

**ORTOREKTIFIKASI FOTO FORMAT KECIL UNTUK PERHITUNGAN DEFORMASI JEMBATAN
(Studi Kasus : Jembatan Suramadu, Surabaya - Madura)**

*Orthorectification of Small Format Image For Calculation Bridge Deformation
(Case Study : Suramadu Bridge, Surabaya-Madura)*

Hepi Hapsari Handayani¹, Shofiyatul Qoyimah¹

¹Jurusan Teknik Geomatika, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Email: hapsari@geodesy.its.ac.id

Abstrak

Jembatan Suramadu merupakan jembatan terpanjang di Indonesia yang melintasi Selat Madura untuk menghubungkan Pulau Jawa (di Kota Surabaya) dan Pulau Madura (di Bangkalan), Indonesia. Pengamatan deformasi dilakukan untuk memberikan informasi geometrik dari benda terdeformasi. Fotogrametri jarak dekat digunakan untuk pengamatan deformasi karena kelebihanannya dalam hal efisiensi biaya serta ukuran dan jangkauan objek yang diamati. Proses kalibrasi kamera dan ortorektifikasi (pembuatan foto tegak) dilakukan untuk mereduksi pergeseran film akibat ketidakstabilan parameter orientasi pada kamera digital non metrik format kecil. Hasil dari proses ortorektifikasi berupa mosaik ortofoto dengan sistem koordinat 2 dimensi dan DEM. Pengamatan deformasi menggunakan proses ortorektifikasi sisi Gresik jembatan Suramadu pada tanggal 19 Maret 2015 dan 7 Mei 2015 menunjukkan bahwa di bentang 1 (antara *Abutment* Surabaya dan pilar 1, deformasi pada sumbu XY berkisar antara 1 – 16 mm dan pada sumbu Z berkisar antara 0 – 35 mm. Dan di bentang 100 (antara pilar 99 dan 100), deformasi pada sumbu XY berkisar antara 11 – 55 mm dan pada sumbu Z berkisar antara 6 – 37 mm. Uji validasi koordinat mosaik ortofoto terhadap koordinat pengukuran terestris menunjukkan bahwa koordinat mosaik ortofoto di arah Surabaya tidak memiliki nilai yang signifikan sedangkan di arah Madura memiliki nilai yang signifikan terhadap koordinat hasil pengukuran terestris. Terdapat beberapa saran untuk penelitian berikutnya. Pertama, melakukan pengamatan lebih dari 2 kala. Kedua, menggunakan GCP yang memiliki tanda silang. Ketiga, melakukan proses kalibrasi *bundle adjustment self calibration* dengan menggunakan titik kontrol pada jembatan dan keempat adalah melakukan percobaan lebih dari 1 kali dalam proses ortorektifikasi.

Kata Kunci: Deformasi, Jembatan Suramadu, Kamera Digital Non Metrik Format Kecil, Ortorektifikasi

Abstract

Suramadu Bridge is the longest bridge in Indonesia that crosses Madura Strait and connecting Java Island (at Surabaya City) and Madura Island (at Bangkalan), Indonesia. A deformation monitoring periodically needed to find out the geometric information of the deformed object. Close range photogrammetry is used in deformation monitoring because of its advantages including cost saving, objects dimension and range of the measurement. Camera calibration and orthorectification (orthophoto) are useful to decrease the film movement because of instability orientation parameter in small format non metric digital camera. Orthophoto mosaic has 2 dimension coordinate system and DEM value. Deformation monitoring using orthorectification at Gresik side of Suramadu bridge on March, 19th 2015 and on May, 7th 2015 shows that at the first tigt (between Surabaya Abutment and first pier), any deformations have a range of 1 – 16 mm in the XY axis and 0 – 35 mm in the Z axis. At 100th tigt (between 99th pier and 100th pier), deformations have a range of 11 – 55 mm in the XY axis and 6 – 37 mm in the Z axis. Test of validation for orthophoto mosaic coordinates showed that orthophoto coordinates in Surabaya side do not have a significant value, but at Madura orthophoto coordinates has significant value to the to the terrestrial measuring coordinates. There are some advices for the next research. First, do monitoring process more than 2 times. Second, use GCP that have a cross marker. Third, do bundle adjustment self calibration using control point on the bridge and try orthorectification process more than 1 times.

Keywords: Deformation, Orthorectification, Small Format Non Metric Digital Camera, Suramadu Bridge

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Jembatan Suramadu merupakan jembatan terpanjang di Indonesia (5.438 m) yang melintasi Selat Madura dengan tujuan untuk mempercepat pembangunan di Pulau Madura (BPWS, 2011). Dalam kurun waktu 9 April 2014 – 7 Juni 2014 dengan menggunakan metode fotogrametri jarak dekat, Jembatan Suramadu pada bentang 102 (antara pilar 102 dan *Abutment* Madura) mengalami pergeseran posisi maksimal ke arah sumbu X dan Y dalam sistem koordinat UTM sebesar 79 mm dan ke arah sumbu Z sebesar 9 mm (Elviani, 2014). Metode fotogrametri memiliki kelebihan seperti biayanya yang terjangkau, objek yang diamati berdimensi kecil dan cakupan pengamatan secara keseluruhan maupun sebagian (Jiang, 2005; Hampel, 2006; Atkinson, 1980).

Kamera non metrik format kecil memiliki kelebihan dalam pengolahan, penyimpanan serta analisis secara digital (Atkinson, 1980) tetapi memiliki kekurangan ketidakstabilan parameter orientasi dalam dan tidak adanya penentuan parameter orientasi luar saat pemotretan (Geogopoulos, 1992). Untuk mereduksi ketidakstabilan orientasi dalam, distorsi lensa dan pergeseran film maka dilakukan dengan kombinasi proses kalibrasi dan evaluasi berdasarkan pemodelan matematis (Ahmad, 1994) dimana model matematis yang digunakan ada dalam proses ortorektifikasi (proses pembuatan foto tegak untuk menghilangkan distorsi akibat dari kemiringan kamera dan pergeseran relief) yakni model kolinearitas (Yang, 2000).

Pada penelitian Ortorektifikasi Foto Format Kecil ini menitikberatkan pada cara pengolahan foto ujung Jembatan Suramadu dari arah Surabaya dan Madura dengan teknik ortorektifikasi pada foto guna mengetahui nilai deformasi yang terjadi.

METODOLOGI PENELITIAN

Data Dan Peralatan

- Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Bidang kalibrasi kamera 2 dimensi

2. Data spesifikasi kamera Nikon D3000
3. Data ukuran BM
4. Data ukuran GCP
5. Foto – foto Jembatan Suramadu

- Peralatan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Kamera Nikon D3000
2. *Electronic Total Station*
3. *Receiver GPS Geodetik*
4. Laptop
5. Mistar *glass*
6. Program fotogrametri
7. MATLAB
8. Perangkat lunak pengolah teks
9. Perangkat plotting koordinat

Metode Penelitian

Lokasi penelitian ini adalah jembatan Suramadu sisi Gresik di bentang 1 (antara *Abutment* Surabaya dan pilar 1 / arah Surabaya) dan di bentang 100 (antara pilar 99 dan 100 / arah Madura).

Penelitian ini meliputi 7 proses pengolahan data. Pertama adalah tahapan kalibrasi kamera menggunakan program MATLAB atas dasar metode *bundle adjustment laboratory calibration*. Tahap kedua adalah yaitu pengukuran kerangka dasar terhadap posisi BM yang ada di Surabaya dan Madura menggunakan alat GPS Geodetik dan pengukuran GCP pada jembatan menggunakan alat ETS. Tahap ketiga adalah pemotretan jembatan Suramadu di darat menggunakan kamera Nikon D3000 dari sembarang posisi dan orientasi. Tahap keempat adalah proses ortorektifikasi menggunakan program fotogrametri dengan data foto jembatan dan hasil kalibrasi. Hasil dari proses ortorektifikasi berupa mosaik ortofoto. Tahap kelima adalah penentuan koordinat objek deformasi dalam sistem koordinat UTM 3 dimensi. Tahap keenam adalah penentuan vektor pergeseran untuk mengetahui kemungkinan adanya deformasi objek dengan menghitung besar pergeserannya. Dan tahapterakhir adalah prose uji statistik validasi koordinat mosaik ortofoto menggunakan cara *t-student* pada taraf nyata 2%. Lokasi penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Lokasi Penelitian (Kementerian PU, 2012)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil dan Pembahasan Proses Kalibrasi Kamera

Proses kalibrasi *bundle adjustment laboratory calibration* dilakukan untuk mengetahui nilai parameter hasil kalibrasi kamera yang digunakan. Hasil dari kalibrasi kamera yang digunakan adalah hasil setelah proses iterasi ke 12 yang ditunjukkan pada Tabel 1.

Kamera dengan resolusi tinggi dan distorsi lensa yang rendah dapat digunakan untuk keperluan fotogrametri. Sedangkan kamera dengan distorsi lensa yang lebih besar (kamera *reconnaissance*) yang didesain untuk keperluan interpretasi dan inventarisasi, bukan untuk keperluan fotogrametri. Kamera jenis ini adalah kamera multispektral dan kamera yang memiliki panjang fokus 35 mm - 70 m. (Berlin, 1992). Kepentingan fotogrametri umumnya menggunakan kamera format besar dimana presisi maksimum sumbu vertikal sebesar 1/1000 dari tinggi terbang. Sedangkan kamera format kecil hanya memiliki akurasi separuh dari kamera format besar (Fryer, 1994). Kamera Nikon DSLR seri D3000 merupakan kamera berformat kecil karena memiliki panjang fokus 35 mm – 55 mm dan memiliki distorsi lensa yang cukup besar sehingga hal ini menandakan bahwa penggunaan kamera DSLR Nikon D3000 tidak sesuai untuk keperluan fotogrametri metrik.

Tabel 1. Parameter Orientasi Dalam 9 Foto

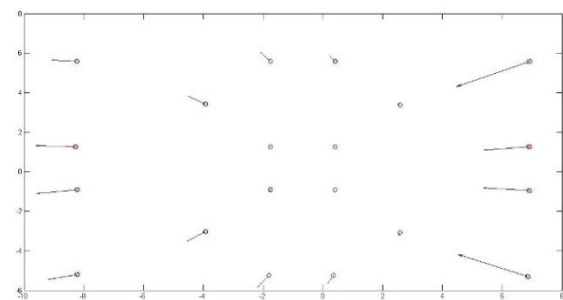
IOP	Nilai
x0 (mm)	-0.7350
y0 (mm)	0.3339
f (mm)	34.4776
k1 (mm)	-0.0001
k2 (mm)	0.0000
k3 (mm)	0.0000
p1 (mm)	0.0002
p2 (mm)	0.0000

Analisa distorsi lensa dapat dilakukan dengan melihat nilai *reprojection error*. Nilai *reprojection error* salah satu foto disajikan pada Tabel .

Berdasarkan tabel nilai *reprojection error* dapat dilihat bahwa nilai kesalahan koordinat foto sebelum dan setelah terkoreksi tidak besar dengan kesalahan minimal 0.0001 mm dan kesalahan maksimal sebesar 0.0472 mm. Untuk GCP yang berada dekat dengan pusat foto (titik 8,9,12 dan 13) memiliki nilai kesalahan koordinat yang sangat kecil yaitu antara 0.0001 mm sampai dengan 0.0011 mm. Sedangkan GCP yang berada jauh dari pusat foto memiliki nilai kesalahan yang besar (-0.0472, -0.0244 mm). Dengan melihat visualisasi distorsi lensa pada Gambar (2), diketahui bahwa titik – titik GCP awal pada sumbu X negatif mengalami pergeseran ke arah kanan mengarah ke pusat foto. Sedangkan GCP yang berada pada sumbu X positif bergeser menjauhi pusat foto. Hal ini menandakan lensa kamera mengalami distorsi. Titik awal GCP ditunjukkan dalam warna biru dan titik akhir berwarna merah.

Tabel 2. Nilai *Reprojection Error* Foto (Satuan mm)

Titik	X	Y
1	-0.019	-0.005
2	-0.007	-0.012
3	-0.004	-0.008
4	-0.045	0.022
5	-0.012	-0.009
6	-0.001	-0.003
7	-0.026	-0.004
8	-0.001	-0.001
9	0.000	0.000
10	-0.030	0.003
11	-0.026	0.001
12	-0.001	0.001
13	0.000	0.000
14	-0.030	-0.003
15	-0.011	0.007
16	-0.002	0.001
17	-0.016	0.001
18	-0.006	0.009
19	-0.003	0.005
20	-0.047	-0.024



Gambar 2. Visualisasi Kesalahan Koordinat Foto Awal dan Koordinat Foto Terkoreksi

Untuk mengetahui jenis distorsi lensa yang terjadi maka dapat dicari dari nilai kesalahan radial. Jika nilai kesalahan radial < 1 maka jenis distorsi lensanya adalah distorsi *barrel* (cembung) dan jika nilai kesalahan radial > 1 maka jenis distorsi lensanya adalah distorsi *pincushion* (cekung) [16]. Nilai kesalahan radial salah satu foto disajikan pada Tabel 3.

Pada Tabel 3 dapat dilihat bahwa nilai kesalahan radial untuk semua titik kurang dari 1. Hal ini menandakan bahwa lensa kamera Nikon D3000 mengalami *barrel distortion*.

Tabel 3. Nilai Kesalahan Radial Foto

Foto	x (mm)	y (mm)
1	-0.014	-0.010
2	0.002	0.008
3	-0.002	0.008
4	0.015	-0.011
5	0.005	0.005
6	-0.005	0.005
7	-0.001	0.000
8	0.000	0.000
9	0.000	0.000
10	0.002	0.000
11	-0.001	0.000
12	0.000	0.000
13	0.000	0.000
14	0.002	0.000
15	0.005	-0.005
16	-0.005	-0.005
17	-0.013	0.009
18	0.002	-0.008
19	-0.002	-0.008
20	0.014	0.010

Hasil dan Pembahasan Visualisasi Proses Ortorektifikasi

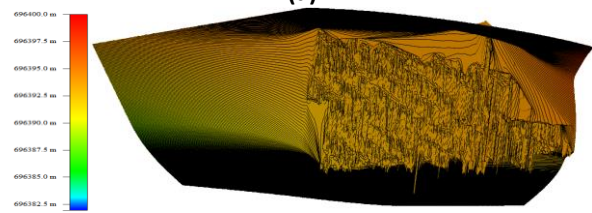
Pada proses ini, ortorektifikasi dilakukan menggunakan program fotogrametri. Program ini memiliki *workflow* untuk membuat suatu foto tegak (ortofoto) baik untuk keperluan fotogrametri maupun fotogrametri jarak dekat. Proses ortorektifikasi bertujuan untuk menghasilkan suatu foto tegak yang terkoreksi dari pergeseran relief (*relief displacement*) (Wolf P R, 2000).

Metode yang digunakan adalah rektifikasi proyeksi satu foto bereferensi pada datum ketinggian rata-rata menggunakan solusi fotogrametri dan koordinat GCP 3 dimensi (Novak, 1992).

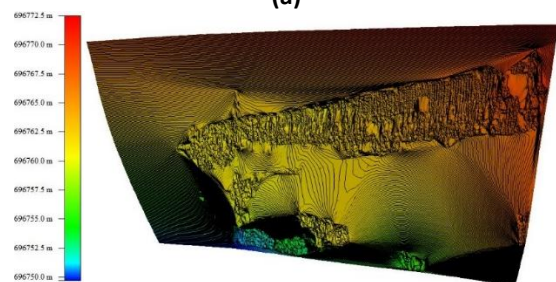
Ortorektifikasi memerlukan data masukan seperti foto yang akan direktifikasi di mana pada semua foto harus terlihat titik kontrol tanah, posisi

pemotretan kamera, nilai kalibrasi kamera dan data koordinat titik kontrol objek yang difoto.

Proses ortorektifikasi pada program meliputi proses definisi model kamera, definisi parameter orientasi luar dan titik kontrol, *alignment photo*, pembentukan *dense surface*, dan pembuatan ortofoto. Hasil dari proses ini adalah mosaik foto tegak atau mosaik ortofoto dengan koordinat 2 dimensi serta file DEM foto yang telah berbentuk mosaik atau gabungan dari foto yang bertampalan di mana proses pembentukan mosaik dilakukan secara otomatis oleh program. Hasil visual dari mosaik ortofoto dapat dilihat pada Gambar 3 dan Gambar 4.



Gambar 3. Foto Jembatan Suramadu Sisi Gresik dari Arah Surabaya (a) Ortofoto 2 Dimensi dan (b) Foto Bernilai DEM



Gambar 4. Foto Jembatan Suramadu Sisi Gresik dari Arah Madura (a) Ortofoto 2 Dimensi dan (b) Foto Bernilai DEM

Pada Gambar 3 (a) dan Gambar 4 (a) terlihat bahwa segmen / potongan bentang yang ditampilkan lebih panjang. Hasil ini dikarenakan gambar pada mosaik terbentuk dari pencocokan minimal 2 foto di mana objek yang ada pada mosaik ada pada minimal 2 foto yang berbeda. Sedangkan objek yang hanya ada pada salah satu foto, tidak akan dibentuk pada mosaik.

Terdapat perbedaan posisi objek bertuliskan "WIKI" pada Gambar 3 (a) dan objek kapal nelayan pada Gambar 4 (a). Yang mempengaruhi hasil ini adalah pendefinisian sumbu – sumbu sistem koordinat UTM yang dimasukkan pada proses ortorektifikasi. Pada proses ortorektifikasi ini, pengambilan foto menggunakan metode fotogrametri jarak dekat yaitu pengambilan foto secara horizontal. Maka, arah pemotretan sama dengan sumbu X pada sistem koordinat tanah (UTM). Sehingga, pendefinisian sumbu kartesian pada sistem koordinat menjadi berubah. Nilai *Easting* berada pada sumbu koordinat Z, nilai *Northing* berada pada sumbu koordinat X dan nilai *Height* berada pada sumbu koordinat Y.

Pada program, sumbu X didefinisikan sebagai garis horizontal dengan nilai membesar ke arah kanan. Sumbu Y didefinisikan sebagai garis vertikal di mana nilainya semakin besar ke arah atas. Sedangkan sumbu Z didefinisikan sebagai garis proyeksi tegak lurus dari sumbu Y yang memotong bidang yang dibentuk oleh sumbu X dengan nilai membesar ke arah luar (menjauhi pusat sumbu). Sehingga, koordinat mosaik ortofoto pada Gambar 3 (a) dan Gambar 4 (a) mengikuti sumbu sistem koordinat program di mana sumbu X menyatakan koordinat *Northing* GCP yang nilainya membesar ke arah kanan dan sumbu Y menyatakan koordinat *Height* GCP yang nilainya membesar ke arah atas.

Dengan melihat Gambar 3 (b) dan Gambar 4 (b) diketahui bahwa sesuai pendefinisian sumbu sistem koordinat pada program dan saat melakukan proses ortorektifikasi, maka nilai *Easting* pada koordinat tanah didefinisikan sebagai nilai ketinggian di sumbu Z pada program dan ditampilkan pada mosaik ortofoto berformat DEM.

Ketentuan umum yang diikuti saat melakukan *georeferencing* adalah bahwa nilai RMSE foto harus kurang dari sama dengan 1 piksel (Thakur, 2008). Ukuran 1 piksel ini merupakan akurasi foto yang berarti ukuran satu piksel maksimal sama dengan 0.006 mm di foto. Hasil RMSE ortofoto dapat dilihat pada Tabel 4.

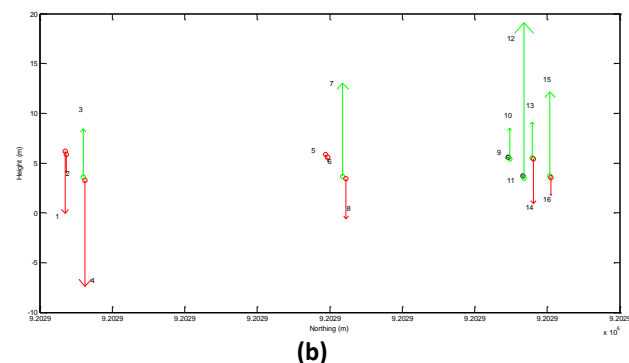
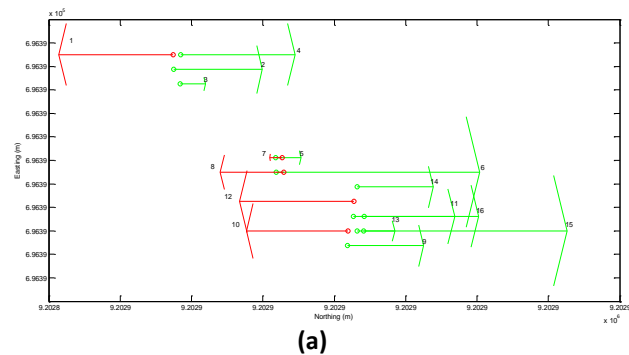
Berdasarkan pada Tabel 4 dapat dilihat bahwa semua foto memiliki nilai RMSE kurang dari 1 piksel. Hal ini menandakan bahwa posisi GCP pada pasangan foto masih teliti.

Tabel 4. Nilai RMSE GCP Ortofoto (Satuan Piksel)

Waktu Pemotretan	Arah Pemotretan			
	Bentang 1 (Surabaya)		Bentang 100 (Madura)	
	RMSE (piksel)	RMSE (mm)	RMSE (piksel)	RMSE (mm)
19 Maret 2015	0.549	0.003	0.585	0.004
7 Mei 2015	0.583	0.00	0.611	0.004

Hasil dan Pembahasan Perhitungan Vektor Pergeseran

Setelah diketahui koordinat GCP objek pada waktu pengamatan 1 dan 2, kemudian dicari besar vektor pergeserannya baik untuk koordinat *Easting*, *Northing* dan *Height*nya. Hasil perhitungan deformasi 2 dimensi ditunjukkan pada Tabel 5 dan Tabel 6. Visualisasi pegeseran ditunjukkan pada Gambar 5 dan Gambar 6.



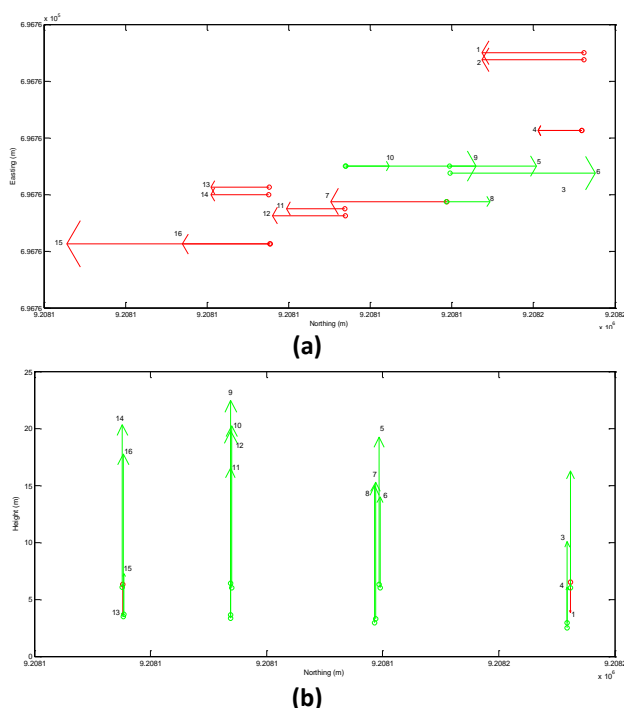
Gambar 5. Arah Vektor Pergeseran Jembatan di Arah Surabaya Secara (a) Horizontal (b) Vertikal

Tabel 5. Besar Deformasi Jembatan Arah Surabaya dalam Sistem Koordinat UTM Satuan Meter

GCP	Horizontal X,Y (m)	Vertikal Z (m)
1	0.009	0.014
2	0.007	0.004
3	0.002	0.011
4	0.009	0.024
5	0.002	0.001
6	0.016	0.001
7	0.001	0.021
8	0.005	0.009
9	0.006	0.000
10	0.008	0.007
11	0.008	0.000
12	0.009	0.035
13	0.003	0.008
14	0.006	0.010
15	0.016	0.019
16	0.009	0.004

Tabel 6. Besar Deformasi Jembatan Arah Madura dalam Sistem Koordinat UTM Satuan Meter

GCP	Horizontal X,Y (m)	Vertikal Z (m)
1	0.027	0.006
2	0.027	0.023
3	0.012	0.016
4	0.012	0.008
5	0.024	0.029
6	0.041	0.018
7	0.031	0.027
8	0.012	0.027
9	0.036	0.036
10	0.011	0.032
11	0.016	0.029
12	0.021	0.037
13	0.017	0.006
14	0.014	0.032
15	0.055	0.008
16	0.023	0.032



Gambar 6. Arah Vektor Pergeseran Jembatan di Arah Madura Secara (a) Horizontal (b) Vertikal

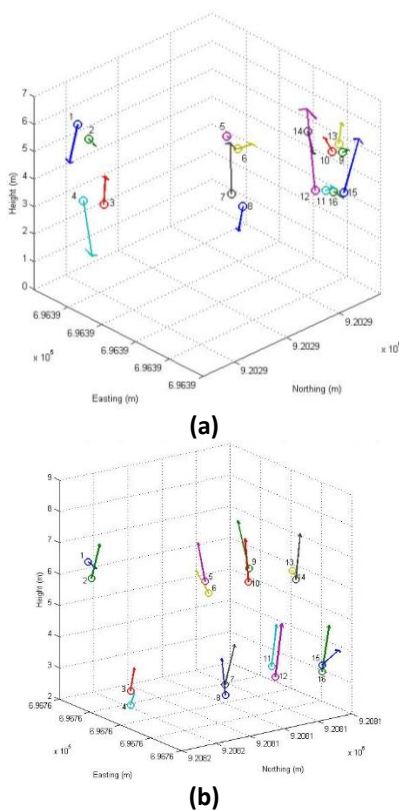
Untuk arah Surabaya, deformasi terbesar pada sumbu XY berada pada titik 6 dan 15 sebesar 16 mm dan untuk sumbu Z deformasi terbesar berada pada titik 12 sebesar 35 mm di mana secara spesifik tidak ada perubahan pada koordinat *Easting*. Deformasi terkecil sumbu XY berada pada titik 7 sebesar 1 mm dan deformasi terkecil sumbu Z berada pada titik 11 sebesar 0 mm. Pengamatan pada arah Surabaya menunjukkan bahwa deformasi jembatan cenderung mengarah ke utara dan mengalami penurunan.

Sedangkan pada arah Madura, deformasi terbesar pada sumbu XY berada pada titik 15 sebesar 55 mm dan untuk sumbu Z deformasi terbesar berada pada titik 12 sebesar 37 mm. Deformasi terkecil sumbu XY berada pada titik 10 sebesar 11 mm dan deformasi terkecil sumbu Z berada pada titik 1 dan 13 sebesar 6 mm. Pengamatan pada arah Madura menunjukkan bahwa deformasi jembatan cenderung mengarah ke selatan dan mengalami kenaikan.

Dalam penentuan deformasi objek juga dilakukan pengecekan signifikansi secara statistik dari vektor pergeseran dari hasil estimasi metode ortorektifikasi dengan cara uji hipotesis. Hasil vektor pergeseran 3 dimensi ditunjukkan pada Tabel 7, visualisasi ditunjukkan pada Gambar 7.

Tabel 7. Besar Vektor Pergeseran GCP Jembatan Arah Surabaya dalam Satuan Meter

GCP	Arah Surabaya (m)	Arah Madura (m)
1	0.017	0.028
2	0.008	0.035
3	0.011	0.020
4	0.026	0.014
5	0.002	0.038
6	0.016	0.045
7	0.021	0.041
8	0.010	0.030
9	0.006	0.051
10	0.011	0.034
11	0.008	0.033
12	0.036	0.043
13	0.009	0.018
14	0.012	0.035
15	0.025	0.056
16	0.010	0.039
Rata-Rata (X)	0.014	0.035
Standar Deviasi (s)	0.009	0.011
Jumlah Titik (n)	16	16



Gambar 7. Arah Vektor Pergeseran Jembatan 3 Dimensi Arah (a) Surabaya (b) Madura

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

Hipotesa nol $H_0 : d = 0$
 Hipotesa alternatif $H_1 : d \neq 0$

Statistik yang digunakan untuk uji pergeseran arah Surabaya ditunjukkan pada Pers(1) :

$$T = \frac{\bar{x}}{s/\sqrt{n}} = \frac{0.014}{0.009/\sqrt{16}} = 6.222 \quad (1)$$

Sedangkan statistik yang digunakan untuk uji pergeseran arah Madura ditunjukkan pada Pers(2):

$$T = \frac{\bar{x}}{s/\sqrt{n}} = \frac{0.035}{0.011/\sqrt{16}} = 12.727 \quad (2)$$

Di mana X adalah rata-rata dari d, s adalah standar deviasi dari d, d merupakan vektor pergeseran dan n adalah jumlah sampel pengamatan. Statistik T mempunyai distribusi *t-student* kalau hipotesa nol adalah benar. Selang di mana hipotesa nol ini ditolak ditunjukkan pada Pers(3):

$$T > t_{df, \alpha/2} \quad (3)$$

Di mana 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 berjumlah 16 titik, maka dapat diasumsikan $df = 16 - 1 = 15$. Dalam studi ini, level kepercayaan yang diambil adalah 95% ($\alpha = 5\%$) digunakan, dimana besar $t_{15, 0.025}$ adalah 2.131.

Pada arah Surabaya, karena $T > t = 6.222 > 2.131$ maka H_0 ditolak. Dan pada arah Madura, karena $T > t = 12.727 > 2.131$ maka H_0 ditolak.

Dari hasil uji hipotesis di atas, diperoleh kesimpulan bahwa pada interval kepercayaan 95% terdapat bukti untuk menyatakan adanya perbedaan antara posisi kala 1 dengan posisi kala 2 tersebut baik pada arah Surabaya maupun pada arah Madura.

Hasil dan Pembahasan Proses Uji Statistik Validasi Koordinat Mosaik Ortofoto

Formulasi hipotesa yang dilakukan pada uji statistik koordinat GCP hasil ortorektifikasi dengan pengukuran terestris adalah sebagai berikut :

Hipotesa nol $H_0 : \mu_{ORTHO} = \mu_{TS}$
 Hipotesa alternatif $H_1 : \mu_{ORTHO} \neq \mu_{TS}$

Di mana asumsi benar adalah tidak terdapat signifikansi data hasil ortorektifikasi dengan hasil pengukuran terestris pada taraf nyata sebesar 2% ($\alpha = 2\%$). Karena yang menjadi acuan adalah koordinat GCP hasil pengukuran terestris kala 1 dan kala 2, maka jumlah titik pengamatan sebanyak 2 titik sehingga derajat kebebasan pada pengujian ini sebesar 1 ($df = 2 - 1$).

Statistik yang digunakan untuk uji hipotesa signifikansi koordinat GCP hasil ortorektifikasi dengan hasil terestris baik pada arah Surabaya dan Madura ditunjukkan pada Pers(4) :

$$T = \frac{\mu_{TS} - \mu_{ORTHO}}{s/\sqrt{n}} \quad (4)$$

Untuk mengetahui apakah hipotesa nol diterima atau ditolak maka dibutuhkan konsultasi terhadap tabel distribusi *t-student* di mana taraf nyata sebesar 2% dengan metode pencarian berupa *two-taile test* di mana H_0 ditolak jika $T > t_{\alpha/2, df}$ atau $T < -t_{\alpha/2, df}$. Nilai dari tabel distribusi t pada $t_{0.001, 1}$ adalah 31.816.

Sedangkan untuk mengetahui apakah titik koordinat hasil ortorektifikasi berada di dalam interval kepercayaan 98% atau tidak, dapat diketahui dengan rumus interval kesalahan ditunjukkan pada persamaan (5) :

$$\mu_{TS} - t_{\alpha/2, df} \frac{s}{\sqrt{n}} < \mu_{ORTHO} < \mu_{TS} + t_{\alpha/2, df} \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (5)$$

Jika koordinat hasil ortorektifikasi berada di antara interval kesalahan minimum dan interval kesalahan maksimum, maka koordinat tersebut berada pada interval kepercayaan 98% dan mendukung diterimanya hipotesa nol. Hasil uji *t-student* arah Surabaya dan Madura ditunjukkan pada lampiran.

Secara umum, koordinat hasil ortorektifikasi di arah Surabaya pada pengukuran 19 Maret 2015, prosentase diterimanya hipotesa nol pada koordinat *Easting*, *Northing*, dan *Height* dari 16 titik GCP secara berturut – turut adalah 87.5%, 25%, dan 56.25%.

Secara umum, prosentase diterimanya hipotesa nol pada koordinat *Easting*, *Northing*, dan *Height* dari 16 titik GCP hasil ortorektifikasi di arah Madura pada pengukuran 19 Maret 2015 secara berturut – turut adalah 62.5%, 0% dan 18.75%.

Di arah Surabaya, dengan rerata jumlah total titik yang diterima sebesar 0.6042 maka prosentase rerata jumlah total titik di mana hipotesa nol diterima sebesar 60.42%. Secara kualitatif, rerata jumlah total titik hasil proses ortorektifikasi yang diterima di arah Surabaya cukup untuk menyatakan diterimanya hipotesa nol. Sedangkan di arah Madura, dengan rerata jumlah total titik yang diterima sebesar 0.2708 maka prosentase rerata jumlah total titik di mana hipotesa nol diterima sebesar 27.08%. Secara kualitatif, rerata jumlah total titik hasil proses ortorektifikasi yang diterima di arah Madura kurang baik untuk menyatakan diterimanya hipotesa nol.

Hal ini menunjukkan bahwa di arah Surabaya tidak terdapat signifikansi antara koordinat GCP hasil proses ortorektifikasi terhadap koordinat hasil pengukuran terestris. Dan untuk arah Madura menunjukkan bahwa terdapat signifikansi antara koordinat GCP hasil proses ortorektifikasi terhadap koordinat hasil pengukuran terestris.

PENUTUP

Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian tugas akhir ini yang pertama, pembuatan mosaik ortofoto dibentuk secara otomatis oleh program dan menghasilkan DEM yang dipengaruhi pendefinisian sistem koordinat saat pemotretan dan saat proses ortorektifikasi.

Berdasar hasil dari proses ortorektifikasi, deformasi maksimum pada bentang 1 (arah Surabaya) dalam sistem koordinat UTM untuk sumbu XY sebesar 16 mm dan untuk sumbu Z sebesar 35 mm. Sedangkan di bentang 100 (arah Madura), deformasi maksimum sumbu XY sebesar 55 mm dan pada sumbu Z sebesar 37 mm.

Hasil uji validasi menyatakan bahwa di arah Surabaya, hasil proses ortorektifikasi cukup untuk menyatakan diterimanya hipotesa nol dan di arah Madura hasil proses ortorektifikasi kurang baik untuk menyatakan diterimanya hipotesa nol yang artinya di arah Surabaya koordinat GCP hasil proses ortorektifikasi tidak signifikan terhadap koordinat hasil pengukuran terestris. Sedangkan di arah Madura koordinat GCP hasil proses ortorektifikasi memiliki perbedaan signifikan terhadap koordinat hasil pengukuran terestris.

Saran yang diberikan adalah pada dibutuhkan percobaan ortorektifikasi lebih dari satu kali agar mendapatkan visualisasi mosaik ortofoto terbaik. Selain itu juga butuh dilakukan proses kalibrasi *bundle adjustment self calibration* di mana titik kontrol yang digunakan adalah titik di Jembatan Suramadu agar hasil kalibrasi menjadi akurat.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis Shofiyatul Qoyimah mengucapkan banyak terima kasih kepada Balai Besar Pelaksanaan Jalan Nasional V, PT. Jasa Marga (Persero .tbk) dan Badan Pengawasan Wilayah Surabaya Madura atas ijin yang telah diberikan dan ketersediaannya dalam memberikan masukan atas penelitian ini. Terima kasih juga saya sampaikan kepada Ibu Hepi Hapsari Handayani yang memberikan dukungan baik secara moriil dan materiil kepada saya selama pengerjaan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

Ahmad, A., 1994. Small Format Photography for Architectural Photogrammetry : A Review. Buletin Ukur, pp. 42-52.

Atkinson, 1980. Developments in Close Range Photogrammetry-1. London: Applied Science Publishers.

Berlin, A. T. E. d. G. L., 1992. Fundamentals of Remote Sensing and Airphoto Interpretation 5th Edition. New Jersey: Prentice Hall.

BPWS. "Badan Pengembangan Wilayah Surabaya Madura". 2011. www.bpws.go.id (1 Jan. 2015).

Elviani, L. E., 2014. Analisa Deformasi Jembatan Suramadu dengan Teknik Fotogrametri Rentang Dekat. Tugas Akhir. Surabaya: Jurusan Teknik Geomatika Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Fryer, J. d. C., 1994. On the Accuracy of Heighting from Aerial Photographs and Maps: Implication to Processmodellers. Earth Surface Processes and Landforms. Vol.19, pp. 577-583.

Geogopoulos, A. S. d. A., 1992. FOTOCAD : A Simple Photogrammetric Package for Non-Photogrammetists. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, pp. 357-362.

Hampel, H. G. M. d. U., 2006. Photogrammetric Techniques in Civil Engineering Material Testing and Structure Monitoring. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing Vol. 72, pp. 39-45.

Jiang, R., 2005. Development of Digital Photogrammetric System for Bridge Deflection Measurement. Disertasi New Mexico State University : Meksiko.

KementerianPU. "Loket Pelayanan Informasi Peta Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia". 2012. www.loketpeta.pu.go.id (2 April. 2015)

Novak, K., 1992. Rectification of Digital Imagery, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing.

Thakur, S. A., 2008. Orthorectification of IRS-P6 LISS-IV data using Landsat ETM and SRTM datasets in the Himalayas of Chamoli District, Uttarakhand. Current Science, p. 1459.

Wolf P R, D. B. A., 2000. Elements of Photogrammetry with Application in GIS. New York AS: Mc Graw-Hill Book Company.

Yang, X., 2000. Accuracy of rational function approximation in photogrammetry. ASPRS Annual Conference, pp. 22 - 26.

LAMPIRAN

Tabel Hasil Uji t- student Koordinat Easting Arah Surabaya dalam Satuan Meter

GCP	Total Station (m)		Ortofoto (m)	Interval Minimum (m)	Interval Maksimum (m)
	19 Maret 2015	07 Mei 2015	19 Maret 2015		
1	696392.888	696392.883	696392.750	696392.801	696392.970
2	696392.888	696392.883	696392.813	696392.801	696392.970
3	696392.920	696392.883	696392.875	696392.307	696393.496
4	696392.920	696392.883	696392.750	696392.307	696393.496
5	696393.350	696393.326	696393.188	696392.958	696393.719
6	696393.350	696393.326	696393.250	696392.958	696393.719
7	696393.414	696393.390	696393.188	696393.022	696393.782
8	696393.414	696393.390	696393.250	696393.022	696393.782
9	696393.643	696393.663	696393.563	696393.334	696393.971
10	696393.643	696393.663	696393.500	696393.334	696393.971
11	696393.694	696393.671	696393.438	696393.317	696394.048
12	696393.694	696393.671	696393.375	696393.317	696394.048
13	696393.738	696393.719	696393.500	696393.417	696394.040
14	696393.738	696393.719	696393.313	696393.417	696394.040
15	696393.798	696393.769	696393.500	696393.320	696394.248
16	696393.798	696393.769	696393.438	696393.320	696394.248

Tabel Hasil Uji t- student Koordinat Northing Arah Surabaya dalam Satuan Meter

GCP	Total Station (m)		Ortofoto (m)	Interval Minimum (m)	Interval Maksimum (m)
	19 Maret 2015	07 Mei 2015	19 Maret 2015		
1	9202859.121	9202859.107	9202858.698	9202858.896	9202859.332
2	9202859.121	9202859.107	9202858.739	9202858.896	9202859.332
3	9202859.129	9202859.100	9202859.201	9202858.656	9202859.573
4	9202859.129	9202859.100	9202859.252	9202858.656	9202859.573
5	9202865.446	9202865.423	9202865.886	9202865.073	9202865.797
6	9202865.446	9202865.423	9202865.949	9202865.073	9202865.797
7	9202865.472	9202865.453	9202866.360	9202865.155	9202865.770
8	9202865.472	9202865.453	9202866.451	9202865.155	9202865.770
9	9202871.386	9202871.363	9202870.922	9202870.998	9202871.751
10	9202871.386	9202871.363	9202870.965	9202870.998	9202871.751
11	9202871.390	9202871.366	9202871.324	9202870.990	9202871.766
12	9202871.390	9202871.366	9202871.367	9202870.990	9202871.766
13	9202872.585	9202872.564	9202871.589	9202872.245	9202872.904
14	9202872.585	9202872.564	9202871.615	9202872.245	9202872.904
15	9202872.590	9202872.566	9202872.076	9202872.194	9202872.961
16	9202872.590	9202872.566	9202872.102	9202872.194	9202872.961

Tabel Hasil Uji t- student Koordinat Height Arah Surabaya dalam Satuan Meter

GCP	Total Station (m)		Ortofoto (m)	Interval Minimum (m)	Interval Maksimum (m)
	19 Maret 2015	07 Mei 2015	19 Maret 2015		
1	5.166	5.131	6.178	4.596	5.702
2	5.066	5.031	5.836	4.496	5.602
3	4.126	4.090	3.571	3.545	4.671
4	4.026	3.990	3.288	3.445	4.571
5	5.181	5.143	5.862	4.558	5.766
6	5.081	5.043	5.583	4.458	5.666
7	4.129	4.093	3.676	3.536	4.686
8	4.029	3.993	3.408	3.436	4.586
9	5.163	5.129	5.563	4.612	5.680
10	5.063	5.029	5.392	4.512	5.580
11	4.068	4.033	3.707	3.500	4.601
12	3.968	3.933	3.511	3.400	4.501
13	4.606	5.016	5.545	-1.707	11.329
14	4.506	4.916	5.400	-1.807	11.229
15	4.083	4.048	3.707	3.509	4.622
16	3.983	3.948	3.528	3.409	4.522

**Tabel Hasil Uji *t*- student Koordinat Easting Arah
Madura dalam Satuan Meter**

GCP	Total Station (m)		Ortofoto (m)	Interval Minimum (m)	Interval Maksimum (m)
	19 Maret 2015	07 Mei 2015	19 Maret 2015		
1	696762.446	696762.487	696762.750	696761.825	696763.108
2	696762.446	696762.487	696762.688	696761.825	696763.108
3	696762.446	696762.483	696762.063	696761.886	696763.043
4	696762.446	696762.483	696762.063	696761.886	696763.043
5	696761.928	696761.972	696761.750	696761.251	696762.650
6	696761.928	696761.972	696761.688	696761.251	696762.650
7	696761.950	696761.972	696761.438	696761.601	696762.321
8	696761.950	696761.972	696761.438	696761.601	696762.321
9	696761.462	696761.486	696761.750	696761.090	696761.857
10	696761.462	696761.486	696761.750	696761.090	696761.857
11	696761.462	696761.481	696761.375	696761.167	696761.775
12	696761.462	696761.481	696761.313	696761.167	696761.775
13	696760.852	696760.849	696761.563	696760.796	696760.905
14	696760.852	696760.849	696761.500	696760.796	696760.905
15	696760.853	696760.849	696761.063	696760.785	696760.917
16	696760.853	696760.849	696761.063	696760.785	696760.917

**Tabel Hasil Uji *t*- student Koordinat Northing Arah
Madura dalam Satuan Meter**

GCP	Total Station (m)		Ortofoto (m)	Interval Minimum (m)	Interval Maksimum (m)
	19 Maret 2015	07 Mei 2015	19 Maret 2015		
1	9208157.548	9208157.542	9208158.083	9208157.450	9208157.640
2	9208157.548	9208157.542	9208158.083	9208157.450	9208157.640
3	9208157.548	9208157.526	9208157.954	9208157.189	9208157.884
4	9208157.548	9208157.526	9208157.954	9208157.189	9208157.884
5	9208150.332	9208150.319	9208149.848	9208150.125	9208150.527
6	9208150.332	9208150.319	9208149.888	9208150.125	9208150.527
7	9208150.312	9208150.319	9208149.689	9208150.205	9208150.427
8	9208150.312	9208150.319	9208149.660	9208150.205	9208150.427
9	9208143.646	9208143.644	9208143.462	9208143.621	9208143.670
10	9208143.646	9208143.644	9208143.501	9208143.621	9208143.670
11	9208143.648	9208143.642	9208143.443	9208143.546	9208143.744
12	9208143.648	9208143.642	9208143.462	9208143.546	9208143.744
13	9208138.115	9208138.121	9208138.795	9208138.026	9208138.210
14	9208138.115	9208138.121	9208138.786	9208138.026	9208138.210
15	9208138.098	9208138.119	9208138.862	9208137.781	9208138.436
16	9208138.098	9208138.119	9208138.833	9208137.781	9208138.436

**Tabel Hasil Uji *t*- student Koordinat Height Arah
Madura dalam Satuan Meter**

GCP	Total Station (m)		Ortofoto (m)	Interval Minimum (m)	Interval Maksimum (m)
	19 Maret 2015	07 Mei 2015	19 Maret 2015		
1	5.145	5.126	6.505	4.842	5.429
2	5.045	5.026	6.034	4.742	5.329
3	4.093	4.089	2.933	4.031	4.151
4	3.993	3.989	2.484	3.931	4.051
5	5.132	5.106	6.313	4.697	5.541
6	5.032	5.006	5.996	4.597	5.441
7	4.078	4.069	3.278	3.933	4.214
8	3.978	3.969	2.936	3.833	4.114
9	5.099	5.018	6.434	3.763	6.354
10	4.999	4.918	5.996	3.663	6.254
11	4.052	3.992	3.618	3.067	4.977
12	3.952	3.892	3.325	2.967	4.877
13	5.093	5.060	6.291	4.561	5.592
14	4.993	4.960	6.073	4.461	5.492
15	3.993	3.987	3.696	3.884	4.097
16	3.893	3.887	3.487	3.784	3.997