

REKONSTRUKSI MODEL 3D MENGGUNAKAN FOTO UDARA UNTUK MENDUGA TINGGI OBJEK

(3D Model Reconstruction Using Aerial Photograph for Height Object Interpretation)

Hafzal Hanief¹, Sri Nurdiati² dan Deni Suwardhi³

¹ Program Studi Ilmu Komputer (KOM), Sekolah Pascasarjana IPB

² Jurusan Ilmu Komputer Fakultas MIPA IPB

³ Teknik Geodesi & Geomatika FITB ITB

E-mail : hafzal.hanief@gmail.com

Diterima (received): 2 Juli 2013; Direvisi (revised): 23 Agustus 2013; Disetujui dipublikasikan (accepted): 6 September 2013

ABSTRAK

Rekonstruksi 3D, terutama untuk ekstraksi tinggi menggunakan foto udara digital yang diambil dari kamera non-metrik dan Pesawat Udara Nir Awak (PUNA) adalah studi yang menantang. Tujuan dari penelitian ini adalah: (1) untuk menentukan presisi tinggi objek yang diungkapkan dari model 3D dan menetapkan prosedur untuk memberikan hasil yang optimal. Dua atau lebih tumpang tindih foto udara dapat dibangun ke dalam model 3D dengan menerapkan prinsip-prinsip collinearity dan geometri epipolar menggunakan algoritma rekonstruksi 3D. Karena ketidakstabilan kamera digital non-metrik, kamera harus dikalibrasi sebelum rekonstruksi 3D diproses, dengan cara bahwa kualitas ekstraksi spasial dapat kemudian diukur. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan 24 megapixel Resolusi Sony NEX7 kamera digital dan Hexacopter UAV. Kamera Kalibrasi Toolbox digunakan untuk menghitung parameter intrinsik kamera dan program yang spesifik dikembangkan dengan menggunakan MATLAB dalam rangka membangun model 3D dan untuk memperoleh ketinggian objek. Hasil validasi dilakukan dengan membandingkan ketinggian model 3D dengan satu pengukuran dengan menggunakan Electronic Total Station. Keakuratan tinggi objek hingga 1 mm berhasil dicapai, dengan ketinggian kesalahan prediksi terbesar mencapai 15,2 cm pada 70 m ketinggian terbang di atas permukaan tanah.

Kata Kunci : Rekonstruksi 3D, Collinearity, Geometri Epipolar, PUNA.

ABSTRACT

Reconstruction of 3D, especially on height extraction using digital aerial photos taken from a non-metric camera and Unmanned Aerial Vehicle (UAV) is a challenging study. The purposes of this study are: (1) to determine the precision of an object's height reveal from a 3D model, and (2) to establish procedures to deliver the optimal result. Two or more overlapping aerial photos can be constructed into a 3D model by applying principles of collinearity and epipolar geometry using 3D reconstruction algorithm. Since there is an instability on a non-metric digital camera, the camera must be calibrated before 3D reconstruction is process, in that way the quality of spatial extraction, then can be measured. The study is conducted using 24 megapixels resolution Sony NEX7 digital camera and Hexacopter UAV. Camera Calibration Toolbox was utilized to calculate intrinsic parameters of the camera and a specific program is developed using MATLAB in order to build the 3D model and to obtain the object's height. The result validation is done by comparing the height from 3D model with that one measured using Electronic Total Station. The accuracy of the object's height up to 1 mm was successfully achieved, with largest height prediction error reaches of 15.2 cm at 70 m flying height above ground level.

Keyword : 3D Reconstruction, Collinearity, Epipolar Geometry, UAV.

PENDAHULUAN

Pada *Close-Range Photogrammetry* (CRP), ekstraksi spasial dari hasil pengolahan foto udara digital 2D menjadi model 3D dapat dimanfaatkan untuk mendapatkan informasi spasial, khususnya pada komponen vertikal/tinggi suatu objek yang terdapat pada foto tersebut. Kajian tentang berapa ketelitian tinggi suatu objek tertentu yang dapat dihasilkan dari model 3D merupakan topik yang menarik. Oleh karena itu penelitian tentang hal tersebut perlu dilakukan karena akan memberikan manfaat pada aspek teori dan aplikasi tertentu.

Penelitian yang pernah dilakukan terkait pemanfaatan foto digital sudah banyak dilakukan dengan berbagai tujuan dan aplikasi. Hanifa (2007) lebih spesifik meneliti tentang aplikasi CRP menggunakan kamera digital *auto-focus* dan *low-cost* untuk mendeteksi deformasi suatu objek, suatu kajian spasial tetapi tidak pada komponen tinggi. Khalil (2011) meneliti tentang pengukuran pergeseran horizontal 2D (dx, dy) dengan statik CRP dan kamera tunggal, tetapi tidak pada komponen tinggi.

Sesuai teknik fotogrametri, maka foto digital yang mempunyai *overlap* (pertampalan) tertentu, misalnya 60%, dengan menggunakan algoritma *coliearity*,

epipolar geometry dan triangulasi dua atau lebih foto digital dan berdimensi 2 (2D) tersebut dapat direkonstruksi menjadi model 3 dimensi (3D). Rekonstruksi model 3D dari foto digital dapat dilakukan jika terdapat dua foto digital atau lebih yang mempunyai beberapa objek yang sama tetapi diambil dari posisi kamera yang berbeda. Dari model 3D tersebut dapat diperoleh satu informasi penting berupa kedalaman atau ketinggian suatu objek yang ada pada kedua foto.

Rekonstruksi model 3D dari dua atau lebih foto digital melibatkan algoritma yang kompleks dan *computational intensive*. Ada tiga tahap utama yang harus dilakukan, yaitu : kalibrasi kamera, rekonstruksi model 3D dan pengujian hasil. Pada dua tahap utama tersebut diterapkan algoritma *collinearity*, *epipolar geometry* dan triangulasi.

Pengujian hasil dilakukan dengan membandingkan tinggi objek hasil rekonstruksi dengan tinggi objek hasil pengukuran lapangan sehingga dapat menjawab beberapa pertanyaan berikut : Apa saja syarat foto digital 2D agar dapat dibuat menjadi model 3D sehingga objek pada foto dapat diduga tingginya? Faktor apa saja yang mempengaruhi ketelitian? Berapa ketelitian yang dicapai? Pertanyaan-pertanyaan tersebut yang dicoba untuk dijawab dalam penelitian ini.

Ruang lingkup penelitian meliputi penggunaan foto digital dari kamera *non-metrik* yang ditempatkan pada pesawat tanpa awak yang terbang dengan beberapa ketinggian tertentu dari permukaan tanah. Pengukuran tinggi objek dilakukan menggunakan alat *Electronic Total Station* (ETS) yang akan memberikan akurasi tinggi hingga 1 mm.

Pembahasan pokok penelitian dititikberatkan pada penerapan proses kalibrasi kamera dan rekonstruksi model 3D. Kemudian hasilnya dilakukan analisis akurasi spasial dan ditentukan faktor apa saja yang mempengaruhinya. Objek yang dimaksud pada penelitian ini adalah objek berupa target yang dibuat khusus dan dapat dikenali secara visual pada foto digital. Target-target tersebut ditempatkan, diamati dan diukur sedemikian rupa sehingga hasil ekstraksi tingginya dapat dianalisis dan ditentukan akurasinya.

Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk merumuskan faktor apa saja yang mempengaruhi ketelitian spasial pada tahapan rekonstruksi model 3D dari foto udara menggunakan kamera non-metrik dan menentukan akurasi tinggi objek dari ekstraksi model 3D. Caranya dengan membandingkan tinggi objek hasil ukuran langsung dengan tinggi hasil hitungan dari model 3D.

Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat dalam penyusunan prosedur yang dapat direkomendasikan terkait pemanfaatan dan pengolahan lanjut dari foto udara digital menggunakan kamera *low-cost*. Selain itu penelitian ini dapat menunjukkan bahwa aplikasi CRP yang fokus pada ekstraksi tinggi suatu objek tertentu dapat diterapkan untuk beberapa tujuan, misalnya untuk menduga tinggi tanaman, tinggi bangunan dan beda tinggi permukaan tanah yang selanjutnya dapat dikembangkan untuk menentukan kontur permukaan tanah, kemiringan lereng dan sebagainya.

METODE

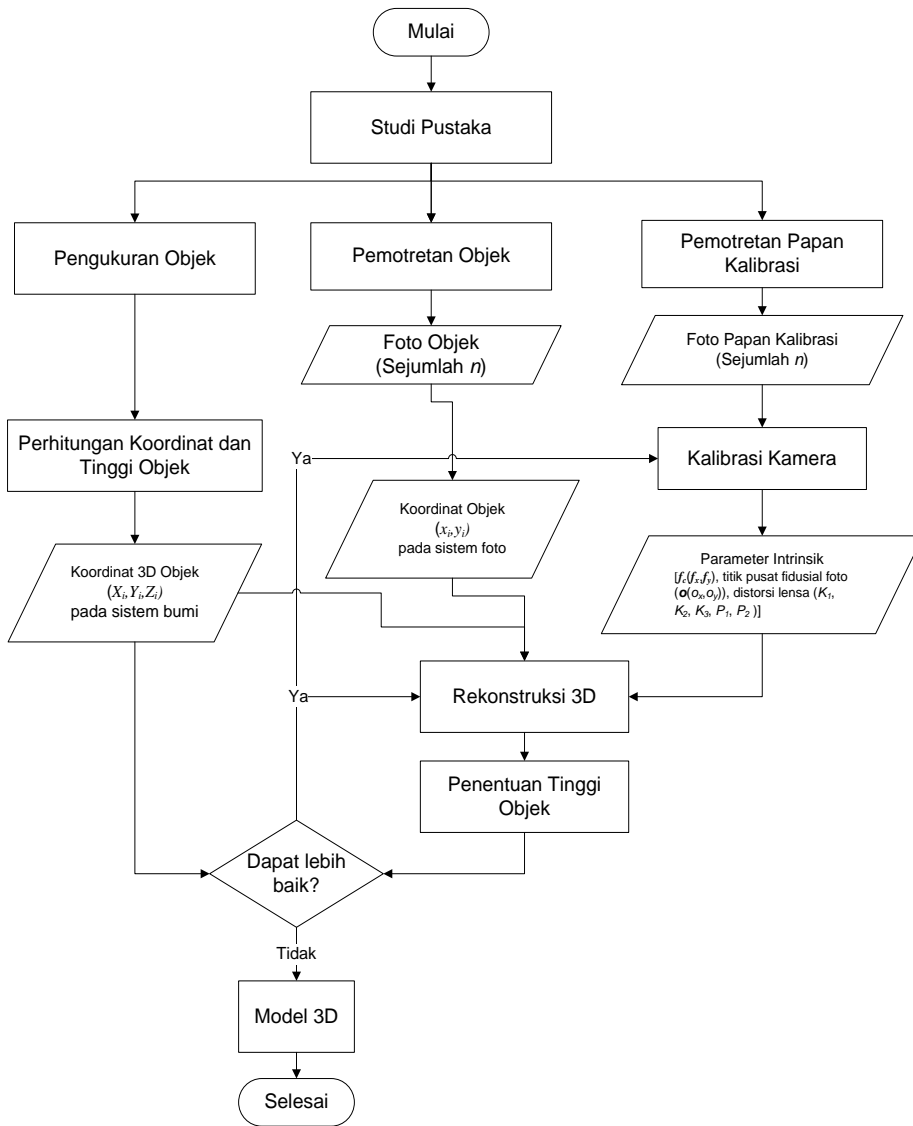
Metode penelitian yang dilakukan disajikan pada **Gambar 1**. Pemotretan udara dan pengukuran tinggi objek dilaksanakan di area parkir dan taman di depan Gedung Olah Raga IPB, Dramaga.

Rekonstruksi 3D dilakukan dengan menerapkan algoritma *collinearity* (Atkinson, 1996), *epipolar geometry* dan triangulasi (Cyganek dan Siebert, 2009). Sebuah program dikembangkan untuk mendapatkan ekstraksi spasial, khususnya tinggi. Prinsip dasarnya adalah merekonstruksi berkas sinar yang dipantulkan suatu benda dan direkam oleh sensor pada kamera. Untuk tujuan tersebut harus direkonstruksi parameter ekstrinsik kamera saat setiap pemotretan dilakukan. Parameter ekstrinsik terdiri atas vektor translasi (X, Y, Z) dan rotasi (ϕ, ω, κ) sistem koordinat kamera, seperti disajikan pada **Gambar 2** Error! Reference source not found.. Data masukannya adalah koordinat objek pada setiap sistem koordinat foto, pada sistem koordinat bumi dan parameter intrinsik kamera.

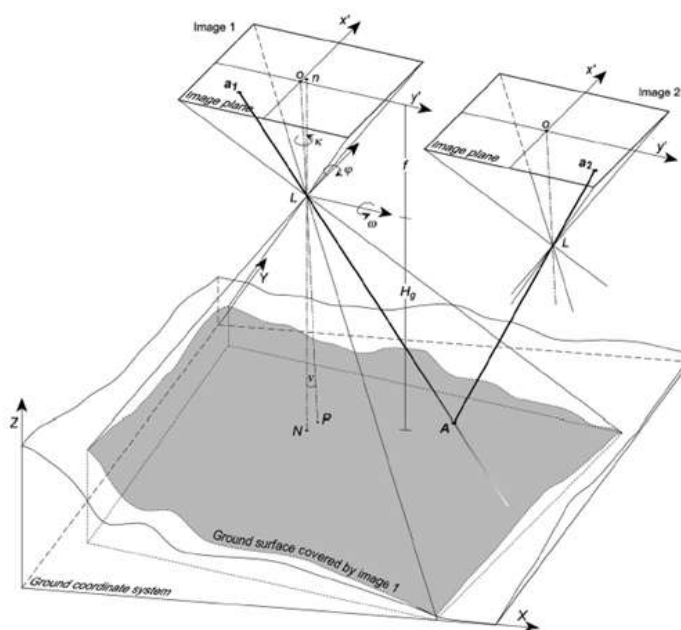
Kalibrasi kamera dilakukan untuk mendapatkan parameter intrinsik kamera. *Camera Calibration Toolboxes* dalam *MATLAB* yang dibuat oleh Bouguet (2010) digunakan pada penelitian ini. Kalibrasi kamera dilakukan sebelum dan sesudah pemotretan udara. Kalibrasi kamera juga dihitung menggunakan data dari foto papan kalibrasi dan foto udara. Oleh karena itu diperoleh beberapa parameter intrinsik dengan berbagai kombinasi yang dapat dipilih.

Foto udara diperoleh dengan menempatkan kamera pada UAV yang diterbangkan pada posisi tertentu dan ketinggian 50, 60 dan 70 m. **Gambar 2** menunjukkan rekonstruksi koordinat sistem bumi 3D dari sebuah objek titik dalam sebuah model 3D menggunakan prinsip perpotongan kemuka (Aber, *et al.*, 2010). Pada setiap ketinggian pemotretan dipilih masing-masing 3 foto untuk direkonstruksi dan ditentukan ketinggian objeknya. Selanjutnya ketinggian hasil ekstraksi dari model 3D dibandingkan dengan hasil pengukuran menggunakan ETS.

Peralatan utama yang digunakan pada penelitian ini adalah kamera digital, UAV, ETS dan komputer. Kamera digital yang dipakai adalah Sony NEX7 24 Megapiksel. UAV berupa Hexacopter yang memiliki fungsi *autopilot*, sehingga pemotretan dapat dilakukan pada posisi dengan koordinat dan tinggi tertentu. Leica TCR 1203 adalah ETS yang digunakan untuk menentukan koordinat objek pada sistem bumi dengan akurasi mencapai 1 mm. Koordinat sistem bumi diperoleh menggunakan *Receiver GPS* tipe navigasi Garmin Map 60csx dalam Datum WGS84. Tinggi objek mengacu pada elevasi altimeter dari receiver GPS. Koordinat hasil pengukuran ETS dianggap tidak memiliki kesalahan sehingga dijadikan acuan dalam menilai hasil ekstraksi spasial dari model 3D. Komputer digunakan untuk pengolahan data menggunakan *MATLAB* 2012a 64-bit. Pada penelitian ini sebuah objek diwakili oleh sebuah target yang dibuat berupa kertas berukuran 30 cm dengan bujur sangkar hitam-putih yang masing-masing berukuran 15 cm seperti bagian dari papan catur. Ada 9 target yang dipakai sebagai titik sekawan dan 20 target yang akan ditentukan tingginya dari model 3D.



Gambar 1. Metode penelitian.



Gambar 2. Rekonstruksi koordinat sistem bumi 3D dari sebuah objek titik.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pembahasan terhadap hasil penelitian dititikberatkan pada hasil kalibrasi kamera dan rekonstruksi 3D, khususnya ekstraksi spasial koordinat 3D objek pada komponen tingginya saja. Parameter intrinsik hasil kalibrasi kamera merupakan data masukan pada perhitungan tinggi objek hasil rekonstruksi 3D, oleh karena itu analisis hubungan atau pengaruh parameter intrinsik terhadap tinggi objek cukup detail dilakukan.

Kalibrasi Kamera

Kalibrasi kamera dilakukan dengan 3 kali pemotretan papan kalibrasi dengan urutan sebagai berikut : Pemotretan kalibrasi pertama → pemotretan udara pertama → pemotretan kalibrasi kedua → pemotretan udara kedua → pemotretan kalibrasi ketiga. Pada tahap ini dihasilkan 3 set parameter intrinsik. Selanjutnya data kalibrasi pertama digunakan kembali tetapi dengan memilih foto tertentu untuk mengetahui pengaruh posisi kamera dan posisi papan kalibrasi pada bidang foto dengan 2 konfigurasi sehingga didapat 2 set parameter intrinsik tambahan. Kalibrasi kamera juga dilakukan menggunakan data pengukuran target di lapangan dan foto udara, sehingga diperoleh 1 set parameter intrinsik

tambahan. Dengan demikian diperoleh 6 set parameter intrinsik seperti **Tabel 1**.

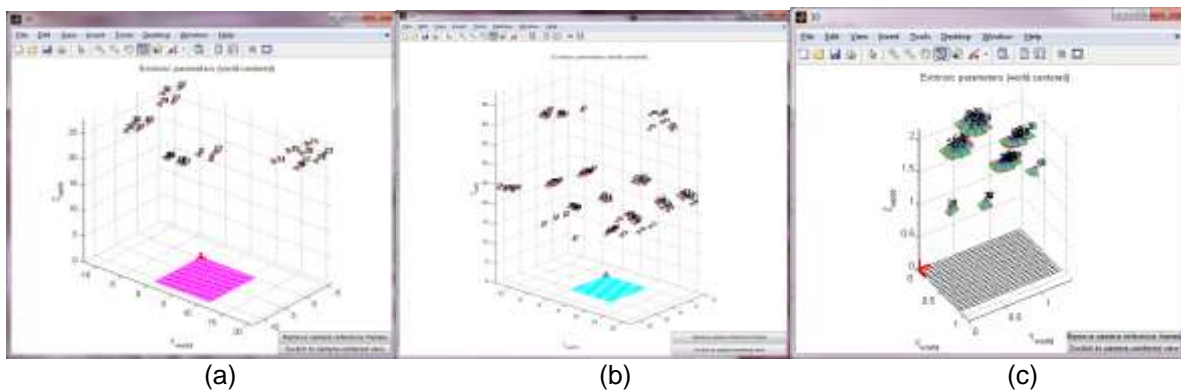
Pada pemotretan kalibrasi pertama, posisi kamera tidak ditentukan pola posisinya terhadap papan kalibrasi, tetapi penempatan posisi papan kalibrasi pada bidang foto yang menjadi faktor utama. Pada pemotretan kalibrasi kedua, posisi kamera dilakukan di 9 posisi seperti matriks 3 x 3. Jarak antara kamera dan papan kalibrasi dipertahankan hampir sama serta variasi penempatannya pada bidang foto dipertahankan seperti pada pemotretan pertama.

Pada pemotretan ketiga dicoba papan kalibrasi dengan ukuran kotak 5 cm dan lensa kamera diatur pada posisi *manual focus* dan dikunci. Hal ini dilakukan dengan tujuan untuk memudahkan penentuan titik pojok kotak hitam-putih dan posisi fokus kamera sedekat mungkin dengan posisi fokus saat pemotretan di udara dilakukan, sedangkan pada kalibrasi pertama dan kedua dilakukan dengan *autofocus*. Selain itu, pada pemotretan kalibrasi ketiga jarak antara kamera dan papan kalibrasi diatur dalam berbagai jarak, dekat dan cukup jauh hingga 2-3 x jarak pada kalibrasi pertama dan kedua.

Pada **Gambar 3** ditampilkan visualisasi posisi dan konfigurasi kamera saat pemotretan terhadap papan kalibrasi pada ketiga pemotretan kalibrasi.

Tabel 1. Parameter intrinsik.

No	Parameter Intrinsik	Kelompok/Set					
		1	2	3	4	5	6
1	f_x (piksel)	4014,66	4015,44	4096,15	4021,75	4004,16	4053,87
2	f_y (piksel)	4013,58	4014,92	4097,64	4021,01	4004,63	4054,95
3	x_p (piksel)	2966,35	2951,91	2975,88	2982,02	2944,30	2983,59
4	y_p (piksel)	1986,66	1968,20	1981,72	1965,77	2009,44	1978,09
5	β	0,0000	0,0002	0,0010	-0,0003	0,0002	0,00069
6	K_1	-0,0665	-0,0712	-0,0623	-0,0678	-0,0744	-0,06292
7	K_2	0,0803	0,0965	0,1185	0,0883	0,1138	0,10701
8	K_3	-0,0014	-0,0020	-0,0024	-0,0024	-0,0004	-0,00240
9	P_1	-0,0028	-0,0025	-0,0025	-0,0019	-0,0046	-0,00275
10	P_2	0,0019	-0,0200	-0,0381	-0,0072	-0,0456	-0,02360



Gambar 3. Konfigurasi dan posisi kamera pada ketiga kalibrasi.

Pada **Tabel 1** kolom 1, 4 dan 5 diperoleh dari data pada **Gambar 3**, tetapi dengan memilih foto tertentu. Parameter intrinsik pada kolom 1, 4 dan 5 memiliki nilai yang berbeda sangat signifikan pada f_x , f_y , x_p dan y_p , padahal ketiganya menggunakan foto yang sama. Hal ini menunjukkan bahwa penempatan posisi kamera dan papan kalibrasi pada bidang foto sangat mempengaruhi nilai 4 komponen parameter intrinsik tersebut.

Dengan demikian sebuah kamera dapat memiliki beberapa parameter intrinsik. Parameter intrinsik pada **Tabel 1** selanjutnya digunakan sebagai data masukan pada rekonstruksi 3D dan diteliti pengaruhnya terhadap ekstraksi tinggi target dari model 3D.

Rekonstruksi 3D

Rekonstruksi 3D dilakukan dengan masukan data berupa 2 atau 3 lebih foto yang bertampalan, yang pada masing-masing foto harus diketahui minimal 6 titik sekawan. Pada penelitian ini digunakan 9 titik sekawan, yang diwakili oleh 9 target, dengan tujuan untuk mendapatkan hasil yang lebih baik dan dapat diukur akurasi. Koordinat 9 titik sekawan pada sistem koordinat masing-masing foto diperoleh dengan melakukan digitasi. Koordinat 9 titik sekawan pada sistem koordinat bumi diperoleh dari pengukuran ETS di

lapangan. Selanjutnya perhitungan rekonstruksi 3D dapat dilakukan dengan masukan koordinat 9 titik sekawan dan parameter intrinsik.

Faktor parameter intrinsik kamera terhadap ketelitian tinggi objek diteliti khusus pada penelitian ini. Remondino dan Frasser (2006) menyatakan bahwa semua komponen parameter intrinsik kamera harus dipakai jika akan melakukan ekstraksi spasial dari rekonstruksi 3D suatu objek dari foto. Semakin baik parameter intrinsik dapat ditentukan semakin baik hasil rekonstruksi yang diperoleh. **Gambar 4**, **Tabel 2** dan **Tabel 3** menunjukkan bahwa hasil penelitian ini membuktikan pernyataan tersebut benar. Perbedaan tinggi target dari hasil rekonstruksi 9 foto udara dari 3 tinggi terbang (50m, 60m dan 70m) dengan tinggi target hasil pengukuran ETS.

Dari **Gambar 4** dapat dianalisis bahwa setiap set parameter intrinsik memberikan hasil perbedaan tinggi yang berlainan pada setiap target dan tidak ada parameter intrinsik yang memberikan hasil perbedaan tinggi terkecil pada semua target. Masing-masing parameter intrinsik dapat memberikan koreksi terbaik pada titik tertentu tetapi dapat juga memberikan koreksi kurang baik pada titik lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa parameter intrinsik menjadi salah satu faktor utama yang mempengaruhi akurasi hasil rekonstruksi.



(a)



(b)

Gambar 4. Grafik perbedaan tinggi 20 target menggunakan 2 foto (a) dan 3 foto (b) serta 6 parameter intrinsik

Tabel 2. Perbedaan tinggi terkecil dari 20 target dengan beberapa kombinasi parameter intrinsik, jumlah foto dan tinggi terbang.

Parameter Intrinsik	Perbedaan Tinggi Terkecil (cm)											
	2 Foto									3 Foto		
	A			B			C			D	E	F
	1	2	3	1	2	3	1	2	3			
1	0,1	0,0	0,0	0,2	0,0	0,2	0,5	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
2	0,2	0,1	0,1	0,9	0,0	0,3	0,4	0,1	0,2	0,1	0,4	0,3
3	0,1	0,0	0,3	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
4	0,1	0,2	0,1	0,0	0,2	0,2	0,5	0,1	0,1	0,0	0,1	0,0
5	0,2	0,3	0,4	0,1	0,3	0,3	0,5	0,6	0,1	0,1	0,2	0,1
6	0,0	0,0	0,1	0,2	0,6	0,4	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,1

Tabel 3. Perbedaan tinggi terbesar dari 20 target dengan beberapa kombinasi parameter intrinsik, jumlah foto dan tinggi terbang.

Parameter Intrinsik	Perbedaan Tinggi Terbesar (cm)											
	2 Foto									3 Foto		
	A			B			C			D	E	F
	1	2	3	1	2	3	1	2	3			
1	13,5	21,9	15,4	16,0	10,5	16,5	25,9	11,9	7,8	14,4	8,6	10,7
2	13,0	26,6	16,9	14,2	9,7	15,0	47,6	12,3	11,6	16,2	8,0	14,4
3	8,3	11,7	7,3	10,0	10,9	10,6	22,2	9,0	13,1	7,3	8,3	7,2
4	10,2	19,0	15,9	18,0	11,0	15,0	25,6	10,1	16,3	14,3	9,6	10,1
5	18,7	20,2	14,9	21,2	10,9	17,8	29,5	15,9	14,2	15,0	11,0	10,7
6	8,7	9,7	6,5	11,2	9,0	9,5	15,2	10,2	13,1	6,0	7,1	6,1

Pada **Tabel 2** dan **Tabel 3** diperlihatkan data perbedaan tinggi terkecil dan terbesar yang dicapai oleh salah satu target dari 20 target hasil rekonstruksi terhadap setiap parameter intrinsik. Nilai perbedaan pada kedua tabel tersebut merupakan selisih nilai tinggi target hasil rekonstruksi dengan hasil pengukuran lapangan menggunakan ETS. Kolom A1, A2 dan A3 berisi perbedaan tinggi target dari model 3D hasil pengolahan dua foto pada tinggi terbang sekitar 50m, sedangkan kolom B1, B2 dan B3 pada tinggi terbang sekitar 60m, dan kolom C1,C1, dan C3 pada tinggi terbang sekitar 70m. Perbedaan tinggi pada kolom D, E dan F, berurutan terkait dengan tinggi terbang 50m, 60m dan 70m, diperoleh dari selisih hasil pengukuran ETS dengan tinggi target rata-rata dari 3 kombinasi rekonstruksi dari 3 buah foto pada masing-masing tinggi terbang. Enam baris data merupakan perbedaan tinggi hasil rekonstruksi yang berubah terhadap perubahan nilai 6 set parameter intrinsik hasil kalibrasi.

Tabel 2 menunjukkan bahwa tinggi target dari rekonstruksi 3D dapat menghasilkan nilai ekstraksi spasial yang mendekati ukuran ETS dalam fraksi milimeter. **Tabel 3** disusun untuk menunjukkan tingkat akurasi yang dapat diperoleh dari rekonstruksi 3D dengan melihat nilai perbedaan terbesar tinggi target pada salah satu target dari 20 target terhadap setiap

parameter intrinsik pada setiap kombinasi foto udara yang dipilih.

Pada **Tabel 3** diperlihatkan beberapa hal sebagai berikut:

- 1) Parameter intrinsik ke-1, 2, 3, 4, 5 dan 6 masing-masing berturut-turut memberikan perbedaan tinggi pada salah satu dari 20 target dengan nilai maksimal 25,9cm, 47,6cm, 22,2cm, 25,6cm, 29,5cm dan 15,2cm terhadap kombinasi jumlah foto yang dipakai dan tinggi terbang.
- 2) Parameter intrinsik ke-6 memberikan perbedaan tinggi maksimal yang relatif lebih kecil pada 8 kolom, parameter intrinsik ke-1 dan ke-3 memberikan perbedaan tinggi target maksimal terkecil masing-masing pada satu dan empat kombinasi foto dan tinggi terbang, sedangkan parameter intrinsik ke-2, 4 dan 5 tidak memilikinya.
- 3) Tinggi target yang diperoleh dari 3 foto pada umumnya lebih baik dari hasil 2 foto. Tinggi target hasil dari 3 foto dapat mereduksi besarnya perbedaan hingga diperoleh akurasi sampai fraksi satuan sentimeter.
- 4) Variasi tinggi terbang 50m, 60m, dan 70m belum dapat dilihat pengaruhnya secara jelas pada akurasi hasil.

Dari berbagai pembahasan di atas dapat diperlihatkan bahwa penentuan tinggi objek melalui rekonstruksi model 3D dari foto udara dapat dicapai dengan tingkat kesalahan maksimal 15,2cm jika menggunakan parameter intrinsik terbaik. Semakin baik parameter intrinsik kamera dapat ditentukan semakin baik tinggi objek yang didapat. Untuk mendapatkan hasil yang baik sebaiknya digunakan minimal 3 foto karena akurasi yang diperoleh pada penelitian ini memiliki kesalahan terbesar 6,0cm.

Parameter intrinsik ke-6 merupakan parameter intrinsik terbaik karena memberikan perbedaan tinggi maksimal yang terkecil dibanding dengan parameter intrinsik lainnya. Hal ini berkaitan dengan penggunaan foto udara dalam menghitung kalibrasi.

Parameter intrinsik yang diperoleh dari foto papan kalibrasi menunjukkan bahwa parameter intrinsik ke-3 memberikan hasil yang lebih baik dibanding 1,2,4, dan 5. Pengaturan fokus lensa kamera yang tetap, bukan *autofocus*, merupakan pengaturan yang diterapkan pada parameter intrinsik ke-3, parameter intrinsik yang lainnya menggunakan *autofocus*.

Hal tersebut dapat disimpulkan menjadi faktor utama yang menyebabkan parameter intrinsik ke-3 menjadi lebih baik. Walaupun saat pemotretan udara lensa diatur pada mode *autofocus*, tetapi pada tinggi terbang 50m, 60m, dan 70m pengaturan fokus tetap pada posisi terjauh yang memberikan akurasi terbaik. Hal ini menunjukkan bahwa pengaruh parameter intrinsik terhadap hasil ekstraksi spasial, khususnya komponen tinggi, sangat besar. Oleh karena itu semua prosedur kalibrasi kamera harus dilakukan dengan benar, bertahap dan teliti.

KESIMPULAN

Tinggi suatu objek dapat diduga dengan cara membuat model 3D dari rekonstruksi, minimal, sepasang foto udara digital yang saling bertampalan. Perlu diketahui minimal 6 titik sekawan yang dapat dikenali di foto dan koordinat diketahui dalam sistem koordinat foto dan sistem koordinat bumi.

Rekonstruksi menggunakan 3 foto memberikan akurasi yang lebih baik dengan penyimpangan terbesar pada fraksi satuan sentimeter atau lebih kecil dari 6,0cm, sedangkan yang menggunakan 2 foto penyimpangan mencapai 15,2cm.

Penentuan parameter intrinsik kamera dengan melakukan kalibrasi kamera harus dilakukan. Kalibrasi kamera sebaiknya dilakukan sebelum dan sesudah pemotretan udara dilakukan untuk dapat mengetahui kestabilan kamera. Kalibrasi kamera sebaiknya dilakukan menggunakan foto udara atau jika dilakukan menggunakan papan kalibrasi dengan pengaturan

fokus lensa kamera pada posisi tetap atau diperkirakan sama dengan posisi fokus saat pemotretan, bukan *autofocus*.

Penelitian ini masih memiliki beberapa kekurangan, untuk itu perlu dilakukan penelitian lanjutan untuk menerapkan kalibrasi kamera menggunakan data lapangan, foto dan target hasil pemotretan udara dengan menerapkan metodologi yang dikemukakan oleh Ebner (1976). Perlu dilakukan juga penelitian khusus terkait metode kalibrasi kamera yang dapat meningkatkan ketelitian rekonstruksi 3D atau membandingkan dengan metode lain yang sudah ada. Selain itu perlu juga dilakukan pemotretan dengan tinggi terbang yang mencapai 100m atau lebih untuk mendapatkan data tambahan untuk mengetahui hubungan berkurangnya akurasi karena semakin jauhnya jarak kamera dengan objek dan menentukan berapa ketelitian yang dapat diperoleh pada ketinggian tersebut.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih ditujukan kepada Sekolah Pascasarjana IPB yang telah memberikan ruang dan waktu sehingga penelitian ini dapat dilaksanakan dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Aber, J.S., I.R. Marzloff and B. Johannes. (2010). *Small-Format Aerial Photography : Principles, Techniques and Geoscience Applications*. Elsevier. Amsterdam.
- Atkinson. (1996). *Close Range Photogrammetry and Machine Vision*. Scotland, UK: Whittles Publishing.
- Bouquet, J.Y. (2010). *Camera Calibration Toolbox for Matlab*. Cited: http://www.vision.caltech.edu/bouquetj/calib_doc/. [Accessed 5 February 2012]
- Cyganek, B. and J.P. Siebert. (2009). *An Introduction to 3D Computer Vision Techniques and Algorithms*. Chippenham, John Wiley & Sons, Ltd. Wiltshire. ISBN: 978-0-470-01704-3.
- Ebner, H. (1976). Self Calibrating Block Adjustment. *Congress of the International Society for Photogrammetry* (1-17pp). Invited Paper of Commission III from Institute for Photogrammetry. Stuttgart University. Helsinki.
- Hanifa, N.R. (2007). *Studi Penggunaan Kamera Digital Low-Cost Non-Metric Auto-Focus*. Tesis. Institut Teknologi Bandung. Bandung.
- Khalil, A.M. (2011). Two-dimensional displacement measurement using static close range photogrammetry and single fixed camera. *Alexandria Engineering*. 219-227.
- Remondino, F. and C. Fraser. (2006). Digital Camera Calibration Methods : Considerations and Comparisons. *IAPRS Volume XXXVI, Part 5* (pp. 266-271). ISPRS Commission. Dresden.