



FINAL ASSIGNMENT - RG 141536

ANALISA KALIBRASI KAMERA NON-METRIK PADA WAHANA TANPA AWAK (DRONE) JENIS MULTICOPTER RTF

**MOHAMMAD AVICENNA
NRP 0331134000087**

**Dosen Pembimbing
Agung Budi Cahyono, S.T., M.Sc., DEA
Husnul Hidayat, S.T., M.T**

**Departemen Teknik Geomatika
Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018**

“Halaman ini sengaja di kosongkan”



FINAL ASSIGNMENT - RG 141536

**CALIBRATION ANALYSIS OF NON-METRIC
CAMERA ON MULTICOPTER RTF TYPE
UNMANNED AERIAL VEHICLE (DRONE)**

**MOHAMMAD AVICENNA
NRP 0331134000087**

**Supervisor
Agung Budi Cahyono, S.T., M.Sc., DEA
Husnul Hidayat, S.T., M.T**

**Geomatics Engineering Department
Faculty of Civil Engineering, Environmental and Earth Science
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018**

“Halaman ini sengaja di kosongkan”

ANALISA KALIBRASI KAMERA NON-METRIK PADA WAHANA TANPA AWAK (DRONE) JENIS MULTICOPTER RTF

Nama Mahasiswa : Mohammad Avicenna
NRP : 0331134000087
Jurusan : Teknik Geomatika
Dosen Pembimbing : Agung Budi Cahyono, S.T, M.Sc, DEA
Husnul Hidayat, S.T, M.T

ABSTRAK

Berkembangnya teknologi Rapid Mapping dengan menggunakan wahana tanpa awak (UAV) seperti drone menjadi pilihan utama. UAV memiliki kelemahan pada sistem kamera, karena pada UAV kamera yang digunakan merupakan kamera non-metrik, oleh karena itu kegunaan UAV untuk rapid mapping hanya untuk foto udara format kecil (FUFK). Sifat dari kamera non-metrik yang tidak stabil berpengaruh terhadap geometri interinsik dan eksterinsik parameter kamera. Geometrik parameter interinsik dan eksterinsik kamera dapat diminimalisir dengan metode kalibrasi. Metode kalibrasi tersebut dilakukan dengan 2 cara yaitu, kalibrasi In-Field dan kalibrasi In-Flight.

Pada penelitian ini dilakukan analisa kalibrasi In-Field menggunakan marker dengan 12 orientasi pengambilan foto pada saat posisi kamera stabil dan tidak dalam keadaan terbang. Data yang dihasilkan berupa 7 parameter IOP (Interior Orientation Parameter) dengan hasil RMS 0,48 pixel. Hasil parameter dari kalibrasi In-Field ini akan digunakan pada kalibrasi In-Flight sebagai perbandingan nilai IOP dengan menggunakan software Australis[®], setelah itu dilakukan analisa titik sampling foto udara dengan pengukuran terestris menggunakan Total Station. Data yang dihasilkan berupa 13 parameter IOP (Interior

Orientation Parameter) dan EOP (Exterior Orientation Parameter) sehingga didapat RMS 0,56 pixel. Kedua metode kalibrasi kamera tersebut diolah dengan menggunakan menggunakan bundle adjustment self-calibration.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa kamera non-metrik Sony Exmor tidak stabil karena parameter EOP (Exterior Orientation Parameter) penentu posisi (X_c , Y_c dan Z_c) memiliki selisih besar antar station foto dan terjadinya perubahan distorsi kamera yang besar sehingga dihasilkan jarak radial 0,503 m. Namun menurut perka BIG No.15 tahun 2014, RMS yang dihasilkan kamera Sony Exmor sebesar 0,104 m dapat digunakan untuk melakukan pemetaan dengan skala besar 1:1000 pada area yang relatif kecil.

Kata Kunci: Kalibrasi In-Flight, Kalibrasi In-Field, Interior Orientation Parameter, Exterior Orientation Parameter

CALIBRATION ANALYSIS OF NON-METRIC CAMERA ON MULTICOPTER RTF TYPE UNMANNED AERIAL VEHICLE (DRONE) RTF

Name : Mohammad Avicenna
Registration Number : 0331134000087
Department : Geomatics Engineering
Supervisor : Agung Budi Cahyono, S.T, M.Sc, DEA
Husnul Hidayat, S.T, M.T

ABSTRACT

The development of Rapid Mapping technology Unmanned Aerial Vehicle (UAV) such as drones is the main choice nowadays. UAV has a weakness in the camera system, because the camera used in UAV is a non-metric camera, therefore the use of UAV for rapid mapping only for Small Format Aerial Photography (SFAP). Unstable non-metric cameras affect the geometry of intrinsic and extrinsic camera parameters. Geometric parameters of interinsic and exterinsic cameras can be minimized by calibration method. The calibration method is done in two ways, In-Field calibration and In-Flight calibration.

The In-Field calibration analysis uses marker with 12 phototaking orientation when the camera position is stable and not inflight state. The resulting data is 7 parameters IOP (Interior Orientation Parameter) with RMS 0.48 pixel result.. The results of the In-Field calibration parameters will be used in In-Flight calibration as a comparison of IOP values using Australis® software, after which an analysis of the sampling point of aerial photograph with terrestris measurement using Total Station is used. The resulting data is 13 IOP (Interior Orientation Parameter) and EOP (Exterior Orientation Parameter) parameters to obtain 0.56 pixels

RMS. Both camera calibration methods are processed using bundle adjustment self-calibration.

The results show that Sony Exmor non-metric camera is unstable because the parameters of EOP (X_c , Y_c and Z_c) have big difference between photo station and distortion change of large cameras resulting in radial distance 0.503 m. However, according to Perka BIG No.15 year 2014, 0.104 meters RMS produced by Sony Exmor camera can be used to perform a 1: 1000 large scale mapping on a relatively small area.

Keywords: In-Flight Calibration, In-Field Calibration, Interior Orientation Parameter, Exterior Orientation Parameter

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISA KAMERA NON-METRIK PADA WAHANA TANPA AWAK (DRONE) JENIS MULTICOPTER RTF

TUGAS AKHIR

Ditujukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Teknik Geomatika
Fakultas Teknik Sipil Lingkungan dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

MOHAMMAD AVICENNA

NRP 0331134000087

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir:

Agung Budi Cahyono, S.T., M.Sc., DEA

NIP. 19690520 199903 1 002

()

Husnul Hidayat, S.T., M.T

NIP. 19900807 201504 1 001

()

SURABAYA, JANUARI 2018



“Halaman ini sengaja di kosongkan”

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur saya sampaikan kehadirat Allah SWT atas segala limpahan rahmat, taufiq dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian untuk tugas akhirnya yang berjudul **“ANALISA KALIBRASI KAMERA NON-METRIK PADA WAHANA TANPA AWAK (DRONE) JENIS MULTICOPTER RTF”** dengan lancar.

Selama pelaksanaan penelitian untuk tugas akhir penulis ini, banyak pihak yang telah memberikan bantuan dan dukungan kepada penulis. Untuk itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Kedua orang penulis, Bapak Mohammad Naseh dan Ibu Nani Suprihatin yang selalu memberikan doa dan dukungannya untuk kelancaran penelitian ini.
2. Keluarga penulis, Mohammad Taufan, Izha Hafiza , Afrena Rahmawati, Nenek, Om, Tante, Pakde, dan lain-lain
3. Bapak Mokhammad Nur Cahyadi, ST., M.Sc., Ph.D., selaku Ketua Jurusan Teknik Geomatika ITS.
4. Bapak Agung Budi Cahyono, S.T., M.Sc., DEA. dan Husnul Hidayat, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing penulis dan dosen wali penulis. Terima kasih atas kesempatan, kesabaran serta dukungan dalam bimbingan hingga dapat terselesaikannya tugas akhir ini.
5. Teman-teman Jurusan Teknik Geomatika ITS, khususnya angkatan 2013 atas dukungan dan semangat yang telah diberikan.
6. Teman-teman yang membantu proses pengukuran untuk pengambilan data penelitian (Alif Fariq Setiawan, Aryan Prasetyo Adji, Rega Hangasta, Ilyas Kalyubi serta kindi Nurhakim)
7. Pihak-pihak yang tidak bisa disebutkan satu persatu, yang telah membantu penulis.

Kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan oleh penulis untuk penyempurnaan penelitian ini. Semoga laporan ini

dapat bermanfaat untuk semua pihak, khususnya untuk mahasiswa Jurusan Teknik Geomatika Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 3 Januari 2018

Penulis

DAFTAR ISI

ABSTRAK.....	v
ABSTRACT.....	vii
LEMBAR PENGESAHAN	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xv
DAFTAR TABEL.....	xvii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xix
DAFTAR PERSAMAAN	xxi
BAB I.....	1
PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang Masalah	1
1.2. Perumusan Masalah.....	2
1.3. Batasan Masalah.....	3
1.4. Tujuan Tugas Akhir.....	3
1.5. Manfaat Penelitian.....	3
BAB II.....	5
TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Fotogrametri	5
2.2 Sistem Koordinat dalam Fotogrametri	6
2.3 Kamera	8
2.4 <i>Unmanned Aerial Vehicle</i> (UAV)	13
2.5 Kalibrasi Kamera.....	13
2.6 Orientasi Kamera.....	18
2.7 Marker	27
2.8 Ground Control Point (GCP).....	28
2.9 <i>Bundle adjustment</i>	28
2.10 Penelitian Terdahulu	32
BAB III	35
METODOLOGI PENELITIAN.....	35
3.1 Lokasi Penelitian	35
3.2 Data dan Peralatan.....	35
3.3 Metodologi Penelitian	41

3.4	Diagram Alir Penelitian.....	44
BAB IV	.....	47
HASIL DAN PEMBAHASAN	.....	47
4.1	Hasil dan Analisa nilai Sensor Kamera Sony Exmor ..	47
4.2	Hasil dan Analisa Kalibrasi <i>In-Field</i>	47
4.3	Hasil dan Analisa kalibrasi <i>In-Flight</i>	48
4.4	Hasil dan Analisa Georeference	49
4.3	Perbandingan parameter Pada Kalibrasi.....	53
4.5	Hasil dan Analisa Distorsi.....	54
4.6	Analisa Geometri Menurut Perka BIG	56
4.7	Hasil dan Analisa Eksterior Orientasi Parameter	58
BAB V	.....	61
KESIMPULAN	.....	61
5.1.	Kesimpulan.....	61
5.2.	Saran.....	62
DAFTAR PUSTAKA	.....	63
LAMPIRAN	.....	67
BIODATA PENULIS	.....	81

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 kolinear atau prinsip keseгарisan	6
Gambar 2.2 Sistem Koordinat Foto dan Pixel	7
Gambar 2.3 Sistem Koordinat Kamera dan Objek	8
Gambar 2.4 Ukuran Sensor Kamera.....	12
Gambar 2.5 Kolinier dan Perpotongan Kebelakang	18
Gambar 2.6 Principle Point	20
Gambar 2.8 Distorsi Lensa.....	22
Gambar 2.9 (a) Pinchusion (b) barrel.....	24
Gambar 2.10 Artificial Photogrametric Target	27
Gambar 2.11 Sistem Kolinier Pada Aero-Triangulation...	29
Gambar 3.1 Diagram Alir Tahapan Penelitian.....	41
Gambar 3.2 Diagram Alir Pengolahan Data	44
Gambar 4.1 Pergeseran Titik <i>Sampling</i> Foto	55

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Spesifikasi Penelitian Terdahulu	33
Tabel 3.1 Spesifikasi DJI Phantom 3	36
Tabel 3.2 Spesifikasi kamera Sony Exmor	37
Tabel 3.3 Spesifikasi Total Station	37
Tabel 4.1 Hasil Kalibrasi <i>In-Field</i>	47
Tabel 4.2 Hasil Kalibrasi <i>In-Flight</i>	48
Tabel 4.3 Koordinat Total Station dengan Foto	50
Tabel 4.4 Perbandingan Hasil Parameter Kalibrasi	53
Tabel 4.5 Ketelitian Geometri Peta RBI.....	58
Tabel 4.6 Hasil Parameter EOP	58

“Halaman ini sengaja di kosongkan”

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Data Kalibrasi Kamera <i>In-Field</i>	67
Lampiran 2. Data Kalibrasi Kamera <i>In-Flight</i>	73
Lampiran 3. Pengukuran Titik Kontrol Tanah	77
Lampiran 4. Hasil Relative Orientation Pada Australis ...	79
Lampiran 5. Transformasi Koordinat Pada Australis	80

“Halaman ini sengaja di kosongkan”

DAFTAR PERSAMAAN

Persamaan 2.1 Self-Calibration kalibrasi In-Field	15
Persamaan 2.2 Self-Calibration kalibrasi In-Flight.....	16
Persamaan 2.3 Jarak Radial.....	22
Persamaan 2.4 Pergeseran Sumbu x dan y.....	23
Persamaan 2.5 Jarak Radial.....	23
Persamaan 2.6 Distorsi Radial.....	23
Persamaan 2.7 Tiga Elemen Penentu Posisi OE	26
Persamaan 2.8 Tiga Elemen Penentu Sudut OE	26
Persamaan 2.9 Matriks Rotasi Pada OE	26
Persamaan 2.10 Transformasi Konform Tiga Dimensi	29
Persamaan 2.11 Pembentukan Matrik R atau R^T	30
Persamaan 2.12 kesejarisan (<i>collinear equation</i>).....	30
Persamaan 2.13 Non-Linier Deret Taylor.....	31
Persamaan 2.14 Teknik <i>Bundle Adjustment</i>	31

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang Masalah

Fotogrametri adalah sebuah proses untuk memperoleh informasi mengenai sebuah obyek melalui pengukuran yang dibuat pada hasil foto udara sebuah obyek. Dalam memperoleh informasi berupa data foto udara, pada fotogrametri ada 2 media yang digunakan yaitu dengan menggunakan kamera metrik dan non-metrik. Kamera metrik dan non-metrik memiliki perbedaan, karena sifat kamera metrik yang dirancang dengan panjang fokus yang tetap dan distorsi yang kecil dibandingkan dengan kamera non-metrik, maka kamera metrik tidak dapat digunakan untuk pemetaan jarak dekat dan hanya dapat digunakan untuk pemetaan dengan ketinggian minimal 300 M.

Hal yang mendasari penggunaan kamera non-metrik pada saat ini yaitu adanya efisiensi biaya pemetaan untuk keperluan pemetaan untuk area yang relatif kecil dan untuk saat ini keterbatasan yang dimiliki oleh kamera Foto Udara Format Kecil (FUFK) dapat diatasi sehingga kamera non-metrik menjadi instrumen yang layak digunakan untuk foto udara. Namun dalam penggunaan kamera non-metrik ini memiliki kekurangan dalam hal geometrik intrinsik dan ekstrinsik kamera sehingga berpengaruh terhadap kestabilan wahana yang digunakan untuk melakukan pemotretan foto udara.

Geometrik dan ketidakstabilan parameter intrinsik dan ekstrinsik kamera dapat diminimalisir dengan metode kalibrasi. Metode kalibrasi yang akan digunakan pada penelitian ini yaitu kalibrasi kamera kalibrasi *In-Field* dan kalibrasi *In-Flight*. Metode kalibrasi *In-Field* untuk mendapatkan nilai *IOP* (*Interior Orientation Parameter*) dan kalibrasi *In-Flight* untuk mendapatkan nilai *IOP* (*Interior Orientation Parameter*) dan *EOP* (*Exterior Orientation*

Parameter). Teknik kalibrasi *In-Field* menggunakan target dan parameter kalibrasi kamera dihitung menggunakan metode *bundle adjustment* serta teknik kalibrasi *In-Flight* dilakukan pada saat pemotretan udara di lapangan dan parameter kalibrasi kamera dihitung menggunakan metode *Bundle Adjustment with Self Calibration* (Harintaka, 2009), sedangkan menurut kusumadharm (2008), kalibrasi In-Lab dilakukan dengan pengambilan foto dilaboratorium menggunakan media berupa target seperti marker dan kalibrasi In-Field dilakukan dilapangan pada saat kamera melakukan pemotretan foto udara. Kalibrasi In-Lab dilakukan dengan posisi kamera stabil dengan 8 orientasi pengambilan gambar, sedangkan kalibrasi In-Field pengambilan data dilakukan minimal 9 orientasi berbeda (Hamid, 2014).

Pada penelitian ini untuk pengolahan data pada masing-masing metode kalibrasi kamera menggunakan pedekatan matematis karena untuk mendapatkan nilai EOP dan IOP dapat diselesaikan dengan metode *bundle adjustmen self-calibration*. Metode ini memungkinkan pengikatan seluruh foto hanya dengan menggunakan GCP yang minimum pada seluruh area pemotretan. Hasil dari penelitian ini merupakan parameter kalibrasi *In-Flight* dan *In-Field* yaitu berupa nilai IOP (*Interior Orientation Parameter*) dan EOP (*Exterior Orientation Parameter*) yang diharapkan dapat dijadikan acuan dalam satu pekerjaan untuk foto udara format kecil pada kamera non-metrik Dji Phantom 3 Advance.

1.2. Perumusan Masalah

Perumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaplikasian fotogrametri dalam sistem kalibrasi kamera *In-Field* dan kalibrasi kamera *In-Flight* pada UAV jenis Multiopter.

2. Bagaimana hasil dari kedua kalibrasi kamera menggunakan metode *BASC (Bundle Adjustment with Self Calibration)*.
3. Bagaimana hasil evaluasi yang telah dilakukan dengan membandingkan parameter (IOP) dari masing – masing kalibrasi kamera.

1.3. Batasan Masalah

Adapun batasan masalah yang akan dibahas dalam penelitian ini yaitu:

1. Melakukan kalibrasi kamera dengan 2 metode yaitu kalibrasi *In-Field* dan *In-Flight*.
2. Wahana yang digunakan untuk kalibrasi kamera adalah jenis *Multicopter* RTF Dji Phantom 3
3. Teknik kalibrasi *In-Flight* menggunakan target berupa *marker* dan pengukuran terestris sedangkan kalibrasi *In-Field* hanya menggunakan *grid/marker*. Kedua kalibrasi tersebut dihitung menggunakan metode *BASC (Bundle Adjustment with Self Calibration)*.

1.4. Tujuan Tugas Akhir

Adapun tujuan dalam penelitian ini yaitu:

1. Menghitung kalibrasi kamera dengan menggunakan 2 metode yaitu kalibrasi *In-Field* dan *In-Flight* sehingga *IOP (Interior Orientation parameter)* serta menghitung jarak distorsi radial.
2. Membandingkan hasil dari nilai *IOP (Interior Orientation parameter)* yang didapat melalui kedua metode kalibrasi kamera.

1.5. Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Memberikan hasil analisa berupa nilai parameter *IOP (Interior Orientation parameter)* dari kedua metode kalibrasi kamera *In-Field* dan *In-Flight*.

2. Menghasilkan nilai evaluasi *IOP (Interior Orientation parameter)* antara kalibrasi *In-Field* dan *In-Flight*.

BAB II

KAJIAN PUSTAKA

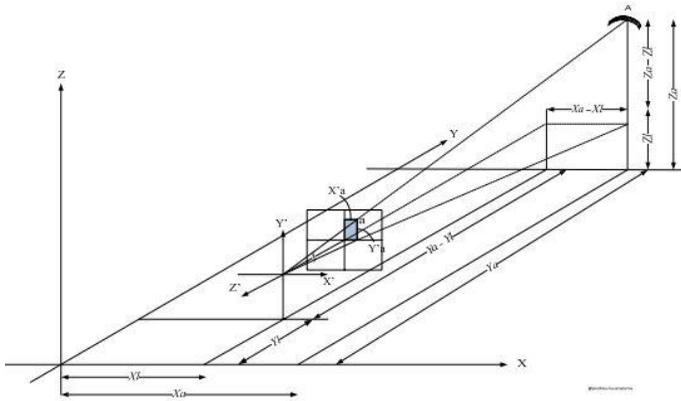
2.1 Fotogrametri

Fotogrametri adalah ilmu untuk memperoleh informasi dari suatu objek melalui proses pencatatan, pengukuran, dan interpretasi fotografis dimana aspek-aspek geometrik dari foto udara seperti sudut, jarak, koordinat, dan sebagainya merupakan faktor utama. Hasil dari fotogrametri adalah foto udara. Pemetaan fotogrametri menggunakan foto udara sebagai sumber data utamanya. Kualitas peta atau informasi yang dihasilkan sangat tergantung dari kualitas metrik maupun kualitas gambar (*pictorial quality*) sumber data tersebut. Pengadaan foto udara biasanya bertitik tolak dari tujuan peruntukannya. Ditinjau dari data yang dapat diperoleh dari foto udara, maka fotogrametri dapat dibagi menjadi dua yaitu:

- a) Fotogrametri Metrik,
Fotogrametri Metrik atau metrik fotogrametri bertujuan untuk memperoleh data kuantitatif seperti jarak, sudut, luas dan posisi dari suatu objek. Untuk memperoleh data tersebut diperlukan alat-alat khusus serta pengetahuan dan keterampilan tertentu. Hal ini bertujuan untuk mengetahui hubungan matematis antara sistem foto udara dengan sistem tanah, sehingga ukuran-ukuran di foto dapat dipindahkan ke sistem tanah atau sebaliknya.
- b) Fotogrametri Interpretatif,
Fotogrametri Interpretatif bertujuan untuk memperoleh data kualitatif dengan cara pengenalan, identifikasi dan interpretasi foto udara.

Pada dasarnya konsep yang digunakan dalam fotogrametri jarak dekat atau foto udara format kecil (FUFK) merupakan konsep fotogrametri analitis yang diaplikasikan pada

pemotretan terestris. Prinsip yang digunakan dalam fotogrametri jarak dekat adalah prinsip kolinearitas (kesegarisan) yang dapat didefinisikan bahwa titik utama kamera, koordinat titik pada foto, dan posisi 3 dimensi titik tersebut pada ruang berada pada satu garis lurus. Kondisi kolinearitas ini tentu saja digunakan sebagai solusi umum saat orientasi relatif baik secara aerial maupun terestris.



Gambar 2.1 kolinear atau prinsip kesegarisan
(Sumber : Wolf, 1983)

2.2 Sistem Koordinat dalam Fotogrametri

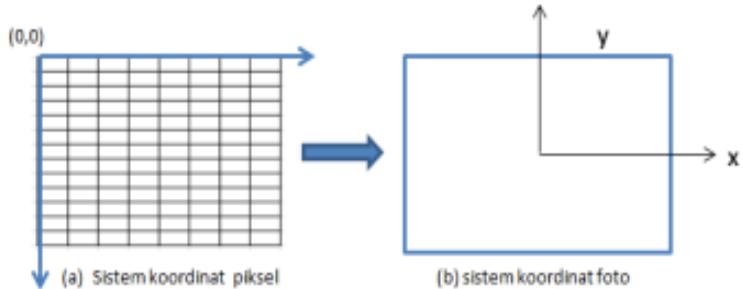
Dalam konteks fotogrametri dikenal beberapa sistem koordinat yang berhubungan dengan foto udara, yaitu: sistem koordinat foto, sistem koordinat pixel, sistem koordinat kamera, dan sistem koordinat objek

a. Sistem Koordinat Foto.

Sistem koordinat foto adalah sistem koordinat dua dimensi sebuah foto dimana pada kamera non metrik maupun kamera metrik dimulai dari pixel tengah. Sumbu x positif ke arah kanan dan sumbu y positif ke arah atas.

b. Sistem Koordinat Pixel.

Sistem koordinat pixel adalah sistem koordinat sebagai referensi titik terkecil pada sebuah foto, yang biasanya dinyatakan dalam satuan mm. Dimana pada kamera non metrik dimulai dari pixel kiri atas, sumbu x positif ke arah kanan (kolom), dan sumbu y positif ke arah bawah (baris).



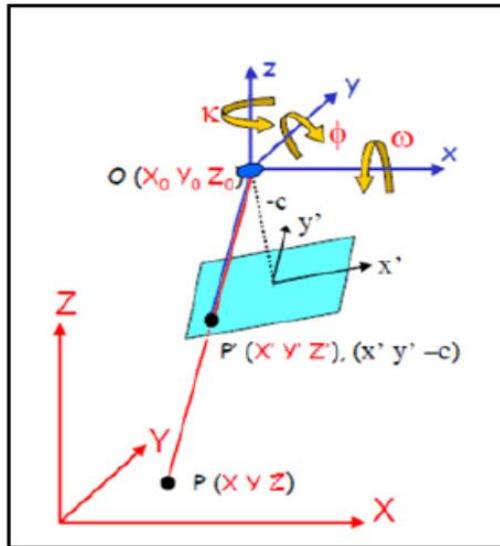
Gambar 2.2 Sistem Koordinat Foto dan Pixel
(Sumber : Barnadib, 2014)

c. Sistem Koordinat Kamera

Sistem koordinat kamera merupakan sistem koordinat 3D pada sebuah kamera dimana titik pusat berada pada *perspective center*. Sumbu (x,y) positif koordinat ini, sejajar dan paralel dengan sumbu (x,y) sistem koordinat objek.

d. Sistem Koordinat Objek

Sistem koordinat objek merupakan system koordinat 3D yang digunakan sebagai representasi bentuk dan ukuran objek melalui transformasi dari system koordinat foto/pixel ke sistem koordinat objek.



Gambar 2.3 Sistem Koordinat Kamera dan Objek
(Sumber : Seto, 2013)

2.3 Kamera

Secara umum pada teknik fotogrametri terdapat dua jenis kamera, yaitu kamera metrik dan kamera non-metrik. Foto yang dihasilkan dari kamera metrik memiliki ketelitian yang tinggi, karena kamera yang digunakan dibuat khusus untuk kebutuhan pemetaan dan memiliki resolusi citra yang baik. Kamera non-metrik adalah kamera yang umum digunakan baik oleh amatir maupun fotografer profesional, dimana kualitas gambar lebih diutamakan dibandingkan dengan ketelitian geometris. Kamera non-metrik dapat dilakukan kalibrasi dan dapat digunakan dengan hasil yang memuaskan untuk aplikasi foto terestris (Wolf, 1993).

Seiring berkembangnya teknologi, kamera non-metrik yang digunakan tidak lagi kamera dengan sistem analog, melainkan digital. Penggunaan kamera digital erat kaitannya dalam perkembangan era digital dan keekonomisannya untuk

aplikasi fotogrametri jarak dekat. Kamera digital memiliki komponen utama yang terdiri atas lensa, sensor, dan media penyimpanan. Kamera ini memiliki karakteristik desain yang berbeda dengan kamera analog. Perbedaan utamanya ialah pada media film seluloid yang diganti oleh sensor optik elektrik seperti *Charge-Couple Device (CCD)* atau *Complementary Metal Oxide Semiconductor (CMOS)* (Maharani, 2015).

Charge-Couple Device (CCD) berfungsi mengubah *photon* yang jatuh mengenai permukaan sensor menjadi elektron, yang selanjutnya elektron ini diakumulasikan ke dalam kapasitor dan diubah menjadi bentuk sinyal elektronik. *Complementary Metal Oxide Semiconductor (CMOS)* adalah sensor yang menggunakan teknologi khusus dengan kualitas dan kepekaan cahaya yang lebih tinggi dibandingkan dengan sensor *CCD*. Keuntungan dari *CMOS* dibandingkan *CCD* adalah memiliki sensitivitas yang tinggi terhadap cahaya, kualitas gambar yang lebih baik dan *noise* yang rendah. Konsekuensi yang ditimbulkan ialah media penyimpanannya memerlukan kapasitas yang lebih besar (Suharsana, 1997).

Dalam fotogrametri kamera merupakan salah satu instrumen paling penting, karena kamera digunakan untuk membuat foto yang merupakan alat utama dalam fotogrametri. Oleh karena itu dapat dikatakan pula bahwa foto yang akurat (mempunyai kualitas geometri yang tinggi) diperoleh dari kamera yang teliti. Baik untuk keperluan foto udara maupun foto terestrial, kamera diklasifikasikan menjadi dua kategori umum yaitu:

a. Kamera Metrik

Kamera metrik merupakan kamera yang dirancang khusus untuk keperluan fotogrametrik. Kamera metrik yang umum digunakan mempunyai ukuran format 23cm × 23cm, kamera metrik dibuat stabil dan dikalibrasi secara menyeluruh sebelum digunakan. Nilai-nilai

kalibrasi dari kamera metrik seperti panjang fokus, distorsi radial lensa, koordinat titik utama foto diketahui dan dapat digunakan untuk periode yang lama. Untuk kamera metrik berformat normal dikenal tiga sudut bukaan (*angle field of view*), yakni: (Dipokusumo, 1999).

- Normal angle (NA), dengan panjang fokus 210 mm
- Wide Angle (WA), dengan panjang fokus 152 mm
- Super Wide Angle, dengan panjang fokus 88 mm

Sebagian besar kamera metrik biasanya dirancang dengan panjang fokus tetap untuk objek tak terhingga. Jika kamera metrik diterapkan untuk foto terrestrial (pemotretan pada jarak pendek) tidak dapat menghasilkan gambar yang tajam. Sehingga diperlukan modifikasi khusus pada panjang fokusnya agar diperoleh gambar yang tajam pada saat melakukan pemotretan pada jarak yang sangat pendek.

b. Kamera Non-Metrik

Kamera non-metrik dirancang untuk foto profesional maupun pemula, dimana kualitas lebih diutamakan daripada kualitas geometrinya. Kamera non-metrik memiliki dua keterbatasan utama yaitu :

1. Ketidakstabilan geometric

Masalah terbesar penggunaan kamera non-metrik adalah ketidakstabilan geometrik. Kamera non-metrik memiliki lensa yang tidak sempurna, sehingga foto udara yang dihasilkan dari perekaman kamera non-metrik mengalami kesalahan. Kamera ini tidak memiliki tanda-tanda fidusial, namun dapat dilakukan modifikasi untuk membuat tanda fidusial. Selain itu pada kamera non-metrik tidak diketahui secara pasti

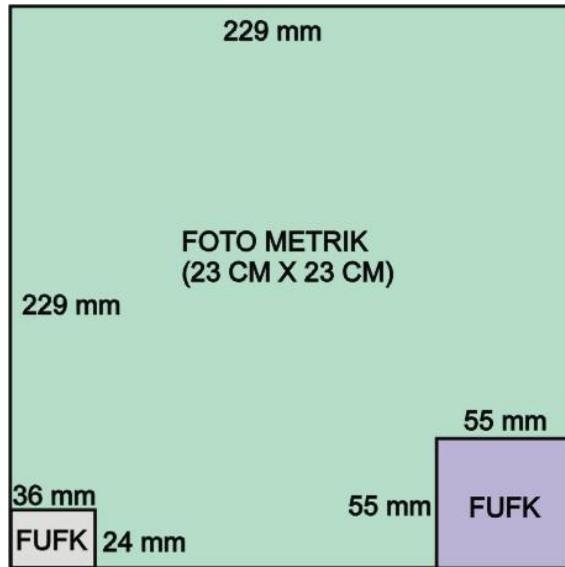
besarnya panjang fokus dan posisi *principal point*, sehingga pengukuran pada foto udara menjadi kurang teliti. Kamera non-metrik dapat dikalibrasi dengan teknik tertentu sehingga parameter-parameter internal yang berpengaruh pada ketelitian geometrik foto dapat diketahui, dan kamera non-metrik dapat digunakan untuk aplikasi fotogrametri.

2. Ukuran film

Keterbatasan lain dalam penggunaan kamera non-metrik adalah terbatasnya ukuran film. Untuk mengcover area dengan luas dan skala yang sama, penggunaan kamera format kecil $24\text{mm} \times 36\text{mm}$ membutuhkan jumlah foto lebih banyak dibandingkan jika pemotretan itu dilakukan dengan menggunakan kamera metrik format besar $23\text{ cm} \times 23\text{cm}$. Selain itu seringkali dalam pemetaan metode foto udara dibutuhkan foto dengan ukuran asli yang besar, sehingga penggunaan kamera format kecil menjadi masalah.

2.2.1. Sensor Kamera

Ada 2 jenis sensor pada kamera dengan berbasis *CCD (Charge Coupled Device)* atau *CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor)*. Perbedaan antara *CCD* dan *CMOS* adalah pada bahan yang digunakan dan transportasi informasi elektro-magnetik. *CMOS* memiliki konsumsi daya yang lebih kecil, high dynamic range (frekuensi gambar yang tinggi), kisaran dinamis tinggi dan noise yang lebih rendah. Unsur-unsur sensor kamera meliputi, (Aulejtner, 2011).



Gambar 2.4 Ukuran Sensor Kamera
(Sumber : Wolf, 1983)

2.2.2. Field of view (sudut kamera)

Kamera dengan sudut field of view yang besarnya di bedakan menjadi, (Soeta'at 2011):

- Normal angel jika besar sudutnya sampai dengan 75°
- Wide angel jika besar sudutnya dari 75° sampai dengan 100°
- Super wide angel jika besar sudutnya lebih besar dari 100°

Besar sudut dapat ditentukan dengan cara mengetahui ukuran sensor dan panjang fokus kamera, sehingga di rumuskan sebagai berikut, (Soeta, 2011).

2.4 Unmanned Aerial Vehicle (UAV)

Wahana udara tanpa awak atau *unmanned aerial vehicle* (UAV) atau disebut juga *unmanned aerial system* adalah sistem yang pertama kali dikenalkan pada perang dunia pertama dan hingga kini telah mengalami banyak perkembangan baik dalam sektor militer maupun sektor umum. Penggunaan wahana udara tanpa awak (UAV) atau *aeromodeling* adalah solusi yang tepat untuk akuisisi data foto udara (*small format / close range photogrametry*). Keuntungan penggunaan pesawat model dalam pemotretan udara adalah biaya operasionalnya relatif lebih murah dan mudah didapatkan di pasaran. Sedangkan keterbatasan dari pesawat model antara lain adalah pada saat terbang pesawat lebih mudah terpengaruh oleh cuaca seperti angin dan suhu sehingga pesawat menjadi kurang stabil, selain itu cakupan waktu terbang juga terbatas (berkisar 15 sampai 30 menit). Oleh karena itu dalam pemaanfaatan pesawat model perlu diketahui karakteristik terbang pesawat dan kondisi cuaca yang baik sehingga pemotretan udara menjadi efektif dan efisien serta menghasilkan data foto digital dengan kondisi baik.

2.5 Kalibrasi Kamera

Kamera fotogrametri tidak mempunyai lensa yang sempurna, sehingga proses perekaman yang dilakukan akan memiliki kesalahan. Oleh karena itu perlu dilakukan pengkalibrasian kamera untuk dapat menentukan besarnya penyimpangan - penyimpangan yang terjadi. Kalibrasi kamera adalah proses untuk mendapatkan parameter intrinsik dan ekstrinsik kamera. Parameter intrinsik meliputi geometri internal kamera dan parameter optik seperti *focal length*, koefisien distorsi lensa, faktor-faktor skala yang tidak dapat diestimasi dan koordinat origin gambar pada computer. Parameter distorsi, meliputi distorsi radial dan distorsi tangensial (*decentring*), serta parameter-parameter lensa

lainnya, termasuk juga *principal distance* (c), serta titik pusat fidusial foto. Pada *Software Austalis*, model kalibrasi terdiri dari elemen interior orientasi (x_0 , y_0 , c), koefisien distorsi lensa (K_1 , K_2 , K_3 , P_1 and P_2) serta koefisien untuk perbedaan penyekalaan dan ketidak ortogonal antara sumbu X dan Y (b_1 , b_2). Distorsi lensa dapat menyebabkan bergesernya titik pada foto dari posisi yang sebenarnya. Parameter ekstrinsik meliputi orientasi posisi kamera terhadap sistem koordinat dunia. Hal ini meliputi tiga sudut Euler dan tiga parameter translasi.

Terdapat berbagai macam teknik kalibrasi kamera, secara operasional teknik kalibrasi kamera dilakukan dengan 3 cara (Stensaas, 2007): *In-Laboratory*, *In-Field*, dan *In-Flight*. Teknik kalibrasi *In-Laboratory* menggunakan peralatan multikolimator atau goniometer. Teknik kalibrasi *In-Field* menggunakan target dan parameter kalibrasi kamera dihitung menggunakan metode *Bundle Adjustment*, *Plumb Line*, atau DLT (*Direct Linear Transform*). Teknik kalibrasi *In-Flight* dilakukan pada saat pemotretan udara di lapangan dan parameter kalibrasi kamera dihitung menggunakan metode BASC (*Bundle Adjustment with Self Calibration*). Algoritma teknik BASC pada dasarnya merupakan perluasan dari persamaan kolinier.

2.5.1 Kalibrasi *In-Field*

Kalibrasi *In-Field* merupakan prosedur lapangan yang mensyaratkan serangkaian target / *marker* yang berada pada posisi tetapan dan sehubungan dengan stasiun kamera yang diukur secara tepat dan akurat. Dalam konfigurasi ini, kamera harus ditempatkan di peralatan khusus seperti wadah tetap, sehingga koordinat stasiun kamera dapat dikatakan benar dengan koordinat target. Hal ini memungkinkan *focal length* yang dikalibrasi (CFL) dan lokasi titik utama yang akan

f : focal lenght
 r, s, q : persamaan *collinear*

2.5.2 Kalibrasi *In-Flight*

Kalibrasi *In-Flight* yang digunakan ini menggunakan pendekatan pada saat pesawat yang membawa kamera melakukan pemotretan. Metode ini telah menjadi lebih partical karena kemajuan dalam teknik GPS udara yang memungkinkan koordinat pada stasiun kamera akurat setiap kali melakukan pemotretan. Metode *In-Flight* dapat juga digeneralisasi pada titik-titik yang parameter kalibrasinya telah ditentukan terlebih dahulu, sehingga dapat digabungkan dengan foto-foto yang diambil selama pekerjaan yang sebenarnya. Pendekatan ini dikenal sebagai analisis *self-calibration (In-Flight calibration)* (Wolf,1993). Penyusunan persamaan dalam *self-calibrating bundle adjustment* adalah (Atkinson, 1996):

$$\begin{aligned}
 & x_{ij} - x_{oj} + (x_{ij} - x_{oj})_{ij}^{-1} (K_{1j}r_{ij}^3 + K_{2j}r_{ij}^5 + K_{3j}r_{ij}^7) \\
 & + P_{ij} [r_{ij}^2 + 2(x_{ij} - x_{oj})^2] + 2P_{2j}(x_{ij} - x_{oj})(y_{ij} - y_{oj}) \\
 & + C_j \frac{[r_{11}(X_{oj} - X_i) + r_{12}(Y_{oj} - Y_i) + r_{13}(Z_{oj} - Z_i)]}{[r_{31}(X_{oj} - X_i) + r_{32}(Y_{oj} - Y_i) + r_{33}(Z_{oj} - Z_i)]} = 0 \\
 & y_{ij} - y_{oj} + (y_{ij} - y_{oj})_{ij}^{-1} (K_{1j}r_{ij}^3 + K_{2j}r_{ij}^5 + K_{3j}r_{ij}^7) \\
 & + P_{ij} [r_{ij}^2 + 2(x_{ij} - x_{oj})^2] + 2P_{2j}(x_{ij} - x_{oj})(y_{ij} - y_{oj}) \\
 & + C_j \frac{[r_{11}(X_{oj} - X_i) + r_{12}(Y_{oj} - Y_i) + r_{13}(Z_{oj} - Z_i)]}{[r_{31}(X_{oj} - X_i) + r_{32}(Y_{oj} - Y_i) + r_{33}(Z_{oj} - Z_i)]} \\
 & \dots\dots\dots (2. 2)
 \end{aligned}$$

Dimana

x_{ij}, y_{ij}	: koordinat pengukuran
x_{oj}, y_{oj}	: koordinat <i>principal point</i>
K_{1j}, K_{2j}, K_{3j}	: koefisien distorsi radial
P_{1j}, P_{2j}	: koefisien distorsi tangensial
C_j	: <i>focal length</i>
X_{oj}, Y_{oj}, Z_{oj}	: koordinat ruang proyeksi foto
X_i, Y_i, Z_i	: koordinat ruang foto

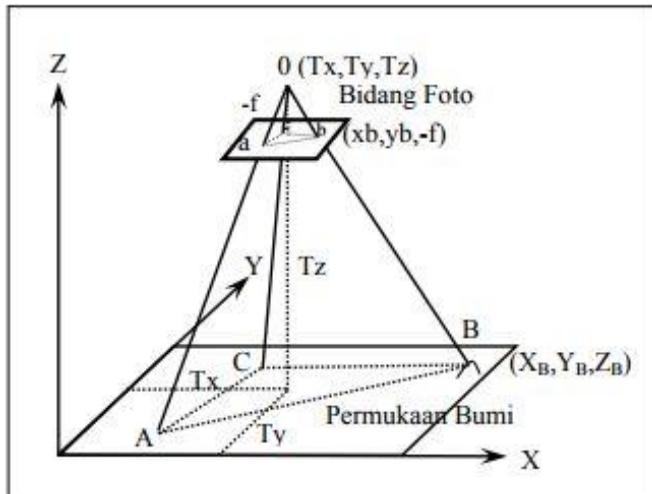
Dalam rangka mencapai kemampuan untuk menentukan hasil yang baik dan akurasi dari *self-calibration bundle blok adjustment* maka pengaturan kalibrasi dengan konfigurasi pencitraan yang sangat konvergen, sudut sensor sumbu tinggi ortogonal, dan medan titik objek terdistribusi dengan baik dalam tiga dimensi yang akan digunakan (Fraser,1997). Dalam kondisi udara pengaturan kalibrasi jarang sekali direkomendasikan, dikarenakan targetnya adalah datar dibandingkan dengan jarak objek dan gambar memiliki sumbu optik paralel sehingga hasil ini berkorelasi antara *IOP (Interior Orientation Parameter)* dan koordinat pusat perspektif. Penggunaan uji lapangan dengan menggunakan perbedaan pada ketinggian dan penggunaan blok gambar dengan citra vertikal dan miring. Pilihan terbaik untuk tes di daerah datar, penerbangannya dilakukan di dua ketinggian yang berbeda untuk mengatasi apabila terdapat data yang hilang perbedaan tinggi, memastikan untuk secara mendalam kalibrasi panjang fokus, serta kesalahan sistematis lainnya.

Kalibrasi *In-Flight* dilakukan dengan menggunakan model *adjustment blok bundel standar* pada pengelompokan berikut parameter yang dihasilkan (Honkavaara, 2003):

1. *Boresight Misalignment* ($d\omega$, $d\phi$, $d\kappa$).
2. Terbang arah tergantung koreksi
 - a. Posisi konstan bergeser tergantung pada arah terbang (DX , dY , DZ).
 - b. Kamera orientasi interior (dc , dx_0 , dy_0)
3. Perubahan bentuk foto berupa parameter model distorsi fisik radial dan distorsi tangensial atau mencoba untuk mengimbangi perubahan bentuk foto sistematis dengan menggunakan polinomial matematika.

2.6 Orientasi Kamera

Perpotongan kebelakang atau *space resection* pada intinya adalah menentukan parameter orientasi (ω , ψ , κ) dan posisi pusat proyeksi (T_x , T_y , T_z) kamera. Gambar (2.5) menunjukkan prinsip perpotongan kebelakang yang memerlukan minimal 3 buah titik yang diketahui koordinat peta (titik A, B, C) dan koordinat fotonya (titik a, b, c).



Gambar 2.5 Kolinier dan Perpotongan Kebelakang
(Sumber : Harintaka, 2003)

Bila telah diketahui 6 buah parameter orientasi dan posisi pusat proyeksi sensor/kamera pada saat pemotretan maka setiap obyek pada citra dapat dihitung koordinat petanya, tentu saja harus diketahui tinggi obyek di permukaan tanah terhadap bidang referensi.

Perpotongan kebelakang pada prinsipnya dikembangkan dari persamaan kolinier. Persamaan kolinier menyatakan bahwa titik obyek di permukaan tanah, bayangannya di citra, dan pusat proyeksi terletak pada satu garis lurus (Wolf, 1983). Pada Gambar (2.5) ditunjukkan oleh titik B (di permukaan tanah), titik b (pada bidang citra), dan O (pusat proyeksi) yang terletak pada satu garis lurus.

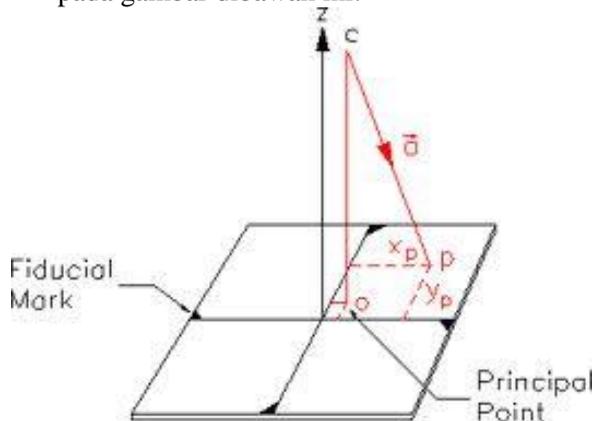
2.6.1 Interior Orientation Parameter/ Sensor Model

Interior Orientation Parameter atau parameter orientasi dalam merupakan suatu proses yang memerlukan nilai kalibrasi kamera, karena dalam proses ini akan terjadi koreksi pada kesalahan akibat distorsi kamera dan kesalahan lain pada kamera. Nilai kalibrasi kamera atau disebut parameter kalibrasi tersebut adalah principal distance (c), yaitu pergeseran titik pusat sesungguhnya dengan titik pusat pada foto, titik pusat fidusial foto (x_0 , y_0), distorsi lensa (K_1 , K_2 , K_3 , P_1 and P_2), serta distorsi akibat perbedaan penyekalaan dan ketidak ortogonal antara sumbu X dan Y (b_1 , b_2) (Fraser, 2006).

1. Parameter x_0 , y_0 , dan Fokus (c)

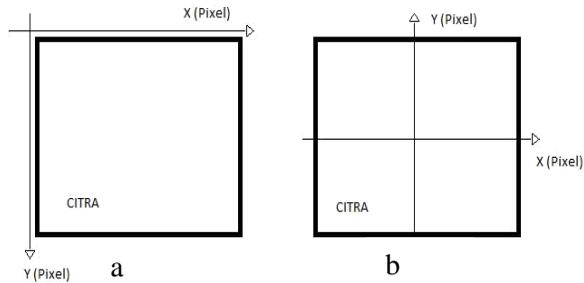
Dalam berbagai kasus fotogrametri, elemen dari *principle point* (x_0 , y_0) dan perspektif *distance* (panjang fokus) harus ditentukan, hal ini dikarenakan semua sistem persamaan matematis yang digunakan dalam fotogrametri bergantung dari ketiga parameter ini. Secara geometris

hubungan antara ketiga parameter ini dapat di lihat pada gambar dibawah ini.



Gambar 2.6 Principle Point
(Sumber : Wolf 1983)

Dari gambar diatas posisi *principle point* (x_o, y_o) merupakan proyeksi garis lurus dari letak *perspective center* ke bidang foto dan jarak dari *principle point* ke *perspective center* merupakan panjang fokus (c). Secara praktis panjang fokus kamera dan letak *principle point* tidak mutlak berada di tengah-tengah pusat foto, permasalahan ini disebabkan oleh kurang stabilnya susunan lensa dan CCD yang berguna untuk merekam bayangan obyek pada saat perakitan.

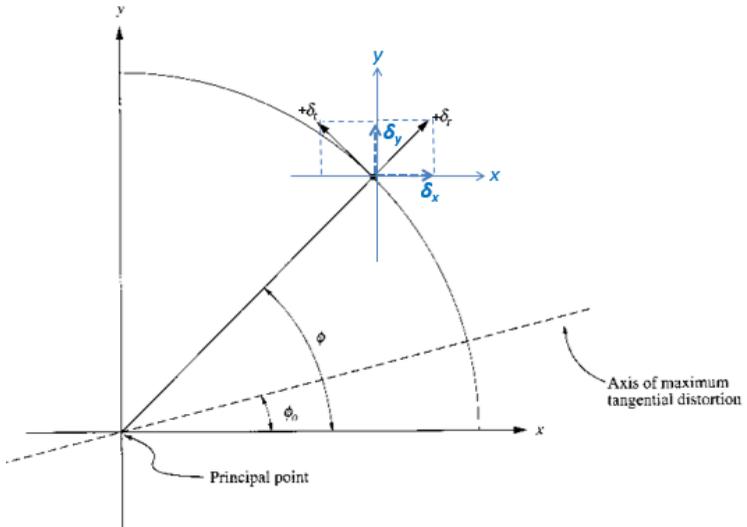


Gambar 2.7 Principal Point Australis (a) Photomodeler (b)
(Sumber : Danuarwendi, 2012)

2. Distorsi Lensa

Distorsi menyebabkan tidak tepatnya proyeksi dari pusat perspektif lensa terhadap bidang foto sehingga letak proyeksinya tidak tepat pada pusat system koordinat foto. Distorsi merupakan ketidaksesuaian bentuk obyek yang ada di dunia nyata dengan bentuk obyek pada foto. Menurut model yang dipilih, distorsi berasal dari persamaan non-linier dengan parameter yang berbeda dan dihitung menggunakan titik yang dideteksi dan dikoreksi pada gambar dengan menggunakan metode kalibrasi (Ricolfe-Viala dan Sanchez-Salmeron, 2010).

Hal ini disebabkan karena lensa yang digunakan memiliki kualitas yang kurang baik sehingga terjadi perubahan arah sinar yang keluar dari lensa dan yang masuk menjadi tidak sejajar. Distorsi pada lensa menyebabkan kesalahan geometrik atau bentuk obyek pada foto, namun tidak mengurangi ketajamannya dari hasil pemotretan kamera. Kesalahan tersebut mengakibatkan adanya penyimpangan geometri pada foto dengan geometri obyek sebenarnya. Distorsi lensa dibedakan menjadi dua yaitu distorsi radial dan tangensial (Wolf, 1993).



Gambar 2.8 Distorsi Lensa
(Sumber : Wolf, 1993)

a. Distorsi Tangensial

Distorsi decentring/tangensial adalah pergeseran linier titik di foto pada arah normal (tegak lurus) garis radial melalui titik foto tersebut. Distorsi decentring disebabkan kesalahan sentering elemen-elemen lensa dalam satu gabungan lensa dimana titik pusat elemen-elemen lensa dalam gabuang lensa tersebut tidak terletak pada satu garis lurus. Pergeseran ini biasa dideskripsikan dengan 2 persamaan polonomial untuk pergeseran pada arah x (dx) dan y (dy). Distorsi decentring ini dapat dijabarkan dalam sebuah persamaan polinomial arah x dan y sebagai berikut (Ricolfe-Viala dan Sanchez-Salmeron, 2010).

$$r = \sqrt{(X_i - X_p)^2 + (Y_i - Y_p)^2} \dots\dots\dots (2. 3)$$

$$\delta x = [P_1[r^2 = 2(x - xp)^2] + 2P_2(x - xp)(y - yp)](1 + P^3r^2)$$

$$\delta y = [2P_1(x - xp)(y - yp) + 2P^2(r^2 + 2(y - yp))](1 + P^3r^2)$$

..... (2. 4)

dimana

- r : jarak radial
- δx : besar pergeseran sumbu x (μm)
- δy : besar pergeseran sumbu y (μm)
- P_1, P_2, P_3 : parameter distorsi tangensial
- x_p, y_p : titik pusat foto (mm)
- x, y : koordinat pusat foto (mm)

Dimana P1 dan P2 merupakan koefesien dari parameter distorsi decentring yang nilainya tergantung dari nilai panjang fokus kamera. Efek dari distorsi decentring ini akan menyebabkann kesan hiperbolik pada foto yang terekam oleh kamera.

b. Distorsi Radial

Distorsi radial adalah pergeseran linier titik foto dalam arah radial terhadap titik utama dari posisi idealnya. Distorsi lensa biasa diekspresikan sebagai fungsi polonomial dari jarak radial (dr) terhadap titik utama foto. Distorsi radial direpresentasikan dalam sebuah persamaan polinimial sebagai berikut (Wolf, 2000) :

$$r = \sqrt{(Xi - Xp)^2 + (Yi - Yp)^2}..... (2. 5)$$

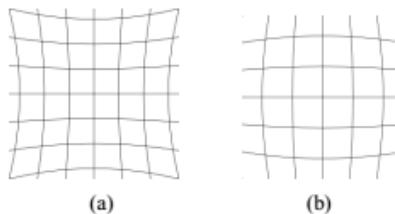
$$\delta r = K_1r^3 + K_2r^5 + K_3r^7..... (2. 6)$$

dimana :

$K1$	: koefisien distorsi radial
r	: jarak radial
δr	: distorsi radial
$x_p y_p$	: titik pusat foto (mm)
$x y$	: koordinat pusat foto (mm)

Efek yang terjadi apabila pada kamera memiliki nilai distorsi, maka gambar foto yang dihasilkan akan berbentuk cembung atau cekung, tergantung dari nilai parameter distorsi radial bernilai positif atau negatif atau biasa disebut distorsi radial ke arah dalam adalah *pinchusion distortion*, dan distorsi radial ke arah luar adalah *barrel distortion* (Wolf, 1983). Efek distorsi radial adalah sekitar 1 sampai 2 piksel diperbatasan CCD sensor.

Dalam kaitannya dengan definisi distorsi radial, ada korelasi besar antara koefisien distorsi itu sendiri $K1$, $K2$, $K3$ dan antara principle distance. Hubungan antara distorsi radial dengan principle distance adalah dalam kaitannya sesuai principle distance dengan deviasi rata-rata akan dihitung menjadi minimum.



Gambar 2.9 (a) Pinchusion (b) barrel
(Sumber : Danurwendi, 2012)

- c. Distorsi Affinity
Distorsi *affinity* (b_1, b_2) ini terjadi akibat kurang sikunya bidang *CCD* atau *CMOS* yang digunakan untuk merekam bayangan obyek, sehingga frame dari foto tidak akan benar-benar terbentuk sebuah bujur sangkar ataupun persegi panjang, akan tetapi membentuk jajar genjang (Seto, 2013).

2.6.2 Eksterior Orientasi Parameter

Orientasi luar (*exterior orientation*) parameter diperoleh melalui metode reseksi ruang dengan persamaan kolinearitas metode numerik yang dihitung secara serentak sehingga menghasilkan dengan enam unsur ($X_o, Y_o, Z_o, \omega, \phi, \kappa$), dimana 3 untuk elemen penentu posisi dan 3 untuk penentu orientasi. Orientasi luar (*exterior orientation*) parameter merupakan posisi dan orientasi kamera pada saat pemotretan. Posisi dan orientasi kamera diperlukan untuk dapat menentukan posisi dari titik objek relatif dari sistem koordinat kamera. Untuk menyelesaikan parameter orientasi luar (*exterior orientation*) dibutuhkan minimal 6 persamaan. Oleh karena itu dibutuhkan minimal 3 titik kontrol dimana setiap 1 titik kontrol mendapatkan 2 persamaan, sistem persamaan ini diselesaikan secara serentak untuk 6 parameter orientasi luar (*exterior orientation*). Untuk titik kontrol lebih dari 3, dilakukan dengan cara hitung perataan. Berikut merupakan element yang terdapat pada parameter eksterior (Purwanto, 2017) :

1. Tiga elemen dari posisi untuk menentukan lokasi titik atau pusat perspektif (titik L). Koordinat titik L sering disebut sebagai stasiun

kamera atau stasiun paparan koordinator akhiri dan dinyatakan sebagai berikut:

$$L = \begin{bmatrix} XL \\ YL \\ ZL \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2. 7)$$

2. Tiga sudut (atau tiga parameter independen) yang cukup untuk menggambarkan orientasi atau sikap bundel ini di ruang objek sistem koordinat. Tiga parameter independen diperlukan untuk menentukan matriks rotasi yang berhubungan ruang obyek dan ruang gambar sistem. Orientasi eksterior mendefinisikan hubungan antara objek dan gambar ruang sistem koordinat dengan persamaan sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} = kR \begin{bmatrix} X - XL \\ Y - YL \\ Z - ZL \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2. 8)$$

dimana matriks R sebagai berikut:

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

$$\begin{bmatrix} \cos \phi \cos \kappa & \cos \omega \sin \kappa + \sin \omega \sin \phi \cos \kappa & \sin \omega \sin \kappa - \cos \omega \sin \phi \cos \kappa \\ -\cos \phi \sin \kappa & \cos \omega \cos \kappa - \sin \omega \sin \phi \sin \kappa & \sin \omega \cos \kappa + \cos \omega \sin \phi \sin \kappa \\ \sin \phi & -\sin \omega \cos \phi & \cos \omega \cos \phi \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2. 9)$$

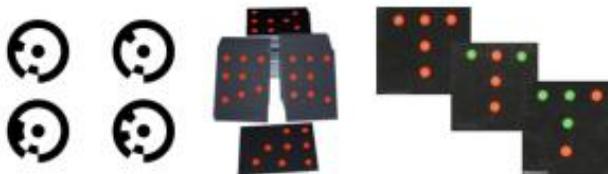
- x, y, f : koordinat ruang gambar
- k : faktor skala
- R : matriks parameter rotasi.

r_{11}, \dots, r_{33} : elemen matriks R^T
 X, Y, Z : titik objek.

2.7 Marker

Marking adalah proses penandaan pada foto-foto yang bertampalan untuk dijadikan acuan dalam membuat model 3 dimensi. Penandaan proses marking ini menggunakan titik-titik objek natural yang terlihat pada foto. Penentuan titik marking diatur sedemikian rupa agar titik tersebut dapat terlihat pada 3 buah foto atau lebih. Hal ini dilakukan karena keterbatasan proses orientasi pada perangkat lunak photomodeler scanner dan Australis walaupun pada teorinya hanya dibutuhkan penampakan pada 2 buah foto saja. Tingkat ketelitian pada proses marking ini sangat dipengaruhi oleh ketelitian orang yang melakukan marking dan juga resolusi kamera yang digunakan.

Proses marking yang dilakukan pada foto UAV lebih dikhususkan pada area yang tidak selalu datar. Kemudian proses marking foto terrestrial dikhususkan pada *software* komersial (mis., Australis dan PhotoModeler) yang biasanya bekerja dengan target kode kecil (Gambar 2.10) yang dapat didistribusikan untuk membentuk poligon kalibrasi 3D. Keuntungan utama dari prosedur ini adalah memiliki solusi portabel. Ini berguna dalam banyak survei fotogrametri dan untuk memastikan identifikasi korespondensi gambar yang benar dan otomatis.



Gambar 2.10 Artificial Photogrammetric Target
 (Sumber : Photomodeller Scanner and Australis®)

2.8 Ground Control Point (GCP)

Ground Control Point (GCP) atau titik kontrol adalah titik lokasi yang diketahui atau diidentifikasi dalam ruang nyata (di tanah), dan *Ground Control Point (GCP)* digunakan untuk verifikasi posisi fitur peta. *Ground Control Point (GCP)* berfungsi sebagai titik sekutu antara sistem koordinat peta dan sistem koordinat foto. *Independent Check Point (ICP)* atau titik cek adalah sebagai kontrol kualitas dari obyek dengan cara membandingkan koordinat model dengan koordinat sebenarnya.

Pada dasarnya koordinat model membutuhkan titik ikat agar dapat terlihat perbandingan titik sekutu yang bertampalan dengan foto. *Tie point* atau titik ikat adalah titik sekutu yang merupakan titik sekutu antar foto yang saling bertampalan. *Tie point* selalu dibuat dengan cara *post-marking*, yaitu mengidentifikasi obyek yang sama pada daerah foto yang bertampalan. Akurasi dan presisi adalah faktor yang perlu diperhatikan dalam pembuatan *Ground Control Point (GCP)* yang berkualitas. Perbedaan antara akurasi dan presisi

2.9 Bundle adjustment

Bundle Adjustment ini merupakan suatu pendekatan model matematika pada fotogrametri yang digunakan untuk kalibrasi kamera dalam proses pemotretan. *Bundle adjustment* menetapkan posisi dan orientasi dari setiap berkas menggunakan sinar dari setiap berkas dan informasi titik kontrol tanah yang diberikan. Prinsip *bundle adjustment* adalah menghubungkan secara langsung sistem koordinat foto ke sistem koordinat tanah tanpa melalui tahap orientasi relatif dan absolut. Secara matematis, persamaan *bundle adjustment* dapat diekspresikan sebagai persamaan transformasi konform tiga dimensi, yaitu:

$$\begin{bmatrix} Xp \\ Yp \\ Zp \end{bmatrix} tanah = \begin{bmatrix} Xo \\ Yo \\ Zo \end{bmatrix} + \lambda R \begin{bmatrix} Xp \\ Yp \\ Zp \end{bmatrix} foto ; \dots (2. 10)$$

Dimana :

Xp, Yp, Zp : Posisi p dalam koordinat tanah

Xo, Yo, Zo : Posisi Pusat Proyeksi Kamera

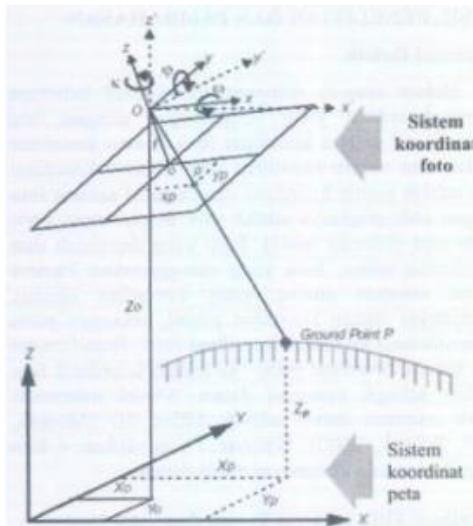
Xp, Yp, Zp : Posisi p dalam koordinat foto

λ : faktor skala.

f : fokus lensa

r_{11}, \dots, r_{33} : elemen matriks R^T

$\phi, \omega, \kappa, Xo, Yo, Zo$: parameter eksterior orientasi



Gambar 2.11 Sistem Kolinier Pada Aero-Triangulation
(Sumbe : Harintaka, 2003)

Prinsip *bundle* adalah menggunakan inversi persamaan (2.10) yang dimodifikasi untuk menunjukkan koordinat foto merupakan fungsi dari koordinat tanah., sebagaimana ditunjukkan oleh persamaan (2.11), dengan r_{11}, \dots, r_{33} adalah elemen matriks rotasi R^T . Elemen matriks r_{11}, \dots, r_{33} ini merupakan fungsi rotasi terhadap sumbu X,Y,Z. Pembentukan Matrik R atau R^T (transpose matriK R) dapat dilihat secara detail pada Kraus (1994), Morgan (2004), dan Wolf (1983).

$$\begin{bmatrix} Xp \\ Yp \\ -f \end{bmatrix} = \frac{1}{\lambda} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{21} & r_{31} \\ r_{12} & r_{22} & r_{32} \\ r_{13} & r_{23} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Xp - Xo \\ Yp - Yo \\ Zp - Zo \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2. 11)$$

Pada persamaan (2.11) jika baris ke-1 dan ke-2 dibagi dengan baris ke-3 maka akan diperoleh persamaan kesegarisan (*collinear equation*) (persamaan 2.13).

$$\begin{aligned} xp &= -f \frac{(r_{11}(Xp-Xo)+r_{21}(Yp-Yo)+r_{31}(Zp-Zo))}{(r_{13}(Xp-Xo)+r_{23}(Yp-Yo)+r_{33}(Zp-Zo))} \\ yp &= -f \frac{(r_{11}(Xi-Xo)+r_{21}(Yi-Yo)+r_{31}(Zi-Zo))}{(r_{13}(Xi-Xo)+r_{23}(Yi-Yo)+r_{33}(Zi-Zo))} \\ &\dots\dots\dots (2. 12) \end{aligned}$$

Persamaan (2.12) menunjukkan bahwa posisi sebuah titik di permukaan tanah, di foto dan pusat proyeksi kamera terletak pada suatu garis lurus (Gambar 2.11). Persamaan kesegarisan tersebut mengandung 6 parameter, yang belum diketahui ($\phi, \omega, \kappa, Xo, Yo, Zo$) dan merupakan persamaan non linier sehingga perlu dilinierkan dengan menggunakan deret Taylor.

$$\begin{aligned} xp &= (xp)_o + \frac{\delta xp}{\delta x_o} \delta x_o + \frac{\delta xp}{\delta y_o} \delta y_o + \frac{\delta xp}{\delta z_o} \delta z_o + \frac{\delta xp}{\delta \omega} \delta \omega + \\ &\frac{\delta xp}{\delta \phi} \delta \phi + \frac{\delta xp}{\delta \kappa} \delta \kappa \end{aligned}$$

$$yp = (yp)_o + \frac{\delta yp}{\delta x_o} \delta x_o + \frac{\delta yp}{\delta y_o} \delta y_o + \frac{\delta yp}{\delta z_o} \delta z_o + \frac{\delta yp}{\delta \omega} \delta \omega + \frac{\delta yp}{\delta \varphi} \delta \varphi + \frac{\delta yp}{\delta \kappa} \delta \kappa$$

..... (2. 13)

Proses pembentukan persamaan normal untuk menyelesaikan persamaan (2.13) dapat dilihat lebih lanjut pada Kraus (1993), Morgan (2004), dan Wolf(1983). Dalam pemotretan foto udara untuk keperluan efisiensi biaya dan mempercepat proses, maka digunakan jumlah titik kontrol tanah seminimum mungkin. Keperluan dalam kerapatan titik kontrol tanah digunakan Triangulasi Udara, dimana secara matematis menggunakan pendekatan Bundle Block Adjustment. Kerapatan titik kontrol tanah ini menggunakan titik sekutu antar foto yang beratampalan, yang disebut *tie point* atau titik Von Gruber. Perataan tersebut dilakukan dengan menambahkan parameter koordinat titik (P), sehingga menjadi :

$$xp = (xp)_o + \frac{\delta xp}{\delta x_o} \delta x_o + \frac{\delta xp}{\delta y_o} \delta y_o + \frac{\delta xp}{\delta z_o} \delta z_o + \frac{\delta xp}{\delta \omega} \delta \omega + \frac{\delta xp}{\delta \varphi} \delta \varphi + \frac{\delta xp}{\delta \kappa} \delta \kappa + \frac{\delta xp}{\delta xp} \delta p + \frac{\delta xp}{\delta yp} \delta yp + \frac{\delta xp}{\delta zp} \delta zp$$

$$yp = (yp)_o + \frac{\delta yp}{\delta x_o} \delta x_o + \frac{\delta yp}{\delta y_o} \delta y_o + \frac{\delta yp}{\delta z_o} \delta z_o + \frac{\delta yp}{\delta \omega} \delta \omega + \frac{\delta yp}{\delta \varphi} \delta \varphi + \frac{\delta yp}{\delta \kappa} \delta \kappa + \frac{\delta xp}{\delta xp} \delta p + \frac{\delta xp}{\delta yp} \delta yp + \frac{\delta xp}{\delta zp} \delta zp$$

..... (2. 14)

Persamaan (2.14) adalah teknik *Bundle adjustment* untuk mendapatkan nilai parameter *EO* dan koordinat titik obyek didalam sistem kartesian 3D. Jika titiktitik obyek ini hendak dihitung dengan tingkat kekurasian yang lebih tinggi lagi, maka kesalahan sistematis didalam kamera harus dimodelkan.

2.10 Penelitian Terdahulu

Penelitian yang mendasari penulis dalam pemilihan judul dan topik pembahasan diantaranya adalah penelitian yang dilakukan Harintaka, dkk (2014) memiliki hasil penelitian nilai parameter IOP dan EOP serta hasil pengukuran Koordinat Tanah. Penelitian ini dilakukan dengan 3 metode kalibrasi kamera, yaitu kalibrasi *In-Lab*, kalibrasi *In-Field* dan kalibrasi *In-Flight* dengan menggunakan wahana UAV yang dilengkapi dengan kamera *digital* dan *Total Station* sebagai alat ukur koordinat tanah.

Penelitian kedua yang mendasari penulis dalam pemilihan judul dan topik pembahasan diantaranya adalah penelitian yang dilakukan Kusumadharna (2008) memiliki hasil penelitian nilai parameter IOP serta hasil pengukuran Koordinat Tanah. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan kamera *digital* dan *Total Station* sebagai alat ukur koordinat tanah. Penelitian ini dilakukan dengan 2 metode kalibrasi yaitu kalibrasi *In-Lab* dan kalibrasi *In-Field*

Penelitian ketiga yang mendasari penulis dalam pemilihan judul dan topik pembahasan diantaranya adalah penelitian yang dilakukan Hamid (2014) memiliki hasil penelitian nilai parameter IOP. Penelitian ini dilakukan dengan 2 metode kalibrasi yaitu kalibrasi *In-Flight* dan kalibrasi *In-Field*.

Tabel 2.1 Spesifikasi Penelitian Terdahulu

Peneliti	Alat	Data	Metode Kalibrasi
Harintaka (tahun 2009)	Total Station, Kamera <i>Digital</i> , UAV	(EOP dan IOP), Koordinat Tanah	<i>In-Flight, In-Lab, In-Field</i>
Kusumadharna (tahun 2008)	Total Station, Kamera <i>Digital</i>	EOP dan IOP), Koordinat Tanah	<i>In-Lab, In-Field</i>
Hamid (tahun 2014)	Kamera <i>Digital</i> , UAV	EOP dan IOP	<i>In-Lab, In-Field</i>

Pada penelitian ini dilakukan kalibrasi dengan 2 metode, yaitu kalibrasi *In-Field* dan kalibrasi *In-Flight*. Kalibrasi *In-Field* dilakukan dengan menggunakan papan kalibrasi dimana posisi UAV (Drone) dalam keadaan tidak terbang, sedangkan kalibrasi *In-Flight* dilakukan dengan menggunakan papan kalibrasi sebanyak 25 buah dan Total Station sebagai alat penunjang pengukuran koordinat tanah, kalibrasi ini dilakukan dengan UAV dalam keadaan terbang. Hasil dari penelitian ini berupa parameter kalibrasi kamera dari masing-masing metode, metode kalibrasi *In-Field* menghasilkan IOP dan kalibrasi *In-Flight* menghasilkan IOP dan EOP. Perbedaan hasil ini disebabkan karena kalibrasi *In-Field*, UAV dalam keadaan tidak terbang / *flight*.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian ini dilakukan di kampus ITS Surabaya. Adapun untuk metode kalibrasi *In-Field* dilakukan di laboratorium KKP (Kadaster Kebijakan Pertanahan) sedangkan untuk kalibrasi *In-Flight* dilakukan di lapangan voli ITS (FASOR).

3.2 Data dan Peralatan

3.2.1. Data

Data yang digunakan dalam penelitian tugas akhir ini antara lain:

- a. Data Titik Kontrol Tanah dari hasil pengukuran Total Station sebanyak 25.
- b. Data pengambilan foto grid pada kalibrasi *In-Field* dengan 12 orientasi sebanyak 3 kala dan data kalibrasi *In-Flight* dengan 9 orientasi foto sebanyak 1 kala.

3.2.2. Peralatan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian tugas akhir ini antara lain:

1. Perangkat untuk mengolah data serta membuat laporan terdiri dari Laptop Asus X451CAP, Australis 8.25[®], Photomodeler Scanner (versi demo) dan microsoft office 2013[®].
2. Perangkat pengambilan data terdiri dari DJI Phantom 3 beserta kamera Sony Exmor, Total Station Serta Grid kalibrasi *In-Field* dan *marker* kalibrasi *In-Flight*.

a. DJI Phantom 3 Advance

Tabel 3.1 Spesifikasi DJI Phantom 3

Berat (termasuk baterai dan balingbaling)	1280 g
Ukuran diagonal (termasuk balingbaling)	350 mm
Kecepatan naik maksimal	5 m/s
Kecepatan turun maksimal	3 m/s
Kecepatan maksimum	16 m/s
Tinggi maksimal (dalam mdpl)	19685 feet (6000)
Waktu maksimal terbang	23 menit
Rentang suhu	32° - 104° F (0°-40° C)
Satellite Positioning Systems	GPS/GLONASS
Hover Accuracy Range	Vertikal : + 0.1 m ; + 0.5 m Horizontal : + 1.5 m
Vision System	Downward Vision System
Kecepatan	≤ 8 m/s
Altitude	50 – 300 m/s
Operating Range	50 – 300 m/s
Gimbal : Jarak Opera	Pitch : -90° - (+30°)
Remote	
Model	GL358wB, GL390Wb
Frekuensi	5.725 GHz – 5.825 GHz
Jarak Transmisi Maksimal	FCC: 1200m, CE: 500 m
Rentang Suhu	0°-40° C
Battery	2600 mAh LiPo 18650 2S
Working Voltage	300 , 7.4 V

b. Kamera Sony Exmor

Tabel 3.2 Spesifikasi kamera Sony Exmor

Sensor	Sensor Sony EXMOR ½.3” CMOS. Effective pixels: 12.4 M
Lens	Lens FOV 94 20mm (35mm format equivalent) f/2.8
ISO Range	100-3200 (video) 100-1600 (foto)
Electronic Shutter Speed	8s-1/8000s
Image Max Size	4000x3000
Photography Mode	Single Shot Burst shooting : 3/5/7framesAuto Exposure Bracketing (AEB) :3/5 at 0.7 EV Bias Timelapse
Photo Formats	JPEG, DNG

c. Total Station

Tabel 3.3 Spesifikasi Total Station

Specifications Total Station	
Model	ZTS-320/320R
Angle Measurement (Hz, V)	
Measurement Method	Absolute Encoder
Display resolution	1”/5”selectable (2 mgon)
Accuracy ^{*1}	2”

Specifications Total Station		
Distance Measurement		
Laser output		
Measuring Range	Reflector-less ^{*2}	350m (1,148 ft.)
	Reflector (60mmx60mm)	800m (2.624 ft.)
	Single prism	2000m to 2500m (6,560 ft. to 8,200ft.)
	Three prism	5000m (16,400ft.) under good condition ^{*3}
Accuracy	Reflector-less	$\pm (3+2\text{ppm} \times D)$ mm
	Prism	$\pm (2+2\text{ppm} \times D)$ mm
Measuring Time	Reflector-less	Fine/Repeat 2s, tracking 1.5s
	Prism	Find 1.5s, Repeat 1s, tracking 0.5s
Telescope		
Magnification		30X
Field of View		1°30'
Minimum Focusing Distance		1.5m (4.9ft.)
Reticle		Illuminated
Compensator		
System		Single-axis liquid- electric tilt sensor
		Dual-axis (optional)
Working Range		$\pm 3'$ (± 56 mgon)
Setting Accuracy		1" (0.3 mgon)

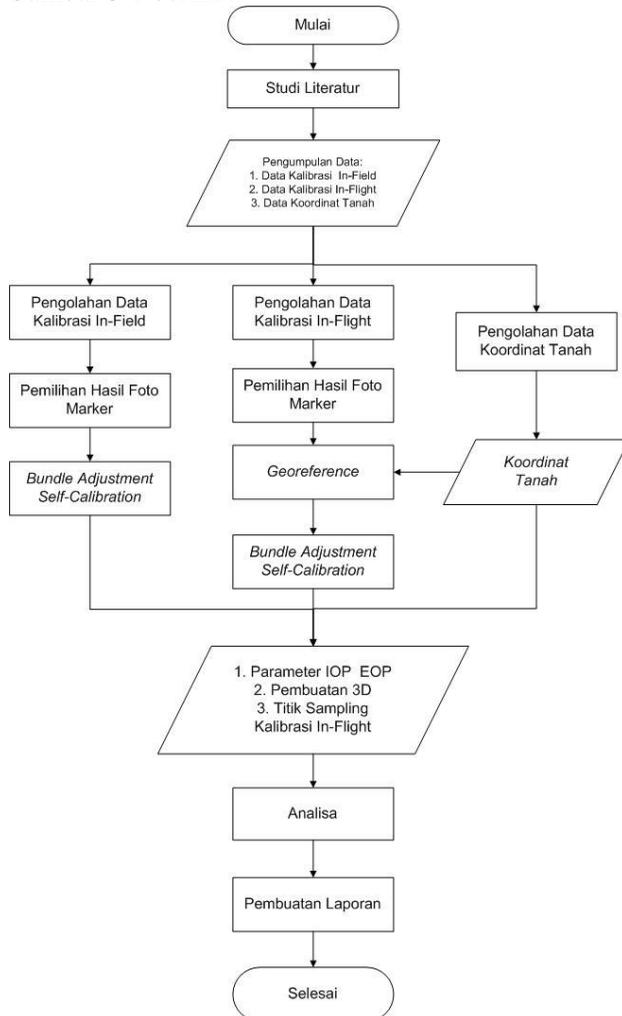
Spesification Total Station		
General		
Communication	Internal Data Memory	Approx. 20,000 Points
	Interface	Standard RS232 port, SD card ^{1*4} , mini USB , standard USB port (Bluetooth optional)
	Data Format	ASCII (DXF/GSI optional)
	Operation system	Real-time English Operating System
	Display	Graphics:192*96 dots /backlight / Character:6 lines*12 characters/ contrast adjustment
	Keyboard	2 sides Alphanumeric keyboard
Laser Plummet	Type	Laser diode, Brightness Adjustment in steps
		Optical plummet (optional)
	Beam Accuracy	1 mm (1.5m instrument height)

Specifications Total Station		
General		
Power supply	Battery Type	Rechargeable Li-ion battery
	Voltage/Capacity	ZBA-400:7.4V(DC) / 3000mAh
	Operating time with ZBA-400	Optimal 16 hrs ^{*5} (single distance measurement every 30 second)
	Measuring times	Around 12000 times
Weight (Incl. Battery & Tribrach)		Approx. 5.5kg (12.1lb.)
Environmental	Operating temperature	-20°C to + 50°C (- 4°F to +122°F)
	Storage temperature	-40°C to + 70°C (- 40°F to + 158°F)
	Dust & Water proofing (IEC60529 Standard)	IP55

3.3 Metodologi Penelitian

3.3.1. Tahapan Penelitian

Tahapan dari penelitian ini ditunjukkan dalam Gambar 3.1 berikut:



Gambar 3.1 Diagram Alir Tahapan Penelitian

1. Studi Literatur

Pada tahap ini dilakukan penentuan bagaimana Kalibrasi Kamera pada UAV Jenis Multicopter RTF dengan menggunakan 2 metode dari kalibrasi kamera yaitu kalibrasi *In-Field* dan *In-Flight*.

2. Pengumpulan Data

a. Pengumpulan Data Kalibrasi *In-Field*

Pada tahap ini data yang terkumpul melalui pemotretan foto di laboratorium dengan pengambilan 12 orientasi sebanyak 3 kala menggunakan *marker*.

b. Pengumpulan Data Kalibrasi *In-Flight*

Pada tahap ini data yang terkumpul melalui pemotretan foto udara menggunakan Dji Phantom 3 Advance dengan *marker* sebagai target pengukuran foto udara dan titik kontrol tanah dilakukan di lapangan voli (Fasor ITS).

c. Pengumpulan Data Titik Kontrol Tanah

Pada tahap ini dilakukan pengukuran menggunakan Total Station dengan 25 *marker* sebagai *benchmark* dengan sistem koordinat lokal.

3. Pengolahan Data

a. Pengolahan Kalibrasi *In-Field*

Pada proses pengolahan data ini dilakukan menggunakan *software* Photomodeller Scanner ®(demo) dengan ketentuan *marker* yang berada pada format *software* tersebut dengan pendekatan matematika *bundle adjustment self-calibration* untuk menghasilkan nilai parameter IOP. Proses pengolahan data yang diolah sebanyak 12 orientasi pengambilan foto dan dilakukan hingga 3 kala.

b. Pengolahan Kalibrasi *In-Flight*

Pada proses pengolahan data ini dilakukan menggunakan *software* Australis® (demo) dengan ketentuan *marker* yang berada pada *software*

tersebut setelah itu dilakukan *georeferencing* menggunakan data pengukuran data koordinat tanah. Setelah itu dilakukan pendekatan model matematika *bundle adjustment self-calibration* untuk menghasilkan 3D dan nilai parameter IOP dan EOP.

c. Pengolahan Titik Kontrol Tanah

Pada tahapan ini dilakukan pengolahan dari pengukuran menggunakan Total Station data yang telah didapat di lapangan dengan metode tachimetri menggunakan *software* microsoft excel.

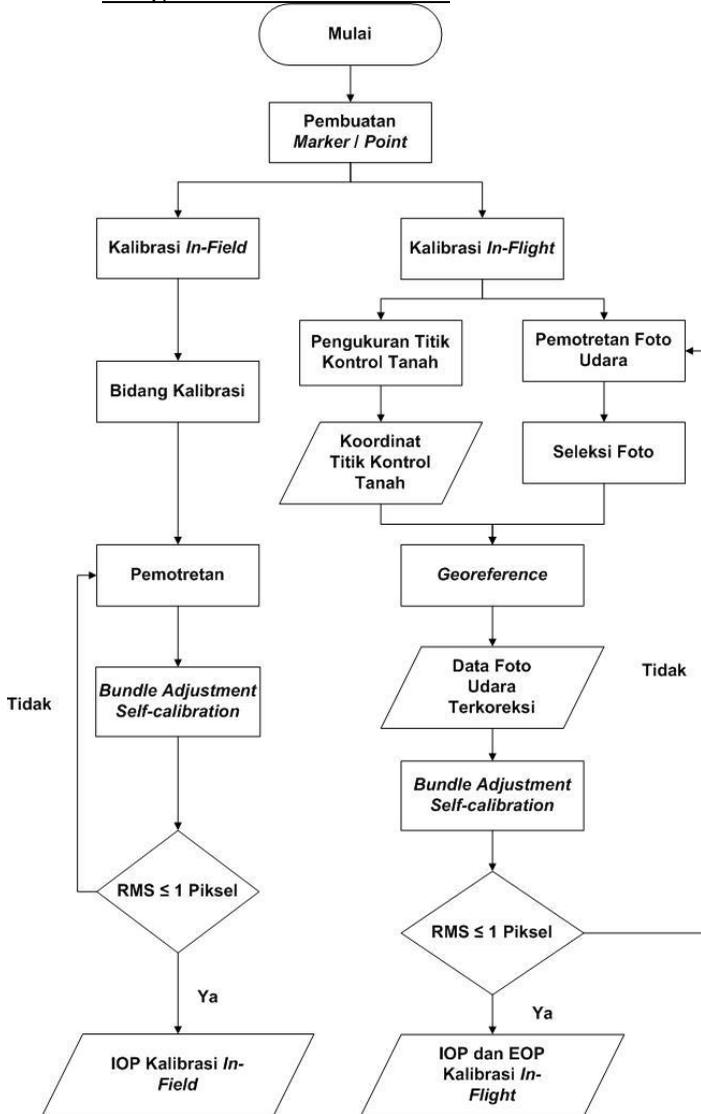
4. Analisa Data

Dari pengolahan data yang dilakukan oleh 2 metode kalibrasi tersebut selanjutnya akan dilakukan analisa untuk mendapatkan nilai dari kalibrasi kamera, baik itu kalibrasi *In-Field* maupun kalibrasi *In-Flight*. Analisa data kalibrasi berupa IOP (*Interior Orientation Parameter*) yang berasal dari masing-masing metode, dimana kedua metode tersebut akan dibandingkan hasilnya. Apabila mendapatkan nilai yang tidak terlalu besar diantara 2 metode tersebut maka nilai IOP yang dihasilkan cukup stabil/konstan dan pada kalibrasi *In-Flight* hasil yang didapat bukan hanya nilai IOP tetapi juga nilai EOP yang digunakan sebagai penentu posisi dan orientasi untuk uji kestabilan pada kamera Sony Exmor.

5. Pembuatan Laporan

Pada tahap ini merupakan tahap penulisan laporan Tugas Akhir yang telah dilakukan.

3.4 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.2 Diagram Alir Pengolahan Data

Pada diagram alir (gambar 3.2) diatas ini, ada 2 proses pengolahan data yang dibagi berdasarkan *software*, yaitu kalibrasi *In-Field* dengan Photomodeller Scanner® (demo) dan kalirasi *In-Flight* dengan Australis® (demo):

1. Kalibrasi *In-Field*

Pada proses pengolahan data ini dilakukan menggunakan *software* Photomodeller Scanner ®(demo) yaitu terdapat proses dalam proses pengolahan pengambilan data:

a. Bidang Kalibrasi

Bidang kalibrasi diperoleh dengan ketentuan yang berada pada *software* Photomodeller Scanner dengan ukuran kertas (A0). Pada bidang kalibrasi ini *software* dapat membaca kode yang berada pada *marker* bidang kalibrasi

b. Pemotretan

Pemotretan ini dilakukan dengan kesesuaian yang berada pada *software* yaitu sebanyak 12 posisi/orientasi. Pada proses ini dilakukan sebanyak 3 kala. Pada setiap kala akan dilakuakan seleksi foto yang baik untuk diolah hal ini berpengaruh terhadap hasil *bundle adjustment*.

c. Bundle Adjustment Self-calibration

Proses pengolahan ini dilakukan *automatic calibration* dengan memasukan hasil foto yang sesuai dengan ketentuan pada *software*. Hasil dari *bundle adjustment self-calibration* ini berupa parameter IOP yaitu (c, xo, yo, K1, K2,P1,P2).

2. Kalibrasi *In-Flight*

Pada proses pengolahan data ini dilakukan menggunakan *software* Australis®(demo) yaitu terdapat proses dalam proses pengolahan pengambilan data:

- a. Pengukuran Titik Kontrol
Pengukuran titik kontrol dilakukan dengan menggunakan metode tachimetri dengan *marker* sebagai *benchmark* sebanyak 25 titik kontrol. Sistem koordinat yang digunakan yaitu lokal dengan koordinat awal (0,0) menggunakan Total Station dan diolah dengan *software* microsoft excel.
- b. Pemotretan Foto Udara
Pemotretan pada tahap ini dilakukan pada wadah atau *background* yang sewarna dan berlawanan dengan warna *marker*, *marker* ini ditentukan pada *software* Australis. Pengambilan foto dilakukan sebanyak minimal 9 sisi/orientasi dan dilakukan sebanyak 1 kala, hal ini berpengaruh terhadap hasil IOP, EOP dan 3D.
- c. Georeferencing
Pada tahapan ini merupakan proses dari transformasi koordinat pada pengukuran titik kontrol tanah dengan hasil koordinat titik marker pada foto udara. Pada proses tranformasi ini titik koordinat pengukuran tanah menjadi nilai yang benar/acuan terhadap hasil dari pengukuran yang dilakukan dengan pengukuran pada foto udara.
- d. *Bundle Adjustment Self-calibration*
Pada tahap ini data foto udara yang telah *georeferencing* akan diolah menggunakan pendekatan model matematika *bundle adjustment self-calibration* sehingga menghasilkan nilai IOP, EOP dan bentuk visual 3D dari *software* Australis.

BAB IV HASIL DAN ANALISA

4.1 Hasil dan Analisa Nilai Sensor Kamera Sony Exmor

Kamera Sony Exmor memiliki keterbatasan dalam hal kestabilan memperoleh nilai IOP dan EOP, oleh karena itu perlunya kalibrasi dalam hal tersebut. Berikut adalah hasil perubahan sensor yang ada pada alat namun berbeda dengan hasil pabrik. Kamera Sony Exmor memiliki 12.4 MP, dengan menggunakan rumus *pythagoras*, dimana dengan nilai $\frac{1}{2} \cdot 3$ CMOS didapat tepi sensor (6.2x4.6 mm) sehingga didapat nilai ukuran 7.7 mm, maka dihasilkan sensor 29,1 piksel. Hasil penelitian ini didapat (3.9 x 1.6) dengan menggunakan transformasi dari hasil ukuran *software* Austrlis ke *software* Photomodeler maka didapat ukuran 4.21 mm (15.9 MP).

4.2 Hasil dan Analisa Kalibrasi In-Field

Hasil kalibrasi In-Field menggunakan media papan dengan format grid kalibrasi yang berasal dari software Photomodeller Scanner dimana hasilnya berupa parameter IOP (*Interior Parameter Orientation*). Hasil kalibrasi *In-Field* ini akan digunakan untuk mengetahui nilai pembandingan kalibrasi *In-Flight*, berikut hasil dari 3 kala kalibrasi.

Tabel 4.1 Hasil Kalibrasi *In-Field*

Variabel IOP	Kala 1	Kala 2	Kala 3
C	3,760 mm	3,767 mm	3,767 mm
Xp	3,249 mm	3,249 mm	3,254 mm
Yp	2,399 mm	2,398 mm	2,397 mm
K1	7,397e-004	1,066e-003	6,282e-004
K2	-4,159e-005	-6,095e-005	-8,357e-006
P1	2,978e-005	1,852e-005	-1,106e-004
P2	-5,791e-005	-9,527e-005	-6,930e-005

Ketelitian yang dihasilkan dari 3 kala kalibrasi diatas masih memiliki kekurangan dalam menghasilkan nilai *area* foto yang tercakup. Oleh karena itu data yang mendekati dalam *area* yang tercakup sebesar 68% dari yang direkomendasikan sebesar 80% adalah data kala 2, sehingga menghasilkan nilai *RMS point residual* sebesar 0,48 *pixel* dan *point precision* 0.375 mm.

4.3 Hasil dan Analisa kalibrasi *In-Flight*

Hasil kalibrasi *In-Flight* menggunakan papan kalibrasi berukuran 40 cm X 40 cm dengan dilapisi sebuah kertas hitam dan diberi stiker reflektor berdiameter 10 cm di posisi *center* pada papan tersebut. Kalibrasi ini diolah dengan menggunakan software Australis dimana hasilnya berupa parameter IOP dan menghasilkan parameter distorsi lensa baru berupa (K3,K4, dan K5) serta distorsi ketidakortogonalan X dan Y (B1, B2).

Tabel 4.2 Hasil Kalibrasi *In-Flight*

Variabel IOP	Value	Value (Setelah dilakukan perhitungan Principle Point)
C	4,012 mm	4,012 mm
Xp	0,141 mm	3, 991mm
Yp	-2,213 mm	1,637 mm
K1	-1,42868e-04	-1,42868e-04
K2	8.,5942e-06	8,65942e-06
K3	-2,21741e-07	-2,21741e-07
K4	2,64106e-09	2,64106e-09
K5	-1,16088e-11	-1,16088e-11
P1	-4,60783e-05	-4,60783e-05
P2	-3,04106e-04	-3,04106e-04
B1	-1,25159e-02	-1,25159e-02
B2	1,84932e-03	1,84932e-03

Perangkat lunak yang bisa digunakan untuk mendapatkan parameter kalibrasi kamera adalah photomodeler dan australis, namun terdapat perbedaan pada kedua perangkat lunak ini dalam mendefinisikan parameter *principal point* (x_p , y_p). Pada australis parameter yang didapat adalah jarak *offset* dari *principal point* yang seharusnya pada koordinat foto, sedangkan pada photomodeler yang didapat hanya nilai koordinat *principal point* pada sistem koordinat foto saja. Maka dari itu untuk menggunakan parameter *principal point* yang dihasilkan dari kalibrasi pada australis di photomodeler, perlu dilakukan perhitungan tambahan dengan rumus sebagai berikut:

$$X_p: \frac{\text{ukuran sensor}}{2} \times \text{rata - rata } x_p \text{ (Australis)}$$

$$Y_p: \frac{\text{ukuran sensor}}{2} \times \text{rata - rata } y_p \text{ (Australis)}$$

Ketelitian yang dihasilkan dari kalibrasi diatas masih memiliki kekurangan dalam menghasilkan nilai yang stabil terhadap kalibrasi *In-Field* sehingga hasil kalibrasi *In-Flight* memiliki selisih dari setiap variabel parameter kalibrasi *In-Field*. sehingga menghasilkan nilai *Point Residual* 0,56 *pixel* dan kualitas *Self-Calibration* sebesar 1,2.

4.4 Hasil dan Analisa Georeference

Kolinierisasi merupakan konsep dasar dari transformasi koordinat foto dengan koordinat tanah. Titik *sampling* yang ada pada hasil foto dan yang didapat melalui pengukuran terestris ini akan dilakukan *Georeference*, dimana titik dimulai dengan X dan Y (0 ,0).

Tabel 4.3 Koordinat Total Station dengan Foto

Titik <i>Sampling</i>	Total Station		Foto	
	X(m)	Y(m)	X(m)	Y(m)
1	0	0	0	0
2	5,174	-0,001	5,209	0,031
3	10,003	-0,033	10,037	0,001
4	15,028	0,075	15,067	0,109
5	20,505	0,087	20,61	0,121
6	20,017	5,132	20,071	5,162
7	14,555	5,087	14,451	5,056
8	10,054	5,186	10,089	5,218
9	5,683	5,356	5,735	5,407
10	-0,016	5,308	0,015	5,404
11	0,175	10,650	0,207	10,705
12	5,100	10,089	-	-
13	10,850	10,670	10,939	10,771
14	15,044	10,168	15,098	10,225
15	20,159	10,114	-	-
16	20,412	15,917	20,294	16,104
17	15,437	15,398	15,538	15,501
18	10,507	15,469	10,587	15,575
19	5,724	15,787	5,801	15,911
20	0,251	15,366	0,289	15,45
21	0,270	20,109	0,311	20,158
22	5,595	20,134	5,535	20,087
23	10,676	20,451	10,711	20,513
24	15,195	20,550	15,246	20,631
25	20,205	20,019	20,378	20,051

Pada penelitian ini titik kontrol yang didapat melalui pengukuran terestris akan digunakan pada titik kontrol yang berada di hasil titik *sampling* foto udara. Titik *sampling* pada foto ditandai dengan sebuah marker. Setelah itu proses yang dilakukan yaitu mengubah orientasi foto pada sumbu X dan Y dengan kosep kolinierisasi. Sumbu X dan Y pada hasil foto sangat berpengaruh pada titik kontrol yang dihasilkan karena dapat membuat posisi titik *sampling* yang ada di foto berbeda dengan yang ada pada pengukuran terestris. Dari seluruh data kalibrasi kamera *infield*, yang berhasil diolah adalah sebanyak 23 titik dari 25. Hal ini disebabkan oleh:

1. Data koordinat pendekatan yang digunakan dari hasil transformasi koordinat.
2. Geometri pemotretan kurang baik.
3. Penandaan titik yang tidak tepat.
4. Jumlah kemunculan titik yang sama dalam foto.

1) Transformasi koordinat

Transformasi yang dilakukan dengan membandingkan data ukuran (Total Station, pita ukur) dengan hasil ukuran pada foto sehingga diketahui sejauh mana efek perambatan kesalahan ketika data pendekatan yang digunakan adalah hasil transformasi koordinat. Dengan menggunakan 9 foto pada kalibrasi *In-Flight* akan dihasilkan 8 *station* foto karena 1 foto mengalami kerusakan. Kemudian dilakukan transformasi koordinat untuk membentuk 1 model dari 8 foto. Model inilah yang digunakan sebagai koordinat pendekatan dalam proses reseksi. Banyaknya transformasi koordinat ini akan sangat berpengaruh terhadap hasil pengolahan karena akan ada perambatan kesalahan. Hasilnya adalah banyaknya titik yang akan ditolak ketika dilakukan *bundle adjustment*.

2) Geometri

Geometri pengukuran sudut yang baik adalah yang mendekati sudut 90° . Dari Gambar lampiran data kalibrasi *In-Flight*, terlihat bahwa cukup banyak foto sudut pengambilan fotonya tidak 90° . Ini dikarenakan *marker* yang tersusun tidak baik dan ketinggian dalam pemotretan yang kurang stabil. Hal ini memberikan dampak terhadap jarak yang dihasilkan antara koordinat foto dengan pengukuran TS cukup besar.

3) Penandaan titik

Titik yang ditandai di foto berupa target (*maker*) sehingga menyebabkan penandaan tidak bisa dilakukan dengan bantuan penanda otomatis (Automatic Marking) software yang digunakan. Ketidak tepatan dalam penandaan posisi titik di foto, antara satu foto dengan foto lainnya (proses referencing) akan menyebabkan kesalahan dalam penghitungan posisi titik tersebut sehingga menurunkan ketelitiannya. Jika sebuah titik muncul dalam dua atau lebih foto dan pengguna memperkirakan lokasi titik yang muncul dalam salah satu foto maka hasilnya akan memberikan ketelitian yang kurang dan mungkin akan ditempatkan dalam posisi yang salah dalam ruang 3D.

4) Kemunculan titik

Posisi yang direkam lebih dari dua posisi kamera (foto), dapat memberikan ketelitian posisi yang lebih baik dari pada yang hanya dihitung dari dua posisi kamera, karena semakin banyak persamaan pengamatan yang dibentuk dari perpotongan berkas-berkas sinar untuk menentukan posisi titik tersebut dengan tepat yaitu dengan menghitung posisi titik yang direkam lebih dari dua foto, maka dapat mengurangi kesalahan dalam proses penandaan titik (point marking) di foto, karena

kesalahan penandaan titik pada satu foto akan dikompensasi dari foto-foto lainnya. Jika hanya ada dua posisi kamera untuk sebuah titik, maka jika terjadi kesalahan penandaan titik, kesalahan akan sulit diketahui dan menyebabkan posisi titik tidak akurat.

4.3 Perbandingan parameter Pada Kalibrasi

Tabel 4.4 Perbandingan Hasil Parameter Kalibrasi

Variabel IOP	Kalibrasi In-Flight	Kalibrasi In-Field	Δ
C	4,012 mm	3,767 mm	0,245 mm
Xp	3,991mm	3,249 mm	0,742 mm
Yp	1,637 mm	2,398 mm	0,761 mm
K1	-1,42868e-04	1,066e-003	15,353
K2	8,65942e-06	-6,095e-005	0,927
P1	-4,60783e-05	1,852e-005	4,626
P2	-3,04106e-04	-9,527e-005	30,315

Dengan asumsi mode fokus kamera saat pengambilan foto tidak berubah, maka dapat diambil beberapa faktor - faktor yang mempengaruhi hasil kalibrasi kamera, yaitu:

1. Objek kalibrasi.

Penggunaan objek kalibrasi yang kurang sesuai dengan daerah/objek yang akan di ukur akan berpengaruh terhadap hasil pengukuran. Pada penelitian kalibrasi *In-Field* ini dilakukan dengan menggunakan bidang kalibrasi dengan format *grid/marker* yang ada pada *software* karena *software* tersebut hanya membaca marker dengan ketentuan tersebut dan pada penelitian kalibrasi *In-Flight* dilakukan dengan menggunakan papan kayu kecil sebagai marker, dimana luas lahan yang tidak seragam dengan ukuran bidang kalibrasi membuat marker/objek kalibrasi

tidak terlihat, untuk meminimalisir hal tersebut maka pemilihan objek yang memiliki dimensi fisik mendekati daerah/objek yang akan diukur.

2. Geometri Pemotretan.

Geometri pemotretan kalibrasi akan sangat berpengaruh terhadap hasil perubahan nilai parameter kalibrasi kamera, agar parameter kalibrasi kamera tidak saling berkorelasi (*Photomodeler Help File*).

Untuk keperluan fotogrametri maka parameter internal kamera seharusnya stabil, sehingga dapat meningkatkan kualitas hasil hitungan. Maka penggunaan metode *self calibration* sangatlah tepat, karena dapat memperkecil resiko tidak stabilnya parameter internal kamera, sebab kamera akan dikalibrasi menggunakan data ukuran saat kamera itu digunakan. Namun, untuk mendapatkan hasil *self-calibration* yang baik, dibutuhkan konfigurasi jaring stasiun pemotretan yang sangat konvergen dan sebaran titik yang baik (menyebar), dan pelaksanaan di lapangan tidak selalu menjamin didapatkannya geometri terbaik. Oleh karena itu baiknya kalibrasi dilakukan sebelum pengukuran yang sebenarnya dan menggunakan objek yang sesuai.

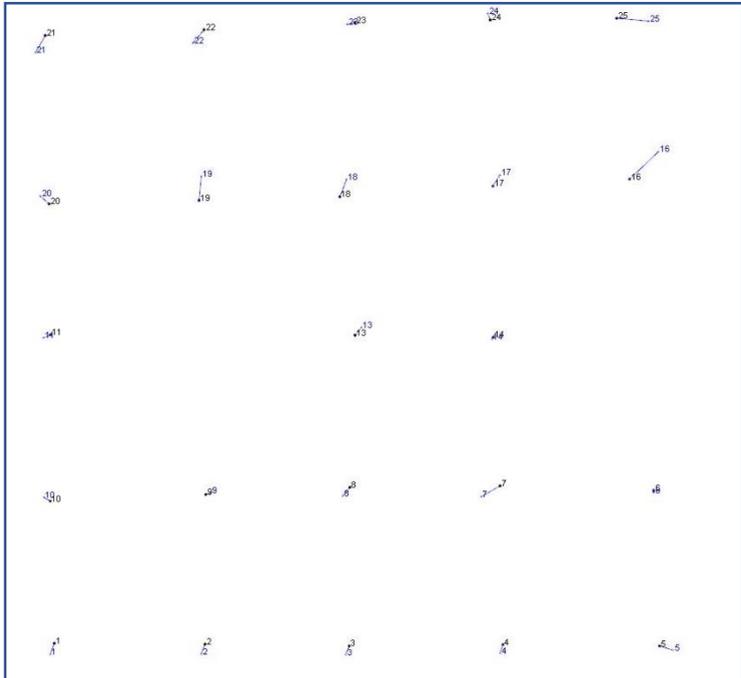
4.5 Hasil dan Analisa Distorsi

Distorsi yang didapat dari masing – masing metode kalibrasi kamera berdasarkan :

1. Analisa Presisi Data Koordinat dari Foto

Analisa didasarkan oleh hasil *bundle adjustment* dari software Australis. Jumlah titik yang diolah sebanyak 25 titik, namun titik yang berhasil diolah berjumlah 23 titik. Rata-rata sigma untuk tiap titik adalah 0,063 m ke arah X dan 0,064 m ke arah Y. Hasil ini sesuai dengan asumsi bahwa untuk pengukuran kalibrasi *In-Flight* ketelitian kearah Y akan lebih jelek dibandingkan pengukuran ke arah X. Ini karena pada

metode kalibrasi *In-Flight* arah Y adalah jarak pemotretan sebanding dengan arah Z pada fotogrametri udara. Dari hasil pengolahan *bundle adjustment* dapat dikatakan hasil pengolahan foto menunjukkan hasil yang presisi.



Gambar 4.1 Pergeseran Titik *Sampling* Foto

2. Analisa Akurasi Data Koordinat dari Foto
Tingkat akurasi koordinat hasil pengolahan foto dapat dilihat dengan menghitung kesalahan terhadap data koordinat dari ukuran Total Station. Nilai koordinat dari data Total Station diasumsikan sebagai nilai yang benar. Besar kesalahan dihitung dengan menggunakan RMS data pengukuran Total Station dan diperoleh

RMS 0,104 m. Tingkat keakuratan ini dapat dibandingkan dengan resolusi spasial dari kamera. Resolusi spasial adalah kemampuan sensor kamera untuk mendeteksi objek terkecil. Resolusi spasial kamera dapat dihitung menggunakan perbandingan sebagai berikut:

$$\frac{p}{c} = \frac{r}{D} ; \text{dimana}$$

- p : koordinat ruang gambar
 c : panjang fokus
 D : jarak kamera terhadap objek
 r : resolusi spasial

Kamera Sony Exmor yang digunakan memiliki ukuran sensor sebesar 0.110 mm, dengan jarak fokus 4 mm. Jika rata-rata jarak pemotretan adalah 10 m, maka resolusi spasial yang diharapkan adalah 0.275 m

4.6 Analisa Geometri Menurut Perka BIG

Pedoman yang digunakan dalam pengujian ketelitian geometri adalah Perka BIG Nomor 15 Tahun 2014 Tentang Pedoman Teknis Ketelitian Peta Dasar.

$$RMSE_x = \sqrt{\frac{\sum(D^2)}{n}} ; RMSE_y = \sqrt{\frac{\sum(D^2)}{n}}$$

$$RMSE = \sqrt{RMSE_x^2 + RMSE_y^2}$$

Keterangan :

D^2 : selisih antara koordinat yang diukur dilapangan dengan koordinat foto

n : jumlah titik

RMSE_r : pada posisi x dan y (horizontal)

RMSE_z : pada posisi z (vertikal).

Hasil data perhitungan antara koordinat foto dan lapangan hanya menggunakan 23 titik (n), untuk selisih antara koordinat yang diukur dilapangan dengan koordinat foto memiliki nilai 0,122 m untuk koordinat X sedangkan untuk koordinat Y sebesar 0,131 m. Sehingga menghasilkan nilai RMSE_x 0,073 m dan RMSE_y 0,075 m dan didapat RMSE sebesar 0,104 m dengan Menurut ketentuan perka BIG standar pengukuran akurasi menurut NMAS (*National Map Accuracy Standar*) adalah sebagai berikut:

Akurasi Horizontal NMAS = 1,5175 x RMSE_r

Akurasi Vertikal NMAS = 1,6499 x RMSE_z

Dengan ketentuan ketelitian untuk data vertikal dan horizontal, maka dibutuhkan hitungan toleransi ketelitian pembuatan peta RBI (Rupa Bumi Indonesia), yang mengacu pada NMAS (*National Map Accuracy Standar*). Pada penelitian hasil pengukuran dengan menggunakan DJI Phantom 3 Advance dengan kamera Sony Exmor menghasilkan akurasi horizontal sebesar 0,159 m dan berada dalam kelas 1 dengan skala besar 1:1000.

Tabel 4.5 Ketelitian Geometri Peta RBI

No	Skala	Interval Kontur (m)	Ketelitian Peta RBI					
			Kelas 1		Kelas 2		Kelas 3	
			Horizontal (CE90 dalam m)	Vertikal (LE90 dalam m)	Horizontal (CE90 dalam m)	Vertikal (LE90 dalam m)	Horizontal (CE90 dalam m)	Vertikal (LE90 dalam m)
1	1:1.000.000	400	200	200	300	300	500	500
2	1:500.000	200	100	100	150	150	250	250
3	1:250.000	100	50	50	75	75	125	125
4	1:100.000	40	20	20	30	30	50	50
5	1:50.000	20	10	10	15	15	25	25
6	1:25.000	10	5	5	7,5	7,5	12,5	12,5
7	1:10.000	4	2	2	3	3	5	5
8	1:5.000	2	1	1	1,5	1,5	2,5	2,5
9	1:2.500	1	0,5	0,5	0,75	0,75	1,25	1,25
10	1:1.000	0,4	0,2	0,2	0,3	0,3	0,5	0,5

4.7 Hasil dan Analisa Eksterior Orientasi Parameter

Pada kalibrasi *In-Flight* ini dilakukan penentuan posisi (X_c , Y_c dan Z_c) dan orientasi (ω , ϕ , κ) menggunakan konsep kesegarisan, dimana pada pengolahan ini diolah dengan *bundle adjustment self-calibration* yang berada pada software Australis®.

Tabel 4.6 Hasil Parameter EOP

Image	Parameter Orientasi			Parameter Posisi		
	ω (mm)	Φ (mm)	κ (mm)	X_c (mm)	Y_c (mm)	Z_c (mm)
1	1,570	0,000	0,000	-0,050	0,001	-0,008
2	1,704	0,117	0,777	777,553	1,337	-516,091
3	1,579	0,164	1,613	758,537	-16,216	64,529
4	1,458	0,103	2,429	544,720	-47,915	1150,942
5	1,421	-0,007	3,125	161,865	-50,604	1223,547
6	1,468	-0,132	-2,391	-640,931	-57,130	1427,609
7	1,596	-0,183	-1,585	-906,467	-55,822	659,687
8	1,722	-0,115	-0,743	-1028,914	-8,916	-565,444

Pada proses pengolahan menggunakan *bundle adjustment self-calibration* dibutuhkan minimal dua buah foto, dimana salah satu fotonya sebagai acuan yang digunakan untuk proses perhitungan nilai parameter posisi dan parameter orientasi pada foto kedua, dan pengolahan foto berikutnya terus diulang dengan menggunakan foto sebelumnya. Dari hasil yang didapat ditunjukkan bahwa hasil untuk model *exterior orientation parameter* dari kalibrasi *In-Flight* menghasilkan nilai yang berbeda pada masing-masing foto.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

1. Berdasarkan pengambilan data kalibrasi *In-Field* dan kalibrasi *In-Flight* terdapat perbedaan hasil IOP yang relatif kecil pada panjang fokus lensa sehingga dapat disimpulkan bahwa kamera Sony Exmor dapat digunakan untuk pemetaan skala besar untuk akurasi pada nilai horizontal dengan acuan Perka BIG No.15 tahun 2014, dimana skala besar tersebut masuk dalam kelas 1 dengan skala 1:1000, karena nilai yang dihasilkan untuk akurasi horizontal pada RMSEr yang didapat sebesar 0,159 m dimana pada kategori skala 1:100 dengan kelas 1 memiliki nilai batasan 0,20 m.
2. Pada metode pengukuran data titik *sampling* dengan menggunakan foto dapat digunakan sebagai data pembandingan dengan metode pengukuran terestris karena pada kalibrasi kamera *In-Flight* parameter EOP (orientasi penentu) mengalami perubahan kecil antar foto, dengan nilai rata-rata dari ω sebesar 1,565, ϕ sebesar -0,007 dan κ sebesar 0,403.
3. Distorsi berupa jarak radial yang dihasilkan oleh kalibrasi kamera *In-Flight* sebesar 7,8 mm dan kalibrasi kamera *In-Field* sebesar 0,375 mm sehingga terjadinya pergeseran linier koordinat foto terhadap koordinat tanah rata-rata sigma untuk tiap titik adalah 0,063 m ke arah X dan 0,064 m ke arah Y sehingga menghasilkan RMSE terhadap koordinat X: 0,073 m dan RMS terhadap Y: 0,075 m.

5.2. Saran

1. Lakukan orientasi pengambilan foto sebanyak-banyaknya atau minimal 6 orientasi, sebagai pembandingan antara banyak persamaan pengamatan yang dihasilkan, dan juga mengetahui pergeseran panjang *focal length*, *principal point*, dan *lens distortion*. Hal ini juga berpengaruh terhadap *bundle adjustment self-calibration*.
2. Teknis persiapan peralatan yaitu pada saat pembuatan marker untuk keperluan kalibrasi *In-Field* maka gunakan stiker *reflektor* agar *marker* dapat terbaca oleh *software* dan pengambilan foto harus pada pada pencahayaan dan cuaca yang baik serta warna *background* peletakan marker harus sewarna.
3. Perlu pengujian dengan metode sistem teristris sebagai pembandingan tingkat akurasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Atkinson, K.B. 1996. Close Range Photogrammetry and Machine Vision. Whittles Publishing. Scotland, UK
- Aulejtner, M.. 2011. Investigation on methods for making detailed digital models of sculptures and other artefacts. poland: Akademia Górniczo-Hutnicza Im.
- Barnadib, M.R ., 2014. Pemetaan Cepat dan Visualisasi Data Spasial Pasca Kejadian Bencana Gempa Aceh Tengah. Yogyakarta: Jurusan Teknik Geodesi Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada.
- Brown, D.C., 1971. Calibration of close-range cameras. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 19(5) unbound paper: 26 pages, ISP Congress, Ottawa.
- Danurwendi, C. 2012. Pemanfaatan Fotogrametri Rentang Dekat Dalam Bidang Arsitektur Lanskep (Studi Kasus : Campus Center ITB). Bandung: : Institut Teknologi Bandung
- DJI. 2016. User Manual : DJI Phantom 3. Shenzhen: DJI
- Fryer, J.G., Goodin, D.J. 1989. In-flight aerial camera calibration from photography of linear features. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 55(12): 1751-1754. Handbook of practical camera calibration methods and models.
- Fraser, C., Remondino, F. 2006. Digital Camera Calibration Methods: Consideration and Comparisons. Department of Geomatics, University of Melbourne, Australia.

- Hanifa, N. R. 2007. Studi Penggunaan Kamera Digital Low-Cost Non-Metric Auto Focus untuk Pemantauan Deformasi. Bandung: Program Studi Teknik Geodesi dan Geomatika Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan Institut Teknologi Bandung.
- Hamid, N.F.A ., Ahmad, A. 2014. Calibration of high resolution digital camera based on different photogrammetric methods. Johor, Johor Bahru, Malaysia: Universiti Teknologi Malaysia.
- Harintaka, Subaryono, Susanto, A., & Hartono. 2009. Pemodelan Ketidakstabilan Kamera Dan Gerakan Pesawat Pada Saat Pemotretan Foto Udara Format Kecil. Yogyakarta: Universitas Gajahmada
- Honkavaara., E 2004. In-flight Camera Calibration for Direct Georeferencing. Finland: Finnish Geodetic Institute.
- Hothmer, J. 1959. Possibilities and limitations for elimination of distortion in aerial photographs (continued). Photogrammetric Record, 3(13): 60-78. USA
- Kusuma, A. 2008. Aplikasi Close Range Photogrametry dalam Pemetaan Bangun Rekayasa dengan Kamera Dijital Non Metrik Terkalibrasi. Bandung : Institut Teknologi Bandung.
- Kraus, K. 1993. Photogrammetry, Volume 1: Fundamentals and Standard Processes, ISBN: 3-427-78684-6, 4th Edition, Dumler Verlag, Bonn.
- Maharani, M. 2015. Analisis Ketelitian Model Tiga Dimensi Bangunan Besar yang Dihasilkan dari Metode Fotogrametri Jarak Dekat. Yogyakarta : Jurusan Teknik Geodesi Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada

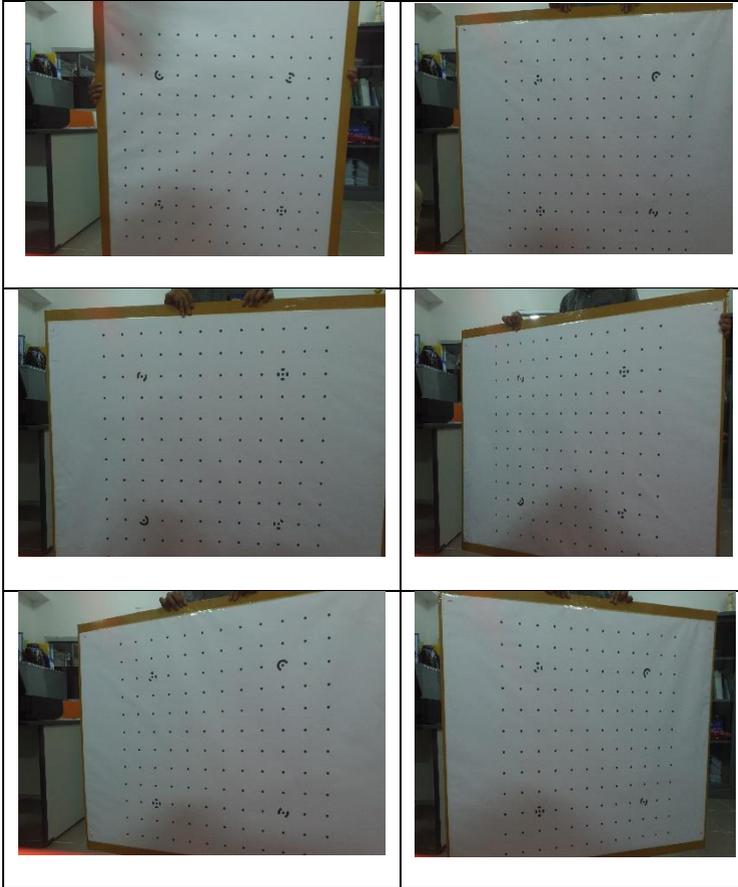
- Merrit, E.L. 1948. Field Camera Calibration. Photogrammetric Engineering Record, 17(4): 611-535. USA
- Merrit, E.L. 1951. Methods of Field Camera Calibration. Photogrammetric Engineering Record, 17(4): 611-535. USA.
- Morgan, M. 2004. Epipolar Resampling of Linear Array Scanner Scenes, Ph.D Dissertation, Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, Canada.
- Peraturan Kepala BIG Nomor 15 Tahun 2014 Tentang Pedoman Teknis Ketelitian Peta Dasar. Badan Informasi Geospasial (BIG).
- Purwanto, T.H. 2017. Pemanfaatan Foto Udara Format Kecil untuk Ekstraksi Digital Elevation Model dengan Metode Stereoplotting. Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia.
- Ricolfe-Viala, C., Sanchez-Salmeron, A. J., 2010. Lens Distortion Models Evaluation. Spain : Department of Systems Engineering and Automatic Control, Polytechnic University of Valencia
- Schenk, T. 2000. Digital Photogrammetry, Volume 1: Background, Fundamentals, Automatic Orientation Procedure, ISBN: 0-9677653-0-7, TerraScience.
- Sedorovich, A., O'Hara, C., and Schuckman, K. 2010. Image Accuracy Checkpoint Collection Guide. Penn State University.

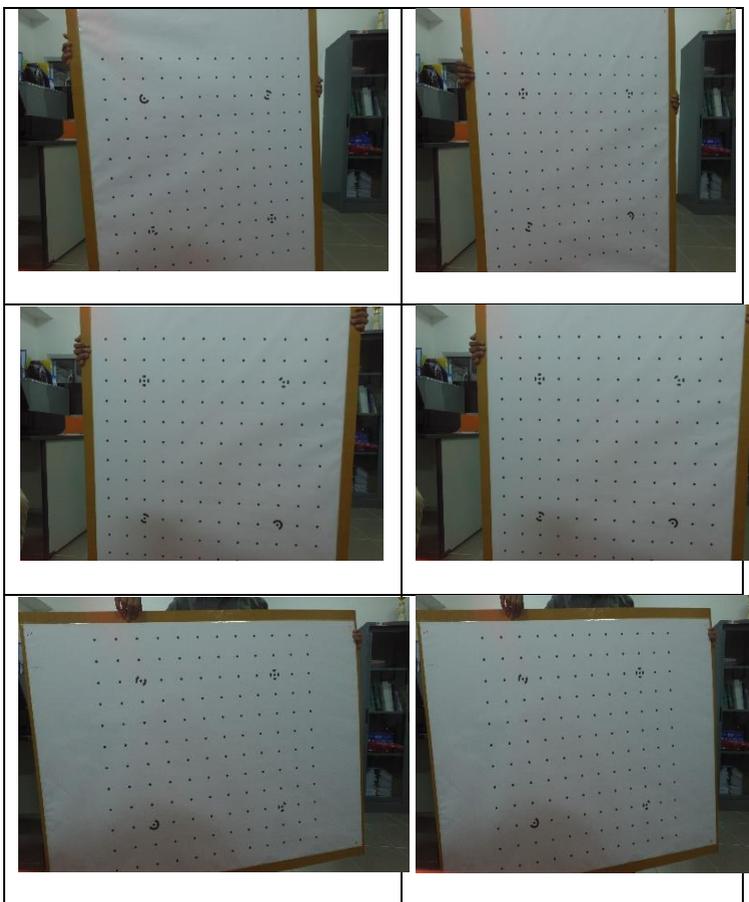
- Seto, Y. 2013. Laporan Metrik Fotogrametri. [https://id.scribd.com/document/191090667/LAPORAN METRIK-FOTOGRAFI](https://id.scribd.com/document/191090667/LAPORAN-METRIK-FOTOGRAFI), diakses 20 november 2017
- Soeta .2004. *Fotogrametri Digital*. Yogyakarta: Jurusan teknik Geodesi, Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada,
- Soeta. 2011 ,*Fotogrametri I*, Diktat. Yogyakarta : Jurusan Teknik Geodesi Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada
- Stansaas, G. L. 2007. US Geological survey Digital aerial mapping camera certification and quality assurance plan for digital imagery. Photogrammetric Week 2007. <http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications>, diakses tanggal 4 Februari 2017.
- Suharsana, 1997, *Fotogrametri Dasar*, Jurusan teknik Geodesi, Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta
- Wolf, P.R., 1983, Elements of Photogrammetry, 2nd edition. McGraw-Hill Book Company. USA.
- Yilmazturk, F. 2011. Full-automatic self-calibration of color digital cameras using color targets. Optic Express: USA.

LAMPIRAN

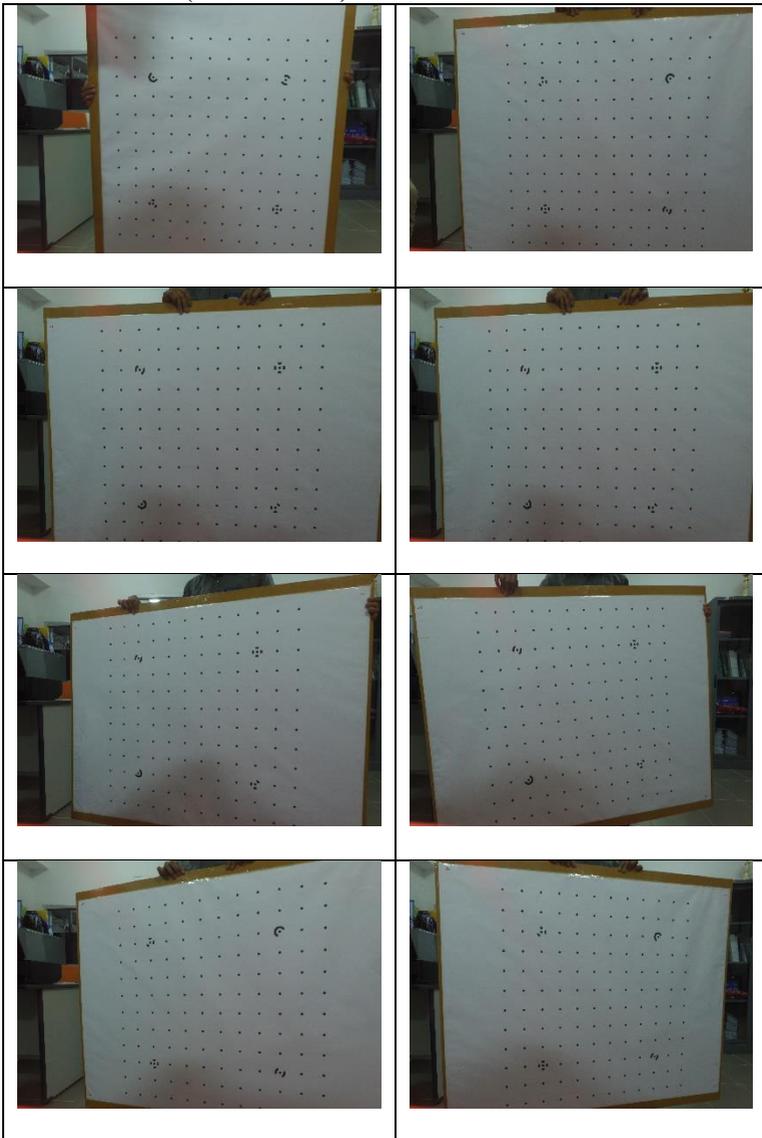
Lampiran 1. Data Kalibrasi Kamera *In-Field*

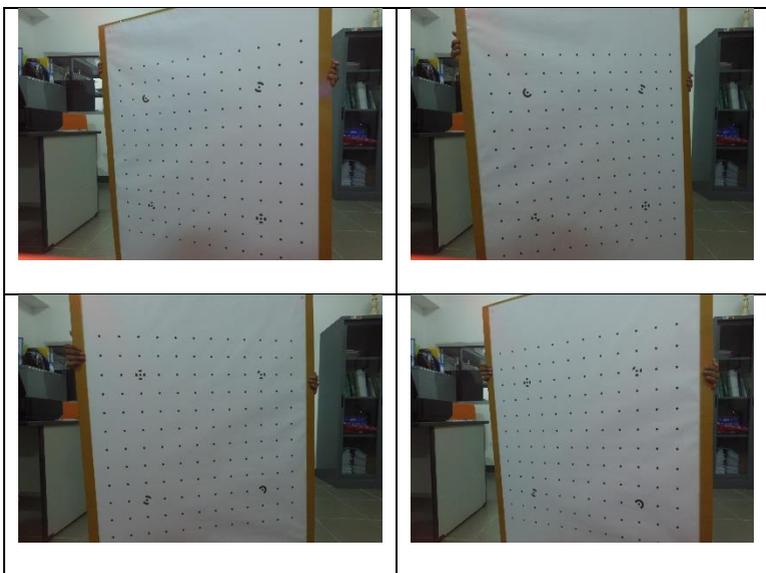
a. Kala 1 (25 mei 2017)



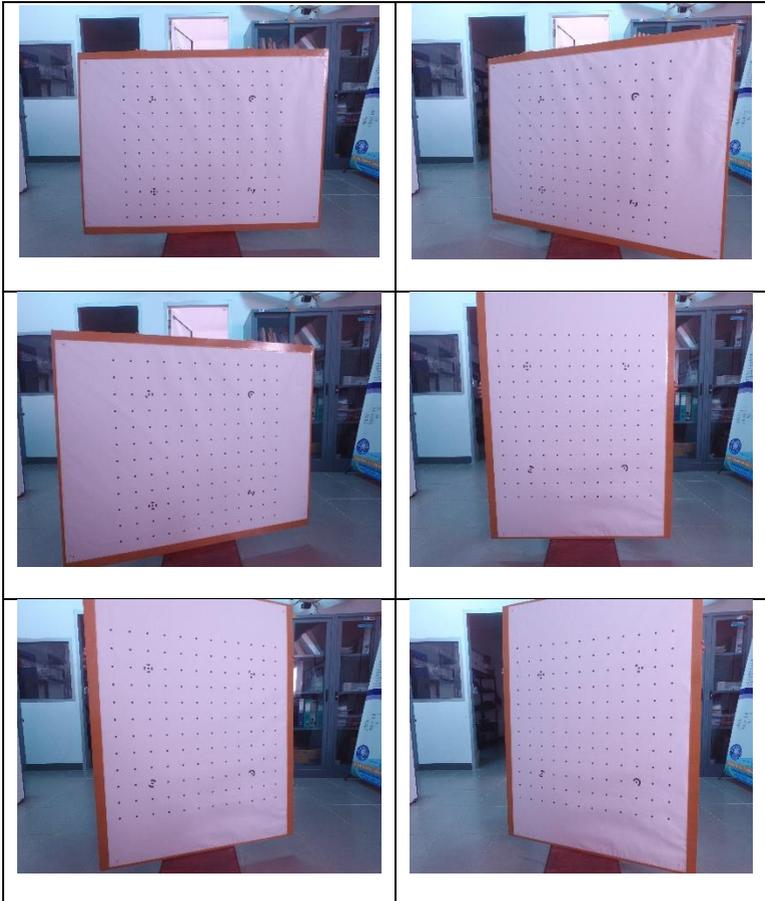


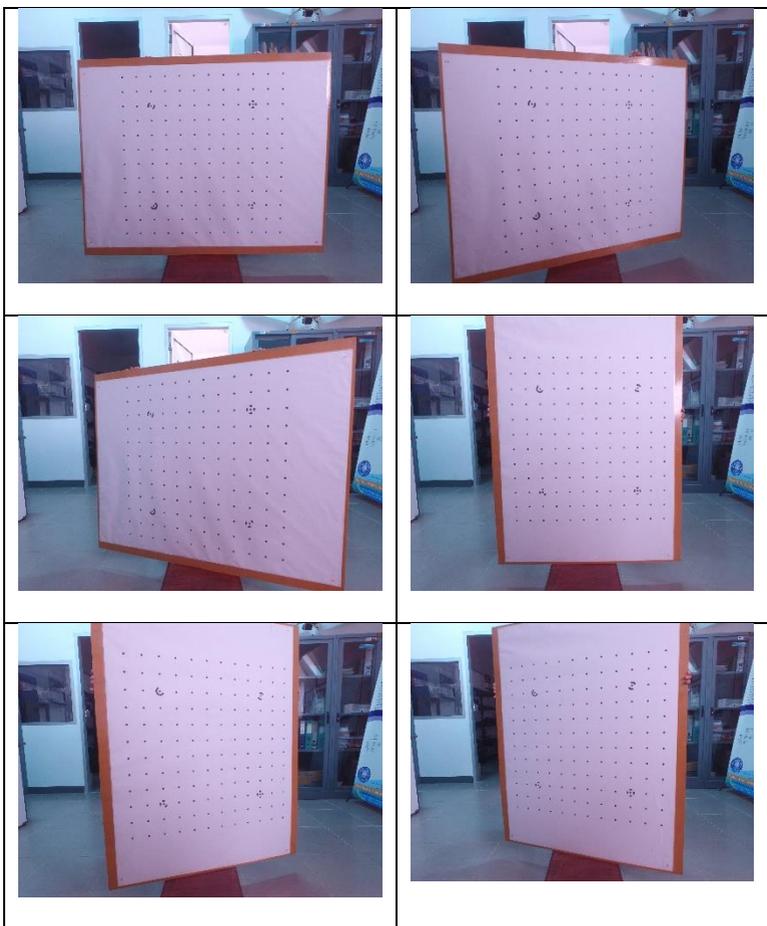
b. Kala 2 (27 mei 2017)





c. Kala 3 (6 november 2017)



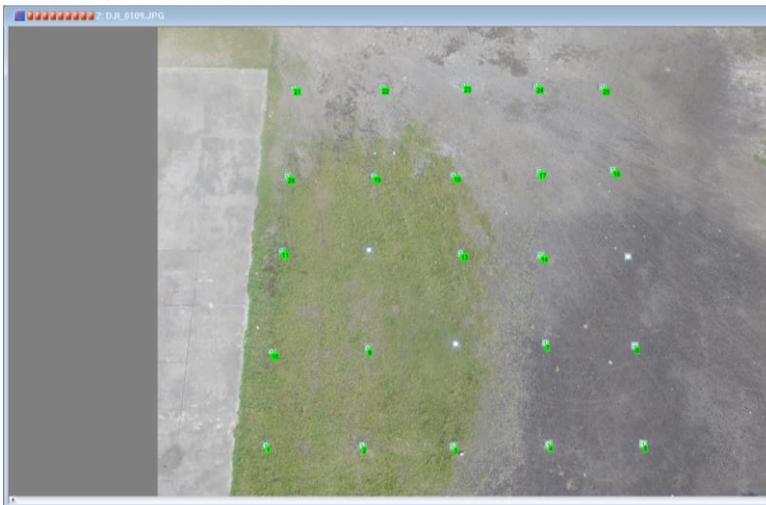


Lampiran 2. Data Kalibrasi Kamera *In-Flight*

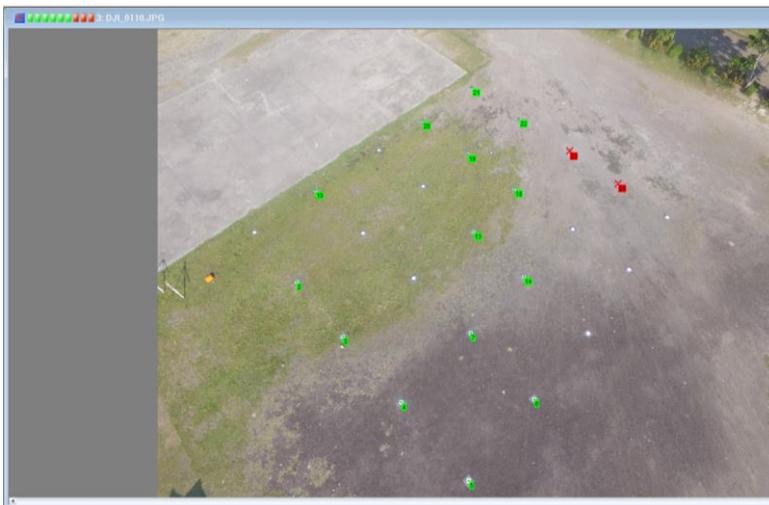
a. Station Camera 1



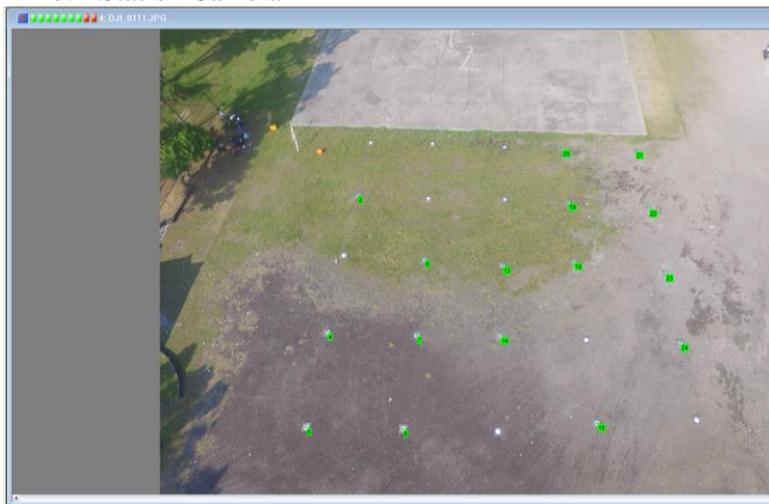
b. Staion Camera 2



c. Station Camera 3



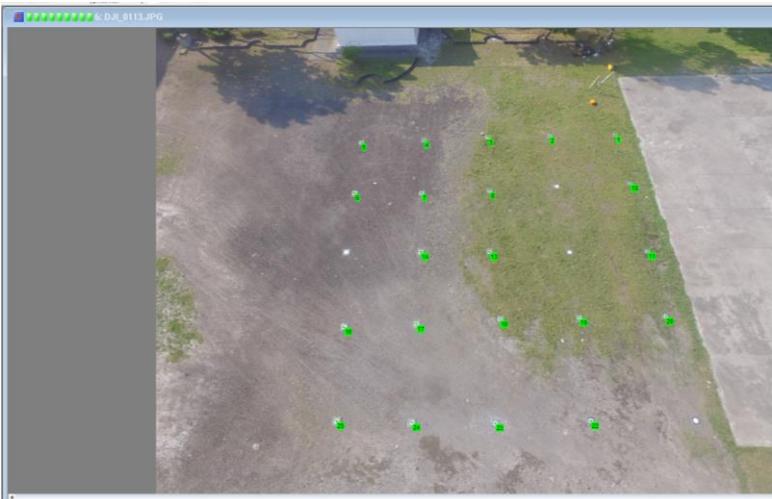
d. Station Camera 4



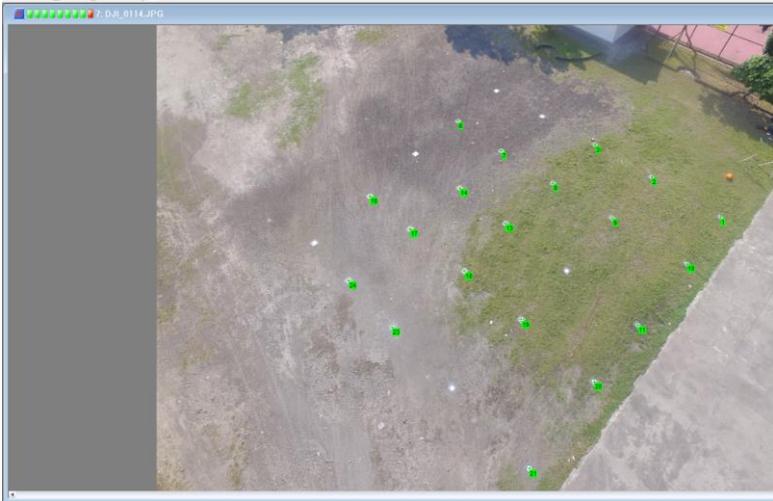
e. Station Camera 5



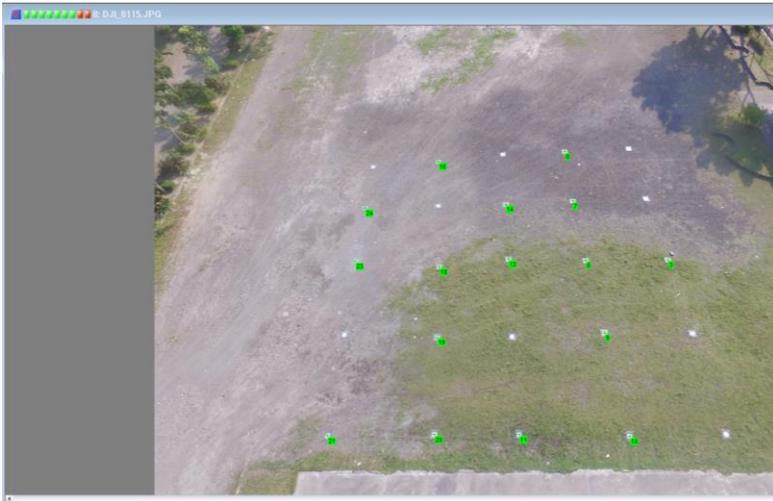
f. Station Camera 6



g. Station Camera 7



h. Station Camera 8



i. Station Camera 9



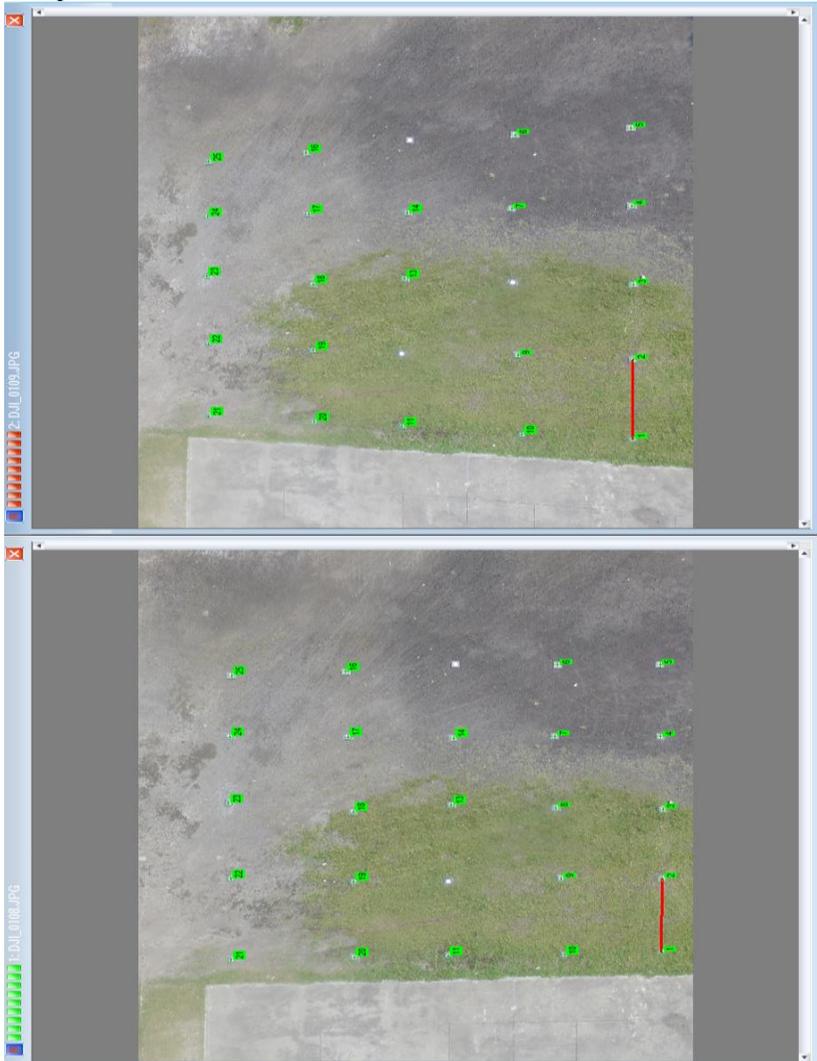
Lampiran 3. Pengukuran Titik Kontrol Tanah
a. Dokumentasi Pengambilan Data Poligon



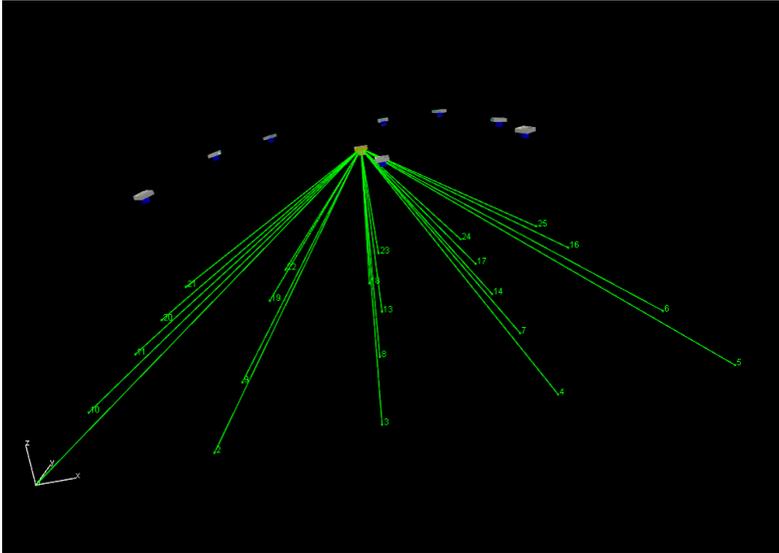
b. Dokumentasi Pengambilan Data Tachimetry



Lampiran 4. Hasil Relative Orientation Pada Australis



Lampiran 5. Transformasi Koordinat Pada Australis



Number of linked points/stations: 5

Control Label	X	Y	Z	Closest Point	DX	DY	DZ	Total
1	0.0000	0.0000	0.0000	1	0.128	-0.000	-0.005	0.128
2	5.1740	-0.0010	0.0000	2	0.128	-0.019	0.015	0.130
3	10.0030	-0.0330	0.0000	3	0.099	0.015	-0.026	0.104
4	15.0280	0.0000	0.0000	4	0.077	0.033	0.025	0.087
5	20.5050	0.0870	0.0000	5	-0.432	-0.029	-0.010	0.433
6	20.0170	5.1320	0.0000	6 (UNLINKED)	-0.060	-3.840	4.828	6.169

Transformation Options

3D
 2D
 1D

Point re-labelling only

Scale set and h

Quality: RMS = 0.126

Number of linked points

Closeness: m

BIODATA PENULIS

Penulis dilahirkan di Pamekasan, 24 Juni 1994, merupakan anak ketiga dari 4 bersaudara. Penulis telah



menempuh pendidikan formal di SDN 04 Jakarta, MTSN 06 Jakarta, dan SMAN 88 Jakarta. Setelah lulus dari SMA, memilih melanjutkan kuliah S-1 dengan mengikuti program Mandiri dan diterima di Teknik Geomatika – FTSP, pada tahun 2013 terdaftar dengan NRP 3513000087. Di Teknik Geomatika penulis memilih bidang kajian ilmu Kadaster atau Pertanahan. Penulis aktif

sebagai keanggotaan HIMAGE-ITS dan ditunjuk sebagai panitia pada beberapa acara himpunan dan kegiatan seminar baik yang diselenggarakan oleh HIMAGE-ITS maupun yang diselenggarakan oleh Jurusan Teknik Geomatika.