

Studi Kelayakan Pemetaan Kadastral Teliti Dari Pemotretan Udara Dengan Wahana Nirawak

M. Edwin Tjahjadi¹, Hery Purwanto¹, Silvester Sari Sae¹

1. Teknik Geodesi ITN Malang

Alamat Email : edwin_tjahjadi@yahoo.com, edwint.tjahjadi@gmail.com

Abstract

Precision of area measurements photographed using off-the-shelf cameras from unmanned aerial vehicles (UAV) is limited by the ground sampling distance of the generated orthomosaics and by the integrity of the internal constructions of non-metric cameras which does not fit for large scale mapping. Furthermore, instabilities of the internal components of such cameras could further degrade the precision of the resulting maps. Nevertheless, using so called on-the-fly camera calibration method and utilizing a modified version of the normal flying paths in aerial photogrammetry, we observed that the measurements precisions could be better up to around 1cm which could meet with that of precision of the RTK-GPS measurements about sub centimeter level. Therefore we firmly believed that conducting cadastral surveys using UAV is very likely possible in the near future.

Keywords: Key Words: UAV, cadastral, survey, precision

Pendahuluan.

Paradigma pemetaan kadastral dengan teknik fotogrametri saat ini adalah pengukuran dan pemetaan persil-persil dari orto-foto atau orto-mosaik. Dalam proses pembuatan orto-foto, area yang dipetakan dipotret secara vertikal dengan teknik pemotretan yang sudah baku. Dan proses deliniasi batas-batas persil dilakukan diatas peta orto-foto.

Berdasarkan pengalaman penulis, ketelitian teknik tersebut masih inferior dibandingkan dengan metode pengukuran langsung di lapangan seperti dengan alat ukur GPS-RTK ataupun dengan Total Station. Seiring dengan semakin marak dan mudahnya teknologi Unmanned Aerial Vehicle (UAV), kami menawarkan metode alternatif pengukuran persil dengan pemanfaatan UAV sebagai wahana pemotretan udara.

Dengan memodifikasi teknik pemotretan udara yang sudah baku dan dengan melakukan kalibrasi kamera "on the fly", pengukuran persil dengan ketelitian 5mm – 15mm sangat mungkin dilakukan walaupun hanya dengan menggunakan kamera saku digital yang banyak terdapat dipasaran. Tulisan ini akan menguraikan desain operasional teknik pemotretan dan pemrosesan foto-foto tersebut.

Metodologi

Didalam tulisan ini, metodologi pemetaan kadastral dengan pesawat nirawak terbagi menjadi dua topik utama yaitu metodologi pemotretan udara dan metodologi pengolahan foto. Sedangkan luas area

studi kasus kurang lebih 1,5Ha yang merupakan area persawahan dengan variasi kemiringan lereng 0° – 50° .

Teknik Pemotretan

Kamera yang digunakan dalam penelitian ini adalah kamera Nikon 12MP CoolPix P300 dengan *setting fix/manual focus*. Kamera ini memiliki ukuran sensor 1/2,3 inch atau 7,66mm x 6,17mm, sehingga jika digunakan untuk memotret dengan foto yang berukuran 4000x3000 piksel, dimensi satu pikselnya akan setara dengan 0,0019mm x 0,0021mm, namun resolusi (baca: *Ground Sampling Distance*) bervariasi tergantung dari panjang fokus kamera yang digunakan dan tinggi terbang pesawat. Selanjutnya, kamera ini ditambatkan pada pesawat Nirawak Hexacopter. Dengan cara ini arah terbang dan interval pemotretan dikendalikan dari jarak jauh secara telemetri.

Pemotretan dilakukan secara vertikal dan dengan kemiringan/kesendengan tertentu. Karena pengaruh hembusan angin dan total berat wahana yang cukup ringan, sekitar 5,5kg, tinggi terbang wahana menjadi bervariasi, kurang lebih berkisar 30-50m. Formasi pemotretan udara mengikuti pola pemotretan fotogrametri format besar. Hasil yang didapat adalah foto-foto udara vertikal. Selanjutnya pada saat terbang, posisi kamera dimiringkan hingga membentuk tilt sekitar 45° . Pemotretan dilanjutkan dengan pola terbang acak dan pola terbang mengitari *Area of Interest* (AoI). Dalam hal ini AoI merupakan

area yang memiliki premark-premark retro-target yang didesain khusus untuk dapat melakukan kalibrasi kamera "on the fly".

Tujuan dari pemotretan area AoI ini adalah untuk penghitungan parameter kalibrasi kamera. Berdasarkan hasil penelitian terdahulu (Gruen, 1985; Fraser, 1997; dan Fryer, 2001), kamera non metrik (seperti kamera yang digunakan dalam penelitian ini) memiliki susunan lensa dan komponen elektronik sensor yang tidak stabil didalam cangkang/badan kameranya. Sebagai akibatnya, apabila kamera tipe ini digunakan untuk pemotretan dengan HexaCopter yang memiliki getaran mesin dan propeller yang sangat kuat akan mempengaruhi parameter kamera seperti panjang fokus (f), dan posisi principal point (x_p , y_p). Selama sesi pemotretan, ketiga parameter ini selalu berubah-ubah setiap saat, oleh karena itu data parameter kalibrasi kamera yang dilakukan pada saat sebelum atau setelah pemotretan tidak akan optimal untuk memodelkan distorsi lensa pada foto-foto dijitalnya. Disamping itu pula parameter kalibrasi kamera yang didapat pada saat sebelum atau setelah pemotretan tidak akan optimal dalam mereduksi distorsi lensa apabila digunakan untuk proses perhitungan triangulasi udara dan bundle adjustment (Luhmann, 2006)..

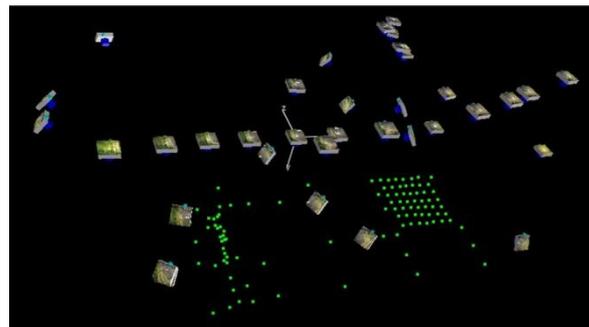
Dengan demikian, untuk meningkatkan ketelitian titik-titik koordinat yang dipotret, dibutuhkan informasi nilai f , x_p , dan y_p yang aktual pada saat pemotretan berlangsung. Teknik untuk mendapatkan ketiga parameter kamera dan parameter distorsi lensayang up-to-date pada saat pemotretan disebut sebagai teknik self-calibrating bundle adjustment (Brown, 1974; Granshaw, 1980; Cooper dan Robson, 2001; serta Luhmann, 2006). Kelebihan teknik ini seperti yang diklaim oleh para penemunya adalah pengaruh distorsi lensa yang secara visual dapat dilihat oleh mata manusia seperti distorsi radial, distorsi tangensial dapat dimodelkan oleh beberapa parameter sederhana, sehingga tidak membebani Persamaan Normal dalam hitungan bundle adjustment. Dengan kata lain, korelasi antara parameter orientasi dalam (IO) dengan parameter-parameter kalibrasi tidaklah signifikan.

Tahun 1971 Kenefick menemukan bahwa untuk meningkatkan akurasi koordinat dari titik-titik obyek yang dipotret maka pola pemotretan haruslah konvergen, mengerucut ke arah obyek yang dipotret (Kenefick, 1971, 1972). Manfaat lain dari teknik pemotretan konvergen ini adalah akurasi dan presisi koordinat XYZ dapat meningkat secara eksponensial sebanding dengan jumlah foto-foto yang bertampalan. Disamping itu pula keakurasian dan ketelitian komponen-komponen koordinat (σ_X , σ_Y , dan σ_Z) menjadi sama besar / seimbang. Hal ini sangat kontradiktif dengan kondisi foto stereo normal

yang sering dijumpai dalam pemotretan fotogrametri format besar, pada umumnya akurasi dan presisi koordinat arah X dan Y (σ_X dan σ_Y) jauh lebih baik ketimbang akurasi dan presisi dalam arah Z (σ_Z). Oleh karena itu akurasi dan presisi informasi vertikal suatu obyek dari foto stereo selalu lebih rendah dibandingkan dengan arah horisontalnya (Huang, 2000).

Namun Foerstner dkk (2004), Georgopoulos dan Skarlatos (2003) dan Carter (1988) berargumentasi bahwa untuk dapat membuat orto-foto diperlukan foto-foto udara tegak sebagai prasyarat hubungan geometrik antara foto dan model permukaan bumi atau digital elevation model (DEM).

Oleh karena itu, agar bisa mendapatkan orto-mosaik sekaligus untuk meningkatkan akurasi dan presisi koordinat titik-titik persil di lokasi penelitian, pemotretan udara dilakukan dengan menghadapkan kamera secara vertikal ke titik nadir, dan merotasi kamera sehingga membentuk tilt 45^0 dalam pemotretan konvergen. Pemotretan udara konvergen untuk daerah AoI akan memfasilitasi perhitungan self-calibrating dalam proses pengolahan data. Secara keseluruhan terdapat 106 foto yang diolah, 20 diantaranya tersaji pada Gambar 1.



Gambar 1. Formasi pemotretan.

Teknik Pengolahan Data

Foto-foto diolah dengan perangkat lunak yang tengah kami kembangkan untuk kepentingan ini. Untuk memverifikasi kebenaran hasil olahan, digunakan perangkat lunak PhotoModeller dan beberapa perangkat lunak berbasis Open Source. Secara garis besar teknik yang digunakan terdiri dari dua metode. Pertama, metode identifikasi titik-titik sekutu baik berupa tie point ataupun control point secara presisi digunakan teknik Multiphoto Least Square Image Matching (MLSM). Cara kerja metode ini berdasarkan identifikasi gradasi keabuan titik fitur pada foto-foto yang bertampalan (Gruen 2001, Lemmens, 1988).

Metode MLSM berdasarkan pada konsep bahwa nilai-nilai keabuan suatu kumpulan piksel pada titik-titik sekutu akan memiliki karakteristik radiometrik yang serupa (Lemmens, 1988). Dengan

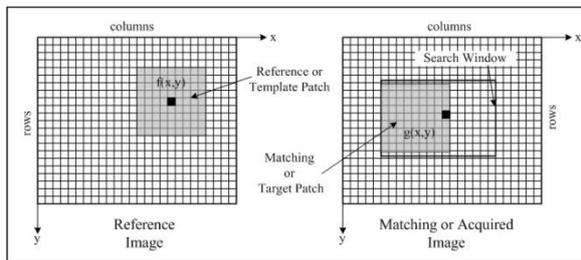
kata lain, jika suatu titik obyek pada suatu foto dengan titik-titik sekutunya di foto-foto yang lain dapat dicari posisinya dengan mengoptimalkan nilai ukuran kesesuaian (dalam hal ini nilai keabuan) didalam dua jendela sampel atau lebih.



Gambar 2. Titik sekutu di Matching image (foto kanan) akan dicari posisinya

Pada Gambar 2, suatu piksel yang merupakan titik pojok bidang tanah diseleksi pada foto referensi (*Reference Image*). Kemudian melalui teknik MLSM, akan dicari titik piksel konjugasinya (titik sekutu) pada foto kanannya (*Matching Image*). Jika nilai-nilai keabuan pada jendela piksel referensi (*Reference Patch*) pada foto referensi (Gambar 3) disebut fungsi $f(x,y)$, nilai-nilai keabuan pada *Matching Patch* disebut fungsi $g(x,y)$, dan kedua macam jendela keabuan itu memiliki nilai-nilai piksel yang sama, maka dapat disusun persamaan (Gruen, 2001):

$$f(x, y) = g(x, y) + e(x, y) \tag{1}$$



Gambar 3. Konsep MLSM

dimana $e(x,y)$ adalah model yang menggambarkan perbedaan nilai radiometrik antara dua jendela (patch) yang merupakan nilai perbedaan absolut untuk kedua patch. Gruen (2001) menyatakan bahwa $f(x,y)$ dapat diasumsikan bebas dari gangguan (noise) radiometrik dan Persamaan 1 adalah non-linier dan harus diselesaikan dengan metode Hitung Kuadrat Terkecil.

Teknik berikutnya adalah self-calibrating bundle adjustment. Dengan metode ini, sepuluh parameter kalibrasi kamera dapat dihitung secara serempak dengan parameter orientasi luar masing-masing foto, dan koordinat XYZ titik-titik persil. Hitungan Least Square yang digunakan adalah metode parameter block invariant, dimana teknik ini serupa dengan yang terdapat pada program sejenis seperti PAT-B, dan PAT-M (Luhmann, 2006). Persamaan umum dari teknik ini adalah sebagai berikut:

$$v_{(2mn,1)} = A_1 \delta_1 + A_2 \delta_2 + A_3 \delta_3 + w_{(2mn,1)} \tag{2}$$

Jika terdapat n buah titik obyek yang terekam pada m buah foto, maka vektor v akan berisikan 2nm buah nilai residu pengukuran koordinat foto. Matrik A_1 berisikan turunan terhadap parameter orientasi luar dan berdimensi 2mn x 6m; matrik A_2 berisikan 2mn x 3n elemen turunan terhadap titik-titik obyek; dan matrik A_3 berdimensi 2mn x p yang merupakan turunan terhadap q buah parameter kesalahan intrinsik kamera. Vektor δ_1, δ_2 dan δ_3 berturut-turut berisikan nilai koreksi parameter orientasi luar, titik-titik obyek, dan kesalahan intrinsik. Sedangkan 2mn buah elemen vektor w berisikan selisih perbedaan antara nilai pengukuran dengan nilai terkoreksi. Kesepuluh parameter kalibrasi kamera yang dapat dihitung adalah 3 parameter orientasi dalam yaitu $f, x_p,$ dan y_p ; tujuh parameter distorsi kamera meliputi 5 parameter distorsi lensa yaitu distorsi radial (K1, K3, K5), distorsi decentring (P1, P2) dan dua parameter terakhir yaitu distorsi affinity (B1, B2) untuk mengoreksi ketidaksikuan penyusunan dan penempatan elemen-elemen sensor CCD/CMOS didalam badan kamera. Parameter orientasi luar suatu foto ada enam buah yaitu 3 parameter posisi (XYZ) dan 3 parameter rotasi (omega, phi, kappa). Sebagai ilustrasi, jika terdapat 100 foto dengan 400 titik persil yang akan diukur koordinatnya akan terdapat $100 \times 6 + 400 \times 3 + 10 = 1810$ parameter. Dengan kata lain dimensi matrik persamaan normalnya adalah 1810 x 1810 elemen.

Didalam kamera digital SLR terdapat bidang sensor CCD/CMOS dan susunan lensa, dimana susunan lensa ini mentransformasikan (transformasi perspektif) gambaran suatu titik obyek di permukaan bumi ke bidang foto digital. Karena adanya kesalahan sistematis pada bidang sensor dan susunan lensa ini, maka gambaran titik pada bidang foto mengalami distorsi. Untuk mendapatkan nilai koordinat dengan akurasi tinggi, maka kesalahan sistematis ini harus dihilangkan atau diminimalkan pengaruhnya terhadap ketelitian titik-titik obyek tersebut. Teknik “Self-Calibrating” merupakan cara yang paling umum untuk meminimalkan kesalahan sistematis ini yang diperkenalkan oleh (Brown, 1974) Brown (1974) di akhir tahun 1960 dan sudah dianggap teknik baku sejak tahun 1980an (Gruen, 1985). Pada prinsipnya, teknik ini melibatkan parameter kalibrasi ke dalam model fungsi Δ_x dan Δ_y didalam sistem persamaan kolinier, atau dalam bentuk matrik akan diperoleh solusi:

$$\begin{bmatrix} A_1^T P A_1 & A_1^T P A_3 & A_1^T P A_2 \\ A_2^T P A_1 & A_2^T P A_3 & A_2^T P A_2 \\ A_3^T P A_1 & A_3^T P A_3 & A_3^T P A_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_3 \\ \delta_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_1^T P w \\ A_2^T P w \\ A_3^T P w \end{bmatrix} = 0 \tag{3}$$

atau dapat ditulis menjadi:

$$\begin{pmatrix} \tilde{N}_{ij} & \tilde{N}_i & \tilde{N}_{ij} \\ \tilde{N}_i^T & \tilde{N}_p & \tilde{N}_j \\ \tilde{N}_{ij}^T & \tilde{N}_j & \tilde{N}_{ij} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta_1 \\ \delta_3 \\ \delta_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \tilde{C}_1 \\ \tilde{C}_p \\ \tilde{C}_j \end{pmatrix} = 0 \tag{4}$$

Dimana P adalah matrik bobot dari ketelitian pengukuran koordinat foto digital. Solusi hitung kuadrat terkecil dapat ditentukan dengan menggunakan matrik inverse Cayley N^{-1} . Tetapi matrik N memiliki *rank defect* sebesar parameter penentuan datum (Cooper and Cross, 1988, 1991), yaitu 7 (Granshaw, 1980). Singularitas matrik N ini dapat diselesaikan dengan menambahkan parameter datum secara implisit untuk membentuk persamaan normal yang non-singular. Teknik hitungan yang dipakai untuk menyelesaikan Persamaan 4 ada beberapa macam, seperti misalnya teknik minimum constraint (Dermanis, 1994a), S-transformation, Pseudo Inverse/Monroe-Penrose (Edmundson dan Fraser, 1998), dan Free-Net Adjustment (Dermanis, 1994b). Tetapi, teknik yang paling sesuai didalam kasus ini adalah teknik yang dapat mengoptimalkan tingkat keakurasian koordinat titik-titik obyek.

Verifikasi lapangan

Untuk memverifikasi hasil pemotretan dan keakurasian ukuran luas persil yang didapat dari hasil pemotretan, setiap titik-titik persil sawah diberi tanda premark yang berupa lingkaran hitam/putih dengan warna latar putih/hitam. Premark-premark ini ada yang berdimensi 10cmx 10cm dan ada pula yang berdimensi 20cmx20cm. Dasar pertimbangan untuk membuat dua jenis premark dengan ukuran yang berbeda adalah untuk mengetahui hubungan antara ketelitian pendijitasian koordinat titik tengah premark pada foto berdasarkan luasannya.

Manfaat lain dari premark yang berbentuk lingkaran hitam/putih dengan warna latar belakang putih/hitam adalah posisi titik tengah lingkaran pada foto dapat ditentukan sampai dengan ketelitian 0,001 piksel (Mitchell dan Pilgrim, 1987; dan Trinder et al., 1990). Oleh karena itu bias atau perbedaan posisi antara titik-titik persil dari data pengukuran lapangan dan dari hasil dijitasi pada foto dapat diminimalkan.

Pendefinisian titik-titik koordinat persil adalah penetapan titik tengah lingkaran premark. Di lapangan, pemberian tanda silang pada titik lingkaran adalah untuk proses centring alat ukur Total Station dan prismanya serta untuk penempatan ujung tongkat GPS-RTK. Pada foto digital, penetapan titik tengah lingkaran premark dilakukan secara matematis dengan menggunakan teknik centroiding. Pendefinisian ini dilakukan agar antara titik-titik persil yang diukur di lapangan dan dengan yang diidentifikasi pada foto adalah titik persil yang sama.

Verifikasi titik-titik ini dilakukan dua kali yaitu dengan melakukan pengukuran GPS-RTK (Gambar 4) dan dengan pengukuran Total Station (Gambar 5). Tujuan pengukuran lapangan dilakukan sebanyak dua kali adalah untuk memastikan tidak ada kesalahan penentuan koordinat persil-persil di lapangan.



Gambar 4. Pengukuran titik koordinat persil pada centroid target dengan GPS-RTK



Gambar 5. Pengukuran titik koordinat persil pada titik tengah target dengan GPS-RTK

Hasil dan Pembahasan

Foto-foto vertikal dari hasil pemotretan disusun menjadi orto-mosaik dengan dikoreksi menggunakan DEM yang diproses dengan perangkat lunak Open Source. Hasil overlay antara orto-mosaik dengan DEM tersaji pada Gambar 6.



Gambar 6. Kondisi topografi lokasi penelitian.

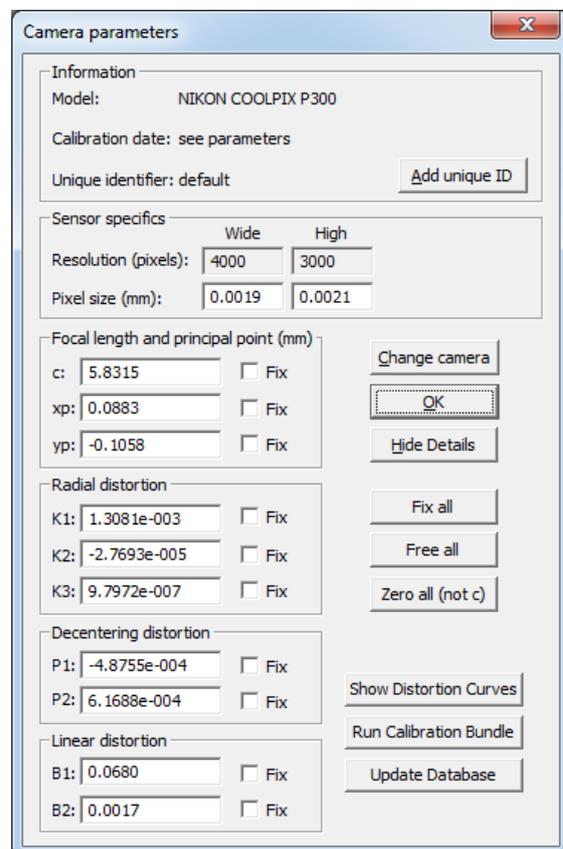
Sedangkan Gambar 7 memperlihatkan lokasi dan luasan-luasan persil sawah yang akan dihitung dan dibandingkan luasannya. Dari Gambar 7 terlihat pula lokasi dan sebaran titik titik premark di setiap sudut-sudut persil sawah, dan terdapat pula sebaran titik-titik premark untuk kalibrasi kamera.



Gambar 7. Orto-mosaik lokasi penelitian

Dengan menggunakan titik-titik kalibrasi seperti tersaji pada Gambar 7, kesepuluh parameter kalibrasi

dapat dihitung dengan menggunakan teknik self-calibrating bundle adjustment. Pada kasus ini digunakan teknik free network adjustment karena untuk menghindari kontaminasi dari perambatan kesalahan pengukuran titik-titik kontrol (titik BM). Hasil dari proses kalibrasi kamera tersaji pada Gambar 8.



Gambar 8. Kesepuluh parameter kalibrasi kamera dapat dihitung secara on the fly.

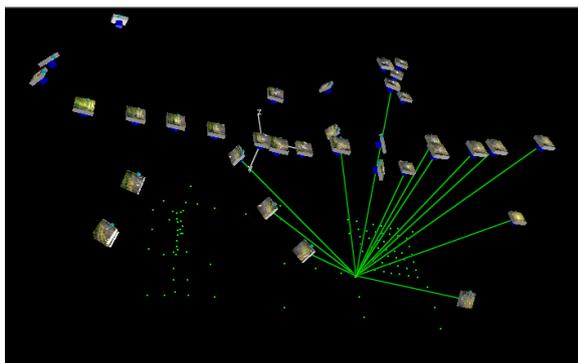
Setelah kesepuluh parameter kalibrasi berhasil dihitung, parameter-parameter tersebut selanjutnya digunakan dalam proses triangulasi udara. Dalam proses ini, koordinat titik-titik persil diekstraksi dari foto-foto yang bertampalan (Gambar 9 dan Gambar 10). Sebelum proses intersection dimulai, terlebih dahulu dilakukan koreksi terhadap pengukuran koordinat persil pada foto terhadap kesalahan sistematis. Dengan menggunakan parameter-parameter kalibrasi besaran distorsi radial dan tangensial dapat direduksi dari ukuran koordinat foto. Dampak langsung dari reduksi ini dan ditambah dengan jaringan pemotretan multi foto yang konvergen adalah meningkatkan akurasi dan presisi koordinat persil-persil secara signifikan (Tabel 1).

Dari kedua gambar ini (Gamabr 9 dan 10) terlihat bahwa suatu titik persil yang diseleksi secara acak dapat terlihat dari lebih 15 foto yang bertampalan. Sehingga apabila titik-titik tersebut diekstraksi dengan menggunakan teknik MLSM dan dengan

teknik intersection dari multi foto, akan didapatkan kualitas geometrik yang sangat baik, bahkan jauh lebih baik dari kualitas geometri dengan kamera metrik format besar yang dipotret secara konvensional. Karena dalam fotogrametri udara konvensional suatu titik kemungkinan besar hanya terlihat dari 2 – 5 foto yang bertampalan saja dimana rasio Base-Height-nya (B/H) lebih kecil dibandingkan rasio B/H pada penelitian ini.

Point Label	X	Y	Z	# Rays	Quality	Angle (deg)	Ds
1	-280.8798	775.1943	-245.4870	12	1.25	84.1	
2	-208.0485	767.0620	-238.8037	12	0.70	85.0	
3	-168.3697	743.2562	-233.0179	16	0.95	88.5	
4	-111.2747	733.1001	-250.1660	14	0.80	89.5	
5	-175.0755	745.0821	-166.0925	16	0.75	89.9	
6	-111.3833	737.3250	-161.4565	16	0.80	89.7	
7	-171.7919	746.8946	-99.2031	16	0.58	89.9	
8	4.6497	721.9080	-253.6466	15	1.21	89.6	
9	-4.0539	728.3487	-62.7434	19	0.75	90.0	
10	-111.1563	741.4734	3.0608	14	0.78	89.4	

Gambar 9. Jumlah foto yang bertampalan dari suatu titik



Gambar 10. Ilustrasi visual dari suatu titik persil yang terlihat dari multi foto udara yang bertampalan

Label	X (m)	Y(m)	Z(m)	SX(m)	SY(m)	SZ(m)
1	679963,622	9124516,927	98,504	0,006	0,007	0,006
2	679965,339	9124520,260	98,851	0,005	0,005	0,005
3	679966,216	9124522,138	100,034	0,004	0,004	0,005
4	679968,538	9124524,137	100,471	0,005	0,005	0,004
5	679963,139	9124523,683	100,029	0,004	0,004	0,004
6	679964,696	9124526,563	100,365	0,004	0,004	0,004
7	679960,337	9124525,658	100,016	0,003	0,004	0,003
8	679971,882	9124529,053	100,920	0,005	0,005	0,005
9	679963,387	9124533,910	100,834	0,003	0,004	0,003
10	679957,590	9124531,084	100,354	0,002	0,003	0,002

Tabel 1. Sample acak koordinat persil beserta ketelitiannya

Tabel 1 memperlihatkan contoh acak koordinat persil-persil hasil dari proses triangulasi udara. Sistem koordinat XY dinyatakan dalam UTM sedangkan sistem tinggi Z berdasarkan pada Mean Sea Level. Ketelitian (standar deviasi untuk 1 sigma) koordinat persil dapat mencapai sub centimeter, atau lebih kecil dari 1cm, setara dengan ketelitian GPS-RTK maupun dengan ketelitian Total Station.

Dari Tabel 1 terlihat pula ketelitian kooordinat dalam arah XYZ (SX, SY, dan SZ) kurang lebih sebanding besarnya. Hal ini menandakan bahwa ketelitian

dalam arah horisontal sebanding dengan ketelitian dalam arah vertikal.

Label Persil	Luas Persil (m ²)	Luas Persil (m ²)	Selisih Luas (m ²)
	dengan GPS-RTK/TS	Pemotretan UAV	
A1	487,05	487,048	0,002
A2	314,68	314,679	0,001
A3	446,83	446,827	0,003
A4	289,592	289,339	0,253
A5	187,979	185,486	2,493
A6	37,667	37,666	0,001
A7	113,751	113,608	0,143

Tabel 2. Analisa perbandingan luasan persil.

Agar hasil penelitian dapat lebih dipertanggung – jawabkan, dilakukan analisa perbandingan luasan antara pengukuran GPS-RTK dan dengan hasil dari triangulasi udara. Metode penghitungan luas dilakukan dengan rumus koordinat. Terdapat tujuh persil sawah yang dihitung luasannya. Hasil perhitungan luas dari masing-masing metode beserta selisih luasannya tersaji pada Tabel 2.

Selisih luasan terbesar terdapat pada persil A5 yaitu sekitar 2,5m², dimana persil ini memiliki faktor kemiringan lereng lebih besar dari 35⁰. Kemudian selisih luasan terbesar kedua terdapat pada persil A4 sebesar kurang lebih 0,25m². Sedangkan untuk persil-persil lainnya, luasannya relatif sama. Hal ini mengindikasikan bahwa pengukuran persil sawah melalui pemotretan udara dengan pesawat nirawak dapat menghasilkan ketelitian yang setara dengan pengukuran GPS maupun Total Station.

Kesimpulan dan Saran

Pengukuran dan pemetaan kadastral menggunakan kamera non-metrik dari pesawat nirawak dapat menghasilkan ketelitian yang sepadan dengan ketelitian pengukuran GPS maupun Total Station. Ketelitian ini dicapai dengan memodifikasi pola pemotretan udara konvensional dengan kamera metrik format besar dan dengan melakukan kalibrasi kamera secara on the fly.

Ketelitian pengukuran kadastral dengan pesawat nirawak dapat lebih ditingkatkan lagi apabila digunakan kamera SLR, atau kamera mirrorless yang memiliki sensor full format.

Ucapan Terimakasih

Ucapan terima kasih ditujukan kepada DIKTI yang telah memberikan dana hibah penelitian Hibah Bersaing dengan nomor kontrak “No. 064/SP2H / PDSTRL / K7 / KL / III / 2013, tanggal 8 Maret 2013 dan kepada semua pihak baik yang secara langsung ataupun tidak langsung telah berpartisipasi demi terwujudnya penelitian ini.

Daftar Pustaka

- Brown, D. C., 1974. *Evolution, Application and Potential of The Bundle Method of Photogrammetric Triangulation*, Geodetic Services, Inc., Melbourne, Florida.
- Carter, J. R., 1988. Digital Representations of Topographic Surfaces. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 54(11): 1577-1580.
- Cooper, M. A. R. and Cross, P. A., 1988. Statistical Concepts and Their Application in Photogrammetry and Surveying. *Photogrammetric Record*, 12(71): 637-663.
- Cooper, M. A. R. and Cross, P. A., 1991. Statistical Concepts and Their Application in Photogrammetry and Surveying (Continued). *Photogrammetric Record*, 13(77): 645-678.
- Cooper, M. A. R. and Robson, S. (Editors), 2001. Theory of Close Range Photogrammetry. *Close Range Photogrammetry and Machine Vision*. Whittles Publishing, Scotland, UK, halaman: 9-51.
- Dermanis, A., 1994a. The photogrammetric inner constraints. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 49(1): 25-39.
- Dermanis, A., 1994b. Free Network Solutions with the DLT Method. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 49(1): 2-12.
- Foerstner, W., Wrobel, B., Paderes, F., Craig, R., Fraser, C. S. and Dolloff, J., 2004. Analytical Photogrammetric Operations, *Manual Of Photogrammetry*, 5th ed. (Eds. C. J. McGlone, E. M. Mikhail, J. Bethel and R. Mullen). American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, 763-948.
- Edmundson, K. and Fraser, C. S., 1998. A practical evaluation of sequential estimation for vision metrology. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 53(5): 272-285.
- Fryer, J. G. (Editor), 2001. Camera Calibration. *Close Range Photogrammetry and Machine Vision*. Whittles Publishing, Scotland, UK, 156-179.
- Fraser, C. S., 1997. Digital camera self-calibration. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* (52): 149-159.
- Gruen, A. W., 1985. Data Processing Methods for Amateur Photographs. *Photogrammetric Record* (11): 567-579.
- Gruen, A. W. (Editor), 2001. Least Square Matching: A Fundamental Measurement Algorithm. *Close Range Photogrammetry and Machine Vision*. Whittles Publishing, Scotland, UK, 217-255.
- Granshaw, S. L., 1980. Bundle Adjustment Methods in Engineering Photogrammetry. *Photogrammetric Record* (10): 181-207.
- Georgopoulos, A. and Skarlatos, D., 2003. A Novel Method for Automating the Checking and Correction of Digital Elevation Models using Orthophotographs. *Photogrammetric Record*, 18(102): 156-163.
- Huang, Y. D., 2000. Evaluation of Information Loss in Digital Elevation Models With Digital Photogrammetric Systems. *Photogrammetric Record*, 16(95): 781-791.
- Kenefick, J. F., 1971. Ultra-Precise Analytics. *Photogrammetric Engineering*, 37(11): 1167-1187.
- Kenefick, J. F., 1972. Analytical Self-Calibration. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 38(11): 1117-1126.
- Lemmens, M. J. P. M., 1988. A Survey on Stereo Matching Techniques. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* (27): 11-23.
- Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S. and Harley, I., 2006. *Close Range Photogrammetry: Principles, Techniques and Applications*. Whittles Publishing, Scotland, UK., 510 halaman.
- Mitchell, H. L. and Pilgrim, L. J., 1987. Selection of an Image Matching Algorithm. In: M. R. Shortis (Editor), Symposium on the Application of Close Range Photogrammetry. The University of Melbourne, Melbourne, halaman: 23-31.
- Trinder, J. C., Tjugiarto, T. and Donnelly, B. E., 1990. A Digital Photogrammetry System for Close Range. *Australian Journal of Geodesy, Photogrammetry and Surveying*: 1-13.