	IGI, CCNS ve benzer sistemlerle uyumludur.
Dış yöneltme desteği	IGI, Aero-Control, Applanix' Pos ve benzer sistemlerle uyumludur.
Görüntü geometrik doğruluğu	$< \pm 2\ \mu m$

4. ULTRACAM$_X$ SAYISAL FOTOGRAMETRİK HAVA KAMERASI

Çalışmanın bu bölümünde uygulamada kullanılan UltraCam$_X$ geniş formatlı sayısal fotogrametrik hava kamerasının sistem bileşenleri, sistem özellikler ve teknik özellikleri detaylı bir şekilde ele alınmıştır.

UltraCam$_X$ geniş formatlı sayısal fotogrametrik hava kamerasının üreticisi fotogrametrik cihazların üretimi alanında iyi bilinen bir firma olan ve Avusturya Graz'da konuşlu bulunan Vexcel'dir. Bu firma tarafından üretilen ilk ürün, Ultrascan5000 hassas film tarayıcısıdır. Firma tarafından, Mayıs 2003 yılında UltraCam$_D$ geniş formatlı sayısal kamerası, üç yıl sonrasında ise Nevada Reno'daki ASPRS 06'da UltraCam$_D$'nin yeni versiyonu olan UltraCam$_X$ geniş formatlı sayısal hava kamerası uluslar arası haritacılık piyasasına sunulmuştur. Vexcel firması daha sonra Microsoft firması tarafından satın alınmıştır.

UltraCam$_D$ sayısal fotogrametrik hava kamerasında yapılan geliştirmeler sonucunda ortaya çıkan Microsoft UltraCam$_X$ geniş çerçeve formatlı sayısal hava kamerası haritacılık alanında kullanılan en geniş formatlı hava kamerası olup ülkemiz kurumlarınca satın alınan ilk fotogrametrik hava kamerasıdır (Şekil 4.1).



Şekil 4.1 Ultracam$_X$ sayısal fotogrametrik hava kamerası

4.1 Sistem Bileşenleri

UltraCam$_X$ sayısal hava kamerası;

- Algılayıcı birimi (SX),
- Hesaplama birimi (CX),
- Kamera işletim arayüzü (IPX),
- Taşınabilir veri depolama birimi (DX),
- Veri transfer birimi (DKX)

donanım bileşenlerinden oluşur. Bunlara ek olarak, inersiyal navigasyon sistemi (Inertial Navigation System-INS) kullanılır. IMU algılayıcı birimin içerisine yerleştirilmiş ve sabitlenmiştir. IMU'nun algılayıcı birimin ana çerçevesine sabitlenmesi optik sistemle aralarındaki ilişkinin sürekli ve sağlam bir şekilde tanımlanmasını sağlar. Algılayıcı birim sistemin ana unsurudur ve pankromatik bant için 4 adet, kırmızı, yeşil, mavi ve kızılötesi (RGBI) bantlara ait 4 adet olmak üzere toplam 8 adet optik objektif, Pankromatik objektiflere ait 9 adet, renkli objektiflere ait 4 adet olmak üzere toplam 13 adet CCD dizini ihtiva eder. 136 Megapiksellik bir görüntünün 1.5 saniyede algılanmasını sağlayacak şekilde yayılımlı paralel algılama prensibi kullanır. UltraCam$_X$ çoklu kamera sistemine sahiptir ve çerçeve görüntüleme sistemine göre çalışır. Sistemin donanım bileşenlerinin yanısıra yazılım bileşenleri de mevcut olup uygulamada kullanılan donanım ve yazılımlar bölümünde detaylı olarak açıklanmıştır.

4.2 Sistem Özellikleri

UltraCam$_X$ geniş formatlı sayısal hava kamerası metrik bir kameradır ve hassas fotogrametrik uygulamalar için tasarlanmıştır. Kameranın pankromatik bölümü, geniş formatlı pankromatik görüntüyü oluşturacak şekilde 9 orta formatlı CCD algılayıcı seti birleşiminden oluşur. Multispektral kanallar ise bağımsız olarak eklenmiş 4 CCD algılayıcıdan oluşur. Bu 13 algılayıcının her biri bir dizi görüntüleme modülünün en ön parçasıdır.

Ham görüntü UltraCam$_X$'in bağımsız depolama modülü olan Depolama ve Hesaplama Ünitesine aktarılır. Böylece kamera, paralel sistem mimarisinin avantajlarını kullanarak saniyede 1 çerçeveden daha yüksek bir görüntüleme hızı ile fotoğraf alımı yapabilir.

Pankromatik görüntü, uçuşa dik yönde 14430 piksel ve uçuş yönünde 9420 pikselden oluşur. Renkli görüntü ise 4810 piksele 3140 piksel boyutunda kırmızı yeşil, mavi ve kızılötesi kanallarda 4 objektif tarafından aynı anda kaydedilir.

Uçuş esnasında görüntü alınır, ilk işleme tabi tutulur ve dağıtım için hazır hale getirilebilir. Uçakta bulunan depolama ve hesaplama ünitesi çoklu işlemcili gelişmiş bir bilgisayar sistemine sahiptir. Hesaplama işlemleri, uçakta, park alanında veya ofiste tamamlanabilir (Şekil 4.2).



Şekil 4.2 UltraCam$_X$ hesaplama işlemleri

UltraCam$_X$'in algılayıcı ünitesi 8 bağımsız kameradan (objektifden) oluşur. Bunlardan dördü geniş formatlı 11430*9420 piksel boyutlarında pankromatik görüntü üretir. Diğer dördü ise multispektral kanallardan sorumlu olan kırmızı, yeşil, mavi ve yakın kızılötesi kanallardır.

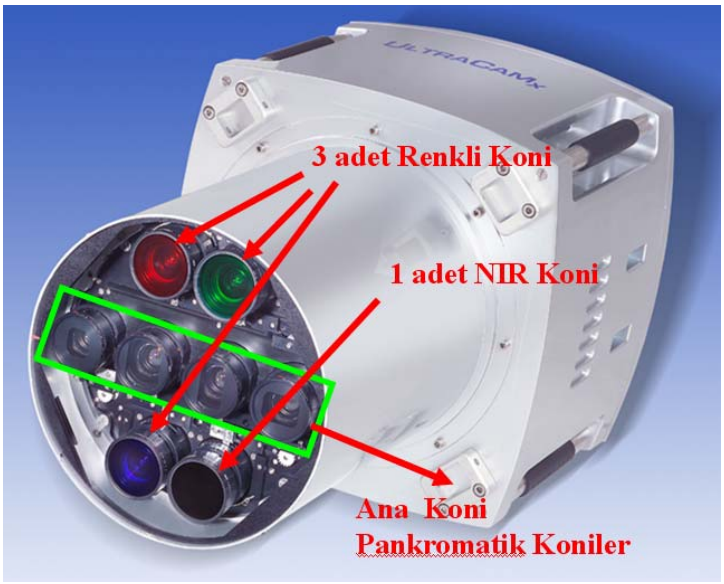
UltraCam$_X$ kamerasının en gelişmiş özelliklerinden biri ise bir DX ile; %70 ileri ve %20 yan bindirme oranlarında, 20 cm çözünürlüğünde (20 mikronda taranmış 1:10000 ölçeğinde analog filme eşit) kesintisiz 8.5 saat uçulabilir.

UltraCam$_X$'in Hesaplama Ünitesi (CX) ham görüntünün işlemden geçirilip depolanmasından sorumludur. Toplam depolama kapasitesi 2*1.7 TB ile 3900 görüntü yedekli olarak ayrı disklere çift olarak kaydedilir.

Sistem paralel bir yapı gösterir, her kamera başlığına (algılayıcıya) ait CCD ünitesinin küçük bir bilgisayarını da içeren kendisine ait "özel" depolama ünitesi ve iki adet korumalı, aynı yapıda kayıt yapan sabit diski vardır.

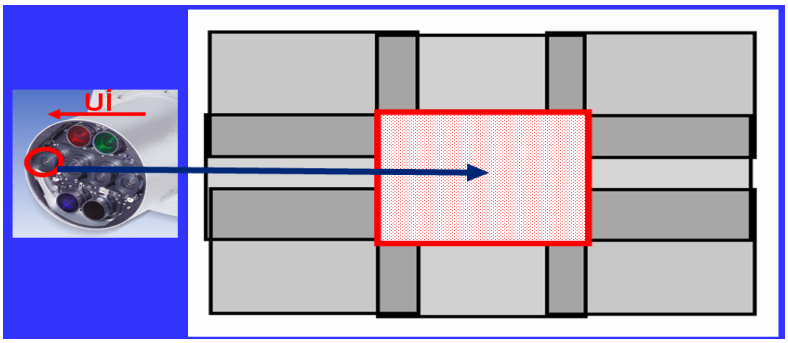
4.3 Kamera Görüntüsü ve Görüntü Alım Aşamaları

UltraCam$_X$ sayısal hava kamerasının pankromatik ve multispektral objektifleri farklı geometri ile görüntü alımını gerçekleştirmektedir.

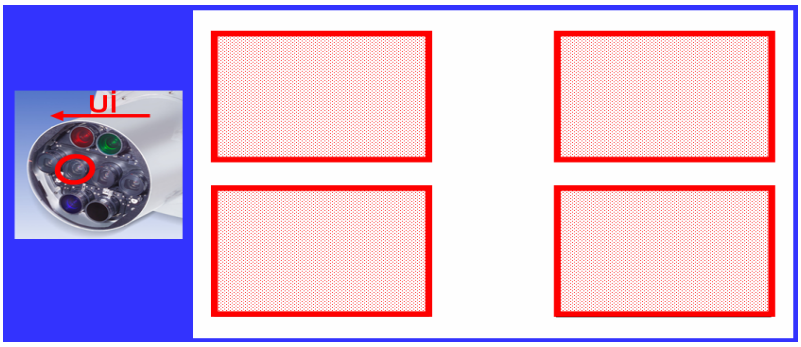


Şekil 4.3 Ultracam$_X$ hava kamerasının objektifleri

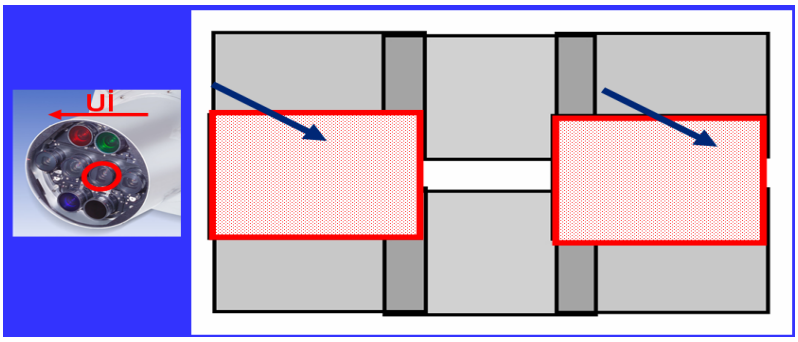
Pankromatik objektiflerin görüntü alımı zaman sırasına göre Şekil 4.4, Şekil 4.5, Şekil 4.6, Şekil 4.7'de gösterildiği gibi bir geometriye sahiptir ve tam bir pankromatik görüntü Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'daki gibidir.



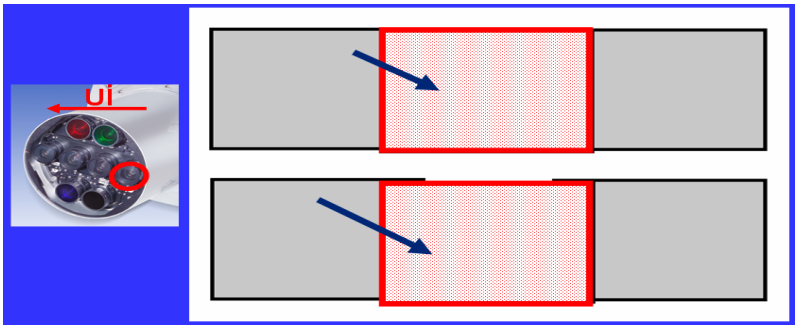
Şekil 4.4 3 numaralı objektifin görüntü alımı



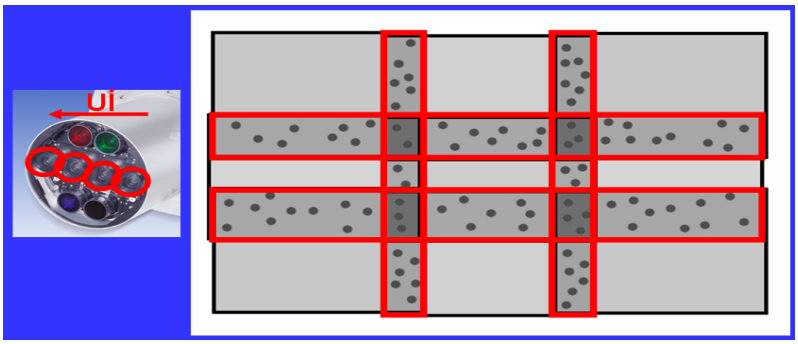
Şekil 4.5 0 numaralı objektifin görüntü alımı



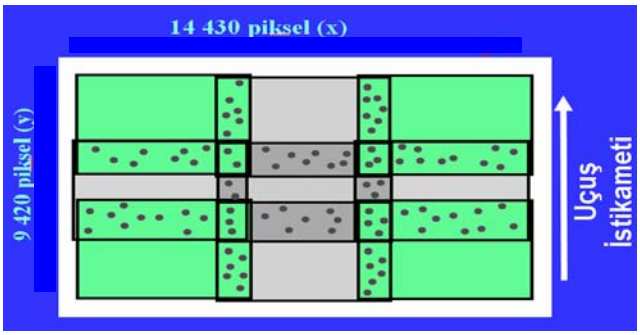
Şekil 4.6 2 numaralı objektifin görüntü alımı



Şekil 4.7 1 numaralı objektifin görüntü alımı

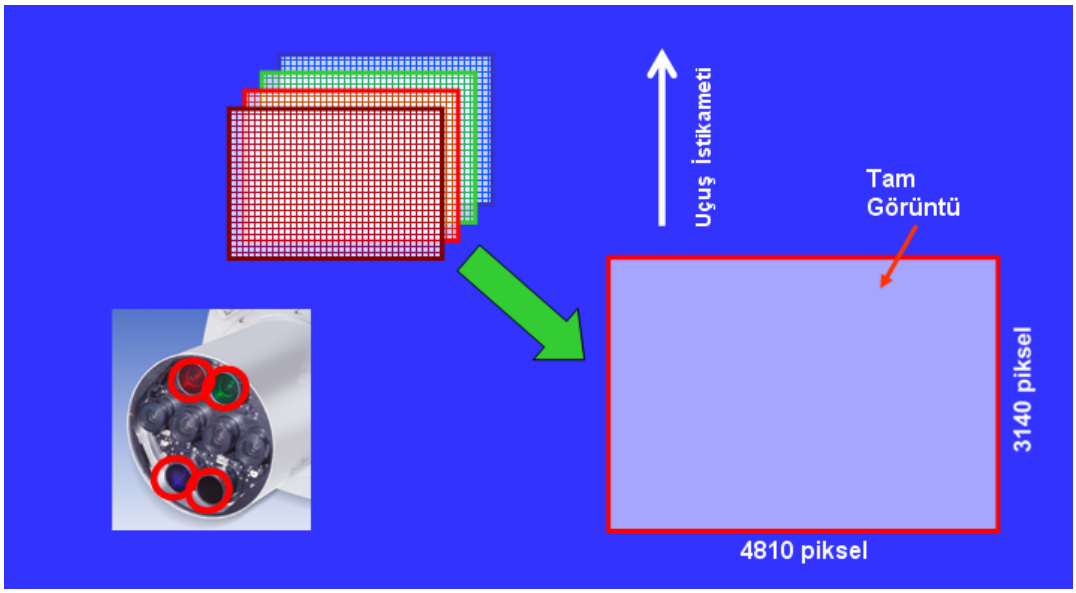


Şekil 4.8 Bir pankromatik görüntünün tamamı



Şekil 4.9 Bir pankromatik görüntünün tamamı

Renkli ve IR (Multispektral) objektifler aynı anda görüntü alırlar (Şekil 4.10).



Şekil 4.10 Renkli ve IR (Multispektral) objektiflerin görüntü alımı

UltraCam$_X$'in görüntüleri sonuç ürün haline gelene kadar aşağıdaki seviyelerden geçerler (Çizelge 4.1)

Çizelge 4.1 UltraCam$_X$ sayısal hava kamerası görüntü oluşum seviyeleri

SEVİYE 00	CCD lerden okunan ham görüntü birimleri, ayna görüntü vardır.
SEVİYE 0	Doğrulanmış görüntü birimleri, ayna depolama yoktur.
SEVİYE 1	Radyometrik olarak düzeltilmiş ve etkili birleştirme için yeniden düzenlenmiş görüntü birimleri
SEVİYE 2	Geometrik ve radyometrik olarak düzeltilmiş, birleştirilmiş görüntüler (renk katmanları ayrı durumdadır)
SEVİYE 3	Sonuç renkli görüntü

4.4 Teknik Özellikler

Ultracam$_X$ sayısal fotogrametrik hava kamerasına ait teknik özellikler Ultracam$_D$ sayısal hava kamerasına benzemekle birlikte teknik açıdan birçok önemli gelişmeyi ve yeniliği ihtiva etmektedir (Çizelge 4.2).

Çizelge 4.2 Ultracam$_X$ sayısal fotogrametrik hava kamerasının teknik özellikleri

Görüntü Özellikleri	
Görüntü boyutları	23 cm x 15 cm boyutlarındaki film bazlı hava fotoğrafına benzerdir.
Görüntü İçeriği (Hava fotoğrafıyla karşılaştırılması)	15 µm piksel boyutu ile taranmış filminden daha iyidir.
Görüntü veri formatları	TIFF, JPEG, Tiled TIFF
Sayısal Kameraların Teknik Verileri	
Pankromatik görüntü boyutu	14,430 x 9,420 piksel
Pankromatik fiziksel piksel boyutu	7.2 µm
Odak düzleminin fiziksel boyutu	104 mm x 68.4mm
Pankromatik lenslerin odak uzaklığı	100 mm
Lens Açıklığı	f = 1/5.6
Düşey Görüş Açısı, (cross track along track)	Yatay 55º, Uçuş istikameti=37º
Renk (multi-spektral yeteneği)	4 kanal -- RGB & NIR
Renkli görüntü boyutu	4,810 x 3,140 piksel
Renkli fiziksel piksel boyutu	7.2 µm
Renkli lens sistemlerinin odak uzaklığı	33 mm
Renkli lens aralığı	f = 1/4.0
Düşeyden renkli görüş alanı, (cross track along track)	Yatay 55º, Uçuş istikameti=37º
Resim çekiş hızı	1/500 to 1/32
Görüntü sürüklenmesi önleyici sistem (FMC)	TDI kontrollü
Maksimum FMC-yeteneği	50 piksel
500 m uçuş yüksekliğine göre yerdeki en küçük piksel (300 m)	3.6 cm (2.2 cm)
Saniyedeki Çerçeve hızı (minimum görüntü intervali)	1.35 saniyede 1 çerçeve
Analog-sayısal dönüşümü	16 bit
Renk kanalları için radyometrik çözünürlük	12 bit
Kamera ünitesinin fiziksel doğrultuları	45 cm x 45 cm x 60 cm
Ağırlık	55 kg
Tam performansta güç tüketimi	150 W
Veri Depolama (DX) ve İşlem Ünitesi (CX)	
Uçuş Süresince depolama kapasitesi	~ 1.7 TB
Uçuş Süresince sıkışmamış görüntüleri depolama kapasitesi (resim sayısı)	~ 4700
CX + 2*DX Ağırlığı	92 kg
CX Ağırlığı	65 kg
DX Ağırlığı	15 kg
Fiziksel ebatlar	50 cm x 36 cm x 65 cm
Tam performansta güç tüketimi	700 W
Operasyonel Özellikleri	
70% ileri bindirmeli maksimum alım periyodu, 20 cm yer çözünürlüğünde (GSD) (film ölçeği 1:10,000)	~ 8.5 saat
Uçaktan ofise veri transferi	Mobil bilgisayarla veya DX ünitesinin taşınması ile
Kameranın Montajı	Mevcut film kameraları ile aynı
Uçuş planlaması	IGI, CCNS ve benzer sistemlerle uyumludur.
Dış yöneltme desteği	IGI, Aero-Control, Applanix' Pos ve benzer DGPS/IMU sistemlerle uyumludur.
Görüntü geometrik doğruluğu	< ± 2 µm

4.5 Kamera Kalibrasyonu

Bütün sayısal hava kameralarında olduğu gibi Ultracam$_X$ sayısal fotogrametrik hava kamerasının kalibrasyonu da geometrik ve radyometrik kalibrasyon olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Radyometrik kalibrasyonda her bir sensörün RGB ve NIR algılama doğrulukları yansıması bilinen örnekler kullanılarak test edilir. Bu çalışmada geometrik doğruluk üzerinde yoğunlaşıldığı için radyometrik kalibrasyon konusunda detaya inilmemiştir.

Geometrik kalibrasyon, kamera üzerindeki bütün objektiflerin ve CCD algılayıcıların görüntü alım geometrisinin test edilmesi ve distorsiyonların her bir objektif ve CCD algılayıcısı için belirlenmesini kapsamaktadır. Kameranın teknik özelliklerinde de bahsedildiği üzere Ultracam$_X$, toplam 13 adet CCD ve 8 adet objektifden oluşmaktadır. Bunlardan 4 adet objektif ve 9 adet CCD pankromatik kamerayı, 4 adet objektif ve 4 adet CCD de Multispektral (Renkli ve NIR) kamerayı oluşturmaktadır. Pankromatik ve Multispektral kameraya ait bilgiler Şekil 4.11'de gösterilmektedir.

Large Format Panchromatic Output Image

Image Format	long track	67.824mm	9420pixel
	cross track	103.896mm	14430pixel
Image Extent		(-33.91, -51.95)mm	(33.91, 51.95)mm
Pixel Size		7.200µm*7.200µm	
Focal Length	ck	100.500mm	± 0.002mm
Principal Point	X_ppa	0.000 mm	± 0.002mm
(Level 2)	Y_ppa	0.144 mm	± 0.002mm
Lens Distortion	Remaining Distortion less than 0.002mm		

Medium Format Multispectral Output Image (Upscaled to panchromatic image format)

Image Format	long track	67.824mm	3140pixel
	cross track	103.896mm	4810pixel
Image Extent		(-33.91, -51.95)mm	(33.91, 51.95)mm
Pixel Size		21.600µm*21.600µm	
Focal Length	ck	100.500mm	
Principal Point	X_ppa	0.000 mm	± 0.002mm
(Level 2)	Y_ppa	0.144 mm	± 0.002mm
Lens Distortion	Remaining Distortion less than 0.002mm		

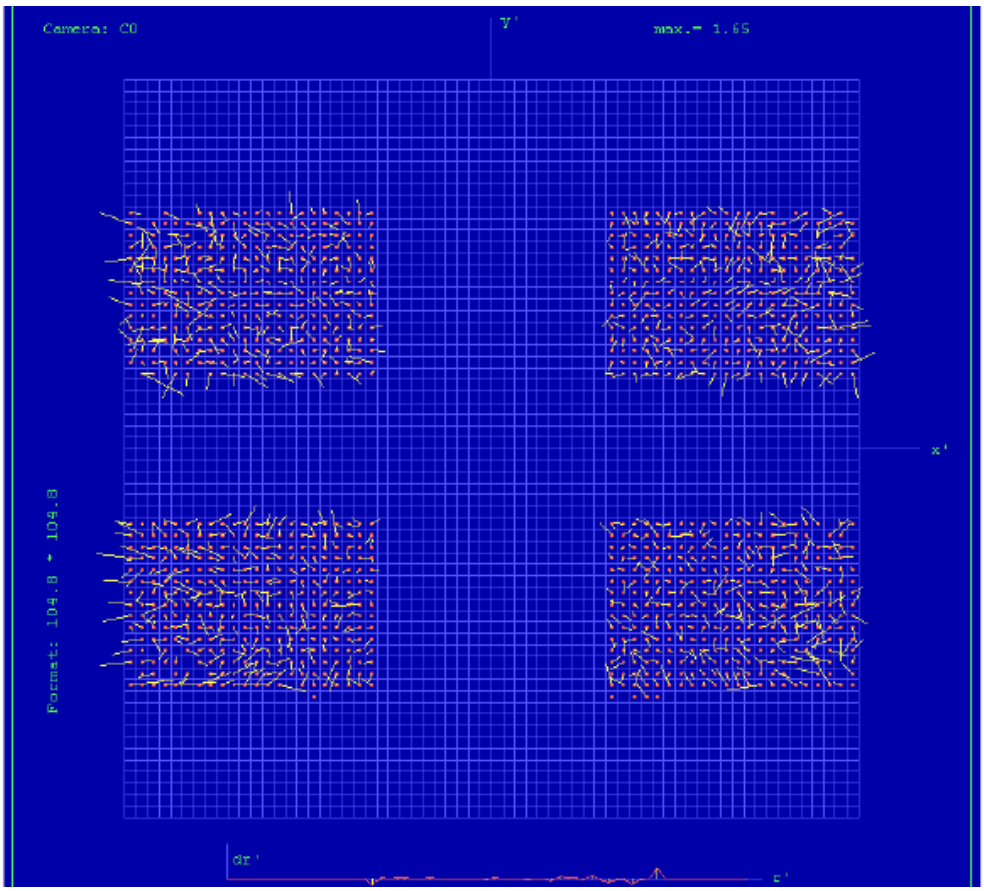
Şekil 4.11 Pankromatik ve multispektral kameranın özellikleri.

Yeterli sayıda YKN tesis edilip uygun hava koşullarında görüntü alımını müteakip bloklar oluşturulup EKK dengelemesi yapılmaktadır. Yapılan hesaplamalar, testler ve ölçümler sonrasında her bir objektif ayrı ayrı ele alınarak söz konusu objektifin ihtiva ettiği CCD algılayıcılara ait görüntüleme alanı koordinatları, öteleme, dönüklük ve ölçek parametreleri ve objektife ait çapsal distorsiyon değerleri hesaplanmakta (Şekil 4.12) ve artık hata diyagramları oluşturulmaktadır (Şekil 4.13). Aşağıdaki şekillerdeki değerler 240 YKN ve 84 görüntü ile elde edilmiştir. Pankromatik kamera için 19311, multispektral kamera için 64864 adet nokta ölçülmüş ve görüntü parametreleri BINGO yazılımı kullanılarak EKK dengelemesi ile belirlenmiştir. Örnek olarak sadece 0 numaralı objektife ait değerler gösterilmiştir.

Cone # C0					
Lens	Linos Vexcel Apo-Sironar Digital 100mm Linos GmbH, Germany				
Shutter	Prontor Magnetic Prontor-Werk Alfred Gauthier GmbH				
Image Extent (nominally)		(-34.28, -52.22)mm		(34.28, 52.22)mm	
Extent CCD 0		(-34.28, -52.22)mm		(-10.32, -16.28)mm	
Extent CCD 1		(-34.28, 16.28)mm		(-10.32, 52.22)mm	
Extent CCD 2		(10.32, -52.22)mm		(34.28, -16.28)mm	
Extent CCD 3		(10.32, 16.28)mm		(34.28, 52.22)mm	
Parameters	Shift X	ShiftY	Rotation	Scale	
CCD0	-5,2199407E-02 mm ± 0.0007 mm	-1,2581050E-01 mm ± 0.0010 mm	-4,1657539E-03 gon ± 0.0001 gon	1,0056340 ± 0.00005	
CCD1	-2,5287729E-02 mm ± 0.0007 mm	-1,5060721E-01 mm ± 0.0010 mm	0,0000000E+00 gon	1,0058086 ± 0.00005	
CCD2	-7,6256715E-02 mm ± 0.0007 mm	-1,3257252E-01 mm ± 0.0010 mm	-2,3554174E-02 gon ± 0.0001 gon	1,0064883 ± 0.00005	
CCD3	-5,8894031E-02 mm ± 0.0007 mm	-1,0400047E-01 mm ± 0.0010 mm	3,8289031E-02 gon ± 0.0001 gon	1,0065026 ± 0.00005	

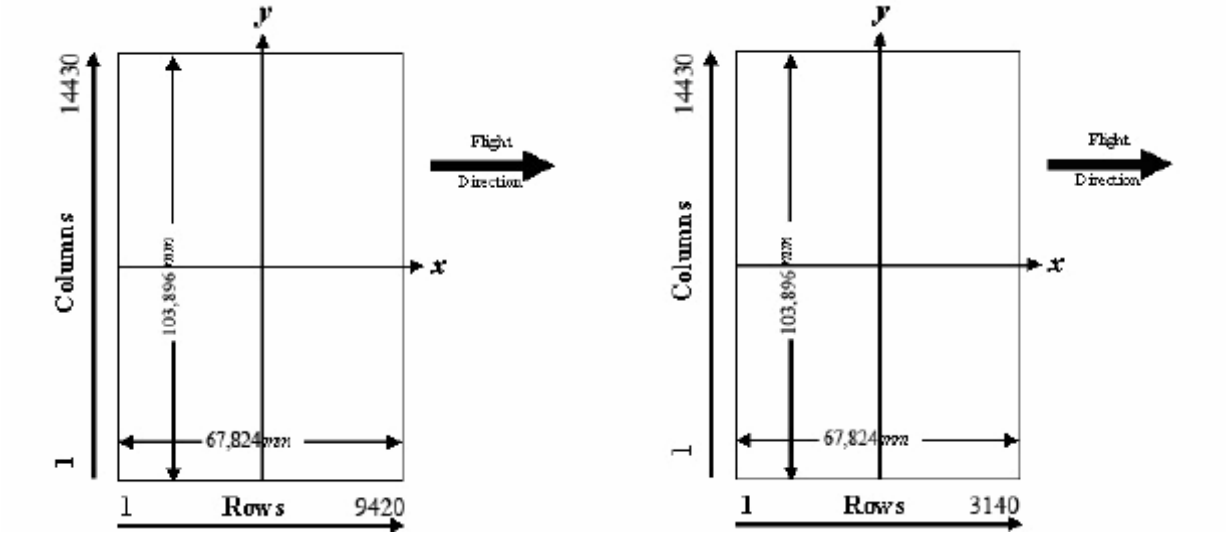
Radial Distortion												
R [mm]	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0	35.0	40.0	45.0	50.0	55.0	60.0 65.0
dr [µm]	-0.8	-1.1	-1.1	-1.1	-1.1	-0.9	0.0	2.2	6.6	14.2	26.3	44.4 70.1

Şekil 4.12 Tek pankromatik objektif verisi



Şekil 4.13 Artık hata diyagramı

Geometrik kalibrasyon ile elde edilen diğer bir parametre ise level 3 görüntüsü üzerinde asal noktanın yeridir. Bu noktanın yeri görüntünün dönüklük durumuna bağlı olarak değişmektedir. Pankromatik ve multispektral görüntülerin (270^0 saat istikametinde döndürülmüş olarak) level 3 görüntü koordinat sistemi Şekil 4.14'de, saat istikametindeki dönüklüğe bağlı olarak asal noktanın level 3 görüntü koordinat sistemindeki yeri ise Şekil 4.15'de gösterilmektedir.

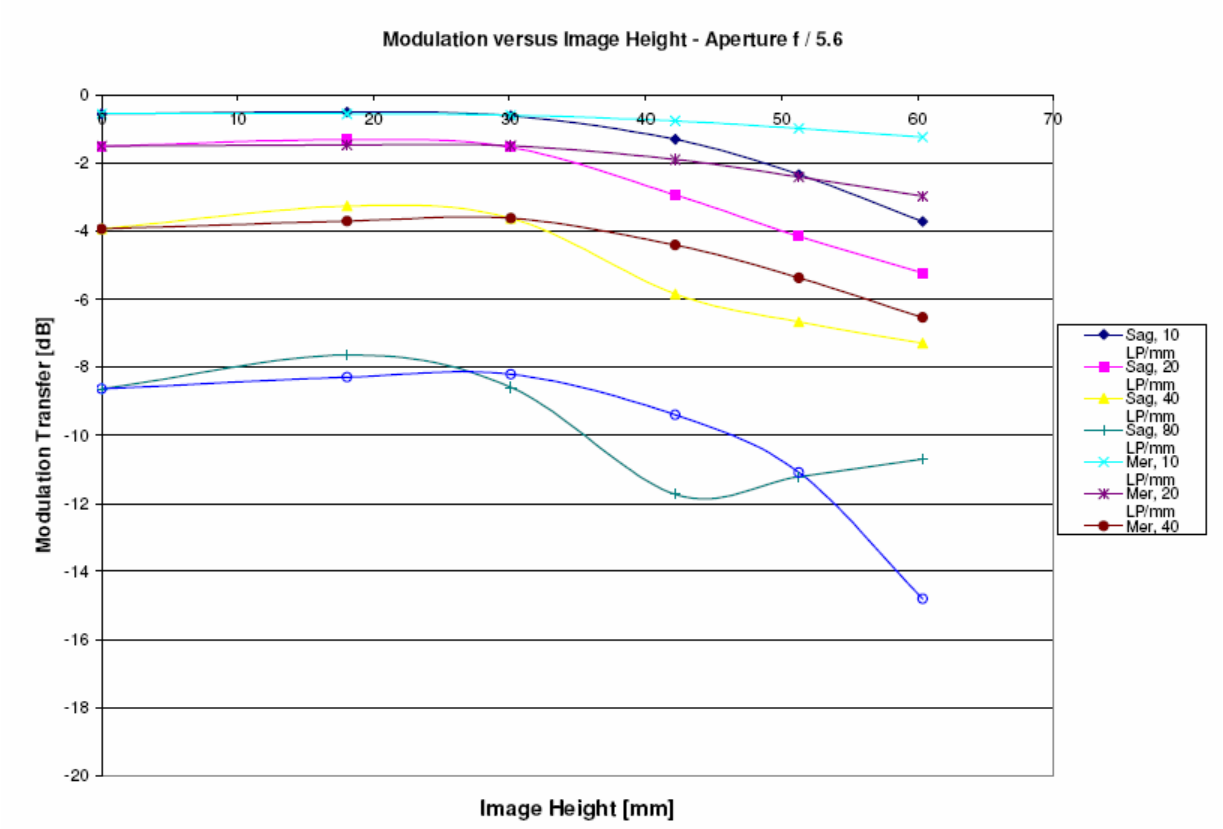


Şekil 4.14 Level 3 görüntü koordinat sistemi

Image Format	Clockwise Rotation (Degree)	PPA	
		X	Y
Level 2	-	0.000	0.144
Level 3	0	0.000	0.144
Level 3	90	0.144	0.000
Level 3	180	0.000	-0.144
Level 3	270	-0.144	0.000

Şekil 4.15 Asal noktanın level 3 görüntü koordinat sistemindeki yeri

Geometrik kalibrasyon kapsamında belirlenen son parametre ise lens ayırma gücüdür. Bu kapsamda lensin 0-70 mm görüntü yüksekliği aralığında, milimetrede 10 ile 80 arasında değişen çapsal ve teğetsel çeşitli çizgi çifti frekansındaki sinyallerdeki geçiş (modülasyon) transferi (ayırma gücü) farklı odak uzaklığı açıklıklarına göre belirlenir ve grafik olarak gösterilir. Örnek olarak f/5.6 odak uzaklığı açıklığındaki modülasyon-görüntü yüksekliği grafiği Şekil 4.16'da gösterilmektedir. Şekil 4.16'da sağ taraftaki açıklamada yer alan (sag) ifadesi çapsal, (mer) ifadesi ise teğetsel çizgi çiftlerini ifade etmektedir.



Şekil 4.16 Lens ayırma gücü

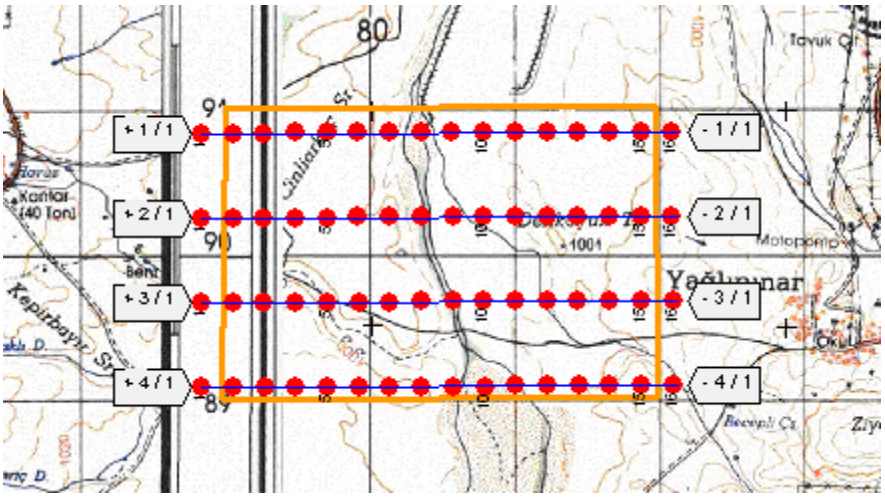
5. UYGULAMA

Bu bölümde, Microsoft UltraCam$_X$ sayısal fotogrametrik hava kamerasının geometrik doğruluğunun araştırılması amacıyla, iki farklı test alanında farklı ölçekteki GPS/IMU destekli uçuşlar sonucunda elde edilen görüntüler kullanılarak oluşturulan bloklar farklı yaklaşımlarla ek parametreler ilave edilerek dengelenmiş ve sistematik hatalar araştırılacaktır. Fotogrametrik nirengi dengelemesi yapılmadan GPS/IMU verileri kullanılarak elde edilen görüntülerin doğrudan yöneltilmesi olanakları araştırılacak, boresight kalibrasyonunun doğrudan yöneltmeye etkileri, kontrolü ve güvenilirliği incelenecektir.

5.1 Test Alanı

Bu çalışmada iki farklı test alanında üç farklı ölçekte Microsoft UltraCam$_X$ sayısal fotogrametrik hava kamerası ile kaydedilen görüntüler kullanılmıştır.

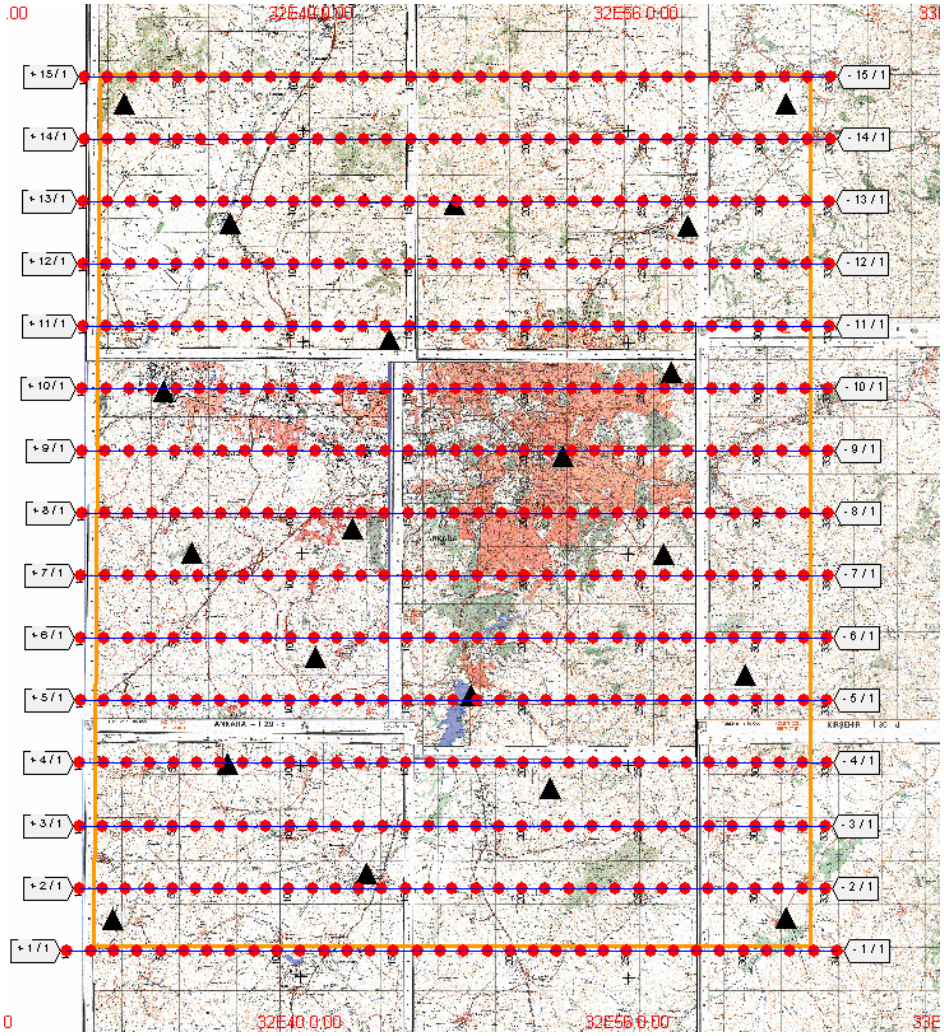
İlk test alanı, Ankara Gölbaşı bölgesinde 6 km^2 lik bir alanı kapsamaktadır ve bu alanda iki farklı ölçekte (1:8.000, 1:20.000) görüntüler alımı gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.1). Bloğun dengelenmesi ve sonuçların kontrolü için blok köşelerinde 4 adet YKN tesis edilmiştir.



Şekil 5.1 Birinci test alanı

İkinci test alanı ise Ankara'yı kapsayan 3600 km^2 lik, ilk bölgeyi içermektedir. Bu test alanında GPS/IMU kullanılarak doğrudan yöneltmenin doğruluğunun belirlenmesi ve fotogrametrik nirengi işlemlerine ne kadar katkı sağlayacağının tespit edilebilmesi için 1:60.000 ölçeğinde bir test uçuşu daha gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.2). Blok köşelerinde birer

adet olmak üzere bölgeye homojen olarak dağılmış 20 adet YKN planlanmış ve tesisi sağlanmıştır.



Şekil 5.2 İkinci test alanı

5.2 Çalışmada Kullanılan Donanımlar

Çalışmalar Microsoft UltraCam$_X$ GPS/IMU destekli sayısal hava kamerası sistemi ile gerçekleştirilmiştir. Microsoft UltraCam$_X$ sayısal hava kamerası geniş çerçeve formatlı sayısal hava kamerası olup altı adet bileşenden oluşmaktadır.

5.2.1 Algılayıcı birimi (SX)

Pankromatik bant için 4 adet, kırmızı, yeşil, mavi ve kızılötesi (RGBI) bantlara ait 4 adet olmak üzere toplam 8 adet optik objektif, Pankromatik objektiflere ait 9 adet, renkli objektiflere ait 4 adet olmak üzere toplam 13 adet CCD dizini bulunmaktadır (Şekil 5.3).



Şekil 5.3 Ultracam$_X$ algılayıcı birimi (SX)

5.2.2 Hesaplama birimi (CX)

Uçuş esnasında görüntü kalite kontrol değerlendirmeleri için kullanılan ara sonuç veri ve dosyalarının işlenmesi ve hesaplanması için 15 adet CPU bulunur. Aynı zamanda, uçuş esnasında canlı görüntü ve görüntü histogramlarının gerçek zamanlı olarak hesabı için ham görüntülerin işlenmesini gerçekleştirir (Şekil 5.4).



Şekil 5.4 Hesaplama birimi (CX)

5.2.3 Kamera işletim arayüzü (IPX)

Kamera operatörü tarafından uçuş esnasında fotoğraf çekim işlemlerinde kullanılmaktadır (Şekil 5.5).



Şekil 5.5 Kamera işletim arayüzü (IPX)

5.2.4 Veri depolama birimi (DX)

Uçuş esnasında veri kaydı ve sonrasında verinin işlenmesi veya arşivlenmesi amacıyla bir sunucu veya iş istasyonuna transferi amacıyla kullanılır. Her bir değiştirilebilir veri depolama ünitesi yaklaşık 4000 görüntü depolayabilmektedir. Bir tam dolu DX verisi (2 Tbytes_14*160GB) bir sunucu veya iş istasyonuna yaklaşık olarak 4 saatte transfer edilebilmektedir. Taşınabilirdir (Şekil 5.6).



Şekil 5.6 Veri depolama birimi (DX)

5.2.5 Veri transfer birimi (DKX)

Uçuş sırasında DX ünitesine kaydedilen ham görüntüler uçuş sonrasında DKX ünitesi yardımı ile bilgisayar ortamına aktarılmaktadır (Şekil 5.7).



Şekil 5.7 Veri transfer birimi (DKX)

5.2.6 İnersiyal navigasyon sistemi (Inertial Navigation System-INS)

GPS ve IMU kombinasyonu ile oluşturulmuş bir sistemdir. IMU (Inertial Measurement Unit), devamlı olarak (kesintisiz) 3 ortogonal doğrusal ivme vektörünü ve açısal dönüklüğü ölçen bir sistemdir. Elde edilen hızların ikinci integrali istenilen konumlama bilgilerini verir. Ayrıca dönüklük ölçümleri zamana bağlı entegre edilerek durum bilgileri hesaplanır. IMU yüksek rölatif doğruluk sağlar ancak, zamana bağlı olarak mutlak doğruluğu bozulur. GPS ile sağlanan gözlemler sayesinde, uygun dış konum veya hız güncelleme ölçümleri ile sistematik hataların etkisi önemli ölçüde elimine edilir (Şekil 5.8).



Şekil 5.8 İnersiyal navigasyon sistemi (INS)

5.3 Çalışmada Kullanılan Yazılımlar

5.3.1 Ofis veri işleme yazılımı (OPC)

UltraCam$_X$ Kamera Sistemine ait bir yazılımdır. Uçaktan gelen ham görüntüleri (Seviye 0) işleyerek, ilk olarak radyometrik olarak düzeltilmiş ve etkili birleştirme için yeniden düzenlenmiş görüntü birimlerine (Seviye 1 (Geçici dosyalardır, kullanıcı tarafından ulaşılamaz ve görüntülenemez)) dönüştürür. Sonrasında "Seviye 1" görüntüleri, geometrik ve radyometrik olarak düzeltilmiş ve birleştirilmiş görüntülere (Seviye 2 (renk katmanları ayrı durumdadır ve kullanıcı isterse "Seviye 3" görüntülerini radyometrik düzeltmeleri elle yaparak elde edebilir.)) dönüştürür. Bu aşamada elle radyometrik düzeltme yapmak için programa müdahale edilmez ise radyometrik olarak düzeltilmiş sonuç görüntüler (Seviye 3) otomatik olarak elde edilebilir.

5.3.2 Uçuş planlama yazılımı

Uçuş planlama yazılımı (Mission Planning Software (WinMP)) yardımıyla uçuş planları hazırlanır ve bir PCMCIA kart kullanılarak uçağın navigasyon sistemine aktarılır. Bu yazılım da IGI firmasına ait bir yazılımdır.

5.3.3 Navigasyon sistemi yazılımı

Navigasyon sistemi olarak IGI'nın CCNS4 kullanılmıştır. CCNS4 navigasyon sistemi, uçuş planlama yazılımı (WinMP) ile önceden planlanmış olan bir uçuş görevinin planlandığı şekilde icra edilmesini ve fotoğraf çekimini sağlayan bir uçuş kontrol ve yönetim sistemidir.

5.3.4 GPS ve IMU Ölçümlerini işleme yazılımı (AeroOffice)

Bu yazılım PCMCIA kart üzerindeki GPS ve IMU verilerinin güvenli bir şekilde aktarılmasını ve bu verileri kullanarak fotoğraflara ait asal nokta koordinatlarının ve dönüklük açılarının (pitch, roll, yaw) hesaplanmasını sağlar. Bu sonuçlar doğrudan yöneltme veya birleştirilmiş algılayıcı yöneltmesi için de kullanılabilir. AeroOffice yazılım paketi içerisinde aynı zamanda Waypoint GPS işlem yazılımı da mevcuttur.

5.3.5 Softplotter 3.0 yazılımı

Stereo model oluşturma, değerlendirme, nokta okuma çalışmaları Softplotter 3.0 yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Sayısallaştırılmış hava fotoğrafları ile uydu görüntülerinden arazi ve detay hakkında doğru bilgi toplama olanağı sağlayan bir fotogrametri yazılımdır.

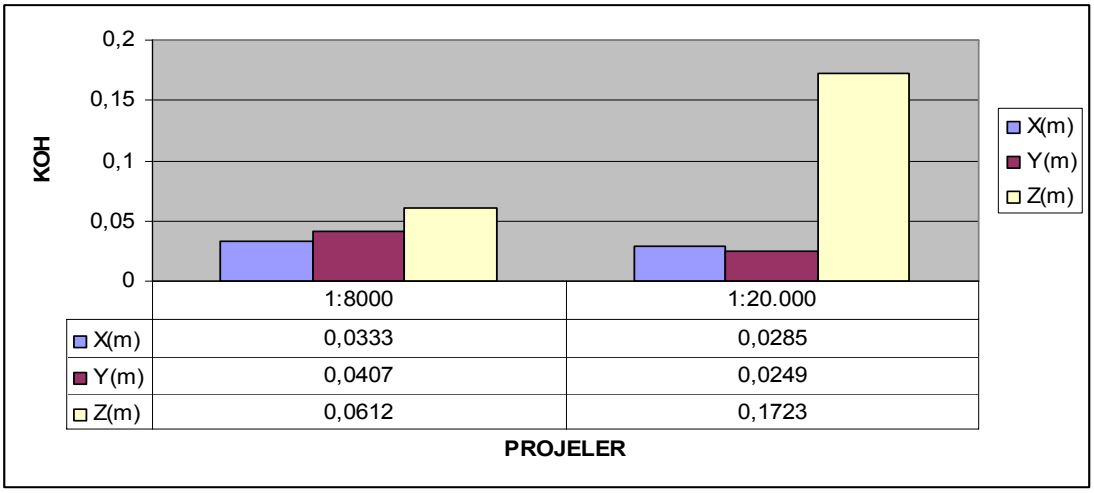
5.4 Birinci Test Alanında Yapılan Çalışmalar

İlk test uçuşunda elde edilen görüntüler ve kinematik GPS/IMU değerleri kullanılarak; Match-AT yazılımı ile blok dengeleme, boresight kalibrasyonu ve doğrudan yöneltme yapılmış sonrasında geometrik doğruluk araştırması kapsamında BLUH yazılımı ile ek parametreler kullanılarak farklı yaklaşımlarla yeni dengelemeler yapılmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

İlk olarak yerde bulunan sabit GPS ve uçaktan alınan GPS verileri GraffNav yazılımı ile işlenmiş (post process) ve kinematik çözümü yapılmıştır. Daha sonra AeroOffice programı ile GPS ve IMU verileri birleştirilmiş ve her görüntüye ait dış yöneltme parametreleri elde edilmiştir. Bu aşamada; sayısal kamera sisteminin üretim aşamasında yapılan ilk test uçuşlarında elde edilen boresight kalibrasyon değerleri kullanılmıştır.

5.4.1 Blok dengeleme

AeroOffice yazılımı kullanılarak yapılan GPS/IMU entegrasyonu ile elde edilen yöneltme elemanları, blok dengelemede başlangıç değerleri olarak kullanılmıştır. GPS/IMU verileri ve blok köşelerindeki YKN'ları kullanılarak bağlama noktaları Inpho Match-AT yazılımı ile otomatik olarak toplanmış ve sonrasında aynı yazılım kullanılarak blok dengelemesi yapılmıştır. Elde edilen dengeleme sonuçları ile stereo modeller oluşturulmuştur. Blok köşelerindeki YKN'lerin stereo modeller üzerinde arazi koordinatları ölçülmüş ve jeodezik olarak belirlenmiş koordinatlar ile olan farkları, ortalama hata ve KOH'ları hesaplanmıştır (Şekil 5.9). Bu işlemler, 1'inci bölgede belirlenmiş olan iki farklı ölçek için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Her bir ölçek için ayrı projeler oluşturulmuştur.



	1:8000	1:20.000
X(m)	0,0333	0,0285
Y(m)	0,0407	0,0249
Z(m)	0,0612	0,1723

Şekil 5.9 Blok Dengeleme sonucunda elde edilen karesel ortalama hatalar

5.4.2 Boresight kalibrasyonu

IMU ve kamera arasındaki mesafe, IMU fiziksel olarak yerleştirilirken ölçülmektedir. Normal koşullarda IMU ve kamera sensörü arasında dönüklük olmaması beklenir. Ancak bunun sağlanması ya da fiziksel olarak ölçülmesi mümkün değildir. Kamera ile IMU arasındaki dönüklük boresight kalibrasyonu ile belirlenir. Boresight hesabı blok dengeleme sonuçları ile GPS/IMU entegrasyonu sonucunda elde edilen sonuçlar arasındaki farklardan elde edilmektedir. Bu kapsamda AeroOffice yazılımı ile dengeleme ve GPS/IMU verileri karşılaştırılarak boresight kalibrasyon değerleri belirlenmiştir. Bu işlem sonucunda dönüklük açı farkları (dω, dφ, dκ) ve GPS sürüklenme parametreleri (dx, dy, dz) elde edilmiştir (Çizelge 5.1).

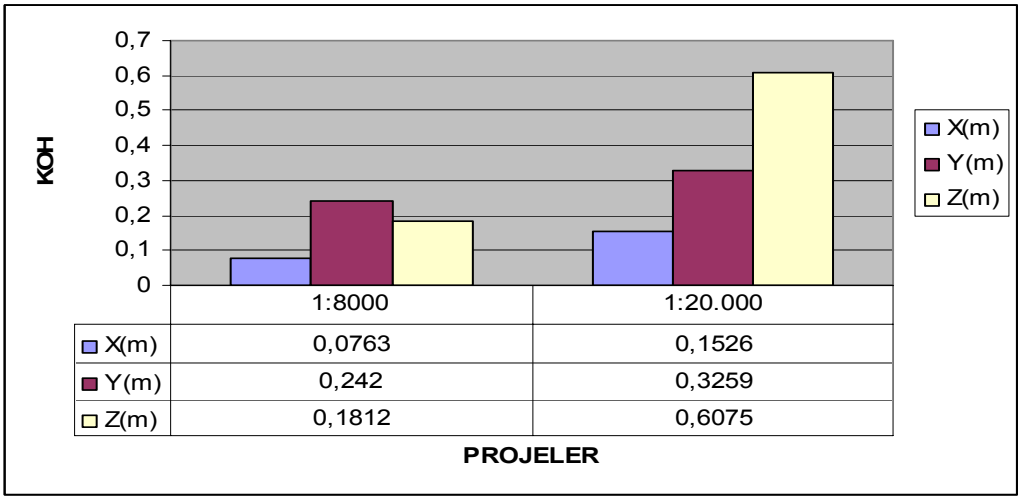
Çizelge 5.1 Boresight kalibrasyon sonuçları

AEROOFFICE BORESIGHT SONUÇLARI						
ÖLÇEK	**ROLL (derece)**	**PITCH (derece)**	**YAW (derece)**	**YUKARI DEĞER (m)**	**SAĞA DEĞER(m)**	**YÜKSEKLİK(m)**
1:8.000	0.3752	-0.019	-0.1046	2,4470	0.787	-1,1850
1:20.000	0.3873	-0.0148	-0.0848	1,8660	0.712	-1,3210

5.4.3 Doğrudan yöneltme (Direct georeferencing)

Fotogrametrik nirengi çalışmalarında gerçekleştirilen blok dengelemenin amacı, her bir görüntüye ait dış yöneltme parametrelerinin belirlenmesidir. Bunun için blok köşelerinde yeterli sayıda YKN'na noktasına ihtiyaç duyulmaktadır. YKN'lerden merkezi izdüşüm denklemleri kullanılarak ve uzaysal geriden kestirme yapılarak fotoğraf izdüşüm merkezi koordinatları (X_0, Y_0, Z_0) ve dönüklükleri (ω, φ, κ) hesaplanmaktadır. Sonrasında dönüklükleri bilinen bindirmeli fotoğraf çiftlerinden stereo model oluşturularak arazi koordinatları elde edilmektedir. Son yıllarda GPS/IMU sisteminin kullanılmaya başlanması ile birlikte dış yöneltme parametreleri dengeleme yapılmaksızın GPS ve IMU ölçümlerinin entegrasyonu ile belirlenebilir hale gelmiştir. Sonuç olarak bu sistemin kullanılmasıyla stereo model oluşturmak için dış yöneltme parametreleri doğrudan elde edilebilmektedir. Doğrudan GPS/IMU verileri kullanılarak arazi koordinatlarının elde edilmesi "Doğrudan yöneltme (Direct Georeferencing)" olarak adlandırılmaktadır. Teorik olarak YKN ihtiyacı ortadan kalkmış olarak görünse de GPS/IMU sisteminin kısıtlamalarının yani GPS/IMU verilerinin

sağladığı geometrik doğruluğun test edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla GPS/IMU entegrasyonu yapılan verilere, hesaplanan boresight değerleri eklenerek dış yöneltme parametreleri elde edilmiştir. Daha sonra bu parametreler ile stereo modeller oluşturulmuş ve blok köşelerindeki yer kontrol noktalarının oluşturulan stereo modeller üzerinde arazi koordinatları ölçülmüş ve jeodezik olarak belirlenmiş koordinatlar ile olan farkları, ortalama hata ve karesel ortalama hataları (KOH) hesaplanmıştır (Şekil 5.10).



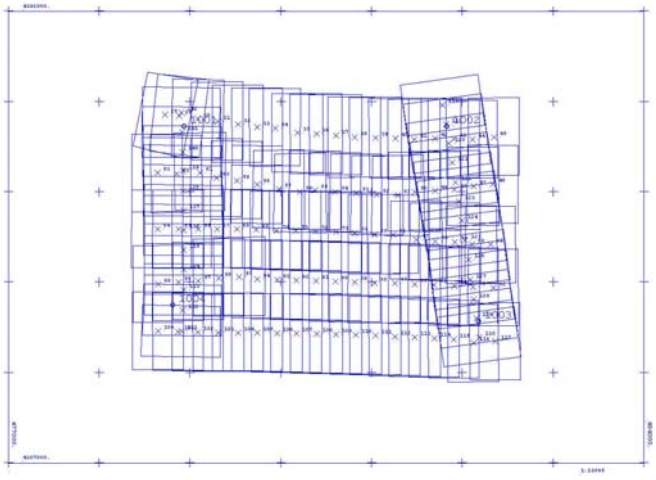
Şekil 5.10 Doğrudan yöneltme sonucunda elde edilen karesel ortalama hatalar

5.4.4 Geometrik doğruluğun araştırılması

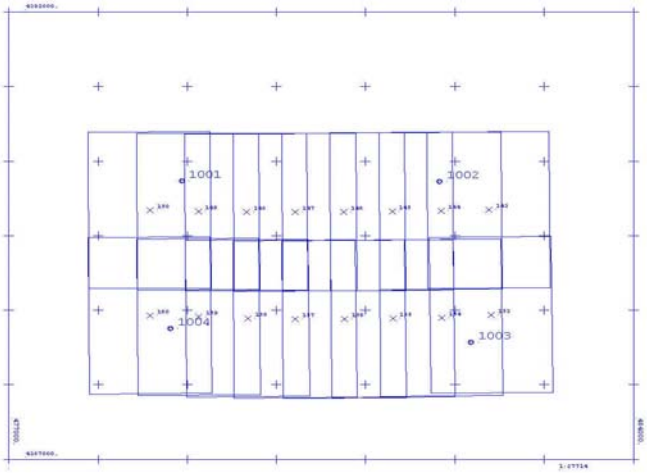
Bu aşamada BLUH (Hannover Üniversitesi, Almanya) yazılımı kullanılarak kameranın doğruluğunu ifade eden parametreleri içeren şart denklemleri (ek parametreler) dengelemeye ilave edilerek yeni dengelemeler yapılmıştır. Bu kapsamda 1:20.000 ve 1:8.000 ölçekli fotoğraflar aşağıdaki yaklaşımlarla dengelenmiştir;

- Blok dengeleme (ek parametresiz),
- Blok dengeleme (12 ek parametre),
- Blok dengeleme (12 ek parametre+UltraCamX ölçek parametreleri),
- Blok dengeleme (UltraCamX ölçek, öteleme ve ana görüntü perspektif hata parametreleri),
- Blok dengeleme (12 ek parametre+UltraCamX ölçek, öteleme ve ana görüntü perspektif hata parametreleri).

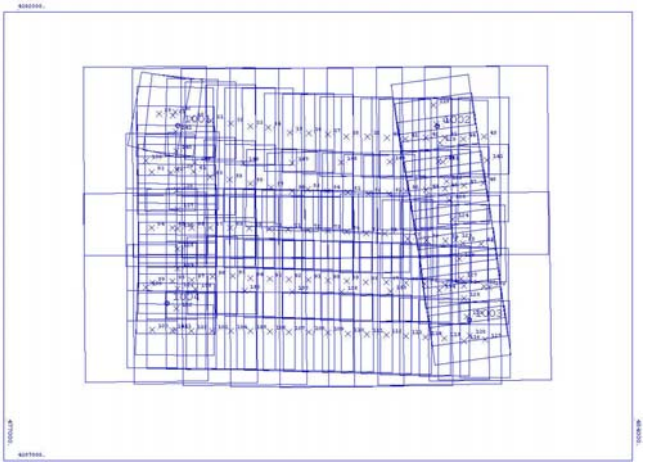
Dengelemeler, 1:8.000 ölçekli fotoğraflar (Şekil 5.11), 1:20.000 ölçekli fotoğraflar (Şekil 5.12) ve 1:8.000+1:20.000 ölçekli fotoğraflar (Şekil 5.13) birlikte olacak şekilde 3 farklı grup halinde ele alınarak ve yukarıda belirtilen yaklaşımlar uygulanarak yapılmıştır.



Şekil 5.11 1:8.000 ölçekli fotoğraflar (115 fotoğraf)



Şekil 5.12 1:20.000 ölçekli fotoğraflar (16 fotoğraf)



Şekil 5.13 1:8.000+1:20.000 ölçekli fotoğraflar (131 fotoğraf)

BLUH yazılımında kullanılan ek parametrelerin listesi Çizelge 5.2'de, ek parametre formülleri ise Çizelge 5.3'de sunulmuştur.

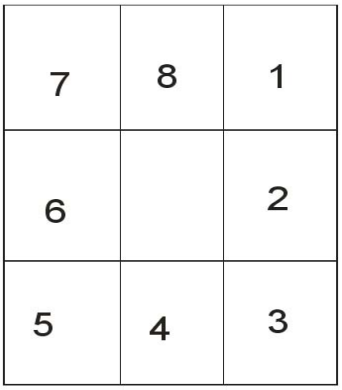
Çizelge 5.2 BLUH ek parametre listesi

EK PARAMETRE NUMARASI	EK PARAMETRE AÇIKLAMASI
1	Açısal afinite
2	Afinite
3-6	Genel deformasyon
7, 8	Teğetsel distorsiyon
9	Çapsal simetri r*r*r
10, 11	Çapsal simetrik yükseklik derecesi
12	Genel distorsiyon
13	Odak uzaklığı
14, 15	Esas nokta parametreleri
16-18	Olası GPS-drift parametreleri
19, 20	GPS-datum parametreleri
21	t*t
22-26	Panaromik kamera için parametreler
27, 28	Balık gözlü kameralar için çapsal simetrik distorsiyonlar
29	DMC eksantrisite parametresi
30-33	DMC senkronizasyon parametreleri
34-41	DMC alt görüntülerin perspektif deformasyon parametreleri
42-49	Ultracam ölçek parametreleri
50-65	Ultracam öteleme parametreleri
66-73	Ultracam Ana görüntü perspektif hata parametreleri
74-77	DMC alt görüntüler çapsal simetri parametreleri
79	DMC görüntü alanı genel değişim
80	DMC alt görüntüler genel çapsal simetri parametresi
81-88	Sayısal orta format kameraların köşe etkileri
89	RMK D için distorsiyon düzeltmesi

Çizelge 5.3 BLUH standart 12 ek parametre formülleri

EK PARAMETRE NUMARASI	EK PARAMETRE FORMÜLÜ	
-	$r^2 = x^2 + y^2$	arctan b = y/x
1	x' = x - y•P1	y' = y - x•P1
2	x' = x - x•P2	y' = y + y•P2
3	x' = x - x•cos 2b • P3	y' = y - y•cos 2b • P3
4	x' = x - x•sin 2b • P4	y' = y - y•sin 2b • P4
5	x' = x - x•cos b • P5	y' = y - y•cos b • P5
6	x' = x - x•sinb • P6	y' = y - y•sin b • P6
7	x' = x + y•r•cos b • P7	y' = y - x•r•cos b • P7
8	x' = x + y•r•sin b • P8	y' = y - x•r•sin b • P8
9	x' = x - x•(r2 - 16384)• P9	y' = y - y•(r2 - 16384)• P9
10	x' = x - x•sin(r • 0.049087) • P10	y' = y - y•sin(r • 0.049087) • P10
11	x' = x - x•sin(r • 0.098174) • P11	y' = y - y*sin(r •0.098174) • P11
12	x' = x - x•sin 4b • P12	y' = y - y• sin 4b •P12

UltraCam$_X$ içerisinde sentetik görüntü tabanlı 9 adet CCD bulunmaktadır. Her bir pankromatik görüntü 4 adet objektif içerisine yerleştirilmiş 9 adet CCD tarafından alınmakta ve birleştirilmektedir. Görüntünün orta kısmındaki bölge 3 numaralı objektif içerisindeki tek CCD ile alınmaktadır ve bu bölge ana bölgedir. Diğer 8 adet bölge alt bölge olarak nitelendirilmektedir (Şekil 5.14). 42 ile 73 arasındaki ek parametreler ile CCD dizisi birleşimindeki problemler belirlenebilmektedir. 8 farklı alt bölge için özel parametreler mevcuttur.



Şekil 5.14 Ana ve alt bölgeler

Ultracam$_X$ için kullanılan BLUH ek parametreleri;

- 42 ile 49 arasındaki parametreler (42 alt bölge 1 için, 49 ise alt bölge 8 için olacak şekilde) ölçek parametreleri,
- 50 ile 57 arasındaki parametreler (50 alt bölge 1 için, 57 ise alt bölge 8 için olacak şekilde) X yönündeki öteleme parametreleri,
- 58 ile 65 arasındaki parametreler (58 alt bölge 1 için, 65 ise alt bölge 8 için olacak şekilde) Y yönündeki öteleme parametreleri,
- 66 ile 73 arasındaki parametreler (66+67 alt bölge 1 için, 68+69 alt bölge 3 için, 70+71 alt bölge 5 için, 72+73 alt bölge 7 için) ana görüntü perspektif hata parametreleridir.

1:8.000 ve 1:20.000 ölçekli fotoğrafların birlikte dengelenmesi için 1:8.000 ölçekli fotoğrafların bağlama noktaları arasından 1:20.000 ölçekli fotoğraflara uygun dağılacak şekilde aynı bağlama noktaları seçilmiştir. BLUH yazılımı ile ek parametreler kullanılarak yapılan farklı yaklaşımlardaki fotogrametrik blok dengelemelerine ait sonuçlar Çizelge 5.4'de, sonuçlara ait grafikler ise Şekil 5.15, Şekil 5.16 ve Şekil 5.17'de sunulmuştur. Dengelemelere ilişkin Çizelge 5.4'de kullanılan kısaltmalar;

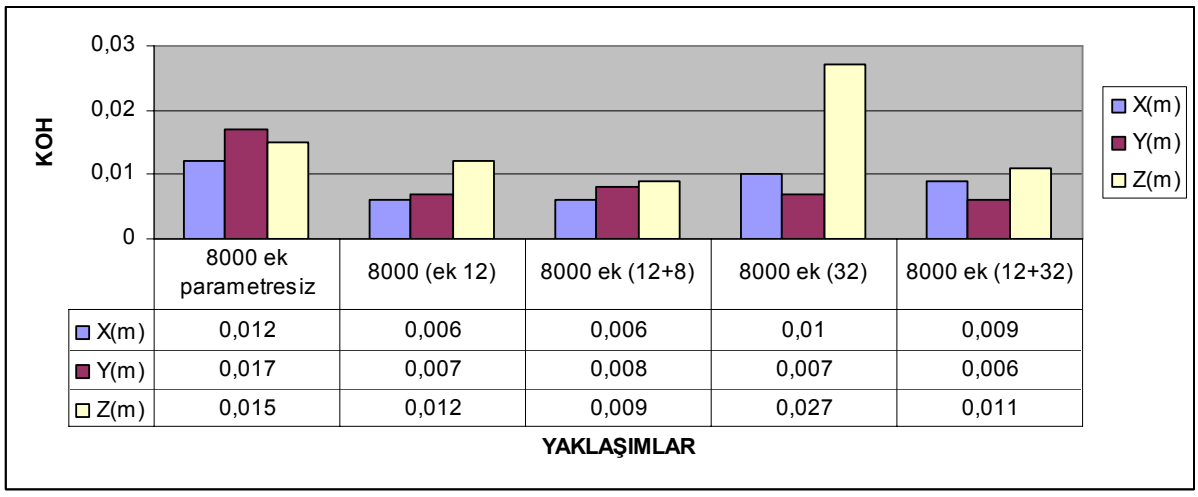
- 8000, 20000 ifadesi hangi ölçekteki fotoğrafların dengelendiğini,
- 8+20 her iki 1:8.000 ve 1:20.000 ölçekteki fotoğrafların birlikte dengelendiğini,
- BD, hiç bir ek parametre kullanılmadan yapılan dengelemeyi,
- BD ek 12, BLUH programındaki ilk 12 parametrenin kullanıldığını,

- BD ek 12+8, BLUH programındaki ilk 12 ye ek olarak 42-49 arası Ultracam ölçek parametrelerinin kullanıldığını,
- BD ek 32, 42-73 arası Ultracam'e ilişkin 32 adet ölçek, öteleme ve Ultracam ana görüntü perspektif hata parametrelerinin kullanıldığını,
- BD ek 12+32, BLUH programındaki ilk 12 ye ek olarak 42-73 arası Ultracam'e ilişkin 32 adet ölçek, öteleme ve Ultracam ana görüntü perspektif hata parametrelerinin kullanıldığını

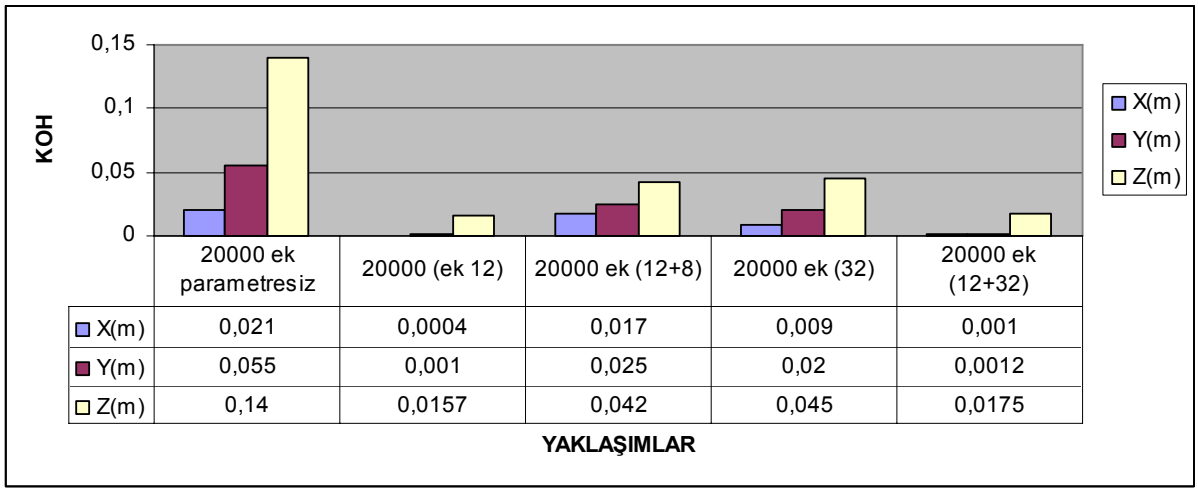
ifade etmektedir.

Çizelge 5.4 Blok dengeleme sonuçları

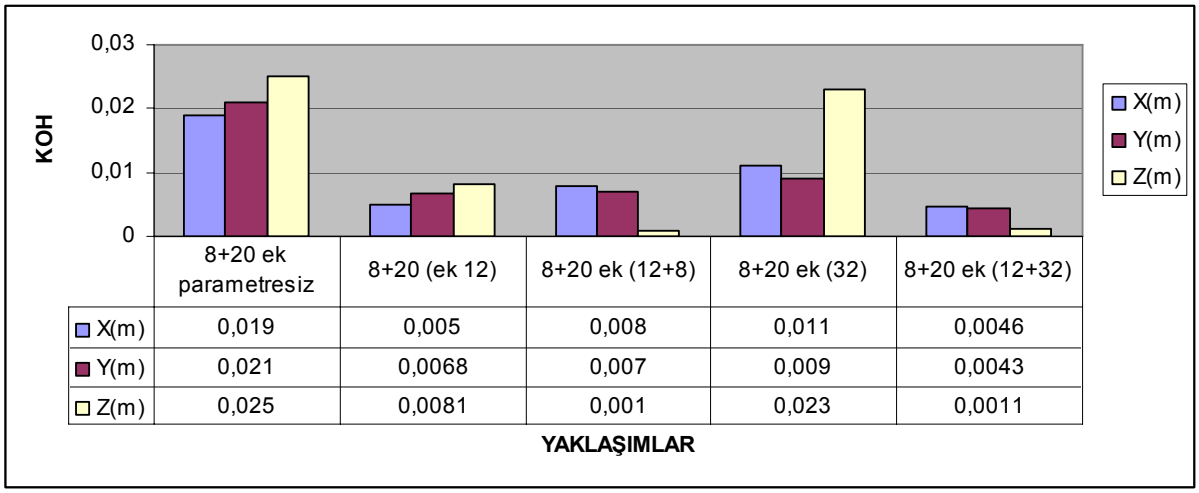
Yaklaşım	Kontrol/Karşılaştırma Noktası	σ_0 (μm)	X(m)	Y(m)	Z(m)
8000 BD	4	0.98	0.012	0.017	0.015
8000 BD ek 12	4	0.80	0.006	0.007	0.012
8000 BD ek 12 +8	4	0.78	0.006	0.008	0.009
8000 BD ek 32	4	0.89	0.010	0.007	0.027
8000 BD ek 12 +32	4	0.76	0.009	0.006	0.011
20000 BD	4	0.94	0.021	0.055	0.140
20000 BD ek 12	4	0.76	0.0004	0.0010	0.0157
20000 BD ek 12+8	4	0.76	0.017	0.025	0.042
20000 BD ek 32	4	0.80	0.009	0.020	0.045
20000 BD ek 12+32	4	0.76	0.0010	0.0012	0.0175
8+20 BD	4	0.99	0.019	0.021	0.025
8+20 BD ek 12	4	0.81	0.005	0.0068	.0081
8+20 BD ek 12+8	4	0.78	0.008	0.007	0.001
8+20 BD ek 32	4	0.90	0.011	0.009	0.023
8+20 BD ek 12+32	4	0.77	0.0046	0.0043	0.0011



Şekil 5.15 1:8.000 ölçekli projede uygulanan yaklaşımlar KOH'lar

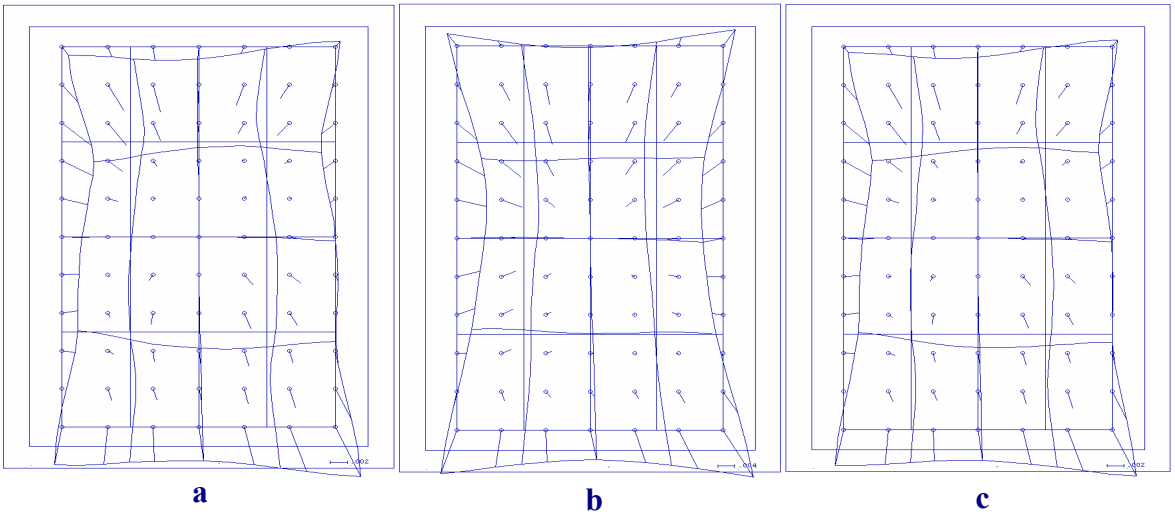


Şekil 5.16 1:20.000 ölçekli projede uygulanan yaklaşımlar ve KOH'lar

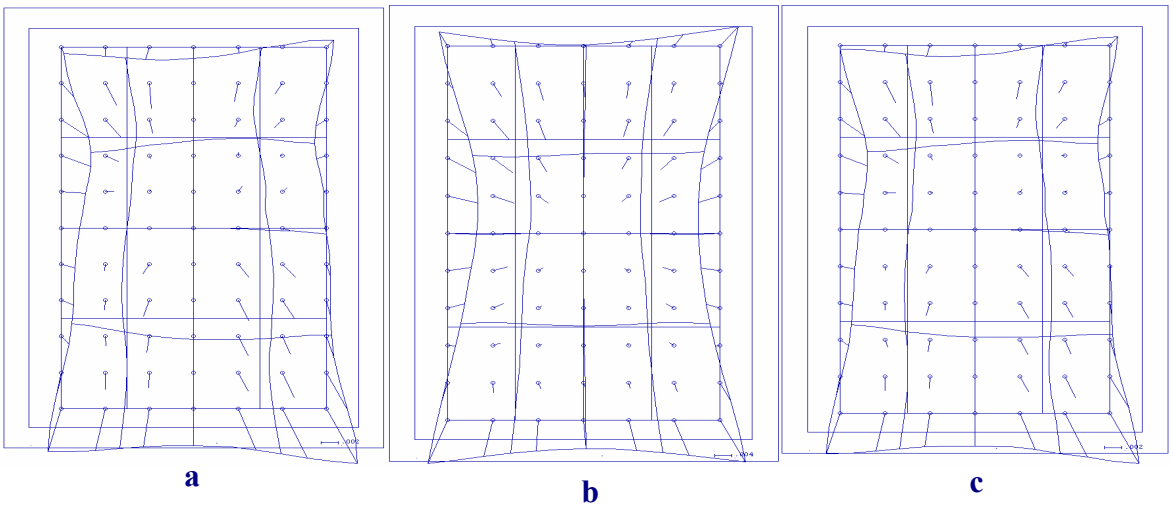


Şekil 5.17 1:8.000+1:20.000 ölçekli projede uygulanan yaklaşımlar ve KOH'lar

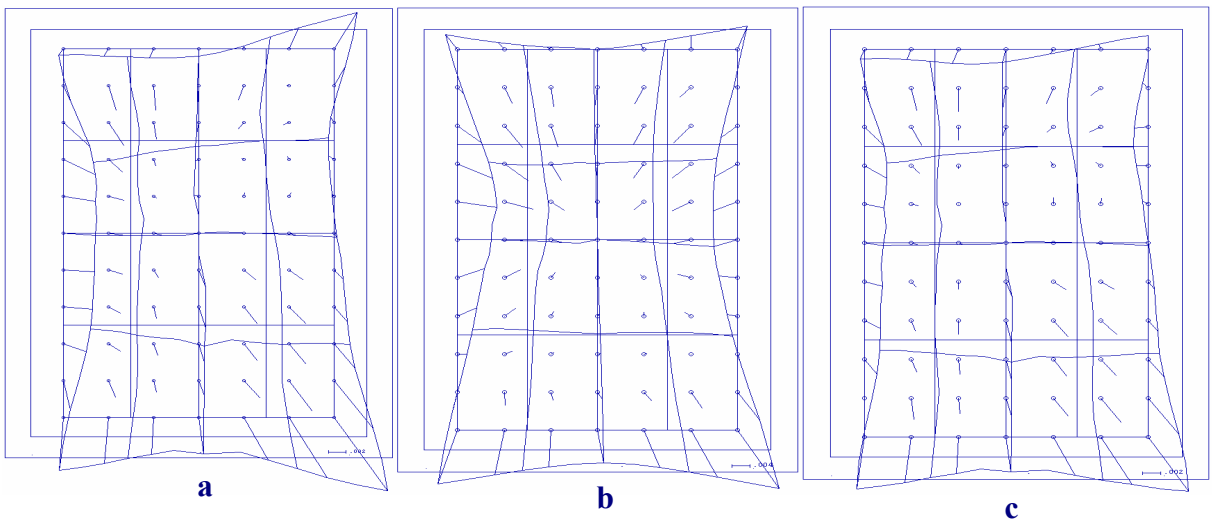
Yapılan dengelemeler sonucunda ek parametrelerin fotoğraf koordinatlarına etkileri belirlenmiştir. Ek 12 parametrenin fotoğraf koordinatlarına etkileri Şekil 5.18'da, ek 12+8 (42-49) ölçek parametrelerinin fotoğraf koordinatlarına etkileri Şekil 5.19'da, ek 12+32 (42-73) ölçek, öteleme ve Ultracam ana görüntü perspektif hata parametrelerinin fotoğraf koordinatlarına etkileri Şekil 5.20'de gösterilmektedir. Bu şekillerde sırasıyla (a) 1:8.000 ölçekli fotoğrafları, (b) 1:20.000 ölçekli fotoğrafları ve (c) 1:8.000+1:20.000 ölçekli fotoğrafları ifade etmektedir.



Şekil 5.18 BLUH ek 12 parametrenin fotoğraf koordinatlarına etkileri



Şekil 5.19 BLUH ek 12+8 (42-49) ölçek parametrelerinin fotoğraf koordinatlarına etkileri



Şekil 5.20 BLUH ek 12+32 (42-73) parametrelerinin fotoğraf koordinatlarına etkileri

5.4.5 Birinci test alanı sonuçlarının değerlendirilmesi

Birinci test alanında yapılan uçuş ve çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçlar doğrultusunda blok dengeleme sonucunda elde edilen koordinat farklarının karesel ortalama hatalarının ölçeğe bağlı olarak yatay bileşende 2 cm ile 4 cm arasında, düşey bileşende ise 18 cm ile 61 cm arasında değiştiği gözlenmiştir (şekil 5.9). GPS/IMU değerleri ile yapılan doğrudan yöneltme sonucunda karesel ortalama hatalarının ölçeğe göre yatay bileşende X yönünde 7 cm ile 16 cm, Y yönünde 24 cm ile 33 cm arasında, düşey bileşende ise 18 cm ile 61 cm arasında değiştiği ve uçuş yüksekliği arttıkça özellikle düşey bileşende olmak üzere koordinat farklarının arttığı gözlenmiştir (şekil 5.10).

Birinci test alanında yapılan uçuş ve çalışmaların bir amacı da çeşitli ölçeklerde harita yapımı için gerçekleştirilecek uçuşlarda kullanılacak olan optimum resim ölçeklerinin veya başka bir deyişle yer örnekleme aralığının (Ground Sample Distance-GSD) belirlenmesidir. Bu kapsamda 1'nci bölgede yapılan uçuşlardaki her bir ölçek için stereo modeller oluşturulmuş, bu modeller detay seçilebilirliği, uçuş yüksekliği ve projedeki model sayısı açılarından değerlendirilerek revizyon uçuşlarının 1:60.000 ölçeğinde (43 cm yer örnekleme aralığında) yapılmasının uygun olacağı değerlendirilmiştir. Klasik kamera ve sayısal kamera arasındaki ölçek ve yer örnekleme aralığı ilişkisi Çizelge 5.5'de sunulmuştur.

Çizelge 5.5 Ölçek ve yer örnekleme aralığı ilişkisi

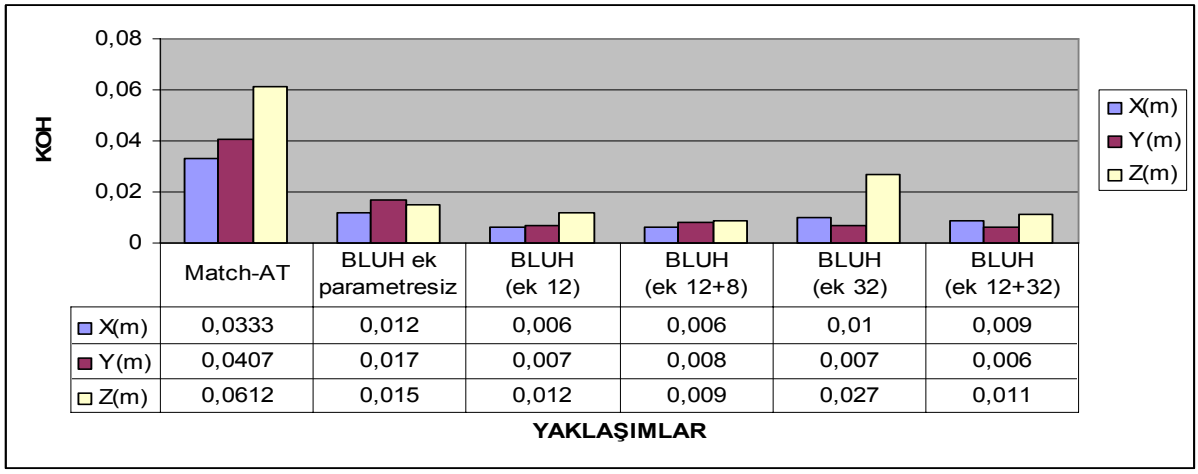
Harita Ölçeği	**Analog Fotoğraf Ölçeği**	**Tarama (mikron)**	**GSD (cm)**	**UltraCam$_X$ Piksel Boyutu (mikron)**	**Sayısal Kamera Ölçeği**
1:1.000	1:4.000	15	6	7.2	1:10.000
1:5.000	1:1.6000	15	25	7.2	1:35.000
1:25.000	1:35.000	15	50	7.2	1:70.000

Geometrik doğruluğun araştırması amacı ile yapılan çalışmalar sonucunda; 1:8.000, 1:20.000 ve 1:8.000+1:20.000 ölçekli fotoğraflar sadece 4 adet YKN kullanılarak farklı sayılarda ek parametreler kullanılarak BLUH yazılımı ile dengelenmiştir. Beklenildiği üzere ek parametresiz ve ek parametreli yaklaşımlar arasında belirgin bir fark görülmüştür. BLUH yazılımı ile yapılan dengelemelerde resim izdüşüm merkezi koordinatlarının dengelemeye sokulmadığı da dikkate alınarak, ek parametrelerin 1:8.000, 1:20.000 ve 1:8.000+1:20.000 ölçekli fotoğraflar üzerindeki etkileri incelendiğinde;

- Ek 12 parametrenin kullanılmasının çok etkili ve yeterli olduğu,
- İlk 12 parametreye ilave olarak diğer parametreleri dengelemeye ilave etmenin dengeleme sonucuna önemli bir katkı sağlamadığı ve benzer bir yapıda olduğu,

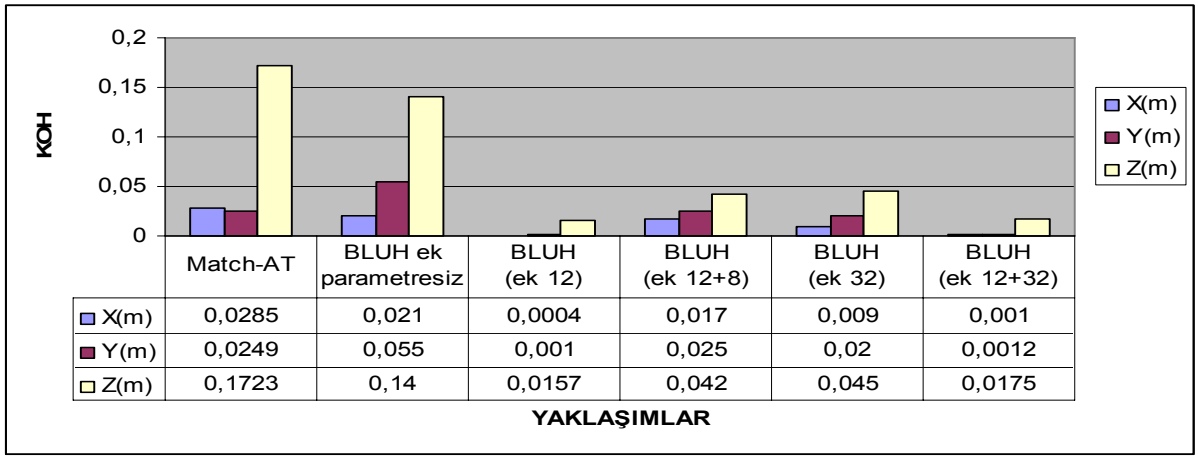
tespit edilmiştir.

Match-AT ve BLUH yazılımları kullanılarak farklı yaklaşımlarla blok dengelemeleri yapılan 1:8.000 ve 1:20.000 ölçekli projelerin dengeleme sonuçlarının karşılaştırması yapılmış ve ek parametrelerin dengelemeye etkisi 1:8.000 ölçekli proje için Şekil 5.21'de, 1:20.000 ölçekli projede için Şekil 5.22'de sunulmuştur. Şekil 5.20 ve Şekil 5.22 incelendiğinde, Match-AT yazılımı ile GPS/IMU sistemi tarafından hesaplanan görüntü izdüşüm merkezi koordinatları kullanılarak elde edilen dengeleme sonuçları, BLUH yazılımı ile ek parametreler kullanılarak resim izdüşüm merkezi koordinatları katılmadan yapılan dengeleme sonuçları ile karşılaştırıldığında BLUH yazılımının belirgin bir iyileşme getirdiği görülmektedir.



	Match-AT	BLUH ek parametresiz	BLUH (ek 12)	BLUH (ek 12+8)	BLUH (ek 32)	BLUH (ek 12+32)
X(m)	0,0333	0,012	0,006	0,006	0,01	0,009
Y(m)	0,0407	0,017	0,007	0,008	0,007	0,006
Z(m)	0,0612	0,015	0,012	0,009	0,027	0,011

Şekil 5.21 Ek parametrelerin dengelemeye etkisi (1:8.000)



	Match-AT	BLUH ek parametresiz	BLUH (ek 12)	BLUH (ek 12+8)	BLUH (ek 32)	BLUH (ek 12+32)
X(m)	0,0285	0,021	0,0004	0,017	0,009	0,001
Y(m)	0,0249	0,055	0,001	0,025	0,02	0,0012
Z(m)	0,1723	0,14	0,0157	0,042	0,045	0,0175

Şekil 5.22 Ek parametrelerin dengelemeye etkisi (1:20.000)

5.5 İkinci Test Alanında Yapılan Çalışmalar

GPS/IMU kullanılarak doğrudan yöneltmenin geometrik doğruluğunun belirlenmesi ve fotogrametrik nirengi işlemlerinde ne kadar katkı sağlayacağının tespit edilebilmesi için 1:60.000 ölçeğinde bir uçuş gerçekleştirilmiştir. Blok köşelerinde birer adet olmak üzere bölgeye homojen olarak dağılmış 20 adet YKN planlanmış ve tesisi sağlanmıştır.

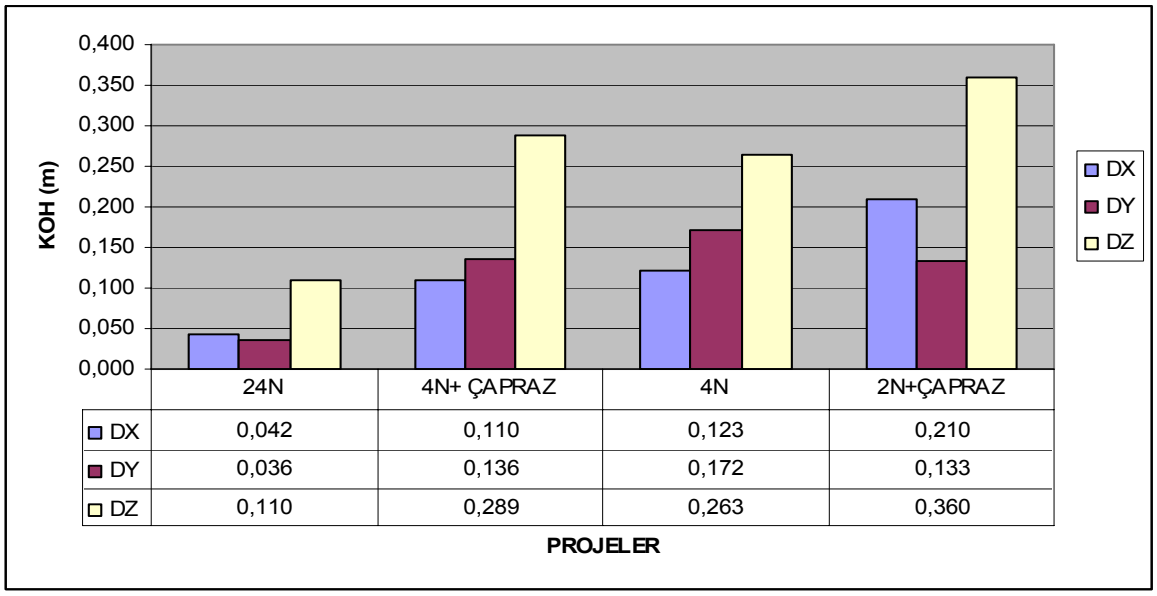
İkinci test alanı için blok dengeleme, boresight kalibrasyonu ve doğrudan yöneltme yapılmıştır. Geometrik doğruluk araştırması amacıyla, BLUH yazılımı ile ek parametreler kullanılarak farklı yaklaşımlarla yeni dengelemeler yapılmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Burada GPS veri işlem adımları diferansiyel ve hassas nokta konumlama (PPP) olarak gerçekleştirilmiş ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

5.5.1 Blok dengeleme

GPS/IMU entegrasyonu ile elde edilen ve boresight düzeltmeleri getirilen parametreler, blok dengelemede başlangıç değerleri olarak kullanılmıştır. GPS/IMU verileri ve blok köşelerindeki YKN'ları kullanılarak bağlama noktaları Inpho Match-AT yazılımı ile otomatik olarak elde edilmiştir. Nirengi sayısının ve çapraz kolonların dengeleme sonuçlarına etkisini araştırmak için 8 ayrı blok dengelemesi yapılmıştır (Çizelge 5.6). Ayrıca self kalibrasyonun sonuca etkisini görmek amacıyla kalibrasyonlu ve kalibrasyonsuz olarak bu işlem iki kez yapılmıştır. Dengeleme sırasında 20 adet YKN kontrol noktası (check point) olarak programa hesaplattırılmış ve jeodezik olarak belirlenmiş koordinatlar ile olan farkları alınmış, ortalama hataları ve KOH'ları hesaplanmıştır (Şekil 5.23 ve Şekil 5.24).

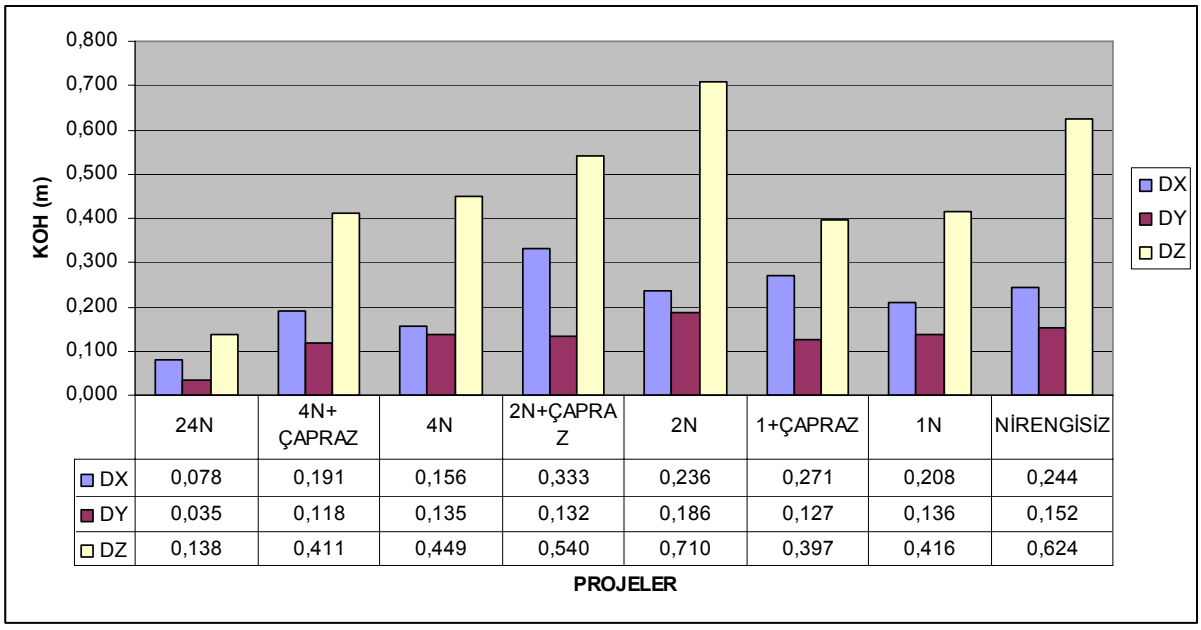
Çizelge 5.6 Match-AT blok dengeleme projeleri

PROJE	YKN	ÇAPRAZ KOLON
24 N	24 ADET	VAR
4 N+ÇAPRAZ	4 ADET	VAR
4 N	4	YOK
2 N+ÇAPRAZ	2	VAR
2 N	2	YOK
1 N+ÇAPRAZ	1	VAR
1 N	1	YOK
NİRENGİSİZ	-	VAR



	24N	4N+ ÇAPRAZ	4N	2N+ÇAPRAZ
DX	0,042	0,110	0,123	0,210
DY	0,036	0,136	0,172	0,133
DZ	0,110	0,289	0,263	0,360

Şekil 5.23 YKN sayısının ve çapraz kolonların yöneltmeye etkisi (Self Kalibrasyonlu)



	24N	4N+ ÇAPRAZ	4N	2N+ÇAPRAZ	2N	1+ÇAPRAZ	1N	NİRENGİSİZ
DX	0,078	0,191	0,156	0,333	0,236	0,271	0,208	0,244
DY	0,035	0,118	0,135	0,132	0,186	0,127	0,136	0,152
DZ	0,138	0,411	0,449	0,540	0,710	0,397	0,416	0,624

Şekil 5.24 YKN sayısının ve çapraz kolonların yöneltmeye etkisi (Self Kalibrasyonsuz)

5.5.2 Boresight kalibrasyonu

Birinci test alanında yapılan boresight kalibrasyonunun kontrolü ve güvenilirliğinin tespiti için proje alanında küçük bir bölgede 4 adet YKN'nı kapsayacak bir alanda boresight parametreleri yeniden belirlenmiştir. Boresight kalibrasyonu, 4 adet YKN ile dengeleme sonucunda elde edilen dış yöneltme parametreleri ve GPS/IMU entegrasyonu ile elde edilen

(doğrudan yöneltme sonucunda) parametreler kullanılarak yapılmıştır. Elde edilen boresight parametreleri Çizelge 5.7'de sunulmuştur. Daha sonra bu sonuçlar kullanılarak elde edilen düzeltilmiş değerler ile stereo modeller oluşturulmuş ve kontrol için inşa edilmiş 20 adet YKN'nın koordinatları okunmuş, jeodezik olarak belirlenmiş koordinatlar ile olan farkları, ortalama hataları ve KOH'ları hesaplanmıştır.

Çizelge 5.7 Boresight kalibrasyon sonuçları

AEROOFFICE BORESIGHT SONUÇLARI						
ÖLÇEK	**ROLL (derece)**	**PITCH (derece)**	**YAW (derece)**	**YUKARI DEĞER (m)**	**SAĞA DEĞER (m)**	**YÜKSEKLİK (m)**
1:60.000	0.3874	-0.0352	-0.1155	-0.03	-0.014	-1.329

5.5.3 Doğrudan yöneltme (Direct Georeferencing)

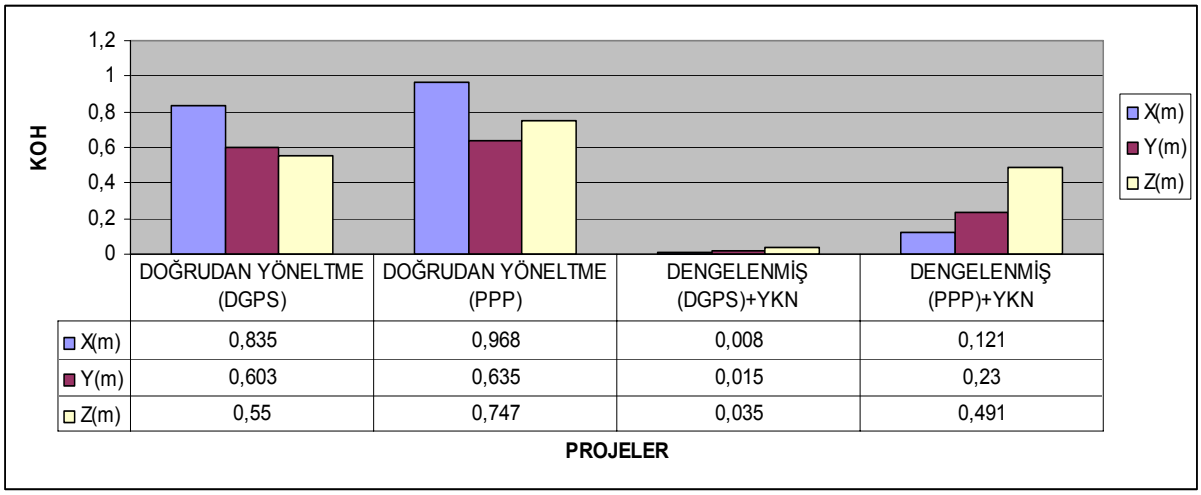
Doğrudan yöneltme için uçuş esnasında yerde ve uçakta GPS ölçümü yapılmıştır. Uçaktan alınan GPS/IMU ve yerde ölçülen GPS verileri ile önce GrafNav yazılımı kullanılarak GPS işlemleri (post proses) yapılmış, daha sonra AeroOffice yazılımı yardımıyla GPS/IMU ölçülerinin birleştirilmesi (entegrasyonu) gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara ikinci test alanında elde edilen boresight düzeltmeleri getirilerek dış yöneltme parametreleri hesaplanmıştır. Daha sonra bu parametreler ile stereo modeller oluşturulmuş ve kontrol için inşa edilmiş 20 adet YKN'na ait koordinatlar stereo modellerden ölçülmüş, jeodezik olarak belirlenmiş koordinatlar ile olan farkları alınmış, ortalama hataları ve KOH'ları hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 5.25'de sunulmuştur.

5.5.4 GPS verilerinin PPP ile çözümü

Bilindiği üzere dış yöneltme parametrelerinden resim orta noktası (X_0, Y_0, Z_0), kinematik GPS yöntemiyle çözülmektedir. Kinematik GPS ile çözüm, yerde kurulan bir sabit GPS ile uçakta bulunan GPS'in kinematik diferensiyel çözümü ile gerçekleştirilmektedir. Burada aynı anda iki GPS ölçümü ile uydu yörünge ve saat hatalarının giderilmesi amaçlanır. Yerde ölçü yapan GPS, ölçü esnasında uyduların yayınladığı efemeris dosyasını otomatik olarak indirmektedir. Diferensiyel çözüm de sabit GPS, uçakta bulunan GPS verileri ve efemeris dosyası kullanılarak baz çözümü yapılmaktadır. Bu çözüme alternatif olarak Hassas Nokta

Konumlandırması (Precise Point Positioning) da yapılabilmektedir. Bu çözümde konsept daha sonra yayınlanan hassas efemeris verisi kullanılarak resim orta noktalarına ait koordinatların çözülmesidir. Hassas efemeris dosyasında düzeltilmiş uydu koordinatları ve uydu saat hataları yayınlanmaktadır. Böylece teorik olarak oldukça hassas sonuçlar elde edilebilmektedir. PPP çözümünün avantajı, uçuş esnasında yerde GPS ölçüsüne ihtiyaç olmamasıdır.

Bu kapsamda projeye ait uçak GPS verileri ve hassas efemeris verileri kullanılarak PPP çözümü yapılmıştır. Elde edilen GPS verileri ile GPS/IMU entegrasyonu yapılmış ve boresight düzeltmeleri getirilmiştir. Elde edilen veriler için hem blok dengeleme hem de doğrudan yöneltme yapılmış ve ikisi için de stereo modeller oluşturulmuş ve kontrol için inşa edilmiş 20 adet YKN'na modellerde yanaşılarak koordinatlar okunmuş, jeodezik olarak belirlenmiş koordinatlar ile olan farkları, ortalama hataları ve KOH'ları hesaplanmıştır. Doğrudan yöneltme ve blok dengeleme ile ölçülen koordinat farklarının karesel ortalama hataları karşılaştırması Şekil 5.25' de sunulmuştur.

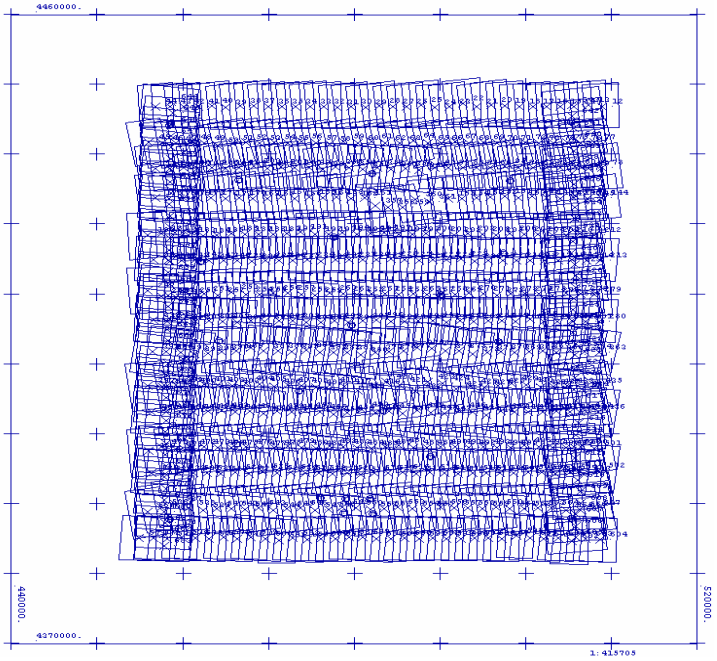


	DOĞRUDAN YÖNELTME (DGPS)	DOĞRUDAN YÖNELTME (PPP)	DENGELENMİŞ (DGPS)+YKN	DENGELENMİŞ (PPP)+YKN
X(m)	0,835	0,968	0,008	0,121
Y(m)	0,603	0,635	0,015	0,23
Z(m)	0,55	0,747	0,035	0,491

Şekil 5.25 Doğrudan yöneltme ve blok dengelemelerin karşılaştırması

5.5.5 Geometrik doğruluğun araştırılması

Geometrik doğruluğun araştırılması kapsamında kullanılan yazılım, kullanılan yaklaşımlar, ek parametrelerin listesi ve ek parametre formülleri birinci test alanında yapılan geometrik doğruluk araştırılmasında Bölüm 5.4.4'de sunulmuştur. Aynı çalışmalar ikinci test alanında da uygulanmıştır. Dengelemeler 1:60.000 ölçekli fotoğraflar (Şekil 5.26) kullanılarak ve belirtilen yaklaşımlar bu proje grubuna da uygulanarak yapılmıştır.

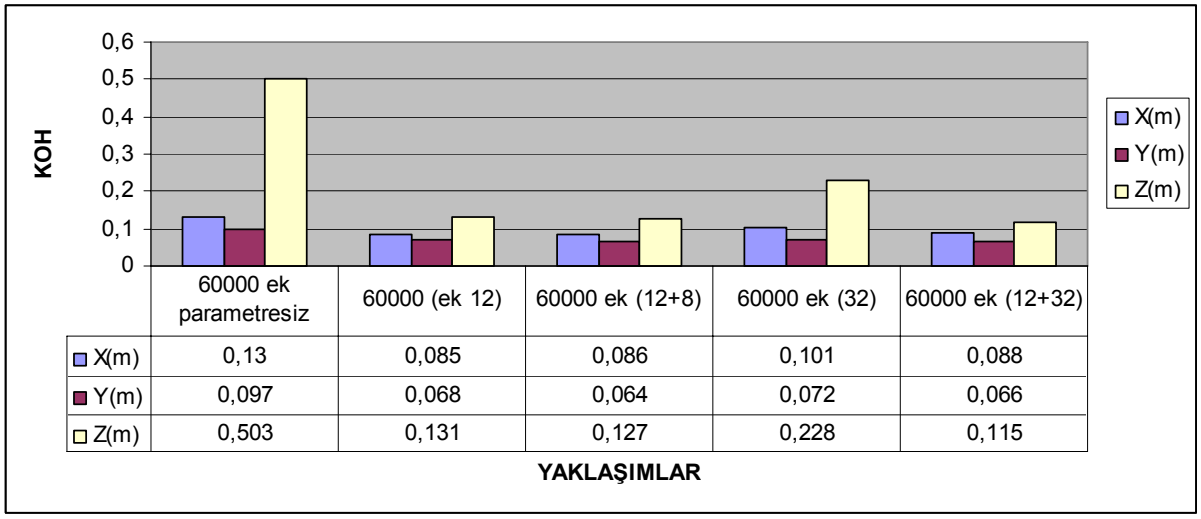


Şekil 5.26 1:60.000 ölçekli fotoğraflar (575 fotoğraf)

1:60.000 ölçekli hava fotoğrafları kullanılarak yapılan dengeleme, yer kontrol noktalarının tümü (24 adet) kullanılarak yapılmıştır. Söz konusu parametreler kullanılarak yapılan farklı yaklaşımlardaki fotogrametrik blok dengelemelerine ait sonuçlar Çizelge 5.8'de, sonuçlara ait grafik ise Şekil 5.27'de sunulmuştur. Dengelemelere ilişkin çizelge 5.8'de kullanılan kısaltmalar Bölüm 5.4.4'de açıklanmıştır.

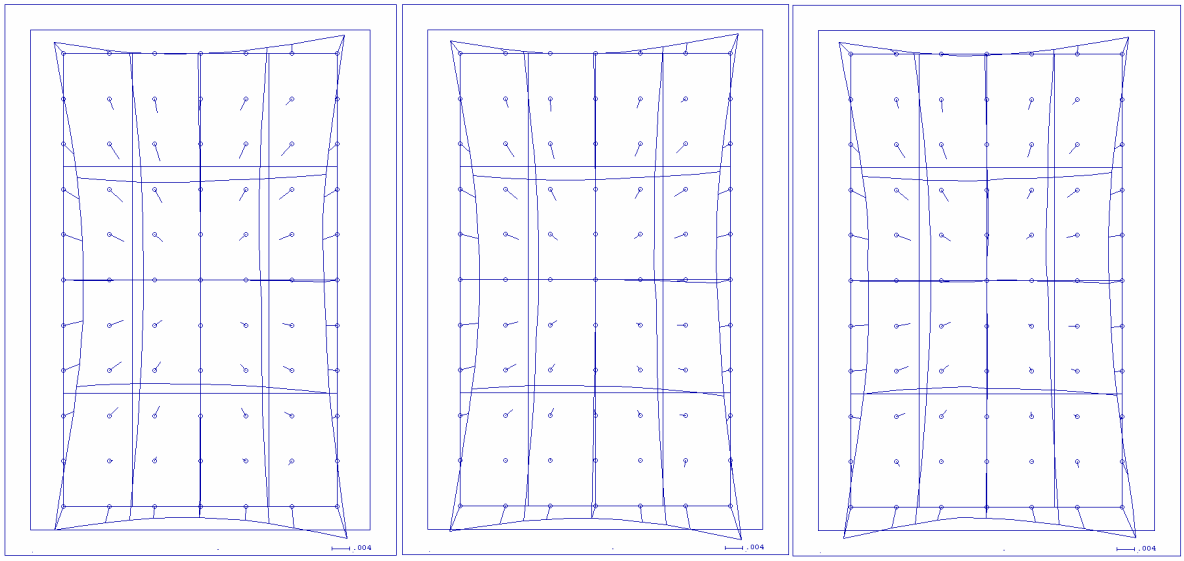
Çizelge 5.8 Blok dengeleme sonuçları

Yaklaşım	Kontrol/Karşılaştırma Noktası	σ_0 (μm)	X(m)	Y(m)	Z(m)
60000 BD	24	1.10	0.130	0.097	0.503
60000 BD ek 12	24	0.75	0.085	0.068	0.131
60000 BD ek 12+8	24	0.73	0.086	0.064	0.127
60000 BD ek 32	24	0.86	0.101	0.072	0.228
60000 BD ek 12+32	24	0.72	0.088	0.066	0.115



Şekil 5.27 1:60.000 ölçekli projede uygulanan yaklaşımlar ve KOH'lar

Yapılan dengelemeler sonucunda ek parametrelerin fotoğraf koordinatlarına etkileri belirlenmiştir. Ek 12 parametrenin fotoğraf koordinatlarına etkileri Şekil 5.28 (a)'da, ek 12+8 (42-49) ölçek parametrelerinin fotoğraf koordinatlarına etkileri Şekil 5.28 (b)'de, ek 12+32 (42-73) ölçek, öteleme ve Ultracam ana görüntü perspektif hata parametrelerinin fotoğraf koordinatlarına etkileri Şekil 5.28 (c)'de sunulmuştur.



a **b** **c**

Şekil 5.28 BLUH ek parametrelerinin fotoğraf koordinatlarına etkileri

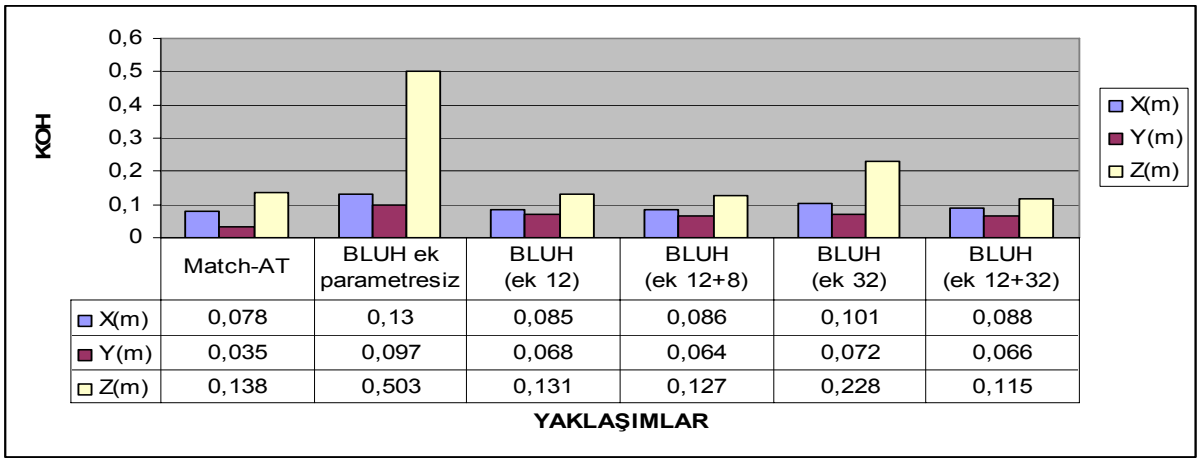
5.5.6 İkinci test alanı sonuçlarının değerlendirilmesi

İkinci test uçuşu için yeniden hesaplanan boresight değerleri kullanıldığında doğrudan yöneltme karesel ortalama hatasının yatayda X yönünde 84 cm, Y yönünde 60 cm, düşeyde ise 55 cm olduğu gözlenmiştir (Şekil 5.25). Bunun yanı sıra PPP çözümü ile yapılan doğrudan yöneltme oldukça hassas sonuçlar verdiği, koordinat farklarının karesel ortalama hatalarının yatayda X yönünde 97 cm, Y yönünde 64 cm, düşeyde ise 75 cm olduğu gözlenmiştir (Şekil 5.25).

Geometrik doğruluğun araştırması amacı ile yapılan çalışmalar sonucunda; 1:60.000 ölçekli fotoğraflar 24 adet YKN kullanılarak ve farklı sayılarda ek parametreler kullanılarak BLUH yazılımı ile dengelenmiştir. İlk test alanındaki sonuçlara benzer şekilde ek parametresiz ve ek parametreli yaklaşımlar arasında belirgin bir fark görülmüştür. BLUH ve Match-AT yazılımı ile elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında BLUH yazılımının Match-AT yazılımına benzer sonuçlar elde ettiği görülmüştür.

BLUH ek parametrelerinin ikinci test alanı dengelemelerine etkileri incelendiğinde; standart 12 parametrenin kullanılmasının çok etkili ve yeterli olduğu, bu kapsamda koordinat farklarının karesel ortalama hatalarının yatayda X yönünde 9 cm, Y yönünde 7 cm, düşeyde ise 13 cm olduğu gözlenmiştir (Şekil 5.27). standart 12 parametreye ilave olarak diğer parametreleri dengelemeye ilave etmenin dengeleme sonuçlarında benzer bir yapı arz ettiği değerlendirilmektedir.

Match-AT ve BLUH yazılımları kullanılarak farklı yaklaşımlarla blok dengelemesi yapılan 1:60.000 ölçekli projenin blok dengeleme sonuçlarının karşılaştırması yapılmış ve ek parametrelerin dengelemeye etkisi Şekil 5.29'da sunulmuştur.



	Match-AT	BLUH ek parametresiz	BLUH (ek 12)	BLUH (ek 12+8)	BLUH (ek 32)	BLUH (ek 12+32)
X(m)	0,078	0,13	0,085	0,086	0,101	0,088
Y(m)	0,035	0,097	0,068	0,064	0,072	0,066
Z(m)	0,138	0,503	0,131	0,127	0,228	0,115

Şekil 5.29 Ek parametrelerin dengelemeye etkisi (1:60.000)

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma ile, Ultracam$_X$ sayısal fotogrametrik hava kamerasının teknik özellikleri detaylı bir şekilde incelenmiş ve geometrik doğruluk potansiyeli araştırılmıştır.

Farklı iki test alanına ait farklı ölçekteki görüntüler kullanılarak, Match-AT yazılımı ile blok dengeleme, boresight kalibrasyonu, doğrudan yöneltme ve BLUH yazılımı ile farklı yaklaşımlarla ek parametreler ilave ederek blok dengelemeler yapılmış ve elde edilen sonuçlar incelenmiştir.

Boresight kalibrasyonu yapılan projede doğrudan yöneltme sonuçları oldukça hassas iken, farklı projelerde kullanıldığında etkili olmadığı, bu yüzden revizyon amaçlı projelerde doğrudan yöneltmenin uygun olmayacağı ancak ortofoto üretimi için yapılacak uçuşlarda doğrudan yöneltmenin kullanılabileceği değerlendirilmektedir.

İkinci test alanı için yapılan self-kalibrasyonlu ve self-kalibrasyonsuz dengeleme sonuçları incelendiğinde, self kalibrasyonunun konum doğruluğunu arttırdığı değerlendirilmektedir (Şekil 5.23 ve Şekil 5.24). Bunun yanı sıra PPP çözümü ile yapılan doğrudan yöneltmenin etkili sonuçlar verdiği, 1:60.000 ölçekli ikinci test alanında koordinat farklarının karesel ortalama hatalarının yatayda X yönünde 97 cm, Y yönünde 64 cm, düşeyde ise 75 cm'ye düştüğü gözlenmiştir (Şekil 5.25).

BLUH yazılımı ile ek parametresiz ve ek parametreli olarak yapılan blok dengelemeler arasında belirgin bir fark görülmüştür. BLUH ek parametrelerinin blok dengelemelerine etkileri incelendiğinde; standart 12 parametrenin kullanılmasının çok etkili ve yeterli olduğu, standart 12 parametreye ilave olarak diğer parametreleri dengelemeye ilave etmenin dengeleme sonucuna önemli bir katkı sağlamadığı ve ek parametreli yaklaşımların benzer bir yapı arz ettiği değerlendirilmektedir. Örneğin, ek parametresiz dengeleme sonucunda koordinat farklarının karesel ortalama hatasının yatayda X yönünde 1,2 cm, Y yönünde 1,7 cm, düşeyde ise 1,5 cm olduğu 1:8.000 ölçekli projede ek 12 parametre ilave edilerek yapılan blok dengeleme sonucunda koordinat farklarının karesel ortalama hatasının yatayda X yönünde 0,6 cm, Y yönünde 0,7 cm, düşeyde ise 1,2 cm'ye düştüğü gözlenmiştir (Şekil 5.15).

Match-AT yazılımı ile, GPS/IMU sistemi tarafından hesaplanan resim izdüşüm merkezi koordinatları kullanılarak elde edilen dengeleme sonuçları, BLUH yazılımı ile resim izdüşüm merkezi koordinatları kullanılmadan, ek parametresiz ve ek parametreli olarak yapılan dengeleme sonuçları ile karşılaştırıldığında BLUH yazılımının ek parametresiz dengelemelere dahil belirgin bir iyileşme getirdiği değerlendirilmektedir. Örneğin, Match-AT yazılımı ile

yapılan blok dengeleme sonucunda koordinat farklarının karesel ortalama hatasının yatayda X yönünde 3,3 cm, Y yönünde 4 cm, düşeyde ise 6,1 cm olduğu 1:8.000 ölçekli projede BLUH yazılımı ile ek parametre ilave etmeden yapılan blok dengeleme sonucunda koordinat farklarının karesel ortalama hatasının yatayda X yönünde 1,2 cm, Y yönünde 1,7 cm, düşeyde ise 1,5 cm'ye düştüğü gözlenmiştir (Şekil 5.21).

1:8.000, 1:20.000, 1:8.000+1.20.000 ve 1:60.000 olmak üzere her iki test alanında, toplamda dört farklı projede BLUH yazılımı ile ek parametreler kullanılarak, ek parametrelerin fotoğraf koordinatlarına etkileri (standart 12), (ek 12+8) ve (ek 12+32) yaklaşımları ile test edilmiş ve benzer şekilde etki ettikleri gözlenmiştir (Şekil 5.18, Şekil 5.19, Şekil 5.20 ve Şekil 5.28).

BLUH yazılımı ile yapılan dengelemeler sonucunda σ_0 (μm) 'lar hesaplanmış ve en yüksek değerin 1,10 olduğu, diğer değerlerin 1'den küçük olduğu gözlenmiştir (Çizelge 5.4 ve Çizelge 5.8). Varyans değerlerinin bu şekilde olması kameranın geometrik doğruluğunun kalitesini göstermektedir.

Sayısal kameraların sağladığı en temel üstünlük, film ihtiyacını, foto-laboratuar çalışmalarını ve hassas fotoğraf tarama işlemlerini ortadan kaldırmasıdır. Bu sayede, foto-laboratuar ve tarama işlemleri sonucu ortaya çıkabilecek görüntü kalitesindeki azalma ve geometrik bozulmalar önlenmekte, zaman ve maliyet açısından tasarruf sağlanmaktadır. Sayısal kameralarda birden fazla kamera objektifinin ve çoklu algılayıcının aynı anda alım yapması nedeniyle uçuş sonrasında pankromatik, renkli ve kızıl ötesi görüntüler aynı anda elde edilebilmekte ve aynı proje için birden fazla uçuş yapma sorunu ortadan kalkmaktadır.

Fotogrametrik değerlendirme sırasında aynı bölgeye ait değişik bantlardaki görüntülerin dönüşümlü olarak kullanılması, görülemeyen detayların diğer görüntü bantlarında görülmesini mümkün kılmakta ve detay teşhisi açısından avantaj sağlamaktadır.

Sayısal kameranın sağladığı diğer bir üstünlük ise daha önce operatörler tarafından yapılan iç yöneltme işlemini ortadan kaldırmasıdır. Bu üstünlük ile iç yöneltmede operatör tarafından ölçüm esnasında yapılan hatalar önlenmiş olmakta ve bu durum operatöre zaman, yapılan projeye ise hassasiyet kazandırmaktadır.

Sayısal hava kameraları ile elde edilen görüntülerin geometrik doğruluğunun, radyometrisinin ve dolayısıyla detay teşhis edilebilirliğinin üstün olması, fotogrametrik değerlendirme esnasında daha fazla detayın daha doğru olarak teşhis edilmesini olanaklı kılmakta ve toplanan detayların nitelik ve niceliğine olumlu katkılar sağlamaktadır.

KAYNAKLAR

Cramer, M. (2003). EuroSDR Project Digital Camera Calibration, 103rd EuroSDR Science and Steering Committee Meetings, München, Germany, October 2003.

Cramer, M. (2004). EuroSDR Network on Digital Camera Calibration, Report Phase 1, Special Session at ISPRS Congress, İstanbul, Türkiye, July, 2004.

Eckardt, A., Braunecker, B., Sandau, R. 2000. Performance of the Imaging System in the LH Systems ADS40 Airborne Digital Sensor, IAPRS, Vol. XXXIII, Working Group I/3, Amsterdam, (2000)

Fricker, P., Sandau, R., Walker, A.S. (1999). Digital photogrammetric cameras: possibilities and problems, Photogrammetric Week 1999, (Fritsch, D., R. Spiller, Eds.), Wichmann Verlag, pp. 71-82.

Gruber, M., Perko, P., Ponticelli, M. (2004). The All Digital Photogrammetric Workflow: Redundancy And Robustness, Commission I, W/G I/6, ISPRS Congress, İstanbul, Türkiye, July, 2004.

Gruner, H. (1977). Photogrammetry: 1776-1976, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, pp. 569-574.

Gürbüz, H., 1997, Genel Fotogrametri, Cilt I, Harita Yüksek Teknik Okulu, Harita Genel Komutanlığı, Ankara

Gürbüz, H., (2006), Genel Fotogrametri I, Harita Yüksek Teknik Okulu, Harita Genel Komutanlığı, Ankara

Hinz, A., (1999). The Z/I Imaging Digital Aerial Camera System, Photogrammetric Week ´99, Eds D. Fritsch/R.Spiller, Wichmann Verlag, Heidelberg, pp.109-115.

Hinz, A., Dörstel, C., Heier, H. (2001). DMC-The Digital Sensor Technology of Z/I Imaging, Photogrammetric Week ´01 Herbert Wichmann Verlag, Hüthig GmbH, Heidelberg, Germany, pp.93 - 103.

Hinsken, L., Miller, S., Tempelmann, U., Uebbing, R., Walker, S. (2002). Triangulation of LH Systems' ADS40 Imagery Using Orima GPS/IMU, ISPRS Commission III, Symposium, September, 2002, Graz, Austria

Honkavaara, E. (2008). Calibrating Digital Photogrammetric Airborne Imaging Systems Using A Test Field, Doctorate Thesis, University of Technology, Espoo, Finland, 2008.

Hoban, R.J. (2004). Digital Aerial Camera Technologies, Georgia URISA Conference September 24, 2004.

Hoffman, O., (2005), Calibration and Georeferencing of Dig,tal Aerial Cameras, Photogrammetric Week 2005.

Jacobsen, K. (2005). Photogrammetry and Geoinformation Trends for Large Scale Mapping, 1st Middle East Conference on Geospatial Information, Technology and Applications 'Map Middle East', Dubai.

Kremer, J., Gruber, M. (2004). Operation of the UltraCamD together with CCNS4/AEROCONTROL – First Experiences and Results, ISPRS Congress, Commission I, WG I/5, İstanbul, Türkiye, 2004.

Leberl, F., Gruber, M., Ponticelli, M., Bernoegge, S., Perko, R. (2003). The UltraCam Large Format Aerial Digital Camera System, Proceedings of the American Society For Photogrammetry & Remote Sensing, 5-9 May, 2003, Anchorage, Alaska

Leberl, F. ve Gruber, M. (2005). ULTRACAM-D: Understanding some Noteworthy Capabilities. Proceedings of the Photogrammetric Week 2005, Dieter Fritsch, Ed., Wichmann Verlag, Heidelberg, 2003, pp. 57-68.

Lemmens, M. (2008). Digital Aerial Cameras: System Configurations and Sensor Architectures. Professional Surveyor Magazine, v. 28, no. 5, p. 66-72.

Luhman, T., (2004). A Historical Review on Panorama Photogrammetry. Proceedings of 1st Panoramic Photogrammetry Workshop. International archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXIV, Part 5/W16.

Madani, M., Dörstel, C., Heipke, C., Jacobsen, K. (2004). DMC Practical Experience and Accuracy Assessment, ISPRS Congress, İstanbul 2004.

Neumann, K.J. (2004). Operational Aspects of Digital Aerial Mapping Cameras, Commision I, WG I/6, Proceedings of XXth ISPRS Congress, Istanbul, 2004, pp.222

Önder, M. (2002). Geçmişten Günümüze Resimlerle Türk Haritacılık Tarihi, Harita Genel Komutanlığı, Ankara, sayfa 272-288.

Perko, R., Gruber, M. (2002). Comparison of Quality and Information Content of Digital and Film-Based Images, ISPRS Commission III, Symposium 2002, September 9 - 13, Graz, Austria, 2002.

Reulke, R., Tempelmann, U., Stallmann, D., Cramer, M., Hala, N. (2003). Film-based and Digital Sensors – Augmentation or Change in Paradigm?, Photogrammetric Week ´03, Eds: D. Fritsch/R.Spiller, Wichmann Verlag, Heidelberg, pp. 41-52.

Tempelmann, U., Börner, A., Chaplin, B., Hinsken, L., Mykhalevych, B., Miller, S., Recke, U., Reulke, R., Uebbing, R. (2000). Photogrammetric Software for the LH Systems ADS40 Airborne Digital Sensor, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, pp.552-559

Yastıklı, N., (2003), GPS/IMU Verileri Kullanılarak Hava Fotoğraflarının Doğrudan Yöneltilmesi ve Birleştirilmiş Blok Dengeleme Olanakları, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Yıldız, İstanbul.

Yaşayan, A. (1997), Fotogrametri II Ders Notları, Yıldız Teknik Üniversitesi, Yıldız, İstanbul.

Zakiewicz, T. (2008). Mapping South Africa, with a Digital Aerial Camera, From the Perspective of the National Mapping Agency, Map Africa 2008, Cape Town, South Africa.

Zeitler, W., Dörstel, C., Jacobsen K. (2002). Geometric Calibration of the DMC: Method and Results, IAPRS, Vol. XXXIV, Part 1, Denver, Colorado.

Microsoft/Vexcel UltracamX Brochures

Z/I Imaging Digital Mapping Camera System Brochures

Leica Geosystems ADS40 Brochures

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	02.09.1981	
Doğum yeri	Bayburt	
Lise	1995-1999	Kuleli Askeri Lisesi
Lisans	1999-2003	Kara Harp Okulu Sistem Mühendisliği Bölümü
	2003-2005	Harita Yüksek Teknik Okulu Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü

Çalıştığı kurum(lar)

2003-Devam ediyor Harita Genel Komutanlığı