

KAJIAN TEKNIK *STEREO PLOTTING* PADA FOTO UDARA FORMAT KECIL UNTUK MENGHASILKAN DATA DTM

(*Assessment of Stereoplotting Techniques for Small Format Aerial Photographs to Generate DTM Data*)

Harintaka

Departemen Teknik Geodesi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada
JL. Grafika No. 2 Yogyakarta 55281 Indonesia
E-mail: harintaka@ugm.ac.id

Diterima: 21 Mei 2020; Direvisi :31 Mei 2020; Disetujui untuk Dipublikasikan: 19 Agustus 2020

ABSTRAK

Pada fotogrametri, untuk menghasilkan data *Digital Terrain Model* (DTM) dari foto udara dilakukan dengan cara *stereo plotting*. Ada dua cara *stereo plotting*, cara interaktif dan otomatis. Cara interaktif memerlukan waktu yang lama bagi operator untuk melihat dan mendeliniasi dalam ruang 3D untuk menghasilkan posisi tiga dimensi (3D) objek dalam sistem koordinat tanah. Cara otomatis adalah melakukan proses *stereo matching* dengan salah satunya menggunakan algoritma korelasi silang. Pada cara otomatis ini, setiap pasangan foto stereo diidentifikasi objek yang sama secara otomatis, kemudian dihitung koordinat 3D-nya menggunakan persamaan *space intersection*. Penelitian ini mengkaji penggunaan kedua teknik tersebut pada Foto Udara Format Kecil (FUFK) untuk menghasilkan data DTM dan dibandingkan hasilnya. Pada penelitian ini digunakan satu blok pemotretan udara yang terdiri dari lima jalur terbang, dengan setiap jalur terdiri dari 40 foto. Setelah dilakukan hitungan triangulasi udara, pasangan – pasangan foto stereo dipilih dan dibentuk *epipolar image*. Kemudian proses *stereo plotting* secara interaktif dan otomatis diterapkan dan dibandingkan hasilnya. Hasil kajian menunjukkan data DTM yang dihasilkan antara teknik *stereo plotting* interaktif dan otomatis adalah mirip, tetapi tidak identik. Ini terjadi terutama di daerah campuran dengan tajuk pohon rapat. Keunggulan teknik *stereo plotting* interaktif adalah hasil sangat akurat dan tanpa memerlukan tahapan editing lagi, sedangkan teknik otomatis adalah kecepatan proses tetapi masih memerlukan editing.

Kata kunci: *stereo plotting* interaktif, otomatis, kamera non metrik, foto udara format kecil, paralaks, foto stereo, epipolar foto

ABSTRACT

On photogrammetry, to generate Digital Terrain Model (DTM) data from aerial photographs is by doing stereo plotting. There are two ways of stereo plotting, automatically and interactively. The Interactive method takes a long time for the operator to see and digitize objects in three-dimensional (3D) space to generate 3D position in the ground coordinate system. The Principle of automatic stereo plotting is to perform stereo matching using a cross-correlation algorithm. In this method, each stereo pair's photos automatically identified the same object, and then calculated its 3D position using the space intersection formula. This research examined the application of both stereo plotting techniques, either interactively or automatically, on small format aerial photography (SFAP) to generate DTM data and compared the results between two methods. This study utilized 1 block of aerial photo project which consisting of 5 runs, with each run consisting of about 40 photos. After aerial triangulation was performed, stereo pair's photos were selected and formed epipolar image. Then, interactive and automatic stereo plotting were applied to each selected stereo pairs photos. The results show that DTM data generated by interactive and automatic stereo plotting techniques are similar, but not identical. This occurs mainly in areas with a mixture of the dense tree canopy. The advantage of the interactive stereo plotting technique is accurate and does not require any more editing stages, while the automatic stereo plotting method has high-speed processing data to generate DTM data but still requires editing.

Keywords: *automatic and interactive stereo plotting, non-metric camera, small format aerial photography, parallax, stereo image, epipolar image*

PENDAHULUAN

Dalam bidang kajian sumber daya alam dan aplikasi rekayasa, *Digital Terrain Model* (DTM)

mempunyai peran yang sangat penting. Sampai saat ini, beberapa teknologi yang digunakan untuk menghasilkan data DTM berkualitas tinggi antara lain: survei terestris, teknologi fotogrametri, Lidar

(*Light Detection and Ranging*), dan InSAR (*Interferometric Synthetic Aperture Radar*) (Konecny, 2014). Di Indonesia, dari beberapa teknologi tersebut, teknologi fotogrametri masih menjadi salah satu pilihan utama untuk menghasilkan data DTM dengan ketelitian tinggi. Namun, sampai saat ini teknologi pemrosesan foto udara untuk menghasilkan informasi geospasial dasar (IGD) masih menggunakan pendekatan interaktif. Cara ini memang terbukti menghasilkan *geodatabase* atau IGD, termasuk DTM, yang berkualitas tinggi (mempunyai ketelitian tinggi). Di satu sisi, perkembangan teknologi saat ini mengarah ke arah otomatisasi, termasuk di bidang fotogrametri. Salah satu prosedur di fotogrametri, yaitu *stereo plotting*, juga mengarah ke arah otomatisasi yang unggul dalam kecepatan pemrosesan data. Hal ini makin ekstensif seiring dengan penggunaan algoritma *structure from motion* (SFM) untuk memproses data foto udara yang dipotret menggunakan wahana tidak berawak (UAV, *Unmanned Aerial Vehicle*).

Beberapa kajian tentang menurunkan data Tiga Dimensi (3D) dari foto udara di wilayah Yogyakarta dilakukan oleh beberapa peneliti (Anggraini & Harintaka, 2015; Pranadita & Harintaka, 2013; Radiastuti et al., 2016). Radiastuti et al. (2016) melakukan kajian ketelitian posisi hasil *stereo plotting* interaktif dan otomatis pada foto udara hasil pemotretan dengan wahana UAV. Hasil kajian menunjukkan *stereo plotting* interaktif memiliki ketelitian horizontal dan vertikal yang memenuhi standar ketelitian peta dasar skala 1 : 2.500 kelas 2, sedangkan hasil *stereo plotting* otomatis untuk ketelitian horizontal memenuhi standar ketelitian peta dasar skala 1 : 2.500 kelas 3 dan untuk ketelitian vertikal memenuhi skala 1 : 5.000 kelas 3. Untuk proses *stereo plotting* interaktif menggunakan perangkat lunak DAT/EM Summit Evolution dan *stereo plotting* otomatis menggunakan pendekatan SFM.

Pranadita dan Harintaka (2013) membuat DTM dengan cara *stereo plotting* interaktif dari foto udara format medium (FUFM) DigiCam dengan hasil ketelitian tinggi sekitar 87 cm. Pada penelitian tersebut, sebagai pembanding digunakan data Lidar yang memiliki ketelitian posisi yang lebih baik. Hasil tersebut konsisten dengan hasil penelitian Anggraini dan Harintaka (2015).

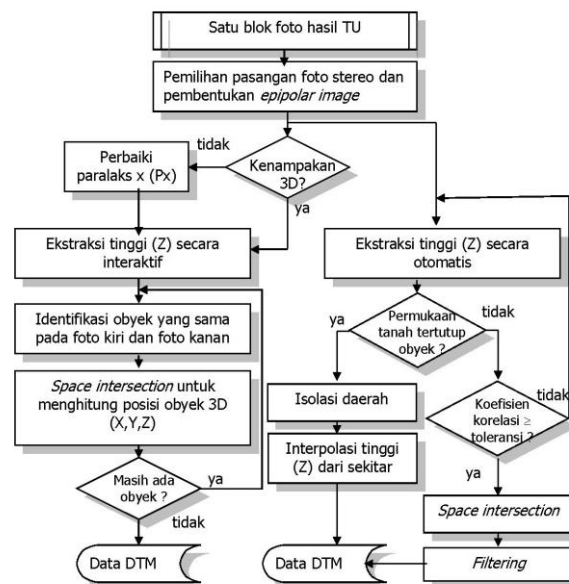
Data tinggi atau DTM dapat diturunkan dari foto stereo secara manual atau otomatis (Ackermann, 1996). Penurunan data tinggi secara manual dilakukan oleh operator dengan mendeliniasi Objek dalam ruang 3D menggunakan *plotter* analitis atau *softcopy photogrammetry*.

Penurunan data tinggi secara otomatis dilakukan dengan mengidentifikasi pasangan Objek yang sama secara otomatis menggunakan teknik pencocokan citra (*image matching*). Tiga metode

pencocokan citra yang cukup dikenal adalah (Schenk, 1996; Schenk, 1999) pencocokan berdasar area (*area based matching*), pencocokan berdasar Objek (*feature based matching*), dan pencocokan berdasar hubungan relasional antar Objek (*relational or symbolic based matching*). Dari ketiga metode pencocokan citra tersebut, metode pencocokan berdasarkan area yang dipergunakan pada penelitian ini.

METODE

Secara garis besar, penelitian dilakukan dalam 6 tahap, yaitu: pemilihan pasangan-pasangan foto stereo dari hasil triangulasi udara (TU), ekstraksi tinggi (Z) atau *stereo plotting* secara interaktif, ekstraksi tinggi (Z) atau *stereo plotting* secara otomatis, *space intersection*, *filtering* dan evaluasi hasil (**Gambar 1**). Pada **Gambar 1** tersebut, kunci utama pada ekstraksi tinggi ini adalah *stereo matching* untuk memastikan model 3D dapat terbentuk dengan sempurna dengan metode pencocokan area.



Gambar 1. Prosedur penurunan data DTM dari foto stereo.

Data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari satu blok foto udara hasil pemotretan udara menggunakan kamera DSLR Nikon D2x di wilayah perbukitan utara Gunung Kidul dan perbatasan Kabupaten Klaten, 35 Titik Kontrol dan Titik Cek, dan hasil kalibrasi kamera. Sesuai dengan yang dinyatakan oleh Warner et al. (1996) pada penelitian ini digunakan lensa fix dengan panjang fokus 24 mm dengan tinggi terbang 1000 m, sehingga diperoleh GSD (*ground sampling distance*) sebesar 20 cm. Adapun perangkat lunak yang digunakan terdiri dari: perangkat lunak untuk pemrograman, *softcopy photogrammetry system*, kacamata 3D, dan perangkat lunak CAD.

Kamera yang digunakan termasuk dalam jenis kamera dengan lensa non metrik. Lensa non metrik adalah lensa yang tidak didesain untuk keperluan pemetaan teliti, nilai instrinsik (yang terdiri atas panjang fokus, titik pusat proyeksi, dan nilai distorsi) yang belum diketahui atau dikalibrasi, serta nilai instrinsik tersebut tidak stabil (Graham & Koh, 2002; Luhmann et al., 2011; Warner et al., 1996).

Prinsip utama metode pencocokan berdasarkan area adalah mengenali kesamaan derajat kecerahan sebuah piksel yang terdapat pada 2 foto. Secara operasional terdapat 2 teknik pencocokan citra berdasarkan area, yaitu korelasi silang (*cross-correlation*) dan korelasi kuadrat terkecil (*least squares correlation*). Metode pencocokan berdasarkan area menggunakan jendela korelasi (*correlation window*). Jendela korelasi berupa matriks piksel dengan ukuran ganjil, antara lain: 3x3, 5x5, dan 7x7.

Prinsip metode pencocokan korelasi silang adalah mencari pasangan piksel yang sama pada foto referensi dengan foto target. Pada foto referensi ditentukan jendela sasaran yang terdapat piksel yang akan dicari pasangannya pada foto target. Pada foto target ditentukan daerah selidik yang mempunyai ukuran lebih besar daripada daerah sasaran. Pada daerah sasaran dibentuk jendela sub selidik dengan ukuran yang sama dengan jendela sasaran. Jendela sub selidik ini bergerak sepanjang baris dan kolom di daerah selidik. Pada setiap posisi pergerakan jendela sub selidik dihitung nilai korelasi (ρ) antara jendela sasaran dengan jendela sub selidik.

Piksel dengan nilai korelasi (ρ) tertinggi merupakan piksel yang bersesuaian pada pasangan foto tersebut. Nilai ρ berkisar antara -1 sampai dengan 1. Nilai 1 menunjukkan korelasi yang sempurna (*perfect match*), nilai 0 menunjukkan total *miss match* (tidak terdapat korelasi), serta nilai -1 menunjukkan adanya korelasi yang berkebalikan atau berlawanan (Schenk, 1999). Bentuk Persamaan korelasi silang disajikan pada **Persamaan 1** sebagai berikut:

$$\rho = \frac{\sum_{i,j} [g_1(u_1, v_1) - \bar{g}_1][g_2(u_2, v_2) - \bar{g}_2]}{\sqrt{\sum_{i,j} [g_1(u_1, v_1) - \bar{g}_1]^2 [g_2(u_2, v_2) - \bar{g}_2]^2}} \dots\dots\dots (1)$$

dengan $\bar{g}_1 = \frac{1}{n} \sum_{i,j} g_1(u_1, v_1)$ dan $\bar{g}_2 = \frac{1}{n} \sum_{i,j} g_2(u_2, v_2)$

dimana:

- ρ : koefisien korelasi
- $g(u,v)$: nilai piksel pada posisi (u,v)
- u_1, v_1 : posisi piksel pada foto referensi
- u_2, v_2 : posisi piksel pada foto target
- n : jumlah piksel dalam satu jendela

Penggunaan metode korelasi silang mensyaratkan diketahuinya posisi kedua jendela

korelasi dan memiliki kekontrasan yang baik. Jika kedua jendela pada pasangan foto memiliki derajat kecerahan yang homogen maka nilai ρ mendekati nol atau korelasi akan gagal.

Dibandingkan dengan foto yang belum diproses dengan triangulasi udara (TU), maka foto yang telah diproses TU akan memiliki nilai EOP (*exterior orientation parameter*), dan secara teoritis seharusnya dapat menghasilkan nilai korelasi yang baik. Pada penelitian ini hasil TU memiliki ketelitian yang baik, ini diindikasikan dengan *sigma naut* dibawah 1 piksel, rerata residu posisi planimetrik *tie point* sebesar 15 mm, dan posisi tinggi 40 mm. Foto yang telah memiliki nilai EOP maka dapat dibuat geometri *epipolar* untuk setiap pasangan foto stereo.

Pada penelitian ini digunakan kamera jenis non metrik yang belum terbebas sepenuhnya dari efek distorsi lensa, sehingga dalam pembentukan *epipolar image* dapat terjadi model 3D yang tidak sempurna. Untuk mengatasi hal tersebut dapat dilakukan pengaturan orientasi relatif lagi sehingga terbentuk model 3D yang baik.

Untuk meningkatkan hasil korelasi silang, dengan menggunakan nilai EOP tersebut dilakukan normalisasi pasangan foto stereo. Pada geometri normalisasi foto, proses pencarian pasangan titik/objek secara otomatis dengan teknik korelasi silang seharusnya berlangsung cepat dengan hasil yang akurat. Selain berdasarkan nilai kecerahan piksel, pada proses ini juga dikontrol oleh geometri pasangan foto tersebut.

Jika proses korelasi telah menghasilkan pasangan titik atau objek yang sama, dengan indikator nilai korelasi yang mendekati nilai 1, maka dengan hitungan *space intersection* dapat dihitung posisi koordinat tanah dari titik/objek tersebut. Prinsipnya persamaan *space intersection* diilustrasikan pada **Gambar 2**, yaitu melakukan transformasi dari sistem koordinat foto ke sistem koordinat tanah/peta, sehingga persamaannya dapat dituliskan sebagai (Eisenbeiß, 2009; Linder, 2006; Luhmann et al., 2011):

$$\begin{pmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{pmatrix}_{Tanah} = \begin{pmatrix} X_o \\ Y_o \\ Z_o \end{pmatrix} + \lambda R \begin{pmatrix} x_p \\ y_p \\ -f \end{pmatrix}_{Foto} \dots\dots\dots (2)$$

Pada proses *stereo plotting* untuk menghitung posisi 3D suatu objek dalam sistem koordinat tanah, baik secara otomatis atau interaktif, identifikasi objek pada foto dilakukan pada foto stereo, sehingga **Persamaan 2** berlaku untuk foto kiri dan foto kanan, sehingga dapat ditulis sebagai (Habib, 1997):

$$\begin{pmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{pmatrix}_{Tanah} = \begin{pmatrix} X'_o \\ Y'_o \\ Z'_o \end{pmatrix} + \lambda' \cdot R' \cdot \begin{pmatrix} x'_p \\ y'_p \\ -f \end{pmatrix}_{Foto} = \begin{pmatrix} X''_o \\ Y''_o \\ Z''_o \end{pmatrix} + \lambda'' \cdot R'' \cdot \begin{pmatrix} x''_p \\ y''_p \\ -f \end{pmatrix}_{Foto} \quad (3)$$

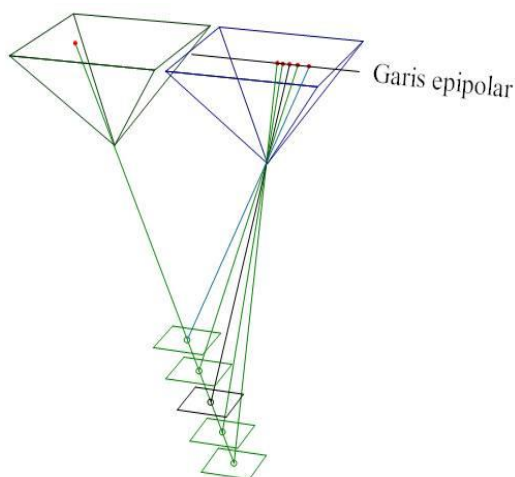
dimana:

- X'_o, Y'_o, Z'_o : posisi pusat proyeksi foto kiri
- X''_o, Y''_o, Z''_o : posisi pusat proyeksi foto kanan
- x'_p, y'_p : absis dan ordinat titik p dalam sistem koordinat foto kiri
- x''_p, y''_p : absis dan ordinat titik p dalam sistem koordinat foto kanan
- R', R'' : matriks rotasi untuk foto kiri dan foto kanan
- λ', λ'' : faktor skala foto kiri dan kanan

Dari **Persamaan 3**, perbedaan koordinat pada 2 persamaan tersebut dipergunakan untuk menghitung faktor skala pada foto kiri (λ') dan foto kanan (λ''). Jika $bx = (X''_o - X'_o)$ dan $by = (Y''_o - Y'_o)$, maka (Konecny, 2014):

$$\lambda' = \frac{bx \cdot R'' \cdot y''_p - by \cdot R'' \cdot x''_p}{(R' \cdot x'_p) \cdot (R'' \cdot y''_p) - (R' \cdot y'_p) \cdot (R'' \cdot x''_p)} \dots\dots\dots (4)$$

$$\lambda'' = \frac{by \cdot R' \cdot x'_p - bx \cdot R' \cdot y'_p}{(R' \cdot y'_p) \cdot (R'' \cdot x''_p) - (R' \cdot x'_p) \cdot (R'' \cdot y''_p)} \dots\dots\dots (5)$$



Sumber: Tempfli, (2001)

Gambar 2. Ilustrasi *space intersection* pada proses *stereomatching* untuk ekstraksi data tinggi.

Pada **Gambar 2** disajikan ilustrasi geometri *space intersection* pada proses *stereomatching* untuk menghasilkan data tinggi pada pasangan foto stereo. Jika pasangan titik/Objek tersebut tidak tepat (*match*) maka data tinggi yang dihasilkan merupakan data tinggi semu (tinggi tidak sebenarnya). Titik tinggi semu tersebut diindikasikan dengan posisinya yang "melayang" atau "menembus" permukaan tanah, yang seharusnya "menempel" di permukaan tanah.

Proses ekstraksi data tinggi secara otomatis dengan menggunakan metode korelasi silang menghasilkan data tinggi permukaan Objek, bukan tinggi permukaan tanah. Data tinggi

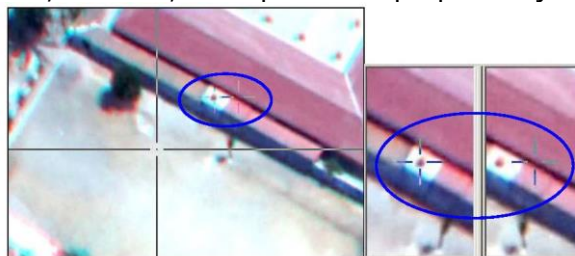
permukaan ini dikenal sebagai DSM (*Digital Surface Model*). Untuk melakukan konversi dari DSM menjadi DTM dapat ditempuh dengan berbagai cara, antara lain dengan *filtering* atau dengan isolasi daerah yang tertutup Objek (misal bangunan, vegetasi).

HASIL DAN PEMBAHASAN

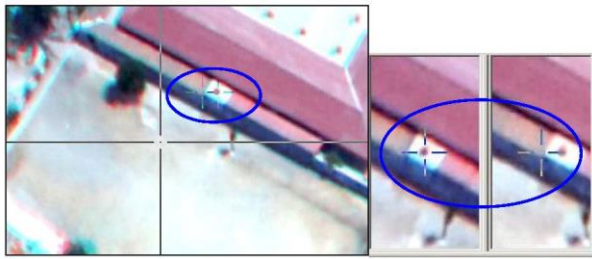
Ekstraksi tinggi (Z) secara interaktif

Cara menurunkan data 3D secara interaktif adalah operator mendigit secara langsung setiap Objek yang nampak secara 3D pada *epipolar image*. Jika secara visual telah diperoleh kenampakan 3D yang sempurna, dengan indikator *floating mark* foto kiri dan kanan telah berimpit dan 'menempel' pada permukaan tanah, maka proses digitasi objek secara langsung dapat dilakukan. Sebaliknya, jika dijumpai Objek yang sama di foto kiri dan kanan (misal jalan, rumah) tidak berimpit maka kenampakan 3D tidak akan diperoleh. Hal ini mengindikasikan masih adanya paralaks-x sehingga perlu dikoreksi. Pada FUFK yang menggunakan kamera non metrik, pada saat pembentukan model stereo seringkali dalam 1 model tidak akan terjadi kenampakan stereo yang sempurna, untuk mengatasi hal ini perlu dilakukan pengaturan paralaks setiap diketemukan kenampakan objek yang belum stereo.

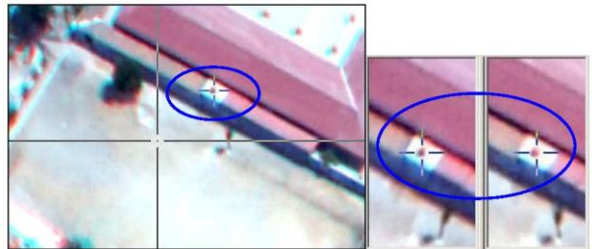
Pada model foto stereo, *stereo plotting* secara interaktif dapat dilakukan jika dipenuhi persyaratan: sudah tidak terdapat paralaks y (P_y) dan paralaks x (P_x). Jika masih terdapat P_y maka model tersebut belum stereo. P_y juga mengindikasikan akurasi hitungan TU. Jika ketelitian hitungan TU sangat tinggi, nilai P_y sama atau sangat mendekati nol. P_x merupakan fungsi tinggi objek. Pada saat *stereo plotting*, untuk mendapatkan posisi X,Y,Z yang benar maka kursor foto kiri dan foto kanan harus berimpit pada satu titik objek yang sama. Jika kursor foto kiri dan foto kanan belum berimpit maka yang diperoleh adalah tinggi di atas Objek. Sebaliknya, jika kursor belum berimpit dan berkebalikan (*reversal*) maka yang diperoleh adalah tinggi di bawah Objek. **Gambar 3**, **Gambar 4**, dan **Gambar 5** berturut-turut menyajikan kondisi kursor stereo yang berada di atas, di bawah, dan tepat menempel pada Objek.



Gambar 3. Kondisi kursor stereo yang berada di atas Objek.

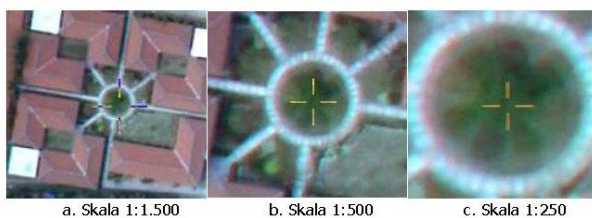


Gambar 4. Kondisi kursor stereo yang berada di bawah Objek.



Gambar 5. Kondisi kursor stereo yang tepat menempel pada Objek.

Pada saat ekstraksi posisi Objek dengan cara *stereo plotting* interaktif, selain pengaturan paralaks juga perlu diperhatikan faktor perbesaran (*zooming*). Dalam satu blok pemotretan, rata-rata rasio H/f adalah 40.000, jika *stereo plotting* dilakukan pada skala tersebut maka posisi Objek yang terekstrak tidak detail dan banyak posisi Objek yang tidak teridentifikasi. Sebaliknya jika faktor perbesaran terlalu besar, misal skala 1:250 seperti disajikan pada Gambar 6.c, maka tampilan foto menjadi kabur (*blur*). Pada **Gambar 6** disajikan contoh tampilan Objek yang sama pada 3 faktor skala, 1:1.500, 1:500, dan 1:250. Berdasarkan berbagai simulasi, perbesaran optimal pada penelitian ini adalah pada skala 1:500.



Gambar 6. Tampilan foto pada berbagai perbesaran. (a) 320 x 320 piksel. (b) 105 x 105 piksel. (c) 55 x 55 piksel.

Kualitas ketelitian posisi tinggi yang dihasilkan dari proses *stereo plotting* secara interaktif pada FUFK dipengaruhi oleh beberapa faktor. Beberapa faktor yang cukup signifikan adalah: kecermatan dan pengalaman operator, faktor perbesaran Objek pada *epipolar image* saat digitasi langsung, kondisi *floating mark/floating cursor*, dan strategi pemilihan Objek yang didigit.

Kecermatan dan pengalaman operator.

Dalam proses pemetaan secara fotogrametri, tahap *stereo plotting* adalah tahap yang memerlukan waktu paling lama dibandingkan dengan tahap lainnya, sehingga dikembangkan prosedur otomatisasi untuk mereduksi waktu proses secara drastis. Hal ini didukung fakta bahwa dalam satu proyek dapat terdiri atas puluhan atau bahkan ratusan model. Pada *stereo plotting* secara interaktif, kecermatan dan pengalaman operator menentukan kualitas dan kecepatan proses. Pada saat berkerja, operator harus memilih Objek yang representatif dan melihat Objek dalam kondisi tiga dimensi dalam waktu yang lama.

Faktor pebesaran Objek pada epipolar image saat digitasi langsung

Untuk kecepatan pemrosesan, umumnya file foto disajikan dalam mode *image pyramid*. Hal ini dilakukan karena jumlah sel CCD/CMOS yang diimplementasikan pada kamera DSLR dan resolusi radiometrik sangat tinggi (24 bit) maka satu file foto berukuran sekitar 7 MB pada mode terkompres dan sekitar 70 MB pada mode tidak terkompres. Pada mode *image pyramid*, operasi awal dilakukan pada tingkat terendah dan bila dilakukan perbesaran (*zooming*) maka dapat dilakukan sampai tingkat tertinggi (1:1). Teknik ini mengambil keuntungan dari proses operasi yang cepat dengan tetap mempertahankan ketelitian data asal. Perlu diingat, jika perbesaran melebihi 1:1 maka secara teknis piksel akan diduplikasi, sehingga secara visual foto akan terlihat kabur (*blur*).

Pada cara *stereo plotting* secara otomatis, pencocokan Objek yang sama pada foto kiri dan foto kanan dimulai pada tingkat *image pyramid* paling rendah. Jika nilai korelasinya sama atau lebih dari nilai ambang yang ditentukan maka dilanjutkan ke tingkat yang lebih tinggi. Proses pencocokan Objek dilanjutkan sampai pada tingkat *image pyramid* tertinggi.

Kondisi floating mark/floating cursor

Syarat utama saat melakukan *stereo plotting* secara interaktif adalah kondisi *floating mark* foto kiri dan kanan harus berimpit pada saat mendigit posisi Objek. Secara stereoskopis, kondisi ini menunjukkan kedua *floating mark* tepat menempel di Objek, tidak berada di bawah atau di atas Objek yang didigit, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 5.

Strategi pemilihan Objek yang didigit (sampling)

Pada saat melakukan *stereo plotting* secara interaktif, harus diperhatikan skala produk yang akan dibuat dan kondisi permukaan tanah. Misalkan akan dibuat peta skala 1:5.000 maka

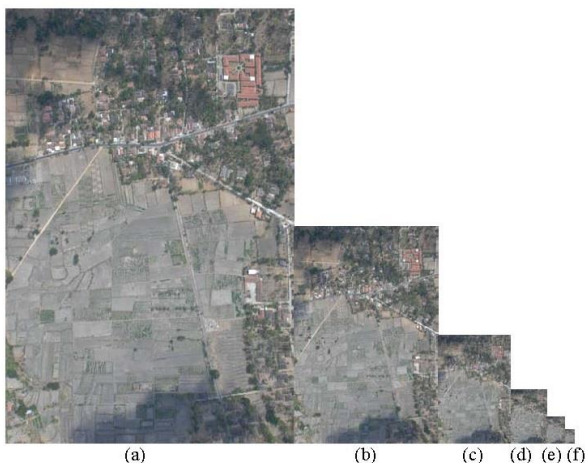
interval konturnya sekitar 2,5 meter maka Objek yang didigit harus memiliki perbedaan tinggi minimal 2,5 meter. Jika kondisi permukaan tanah datar maka jarak antar Objek yang didigit dapat jauh, tetapi jika permukaan tanah tidak datar maka harus lebih rapat (representatif).

Pada cara *stereo plotting* secara otomatis, strategi pemilihan Objek yang akan didigit tidak dapat dilakukan secara selektif. Hal yang umum dilakukan adalah mengatur interval antar titik *sampling* dengan tanpa memperhitungkan kondisi permukaan tanah, misalnya: daerah datar atau tidak datar, tertutup Objek atau terbuka.

Ekstraksi tinggi (Z) secara otomatis

Cara ekstraksi data DTM secara otomatis adalah melakukan *stereomatching* menggunakan algoritma *cross-correlation* untuk mendeteksi Objek yang sama pada pasangan foto stereo. Algoritma *cross-correlation* mengidentifikasi kemiripan Objek berdasarkan kesamaan nilai kecerahan piksel pada pasangan foto stereo. Indikator pasangan piksel dinyatakan sama (*match*) adalah jika nilai korelasinya (ρ) lebih besar dari nilai toleransi, dalam hal ini 0,8.

Untuk mempercepat proses komputasi saat *stereomatching* dengan tetap mempertahankan akurasi hasil, saat melakukan *cross-correlation* dapat digunakan *image pyramid* (Heno & Egels, 2002). Pada dasarnya *image pyramid* adalah menyimpan data raster dalam beberapa tingkat. Tingkat 1 adalah citra asli dengan perbandingan 1:1. Tingkat 2 adalah pengecilan 0,5 dari citra tingkat 1. Demikian seterusnya untuk tingkat selanjutnya.



Gambar 7. Enam tingkat image pyramid. (a) tingkat 1 (b) tingkat 2. (c) tingkat 3. (d) tingkat 4. (e) tingkat 5. (f) tingkat 6.

Pada penelitian ini, *image pyramid* yang digunakan sampai tingkat 6 (**Gambar 7**). Secara teoritis, saat pertama kali melakukan *cross correlation* diterapkan pada tingkat terendah, kemudian diulang sampai pada tingkat tertinggi

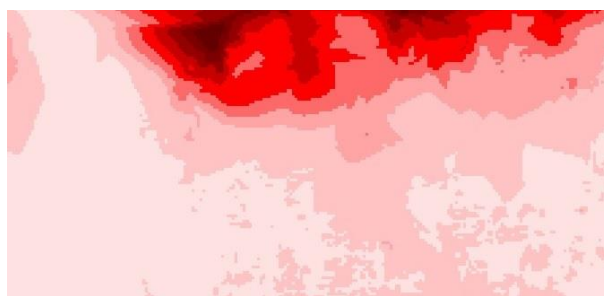
(tingkat 1:1) (Paparoditis & Dissard, 2002). Tetapi, jika jumlah kandidat pasangan Objek pada foto stereo cukup banyak, proses *cross-correlation* dapat langsung diterapkan pada tingkat tertinggi. Cara ini akan sangat efektif jika foto stereo telah dibuat sebagai *epipolar image* dengan akurasi TU yang sangat baik.

Jika permukaan tanah tertutup Objek, misal pepohonan atau bangunan, maka pasangan piksel yang terdeteksi adalah nilai piksel Objek tersebut, bukan nilai piksel permukaan tanah, sehingga yang diperoleh bukan data DTM atau DEM, tetapi DSM (*digital surface model*). Untuk mengatasi hal ini, daerah yang tertutup Objek dengan kerapatan tinggi dilakukan isolasi. Untuk menentukan nilai tinggi di daerah yang diisolasi tersebut dilakukan interpolasi terhadap nilai tinggi di sekitarnya. Meskipun demikian, dapat dijumpai nilai tinggi yang tidak wajar, misal nilai tinggi yang sangat berbeda dengan nilai sekitarnya. Dari berbagai percobaan, untuk mengatasinya diperlukan *filtering* pada data DTM.

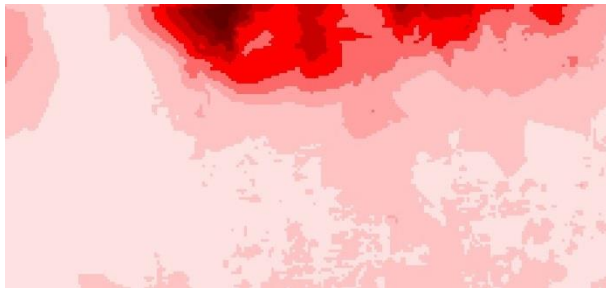
Kualitas ketelitian posisi tinggi yang dihasilkan dari proses *stereo plotting* secara otomatis pada FUFK dipengaruhi oleh beberapa faktor yang dinyatakan oleh (Harintaka, 2010). Beberapa faktor yang cukup signifikan adalah sebagai berikut: nilai dan kualitas IOP (*interior orientation parameter*), nilai dan kualitas EOP, konfigurasi foto, daerah yang tertutup Objek, pertampalan yang lebar antar jalur terbang, pengabaian kondisi permukaan tanah, ketidakteraturan jalur terbang akibat *crab*, dan variasi tinggi terbang.

Perbandingan cara interaktif dengan cara otomatis

Hasil *stereo plotting* secara interaktif dan otomatis disajikan pada **Gambar 8** dan **Gambar 9**. Adapun akurasi posisi tinggi yang dihasilkan untuk kedua cara tersebut disajikan pada Tabel 1. Pada **Gambar 9** hasil *stereo plotting* otomatis sudah dilakukan editing terlebih dahulu untuk memastikan data tinggi (Z) yang diekstrak sudah merepresentasikan *terrain*, bukan *surface*.



Gambar 8. Hasil *stereo plotting* secara interaktif.



Gambar 9. Hasil *stereo plotting* secara otomatis.

Data DTM yang dihasilkan antara teknik *stereo plotting* interaktif dan otomatis menunjukkan hasil yang mirip, meski tidak identik. Hasil ini sesuai dengan hasil uji akurasi posisi tinggi untuk 3 lokasi sebagaimana disajikan pada **Tabel 1**. Perbedaan yang cukup terlihat umumnya terletak di daerah campuran dengan tajuk pohon rapat (lokasi 2 dengan 71 titik uji).

Tabel 1. Rerata akurasi ekstraksi tinggi secara interaktif dan otomatis.

No	Jumlah Titik Uji	Rerata akurasi Posisi Vertikal (m)	
		Interaktif	Otomatis
1	Lokasi 1 (44 titik)	1,39	1,42
2	Lokasi 2 (71 titik)	1,71	1,75
3	Lokasi 3 (60 titik)	1,34	1,36

Pada proses ekstraksi data DTM, baik dengan cara interaktif maupun otomatis, masing-masing memiliki keunggulan dan kelemahan. **Tabel 2** menyajikan perbandingan kedua metode ekstraksi tinggi tersebut. Keunggulan utama cara interaktif adalah data ketinggian yang terpercaya dan hampir tidak diperlukan editing, sedangkan cara otomatis adalah kecepatan pemrosesan data.

Hasil uji ketelitian diperoleh akurasi horizontal sebesar 1,5 m dan vertikal sebesar 1,7 m. Hasil ini cukup bagus mengingat hitungan perbandingan antara tinggi terbang dengan fokus kamera (H/f) menghasilkan angka 39.000 – 43.000. Nilai tersebut merepresentasikan pengertian skala yang sebenarnya, yaitu perbandingan ukuran Objek di permukaan bumi dengan ukuran Objek di foto.

Tabel 2. Perbandingan ekstraksi tinggi secara interaktif dan otomatis.

No	Aspek	Interaktif	Otomatis
1	Pemilihan Objek	Selektif	Berdasarkan kesamaan nilai piksel
2	Kecepatan proses	Lebih lama dan sangat tergantung kecermatan operator	Cepat dan tergantung ukuran jendela pencarian
3	Kontrol proses	Kondisi paralaks dapat dikoreksi	Nilai paralaks dihitung

4	Hasil akhir	Hampir tidak diperlukan editing	Diperlukan editing hasil, antara lain dengan <i>filtering</i>
---	-------------	---------------------------------	---

KESIMPULAN

Hasil kajian menunjukkan data DTM yang dihasilkan antara teknik *stereo plotting* interaktif dan otomatis mirip, tetapi tidak identik. Ini terjadi terutama di daerah campuran dengan tajuk pohon rapat. Keunggulan teknik *stereo plotting* interaktif adalah hasil sangat akurat dan tanpa memerlukan tahapan *editing* lagi, sedangkan teknik otomatis adalah kecepatan proses tetapi masih memerlukan tahapan *editing*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Departemen Teknik Geodesi FT-UGM yang telah memungkinkan menggunakan peralatan survei dan fasilitas laboratorium untuk melaksanakan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Ackermann, F. (1996). Techniques and Strategies for DEM Generation. In *Digital Photogrammetry: An Addendum to the Manual of Photogrammetry*. ASPRS.
- Angraini, H. N. S., & Harintaka. (2015). *Kajian Akurasi Dem Hasil Stereo plotting Interaktif Foto Udara Format Kecil*. 1–8.
- Eisenbeiß, H. (2009). *UAV Photogrammetry*. Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zurich.
- Graham, R., & Koh, A. (2002). *Digital Aerial Survey: Theory and Practice* (1 edition). Whittles Publishing.
- Habib, A. (1997). *Advanced Topics in Photogrammetry: Photogrammetric Bundle Adjustment*. Department of Geomatics Engineering, Sculich School of Engineering, University of Calgary.
- Harintaka. (2010). Permasalahan Ekstraksi Tinggi Secara Otomatis Pada Foto Udara Format Kecil Pada Daerah Campuran. *Kongres Dan PIT MAPIN Tahun 2010*. <https://mapin.wordpress.com/2010/08/09/pit-dan-kongres-mapin-th-2010/>
- Heno, R., & Egels, Y. (2002). Digital Photogrammetric Workstations. In Y. Egels & M. Kasser (Eds.), *Digital Photogrammetry* (1st ed.). Taylor & Francis.
- Konecny, G. (2014). *Geoinformation Remote Sensing, Photogrammetry, and Geographic Information Systems* (2nd ed.). Taylor & Francis Group.
- Linder, W. (2006). *Digital Photogrammetry: A Practical Course* (2nd ed.). Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., & Harley, I. (2011). *Close Range Photogrammetry*. Whittles Publishing.
- Paparoditis, N., & Dissard, O. (2002). 3D Data Acquisition From Visible Images. In *Digital Photogrammetry* (1st ed., pp. 168–220).
- Pranadita, S., & Harintaka. (2013). Pembuatan Model Elevasi Digital dari Stereo plotting Interaktif Foto

- Udara Format Sedang dengan Kamera Digicam. *Jurnal Ilmiah Geomatika*, 19(2), 101–105. <http://jurnal.big.go.id/index.php/GM/issue/view/6>
- Radiastuti, A. R., Harintaka, & Djurdjani. (2016). Ketelitian Posisi Hasil Stereo plotting Interaktif dan Otomatis Pada Foto Udara Hasil Pemotretan dengan Wahana UAV. *Forum Ilmiah Tahunan Ikatan Surveyor Indonesia Dan CGISE 2016*, 378–383. <https://www.isi.or.id/papermakalah/>
- Schenk, T. (1996). Automatic Generation of DEM. In C. Greve (Ed.), *Digital Photogrammetry: An Addendum to the Manual of Photogrammetry* (4th ed., p. 260). ASPRS.
- Schenk, T. (1999). *Digital Photogrammetry: Vol. I: Background, Fundamentals, Automatic Orientation Producers*. TerraScience.
- Tempfli, K. (2001). *Digital Terrain Relief Modelling*. ITC.
- Warner, W. S., Graham, R. W., & Read, R. E. (1996). *Small Format Aerial Photography*. Whittles Publishing.