



TUGAS AKHIR - RG091536

ANALISA DEFORMASI JEMBATAN SURAMADU DENGAN TEKNIK FOTOGRAMETRI RENTANG DEKAT

LIA EKA ELVIANI
NRP 3510 100 032

Dosen Pembimbing
Dr-Ing. Ir. Teguh Hariyanto, M.Sc

PROGRAM STUDI TEKNIK GEOMATIKA
Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2014



FINAL ASSIGNMENT - RG091536

**ANALYSIS OF SURAMADU BRIDGE
DEFORMATION USING CLOSE RANGE
PHOTOGRAMMETRIC METHOD**

LIA EKA ELVIANI
NRP 3510 100 032

Supervisor
Dr-Ing. Ir. Teguh Hariyanto, M.Sc

DEPARTMENT OF GEOMATICS ENGINEERING
Faculty of Civil Engineering and Planning
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2014

**ANALISA DEFORMASI JEMBRAN SURAMADU
DENGAN TEKNIK FOTOGRAMETRI RENTANG
DEKAT**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada**

**Program Studi S-1 Teknik Geomatika
Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Oleh :

**LIA EKA ELVIANI
NRP. 3510 100 032**

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir :

1. Dr-Ing. Ir. Teguh Hariyanto, M.Sc
NIP. 1959 0819 1985 02 1001



SURABAYA, AGUSTUS 2014

ANALISA DEFORMASI JEMBATAN SURAMADU DENGAN TEKNIK FOTOGRAMETRI RENTANG DEKAT

Nama Mahasiswa : Lia Eka Elviani
NRP : 3510 100 032
Jurusan : Teknik Geomatika FTSP-ITS
Dosen Pembimbing : Dr-Ing. Ir. Teguh Hariyanto, M.Sc

Abstrak

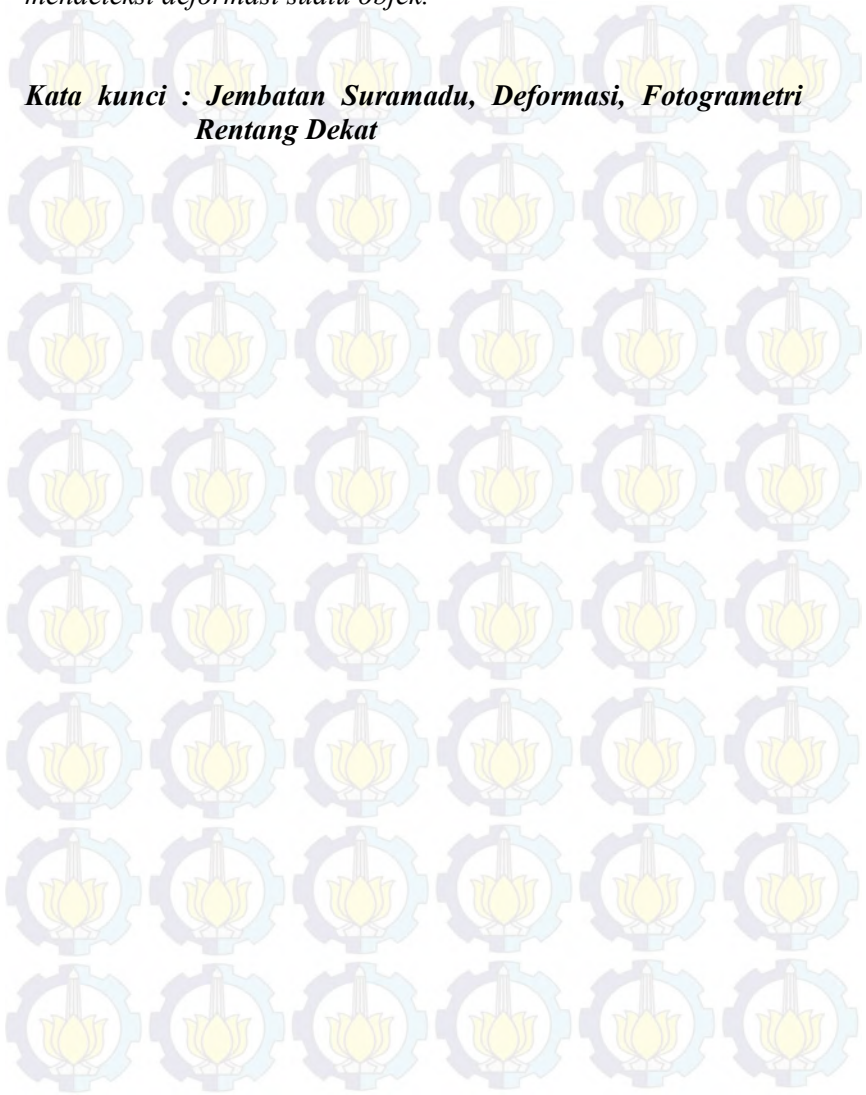
Jembatan Suramadu merupakan jembatan yang melintasi Selat Madura menghubungkan pulau Jawa (di Surabaya) dan Pulau Madura (di Bangkalan), Indonesia. Kebanyakan pada jembatan mengalami deformasi yang disebabkan oleh keadaan pondasi jembatan, keadaan alam, beban yang terlalu berlebihan maupun penuaan. Maka perlu dilakukan pemantauan secara berkala untuk mengetahui informasi mengenai deformasi yang terjadi pada jembatan Suramadu.

Penelitian ini mencoba suatu metode alternatif yang relatif murah untuk melakukan pengamatan deformasi, yakni menggunakan teknologi Fotogrametri Rentang Dekat, dengan memanfaatkan kamera digital non metrik. Metode Fotogrametri Rentang Dekat mempunyai kelebihan terutama jika objek yang akan diukur sulit untuk dijangkau atau memiliki dimensi yang kecil. Selain itu, kamera digital non metrik umumnya mempunyai harga yang relatif terjangkau. Dari hasil pengamatan deformasi dengan metode Fotogrametri Rentang Dekat, hasil pengamatan tersebut akan dianalisa untuk mengetahui seberapa besar deformasi dari suatu jembatan.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa metode Fotogrametri Rentang Dekat ini menunjukkan adanya deformasi jembatan berkisar 1 - 79 mm pada sumbu X dan Y, dan 1 - 15 mm pada sumbu Z. Hasil menunjukkan bahwa metode

Fotogrametri Rentang Dekat berpotensi untuk digunakan dalam mendeteksi deformasi suatu objek.

Kata kunci : Jembatan Suramadu, Deformasi, Fotogrametri Rentang Dekat



ANALYSIS OF SURAMADU BRIDGE DEFORMATION USING CLOSE RANGE PHOTOGRAMMETRIC METHOD

Student Name : Lia Eka Elviani
Reg. Number : 3510 100 032
Department : Geomatics Engineering FTSP-ITS
Supervisor : Dr-Ing. Ir. Teguh Hariyanto, M.Sc

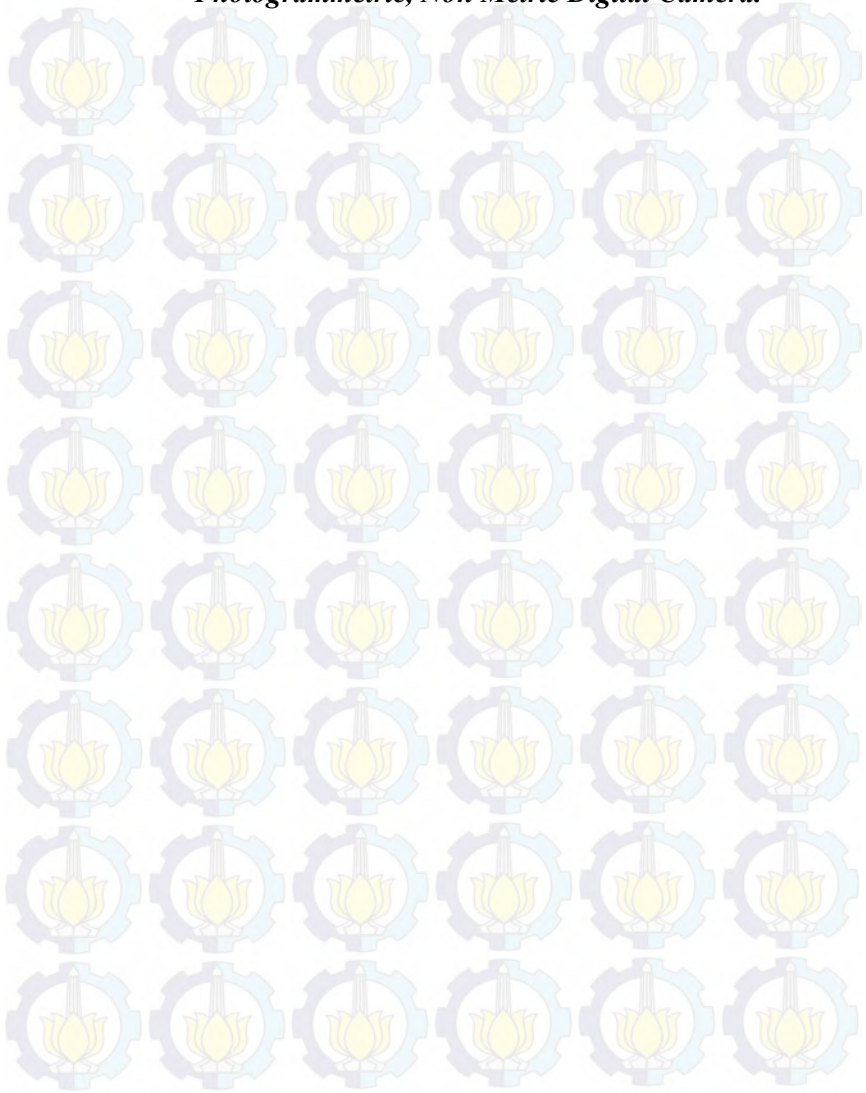
Abstract

Suramadu Bridge is a bridge that crosses Madura Strait and connects Java Island (at Surabaya) and Madura Island (at Bangkalan), Indonesia. Most of bridges were changed the shapes, position, and dimension which is caused by condition of bridge foundation, natural condition, overload, and out of date. Then, It is needed a monitoring periodically to find out information about Suramadu Bridge deformation.

This research tried an alternative method that is relatively inexpensive for observation of deformation by applying technology of Close Range Photogrammetric using non metric digital camera. Close Range Photogrammetric Method has advantages, especially if the measured object is difficult to observed or has small dimension. In addition, Non metric digital cameras generally have relatively affordable price. Of the results of deformation observation by Close Range Photogrammetric Method, result will be analysed to find out how many deformation of a bridge.

The results of this study indicate that the close range photogrammetry method showed any deformation of bridge range 1 - 79 mm in the X and Y axis, and 1 - 15 mm in the Z axis. The results indicate that the method of Close Range Photogrammetry has the potentially to detect deformation of an object.

Keywords : Suramadu Bridge, Deformation, Close Range Photogrammetric, Non Metric Digital Camera.



KATA PENGANTAR

Dengan mengucap puji dan syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena hanya atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga tugas akhir dengan judul “Analisa Deformasi Jembatan Suramadu dengan Teknik Fotogrametri Rentang Dekat” ini dapat diselesaikan.

Tugas akhir ini diajukan untuk memenuhi salah satu persyaratan memperoleh derajat kesarjanaan Strata-1 pada Jurusan Teknik Geomatika, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Penyusun mengucapkan banyak terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu dalam penyelesaian tugas akhir ini. Ucapan tersebut ditujukan kepada :

1. Kedua orang tua penulis yang telah memberikan dukungan dan doa restu.
2. Bapak Dr. Ir. Muhammad Taufik selaku Ketua Jurusan Teknik Geomatika, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
3. Bapak Dr-Ing. Ir. Teguh Hariyanto, M.Sc selaku dosen pembimbing yang telah banyak meluangkan waktu untuk membantu pelaksanaan penelitian ini.
4. Semua dosen di Jurusan Teknik Geomatika yang telah meluangkan waktu untuk memberikan saran dan masukan dalam pelaksanaan penelitian.
5. Laboran Jurusan Teknik Geomatika yang telah memfasilitasi penelitian Tugas Akhir ini.
6. Semua teman-teman Jurusan Teknik Geomatika yang telah banyak membantu menyelesaikan penelitian Tugas Akhir ini.
7. Semua pihak yang tidak mungkin dapat disebutkan satu per satu, yang telah membantu penulis dalam penyelesaian Tugas Akhir ini.

Disadari bahwa tugas akhir ini masih banyak kekurangan, maka diharapkan masukan dan saran-saran penyempurnaan sangat diharapkan. Akhir kata, semoga tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi pembaca pada umumnya dan mahasiswa Jurusan Teknik Geomatika pada khususnya.

Surabaya, Agustus 2014

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
ABSTRAK	v
HALAMAN PENGESAHAN	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xix
DAFTAR LAMPIRAN	xxi
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan	3
1.5 Manfaat	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Jembatan	5
2.2 Deformasi	6
2.3 Sistem Koordinat dalam Fotogrametri	7
2.3.1 Sistem Koordinat Foto	7
2.3.2 Sistem Koordinat Pikel	7
2.3.3 Sistem Koordinat Kamera	8
2.3.4 Sistem Koordinat Objek	8
2.4 Fotogrametri Rentang Dekat	8
2.4.1 Prinsip Dasar Fotogrametri Rentang Dekat	9
2.4.2 Reseksi Spasial (<i>Space Resection</i>)	11
2.4.3 Interseksi Spasial (<i>Space Intersection</i>)	12
2.5 Kamera	13
2.6 Kalibrasi Kamera	16
2.7 Pemantauan Deformasi Menggunakan Teknik Fotogrametri Rentang Dekat	19

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1	Lokasi Penelitian	21
3.2	Data dan Peralatan	22
3.2.1	Data	22
3.2.2	Peralatan	22
3.3	Metodologi Penelitian	23
3.3.1	Tahap Persiapan	24
3.3.2	Tahap Pengolahan Data	25
3.3.2.1	Tahap Kalibrasi Kamera	25
3.3.2.2	Tahap Pengolahan Data	26
3.3.3	Tahap Analisis	30
3.3.4	Tahap Akhir	30

BAB IV HASIL DAN ANALISA

4.1	Analisa Stabilitas Kamera	31
4.1.1	Analisa Parameter Intrinsik Kamera	31
4.1.2	Analisa Model Distorsi Kamera	36
4.2	Analisa Perhitungan Koordinat Titik Kerangka dan Titik Kontrol	39
4.2.1	Analisa Perhitungan Koordinat Titik Kerangka Dasar	39
4.2.2	Analisa Perhitungan Titik Kontrol	40
4.3	Analisa Pengolahan Foto	41
4.3.1	Analisa Pengambilan Foto	41
4.3.2	Analisa Radiometrik Foto	43
4.3.3	Analisa Perhitungan Koordinat Foto	44
4.4	Analisa Deformasi Jembatan	46
4.5	Uji Kelayakan Metode Fotogrametri Rentang Dekat	51

BAB V PENUTUP

5.1	Kesimpulan	55
5.2	Saran	55

DAFTAR PUSTAKA

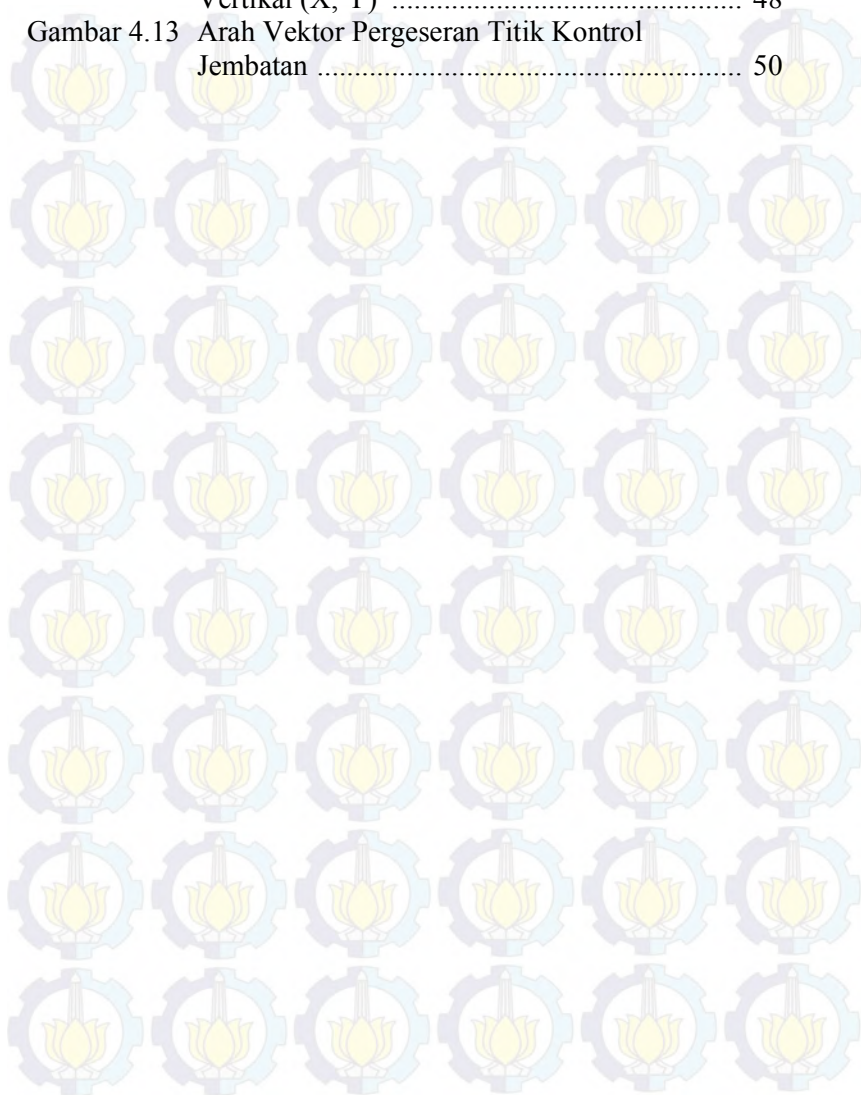
LAMPIRAN

BIODATA PENULIS

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Sistem Koordinat Foto dan Sistem Koordinat Piksel	7
Gambar 2.2	Sistem Koordinat Kamera dan Sistem Koordinat Objek	8
Gambar 2.3	Kondisi Kesegarisan	9
Gambar 2.4	Interseksi Spasial	13
Gambar 2.5	Tipe Kalibrasi Kamera	19
Gambar 2.6	Ilustrasi Vektor Pergeseran	20
Gambar 3.1	Lokasi Penelitian	21
Gambar 3.2	Jembatan Suramadu	21
Gambar 3.3	Diagram Alir Tahapan Penelitian	23
Gambar 3.4	Diagram Alir Tahap Kalibrasi Kamera	25
Gambar 3.5	Diagram Alir Tahap Pengolahan Data	27
Gambar 3.6	Dokumentasi saat Pemotretan Jembatan	28
Gambar 3.7	Bidang Kalibrasi Kamera	29
Gambar 4.1	Proyeksi Bidang Kalibrasi beserta Gambaran Posisi Kamera	31
Gambar 4.2	Bidang Kalibrasi Kamera beserta 16 Titik <i>Ground Control Point</i>	32
Gambar 4.3	Menentukan Koordinat Foto dalam Satuan Piksel	34
Gambar 4.4	Model Distorsi antara Koordinat Foto Awal dan Koordinat Foto Terkoreksi	37
Gambar 4.5	Proyeksi Jembatan beserta Gambaran Posisi Kamera	41
Gambar 4.6	Hasil Pemotretan Jembatan (foto kiri)	42
Gambar 4.7	Hasil Pemotretan Jembatan (foto kanan)	42
Gambar 4.8	Visualisasi Posisi GCP	42
Gambar 4.9	Foto Jembatan sebelum Proses <i>Filtering</i>	43
Gambar 4.10	Foto Jembatan setelah Proses <i>Filtering</i>	44
Gambar 4.11	Arah Vektor Pergeseran Jembatan secara Horizontal (<i>Z</i>)	47

Gambar 4.12	Arah Vektor Pergeseran Jembatan secara Vertikal (X, Y)	48
Gambar 4.13	Arah Vektor Pergeseran Titik Kontrol Jembatan	50

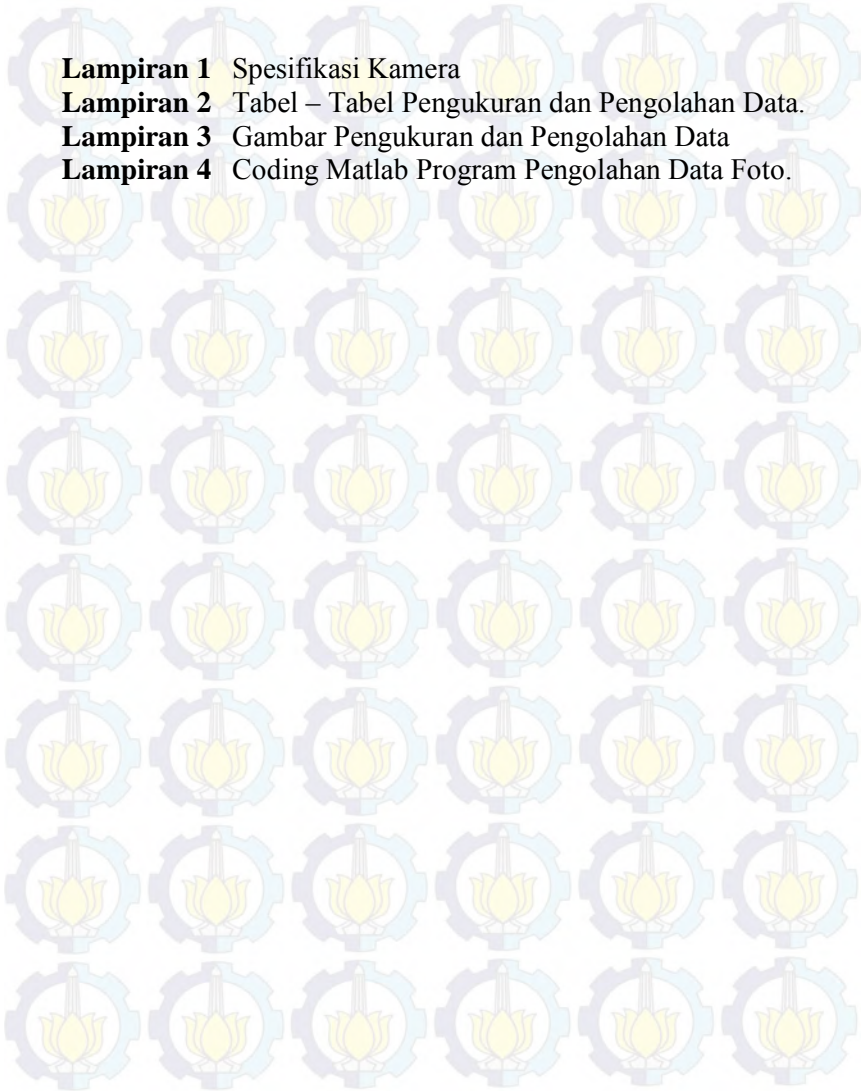


DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Spesifikasi Kamera Digital SLR Nikon D90	23
Tabel 4.1	Koordinat GCP pada Bidang Kalibrasi	32
Tabel 4.2	Koordinat Foto dalam Satuan Milimeter	34
Tabel 4.3	Parameter Eksterior (EOP)	35
Tabel 4.4	Parameter Orientasi Dalam	36
Tabel 4.5	Nilai <i>Reprojection Error</i> Foto 1	36
Tabel 4.6	Nilai <i>RMS Error</i>	38
Tabel 4.7	Koordinat Titik Kerangka	39
Tabel 4.8	Koordinat Titik Kontrol	40
Tabel 4.9	Koordinat Jembatan Kala 1	45
Tabel 4.10	Koordinat Jembatan Kala 2	45
Tabel 4.11	Besar Deformasi Jembatan secara Vertikal dan Horizontal	47
Tabel 4.12	Besar Pergeseran Titik-titik Kontrol Jembatan	49
Tabel 4.13	Hasil Uji <i>t student</i> pada Koordinat <i>Easting</i>	51
Tabel 4.14	Hasil Uji <i>t student</i> pada Koordinat <i>Northing</i>	52
Tabel 4.15	Hasil Uji <i>t student</i> pada Koordinat Elevasi	52

DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 1** Spesifikasi Kamera
- Lampiran 2** Tabel – Tabel Pengukuran dan Pengolahan Data.
- Lampiran 3** Gambar Pengukuran dan Pengolahan Data
- Lampiran 4** Coding Matlab Program Pengolahan Data Foto.



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Jembatan merupakan bangunan yang membentangi sungai, jalan, saluran air, jurang dan lain sebagainya untuk menghubungkan kedua tepi yang dibentangi itu agar orang dan kendaraan dapat menyeberang. Jembatan Suramadu merupakan jembatan yang melintasi Selat Madura untuk menghubungkan pulau Jawa (di Surabaya) dan Pulau Madura (di Bangkalan, tepatnya timur Kamal), Indonesia. Dengan panjang 5.438 m, jembatan ini merupakan jembatan terpanjang di Indonesia saat ini. Pembangunan jembatan ini ditujukan untuk mempercepat pembangunan di bidang di pulau Madura, yang meliputi bidang infrastruktur dan ekonomi di Madura, yang relatif tertinggal dibandingkan kawasan lain di Jawa Timur.

Jembatan terkadang sering mengalami perubahan bentuk, posisi, dan dimensi dari suatu benda lain yang dikenal dengan istilah deformasi. Deformasi sebuah jembatan dibagi menjadi dua, yaitu gerakan jangka panjang dan jangka pendek. Jangka panjang biasanya disebabkan oleh pondasi, dek jembatan, dan tekanan regangan. Sedangkan gerakan jangka pendek disebabkan oleh angin, suhu, gempa bumi dan lalu lintas. Deformasi jangka panjang berbeda dengan deformasi jangka pendek, yang tidak dapat kembali ke bentuk aslinya, sedangkan deformasi jangka pendek dapat kembali ke posisi dan bentuknya semula jika terlepas dari seluruh muatannya, kejadian seperti ini biasa disebut dengan defleksi (*deflection*).

Untuk mengetahui selisih deformasi posisi jembatan dengan metode yang berbeda, penelitian ini mencoba menerapkan metode Fotogrametri Rentang Dekat sebagai metode alternatif untuk melakukan pengamatan deformasi dengan memanfaatkan teknologi kamera digital non metrik.

Pemantauan deformasi dengan teknik Fotogrametri Rentang Dekat pada prinsipnya tidak berbeda dengan metode GPS, yakni melakukan pengamatan terhadap perubahan koordinat titik objek dengan melakukan pengukuran pada waktu yang berbeda. Dalam teknik Fotogrametri Rentang Dekat, kualitas proses penentuan koordinat dapat ditingkatkan dengan cara melakukan pembidikan ke objek secara konvergen dari beberapa kamera agar diperoleh ukuran lebih. Metode Fotogrametri Rentang Dekat mempunyai kelebihan tersendiri, terutama pada objek yang memiliki dimensi yang kecil, selain itu kamera yang digunakan yaitu kamera digital populer (non-metrik) yang mempunyai harga yang relatif terjangkau.

Aspek yang perlu diperhatikan dalam penerapan teknik Fotogrametri Rentang Dekat ini setidaknya menyangkut target yang digunakan, kamera yang digunakan, kalibrasi kamera, jenis pengukuran, sebaran titik kontrol, jaring pengukuran, letak stasiun kamera, banyaknya foto, dan perangkat lunak yang digunakan, metode ini memiliki potensi yang besar untuk memberikan cara yang efektif dan efisien untuk mengukur deformasi.

1.2 Rumusan Permasalahan

Perumusan masalah yang dimunculkan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Berapa besar nilai deformasi yang terjadi pada ujung Jembatan Suramadu?
- b. Apakah metode fotogrametri rentang dekat ini dapat dijadikan sebagai acuan dalam pemantauan deformasi pada ujung suatu jembatan?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penulisan tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

- a. Penelitian ini dilakukan menggunakan metode Fotogrametri Rentang Dekat.
- b. Penelitian ini dilakukan menggunakan teknologi kamera SLR.
- c. Pemantauan deformasi jembatan Suramadu dengan metode Fotogrametri Rentang Dekat dilakukan pada salah satu ujung jembatan baik dari sisi Surabaya atau sisi Madura terhadap posisi muka tanah.

1.4 Tujuan

Tujuan dalam penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

- a. Mengetahui besar nilai deformasi pada Jembatan Suramadu.
- b. Melakukan uji kelayakan metode Fotogrametri Rentang Dekat dalam pemantauan jembatan.

1.5 Manfaat

Manfaat yang ingin diperoleh dari penulisan tugas akhir ini adalah :

- a. Memberikan pengetahuan mengenai pemantauan deformasi dengan menggunakan metode Fotogrametri Rentang Dekat.
- b. Memberikan informasi yang nantinya dapat dijadikan acuan *monitoring* dan *controlling* Jembatan Suramadu.
- c. Melalui hasil yang telah diperoleh, bisa digunakan sebagai referensi untuk *monitoring* jembatan lainnya.



“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Jembatan

Jembatan secara umum adalah suatu konstruksi yang dibangun untuk melewati suatu massa atau traffic lewat atas suatu penghalang atau rintangan seperti sungai, rel kereta api ataupun jalan raya. Penjelasan Pasal 86 ayat (3) PP No. 34 Tahun 2006 tentang Jalan menyebutkan bahwa yang dimaksud dengan jembatan adalah jalan yang terletak di atas permukaan air dan/atau di atas permukaan tanah.

Jenis jembatan sendiri dapat dibedakan berdasarkan fungsi, lokasi, dan bahan konstruksinya (Supriyadi dan Muntohar, 2007). Berdasarkan fungsinya, jembatan dapat dibedakan sebagai berikut :

- a. Jembatan jalan raya (*highway bridge*)
- b. Jembatan jalan kereta api (*railway bridge*)
- c. Jembatan pejalan kaki atau penyeberangan (*pedestrian bridge*)

Kalau berdasarkan lokasinya, jembatan dapat dibedakan sebagai berikut :

- a. Jembatan di atas sungai atau danau
- b. Jembatan di atas lembah
- c. Jembatan di atas jalan yang ada (*fly over*)
- d. Jembatan di atas saluran irigasi/drainase (*culvert*)
- e. Jembatan di dermaga (*jetty*)

Sedangkan berdasarkan bahan konstruksinya, jembatan dapat dibedakan sebagai berikut :

- a. Jembatan kayu (*log bridge*)
- b. Jembatan beton (*concrete bridge*)
- c. Jembatan beton prategang (*prestressed concrete bridge*)
- d. Jembatan baja (*steel bridge*)
- e. Jembatan komposit (*composite bridge*)

Secara garis besar, jembatan memiliki beberapa bagian antara lain :

- a. Struktur atas (*super structure*), yaitu semua bagian jembatan atas tumpuan yang terdiri dari tumpuannya sendiri, balok utama longitudinal atau *stringer/girder*, sistem lantai dan pengaku (*bracing/stiffener*). Bagian-bagian sekunder lain adalah parapet, dinding *railing*, anti kembang-susu, alat sambung dek dan sebagainya.
- b. Struktur bawah (*sub structure*), dibagi menjadi 2 bagian yaitu kepala jembatan (*abutments*) atau pilar (*pier*) dan pondasi untuk kepala jembatan atau pilar. Struktur bangunan bawah perlu didesain khusus sesuai dengan jenis kekuatan tanah dasar dan elevasi jembatan.

2.2 Deformasi

Deformasi adalah perubahan bentuk, posisi, dan dimensi dari suatu benda (Kuang, 1996). Berdasarkan definisi tersebut, deformasi dapat diartikan sebagai perubahan kedudukan atau pergerakan suatu titik pada suatu benda secara absolut maupun relatif. Dikatakan titik bergerak absolut apabila dikaji dari perilaku gerakan titik itu sendiri dan dikatakan relatif apabila gerakan itu dikaji dari titik yang lain. Perubahan kedudukan atau pergerakan suatu titik pada umumnya mengacu kepada suatu sistem kerangka referensi (absolut atau relatif). Deformasi yang dimaksudkan dalam pemantauan survey ini adalah besarnya perubahan posisi suatu titik yang diamati pada jangka waktu tertentu secara kontinyu.

Deformasi yang terjadi pada objek infrastruktur dapat disebabkan oleh faktor alam misalnya pergerakan tanah di lokasi berdirinya infrastruktur tersebut. Untuk mengetahui besar deformasinya, diperlukan monitoring posisi terhadap target yang terdapat pada infrastruktur. Target dapat berupa titik, garis atau bidang yang dapat dianggap mewakili objek infrastruktur. Monitoring dilakukan secara kontinyu (*time series*). Dengan mengetahui posisi target di setiap pengamatan, nantinya perubahan posisi yang

terjadi tersebut diolah dan dianalisis untuk diambil kesimpulan deformasinya.

2.3 Sistem Koordinat dalam Fotogrametri

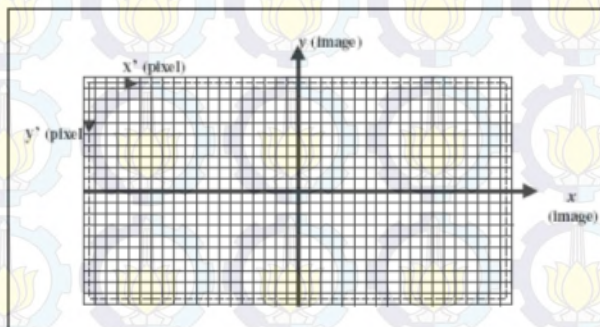
Dalam konteks fotogrametri dikenal beberapa sistem koordinat yang berhubungan dengan foto udara, yaitu : sistem koordinat foto, sistem koordinat piksel, sistem koordinat kamera, dan sistem koordinat objek.

2.3.1 Sistem Koordinat Foto

Sistem koordinat foto adalah sistem koordinat dua dimensi sebuah foto dimana pada kamera non metrik maupun kamera metrik dimulai dari piksel tengah. Sumbu x positif ke arah kanan dan sumbu y positif ke arah atas. (Tjahjadi, 2013)

2.3.2 Sistem Koordinat Piksel

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



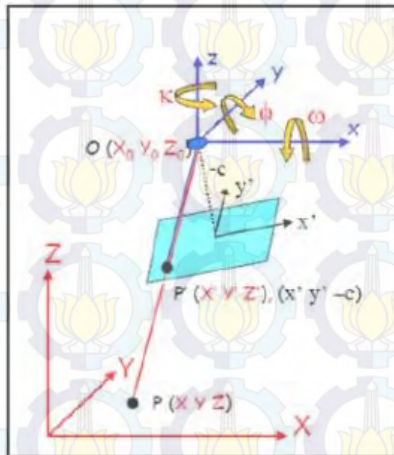
Gambar 2.1 Sistem Koordinat Foto dan Sistem Koordinat Piksel

2.3.3 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 parallel dengan sumbu (x,y) sistem koordinat objek.

2.3.4 Sistem Koordinat Objek

Sistem koordinat objek merupakan sistem koordinat 3D yang digunakan sebagai representasi bentuk dan ukuran objek melalui transformasi dari sistem koordinat foto/piksel ke sistem koordinat objek. (Tjahjadi, 2013)



Gambar 2.2 Sistem Koordinat Kamera dan Sistem Koordinat Objek

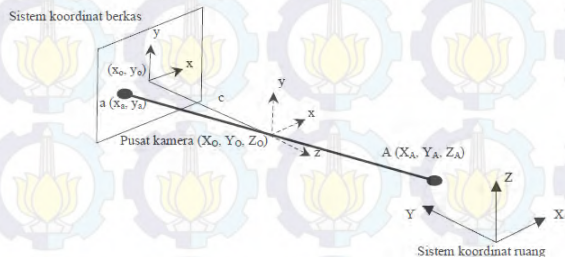
2.4 Fotogrametri Rentang Dekat

Fotogrametri adalah seni, ilmu, dan teknologi untuk memperoleh informasi terpercaya tentang objek fisik dan lingkungan melalui proses perekaman, pengukuran, dan

interpretasi gambaran fotografis dan pola radiasi tenaga elektromagnetik yang terekam (Wolf, 1983). Metode fotogrametri merupakan suatu metode pengukuran terhadap suatu objek yang dilakukan tanpa perlu bersentuhan langsung dengan objek yang diukur. Pengukuran terhadap objek dilakukan pada data yang diperoleh dengan perekaman citra pada suatu sensor yang digunakan. Istilah fotogrametri rentang dekat diperkenalkan sebagai suatu teknik fotogrametri terestrial dengan jarak antara kamera dengan objek kurang dari 100 m (Cooper & Robson, 1996).

2.4.1 Prinsip Dasar Fotogrametri Rentang Dekat

Pada saat sebuah foto diambil, berkas sinar dari objek akan menjalar menyerupai garis lurus menuju pusat lensa kamera hingga mencapai bidang film. Kondisi dimana titik objek pada dunia nyata, titik pusat proyeksi, dan titik obyek pada bidang foto terletak satu garis dalam ruang dinamakan kondisi kesejarisan berkas sinar atau kondisi kolinearitas (*collinearity condition*). Kondisi ini merupakan syarat fundamental dalam fotogrametri.



Gambar 2.3 Kondisi kesejarisan (*Collinearity Condition*)

(Sumber : Atkinson, 1996)

Dalam fotogrametri, posisi dari sebuah objek pada ruang didefinisikan pada sistem koordinat

kartesian 3D. Pada awalnya, objek terdefinisi pada sistem koordinat berkas. Kemudian dilakukan transformasi koordinat untuk mendapatkan koordinat objek pada sistem koordinat tanah. Antara kedua sistem koordinat itu terdapat perbedaan orientasi dan skala sehingga, transformasi koordinat terdiri dari translasi, rotasi dan perubahan skala.

Pusat dari sistem koordinat berkas merupakan pusat dari lensa kamera, yang dikenal dengan nama pusat perspektif (*perspective center*). Titik pusat lensa kamera diketahui, sehingga berkas sinar dari objek yang melewati pusat lensa kamera akan jatuh pada sebuah titik pada bidang foto yang dapat diketahui koordinat fotonya. Perhatikan Gambar 2.3., X_o , Y_o , Z_o merupakan titik pusat kamera, x_a , y_a , $-c$ merupakan koordinat sebuah titik A pada sistem koordinat berkas, dan X_A , Y_A , Z_A merupakan koordinat titik A pada sistem koordinat tanah, maka persamaan kolineraritas adalah (Atkinson, 1996) :

$$\begin{aligned} x_a &= -c \frac{[r_{11}(X_o - X_A) + r_{12}(Y_o - Y_A) + r_{13}(Z_o - Z_A)]}{[r_{31}(X_o - X_A) + r_{32}(Y_o - Y_A) + r_{33}(Z_o - Z_A)]} \\ y_a &= -c \frac{[r_{21}(X_o - X_A) + r_{22}(Y_o - Y_A) + r_{23}(Z_o - Z_A)]}{[r_{31}(X_o - X_A) + r_{32}(Y_o - Y_A) + r_{33}(Z_o - Z_A)]} \end{aligned} \quad (2.1)$$

dengan c merupakan *principal distance*, dan r_{ij} merupakan elemen dari matriks rotasi. Elemen dan matriks rotasi diberikan pada persamaan berikut:

$$\begin{aligned} R &= R_\omega R_\varphi R_\kappa = \\ \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \kappa & \sin \omega \sin \varphi \cos \kappa + \cos \omega \sin \kappa & -\cos \omega \sin \varphi \cos \kappa + \sin \omega \sin \kappa \\ -\cos \varphi \sin \kappa & -\sin \omega \sin \varphi \cos \kappa + \cos \omega \sin \kappa & \cos \omega \sin \varphi \cos \kappa + \sin \omega \sin \kappa \\ \sin \varphi & -\sin \omega \cos \varphi & \cos \omega \cos \varphi \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.2)$$

R_{κ} merupakan rotasi terhadap sumbu z , R_{ω} adalah rotasi terhadap sumbu x , sedangkan R_{ϕ} rotasi terhadap sumbu y .

2.4.2 Reseksi Spasial (*Space Resection*)

Space Resection atau reseksi spasial dengan kolinieritas merupakan metode numerik murni yang secara serentak menghasilkan enam unsur orientasi luar (EOP). Biasanya nilai sudut X_L , Y_L , Z_L , ω , ϕ , κ diperoleh dengan penyelesaian itu. *Space Resection* dengan kolinieritas memungkinkan penggunaan ulang sejumlah titik kontrol medan. Oleh karena itu dapat digunakan cara perhitungan kuadrat terkecil untuk menentukan nilai yang paling mungkin bagi keenam unsur itu. Meskipun perhitungannya panjang dapat dilakukan secara rutin. *Space Resection* dengan kolinieritas merupakan metode yang lebih disukai untuk menentukan orientasi luar (Wolf, 2000).

Space Resection merupakan suatu proses untuk menentukan elemen *Exterior Orientation Parameter* dan posisi sensor dari titik kontrol tanah dan koordinat *image*. Metode perhitungan yang paling biasa digunakan adalah persamaan kolinieritas, dimana prinsip dari persamaan tersebut adalah titik kontrol, titik pada *image*, dan proyeksi pusat terletak pada satu garis lurus. Untuk setiap titik kontrol, dapat diperoleh dua persamaan. Karena terdapat 6 parameter *EO*, sedikitnya tiga titik kontrol dibutuhkan untuk memecahkan masalah *resection*. Metode perhitungan dengan menggunakan teknik *Least Square* akan diterapkan pada penelitian ini untuk menentukan nilai yang paling mungkin pada enam parameter *EO*.

Dalam penyelesaian secara *least square* maka diperoleh persamaan untuk proses *resection* dalam bentuk persamaan kolinieritas terlinierisasi yang

disederhanakan termasuk untuk nilai residualnya sebagai berikut (Wolf, 2000) :

$$\begin{aligned} b_{11}d\omega + b_{12}d\varphi + b_{13}d\kappa - b_{14}dX_L - b_{15}dY_L - b_{16}dZ_L &= J + vx_a \\ b_{21}d\omega + b_{22}d\varphi + b_{23}d\kappa - b_{24}dX_L - b_{25}dY_L - b_{26}dZ_L &= K + vy_a \end{aligned} \quad (2.3)$$

Dimana setiap notasi di atas diwakili oleh susunan matriks sebagai berikut :

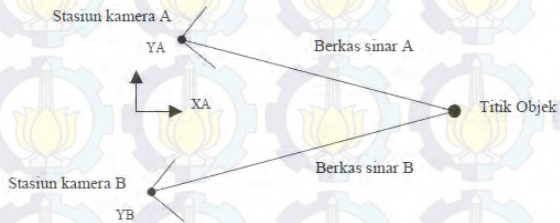
$$A = \begin{bmatrix} b_{11a} & b_{12a} & b_{13a} & -b_{14a} & -b_{15a} & -b_{16a} \\ b_{21a} & b_{22a} & b_{23a} & -b_{24a} & -b_{25a} & -b_{26a} \\ b_{11b} & b_{12b} & b_{13b} & -b_{14b} & -b_{15b} & -b_{16b} \\ b_{21b} & b_{22b} & b_{23b} & -b_{24b} & -b_{25b} & -b_{26b} \\ b_{11c} & b_{12c} & b_{13c} & -b_{14c} & -b_{15c} & -b_{16c} \\ b_{21c} & b_{22c} & b_{23c} & -b_{24c} & -b_{25c} & -b_{26c} \\ b_{11d} & b_{12d} & b_{13d} & -b_{14d} & -b_{15d} & -b_{16d} \\ b_{21d} & b_{22d} & b_{23d} & -b_{24d} & -b_{25d} & -b_{26d} \end{bmatrix} \quad L = \begin{bmatrix} J_a \\ K_a \\ J_b \\ K_b \\ J_c \\ K_c \\ J_d \\ K_d \end{bmatrix}$$

$$X = \begin{bmatrix} d\omega \\ d\varphi \\ d\kappa \\ dX_L \\ dY_L \\ dZ_L \end{bmatrix} \quad V = \begin{bmatrix} V_{xa} \\ V_{ya} \\ V_{xb} \\ V_{yb} \\ V_{xc} \\ V_{yc} \\ V_{xd} \\ V_{yd} \end{bmatrix}$$

2.4.3 Interseksi Spasial (*Intersection*)

Untuk mendapatkan posisi objek pada dunia nyata, maka diperlukan berkas sinar objek yang sama dari foto lainnya (Leitch, 2002). Kedua berkas sinar akan berpotongan pada objek yang sama di dunia nyata. Perpotongan ini dinamakan interseksi spasial (Atkinson, 1996). Jika terdapat titik A di lapangan yang dapat diamati dari 2 foto, maka di setiap foto

akan terdapat bayangan titik tersebut. Apabila diketahui posisi kamera dan arah sumbu optiknya maka perpotongan sinar garis dari foto 1 dan foto 2 akan dapat menentukan posisi koordinat titik P tersebut (Wolf, 1993). Prinsip penentuan posisi dari perpotongan sinar ini dikenal dengan interseksi spasial.



Gambar 2.4 Interseksi spasial
(Sumber : Leitch, 2002)

2.5 Kamera

Dalam ilmu fotogrametri, dilihat dari teknik pengambilan datanya, foto dibedakan menjadi dua kategori yaitu foto udara dan foto terestrial. Pada foto terestrial, proses perekaman data (pemotretan) dilakukan di permukaan bumi. Pada metode ini, kamera dapat dipegang dengan tangan, dipasang pada kaki kamera (tripod), dipasang pada menara, atau alat penyangga lain yang dirancang secara khusus. Fotogrametri terestrial digunakan untuk pemetaan objek-objek khusus yang membutuhkan ketelitian detail seperti, bangunan, daerah galian, lubang-lubang pertambangan, timbunan material, dan lain sebagainya.

Pada foto udara, proses perekaman data dilakukan di udara melalui sebuah wahana terbang seperti balon udara,

pesawat miniature dengan kendali radio, dan pesawat ringan berawak. Metode ini dikembangkan untuk memetakan daerah-daerah yang relatif sulit dijangkau dengan metode terrestrial, seperti daerah bergunung-gunung, daerah berawa, hutan, dan daerah-daerah yang padat penduduk.

Dalam fotogrametri, kamera merupakan salah satu instrument 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 terrestrial, kamera diklasifikasikan menjadi dua kategori umum yaitu :

a. Kamera metrik

Kamera metrik merupakan kamera yang dirancang khusus untuk keperluan fotogrametri. Kamera metrik yang umum digunakan mempunyai ukuran format 23cm x 23 cm, 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, dan
- *Super Wide Angle* (SWA), 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 :

- Ketidakstabilan geometrik

Masalah terbesar penggunaan kamera non metrik adalah ketidakstabilan geometric. 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 focus 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.

- Ukuran film

Keterbatasan lain dalam penggunaan kamera non metrik adalah terbatasnya ukuran film. Untuk mencakup area dengan luas dan skala yang sama, penggunaan kamera format kecil 24 mm x 36 mm membutuhkan jumlah foto lebih banyak dibandingkan jika pemotretan itu dilakukan dengan menggunakan kamera metrik format besar 23 cm x 23 cm. Selain itu seringkali dalam pemetaan metode foto udara dibutuhkan foto dengan ukuran asli yang besar,

sehingga penggunaan kamera format kecil menjadi masalah.

Penggunaan foto udara metrik format besar (23 cm x 23 cm) akan mampu memberikan ketelitian yang baik, akan tetapi untuk area penentuan yang relatif kecil dipandang tidak ekonomis. Pertimbangan penggunaan kamera non metrik untuk keperluan pemetaan (foto udara) adalah adanya efisiensi biaya pemetaan untuk area yang relatif kecil. Selain itu dengan semakin berkembangnya ilmu pengetahuan dan teknologi, keterbatasan-keterbatasan penggunaan kamera format kecil dapat diatasi, sehingga kamera non metrik menjadi instrument yang layak digunakan untuk foto udara.

2.6 Kalibrasi Kamera

Kamera non-metrik 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 dilakukan untuk menentukan parameter internal kamera (IOP) meliputi *principal distance* (c), 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, 1998).

Distorsi lensa dapat menyebabkan bergesernya titik pada foto dari posisi yang sebenarnya, sehingga memberikan ketelitian pengukuran yang tidak baik, namun tidak mempengaruhi kualitas ketajaman citra yang dihasilkan. Distorsi lensa dapat dibagi menjadi distorsi radial dan distorsi tangensial.

Menurut ASP (1980) dalam Wigrata (1986), distorsi radial adalah pergeseran linier titik foto dalam arah radial terhadap titik utama dari posisi idealnya. Distorsi lensa biasa diekspresikan sebagai fungsi polinomial dari jarak radial (dr)

terhadap titik utama foto. Distorsi radial direpresentasikan dalam sebuah persamaan polinomial sebagai berikut (Wolf, 2000) :

$$\Delta r = K_1 r^3 + K_2 r^5 + K_3 r^7 \quad (2.4)$$

Dimana istilah dari Δr adalah jumlah dari distorsi lensa radial, r adalah jarak radial dari *principal point*, dan K_1 , K_2 , K_3 merupakan koefisien polynomial dari distorsi radial. 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 (Wolf, 1993).

Menurut ASP (1980) dalam Wigrata (1986), distorsi tangensial adalah pergeseran linier titik di foto pada arah normal (tegak lurus) garis radial melalui titik foto tersebut. Distorsi tangensial disebabkan kesalahan sentering elemen-elemen lensa dalam satu gabungan lensa dimana titik pusat elemen-elemen lensa dalam gabungan lensa tersebut tidak terletak pada satu garis lurus. Pergeseran ini biasa dideskripsikan dengan 2 persamaan polinomial untuk pergeseran pada arah x (Δx) dan y (Δy) (Atkinson 1996).

$$\begin{aligned} \Delta_x &= P_1[r^2 + 2(x - x_0)^2] + 2P_2(x - x_0)(y - y_0) \\ \Delta_y &= P_2[r^2 + 2(x - x_0)^2] + 2P_2(x - x_0)(y - y_0) \end{aligned} \quad (2.5)$$

Dimana P_1 dan P_2 merupakan koefisien dari parameter distorsi tangensial yang nilainya tergantung dari nilai panjang fokus kamera. Efek dari distorsi tangensial ini akan menyebabkan kesan hiperbolik pada foto yang terekam oleh kamera.

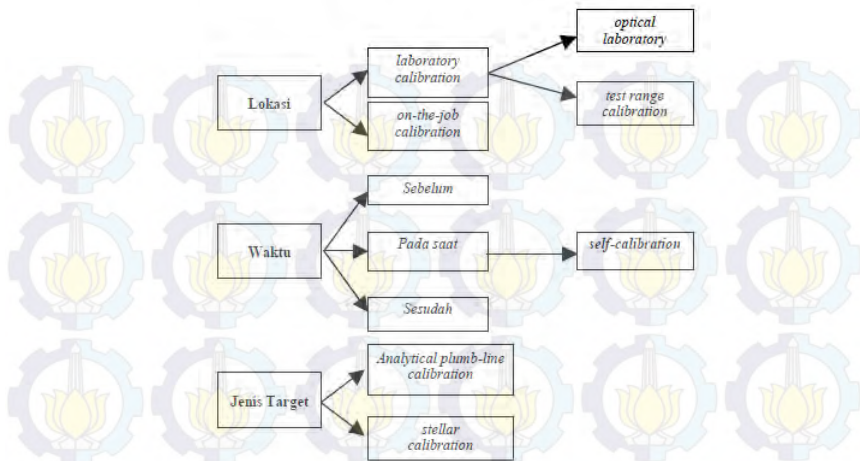
Untuk mengkoreksi kesalahan IOP, maka harus dilakukan kalibrasi. Kalibrasi kamera dapat dilakukan dengan berbagai metode sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.5 (Atkinson, 1987). Secara umum kalibrasi

kamera biasa dilakukan berdasarkan tiga hal (Soemarto, 2007): lokasi, waktu, dan jenis target.

Berdasarkan lokasi, kalibrasi kamera dapat dilakukan dengan metode *laboratory calibration* serta *on-the-job calibration*. *Laboratory calibration* dilakukan di laboratorium, terpisah dengan proses pemotretan objek. Metode yang termasuk di dalamnya antara lain *optical laboratory* dan *test range calibration*. Secara umum metode ini sesuai untuk kamera jenis metrik. *On-the-job calibration* merupakan teknik penentuan parameter kalibrasi lensa dan kamera yang dilakukan bersamaan dengan pelaksanaan pemotretan objek.

Berdasarkan waktu, kalibrasi kamera dapat dilakukan sebelum pemotretan, pada saat pemotretan, maupun sesudah pemotretan. Kalibrasi sebelum maupun sesudah pemotretan, biasa dilakukan di laboratorium atau di lokasi pemotretan. Kalibrasi pada saat pemotretan dikenal dengan *self-calibration*, yakni mengkalibrasi kamera sekaligus pada objek amat dan data diambil bersamaan dengan data observasi. Pada *self-calibration* pengukuran titik-titik target pada objek pengamatan digunakan sebagai data untuk penentuan titik objek sekaligus untuk menentukan parameter kalibrasi kamera.

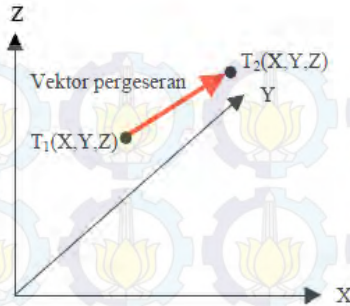
Menurut Fryer (1989) dalam Effendi (2000), metode kalibrasi berdasarkan jenis target antara lain dengan *analytical plumb-line calibration* dan *stellar calibration*.



Gambar 2.5 Tipe Kalibrasi Kamera
(Sumber : Hanifa, 2007)

2.7 Pemantauan Deformasi Menggunakan Teknik Fotogrametri Rentang Dekat

Pemantauan deformasi dilakukan dengan cara mengamati perubahan koordinat objek sebagai fungsi dari waktu. Besarnya perubahan bagian-bagian pada objek tersebut dinyatakan melalui pengukuran koordinat-koordinatnya secara tiga dimensi. Pemantauan deformasi menggunakan teknik Fotogrametri Rentang Dekat pada prinsipnya tidak berbeda dengan metode geodetik lainnya, yakni dengan melakukan pengamatan terhadap perubahan koordinat titik objek dengan cara melakukan pengukuran pada waktu yang berbeda. Dari setiap pengamatan diperoleh koordinat titik-titik objek sehingga selanjutnya dapat dihitung vektor pergeseran (Gambar 2.6). Cara untuk menghitung pergeseran diberikan pada Pers. (2.6). (Hanifa, 2007)



Gambar 2.6 Ilustrasi vektor pergeseran
(Sumber : Hanifa, 2007)

$$\text{vektor pergeseran} = \sqrt{(X_{T2} - X_{T1})^2 + (Y_{T2} - Y_{T1})^2 + (Z_{T2} - Z_{T1})^2} \quad (2.6)$$

Secara garis besar pengukuran deformasi menggunakan teknik Fotogrametri Rentang Dekat dilakukan dalam beberapa tahapan pekerjaan, yaitu pengadaan titik-titik kontrol, pemotretan, kalibrasi kamera, pengolahan data serta analisis.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian adalah Jembatan Suramadu. Secara geografis, lokasi ini berada di $7^{\circ}11'3''$ LS dan $112^{\circ}46'48''$ BT.



Gambar 3.1 Lokasi Penelitian



Gambar 3.2 Jembatan Suramadu

3.2 Data dan Peralatan

3.2.1 Data

Data yang digunakan dalam tugas akhir ini antara lain :

- Foto – foto bangunan objek penelitian
- Data ukuran GCP bangunan
- Bidang Kalibrasi 2D berupa papan catur beserta fotonya
- Data spesifikasi kamera digital non-metrik Nikon D90

3.2.2 Peralatan

Peralatan yang digunakan dalam tugas akhir ini antara lain terbagi dalam kelompok *hardware* (perangkat keras) dan *software* (perangkat lunak) yaitu sebagai berikut :

1. Perangkat Keras (*Hardware*)

- Kamera digital non-metrik Nikon D90 dengan spesifikasi terlampir pada tabel (3.1) sebagai alat pengambilan data foto.
- ETS *reflectorless* Hi Target untuk pengukuran objek dan titik eksposure.
- 2 set *Receiver* GPS Geodetik Topcon untuk pengukuran kerangka dasar.
- Laptop dengan spesifikasi RAM 4 GB, processor AMD Dual Core, VGA NVIDIA 1 GB sebagai alat pengolahan data.
- Mistar sebagai alat pengukur objek bidang kalibrasi

2. Perangkat Lunak (*Software*)

- Matlab R2013a untuk pengolahan data
- Microsoft Office untuk penyajian dan pelaporan hasil penelitian
- Autodesk Land Desktop 2006 untuk penyajian koordinat titik kontrol

Tabel 3.1 Spesifikasi Kamera Digital SLR Nikon D90

Spesifikasi Umum	Nikon D90
Effective pixels	12.3 million
Image Sensor	CMOS sensor, 23.6 x 15.8 mm; total pixels : 12.9 million; Nikon DX format
Image size (pixels)	4,288 x 2,848 [L], 3,216 x 2,136 [M], 2,144 x 1,424 [S]
Dimension (W x H x D)	Approx. 132 x 103 x 77 mm (5.2 x 4.1 x 3.0 in.)
Weight	Approx. 620 g (1 lb. 6 oz.) without battery, memory card, body cap or LCD monitor cover

3.3 Metodologi Penelitian

Tahapan yang dilakukan dalam penelitian ini adalah:



Gambar 3.3 Diagram Alir Tahapan Penelitian

3.3.1 Tahap Persiapan

Pada tahap ini kegiatan yang telah dilakukan adalah:

1. Identifikasi Masalah

Identifikasi masalah dilakukan untuk menentukan dan membatasi fokus permasalahan yang akan diselesaikan dalam penelitian. Permasalahan dalam penelitian ini adalah sejauh mana penggunaan kamera digital dapat diaplikasikan dalam pemantauan deformasi dari sebuah jembatan.

2. Studi Literatur

Studi literatur dilakukan untuk mendapatkan referensi dan memahami materi yang terkait dengan permasalahan yang ingin diselesaikan baik dari buku, jurnal, internet, dan sebagainya. Dalam hal ini, referensi atau materi yang dimaksud ialah fotogrametri dan survei deformasi .

3. Persiapan Peralatan dan Perizinan Lokasi

Pada kegiatan ini dilakukan persiapan peralatan, baik *hardware* maupun *software* yang digunakan. Selain itu, Jembatan Suramadu merupakan sarana transportasi penting yang menghubungkan Surabaya dengan Madura, maka untuk melakukan pengumpulan data perlu dilakukan proses perizinan kepada pengelola bangunan.

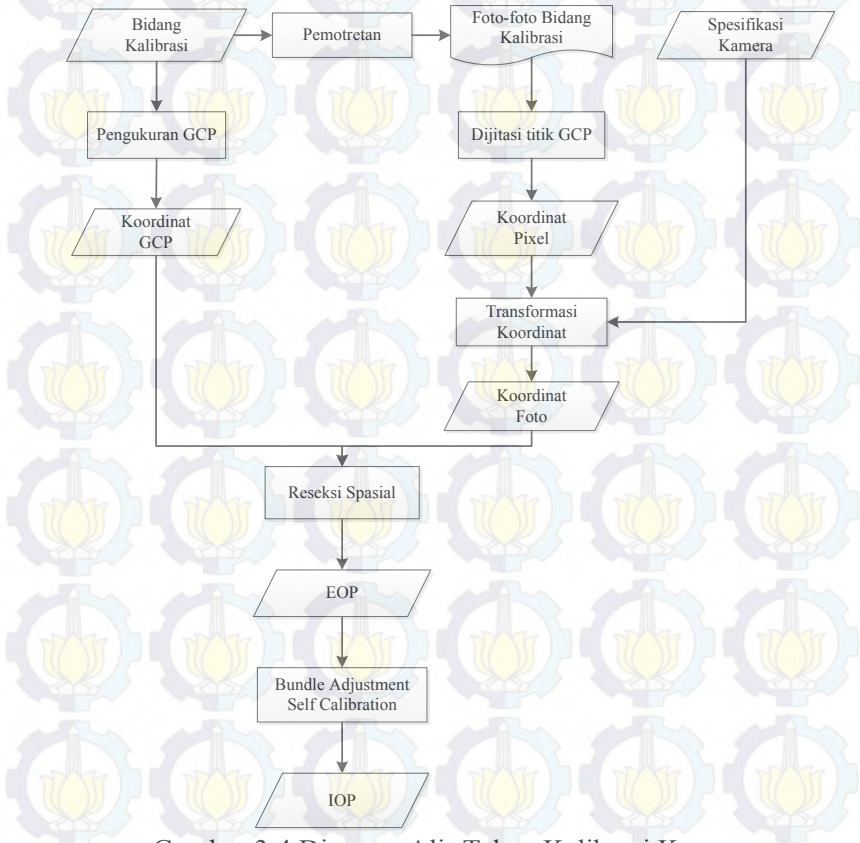
4. Pengumpulan Data

Maksud dari pengumpulan data dalam penelitian ini adalah kegiatan mencari dan mengumpulkan data yang diperlukan dalam penelitian. Kegiatan yang dilakukan dalam tahapan pengumpulan data ini antara lain : Pengambilan foto bidang kalibrasi, Pengukuran BM Utama, Pengukuran Titik Kontrol, dan Pemotretan Jembatan Suramadu

3.3.2 Tahap Pengolahan Data

3.3.2.1 Tahap Kalibrasi Kamera

Kalibrasi kamera dilakukan dengan menggunakan aplikasi pemrograman MATLAB yang dikembangkan berdasarkan persamaan *Bundle Adjustment Self Calibration* (BASC). Secara khusus, tahap kalibrasi kamera ditunjukkan pada diagram alir berikut:



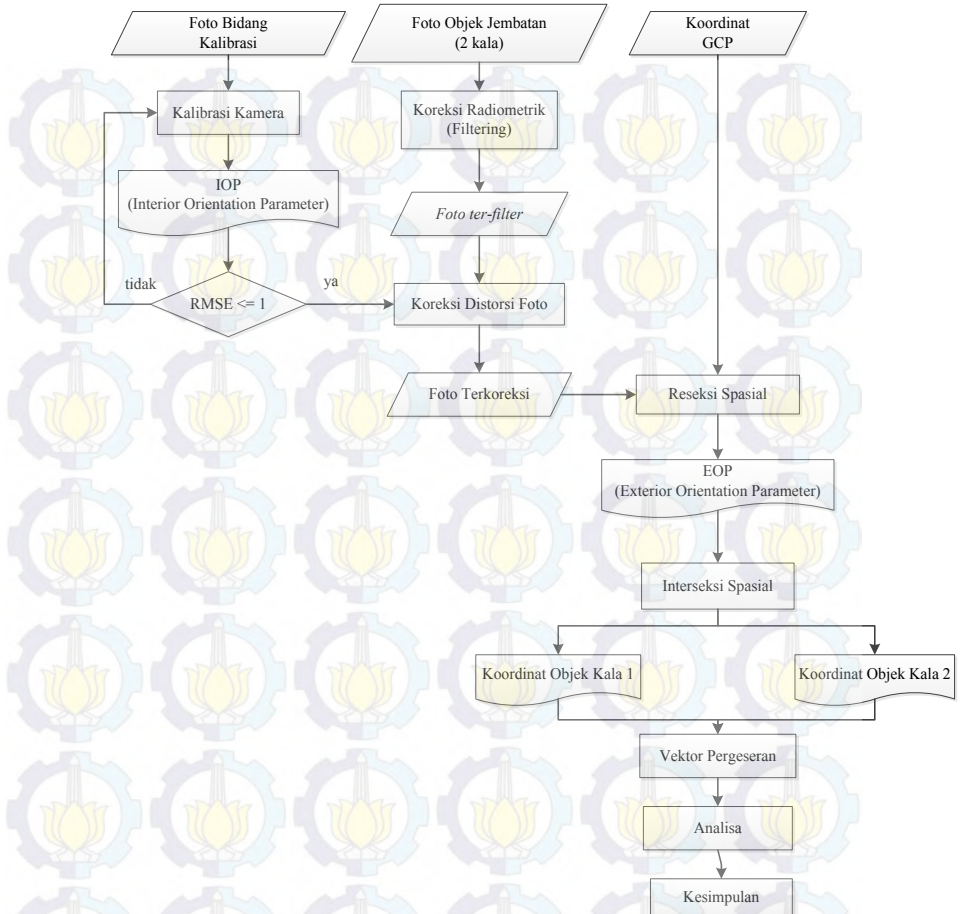
Gambar 3.4 Diagram Alir Tahap Kalibrasi Kamera

Berikut ini adalah penjelasan diagram alir tersebut adalah :

1. Menyiapkan bidang kalibrasi berupa berbentuk papan catur dengan ukuran kertas A4 (21 cm x 29,7 cm).
2. Memilih dan mengukur titik GCP dengan menggunakan mistar ukur untuk mendapatkan koordinat titik GCP.
3. Melakukan pemotretan bidang kalibrasi dari segala arah sehingga menghasilkan 9 foto
4. Mendijitasi titik-titik GCP pada foto – foto bidang kalibrasi tersebut, untuk mendapatkan koordinat foto dalam satuan piksel dari titik-titik GCP tersebut.
5. Melakukan transformasi koordinat foto dalam satuan piksel ke koordinat foto sesuai dengan ukuran sensor kamera yang digunakan.
6. Melakukan proses reseksi spasial untuk mencari posisi dan orientasi kamera pada saat pemotretan. Metode ini menghasilkan enam parameter orientasi luar (EOP).
7. Melakukan *Bundle Adjustment Self Calibration* (BASC) untuk mendapatkan nilai parameter orientasi dalam (IOP), yakni panjang fokus kamera (f), koordinat *principal point* (x_0, y_0), dan distorsi radial dan tangensial ($k_1, k_2, k_3, p_1, \text{ dan } p_2$).

3.3.2.2 Tahap Pengolahan Data

Tahap pengolahan data dalam tugas akhir ini ditunjukkan dalam diagram berikut ini:



Gambar 3.5 Diagram Alir Tahap Pengolahan Data

Adapun penjelasan dari diagram alir di atas adalah sebagai berikut :

1. Hal pertama yang dilakukan sebelum pemotretan ialah pengukuran kerangka

dasar dan pengukuran titik kontrol. Pengukuran kerangka dasar ini menggunakan 4 BM Utama (2 BM sisi Surabaya dan 2 BM sisi Madura). Alat yang digunakan untuk mengukur koordinat kerangka dasar ini adalah GPS Geodetik. Setelah itu, dilakukan pengukuran titik kontrol (GCP) dengan menggunakan ETS (*Electronic Total Station*) *reflectorless*. Perhitungan koordinat menggunakan sistem koordinat UTM, dengan mengacu pada BM utama. Hasil pengukuran ini berupa koordinat GCP yang digunakan sebagai ukuran referensi untuk menentukan unsur-unsur bangunan yang tampak di foto.

2. Setelah melakukan pengukuran titik kontrol, pemotretan pun dilakukan untuk mendapatkan data foto objek Jembatan Suramadu. Foto tersebut diambil secara bebas menggunakan kamera digital SLR. Setiap foto diambil dari sembarang posisi dan orientasi.



Gambar 3.6 Dokumentasi saat Pemotretan Jembatan

3. Sebelum melakukan pengolahan foto, untuk mendapatkan nilai koordinat titik-titik yang dikehendaki, terlebih dahulu dilakukan kalibrasi kamera. Kalibrasi kamera ini dilakukan untuk menentukan parameter internal kamera dan model distorsi kamera. Pada tahap ini dilakukan kalibrasi kamera digital non metrik dengan menggunakan *software* pemrograman MATLAB. Metode kalibrasi ini menggunakan *Bundle Adjustment Self Calibration*. Dalam penelitian ini kalibrasi kamera dilakukan dengan menggunakan bidang 2 dimensi berupa kertas berukuran A4 dengan target berupa grid yang berbentuk papan catur.



Gambar 3.7 Bidang Kalibrasi Kamera

4. Foto jembatan yang didapatkan di-filter terlebih dahulu untuk mendapatkan kualitas foto yang baik. Proses *filtering* ini menggunakan perangkat lunak editor citra.

5. Selanjutnya koordinat foto tersebut dikoreksi menurut parameter intrinsik kamera yang digunakan.
6. Setelah foto tersebut terkoreksi, maka dilakukan koreksi geometrik dengan reseksi dan interseksi spasial untuk mendapatkan system koordinat kamera dan koordinat 3D pada foto dari koordinat GCP.
7. Setelah diperoleh koordinat titik-titik target dari foto kala 1 dan kala 2, kemudian dilakukan perhitungan vektor pergeseran untuk mengetahui kemungkinan adanya deformasi objek dengan menghitung besar pergeserannya. Dari hasil perhitungan tersebut dilakukan analisa apakah ada pergeseran posisi pada jembatan.

3.3.3 Tahap Analisis

Pada tahap ini dilakukan beberapa analisis sebagai berikut :

- Analisis stabilitas kamera
- Analisis deteksi deformasi objek
- Analisis kelayakan metode fotogrametri rentang dekat dalam pemantauan deformasi.

3.3.4 Tahap Akhir

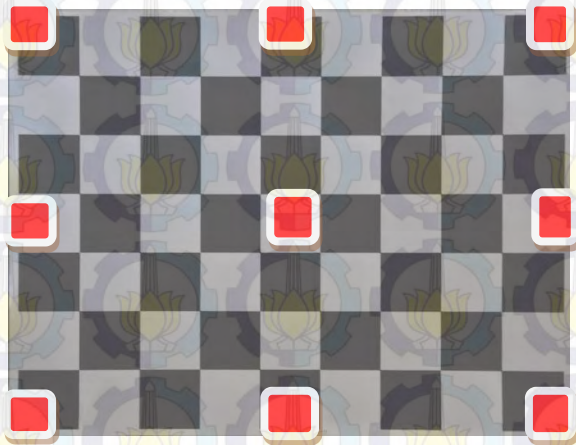
Pada tahap ini dilakukan penyajian data dan penarikan kesimpulan berdasarkan analisis. Hasil dari penyajian data dan penarikan kesimpulan tersebut disusun dalam bentuk laporan tertulis untuk memberikan tambahan ilmu baik secara praktis maupun secara teoretis untuk pengembangan selanjutnya.

BAB IV HASIL DAN ANALISA

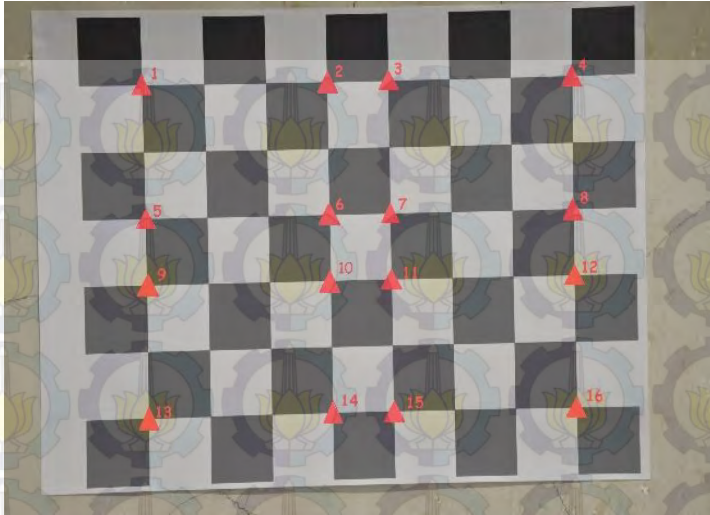
4.1 Analisa Stabilitas Kamera

4.1.1 Analisa Parameter Intrinsik Kamera

Kalibrasi kamera pada penelitian ini menggunakan metode *Bundle Adjustment Self Calibration* dengan menggunakan *software* pemrograman MATLAB. Pada penelitian ini, menggunakan panjang fokus (f) sebesar 50 mm. Dalam proses kalibrasi ini, menggunakan bidang kalibrasi dengan ukuran A4 (21mm x 29.7 mm). Dimana proses kalibrasi ini menggunakan 9 foto dengan posisi pemotretan yang dilakukan dari 9 arah yang digambarkan pada gambar 4.1.



Gambar 4.1 Proyeksi Bidang Kalibrasi beserta Gambaran Posisi Kamera (kotak merah)



Gambar 4.2 Bidang Kalibrasi Kamera beserta 16 Titik *Ground Control Point*

Koordinat *Ground Control Point* (GCP) ialah koordinat bidang kalibrasi yang berupa bidang datar berbentuk grid papan catur (*chessboard*). Pengukuran koordinat GCP pada bidang kalibrasi ini menggunakan penggaris skala millimeter. Untuk nilai koordinat Z dianggap 0 mm, dikarenakan bidang kalibrasi tersebut merupakan bidang datar. Hasil pengukuran koordinat GCP pada bidang kalibrasi disajikan pada tabel 4.1.

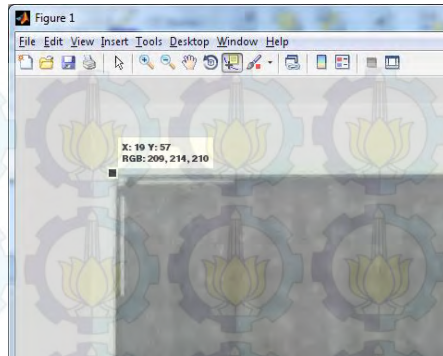
Tabel 4.1 Koordinat GCP pada Bidang Kalibrasi (satuan mm)

Titik	X	Y	Z
1	0	150	0
2	90	150	0
3	120	150	0
4	210	150	0

Tabel 4.1 Koordinat GCP pada Bidang Kalibrasi
(lanjutan)

Titik	X	Y	Z
5	0	90	0
6	90	90	0
7	120	90	0
8	210	90	0
9	0	60	0
10	90	60	0
11	120	60	0
12	210	60	0
13	0	0	0
14	90	0	0
15	120	0	0
16	210	0	0

Koordinat foto dalam satuan piksel didapat dengan bantuan program Matlab seperti pada gambar 4.3. Kemudian koordinat foto dalam satuan piksel tersebut ditransformasikan ke dalam satuan millimeter dengan metode affine. Hasil transformasi koordinat foto dari satuan piksel ke satuan millimeter disajikan pada tabel 4.2.



Gambar 4.3 Menentukan Koordinat Foto dalam Satuan Piksel

Tabel 4.2 Koordinat Foto dalam Satuan Milimeter

Titik	X	Y
1	-7.227	5.310
2	-1.090	5.399
3	0.936	5.450
4	7.036	5.598
5	-7.102	1.195
6	-1.002	1.321
7	1.009	1.365
8	7.080	1.506
9	-7.058	-0.847
10	-0.965	-0.707
11	1.046	-0.662
12	7.117	-0.529
13	-6.992	-4.940
14	-0.885	-4.770
15	1.134	-4.718
16	7.197	-4.599

Selanjutnya, koordinat GCP dan koordinat foto tersebut digunakan untuk menghitung parameter eksterior dengan menggunakan rumus kolinieritas. Hasil perhitungan parameter eksterior tersebut disajikan pada tabel 4.3.

Tabel 4.3 Parameter Eksterior (EOP)

omega (rad)	phi (rad)	kappa (rad)	XL (mm)	YL (mm)	ZL (mm)
- 0.02245	- 0.02025	- 0.02154	89.581	86.699	737.595

Setelah mendapatkan nilai parameter eksterior selanjutnya menentukan parameter internal kamera atau *Interior Orientation Parameter* (IOP) untuk mendapatkan unsur-unsur orientasi dalam antara lain panjang focus terkalibrasi (f), posisi titik utama (X_0, Y_0), dan koefisien distorsi lensa ($K1, K2, K3, P1, P2$) dengan memberi nilai pendekatan dalam melakukan proses *Bundle Adjustment Self Calibration*. Hasil dari proses kalibrasi kamera diberikan pada Lampiran.

Dari hasil kalibrasi kamera yang diberikan pada Lampiran dapat diketahui bahwa nilai *principal point* (x_0, y_0) yang dihasilkan kurang stabil. Sedangkan nilai fokus terkalibrasi mulai terlihat stabil pada iterasi keempat. Hal ini menandakan bahwa kamera digital SLR Nikon D90 kurang stabil untuk keperluan fotogrametri. Parameter orientasi dalam yang digunakan untuk proses selanjutnya dari hasil kalibrasi kamera ialah parameter intrinsik kamera pada proses iterasi ke-5 seperti yang digambarkan pada tabel 4.4. Hal ini dikarenakan proses iterasi pada panjang fokus mulai stabil pada iterasi ke-5.

Tabel 4.4 Parameter Orientasi Dalam (satuan mm)

IOP	Nilai
x0	-0.576
y0	-0.043
f	47.808
k1	-0.000875
k2	0.0000121
p1	0.0000558
p2	0.000119

4.1.2 Analisa Model Distorsi Kamera

Dari hasil kalibrasi kamera tersebut, didapatkan nilai koordinat foto terkoreksi. Untuk mengetahui tingkat akurasi koordinat dari hasil kalibrasi, maka dihitung tingkat kesalahan koordinat foto awal terhadap koordinat foto terkoreksi. Tingkat kesalahan itu biasa disebut dengan *reprojection error*. Nilai *reprojection error* dan plot visualisasi distorsi antara koordinat foto awal dan koordinat foto terkoreksi pada salah satu foto bidang kalibrasi dapat digambarkan pada tabel 4.5 dan gambar 4.4 (selengkapnya lihat pada Lampiran).

Tabel 4.5 Nilai Reprojection Error Foto 1 (satuan mm)

TITIK	X	Y
1	-0.37582	0.26164
2	-0.01816	0.11098
3	0.03495	0.10671
4	0.59554	0.39900
5	-0.24069	0.03537
6	-0.00408	-0.00006
7	0.01284	0.13239

Tabel 4.5 Nilai Reprojection Error Foto 1 (lanjutan)

TITIK	X	Y
8	0.34281	-0.08398
9	-0.23312	-0.02670
10	0.00307	0.00380
11	0.01628	0.00129
12	0.33946	-0.03148
13	-0.32497	-0.23134
14	-0.00079	-0.08663
15	0.04794	-0.09662
16	0.54701	-0.30549



Gambar 4.4 Model Distorsi antara Koordinat Foto Awal dan Koordinat Foto Terkoreksi

Keterangan :

- = Titik GCP awal
- = Titik GCP terkoreksi

Dari gambar dan tabel di atas dapat dilihat bahwa besar pergeseran titik setelah dikoreksi mengalami pergeseran yang tidak besar. Besar nilai *reprojection error* pada tabel 4.5 menunjukkan rentang nilai antara 0.00080 mm – 0.595544 mm. Untuk titik-titik GCP yang berada di bagian luar, besar pergeserannya cenderung lebih dari 0.15 mm dan arah pergeserannya cenderung ke luar. Sedangkan, untuk titik-titik GCP yang berada di tengah, besar pergeserannya cenderung kecil di bawah 0.1 mm dan arah pergeserannya cenderung ke tengah. Hal ini menunjukkan bahwa kamera yang digunakan mengalami *barrel distortion*. Berdasarkan hasil *reprojection error* tersebut, dapat dianalisa bahwa semakin jauh jarak titik GCP terhadap titik utama (*principal point*), maka semakin besar pula besar pergeserannya.

Untuk mengetahui besar kesalahan, dihitung dengan menggunakan *Root Mean Square Error* (RMSE), yakni akar dari rata-rata kuadrat kesalahan. RMS dihitung dari besarnya *reprojection error*, kemudian setiap *error* ini dikuadratkan, selanjutnya dijumlahkan. Jumlah kuadrat kesalahan ini selanjutnya dibagi jumlah titik GCP, selanjutnya diakarkan. Hasil perhitungan RMS diberikan pada tabel 4.6. Dari hasil perhitungan RMS yang disajikan pada tabel 4.6 dapat dilihat nilai RMS Error dari seluruh foto kurang dari 1 mm. Dari nilai RMS Error tersebut dapat diketahui bahwa kamera digital non metrik tersebut dapat digunakan untuk proses selanjutnya, yakni pemantauan deformasi dengan metode fotogrametri rentang dekat.

Tabel 4.6 Nilai RMS Error (satuan mm)

FOTO	X	Y
1	0.27951668	0.16632068
2	0.19023883	0.13907191

Tabel 4.6 Nilai RMS Error (lanjutan)

FOTO	X	Y
3	0.19663506	0.1433283
4	0.35951327	0.21163438
5	0.16335693	0.3051662
6	0.20185419	0.32060091
7	0.26380761	0.15756768
8	0.1557759	0.34403963
9	0.11501647	0.3324612

4.2 Analisa Perhitungan Koordinat Titik Kerangka dan Titik Kontrol

4.2.1 Analisa Perhitungan Koordinat Titik Kerangka Dasar

Kerangka dasar dibangun dengan pengukuran menggunakan GPS Geodetik. Penentuan posisi BM Utama dengan GPS Geodetik ini menggunakan metode *differential positioning*, dimana metode ini menggunakan lebih dari sebuah *receiver*. *Receiver* GPS Geodetik didirikan di kedua BM Utama sebagai *rover*, sedangkan *base* terletak di lantai 4 Gedung Teknik Geomatika – ITS Surabaya.

Sistem koordinat menggunakan sistem koordinat UTM. Hitungan koordinat dilakukan dengan metode hitung perataan jaring. Hasil perhitungan diberikan pada Tabel 4.7.

Tabel 4.7 Koordinat Titik Kerangka

Titik	Kordinat UTM			Std. Deviasi		
	Easting (m)	Northing (m)	Elevation (m)	E	N	H
BMM2	696743.606	9208234.102	2.367	0.009	0.010	0.032
BMM1	696747.540	9208247.809	2.509	0.010	0.010	0.029

4.2.2 Analisa Perhitungan Titik Kontrol

Setelah diperoleh koordinat titik – titik kerangka dasar, selanjutnya dihitung koordinat tiap titik kontrol pada jembatan. Nilai koordinat titik kontrol diberikan pada Tabel 4.8.

Tabel 4.8 Koordinat Titik Kontrol

Titik	Koordinat UTM			Standar Deviasi		
	Easting (m)	Northing (m)	Z (m)	E	N	Z
1a	696769.531	9208256.671	4.099	0.016	0.020	0.008
1b	696769.503	9208256.649	3.027	0.016	0.020	0.008
2a	696769.295	9208250.739	4.183	0.011	0.014	0.008
2b	696769.275	9208250.724	3.156	0.011	0.014	0.008
3a	696768.838	9208244.292	4.255	0.018	0.023	0.013
3b	696768.806	9208244.266	3.242	0.018	0.023	0.013
4a	696768.325	9208237.304	4.311	0.001	0.015	0.011
4b	696768.304	9208237.302	3.292	0.001	0.015	0.011
5a	696767.825	9208230.445	4.312	0.005	0.017	0.014
5b	696767.801	9208230.452	3.302	0.005	0.017	0.014
6a	696767.464	9208223.812	4.289	0.011	0.022	0.008
6b	696767.433	9208223.828	3.263	0.011	0.022	0.008
7a	696766.708	9208218.097	4.244	0.006	0.006	0.010
7b	696766.700	9208218.106	3.166	0.006	0.006	0.010

Titik-titik kontrol jembatan yang digunakan ialah 14 titik. Alasan pemilihan distribusi titik tersebut, agar titik –titik kontrol tersebut tersebar rata di satu bentang jembatan antar pilar, sehingga dapat mencakup keseluruhan satu bentang jembatan tersebut

4.3 Analisa Pengolahan Foto

4.3.1 Analisa Pengambilan Foto

Foto diambil dari 9 posisi, antara lain : kiri – atas, tengah – atas, kanan – atas, kiri – tengah, tengah – tengah, kanan – tengah, kiri – bawah, tengah – bawah, dan kanan – bawah, seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.5.



Gambar 4.5. Proyeksi Jembatan beserta Gambaran Posisi Kamera (kotak merah)

Pengambilan foto juga tidak didukung dengan pencahayaan yang baik, sehingga tidak semua foto memiliki kualitas yang baik untuk dilakukan pengolahan dikarenakan kualitas titik target untuk marking menjadi rendah. Posisi titik kontrol pada jembatan suramadu tersebut digambarkan pada gambar 4.6, 4.7, dan 4.8.

Pemotretan ini hanya dilakukan sebanyak 2 kali, yaitu pada April 2014 dan Juni 2014. Hal ini dikarenakan hanya untuk menguji apakah metode fotogrametri rentang dekat layak digunakan untuk pemantauan deformasi.



Gambar 4.6. Hasil Pemotretan Jembatan (foto kiri)



Gambar 4.7. Hasil Pemotretan Jembatan (foto kanan)



Gambar 4.8. Visualisasi Posisi GCP

4.3.2 Analisa Radiometrik Foto

Tahapan *Filtering* pada foto objek jembatan ini menggunakan software pengolah citra. Proses *filtering* ini meliputi beberapa metode yang bertujuan untuk meningkatkan tampilan visual dari sebuah citra. Dalam penelitian tugas akhir ini, teknik *filtering* yang dilakukan ialah teknik *contrast stretching*.



Gambar 4.9 Foto Jembatan sebelum Proses *Filtering*

Contrast stretching merupakan proses peningkatan kontras pada citra. *Contrast stretching* ini dilakukan dengan menggunakan metode *Gaussian Stretching*. Hal ini dimaksudkan agar nilai histogram RGB band pada foto menjadi sesuai dengan distribusi normal/gauss. Berikut hasil foto setelah melalui proses *contrast stretching*.



Gambar 4.10 Foto Jembatan setelah Proses *Contrast Stretching*

Jika dibandingkan, gambar 4.9 dengan gambar 4.10 terlihat perbedaan kontras yang cukup signifikan. Terlihat adanya peningkatan visual pada foto jembatan tersebut, dimana pixel yang gelap semakin gelap dan pixel yang terang semakin terang. Sehingga perbedaan kecerahan antara kedua foto tersebut sangat terlihat.

4.3.3 Analisa Perhitungan Koordinat Foto

Pelaksanaan perhitungan koordinat dari data foto meliputi transformasi koordinat pixel ke koordinat foto, perhitungan parameter eksterior (reseksi spasial), dan perhitungan koordinat titik – titik yang dikehendaki (interseksi spasial).

Perhitungan koordinat dari data foto menggunakan persamaan kolinieritas. Data foto yang diolah adalah data foto kala 1 dan kala 2. Untuk menghilangkan kesalahan transformasi dari koordinat raster ke koordinat vektor ialah dengan cara melakukan reseksi posisi kamera dan interseksi antar foto, digunakan data koordinat titik kontrol. Pada pengolahan foto kala 1 dan kala 2, digunakan data titik kontrol dari pengukuran Total Station.

Dari hasil perhitungan dengan persamaan kolineritas diperoleh nilai parameter eksterior dan koordinat titik-titik yang telah ditandai pada foto. Hasil koordinat dari pengolahan foto diberikan pada tabel 4.9 dan tabel 4.10.

Tabel 4.9. Koordinat Jembatan Kala 1 (April 2014)

Titik	Koordinat UTM			Standar Deviasi		
	X	Y	Z	X	Y	Z
1a	696769.347	9208256.539	4.091	0.073	0.057	0.002
1b	696769.679	9208256.776	3.027	0.078	0.061	0.004
2a	696769.322	9208250.747	4.182	0.011	0.008	0.003
2b	696769.259	9208250.722	3.153	0.011	0.007	0.003
3a	696768.832	9208244.289	4.263	0.018	0.013	0.007
3b	696768.787	9208244.262	3.246	0.011	0.008	0.004
4a	696768.310	9208237.294	4.303	0.011	0.010	0.005
4b	696768.323	9208237.310	3.294	0.010	0.009	0.005
5a	696767.818	9208230.447	4.308	0.006	0.004	0.003
5b	696767.817	9208230.450	3.304	0.006	0.004	0.003
6a	696767.424	9208223.841	4.288	0.015	0.013	0.003
6b	696767.370	9208223.879	3.266	0.013	0.011	0.002
7a	696766.773	9208218.037	4.243	0.017	0.020	0.004
7b	696766.707	9208218.090	3.165	0.013	0.015	0.003

Tabel 4.10. Koordinat Jembatan Kala 2 (Juni 2014)

Titik	Koordinat UTM			Standar Deviasi		
	X	Y	Z	X	Y	Z
1a	696769.421	9208256.569	4.100	0.149	0.143	0.005
1b	696769.649	9208256.785	3.020	0.160	0.153	0.004
2a	696769.302	9208250.740	4.189	0.013	0.013	0.003
2b	696769.297	9208250.745	3.155	0.012	0.009	0.002
3a	696768.825	9208244.287	4.248	0.008	0.007	0.004
3b	696768.805	9208244.270	3.241	0.009	0.008	0.005

Tabel 4.10. Koordinat Jembatan Kala 2 (lanjutan)

Titik	Koordinat UTM			Standar Deviasi		
	X	Y	Z	X	Y	Z
4a	696768.336	9208237.307	4.307	0.009	0.008	0.005
4b	696768.300	9208237.297	3.302	0.010	0.009	0.005
5a	696767.819	9208230.447	4.308	0.002	0.001	0.001
5b	696767.808	9208230.450	3.305	0.002	0.001	0.001
6a	696767.474	9208223.807	4.291	0.012	0.011	0.003
6b	696767.422	9208223.834	3.262	0.015	0.012	0.002
7a	696766.742	9208218.059	4.244	0.006	0.007	0.001
7b	696766.675	9208218.135	3.167	0.004	0.005	0.001

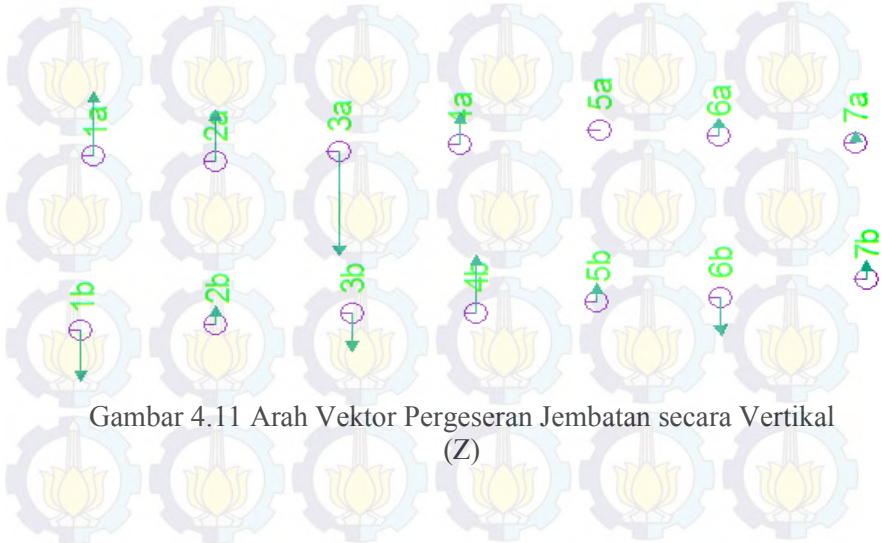
Dari Tabel 4.9 dan 4.10, terlihat bahwa standar deviasi koordinat titik X, Y, Z titik GCP Jembatan pada data kala pertama dan kala kedua, yang memiliki nilai standar deviasi terbesar ialah koordinat pada sumbu X. Kemudian, hasil tersebut sesuai dengan asumsi bahwa untuk pengukuran fotogrametri jarak dekat, ketelitian arah sumbu X akan lebih jelek dibandingkan ketelitian pada arah sumbu Y dan Z. Hal ini dikarenakan pada fotogrametri jarak dekat, arah sumbu X merupakan jarak pemotretan sebanding dengan arah sumbu Z pada fotogrametri.

4.4 Analisa Deformasi Jembatan

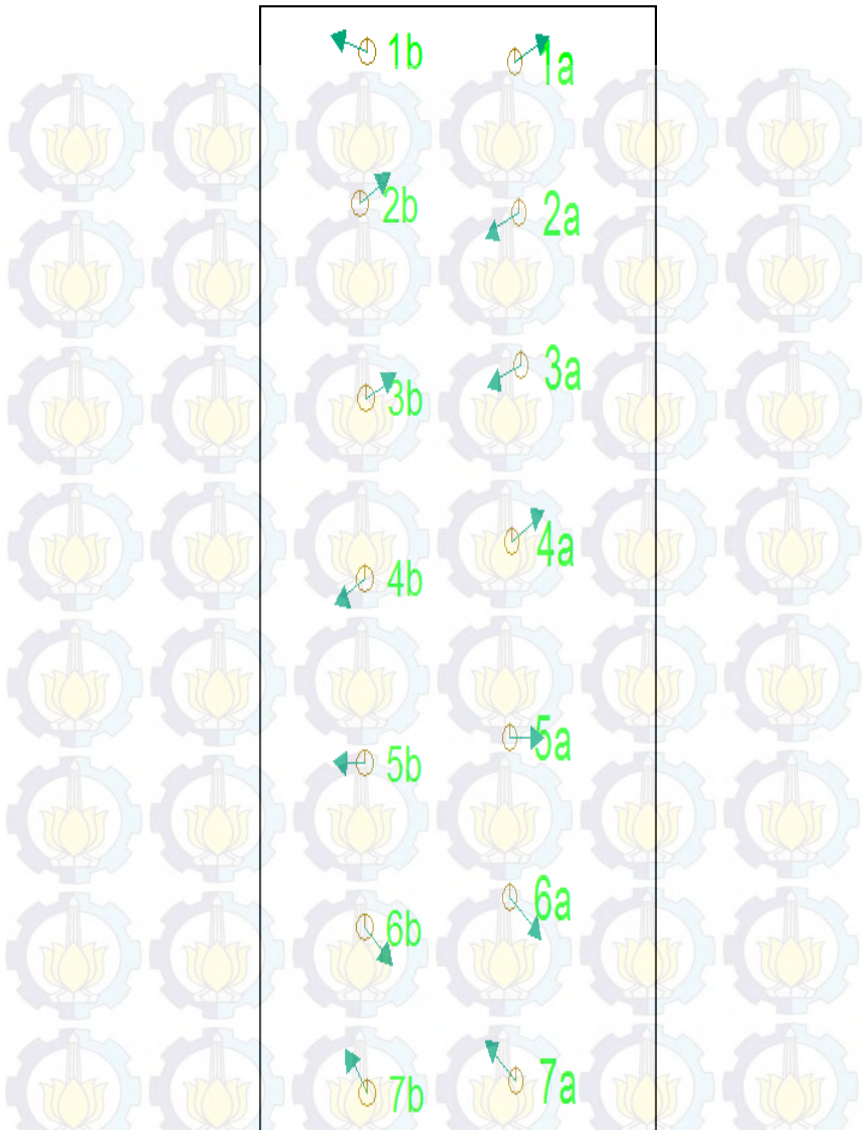
Setelah diperoleh koordinat titik-titik target dari foto pada kala 1 serta kala 2, kemudian diperiksa kemungkinan adanya deformasi objek simulasi dengan menghitung besar vector pergeserannya. Hasil perhitungan vektor pergeseran diberikan pada Tabel 4.11. Secara visual ditunjukkan pada gambar 4.11 dan gambar 4.12.

Tabel 4.11. Besar Deformasi Jembatan secara Vertikal dan Horizontal (satuan mm)

Titik	Horizontal (X, Y)	Vertikal (Z)
1a	79	9
1b	31	7
2a	20	7
2b	45	2
3a	7	15
3b	19	5
4a	29	4
4b	26	8
5a	1	0
5b	9	2
6a	61	2
6b	70	5
7a	38	1
7b	55	2



Gambar 4.11 Arah Vektor Pergeseran Jembatan secara Vertikal (Z)



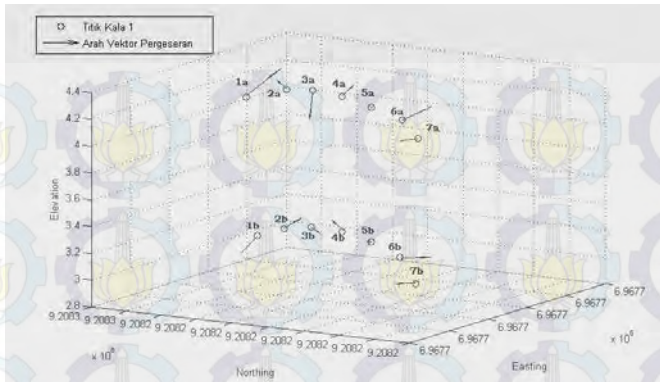
Gambar 4.12 Arah Vektor Pergeseran Jembatan secara Horizontal (X,Y)

Berdasarkan hasil yang diberikan pada tabel 4.11, gambar 4.11, dan gambar 4.12 dapat dilihat bahwa adanya deformasi. Titik yang mengalami deformasi yang terbesar ialah terjadi pada titik 1a dimana deformasi sumbu X dan Y cenderung mengarah ke timur laut sebesar 79 mm dan penurunan sebesar 9 mm. Sedangkan titik yang mengalami deformasi yang terkecil ialah pada titik 5a dimana pergeseran sumbu X dan Y cenderung mengarah ke timur sebesar 1 mm dan tidak mengalami perubahan terhadap sumbu Z. Jika dilihat secara keseluruhan, jembatan tersebut mengalami kenaikan. Hal ini dapat dilihat pada gambar 4.11, dimana sebagian besar titik – titik tersebut mengalami pergeseran sumbu Z yang mengarah ke atas.

Dalam penelitian ini, untuk mengecek signifikansi secara statistik dari vektor pergeseran hasil estimasi metode Fotogrametri Rentang Dekat tersebut, uji hipotesis diterapkan untuk variabel vektor pergeseran yang dijelaskan pada persamaan 2.6. Hasil dan arah vektor pergeseran tersebut disajikan pada Tabel 4.12 dan Gambar 4.13.

Tabel 4.12 Besar Pergeseran Titik-titik Kontrol Jembatan

Titik	DEFORMASI	Titik	DEFORMASI
1a	0.080	1b	0.032
2a	0.022	2b	0.045
3a	0.017	3b	0.020
4a	0.029	4b	0.027
5a	0.001	5b	0.009
6a	0.061	6b	0.070
7a	0.038	7b	0.055
Rata - rata (X)		0.036	
standar deviasi (s)		0.022	
Jumlah titik (n)		14.000	



Gambar 4.13. Arah Vektor Pergeseran Titik Kontrol Jembatan

Hipotesa nol yang digunakan pada uji statistik ini adalah titik tidak bergeser dalam selang dari kala 1 ke kala 2, sehingga:

$$\text{hipotesa nol } H_0 : d = 0,$$

$$\text{hipotesa alternatif } H_1 : d \neq 0,$$

Statistik yang digunakan untuk uji pergeseran ini adalah :

$$T = \frac{\bar{X}}{s/\sqrt{n}} = 6.009$$

dimana s adalah standar deviasi dari d , n adalah jumlah sampel pengamatan. Statistik T mempunyai distribusi *student* (t) kalau hipotesa nol adalah benar. Selang dimana hipotesa nol ini ditolak adalah

$$T > t_{df, \alpha/2},$$

dimana df adalah derajat kebebasan ($n-1$) dan α adalah level signifikan yang digunakan untuk uji statistik. Karena dalam penelitian ini, data pergeseran titik yang diamati ada 14 titik, maka dapat diasumsikan $df = 14 - 1 = 13$. Dalam studi ini level kepercayaan 95% (i.e. $\alpha = 5\%$) digunakan, dimana nilai $t_{13, 0.975}$ adalah 2.16. Karena $T > t = 6.009 > 2.16$, maka H_0 ditolak.

Dari hasil uji hipotesis diatas, diperoleh kesimpulan bahwa pada interval kepercayaan 95% terdapat bukti untuk menyatakan adanya perbedaan antara posisi kala 1 dengan posisi kala 2 tersebut

4.5 Uji Kelayakan Metode Fotogrametri Rentang Dekat.

Analisis kelayakan metode dilakukan dengan membandingkan hasil hitungan koordinat titik-titik GCP menggunakan metode Fotogrametri Rentang Dekat dengan metode Total Station. Perbandingan hasil hitungan koordinat menggunakan uji statistik *t-test*.

Untuk mengetahui kesamaan hasil hitungan koordinat, maka dilakukan uji statistic *t-test* pada interval kepercayaan 95%.

hipotesa nol $H_0 : \mu_{TS} = \mu_{CRP}$,

hipotesa alternatif $H_1 : \mu_{TS} \neq \mu_{CRP}$,

Untuk dapat menguji apakah harga $\mu_{TS} = \mu_{CRP}$ atau terdapat perbedaan secara signifikan, maka perlu dikonsultasikan dengan tabel distribusi *t student*, dengan memakai tingkat kepercayaan 95 % dan besar derajat kebebasan untuk uji t sampel berhubungan adalah dengan $n-1$. Berdasarkan tabel distribusi *t-student*, maka didapatkan $t_{0,975,1} = 12,706$.

Tabel 4.13 Hasil Uji *t student* pada koordinat *Easting*

EASTING					
Titik	TS (x)	CRP 1	CRP 2	Interval minimum	Interval maksimum
1a	696769.531	696769.347	696769.421	696769.3912	696769.6708
1b	696769.503	696769.679	696769.649	696769.3632	696769.6428
2a	696769.295	696769.322	696769.302	696769.1997	696769.3903
2b	696769.275	696769.259	696769.297	696769.1797	696769.3703
3a	696768.838	696768.832	696768.825	696768.6728	696769.0032
3b	696768.806	696768.787	696768.805	696768.6408	696768.9712
4a	696768.325	696768.310	696768.336	696768.3123	696768.3377
4b	696768.304	696768.323	696768.300	696768.2913	696768.3167
5a	696767.825	696767.818	696767.819	696767.7805	696767.8695
5b	696767.801	696767.817	696767.808	696767.7565	696767.8455
6a	696767.464	696767.424	696767.474	696767.3624	696767.5656
6b	696767.433	696767.370	696767.422	696767.3314	696767.5346
7a	696766.708	696766.773	696766.742	696766.6508	696766.7652
7b	696766.700	696766.707	696766.675	696766.6428	696766.7572

Tabel 4.14 Hasil Uji *t student* pada koordinat *Northing*

NORTHING					
Titik	TS (x)	CRP 1	CRP 2	Interval minimum	Interval maksimum
1a	9208256.671	9208256.539	9208256.569	9208256.493	9208256.849
1b	9208256.649	9208256.776	9208256.785	9208256.471	9208256.827
2a	9208250.739	9208250.747	9208250.740	9208250.612	9208250.866
2b	9208250.724	9208250.722	9208250.745	9208250.597	9208250.851
3a	9208244.292	9208244.289	9208244.287	9208244.089	9208244.495
3b	9208244.266	9208244.262	9208244.270	9208244.063	9208244.469
4a	9208237.304	9208237.294	9208237.307	9208237.171	9208237.437
4b	9208237.302	9208237.310	9208237.297	9208237.169	9208237.435
5a	9208230.445	9208230.447	9208230.447	9208230.293	9208230.597
5b	9208230.452	9208230.450	9208230.450	9208230.3	9208230.604
6a	9208223.812	9208223.841	9208223.807	9208223.615	9208224.009
6b	9208223.828	9208223.879	9208223.834	9208223.631	9208224.025
7a	9208218.097	9208218.037	9208218.059	9208218.046	9208218.148
7b	9208218.106	9208218.090	9208218.135	9208218.055	9208218.157

Tabel 4.15 Hasil Uji *t student* pada Koordinat Elevasi

ELEVASI					
Titik	TS (x)	CRP 1	CRP 2	Interval minimum	Interval maksimum
1a	4.099	4.091	4.100	4.029117	4.168883
1b	3.027	3.027	3.020	2.957117	3.096883
2a	4.183	4.182	4.189	4.1099405	4.2560595
2b	3.156	3.153	3.155	3.0829405	3.2290595
3a	4.255	4.263	4.248	4.1374695	4.3725305
3b	3.242	3.246	3.241	3.1244695	3.3595305
4a	4.311	4.303	4.307	4.2125285	4.4094715
4b	3.292	3.294	3.302	3.1935285	3.3904715
5a	4.312	4.308	4.308	4.18494	4.43906
5b	3.302	3.304	3.305	3.17494	3.42906
6a	4.289	4.288	4.291	4.212764	4.365236
6b	3.263	3.266	3.262	3.186764	3.339236
7a	4.244	4.243	4.244	4.155058	4.332942
7b	3.166	3.165	3.167	3.077058	3.254942

Dari tabel 4.13, 4.14, dan 4.15 di atas dapat dilihat sebagian besar hasil hitungan koordinat Fotogrametri Rentang Dekat terletak di antara interval kepercayaan. Tetapi ada beberapa koordinat yang tidak memenuhi kriteria uji statistik tersebut. Hal tersebut ditunjukkan pada tulisan yang berwarna merah (contoh : 920818.037). Pada sumbu X (*Easting*), koordinat yang ditolak dalam uji statistik *t-student* ada 4 titik pada kala 1 (1a, 1b, 4a, dan 4b) dan 1 titik pada kala 2 (1b). Pada sumbu Y (*Northing*), koordinat yang ditolak dalam uji statistik *t-student* hanya 1 titik, yakni titik 7a pada kala 1. Sedangkan pada sumbu Z (*Elevasi*), seluruh koordinat titik tersebut diterima dalam uji statistik. Dari hasil uji statistik tersebut dapat dilihat bahwa hasil pengukuran fotogrametri jarak dekat, ketelitian arah sumbu X lebih jelek dibandingkan ketelitian pada arah sumbu Y dan Z. Hal ini dikarenakan pada fotogrametri jarak dekat, arah sumbu X merupakan jarak pemotretan sebanding dengan arah sumbu Z pada fotogrametri.

Dikarenakan sebagian besar koordinat titik pengukuran fotogrametri rentang dekat diterima dalam uji statistik *t-student* tersebut, oleh karena itu H_0 diterima. Hal ini berarti bahwa $\mu_{TS} = \mu_{CRP}$, sehingga tidak ada perbedaan yang cukup berarti/signifikan antara hasil hitungan koordinat Fotogrametri Rentang Dekat dengan koordinat Total Station.



“halaman ini sengaja di kosongkan”

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang diperoleh berdasarkan hasil penelitian tugas akhir ini adalah :

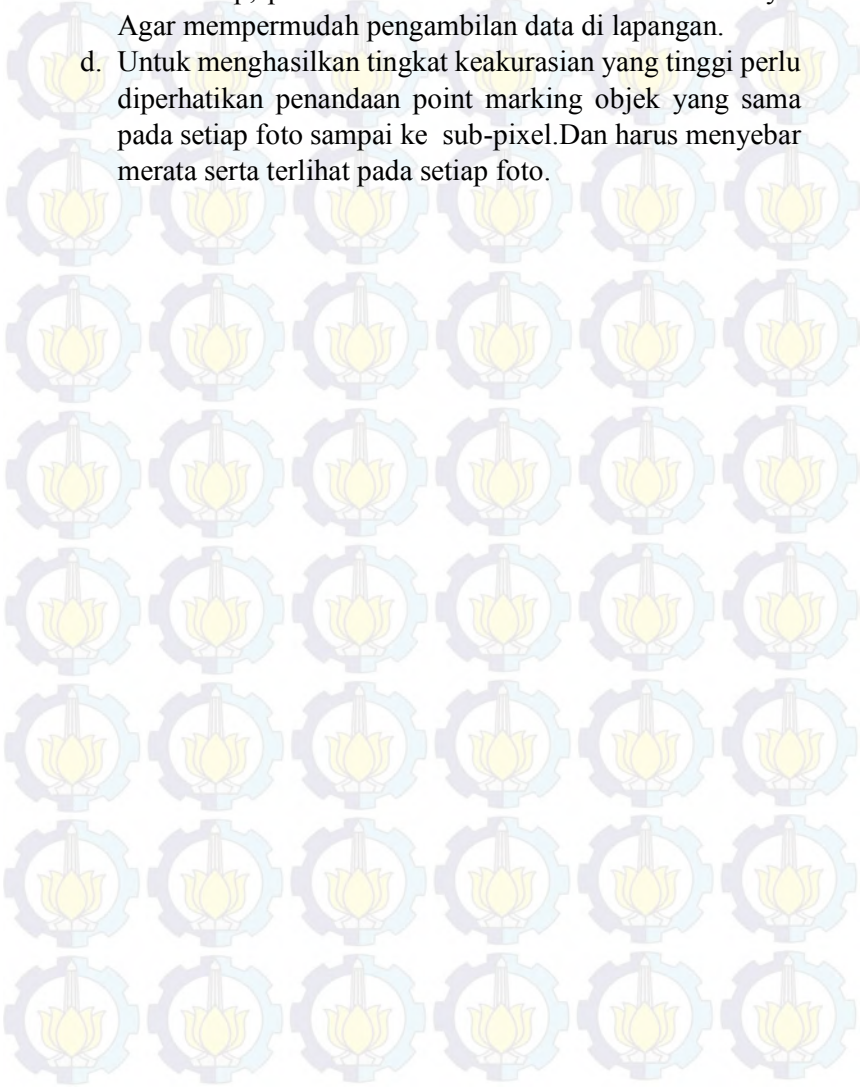
1. Berdasarkan analisis yang didapat pada penelitian yang dilakukan pada 9 April 2014 – 7 Juni 2014 pada jembatan Suramadu dapat dilihat bahwa adanya deformasi. Titik yang mengalami deformasi terbesar ialah terjadi pada titik 1a dimana pergeseran sumbu X dan Y sebesar 79 mm dan pergeseran sumbu Z sebesar 9 mm. Sedangkan titik yang mengalami deformasi yang terkecil ialah pada titik 5a dimana pergeseran sumbu X dan Y sebesar 1 mm dan tidak mengalami pergeseran sumbu Z.
2. Berdasarkan hasil analisis yang dilakukan pada penelitian ini bahwa metode fotogrametri jarak dekat dapat dipakai sebagai monitoring jembatan.

5.2 Saran

Beberapa saran yang dapat penulis sampaikan untuk pengembangan lebih lanjut di antaranya:

- a. Jika target yang digunakan akan juga diukur menggunakan alat ukur terestris untuk titik kontrolnya, lebih baik menggunakan target circular dengan benang silang di dalamnya. Dengan demikian dapat diperoleh akurasi pembidikan yang lebih baik.
- b. Perlu diadakan studi lebih lanjut terkait Fotogrametri Rentang Dekat, sehingga nantinya dapat digunakan dalam keperluan metode Fotogrametri Rentang Dekat untuk pengukuran ke lapangan.

- c. Untuk pengambilan data sebaiknya penempatan patok harus tetap, permanen dan sudah ada nilai koordinatnya. Agar mempermudah pengambilan data di lapangan.
- d. Untuk menghasilkan tingkat keakurasian yang tinggi perlu diperhatikan penandaan point marking objek yang sama pada setiap foto sampai ke sub-pixel. Dan harus menyebar merata serta terlihat pada setiap foto.

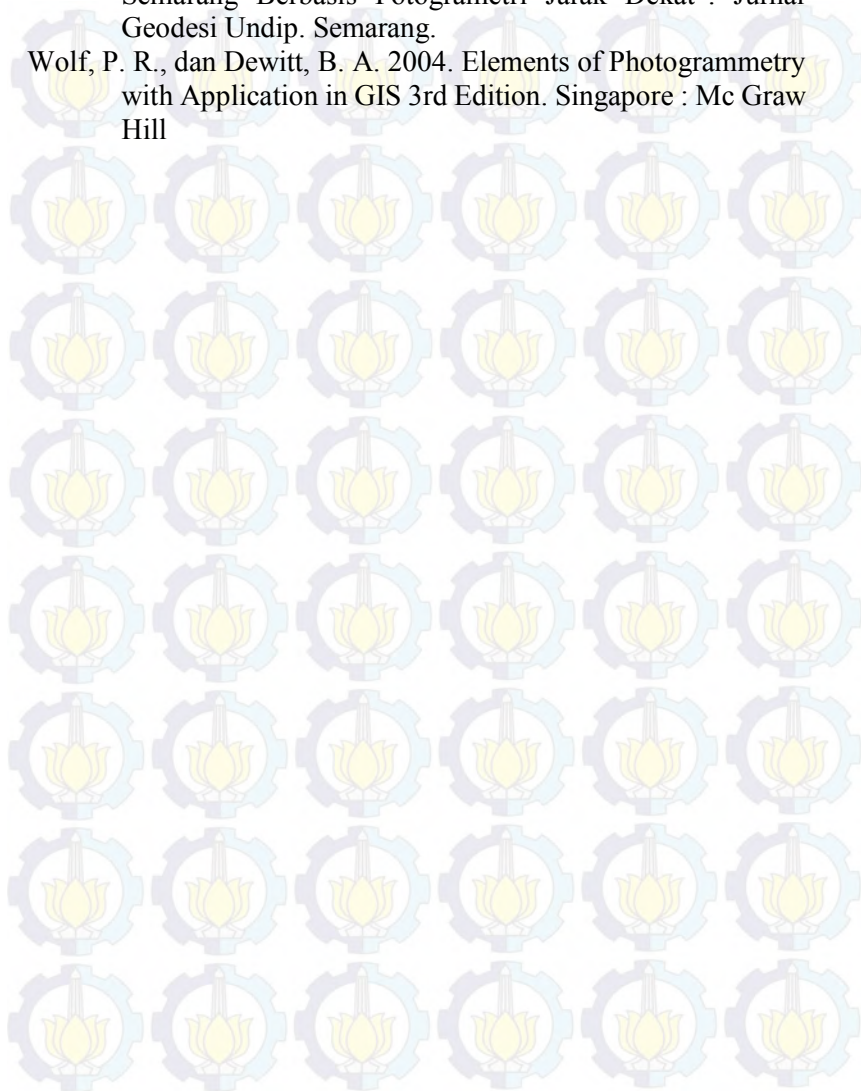


DAFTAR PUSTAKA

- Abidin, H. Z. 2006. Penentuan posisi dengan GPS dan aplikasinya. Jakarta : PT. Pradnya Paramita.
- Atkinson, K.B. 1996. Close Range Photogrammetry and Machine Vision. Scotland : Whittles Publishing.
- Atkinson. 1980. Developments in Close Range Photogrammetry- 1. London : Applied Science Publishers.
- Fraser, C.S. 1997. "Digital camera self-calibration". ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 52(4): 149-159.
- Hanifa, N. R. 2007. "Studi Penggunaan Kamera Digital Low-Cost Non-Metric Auto-Focus untuk Pemantauan Deformasi". Tesis Magister Program Studi Teknik Geodesi dan Geomatika ITB. Bandung.
- Leitch, K. 2002. "Close Range Photogrammetric Measurement of Bridge Deformation". Disertasi New Mexico State University. Meksiko.
- Mikhail, J. S. Bethel, et al, 2001. Introduction To Modern Photogrammetry. New York : John Wiley & Sons, Inc.
- Nababan, P. 2008. "Structural Health Monitoring System". Proceeding Construction and Maintenance of Main Span Suramadu Bridge. Surabaya : Ministry of Public Works
- Pullivelli, A. 2005. "Low-Cost Digital Cameras: Calibration, Stability Analysis, and Applications". Tesis Magister Department of Geomatics Engineering. University of Calgary.
- Supriyadi, B., dan Muntohar, A. S. 2007. Jembatan. Yogyakarta: Beta Offset
- Tjahjadi, M. E. 2010. "Pemantauan Deformasi Jalan Layang dan Jembatan Kereta Api dengan Kamera Dijital di Kota Malang". Jurnal Sondir Program Studi Teknik Sipil Institut Teknologi Nasional. Malang.

Utomo, A. N. 2013. “Monitoring Pergerakan Struktur Jembatan di Semarang Berbasis Fotogrametri Jarak Dekat”. Jurnal Geodesi Undip. Semarang.

Wolf, P. R., dan Dewitt, B. A. 2004. Elements of Photogrammetry with Application in GIS 3rd Edition. Singapore : Mc Graw Hill



SPESIFIKASI KAMERA DSLR NIKON D90



Effective pixels	12.3 million
Image sensor	CMOS sensor, 23.6 x 15.8 mm; total pixels: 12.9 million; Nikon DX format
Image size (pixels)	4,288 x 2,848 [L], 3,216 x 2,136 [M], 2,144 x 1,424 [S]
Sensitivity	ISO 200 to 3200 in steps of 1/3 EV, can also be set to approx. 0.3, 0.7 or 1 EV (ISO 100 equivalent) below ISO 200, or to approx. 0.3, 0.7 or 1 EV (ISO 6400 equivalent) over ISO 3200, ISO sensitivity auto control available
Storage media	SD memory cards, SDHC compliant

Monitor	3-in., approx. 920k-dot (VGA), low-temperature polysilicon TFT LCD with 170° viewing angle, approx. 100% frame coverage, and brightness adjustment
Exposure metering	3D Color Matrix Metering II, Center-Weighted and Spot Metering
Exposure modes	Auto modes (auto, auto [flash off]), Advanced Scene Modes (Portrait, Landscape, Sports, Close-up, Night Portrait), programmed auto with flexible program (P), shutter-priority auto (S), aperture-priority auto (A), manual (M)
Interface	Hi-Speed USB
Power sources	One Rechargeable Li-ion Battery EN-EL3e, Multi-Power Battery Pack MB-D80 (optional) with one or two Rechargeable Li-ion Battery EN-EL3e or six R6/AA-size alkaline, Ni-MH, lithium or nickel-manganese batteries (Battery Holder MS-D200 is required when using R6/AA-size batteries)
Dimensions (W x H x D)	Approx. 132 x 103 x 77 mm (5.2 x 4.1 x 3.0 in.)
Weight	Approx. 620 g (1 lb. 6 oz.) without battery, memory card, body cap or LCD monitor cover

Tabel Koordinat Foto dalam Satuan Milimeter

FOTO		TITIK															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	X	-7.227	-1.090	0.936	7.036	-7.102	-1.002	1.009	7.080	-7.058	-0.965	1.046	7.117	-6.992	-0.885	1.134	7.197
	Y	5.310	5.399	5.450	5.598	1.195	1.321	1.365	1.506	-0.847	-0.707	-0.662	-0.529	-4.940	-4.770	-4.718	-4.599
2	X	-5.627	-0.877	0.811	6.368	-5.487	-0.767	0.921	6.449	-5.443	-0.716	0.973	6.507	-5.377	-0.620	1.083	6.632
	Y	4.414	4.747	4.888	5.317	0.781	0.936	0.995	1.173	-1.025	-0.966	-0.951	-0.892	-4.644	-4.777	-4.829	-5.036
3	X	-6.911	-1.002	0.855	6.118	-6.823	-0.936	0.907	6.140	-6.779	-0.907	0.921	6.162	-6.720	-0.848	0.980	6.214
	Y	5.613	5.480	5.458	5.384	1.425	1.491	1.513	1.580	-0.662	-0.500	-0.448	-0.300	-4.829	-4.466	-4.355	-4.074
4	X	-7.528	-0.951	1.252	8.005	-7.256	-0.877	1.259	7.807	-7.139	-0.848	1.259	7.719	-6.948	-0.789	1.274	7.587
	Y	5.302	5.280	5.280	5.325	1.062	1.018	1.003	0.988	-0.973	-1.025	-1.040	-1.092	-4.918	-4.962	-4.984	-5.103
5	X	-5.707	-1.024	0.657	6.199	-5.494	-0.929	0.708	6.096	-5.406	-0.899	0.730	6.052	-5.274	-0.826	0.774	5.994
	Y	5.946	5.517	5.376	4.925	2.342	1.721	1.499	0.803	0.596	-0.107	-0.359	-1.188	-2.794	-3.660	-3.970	-5.036
6	X	-6.904	-0.877	0.987	6.199	-6.684	-0.833	0.987	6.052	-6.581	-0.796	0.980	5.986	-6.383	-0.752	0.980	5.876
	Y	5.132	5.709	5.902	6.464	0.840	1.639	1.891	2.609	-1.225	-0.315	-0.033	0.773	-5.221	-4.089	-3.741	-2.808
7	X	-7.014	-1.097	0.863	6.801	-7.131	-1.075	0.936	7.007	-7.197	-1.068	0.965	7.124	-7.374	-1.053	1.039	7.388
	Y	5.325	5.391	5.436	5.547	1.587	1.676	1.713	1.809	-0.352	-0.241	-0.211	-0.130	-4.370	-4.259	-4.237	-4.178
8	X	-5.157	-0.804	0.745	5.810	-5.171	-0.730	0.848	6.016	-5.186	-0.716	0.892	6.133	-5.274	-0.657	1.002	6.390
	Y	2.993	4.037	4.414	5.650	-0.270	0.633	0.958	1.994	-1.943	-1.121	-0.825	0.107	-5.421	-4.762	-4.533	-3.815
9	X	-5.179	-0.503	0.929	4.848	-5.289	-0.510	0.958	4.944	-5.355	-0.510	0.951	5.003	-5.472	-0.518	0.980	5.120
	Y	5.924	4.592	4.192	3.082	2.268	1.166	0.840	-0.085	0.381	-0.596	-0.892	-1.728	-3.519	-4.259	-4.488	-5.125

Tabel Hasil Parameter Exterior

Foto	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ω	-0.02245	-0.01137	-0.02892	-0.29354	-0.32481	-0.33474	0.30651	0.34313	0.36139
ϕ	-0.02025	0.49445	-0.36846	0.06104	0.52793	-0.45130	0.01113	0.50059	-0.61262
κ	-0.02154	-0.02164	-0.02434	0.00686	0.15114	-0.15643	-0.01507	-0.19069	0.21234
XL	89.581	471.991	-167.918	144.792	500.174	-220.282	113.945	490.990	-367.531
YL	86.699	82.787	87.618	277.083	279.439	282.280	-157.462	-161.487	-163.461
ZL	737.595	684.149	706.223	668.141	639.731	630.817	698.652	666.858	622.940

Tabel Hasil Kalibrasi Kamera

<i>Iterasi ke -</i>	X₀ (mm)	Y₀ (mm)	f (mm)	K1	K2	K3	P1	P2
1	-0.650	-0.095	47.736	-1.75E-04	2.38E-06	-2.04E-08	1.84E-05	2.84E-05
2	-0.554	-0.092	47.811	3.54E-04	4.92E-06	-4.21E-08	1.53E-05	5.99E-05
3	-0.553	-0.072	47.809	-5.29E-04	7.35E-06	-6.30E-08	2.38E-05	8.27E-05
4	-0.563	-0.055	47.808	-7.02E-04	9.73E-06	-8.36E-08	3.76E-05	1.02E-04
5	-0.576	-0.043	47.808	-8.75E-04	1.21E-05	-1.04E-07	5.58E-05	1.19E-04
6	-0.590	-0.033	47.808	-1.05E-03	1.44E-05	-1.24E-07	7.82E-05	1.35E-04
7	-0.604	-0.025	47.808	-1.22E-03	1.67E-05	-1.44E-07	1.04E-04	1.51E-04
8	-0.617	-0.018	47.808	-1.39E-03	1.90E-05	-1.64E-07	1.34E-04	1.65E-04
9	-0.631	-0.013	47.808	-1.56E-03	2.13E-05	-1.84E-07	1.67E-04	1.78E-04
10	-0.644	-0.007	47.808	-1.72E-03	2.35E-05	-2.03E-07	2.04E-04	1.90E-04
11	-0.657	-0.003	47.808	-1.89E-03	2.58E-05	-2.23E-07	2.44E-04	2.02E-04
12	-0.670	0.002	47.808	-2.06E-03	2.80E-05	-2.42E-07	2.88E-04	2.13E-04
13	-0.683	0.006	47.808	-2.23E-03	3.02E-05	-2.61E-07	3.34E-04	2.23E-04
14	-0.696	0.010	47.808	-2.39E-03	3.24E-05	-2.80E-07	3.84E-04	2.33E-04
15	-0.708	0.013	47.808	-2.56E-03	3.46E-05	-2.99E-07	4.37E-04	2.42E-04

Tabel Nilai *Reprojection Error*

Tabel Nilai Reprojection Error Foto - 1

TITIK	X	Y	TITIK	X	Y
1	-0.376	0.262	9	-0.233	-0.027
2	-0.018	0.111	10	0.003	0.004
3	0.035	0.107	11	0.016	0.001
4	0.596	0.399	12	0.339	-0.031
5	-0.241	0.035	13	-0.325	-0.231
6	-0.004	0.000	14	-0.001	-0.087
7	0.013	0.132	15	0.048	-0.097
8	0.343	-0.084	16	0.547	-0.305

Tabel Nilai Reprojection Error Foto - 2

TITIK	X	Y	TITIK	X	Y
1	-0.157	0.126	9	-0.120	-0.022
2	-0.006	0.093	10	-0.004	-0.002
3	0.038	0.095	11	0.008	-0.001
4	0.401	0.312	12	0.263	-0.042
5	-0.125	0.016	13	-0.155	-0.158
6	-0.004	-0.001	14	0.001	-0.107
7	0.006	0.108	15	0.038	-0.124
8	0.260	-0.080	16	0.447	-0.326

Tabel Nilai Reprojection Error Foto - 3

TITIK	X	Y	TITIK	X	Y
1	-0.342	0.294	9	-0.196	-0.027
2	-0.005	0.132	10	0.001	0.003
3	0.033	0.124	11	0.014	0.001
4	0.368	0.277	12	0.226	-0.018
5	-0.195	0.035	13	-0.288	-0.231
6	0.000	-0.001	14	-0.008	-0.088
7	0.005	0.138	15	0.038	-0.093
8	0.233	-0.079	16	0.314	-0.187

Tabel Nilai Reprojection Error Foto - 4

TITIK	X	Y	TITIK	X	Y
1	-0.393	0.291	9	-0.234	-0.042
2	-0.006	0.108	10	-0.001	0.006
3	0.045	0.119	11	0.015	0.000
4	0.893	0.544	12	0.439	-0.065
5	-0.235	0.025	13	-0.320	-0.237
6	-0.002	0.004	14	-0.006	-0.118
7	0.009	-0.027	15	0.050	-0.135
8	0.440	0.081	16	0.716	-0.456

Tabel Nilai Reprojection Error Foto - 5

TITIK	X	Y	TITIK	X	Y
1	-0.215	0.241	9	-0.117	0.008
2	-0.007	0.135	10	0.003	0.000

Tabel Nilai Reprojection Error Foto – 5 (lanjutan)

TITIK	X	Y	TITIK	X	Y
3	0.036	0.128	11	0.002	-0.002
4	0.342	0.248	12	0.228	-0.048
5	-0.134	0.044	13	-0.111	-0.061
6	-0.008	0.007	14	0.000	-0.053
7	0.004	-0.748	15	0.022	-0.080
8	0.221	0.827	16	0.341	-0.275

Tabel Nilai Reprojection Error Foto - 6

TITIK	X	Y	TITIK	X	Y
1	-0.310	0.245	9	-0.178	-0.051
2	-0.004	0.148	10	-0.001	0.002
3	0.038	0.160	11	0.008	0.003
4	0.500	0.457	12	0.213	0.011
5	-0.179	0.010	13	-0.282	-0.244
6	0.012	0.006	14	-0.004	-0.071
7	0.005	0.857	15	0.033	-0.068
8	0.235	-0.716	16	0.241	-0.094

Tabel Nilai Reprojection Error Foto – 7

TITIK	X	Y	TITIK	X	Y
1	-0.341	0.258	9	-0.227	-0.007
2	-0.020	0.126	10	-0.004	-0.009
3	0.035	0.121	11	0.004	-0.010
4	0.538	0.389	12	0.333	-0.017

Tabel Nilai Reprojection Error Foto – 7 (lanjutan)

TITIK	X	Y	TITIK	X	Y
5	-0.227	0.050	13	-0.318	-0.215
6	-0.008	0.002	14	-0.009	-0.078
7	0.002	0.088	15	0.035	-0.079
8	0.338	-0.023	16	0.524	-0.282

Tabel Nilai Reprojection Error Foto – 8

TITIK	X	Y	TITIK	X	Y
1	-0.107	0.063	9	-0.124	-0.043
2	0.000	0.055	10	0.005	-0.002
3	0.033	0.076	11	0.010	-0.009
4	0.342	0.301	12	0.222	0.001
5	-0.103	0.000	13	-0.170	-0.215
6	-0.010	0.000	14	0.005	-0.111
7	0.004	0.922	15	0.033	-0.109
8	0.227	-0.913	16	0.319	-0.187

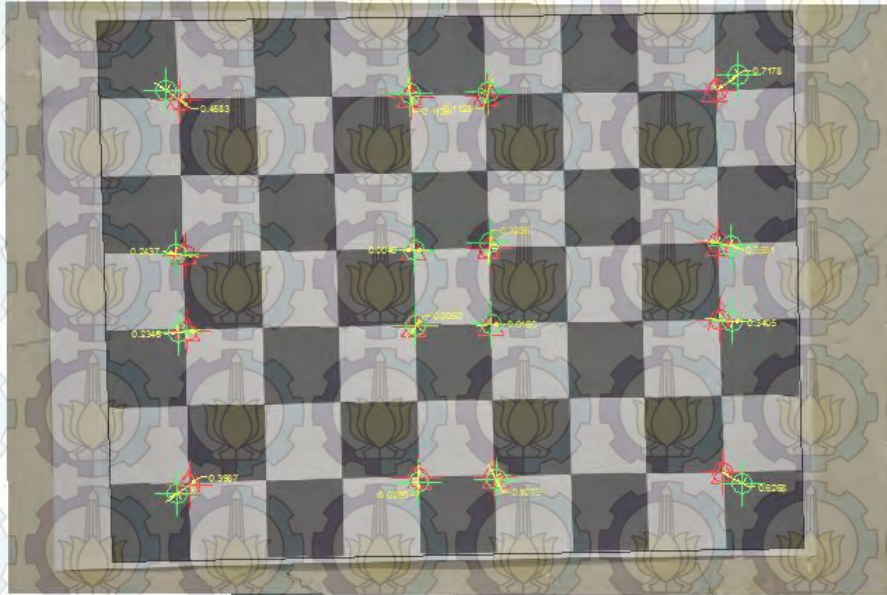
Tabel Nilai Reprojection Error Foto – 9

TITIK	X	Y	TITIK	X	Y
1	-0.181	0.225	9	-0.085	0.012
2	0.000	0.083	10	-0.004	-0.002
3	0.014	0.072	11	0.006	-0.009
4	0.162	0.097	12	0.158	-0.055
5	-0.102	0.052	13	-0.150	-0.113
6	0.000	0.003	14	-0.005	-0.081

Tabel Nilai Reprojection Error Foto – 9 (lanjutan)

TITIK	X	Y	TITIK	X	Y
7	-0.014	-0.930	15	0.032	-0.099
8	0.146	0.861	16	0.254	-0.235

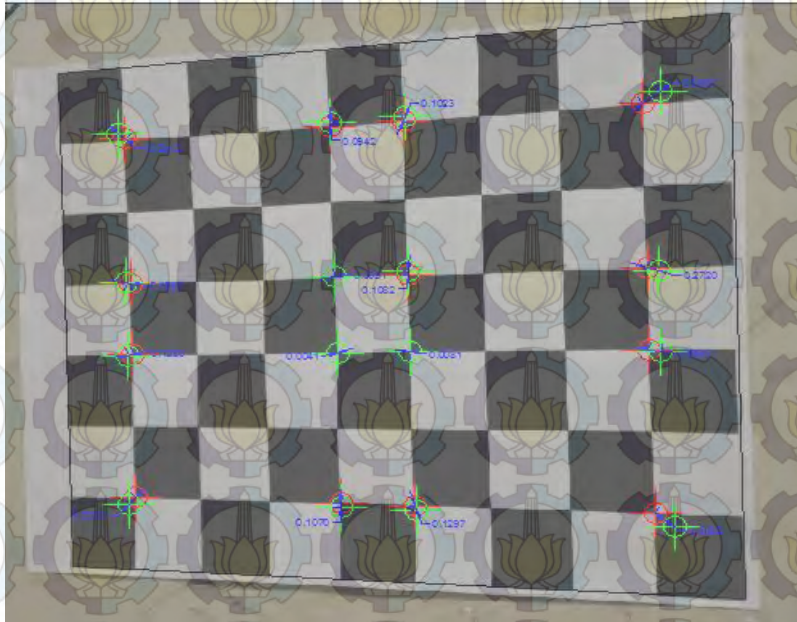
Model Distorsi *Reprojection Error* Foto 1



Keterangan :

- **Merah** = Titik GCP awal
- **Hijau** = Titik GCP terkoreksi

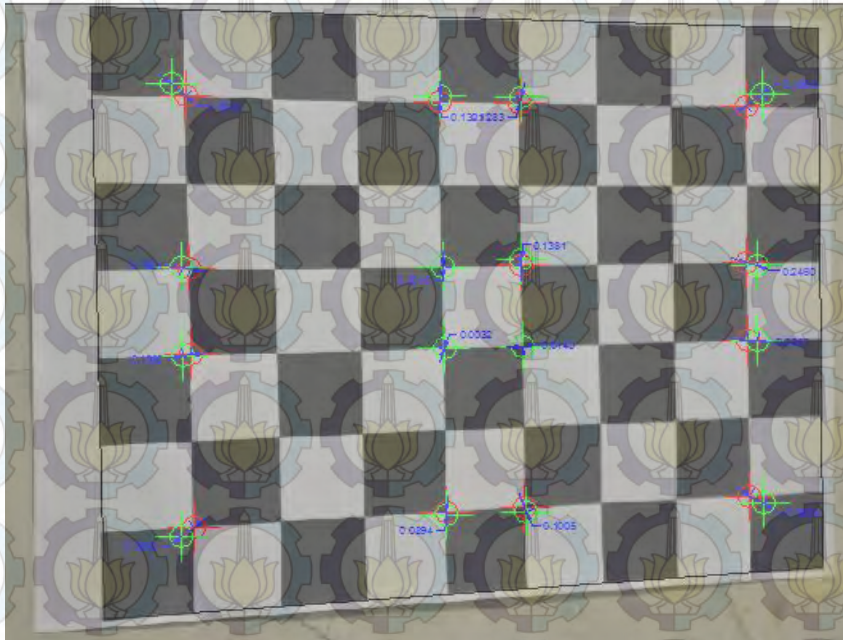
Model Distorsi *Reprojection Error* Foto 2



Keterangan :

- **Merah** = Titik GCP awal
- **Hijau** = Titik GCP terkoreksi

Model Distorsi *Reprojection Error* Foto 3



Keterangan :

- **Merah** = Titik GCP awal
- **Hijau** = Titik GCP terkoreksi

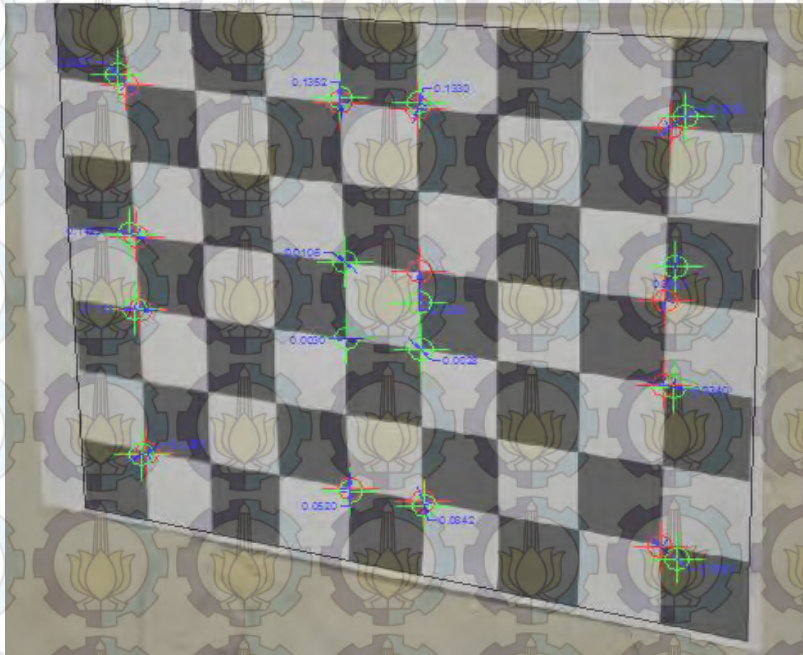
Model Distorsi *Reprojection Error* Foto 4



Keterangan :

- **Merah** = Titik GCP awal
- **Hijau** = Titik GCP terkoreksi

Model Distorsi *Reprojection Error* Foto 5



Keterangan :

- **Merah** = Titik GCP awal
- **Hijau** = Titik GCP terkoreksi

Model Distorsi *Reprojection Error* Foto 6



Keterangan :

- **Merah** = Titik GCP awal
- **Hijau** = Titik GCP terkoreksi

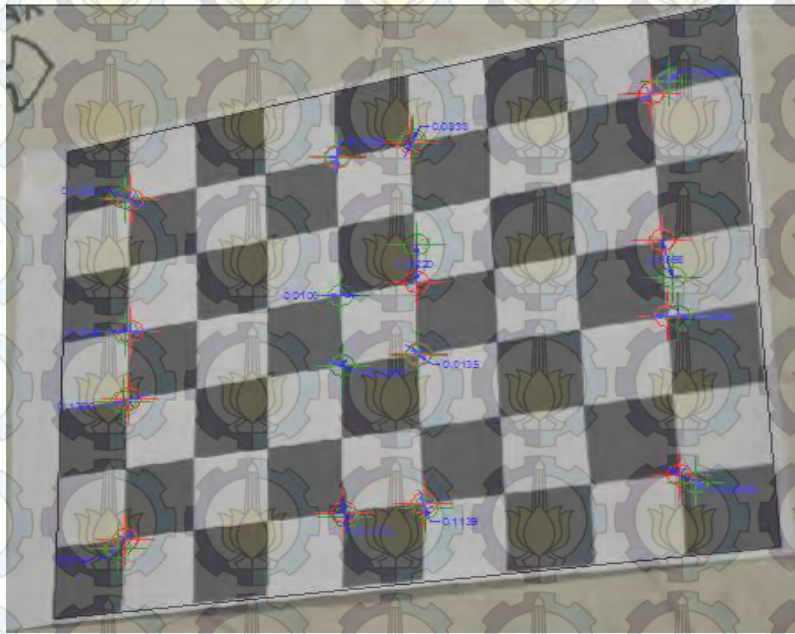
Model Distorsi *Reprojection Error* Foto 7



Keterangan :

- **Merah** = Titik GCP awal
- **Hijau** = Titik GCP terkoreksi

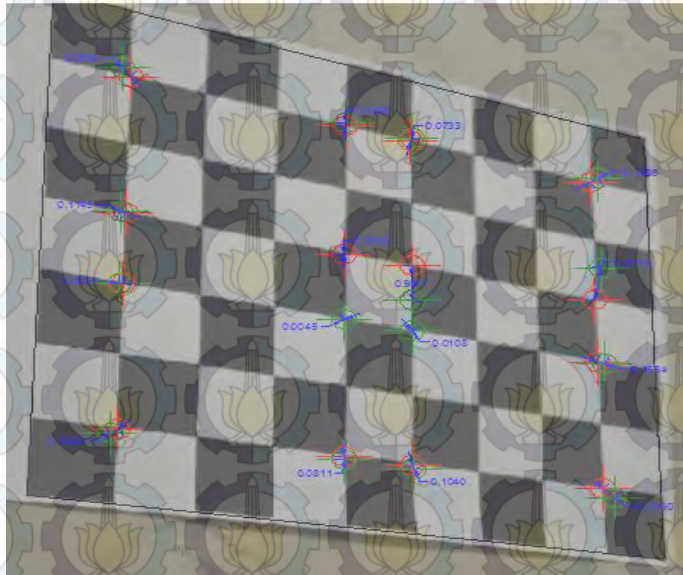
Model Distorsi *Reprojection Error* Foto 8



Keterangan :

- **Merah** = Titik GCP awal
- **Hijau** = Titik GCP terkoreksi

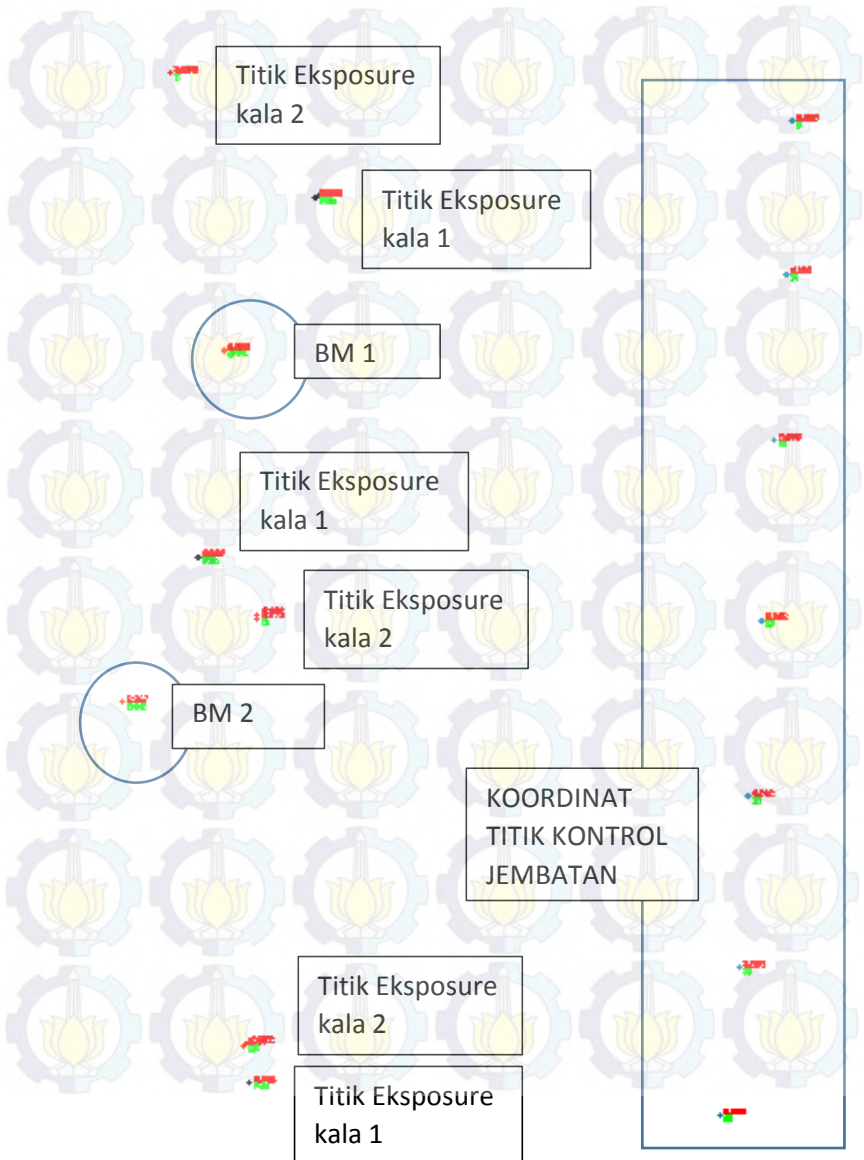
Model Distorsi *Reprojection Error* Foto 9



Keterangan :

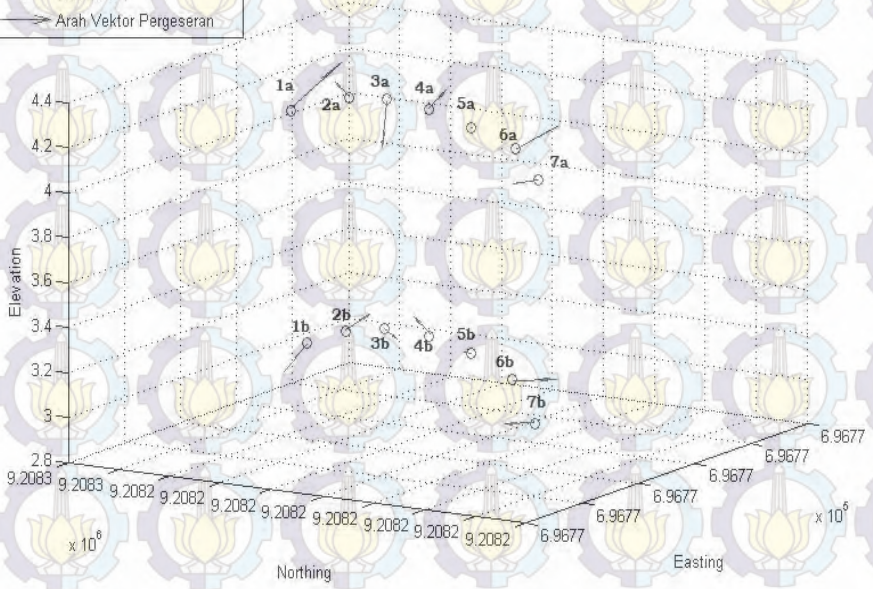
- **Merah** = Titik GCP awal
- **Hijau** = Titik GCP terkoreksi

SKETSA PENGUKURAN



ARAH VEKTOR DEFORMASI JEMBATAN

○ Titik Kala 1
→ Arah Vektor Pergeseran



CODING MATLAB RESECTION

```
clc; clear all;

disp('bismillah. semoga lancar. Amiin');

%===== IOP
=====
x0 = -0.617327213; y0 = -0.01848743; f =
47.80753961;
xyo=[x0;y0;f]

%===== Koordinat Foto
=====
x1 = 3.486760481; y1 = 3.308501512;
x2 = 3.548835331; y2 = 1.998299447;
x3 = 7.547165335; y3 = 3.68147752;
x4 = 7.799825882; y4 = 2.31748366;

xy = [x1 y1; x2 y2; x3 y3; x4 y4]

%===== Koordinat GCP
=====
Y1 = 9208250.739; X1 = 696769.295; Z1 =
4.183;
Y2 = 9208250.724; X2 = 696769.275; Z2 =
3.156;
Y3 = 9208244.292; X3 = 696768.838; Z3 =
4.255;
Y4 = 9208244.266; X4 = 696768.806; Z4 =
3.242;

XYZ = [X1 Y1 Z1; X2 Y2 Z2; X3 Y3 Z3; X4 Y4 Z4]

%===== EOP Pendekatan
=====
XL = 696749.29829;
YL = 9208220.31326;
ZL = 2.58694;
```

```

omega = 88.37308*(pi/180);
phi = -28.14619*(pi/180);
kappa = -3.17979*(pi/180);

eop = [omega; phi; kappa; XL; YL; ZL];

%===== Perhitungan EOP
=====
for i = 1:15

    %matriks rotasi
    m11 = cos(eop(2,1))*cos(eop(3,1));
    m12 =
sin(eop(1,1))*sin(eop(2,1))*cos(eop(3,1)) +
cos(eop(1,1))*sin(eop(3,1));
    m13 = -
cos(eop(1,1))*sin(eop(2,1))*cos(eop(3,1)) +
sin(eop(1,1))*sin(eop(3,1));
    m21 = -cos(eop(2,1))*sin(eop(3,1));
    m22 = -
sin(eop(1,1))*sin(eop(2,1))*sin(eop(3,1)) +
cos(eop(1,1))*cos(eop(3,1));
    m23 =
cos(eop(1,1))*sin(eop(2,1))*sin(eop(3,1)) +
sin(eop(1,1))*cos(eop(3,1));
    m31 = sin(eop(2,1));
    m32 = -sin(eop(1,1))*cos(eop(2,1));
    m33 = cos(eop(1,1))*cos(eop(2,1));

    M = [m11 m12 m13; m21 m22 m23; m31 m32 m33];

    %Koefisien r, s, dan q
    r1 = m11*(X1 - eop(4,1)) + m12*(Y1 -
eop(5,1)) + m13*(Z1 - eop(6,1));
    s1 = m21*(X1 - eop(4,1)) + m22*(Y1 -
eop(5,1)) + m23*(Z1 - eop(6,1));
    q1 = m31*(X1 - eop(4,1)) + m32*(Y1 -
eop(5,1)) + m33*(Z1 - eop(6,1));

```


$$r2 = m11*(X2 - eop(4,1)) + m12*(Y2 - eop(5,1)) + m13*(Z2 - eop(6,1));$$

$$s2 = m21*(X2 - eop(4,1)) + m22*(Y2 - eop(5,1)) + m23*(Z2 - eop(6,1));$$

$$q2 = m31*(X2 - eop(4,1)) + m32*(Y2 - eop(5,1)) + m33*(Z2 - eop(6,1));$$

$$r3 = m11*(X3 - eop(4,1)) + m12*(Y3 - eop(5,1)) + m13*(Z3 - eop(6,1));$$

$$s3 = m21*(X3 - eop(4,1)) + m22*(Y3 - eop(5,1)) + m23*(Z3 - eop(6,1));$$

$$q3 = m31*(X3 - eop(4,1)) + m32*(Y3 - eop(5,1)) + m33*(Z3 - eop(6,1));$$

$$r4 = m11*(X4 - eop(4,1)) + m12*(Y4 - eop(5,1)) + m13*(Z4 - eop(6,1));$$

$$s4 = m21*(X4 - eop(4,1)) + m22*(Y4 - eop(5,1)) + m23*(Z4 - eop(6,1));$$

$$q4 = m31*(X4 - eop(4,1)) + m32*(Y4 - eop(5,1)) + m33*(Z4 - eop(6,1));$$

`%Turunan parsial`

$$b11a = (f/q1^2)*(r1*(-m33*(Y1-eop(5,1)) + m32*(Z1-eop(6,1))) - q1*(-m13*(Y1-eop(5,1)) + m12*(Z1-eop(6,1))));$$

$$b12a = (f/q1^2)*(r1*(\cos(eop(2,1))*(X1-eop(4,1)) + \sin(eop(1,1))*\sin(eop(2,1))*(Y1-eop(5,1)) - \cos(eop(1,1))*\sin(eop(2,1))*(Z1-eop(6,1))) - q1*(-\sin(eop(2,1))*\cos(eop(3,1))*(X1-eop(4,1)) + \sin(eop(1,1))*\cos(eop(2,1))*\cos(eop(3,1))*(Y1-eop(5,1)) - \cos(eop(1,1))*\cos(eop(2,1))*\cos(eop(3,1))*(Z1-eop(6,1))));$$

$$b13a = (-f/q1)*(m21*(X1-eop(4,1)) + m22*(Y1-eop(5,1)) + m23*(Z1-eop(6,1)));$$

$$b14a = (f/q1^2)*(r1*m31 - q1*m11);$$

$$b15a = (f/q1^2)*(r1*m32 - q1*m12);$$

```

b16a = (f/q1^2)*(r1*m33 - q1*m13);
Ja = x1 - x0 + f*(r1/q1);
b21a = (f/q1^2)*(s1*(-m33*(Y1-eop(5,1)) +
m32*(Z1-eop(6,1))) - q1*(-m23*(Y1-eop(5,1)) +
m22*(Z1-eop(6,1)))));
b22a = (f/q1^2)*(s1*(cos(eop(2,1))* (X1-
eop(4,1)) + sin(eop(1,1))*sin(eop(2,1))* (Y1-
eop(5,1)) - cos(eop(1,1))*sin(eop(2,1))* (Z1-
eop(6,1))) -
q1*(sin(eop(2,1))*sin(eop(3,1))* (X1-eop(4,1)) -
sin(eop(1,1))*cos(eop(2,1))*sin(eop(3,1))* (Y1-
eop(5,1)) +
cos(eop(1,1))*cos(eop(2,1))*sin(eop(3,1))* (Z1-
eop(6,1)))));
b23a = (f/q1)*(m11*(X1-eop(4,1)) + m12*(Y1-
eop(5,1)) + m13*(Z1-eop(6,1)));
b24a = (f/q1^2)*(s1*m31 - q1*m21);
b25a = (f/q1^2)*(s1*m32 - q1*m22);
b26a = (f/q1^2)*(s1*m33 - q1*m23);
Ka = y1 - y0 + f*(s1/q1);

b11b = (f/q2^2)*(r2*(-m33*(Y2-eop(5,1)) +
m32*(Z2-eop(6,1))) - q2*(-m13*(Y2-eop(5,1)) +
m12*(Z2-eop(6,1)))));
b12b = (f/q2^2)*(r2*(cos(eop(2,1))* (X2-
eop(4,1)) + sin(eop(1,1))*sin(eop(2,1))* (Y2-
eop(5,1)) - cos(eop(1,1))*sin(eop(2,1))* (Z2-
eop(6,1))) - q2*(-
sin(eop(2,1))*cos(eop(3,1))* (X2-eop(4,1)) +
sin(eop(1,1))*cos(eop(2,1))*cos(eop(3,1))* (Y2-
eop(5,1)) -
cos(eop(1,1))*cos(eop(2,1))*cos(eop(3,1))* (Z2-
eop(6,1)))));
b13b = (-f/q2)*(m21*(X2-eop(4,1)) + m22*(Y2-
eop(5,1)) + m23*(Z2-eop(6,1)));
b14b = (f/q2^2)*(r2*m31 - q2*m11);
b15b = (f/q2^2)*(r2*m32 - q2*m12);
b16b = (f/q2^2)*(r2*m33 - q2*m13);
Jb = x2 - x0 + f*(r2/q2);

```

$$b21b = (f/q2^2) * (s2 * (-m33 * (Y2 - eop(5,1)) + m32 * (Z2 - eop(6,1))) - q2 * (-m23 * (Y2 - eop(5,1)) + m22 * (Z2 - eop(6,1))));$$

$$b22b = (f/q2^2) * (s2 * (\cos(eop(2,1)) * (X2 - eop(4,1)) + \sin(eop(1,1)) * \sin(eop(2,1)) * (Y2 - eop(5,1)) - \cos(eop(1,1)) * \sin(eop(2,1)) * (Z1 - eop(6,1))) - q2 * (\sin(eop(2,1)) * \sin(eop(3,1)) * (X2 - eop(4,1)) - \sin(eop(1,1)) * \cos(eop(2,1)) * \sin(eop(3,1)) * (Y2 - eop(5,1)) + \cos(eop(1,1)) * \cos(eop(2,1)) * \sin(eop(3,1)) * (Z2 - eop(6,1))));$$

$$b23b = (f/q2) * (m11 * (X2 - eop(4,1)) + m12 * (Y2 - eop(5,1)) + m13 * (Z2 - eop(6,1)));$$

$$b24b = (f/q2^2) * (s2 * m31 - q2 * m21);$$

$$b25b = (f/q2^2) * (s2 * m32 - q2 * m22);$$

$$b26b = (f/q2^2) * (s2 * m33 - q2 * m23);$$

$$Kb = y2 - y0 + f * (s2/q2);$$

$$b11c = (f/q3^2) * (r3 * (-m33 * (Y3 - eop(5,1)) + m32 * (Z3 - eop(6,1))) - q3 * (-m13 * (Y3 - eop(5,1)) + m12 * (Z3 - eop(6,1))));$$

$$b12c = (f/q3^2) * (r3 * (\cos(eop(2,1)) * (X3 - eop(4,1)) + \sin(eop(1,1)) * \sin(eop(2,1)) * (Y3 - eop(5,1)) - \cos(eop(1,1)) * \sin(eop(2,1)) * (Z3 - eop(6,1))) - q3 * (-\sin(eop(2,1)) * \cos(eop(3,1)) * (X3 - eop(4,1)) + \sin(eop(1,1)) * \cos(eop(2,1)) * \cos(eop(3,1)) * (Y3 - eop(5,1)) - \cos(eop(1,1)) * \cos(eop(2,1)) * \cos(eop(3,1)) * (Z3 - eop(6,1))));$$

$$b13c = (-f/q3) * (m21 * (X3 - eop(4,1)) + m22 * (Y3 - eop(5,1)) + m23 * (Z3 - eop(6,1)));$$

$$b14c = (f/q3^2) * (r3 * m31 - q3 * m11);$$

$$b15c = (f/q3^2) * (r3 * m32 - q3 * m12);$$

$$b16c = (f/q3^2) * (r3 * m33 - q3 * m13);$$

$$Jc = x3 - x0 + f * (r3/q3);$$

$$b21c = (f/q3^2) * (s3 * (-m33 * (Y3 - eop(5,1)) + m32 * (Z3 - eop(6,1))) - q3 * (-m23 * (Y3 - eop(5,1)) + m22 * (Z3 - eop(6,1))));$$

$$b22c = (f/q3^2) * (s3 * (\cos(eop(2,1)) * (X3 - eop(4,1)) + \sin(eop(1,1)) * \sin(eop(2,1)) * (Y3 - eop(5,1)) - \cos(eop(1,1)) * \sin(eop(2,1)) * (Z3 - eop(6,1))) - q3 * (\sin(eop(2,1)) * \sin(eop(3,1)) * (X3 - eop(4,1)) - \sin(eop(1,1)) * \cos(eop(2,1)) * \sin(eop(3,1)) * (Y3 - eop(5,1)) + \cos(eop(1,1)) * \cos(eop(2,1)) * \sin(eop(3,1)) * (Z3 - eop(6,1))));$$

$$b23c = (f/q3) * (m11 * (X3 - eop(4,1)) + m12 * (Y3 - eop(5,1)) + m13 * (Z3 - eop(6,1)));$$

$$b24c = (f/q3^2) * (s3 * m31 - q3 * m21);$$

$$b25c = (f/q3^2) * (s3 * m32 - q3 * m22);$$

$$b26c = (f/q3^2) * (s3 * m33 - q3 * m23);$$

$$Kc = y3 - y0 + f * (s3/q3);$$

$$b11d = (f/q4^2) * (r4 * (-m33 * (Y4 - eop(5,1)) + m32 * (Z4 - eop(6,1))) - q4 * (-m13 * (Y4 - eop(5,1)) + m12 * (Z4 - eop(6,1))));$$

$$b12d = (f/q4^2) * (r4 * (\cos(eop(2,1)) * (X4 - eop(4,1)) + \sin(eop(1,1)) * \sin(eop(2,1)) * (Y4 - eop(5,1)) - \cos(eop(1,1)) * \sin(eop(2,1)) * (Z4 - eop(6,1))) - q4 * (-\sin(eop(2,1)) * \cos(eop(3,1)) * (X4 - eop(4,1)) + \sin(eop(1,1)) * \cos(eop(2,1)) * \cos(eop(3,1)) * (Y4 - eop(5,1)) - \cos(eop(1,1)) * \cos(eop(2,1)) * \cos(eop(3,1)) * (Z4 - eop(6,1))));$$

$$b13d = (-f/q4) * (m21 * (X4 - eop(4,1)) + m22 * (Y4 - eop(5,1)) + m23 * (Z4 - eop(6,1)));$$

$$b14d = (f/q4^2) * (r4 * m31 - q4 * m11);$$

$$b15d = (f/q4^2) * (r4 * m32 - q4 * m12);$$

$$b16d = (f/q4^2) * (r4 * m33 - q4 * m13);$$

$$Jd = x4 - x0 + f * (r4/q4);$$

```
b21d = (f/q4^2)*(s4*(-m33*(Y4-eop(5,1)) +  
m32*(Z4-eop(6,1))) - q4*(-m23*(Y4-eop(5,1)) +  
m22*(Z4-eop(6,1)))));
```

```
b22d = (f/q4^2)*(s4*(cos(eop(2,1))*(X4-  
eop(4,1)) + sin(eop(1,1))*sin(eop(2,1))*(Y4-  
eop(5,1)) - cos(eop(1,1))*sin(eop(2,1))*(Z4-  
eop(6,1))) -  
q4*(sin(eop(2,1))*sin(eop(3,1))*(X4-eop(4,1)) -  
sin(eop(1,1))*cos(eop(2,1))*sin(eop(3,1))*(Y4-  
eop(5,1)) +  
cos(eop(1,1))*cos(eop(2,1))*sin(eop(3,1))*(Z4-  
eop(6,1)))));
```

```
b23d = (f/q4)*(m11*(X4-eop(4,1)) + m12*(Y4-  
eop(5,1)) + m13*(Z4-eop(6,1)));
```

```
b24d = (f/q4^2)*(s4*m31 - q4*m21);
```

```
b25d = (f/q4^2)*(s4*m32 - q4*m22);
```

```
b26d = (f/q4^2)*(s4*m33 - q4*m23);
```

```
Kd = y4 - y0 + f*(s4/q4);
```

```
B = [b11a b12a b13a -b14a -b15a -b16a; b21a  
b22a b23a -b24a -b25a -b26a;  
b11b b12b b13b -b14b -b15b -b16b; b21b  
b22b b23b -b24b -b25b -b26b;  
b11c b12c b13c -b14c -b15c -b16c; b21c  
b22c b23c -b24c -b25c -b26c;  
b11d b12d b13d -b14d -b15d -b16d; b21d  
b22d b23d -b24d -b25d -b26d];
```

```
E = [Ja; Ka; Jb; Kb; Jc; Kc; Jd; Kd];
```

```
delta = (inv(B'*B))*(B'*E);
```

```
eop = eop+delta;
```

```
end
```

```
omega = eop(1)*(180/pi);
```

```
phi = eop(2)*(180/pi);
```

```
kappa = eop(3)*(180/pi);
```

```
XL = eop(4);
```

```
YL = eop(5);
```

```
ZL = eop(6);
```

```
EOP = [omega; phi; kappa; XL; YL; ZL]
```

```
%===== Standar Deviasi
```

```
=====%
```

```
nsd = size(delta,1);
```

```
msd = size(B,1);
```

```
rsd = msd - nsd;
```

```
V = B*delta - E;
```

```
So = sqrt((V'*V)/rsd);
```

```
Qxx = inv(B'*B);
```

```
Sxx = So*sqrt(Qxx);
```

```
SD = diag(Sxx)
```

CODING MATLAB INTERSECTION

```
%  
MULTI PHOTO INTERSECTION  
% the mathematical model is based on the  
collinearity equations in Photogrammetry and  
machine vision topics.  
% Input: 1-Orientation of the cameras "three  
angles [deg] and three coordinates[m] for each  
camera"  
% 2- focal length f [mm] - assume  
xo=yo=lens distortion=0  
% 3- measured photo coordinates in [mm]  
in both photos  
% Output:  
% 3D metric coordinates of the image points by  
least square adjustment  
%
```

```
function [XYZ,SD] =  
multiintersect(wpk,xyo,xp,yp,xyz)
```

```
omega = wpk(:,1)*(pi/180); phi =  
wpk(:,2)*(pi/180); kappa = wpk(:,3)*(pi/180);  
XL = wpk(:,4); YL = wpk(:,5); ZL = wpk(:,6);
```

```
xo = xyo(1,1); yo = xyo(2,1); f = xyo(3,1);  
xx = xyz(1,1); yy = xyz(1,2); zz = xyz(1,3);
```

```
p = size(wpk,1);  
delta = ones(3,1);  
iterasi = 0;
```

```
while abs(delta)>10^(-6)
```

```
iterasi = iterasi + 1;
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Matriks Rotasi  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
for i = 1:p  
    m11(i,1) = cos(phi(i,1))*cos(kappa(i,1));  
    m12(i,1) =  
sin(omega(i,1))*sin(phi(i,1))*cos(kappa(i,1)) +  
cos(omega(i,1))*sin(kappa(i,1));  
    m13(i,1) = -  
cos(omega(i,1))*sin(phi(i,1))*cos(kappa(i,1)) +  
sin(omega(i,1))*sin(kappa(i,1));  
    m21(i,1) = -cos(phi(i,1))*sin(kappa(i,1));  
    m22(i,1) = -  
sin(omega(i,1))*sin(phi(i,1))*sin(kappa(i,1)) +  
cos(omega(i,1))*cos(kappa(i,1));  
    m23(i,1) =  
cos(omega(i,1))*sin(phi(i,1))*sin(kappa(i,1)) +  
sin(omega(i,1))*cos(kappa(i,1));  
    m31(i,1) = sin(phi(i,1));  
    m32(i,1) = -sin(omega(i,1))*cos(phi(i,1));  
    m33(i,1) = cos(omega(i,1))*cos(phi(i,1));
```

```
    q(i,1) = m31(i,1)*(xx - XL(i,1)) +  
m32(i,1)*(yy - YL(i,1)) + m33(i,1)*(zz -  
ZL(i,1));
```

```
    r(i,1) = m11(i,1)*(xx - XL(i,1)) +  
m12(i,1)*(yy - YL(i,1)) + m13(i,1)*(zz -  
ZL(i,1));
```

```
    s(i,1) = m21(i,1)*(xx - XL(i,1)) +  
m22(i,1)*(yy - YL(i,1)) + m23(i,1)*(zz -  
ZL(i,1));
```

```
end
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Matriks B dan E  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
for i = 1:p
```



```

    b14(i,1) = (f/(q(i,1)^2))*(r(i,1)*m31(i,1) -
    q(i,1)*m11(i,1));
    b15(i,1) = (f/(q(i,1)^2))*(r(i,1)*m32(i,1) -
    q(i,1)*m12(i,1));
    b16(i,1) = (f/(q(i,1)^2))*(r(i,1)*m33(i,1) -
    q(i,1)*m13(i,1));
    b24(i,1) = (f/(q(i,1)^2))*(s(i,1)*m31(i,1) -
    q(i,1)*m21(i,1));
    b25(i,1) = (f/(q(i,1)^2))*(s(i,1)*m32(i,1) -
    q(i,1)*m22(i,1));
    b26(i,1) = (f/(q(i,1)^2))*(s(i,1)*m33(i,1) -
    q(i,1)*m23(i,1));

    J(i,1) = xp(i,1) - xo + f*(r(i,1)/q(i,1));
    K(i,1) = yp(i,1) - yo + f*(s(i,1)/q(i,1));

    B(i*2-1,:) = [b14(i) b15(i) b16(i)];
    B(i*2,:) = [b24(i) b25(i) b26(i)];
    e(i*2-1,:) = [J(i)];
    e(i*2,:) = [K(i)];
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Least Square
Adjustment %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

delta = (inv(B'*B))*(B'*e)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Koordinat Objek 3D
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

xx = xx + delta(1);
yy = yy + delta(2);
zz = zz + delta(3);

end

XYZ = [xx    yy    zz];

```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Standar Deviasi
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
v = (B*delta) - e  
vtv = v'*v;  
m = size(B,1);  
u = size(delta,1);  
r = m - u;  
So = sqrt(vtv/r);  
Q = inv(B'*B);  
Qxx = diag(Q);  
SD = So*(sqrt(Qxx));
```



BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Surabaya, 15 Desember 1992, merupakan anak pertama dari 3 bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal di TK Sylva Puspita, SDN Pabean I, kemudian SMP Negeri I Waru dan SMA Negeri I Waru, Kabupaten Sidoarjo. Setelah lulus dari SMA memilih melanjutkan kuliah S-1 dengan mengikuti program SNMPTN dan diterima di Teknik Geomatika – FTSP, ITS pada tahun 2010 terdaftar dengan NRP

3510100032. Selama kuliah di Teknik Geomatika, penulis aktif mengikuti berbagai organisasi di ITS. Organisasi yang pernah diikuti antara lain HIMAGE, BEM FTSP, dan DPM. Pada tahun 2010, penulis berpartisipasi dalam kegiatan Program Kreativitas Mahasiswa Gagasan Tertulis (PKM – GT) dengan judul “Pembangunan Taman Kota dengan Konsep Vertical Garden” Dalam kegiatan akademik penulis aktif dan terdaftar sebagai Asisten Praktikum pada mata Kuliah Fotogrametri dan Fotogrametri Digital. Penulis memilih bidang kajian Geomatika dalam tugas akhirnya dengan judul “Analisa Deformasi Jembatan Suramadu dengan Teknik Fotogrametri Rentang Dekat”.