

APLIKASI CLOSE RANGE PHOTOGRAMMETRY UNTUK PERHITUNGAN VOLUME OBJEK

Nama Mahasiswa : Sarkawi Jaya Harahap
NRP : 3511100004
Jurusan : Teknik Geomatika FTSP-ITS
Dosen Pembimbing : Hedi Hapsari Handayani, S.T, M.Sc.

Abstrak

Perhitungan volume merupakan salah satu aplikasi surveying yang digunakan untuk keperluan teknik, desain konstruksi, kuantitas timbunan dan kuantitas penggalian material objek. Close Range Photogrammetry (CRP) adalah teknik fotogrametri dengan menggunakan prinsip kesejajaran atau kolinearitas, namun dalam pengambilan data dilakukan pada jarak dekat yakni 100 mm sampai dengan 300 m. Close Range Photogrammetry dapat diaplikasikan berbagai ilmu, salah satunya adalah perhitungan volume suatu objek yang memiliki bentuk 3D. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui bagaimana cara melakukan perhitungan volume suatu objek dengan menggunakan metode CRP. Objek yang digunakan memiliki bentuk beraturan, yaitu memiliki bentuk kotak atau balok. Bentuk objek tersebut memiliki ukuran kecil sehingga pengukuran volume bangun ruang menggunakan alat pita ukur. Hasil perhitungan volume CRP menggunakan metode Gridding yang akan dibandingkan dengan hasil pengukuran volume bangun ruang. Kalibrasi kamera dilakukan menggunakan metode Bundle Adjustment Laboratory Calibration pada dua objek, yaitu objek grid untuk kalibrasi otomatis (image matching) dan objek kotak sebagai objek penelitian untuk kalibrasi analitik (manual). Hasil perhitungan volume dari hasil kedua kalibrasi tersebut dapat dihitung menggunakan data DEM dari hasil pembentukan objek 3D model.

Hasil kedua kalibrasi yang telah dilakukan, dapat dilihat bahwa nilai panjang fokus memiliki perbedaan yang relatif kecil sebesar 0,142 mm. Nilai koordinat pusat kamera memiliki perbedaan selisih sebesar 0,503 mm untuk sumbu x dan 0,117 mm untuk sumbu y. Selisih nilai K_1 , K_2 , dan K_3 pada kedua kalibrasi sebesar 0,0000169; 0,000 dan 0,000. Sedangkan nilai koefisien P_1 dan P_1 memiliki selisih sebesar 0,000498 ; 0,000. Perbedaan nilai kalibrasi kamera diatas dapat dipengaruhi oleh kondisi objek kalibrasi.

Volume objek kontainer berbentuk kotak jika dihitung menggunakan alat ukur pita ukur sebesar 37,76 m³. Perhitungan volume tersebut menggunakan data panjang, lebar dan tinggi. Adapun hasil volume kontainer dengan menggunakan metode CRP hasil kalibrasi otomatis adalah sebesar 38,098 m³ dengan selisih 0,887 %, sedangkan perhitungan volume hasil kalibrasi analitik sebesar 38,288 m³ dengan selisih 1,398 % terhadap hasil pita ukur. Hasil volume kalibrasi otomatis memiliki pebedaan lebih kecil dari hasil volume kalibrasi analitik. Perbedaan nilai ini dipengaruhi oleh hasil pembentukan DEM pada software yang berbeda terhadap kedua hasil kalibrasi.

Kata Kunci : *Close Range Photogrammetry, Kalibrasi Kamera, Volume, 3D Model*

APPLICATION OF CLOSE RANGE PHOTOGRAMMETRY FOR OBJECT VOLUME CALCULATION

Name : Sarkawi Jaya Harahap
NRP : 3511100004
Department : Teknik Geomatika FTSP-ITS
Supervisor : Hepi Hapsari Handayani, S.T, M.Sc.

Abstract

Volume calculation is one of the applications that are used for the purposes of surveying engineering, design, construction, quantity and quantity extracting material heap objects. Close Range Photogrammetry (CRP) is a photogrammetric techniques using the principle colinearity, but the data collection is done in close range of 100 mm up to 300 m. Close Range Photogrammetry can be applied to a variety of science, one of which is a calculation of the volume of an object that has 3D. This research was conducted to determine how to perform the calculation of the volume of an object by using CRP. The object used to have an irregular shape, which has the shape of a box or block. Shape of the object is to have a small size so that the measurement of volume bagun space using a tape measure. CRP volume calculation results using Gridding method that will be compared with the results of measurements of the volume of geometry. Camera calibration performed using methods Bundle Adjustment Calibration Laboratory at the two objects, the object grid for automatic calibration (image matching) and a box object as an object of research for analytical calibration (manual). Volume calculation results of the calibration results can be calculated using DEM data from the formation of 3D object models. Results of both the calibration has been done, it can be seen that the value of the focal length to have

a relatively small difference of 0.142 mm. Coordinate value of the center of the camera has the distinction of difference of 0.503 mm and 0.117 mm x-axis to the y-axis. Difference in value of K1, K2, and K3 on both calibration of 0.0000169; 0.000 and 0.000. While the value of the coefficient P1 and P1 have a difference of 0.000498; 0.000. Differences over the camera calibration value can be affected by the condition of the calibration object.

The volume of a box-shaped container object if it is calculated using a measuring tape measuring instrument of 37.76 m³. The volume calculation using the data length, width and height. The results of container volume by using the automatic calibration CRP result amounted to 38.098 m³ by a margin of 0.887%, while the volume calculation results of the analytical calibration of 38.288 m³ by a margin of 1.398% on the results of the measuring tape. Automatic calibration results have perbedaan volume smaller than the volume of the calibration of analytical results. The difference in value is influenced by the results of the DEM formation on different software on both the results of the calibration

Key Word : Close Range Photogrammetry, Camera Calibration, Volume, 3D Model

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Fotogrametri Jarak Dekat

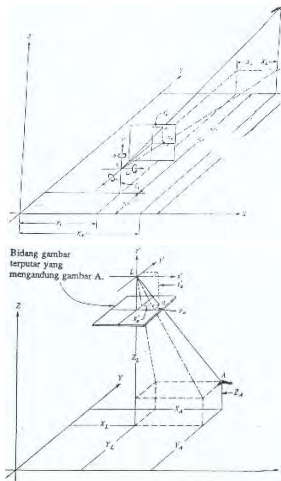
Fotogrametri merupakan seni, ilmu dan teknologi untuk memperoleh informasi terpercaya tentang objek fisik dan lingkungan melalui proses perekaman, pengukuran, dan interpretasi gambaran fotofrafi dan pola radiasi tenaga elektromagnetik yang terekam (Wolf, 2000). Fotogrametri mencakup dua bidang yang berbeda, yaitu fotogrametri metrik dan fotogrametri interpretatif. Fotogrametri metrik terdiri dari pengukuran cermat berdasarkan foto dan sumber informasi lain yang pada umumnya digunakan untuk menentukan lokasi relatif titik-titik. Pada umumnya menggunakan foto udara (dibuat dari wahana udara), tetapi juga digunakan foto terestrial (dibuat dengan kamera di muka Bumi). Dengan demikian aplikasi ini dapat digunakan untuk perhitungan ukuran jarak, sudut, luas, volume, elevasi dan bentuk objek. Sedangkan Fotogrametri interpretatif merupakan cabang ilmu interpretasi foto udara dan penginderaan jauh. Fotogrametri interpretatif ini tidak hanya meliputi analisis foto tetapi juga penggunaan data yang dipeloleh dari berbagai jenis piranti penginderaan jauh seperti multispektral, sensor inframerah dan lain-lain.

Fotogrametri Jarak Dekat merupakan suatu cabang penting ilmu fotogrametri dengan kamera berada di permukaan bumi yang mempunyai jarak antara kamera dengan objek sampai dengan 300 meter. Kamera Foto ini mudah dicapai sehingga dapat dilakukan pengukuran langsung untuk memperoleh posisi pemotretan (wolf, 2000). Kamera dan prosedur analisis Fotogrametri Jarak Dekat ini dimulai pada akhir abad ke 19 oleh seorang kolonel Prancis, Laussedat (Atkinson, 1980). Teknologi Sensor pada kamera merupakan komponen penting dalam

perkembangan teknologi Fotogrametri Jarak Dekat yang dapat digunakan untuk dalam aplikasi desain industri, produksi dan kontrol kualitas, serta keperluan biomedis (Maas, 2008).

2.1.1 Prinsip Dasar Fotogrametri Jarak Dekat

Prinsip Dasar dalam penyelesaian permasalahan Fotogrametri Jarak Dekat adalah dengan menerapkan prinsip persamaan kondisi kolinearitas. Kolinearitas merupakan kondisi dimana stasiun pemotretan foto, titik objek, dan gambar foto, semua terletak pada satu garis lurus. Perbedaan kondisi kolinearitas antara foto udara dengan foto terestrial adalah berada pada sumbu foto.



(a)

(b)

Gambar 2.1 Kondisi Kolinearis : a) Kondisi Kolinearis pada Foto Teristris, b) Kondisi Kolinearis pada Foto Udara

Jika gambar objek terestrial dan ruang objek diketahui seperti gambar 2.1 (a), dan jika sudut rotasi omega, phi dan kappa digambarkan dengan rotasi searah jarum jam pada sumbu x, y, dan z maka hanya ada sedikit perbedaan anatar kolinearis foto udara dengan foto terestrial. Begitu juga sebaliknya yang disajikan pada gambar 2.1 (b), sumbu ruang gambar foto udara yang ditransformasikan yaitu $x'.y'$, dan z ; masing-masing sejajar X,Y dan Z . Tetapi dalam hal sumbu terestrial, sumbu x', y' dan z' masing-masing sejajar dengan Objek X, Z dan Y . Adapun persamaan kolinearitas terestrial adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} x_a - x_o &= -f \frac{m_{11}(X_A - X_L) + m_{12}(Z_A - Z_L) + m_{13}(Y_A - Y_L)}{m_{31}(X_A - X_L) + m_{32}(Z_A - Z_L) + m_{33}(Y_A - Y_L)} \\ y_a - y_o &= -f \frac{m_{21}(X_A - X_L) + m_{22}(Z_A - Z_L) + m_{23}(Y_A - Y_L)}{m_{31}(X_A - X_L) + m_{32}(Z_A - Z_L) + m_{33}(Y_A - Y_L)} \end{aligned} \quad (2-1)$$

Dengan x_a dan y_a merupakan koordinat titik A di foto, x_a dan y_a merupakan koordinat titik utama, koordinat $X_A Y_A$ dan Z_A merupakan koordinat titik A pada objek, $X_L Y_L$ dan Z_L merupakan koordinat pusat pemotretan, f merupakan panjang fokus kamera, dan m merupakan elemen matriks rotasi. Elemen Matriks Rotasi menggunakan tiga rotasi bertingkat : $M\omega$ rotasi terhadap sumbu X , $M\phi$ adalah rotasi sumbu Y , dan Mk adalah rotasi sumbu Z (Mikhail, dkk, 2001). Elemen matriks rotasi dapat dilihat pada persamaan 2-2 dan matriks keseluruhan dapat dilihat pada persamaan 2-3 berikut :

$$\begin{aligned}
M_\omega &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & \sin \omega \\ 0 & -\sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix} \\
M_\varphi &= \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & -\sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} \\
M_k &= \begin{bmatrix} \cos k & \sin k & 0 \\ -\sin k & \cos k & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
\end{aligned}
\tag{2-2}$$

$$M = M_k M_\varphi M_\omega$$

$$\begin{aligned}
M &= \\
&\begin{bmatrix} \cos \varphi \cos k & \cos \omega \sin k + \sin \omega \sin \varphi \cos k & \sin \omega \sin k - \cos \omega \sin \varphi \cos k \\ -\cos \varphi \sin k & \cos \omega \cos k - \sin \omega \sin \varphi \sin k & \sin \omega \cos k + \cos \omega \sin \varphi \sin k \\ \sin \varphi & -\sin \omega \cos \varphi & \cos \omega \cos \varphi \end{bmatrix}
\end{aligned}
\tag{2-3}$$

2.1.2 Reseksi Spasial

Reseksi spasial merupakan suatu metode yang ditunjukkan untuk mencari posisi dan orientasi kamera. Metode reseksi spasial ini menggunakan prinsip kolinearitas yang akan menghasilkan enam parameter orientasi luar (*exterior orientation parameters*) yaitu $X_L, Y_L, Z_L, \omega, \varphi$ dan k . Posisi dan orientasi kamera diperlukan untuk penentuan posisi titik objek relatif terhadap sistem koordinat kamera.

Proses reseksi ruang menggunakan persamaan kolinaritas. Dalam melakukan reseksi ruang diperlukan minimal 6 persamaan dengan tiga titik kontrol tiga dimensi, pada tiap 1 titik kontrol mendapatkan 2 persamaan, sesuai dengan persamaan (2-1) diselesaikan secara serentak untuk 6 parameter orientasi luar. Jika titik kontrol lebih dari 3, maka dilakukan dengan cara hitung persataan kuadrat terkecil. Bentuk linear persamaan

reseksi spasial dapat dilihat persamaan (2-4) berikut ini:

$$\begin{aligned} V_{xa} &= b_{11}d\omega + b_{12}d\varphi + b_{12}dk - b_{14}dX_L - b_{15}dY_L - b_{16}dZ_L + J \\ V_{ya} &= b_{21}d\omega + b_{22}d\varphi + b_{23}dk - b_{24}dX_L - b_{25}dY_L - b_{26}dZ_L + K \end{aligned} \quad (2-4)$$

V_{xa} dan V_{xb} adalah residu yang dapat diselesaikan dengan persamaan matrik, $d\omega$ $d\varphi$ dk dX_L dY_L dan dZ_L adalah parameter unsur orientasi luar, b adalah turunan dari parameter, J dan K adalah nilai pendekatan. Persamaan J dan K dapat diselesaikan pada persamaan (2-5) berikut :

$$\begin{aligned} J &= \frac{(qx + rf)}{q} \\ K &= \frac{(qy + sf)}{q} \\ q &= m_{31}(X_A - X_L) + m_{32}(Y_A - Y_L) + m_{33}(Z_A - Z_L) \\ r &= m_{11}(X_A - X_L) + m_{12}(Y_A - Y_L) + m_{13}(Z_A - Z_L) \\ s &= m_{21}(X_A - X_L) + m_{22}(Y_A - Y_L) + m_{23}(Z_A - Z_L) \end{aligned} \quad (2-5)$$

2.1.3 Interseksi Spasial (Intersection)

Interseksi Spasial digunakan untuk menentukan letak titik pada ruang objek (X, Y dan Z) dari dua buah foto atau lebih melalui berkas sinar yang berpotongan. Metode umum penentuan titik ini dengan perhitungan persamaan kolinearitas pada persamaan (2-1), dengan dua persamaan pada setiap titik pada satu foto. Apabila diketahui posisi kamera dan arah sumbu optiknya, maka perpotongan sinar garis dari foto 1 dan foto 2 akan dapat menentukan posisi koordinat titik objek tersebut (Wolf, 2000). Bentuk persamaan linearisasi interseksi spasial dapat dilihat pada persamaan (2-6) berikut:

$$\begin{aligned} V_{xe} &= b_{14}dX_E + b_{15}dY_E + b_{16}dZ_E + J \\ V_{ye} &= b_{24}dX_E + b_{25}dY_E + b_{26}dZ_E + K \end{aligned} \quad (2-6)$$

2.1.4 Metode Kalibrasi Kamera

Kalibrasi kamera bertujuan untuk menentukan parameter internal kamera (*Internal Orientation Parameter*) yang meliputi *principal distance* (c), titik pusat fidusial foto (x_0, y_0), distorsi lensa (K_1, K_2, K_3, P_1 , dan P_2), serta distorsi akibat perbedaan penyekalaan dan ketidak ortogonal antara sumbu X dan Y (b_1, b_2). Kalibrasi ini digunakan pada kamera jenis non-metrik, karena tidak memiliki lensa yang sempurna sehingga memiliki kesalahan dalam melakukan pemotretan. Kalibrasi kamera memiliki tiga aspek, yaitu: kalibrasi Geometrik, kualitas foto dan kalibrasi radiometrik. Kalibrasi biasanya dilakukan di laboratorium meskipun di lokasi objek pemotretan juga bisa dilakukan. Kalibrasi bisa dilakukan pada objek amat data yang diambil yang dikenal dengan *self-calibration* (Mikhail, Bethel and McGlone, 2001).

Metode kalibrasi kamera dibagi menjadi tiga metode, yaitu: metode laboratorium, metode lapangan, dan metode *Stellar*. Metode laboratorium merupakan metode yang paling sering dilakukan dalam aplikasi fotogrametri (Wolf, 2000). Adapun parameter-parameter orientasi adalah sebagai berikut :

1. Panjang Fokus Ekuivalen, Panjang Fokus yang efektif di dekat lensa kamera.
2. Panjang Fokus terkalibrasi, (sering disebut konstanta kamera), Panjang fokus yang

menghasilkan distribusi distorsi radial rata-rata secara menyeluruh.

3. Distorsi Radial (K_1, K_2, K_3). Distorsi radial adalah pergeseran linear titik foto dalam arah radial terhadap titik utama dari posisi idealnya.. Distorsi lensa biasa diekspresikan sebagai fungsi polinomial dari jarak radial (r) terhadap titik utama foto. Distorsi radial direpresantisakan dalam sebuah persamaan polinomial sebagai berikut (Wolf, 2000)

$$\delta r = K_1 r^3 + K_2 r^5 + K_3 r^7 \quad (2-7)$$

$$r^2 = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 \quad (2-8)$$

δr adalah distorsi radial, K_1, K_2 dan K_3 koefisien polinomial distorsi radial, r^2 adalah jarak radial terhadap titik utama foto, x dan y adalah posisi titik pada foto (mm), x_0 dan y_0 posisi titik utama foto (mm).

4. Distorsi tangensial (P_1, P_2). Distorsi posisi gambar dengan arah tegak lurus terhadap garis radial dari titik utama yang disebabkan oleh kesalahan centering elemen-elemen lensa dalam satu gabungan lensa dimana titik pusat elemen-elemen lensa dalam gabungan lensa tidak terletak pada satu garis lurus. Pergeseran yang terjadi pada arah x dan y digambarkan dengan persamaan dibawah ini :

$$\begin{aligned} \Delta x &= P_1 [r^2 + 2(x - x_0)^2] + 2P_1(x - x_0)(y - y_0) \\ \Delta y &= P_1 [r^2 + 2(y - y_0)^2] + 2P_1(y - y_0)(x - x_0) \end{aligned} \quad (2-9)$$

Δx dan Δy adalah persamaan polinomial untuk pergeseran arah sumbu x dan sumbu y , P_1 dan P_2 adalah koefisien dari parameter

distorsi tangensial yang nilainya tergantung dari nilai panjang fokus kamera.

5. Lokasi titik utama. Koordinat titik utama yang dinyatakan terhadap x dan y sumbu fidusial.

Secara umum kalibrasi kamera bisa dilakukan tiga hal yaitu lokasi, waktu dan jenis target (Soemarto 2007 dalam Hanifa, 2007). Berdasarkan lokasi, kalibrasi kamera dapat dilakukan dengan metode *laboratory calibration* serta *on-the job calibration*. *Laboratory calibration* dapat dilakukan di Laboratorium atau terpisah dengan proses pemotretan objek. Metode yang termasuk didalamnya adalah metode *optical laboratory* dan *test range calibration*. Metode ini sesuai untuk kamera jenis metrik. Sedangkan *on-the job calibration* merupakan penentuan parameter kalibrasi lensa dan area yang dilakukan bersamaan dengan pelaksanaan pemotretan objek.

Berdasarkan waktu, metode kalibrasi jenis ini dengan analytical *plumb line* dan *stellar calibration*. Untuk kamera non-metrik, jenis kalibrasi yang dapat dilakukan adalah metode *on-the job calibration* dan *self calibration*, karena kedua metode ini dapat mengeliminasi efek dari ketidakstabilan orientasi dalam dari kamera.

Berdasarkan waktu, kalibrasi kamera dapat dilakukan sebelum, sesudah maupun sesaat pemotretan objek. Kalibrasi yang dilakukan pada saat pemotretan dikenal dengan istilah *self calibration*, yaitu pengukuran titik-titik target pengamatan digunakan sebagai data untuk

penentuan titik objek sekaligus menentukan parameter internal kamera. *Self calibration* merupakan metode yang sangat sesuai diterapkan pada kamera non-metrik, karena dapat mengeliminasi efek dari ketidakstabilan interior foto. Untuk keperluan geometrik yang cukup tinggi, penentuan parameter internal kamera atau proses kalibrasi kamera harus dilakukan pada waktu yang sedekat mungkin dengan waktu pemanfaatan kamera tersebut, atau idelanya kalibrasi dilakukan secara simultan ddengan saat pemakaian kamerapada aplikasi tertentu atau bisa disebut dengan metode *self-calibration* (Hanifa, 2007). Penyelesaian kalibrasi kamera metode *self-calibration* dapat dihitung dengan persamaan (2-10) berikut ini (Wolf, 2000) :

$$\begin{aligned} x_a &= x_0 - \bar{x}_a(k_1 r_a^2 + k_2 r_a^4 + k_3 r_a^6) - (1 + p_3^2 r_a^2) [p_1(3\bar{x}_a^2 + \bar{y}_a^2) + 2p_2 \bar{x}_a \bar{y}_a] - f^r/q \\ y_a &= y_0 - \bar{y}_a(k_1 r_a^2 + k_2 r_a^4 + k_3 r_a^6) - (1 + p_3^2 r_a^2) [2p_1 \bar{x}_a \bar{y}_a + p_2(\bar{x}_a^2 + 3\bar{y}_a^2)] - f^s/q \end{aligned} \quad (2-10)$$

x_a dan y_a adalah koordinat foto yang diukur, x_0 dan y_0 adalah koordinat pusat (*principal point*), $\bar{x}_a$ adalah selisih koordinat sumbu x foto yang diukur dengan koordinat pusat ($\bar{x}_a = x_a - x_0$), $\bar{y}_a$ adalah selisih koordinat sumbu y foto yang diukur dengan koordinat pusat ($\bar{y}_a = y_a - y_0$), r_a^2 dapat dihitung dengan menjumlahkan $\bar{x}_a$ dengan $\bar{y}_a$ ($r_a^2 = \bar{x}_a^2 + \bar{y}_a^2$), k_1 , k_2 dan k_3 adalah koefisien distorsi radial, p_1 , p_2 dan p_3 adalah koefisien distorsi tangensial, f adalah panjang fokus, r dan s dan q adalah persamaan kolinaritas pada persamaan (2-5).

2.2 Sistem Koordinat dalam Fotogrammetri

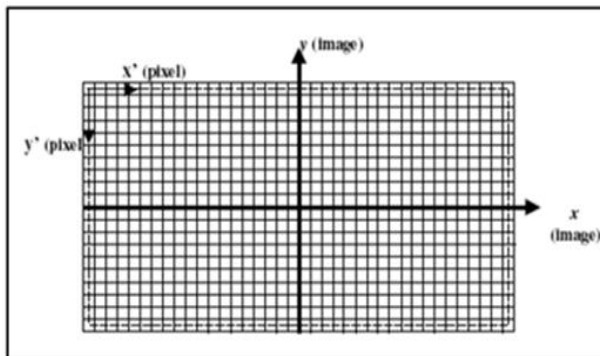
Sistem koordinat pada fotogrametri dibagi menjadi empat, yaitu sistem koordinat foto, sistem koordinat piksel, sistem koordinat kamera, dan sistem koordinat objek (Tjahjadi, 2010).

2.2.1 Sistem Koordinat Foto

Sistem koordinat foto merupakan sistem referensi internal, sehingga semua objek diatas foto dapat ditentukan posisinya terhadap sistem koordinat foto. Bidang foto sumbu x positif kearah kanan dan sumbu y positif kearah atas.

2.2.2 Sistem Koordinat Piksel

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



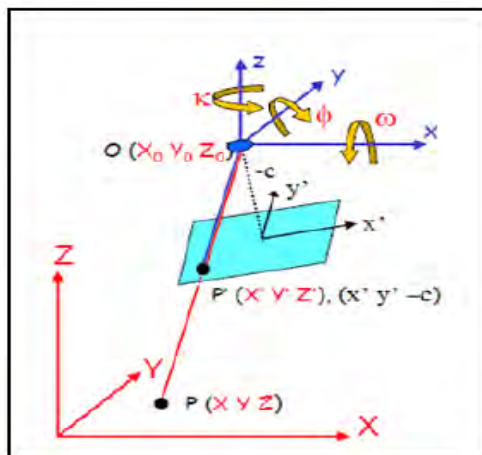
Gambar 2.2 Sistem Koordinat Foto dan Sistem Koordinat Piksel

2.2.3 Sistem Koordinat Kamera

Sistem koordinat kamera merupakan sistem koordinat 3D pada sebuah kamera dimana titik pusat berada pada *perspective center*. Sumbu xy positif koordinat ini, sejajar dan paralel dengan sumbu xy sistem koordinat objek.

2.2.4 Sistem koordinat Objek

Sistem koordinat objek merupakan sistem koordinat 3D yang digunakan sebagai representasi bentuk dan ukuran objek melalui transformasi dari sistem koordinat foto atau piksel ke sistem koordinat objek.



Gambar 2.3 Sistem Koordinat Kamera dan Sistem Koordinat Objek

2.3 Image Matching

Sejarah *image matching* atau biasa disebut *automatic stereo matching* dimulai pada tahun 50-an yang dilakukan oleh *Hobrough* dengan mencocokkan 2 foto berdasarkan derajat keabuan atau *grey levels* (*Hobrough* 1959 dalam *Scheck*, 1999). *Image Matching* suatu proses

mencari atau mengidentifikasi pasangan suatu titik yang muncul pada dua foto atau lebih secara otomatis. Pada instrumen analog/analitik image matching dilakukan oleh operator secara manual menggunakan persepsi 3D mata kiri dan kanan.

Metode image matching terbagi menjadi 3 yaitu, *Area-based matching*, *Feature-based matching*, *Symbolic matching* (Sceck, 1999). Metode *area-based matching* merupakan metode yang paling baik digunakan pada fotogrammetri dengan mendasarkan hubungan antara dua foto menurut kesamaan derajat keabuan (*grey levels*). Teknik yang digunakan adalah *cross-correlation* dan *least Square Matching* (LSM). *Feature-based matching* adalah metode yang digunakan untuk menentukan suatu garis dan area menggunakan teknik *cost funtion*, sedangkan *Symbolic matching* dapat menentukan deskriptif objek seperti pohon, grafik, ataupun berbentuk jaring menggunakan teknik *cross funtion*.

SIFT adalah sebuah metode *image matching* yang dikenalkan oleh Lowe pada tahun 2004 untuk memecahkan permasalahan rotasi citra, penskalaan, perubahan sudut pandang, *noise*, *affine deformation* serta perubahan pencahayaan yang memiliki ketahanan yang kuat. Algoritma SIFT mempunyai empat langkah utama yaitu :

1. *Scale Space Extrema Detection*

Tahap ini mengidentifikasi kandidat *keypoint* pada gambar disemua skala. *Keypoint* diambil dari dari maksimal dan minimal dari DoG (*Different of Gaussian*) pada persamaan (2-11).

$$\begin{aligned} D(x, y, \sigma) &= (G(x, y, k\sigma) - G(x, y, \sigma)) * I(x, y) \\ &= L(x, y, k\sigma) - L(x, y, \sigma) \end{aligned} \quad (2-11)$$

$D(x, y, \sigma)$ adalah *different of gaussian*, $L(x, y, k\sigma)$ adalah konvolusi citra asli $I(x, y)$ dengan

Gaussian pada *scale* $k\sigma$ dengan $k = \sqrt{2}$, $L(x, y, \sigma)$ adalah konvolusi citra asli $I(x, y)$ dengan *Gaussian* pada *scale* σ .

2. Keypoint Localization

Setiap kandidat lokasi dibuat detail untuk menentukan lokasi dan skala *keypoint* yang dipilih berdasarkan stabilitasnya.

3. Orientation Assignment

Satu atau lebih orientasi akan diberikan kesetiap lokasi *keypoint* berdasarkan arah gradient gambar. Adapun persamaan yang digunakan adalah :

$$m(x, y) = \sqrt{(L(x+1, y) - L(x-1, y))^2 + (L(x, y+1) - L(x, y-1))^2}$$

$$\theta(x, y) = \arctan\left(\frac{L(x, y+1) - L(x, y-1)}{L(x+1, y) - L(x-1, y)}\right)$$

(2-12)

$m(x, y)$ adalah *gradient magnitude*, $\theta(x, y)$ adalah arah orientasi dan $L(x, y)$ adalah *keypoint*

4. Keypoint Descriptor

Proses selanjutnya adalah penghitungan vektor *descriptor* *Descriptor* dihitung untuk masing-masing *keypoint*. Langkah ini dilakukan pada gambar yang paling dekat dengan skala untuk skala *keypoint*. Langkah selanjutnya adalah melakukan proses *keypoint matching*, yaitu sebuah proses pencocokan antara dua citra objek dengan membandingkan semua *keypoint* dan deskriptor yang dimiliki keduanya. Proses perhitungan pencocokan ini dihitung berdasarkan jarak dengan menggunakan *Eucliden Distance*, dengan persamaan berikut :

$$d(p, q) = \sqrt{(q_1 + p_1)^2 + \dots + (q_n + p_n)^2}$$

(2-13)

$d(p, q)$ adalah jarak anatar deskriptor citra 1 (p) dan citra 2 (q), $p_1 \dots p_n$ adalah deskriptor citra 1 dan $q_1 \dots q_n$ deskriptor citra 2.

2.4 Digital Elevation Model (DEM)

DEM adalah data digital yang menggambarkan geometri dari bentuk permukaan bumi atau bagiannya yang terdiri dari himpunan titik-titik koordinat hasil sampling dari permukaan dengan algoritma yang mendefinisikan permukaan tersebut menggunakan himpunan koordinat (Tempfli, 1991). Distribusi titik yang mewakili bentuk permukaan bumi dapat dibedakan dalam bentuk teratur, semi teratur, dan acak. Sedangkan teknik pengumpulan data dapat dibedakan dalam pengukuran secara langsung metode teretris, fotogrametris, maupun metode digitasi. Data DEM memiliki struktur data yang berbeda dan terbagi menjadi tiga jenis, yaitu Grid, TIN dan Kontor.

Data DEM memiliki struktur data yang berbeda dan terbagi menjadi tiga jenis, yaitu Grid, TIN dan Kontor.

1. Grid

Grid atau *Lattice* menggunakan sebuah bidang segitiga teratur, segiempat, atau bujursangkar atau bentuk siku yang teratur grid. Perbedaan resolusi grid dapat digunakan, pemilihannya biasanya berhubungan dengan ukuran daerah penelitian dan kemampuan fasilitas komputer. Data dapat disimpan dengan berbagai cara, biasanya metode yang digunakan adalah koordinat Z berhubungan dengan rangkaian titik-titik sepanjang profil dengan titik awal dan spasi grid tertentu (Moore et al., 1991).

2. TIN (*Trianulated Irregular Network*)

TIN adalah rangkaian segitiga yang tidak tumpang tindih pada ruang tak beraturan dengan

koordinat x, y, dan nilai z yang menyajikan data elevasi. Model TIN disimpan dalam topologi berhubungan antara segitiga dengan segitiga didekatnya, tiap bidang segitiga digabungkan dengan tiga titik segitiga yang dikenal sebagai facet. Titik tak teratur pada TIN biasanya merupakan hasil sampel permukaan titik khusus, seperti lembah, igir, dan perubahan lereng (Mark, 1975).

3. Kontur

Kontur dibuat dari digitasi garis kontur yang disimpan dalam format seperti DLGs (Digital Line Graphs koordinat (x, y) sepanjang tiap garis kontur yang menunjukkan elevasi khusus. Kontur paling banyak digunakan untuk menyajikan permukaan bumi dengan simbol garis.

2.5 Metode Perhitungan Volume

Volume merupakan istilah yang digunakan dalam perhitungan kapasitas atau kemampuan penyimpanan. Tetapi perhitungan volume tidak selalalu dengan bentuk teratur seperti bentuk kubus, silinder maupun kerucut, tetapi juga bentuk permukaan yang tidak beraturan. Sehingga perlu beberapa metode yang dilakukan dalam melakuakn perhitungan volume.

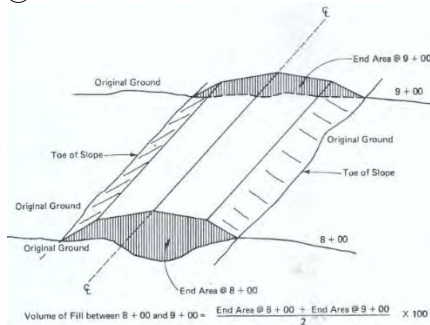
Adapun metode yang dilakukan dalam perhitungan volume adalah :

1. Volume *Metode End Area*

Pada gambar dibawah akan dihitung volume suatu area yang dibatasi oleh *Section @ 8 + 00* sampai *Section 9 + 00*, Jika diketahui panjang antara area adalah L , maka rumus yang digunakan adalah :

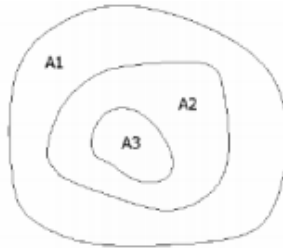
$$V = \frac{(A_1 + A_2)L}{2} \quad (2-14)$$

V adalah volume, A_1 dan A_2 adalah luas penampang pada Section 8 + 00 dan Section 9 + 00, dan L adalah panjang antara Section @ 8 + 00 dengan Section @ 9 + 00



Gambar 2.4 Perhitungan volume metode *end area*

2. Metode Kontur



Gambar 2.5 Kontur

$$Volume = \frac{(A_1 + A_2 + \dots + A_n)}{n} \times ((n - 1) \times d) \quad (2-15)$$

A_1, A_2 dan A_n adalah luas penampang 1, 2 dan n . Sedangkan d adalah interval kontur.

3. Metode *Borrow Pit*

Cara menghitung volume dengan *Borrow Pit* adalah dengan membagi daerah tersebut kedalam

beberapa kapling yang seragam, biasanya bujur sangkar atau empat persegi panjang. Persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut :

$$volume = \frac{A}{4} \times (1 \times \sum h_1 + 2 \times \sum h_2 + 3 \times \sum h_3 + 4 \times \sum h_4) \quad (2-16)$$



Gambar 2.6 Ilustrasi *Borrow Pit*

A adalah luas penampang satu kapling yang seragam (m^2), h_1 adalah tinggi yang digunakan untuk menghitung volume 1 kali (m), h_2 adalah tinggi yang digunakan untuk menghitung volume 2 kali (m), h_3 adalah tinggi yang digunakan untuk menghitung volume 3 kali (m) dan h_4 adalah tinggi yang digunakan untuk menghitung volume 4 kali (m).

2.6 Uji Statistika

Uji statistika digunakan untuk membandingkan hasil hitungan statistik dengan hasil sebelumnya atau dengan standar tertentu. Hipotesa : pernyataan eksplisit maupun implisit tentang distribusi probabilitas sebuah variabel acak. Hipotesa dikatakan “sederhana” jika mencakup semua parameter distribusi, dan dikatakan “komposit” jika hanya mencakup sebagian parameter distribusi (Setyadi, 2005). Pengujian hipotesis dengan

distribusi t adalah pengujian hipotesis yang menggunakan distribusi t sebagai uji statistik. Uji statistik ini kemudian dibandingkan dengan nilai yang ada pada tabel untuk kemudian menerima atau menolak hipotesis nol (H_0) yang dikemukakan (Sugiyono, 2006).

Langkah-langkah dalam membuat Uji Hipotesis adalah sebagai berikut:

1. Tentukan Formulasi H_0 dan Hipotesis Alternatif (H_a)
 - i. $H_0 : \mu_1 = \mu_2$
 $H_a : \mu_1 \neq \mu_2$
 - ii. $H_0 : \mu_1 \leq \mu_2$
 $H_a : \mu_1 > \mu_2$
 - iii. $H_0 : \mu_1 \geq \mu_2$
 $H_a : \mu_1 < \mu_2$
2. Tentukan Taraf Nyata (α) atau disebut juga *Level of Significant*. Bisa 5%, 2%, atau 1%.
3. Tentukan Nilai Kritis (nilai Tabel) dan Statistik Uji Hipotesis-nya.

Langkah pertaman yang dihitung adalah rata-rata sampel dan standar deviasi dengan persamaan (2-17) dan (2-18) berikut.

$$x_i = \frac{\sum x}{n} \quad (2-17)$$

$$s^2 = \sqrt{\frac{\sum (xi-x)^2}{n-1}} \quad (2-18)$$

x_i adalah nilai rata-rata sampel, x adalah sampel, n adalah jumlah sampel, dan s adalah standar deviasi. Sehingga nilai t dihitung menggunakan persamaan (2-19) berikut ini:

$$to = \frac{x - \mu}{s / \sqrt{n}}$$

(2-19)

t_o adalah nilai t yang dihitung, $\bar{x}$ adalah rata-rata sampel, μ adalah rata-rata populasi, s adalah standar deviasi dan n adalah jumlah sampel.

4. Hitung Nilai Statistik Uji Hipotesis
5. Pengambilan keputusan.

2.7 **Penelitian Sebelumnya**

Penelitian yang dilakukan Yakar dan Yilmaz (2008) dengan membandingkan hasil berdasarkan volume menggunakan metode CRP dengan metode tachimetri. Objek yang diukur berupa tumpukan batu dan pada permukaan objek tersebut diletakkan 24 titik kontrol yang tersebar di permukaan objek secara merata. Titik kontrol tersebut berwarna putih dan merah untuk memudahkan dalam melakukan proses pengolahan data CRP. Adapun hasil pengukuran metode CRP lebih menguntungkan 20% dari segi waktu; 7,61% dari segi akurasi, dan 33,33% biaya lebih sedikit dari metode tachimetri. Penelitian selanjutnya dikembangkan oleh Yakar dkk (2010) dengan membandingkan hasil volume CRP dengan *Laser Scanner*. Adapun kesimpulan yang didapat bahwa metode CRP dan *Laser Scanner* menggunakan objek material tambang memiliki akurasi 93.63 % dengan interval waktu 40 cm pada *Laser Scanner*.

Penelitian volume yang dilakukan oleh Defri Mulia (2014) menggunakan lemari untuk objek beraturan dengan metode manual dan gundukan tanah untuk objek tidak beraturan. Dengan metode *image matching* dalam menentukan titik sampel. Hasil yang diperoleh volume objek lemari tidak terjadi perubahan signifikan dengan pengukuran volume pita ukur, tetapi perhitungan volume pada gundukan tanah tidak bisa dilakukan dengan metode

image matching, karena tidak ditempatkan titik kontrol pada objek tersebut.

Berdasarkan penelitian diatas, masih terdapat kekurangan dalam melakukan perhitungan volume. Seperti metode kalibrasi digunakan secara otomatis. Perencanaan penelitian ini dengan melakukan kalibrasi laboratorium dengan dua metode, yaitu kalibrasi otomatis dengan menggunakan prinsip *image matching* dan kalibrasi analitik (manual) dengan perhitungan *bundle adjustment self calibration*. Sedangkan pengolahan data CRP dengan menempatkan titik kontrol pada objek yang tersebar secara merata sebagai titik GCP (*Ground Control Point*) untuk melakukan *georeferencing* yaitu titik koordinat dilapangan sama dengan titik koodinat pada hasil pengolahan foto.

BAB III

METODOLOGI

3.1 Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian Tugas Akhir ini dengan objek kotak kontainer berlokasi di halaman Workshop Mobil Listrik ITS, kampus ITS Sukolilo Surabaya.



Gambar 3.1 Lokasi dan Objek Penelitian

3.2 Data dan Peralatan

3.2.1 Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini antara lain :

- a. Bidang kalibrasi kamera 2D berupa grid untuk kalibrasi otomatis dan foto kalibrasi objek kontainer untuk kalibrasi Analitik (manual).
- b. Data spesifikasi kamera digital non-metrik Nikon D3000.
- c. Data pengukuran *Grund Control Komelon Unigrip 110CCD Point* (GCP) kontainer menggunakan pita ukur.

- d. Foto-foto objek kontainer untuk perhitungan volume.

3.2.2 Peralatan

Adapun peralatan yang digunakan dalam penelitian ini terbagi dalam kelompok hardware (perangkat keras) dan software (perangkat lunak) yaitu sebagai berikut:

- a. Perangkat Keras (*Hardware*)
 - i. Kamera digital non-metrik SLR Nikon D3000 sebagai alat untuk pengablan foto kalibrasi dan pembuatan 3D model.
 - ii. Pita ukur Komelon Unigrip Flx Kmc 1800 berukuran panjang 30 meter, dengan skala bacaan milimeter, bahan pita *Fiber Glass*
 - iii. Laptop sebagai alat pengolahan data.
- b. Perangkat Lunak (*Software*)
 - i. Perangkat pengolah data fotogrametri.
 - ii. *MATLAB* untuk pengolahan kalibrasi Analitik.
 - iii. Perangkat lunak Volume untuk perhitungan volume objek.

Tabel 3.1 Data Spesifikasi Kamera Nikon D3000

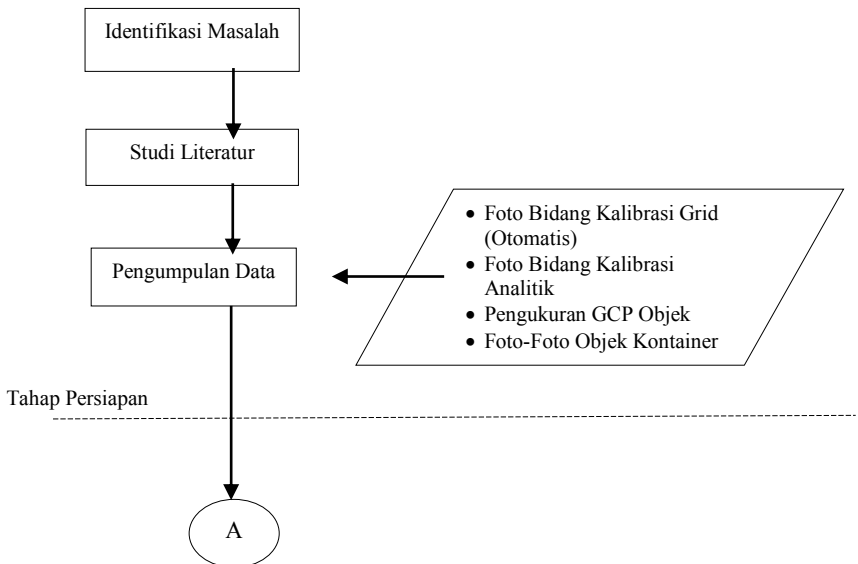
<i>Spesifikasi</i>	<i>Keterangan</i>
<i>Effective Pixel</i>	<i>10 megapixel, 11 megapixel sensor photo detector</i>
<i>Image Sensor</i>	<i>CCD sensor, APS-C (23.6 x 15.8 mm) sensor size</i>

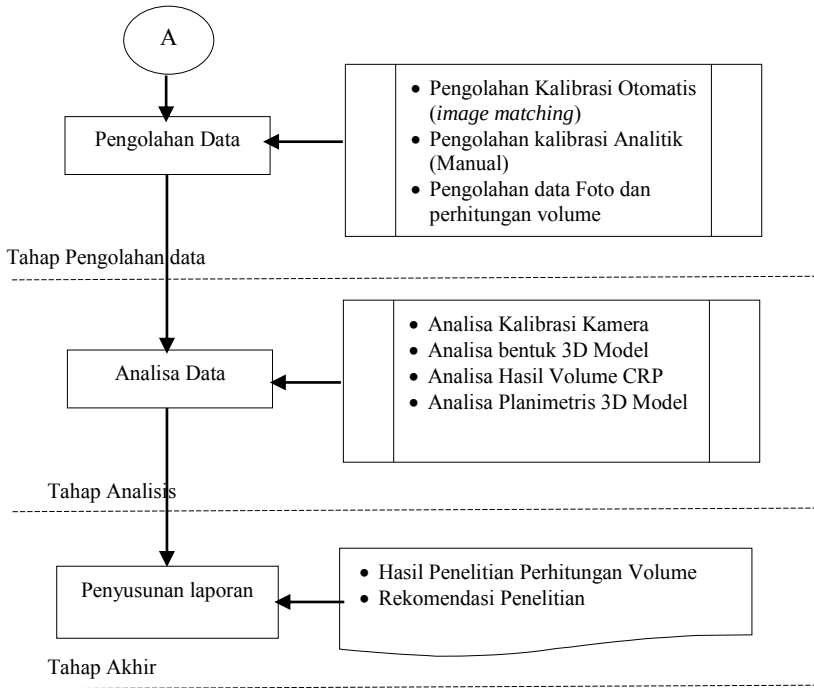
Tabel 3.1 Data Spesifikasi Kamera NMA Tikon D3000
(Lanjutan)

<i>Image Size (pixel)</i>	<i>Max resolution 3872 x 2592, other resolution 2896 x 1944 and 1936 x 1296, 3:2 image ratio</i>
<i>Sensitivity</i>	<i>ISO (Auto, 100, 200, 400, 800, 1600 puls 3200 with boost),</i>
<i>Focal lenght</i>	<i>18-55 mm</i>

3.3 Metodologi Penelitian

Secara garis besar, tahapan kegiatan penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut :





Gambar 3.2 Diagram Alir Kegiatan Penelitian

3.3.1 Tahap Persiapan

Pada tahap ini, kegiatan yang dilakukan adalah:

a. Identifikasi Masalah

Tahap ini merupakan tahap paling awal. Pada tahap ini diidentifikasi masalah bagaimana menghitung volume suatu objek menggunakan metode CRP dengan memperhatikan aspek geometri terhadap aspek hasil pengukuran.

b. Studi Literatur

Studi literatur dilakukan setelah masalah teridentifikasi. Pada tahap ini ini dilakukan kegiatan untuk mendapatkan referensi yang terkait dengan CRP dan perhitungan volume yang diangkat berbagai sumber seperti buku, jurnal maupun media lainnya.

c. Pengumpulan Data

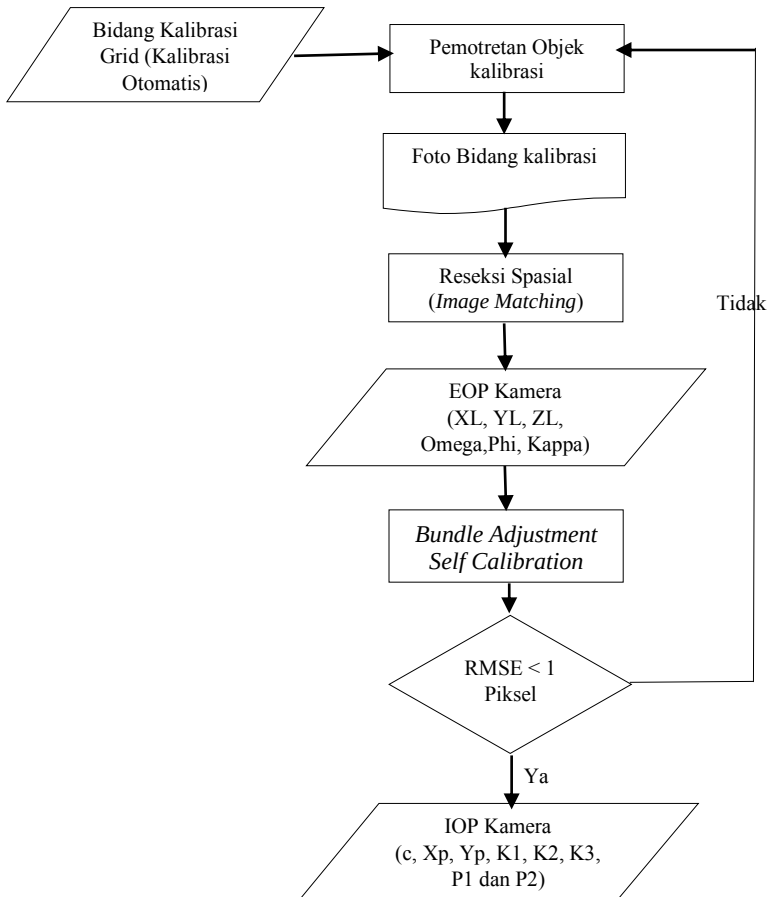
Pada tahap ini dilakukan pengambilan data kalibrasi dengan kamera digital non-metrik menggunakan objek grid 2D dan kalibrasi objek kontainer, data foto objek untuk perhitungan volume serta data GCP dengan menggunakan pita ukur. Titik kontrol dipasangkan pada permukaan objek kontainer berbentuk persegi berwarna merah (20 cm x 20 cm) untuk memudahkan dalam interpretasi pengolahan data foto bidang kalibrasi dan foto untuk perhitungan volume.

3.3.2 Tahap Pengolahan Data

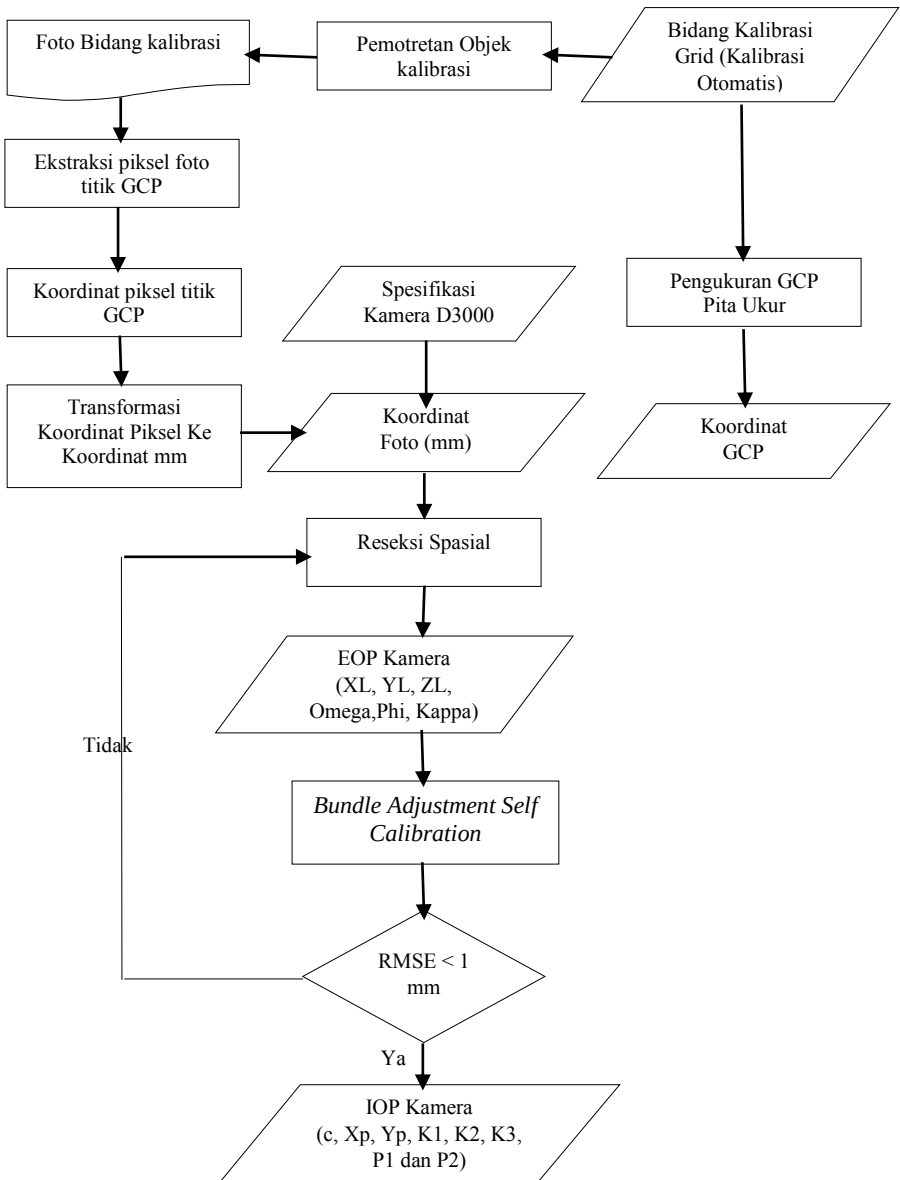
a. Tahap Kalibrasi Kamera

Kamera yang digunakan dalam penelitian ini memiliki jenis kamera non-metrik. Kamera non-metrik memiliki kesalahan pada geometri kamera. Kesalahan geometri tersebut diduga pada unsur-unsur internal parameter kamera yang terdiri dari panjang fokus (f), titik utama foto (X_p, Y_p), distorsi radial (K_1, K_2 , dan K_3), serta distorsi tangensial (P_1, P_2). Sehingga untuk mengetahui parameter internal kamera

tersebut harus melakukan proses kalibrasi kamera. Kalibrasi kamera dilakukan dengan *bundle adjustment laboratory calibration* secara otomatis dan manual. Adapun tahap kalibrasi kamera ditunjukkan dalam diagram alir berikut:



Gambar 3.3 Tahapan Kalibrasi Kamera Secara Otomatis



Gambar 3.4 Tahapan kalibrasi Kamera Secara Analitik

Penjelasan diagram alir diatas adalah sebagai berikut:

i. Kalibrasi kamera objek secara otomatis
(*image matching*)

Kalibrasi kamera metode laboratorium pada objek grid 2D secara otomatis dilakukan menggunakan bidang grid 2D memiliki 100 titik dengan 4 titik kontrol. Pemotretan kalibrasi dilakukan dengan empat sisi dengan masing-masing sisi terbagi menjadi 3 foto, yaitu foto dengan posisi landscape dan 2 foto dengan posisi potrait masing-masing rotasi 90 ke-kanan dan 90 ke-kiri. Jumlah pengambilan foto serta intensitas pencahayaan sangat mempengaruhi kualitas kalibrasi kamera. Kemudian dilakukan pengolahan kalibrasi secara otomatis (*image matching* dengan metode *self calibration*. Dalam hal ini kalibrasi yang baik harus memiliki $RMS \leq 1$ piksel. Selain itu titik-titik kalibrasi harus terorientasi satu sama lain minimal 80%.

ii. Kalibrasi kamera analitik (manual)

Kalibrasi menggunakan objek kontainer bertujuan untuk mendapatkan geometris IOP lebih baik daripada grid, karena ukuran kalibrasi objek kontainer sama dengan ukuran objek dalam melakukan pengukuran volume. Adapun kegiatan

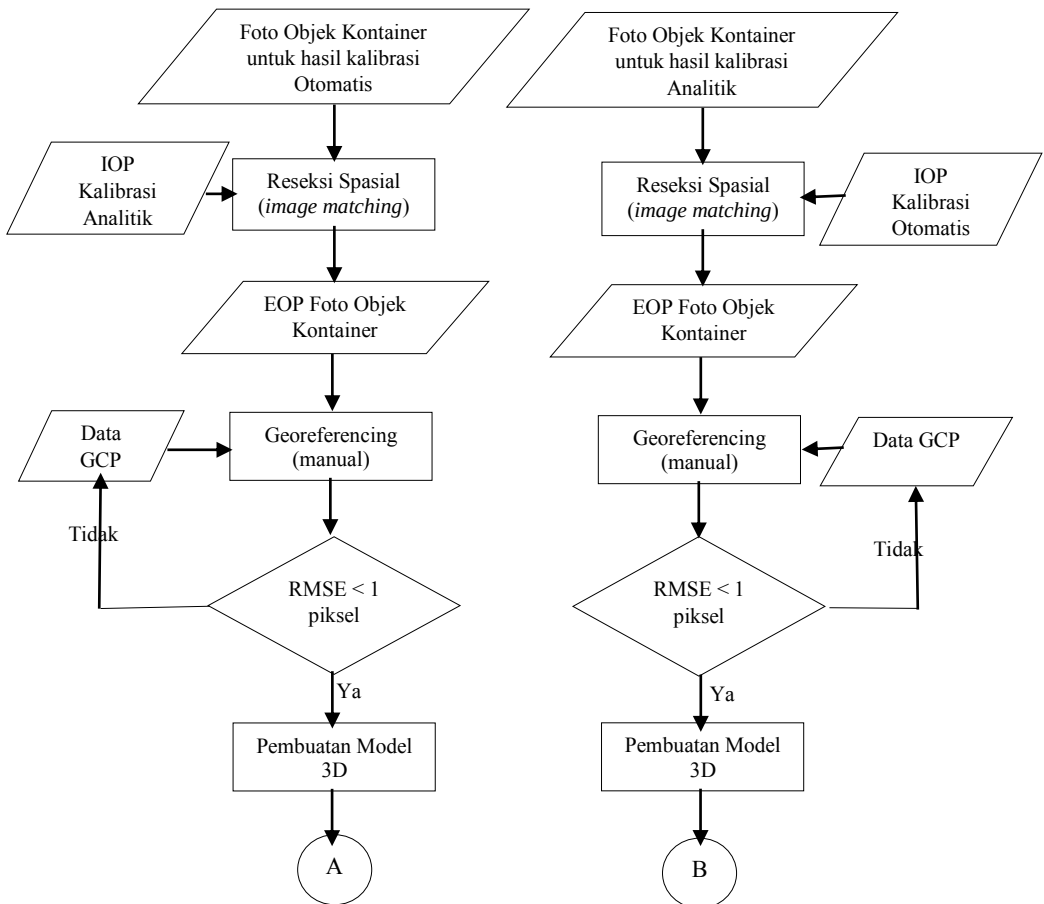
dalam melakukan kalibrasi bidang objek kontainer adalah sebagai berikut:

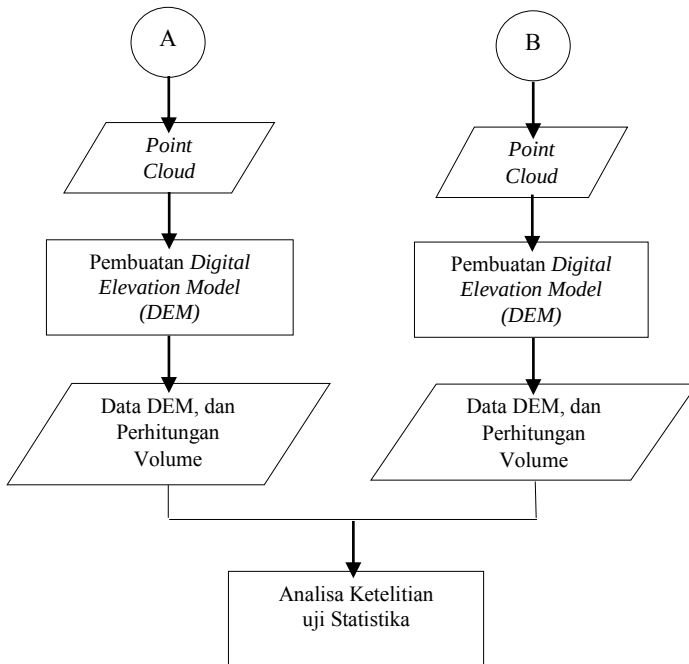
- Penempatan titik kontrol yang tersebar secara merata pada objek kontainer sebelum melakukan pemotretan. Jumlah desain titik kontrol berjumlah 16 titik GCP.
- Melakukan pengukuran GCP dengan alat ukur pita ukur masing-masing GCP dengan sistem koordinat 3D (X,Y dan Z).
- Melakukan pemotretan bidang kalibrasi.
- Melakukan ekstraksi koordinat GCP dalam piksel (2D).
- Melakukan transformasi koordinat piksel GCP ke koordinat foto dalam mm dengan memasukkan data spesifikasi kamera yaitu ukuran sensor dan ukuran dimensi piksel foto.
- Melakukan proses reseksi spasial untuk mendapatkan nilai parameter orientasi luar (EOP) yaitu X_l , Y_l , Z_l , Omega, phi dan kappa.
- Melakukan proses *Bundle Adjustment Self Calibration* untuk mendapatkan nilai orientasi dalam (IOP). Proses *Bundle Adjustment Self Calibration* dilakukan secara simultan sampai mencapai nilai konstan pada setiap

parameter IOP kamera, sehingga nilai $RMSE < 1$ mm.

b. Tahap Pengolahan Data Foto

Tahapan pengolahan data CRP digambarkan pada diagram alir berikut ini:





Gambar 3.5 Pengolahan data CRP

Pengolahan data CRP dilakukan dengan kegiatan berikut ini :

- i. Penentuan titik GCP yang tersebar pada objek kontainer. Titik GCP tersebut di ukur dengan pita ukur untuk mendapatkan data jarak. Sehingga mendapatkan koordinat 3D (X, Y dan Z). Titik GCP ini digunakan untuk georeferencing pada foto.
- ii. Pengolahan data CRP dilakukan dengan dua *software* yang berbeda, sehingga

pengolahan foto juga dilakukan dengan foto yang berbeda.

- iii. Reseksi spasial atau orientasi relatif dilakukan secara otomatis dengan metode *image matching* pada software. Reseksi spasial ini bertujuan untuk mendapatkan koordinat stasiun pemotretan dan orientasi kamera (X_l , Y_l , Z_l , Ω , ϕ , κ).
- iv. Georeferencing dilakukan dengan memasukkan koordinat GCP hasil pengukuran untuk mendapatkan koordinat nyata pada foto. Georeferencing ini dilakukan secara manual dengan melakukan marking pada foto yang bertampalan. Hasil Georeferencing ini harus memiliki RMSE < 1 piksel.
- v. Langkah selanjutnya adalah pembuatan 3D Model dengan menghasilkan permukaan objek dalam bentuk *point cloud*.
- vi. *Point cloud* ini kemudian di-export menjadi data *Digital Elevation Model* (DEM) untuk perhitungan volume objek. Perhitungan volume objek dilakukan pada software *Surfer 11*. Hasil perhitungan volume objek akan dibandingkan dengan hasil pengukuran pita ukur dan juga koordinat 3D Model Objek kedua metode kalibrasi dilakukan uji statistika terhadap hasil pengukuran dengan menggunakan pita ukur yang dianggap benar dalam penelitian ini.

3.3.3 Tahap Analisis

Pada tahap ini dilakukan dengan beberapa analisis seperti :

- a. Analisis hasil kalibrasi kamera metode laboratorium secara otomatis dan analitik.
- b. Analisis hasil bentuk 3D Objek kontainer.
- c. Analisis hasil volume metode CRP.
- d. Analisis Statistika Koordinat 3D Model terhadap GCP pita ukur.

3.3.4 Tahap Akhir

Pada tahap ini akan ditarik kesimpulan bagaimana perbedaan hasil perhitungan volume objek kontainer dari hasil kalibrasi metode laboratorium secara otomatis pada objek grid dan kalibrasi kamera analitik pada objek kontainer dalam bentuk 3D model terhadap hasil pengukuran dengan pita ukur. Hasil dari penelitian ini disusun dalam bentuk laporan tertulis tentang perhitungan volume sebagai pertimbangan aspek geometris pengukuran CRP.

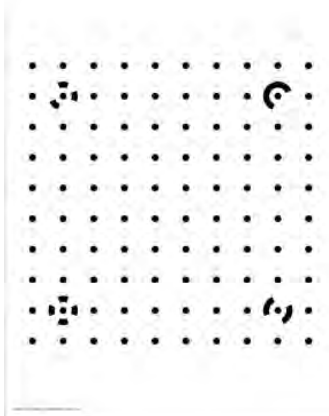
“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB IV HASIL DAN ANALISA

4.1 Hasil Tahapan Kalibrasi Kamera

4.1.1 Pengambilan Foto Kalibrasi Otomatis (*Image Matching*)

Bidang kalibrasi secara otomatis menggunakan bidang grid 2D berupa kertas putih berukuran A4. Jumlah target titik kalibrasi 10 x 10 titik dengan 4 titik kontrol. Titik-titik tersebut secara otomatis akan terdeteksi pada saat pengolahan data kalibrasi

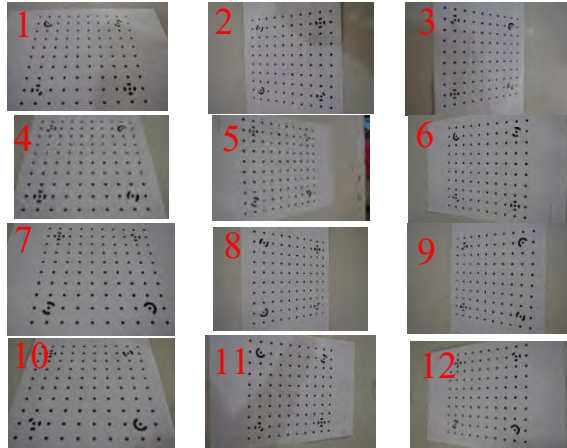


Gambar 4.1 Grid Kalibrasi bidang 2D

Sumber : *Photomodeller Scanner*

Pengambilan Foto kalibrasi kamera dilakukan dengan posisi kamera berada pada masing-masing sisi grid berjumlah 3 foto (atas, bawah, kanan dan kiri). Total pengambilan jumlah foto sebanyak 12 foto. Adapun teknik pengambilan foto dilakukan 1 foto untuk posisi *landscape*, 1 foto untuk posisi *potrait* rotasi $+90^0$, dan 1 foto untuk posisi *potrait* rotasi -90^0 . Panjang fokus kamera yang digunakan

dalam penelitian ini adalah 24 mm. Hal ini juga sama digunakan pada pengambilan foto kalibrasi secara manual. Posisi pengambilan foto dapat dilihat pada gambar 4.2 berikut ini.



Gambar 4.2 Posisi pengambilan gambar bidang grid

4.1.2 Hasil Perhitungan Parameter IOP Kalibrasi Otomatis (*Image Matching*)

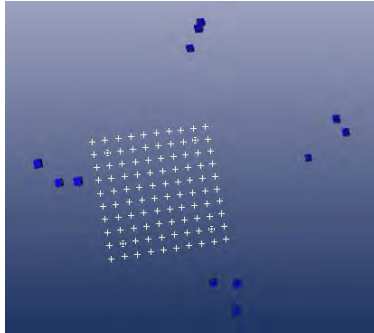
Proses perhitungan kalibrasi pada *software* dilakukan secara otomatis (*image matching*). Metode *Image Matching* pada *software* menggunakan algoritma SIFT (*Scale Invariant Feature Transform*) seperti yang dijelaskan pada bab 2 sebelumnya, sedangkan prinsip perhitungan parameter internal kamera secara analitis menggunakan prinsip *bundel adjustment self calibration*. Hasil perhitungan kalibrasi kamera dapat dilihat dalam tabel 4.1 dan berikut ini.

Tabel 4.1 Hasil Parameter Internal Kamera Otomatis

Parameter Internal Kamera	Nilai (mm)	Standar Deviasi
Panjang Fokus	24,216	0,003
Xp	11,968	0,003
Yp	7,884	0,004
K1	0,0001	0,000
K2	0,000002	0,000
K3	0,000	0,000
P1	0,00002	0,000002
P2	-0,000008	0,000002

Tabel 4.2 Kualitas Kalibrasi Kamera Otomastis

Kualitas	Parameter	Nilai
Foto	Jumlah Foto	12
	Jumlah Terorientasi	12
Kamera	Jumlah Foto yang digunakan	12
	Rata-rata area ter-cover	79%
Residual Titik	RMS Total	0,272 pixels
	Maksimum (titik 5 pada foto 12)	1,317 pixels
	Minimum (titik 19 pada foto 7)	0,202 pixels
	Maksimum RMS (titik 9)	0,107 piksel
	Minimum RMS (titik 74)	0,107 pixel
Kerapatan Titik	Makimum (titik 78)	0,00083 m
	Minimum (titik 61)	0,00016 m
Presisi Titik	Panjang vektor RMS total	0,00009 m
	Panjang vektor maksimum (titik 86)	0,0001 m
	Panjang vektor minimum (titik 89)	0,00009 m

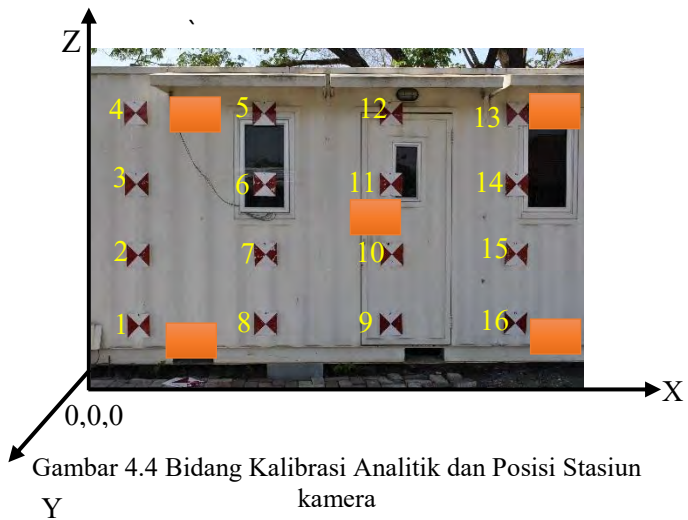


Gambar 4.3 Tampilan Posisi Kamera dan Titik Kalibrasi Otomatis

4.1.3 Pengambilan Foto Kalibrasi Analitik (Manual)

Foto kalibrasi metode Analitik objek kontainer menggunakan objek kotak kontainer menggunakan panjang fokus yang sama dengan kalibrasi otomatis grid 2D yaitu 24 mm. Hal ini telah disesuaikan dengan kondisi lapangan pada saat pemotretan. Untuk mendapatkan kualitas foto yang baik, dilakukan pada saat kondisi cuaca yang cerah, dilakukan pemotretan pada jam 12.00 WIB. Adapun posisi pemotretan dapat dilihat pada gambar 4.4.

Titik GCP berjumlah 16 titik tersebar secara teratur dengan jarak antar titik untuk x dan y adalah 100 cm dan 60 cm diukur menggunakan pita ukur. Hal ini digunakan untuk memudahkan pengukuran dan mengurangi kesalahan pengukuran. Kordinat titik 0,0,0 mm berada pada pojok kiri bawah kontainer. Hasil pengukuran GCP dijadikan dalam bentuk koordinat 3D (X,Y dan Z) dapat disajikan dalam tabel 4.3 dan hasil pemotretan pada kelima posisi (atas kiri, atas kanan, tengah, bawah kiri dan bawah kanan) dapat dilihat pada gambar 4.5 dan gambar 4.6 berikut ini:



Tabel 4.3 Titik GCP Kalibrasi Analitik (satuan mm)

Titik	X	Y	Z
1	1525	0	200
2	1525	0	800
3	1525	0	1400
4	1525	0	2000
5	2635	0	2000
6	2635	0	1400
7	2635	0	800
8	2635	0	200
9	3740	0	200
10	3740	0	800
11	3740	0	1400
12	3740	0	2000
13	4865	0	2000
14	4865	0	1400
15	4865	0	800
16	4865	0	200



Gambar 4.5 Hasil Pemotretan Kalibrasi Sisi Atas Kanan dan Atas Kiri

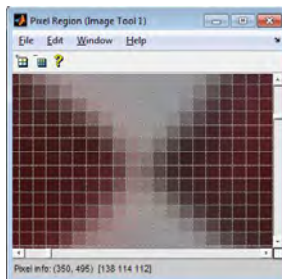


Gambar 4.6 Hasil Pemotretan Kalibrasi Sisi Tengah, Bawah Kiri dan Bawah Kanan.

4.1.4 Ekstraksi Titik GCP Kalibrasi Objek Kontainer dalam Koordinat Pikel

Digitasi GCP pada setiap foto dilakukan pada perangkat lunak *Matlab (Image Tool)*. Digitasi titik GCP tersebut dilakukan secara manual untuk mendapatkan nilai koordinat piksel titik. Adapun jumlah piksel kamera memiliki dimensi 3872 piksel untuk sumbu X dan 2592 piksel untuk sumbu Y. Posisi koordinat piksel akan bertambah ke arah kanan pada sumbu X dan bertambah ke bawah pada sumbu Y, karena posisi koordinat piksel 0,0 foto berada pada posisi sudut kiri atas. Proses ekstraksi koordinat

piksel dapat diilustrasikan pada gambar 4.7 dibawah ini. Titik GCP koordinat piksel berada pada piksel berwarna putih yang diapit sisi piksel warna merah. Sedangkanh hasil ekstraksi koordinat piksel dapat dilihat pada tabel 4.4. Koordinat piksel X sama dengan sumbe X pada GCP lapangan, tetapi untuk koordinat piksel Y diasumsikan sama dengan koordinat sumbu Z pada titik GCP lapangan, sedangkan koordinat piksel Z diasumsikan sama dengan 0. Hal ini juga sesuai dengan kondisi lapangan bidang kalibrasi yang memiliki bentuk permukaan datar (sama).



Gambar 4.7 Ilustrasi Ektraksi Koordinat Piksel

Tabel 4.4 Koordinat Piksel Titik GCP (satuum mm)

No Titik	Atas Kiri		Atas Kanan		Tengah		Bawah kanan		Bawah kiri	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
1	561	2247	416	1820	411	2091	435	2023	613	2142
2	536	1669	401	1373	403	1564	466	1566	613	1513
3	505	1061	381	910	390	1029	491	1122	610	902
4	483	428	370	436	388	493	524	696	616	320
5	1585	466	1039	410	1379	490	1171	583	1664	418
6	1584	1028	1049	941	1382	1027	1154	1053	1679	950
7	1590	1570	1053	1456	1388	1560	1131	1539	1701	1497
8	1588	2089	1057	1952	1388	2087	1107	2044	1716	2063

Tabel 4.4 Koordinat Pikel Titik GCP Satuan mm (Lanjutan)

No Titik	Atas Kiri		Atas Kanan		Tengah		Bawah kanan		Bawah kiri	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
9	2414	1963	1877	2124	2368	2085	1956	2079	2615	2005
10	2435	1492	1894	1565	2377	1559	1969	1512	2592	1490
11	2444	1002	1897	981	2372	1026	1969	967	2557	989
12	2461	496	1904	374	2373	489	1973	445	2530	503
13	3172	528	3042	344	3356	498	2976	283	3255	581
14	3145	985	3003	1038	3349	1028	2993	863	3288	1025
15	3119	1426	2968	1702	3343	1554	3012	1472	3324	1481
16	3092	1854	2929	2334	3333	2075	3027	2112	3357	1949

4.1.5 Hasil Transformasi Koordinat Pikel ke Koordinat Foto Satuan mm

Transformasi koordinat pikel ke koordinat foto dilakukan secara sederhana menggunakan pemograman *Matlab*. Dengan memasukkan parameter dimensi pikel foto dan panjang sensor CCD (*Charge Coupled Device*) kamera yaitu 23. 6 mm x 15.8 mm. Proses ini dilakukan sistem koordinat foto sama dengan sistem koordinat lapangan. Adapun hasil transformasi koordinat pikel ke koordinat foto satuan milimeter dapat dilihat dalam tabel 4.5 dibawah ini.

Tabel 4.5 Titik GCP dalam Sistem Koordinat Foto Atas Kiri, Atas Kanan dan tengah (satuan mm)

Nama Foto	Atas Kiri		Atas Kanan		Tengah	
Titik	X	Y	X	Y	X	Y
1	-8,378	-5,8	-9,261	-3,197	-9,292	-4,849
2	-8,53	-2,277	-9,353	-0,472	-9,341	-1,637
3	-8,719	1,429	-9,475	2,35	-9,42	1,625
4	-8,853	5,288	-9,542	5,239	-9,432	4,892

Tabel 4.5 Titik GCP dalam Sistem Koordinat Foto Atas Kiri,
Atas Kanan dan tengah Satuan mm (Lanjutan)

Nama Foto	Atas Kiri (mm)		Atas Kanan (mm)		Tengah (mm)	
	X	Y	X	Y	X	Y
5	-2,136	5,056	-5,464	5,398	-3,392	4,91
6	-2,142	1,631	-5,403	2,161	-3,374	1,637
7	-2,106	-1,673	-5,379	-0,978	-3,337	-1,612
8	-2,118	-4,837	-5,355	-4,002	-3,337	-4,825
9	2,917	-4,069	-0,357	-5,050	2,636	-4,813
10	3,045	-1,198	-0,253	-1,643	2,691	-1,606
11	3,099	1,789	-0,235	1,917	2,661	1,643
12	3,203	4,874	-0,192	5,617	2,667	4,916
13	7,537	4,678	6,744	5,800	8,658	4,861
14	7,372	1,893	6,507	1,570	8,615	1,631
15	7,214	-0,796	6,293	-2,478	8,579	-1,576
16	7,049	-3,404	6,055	-6,330	8,518	-4,752

Tabel 4.6 Titik GCP dalam Sistem Koordinat Foto Bawah Kanan
dan Bawah Kiri (satuan mm)

Nama Foto	Bawah kanan		Bawah kiri	
	X	Y	X	Y
1	-9,146	-4,435	-8,061	-5,160
2	-8,963	-1,649	-8,061	-1,326
3	-8,804	1,058	-8,079	2,399
4	-8,603	3,648	-8,042	5,946
5	-4,66	4,337	-1,655	5,349
6	-4,763	1,478	-1,563	2,106
7	-4,904	-1,484	-1,429	-1,228
8	-5,056	-4,563	-1,338	-4,678
9	0,119	-4,782	4,142	-4,325
10	0,204	-1,32	4,001	-1,186
11	0,204	2,002	3,788	1,868
12	0,229	5,184	3,624	4,831

Tabel 4.6 Titik GCP dalam Sistem Koordinat Foto Bawah Kanan dan Bawah Kiri Satuam mm (Lanjutan)

Nama Foto	Bawah kanan		Bawah kiri	
Titik	X	Y	X	Y
12	0,229	5,184	3,624	4,831
13	6,342	6,172	8,042	4,355
14	6,439	2,636	8,244	1,649
15	6,561	-1,076	8,463	-1,131
16	6,653	-4,977	8,664	-3,984

4.1.6 Hasil Proses Reseksi Spasial

Proses reseksi spasial dilakukan untuk mendapatkan parameter orientasi luar kamera, yaitu posisi stasiun pemotretan (XL, YL, dan ZL) serta orientasi sudut (Ω , ϕ dan κ). Proses reseksi spasial menggunakan seluruh titik GCP foto dan GCP lapangan menggunakan prinsip kolinearitas (prinsip keseгарisan).

Kondisi kolinearitas dapat dilakukan beberapa tahap seperti : menentukan nilai pendekatan awal untuk nilai Ω dan ϕ bernilai 0, menentukan jarak antara posisi pemotretan dengan objek menggunakan prinsip perbandingan panjang fokus dengan skala foto yang digunakan nilai pendekatan ZL, menghitung koordinat lapangan dari foto vertikal, serta menghitung nilai pendekatan XL, YL dan κ menggunakan transformasi koordinat konform 2D (dua dimensi) dengan perhitungan kuadrat terkecil (*least square*).

Adapun hasil parameter orientasi luar kamera dapat dilihat pada tabel 4.7 dibawah ini.

Tabel 4.7 Parameter Orientasi Luar Kamera
Kalibrasi Analitik

Parameter/Foto	Atas kiri	Atas Kanan	Tengah	Bawah Kanan	Bawah Kiri
Omega (radian)	-0,180	-0,168	-0,046	0,160	0,115
Phi (radian)	-0,433	0,513	0,007	0,482	-0,371
Kappa (radian)	-0,068	0,098	-0,002	-0,059	0,006
XL (mm)	1063,642	5696,820	3179,347	5623,371	1235,769
YL (mm)	1773,719	1629,937	1257,917	383,000	513,510
ZL (mm)	4003,535	3513,352	4459,483	3824,306	4017,841

4.1.7 Hasil Proses *Bundle Adjustment Self Calibration*

Hasil parameter kalibrasi *Bundle Adjustment Self Calibration* metode laboratorium sama halnya dengan kalibrasi metode otomatis sebelumnya, yaitu untuk menentukan nilai panjang fokus terkalibrasi (f), titik koordinat pusat atau titik fidusial kamera (x_p , y_p), parameter distorsi radial (K_1 , K_2 , dan K_3) serta parameter distorsi tangensial (P_1 dan P_2). Proses *Bundle Adjustment Self Calibration* dilakukan secara simultan sampai mendapatkan nilai yang stabil hingga 12 kali pengulangan (iterasi). Adapun hasil kalibrasi kamera dapat dilihat dari 5 foto dapat dilihat pada tabel 4.8 dibawah ini.

Tabel 4.8 Parameter Orientasi Dalam
pada kelima Foto

Parameter <i>IOP</i>	Nilai
f	24,358
X_p	-0,535
Y_p	-0,237
K_1	0,0003
K_2	-0,000002
K_3	0,000
P_1	0,0005
P_2	0,0001

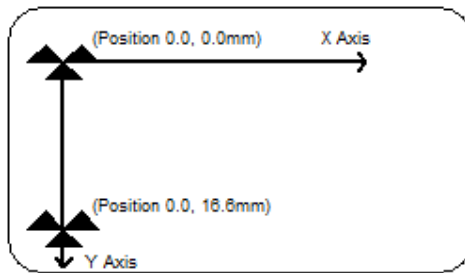
4.2 Analisa Kalibrasi Kamera

4.2.1 Analisa Kalibrasi Kamera Otomatis (*image matching*)

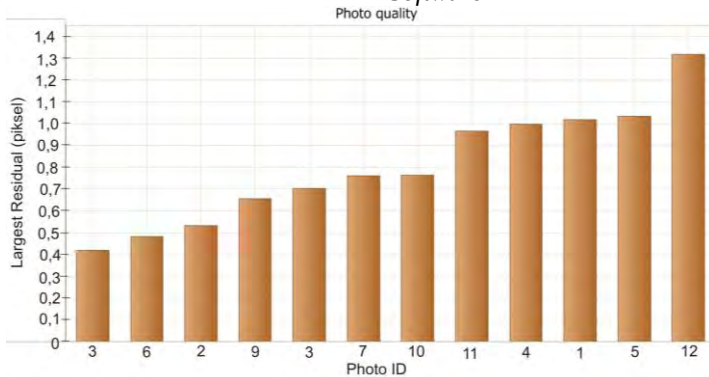
Pada pengolahan kalibrasi kamera diatas dapat diketahui nilai parameter internal seperti panjang fokus terkalibrasi adalah 24,216 mm. Hal ini terdapat selisih perubahan panjang fokus awal sebesar 0,216 mm. *Principal point* (koordinat pusat kamera) pada sensor kamera memiliki nilai X_p dan Y_p masing-masing 11,968 mm dan 7,884 mm. Nilai koordinat kamera 0,0 mm berada di posisi pojok kanan atas, seperti yang diilustrasikan pada gambar 4.8 dibawah. Nilai K_1 , K_2 , dan K_3 masing-masing bernilai 0,0001 mm, -0,00000003 dan 0,000 mm. Nilai K_3 tidak dapat dihitung, karena pada perangkat lunak nilai K_3 digunakan ketika memiliki *wide angle lenses*.

Untuk mendapatkan akurasi yang baik pada kalibrasi harus memiliki nilai RMS dibawah 1 piksel. Tetapi hasil kalibrasi menunjukkan terdapat nilai lebih besar dari satu piksel, yaitu 1,32 piksel pada titik 5 photo 12. Hal ini dikarenakan pada saat pemotretan terdapat kesalahan terutama kurangnya pencahayaan sehingga mengakibatkan perbedaan gradasi warna antara satu foto dengan foto yang lain. Sedangkan nilai RMS secara umum memiliki nilai 0,272 piksel dimana memiliki nilai lebih kecil dari 1 piksel. Untuk distribusi RMS masing-masing foto dapat dilihat pada grafik gambar 4.6.

Analisa kalibrasi kamera yang lain dapat dilihat dari area foto yang tertutupi. Jumlah area foto yang tertutupi oleh titik adalah 79%, hal ini merupakan kurang 1% untuk mencapai 80% sesuai yang direkomendasikan oleh perangkat lunak.



Gambar 4.8 Posisi Koordinat 0,0 mm pada
Software



Gambar 4.9 Grafik Residual Masing-masing Foto

4.2.2 Analisa Kalibrasi Kamera Analitik (Manual)

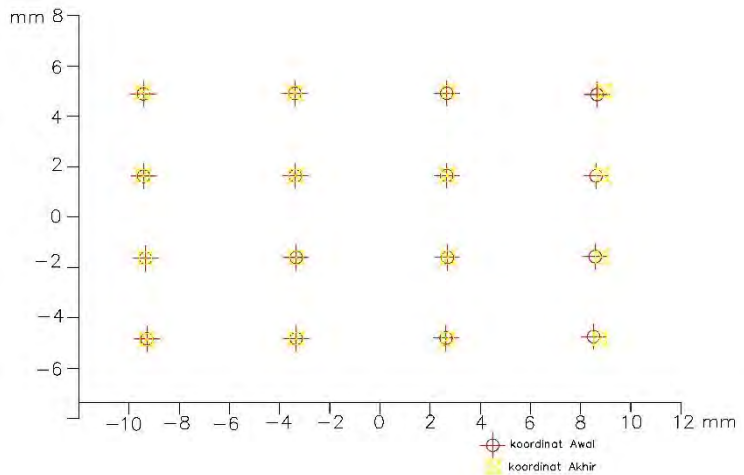
Pada pengolahan kalibrasi kamera objek kontainer dapat diketahui kualitasnya seperti stabilitas perubahan setiap iterasi *Bundle Adjustment Self Calibration*. Selisih iterasi pada lapisan 2 dapat dilihat kokonstanan atau nilai perubahan setiap iterasi. Parameter X_p mencapai nilai konstan pada iterasi 10, Y_p mencapai nilai konstan pada iterasi ke 6, panjang fokus (f) dan K_1 mencapai nilai konstan pada iterasi 9, K_2 mencapai nilai konstan pada iterasi ke 10, K_3 pada iterasi 8, P_1 pada iterasi 10, dan P_2 pada iterasi 11. Masing-masing parameter memiliki

menunjukkan bahwa kekontanan nilai perubahan berbeda-beda satu sama lain. Nilai parameter orientasi dalam yang digunakan pada iterasi ke 12. Kamera SLR Nikon D3000 merupakan jenis kamera format kecil karena memiliki panjang fokus 18-55 mm. Kamera ini memiliki distorsi lensa yang cukup besar karena mencapai nilai stabil pada iterasi ke 8.

Analisa kalibrasi kamera juga dapat dilihat berdasarkan distorsi kamera. Distorsi kamera dapat diketahui dengan melihat perubahan koordinat foto sebelum dan setelah terkalibrasi. Perubahan tersebut disebut dengan *reprojection error* dengan menghitung perubahan koordinat nilai *principal point* dan parameter distorsi kamera. Nilai dan visualisasi *reprojection error* untuk foto tengah dapat dilihat pada tabel 4.9 dan gambar 4.10 dibawah. Foto lain dapat dilihat dalam lampiran

Tabel 4.9 Nilai *Reprojection Error* Foto Tengah
(satuan mm)

Titik	Tengah	
	X	Y
1	-0,010	-0,019
2	-0,009	0,001
3	-0,016	0,020
4	-0,031	0,058
5	-0,002	0,037
6	0,003	0,003
7	0,005	0,001
8	0,004	-0,012
9	0,044	-0,040
10	0,025	-0,007
11	0,029	0,015
12	0,057	0,068
13	0,295	0,146
14	0,255	0,053
15	0,244	-0,021
16	0,260	-0,095



Gambar 4.10 Visualisasi Kesalahan Koordinat Awal dan Koordinat Terkoreksi.

Berdasarkan tabel tersebut dapat diketahui bahwa nilai kesalahan koordinat foto memiliki kesalahan minimum sebesar 0,001 dan maksimum sebesar 0,3946 mm. Nilai yang mengalami kesalahan terbesar adalah berada pada titik 13, 14, 15 dan 16. Sedangkan pada bagian tengah cenderung lebih kecil. Dari visualisasi diatas dapat dilihat terjadi pergeseran koordinat paling besar berada sebelah kanan foto, tetapi pada bagaian pusat cendrung lebih rapat, hal ini membuktikan kamera mengalami distorsi lensa.

Kesalahan radial dapat diketahui dari perhitungan koefisien distorsi radial (K_1 , K_2 dan K_3) dengan jarak radial dengan mengikuti deret aritmatika dimana nilai jarak radial mengalami kenaikan order perkalian setiap koefisien yang berbeda. Jika nilai kesalahan radial < 1 maka maka

lensa kamera mengalami distorsi cembung. Sedangkan nilai kesalahan radial > 1 , maka lensa kamera mengalami distorsi cekung. Pada tabel 4.10 diketahui nilai kesalahan radial pada foto tengah kurang dari 1, sehingga dapat dikatakan lensa kamera SLR D3000 mengalami distorsi cembung.

Tabel 4. 10 Nilai Kesalahan Radial Foto Tengah
(satuan mm)

Titik	Tengah	
	X	Y
1	-0,136	-0,072
2	-0,121	-0,019
3	-0,125	0,026
4	-0,145	0,084
5	-0,022	0,041
6	-0,009	0,006
7	-0,008	-0,004
8	-0,020	-0,032
9	0,023	-0,034
10	0,011	-0,004
11	0,012	0,007
12	0,027	0,043
13	0,154	0,086
14	0,133	0,027
15	0,130	-0,019
16	0,144	-0,072

Selain daripada distorsi lensa kamera, analisa kesalahan dari *reprojection error* pada lampiran 3 juga perlu dilakukan dengan menghitung *Root Mean Square Error* (RMSE). Masing-masing foto dihitung RMSE dengan cara mnegkuadratkan *reprojection error*, jumlah hasil kuadrat *reprojection error* tersebut dibagi sebanyak jumlah titik GCP untuk mencari rerat *reprojection error*.

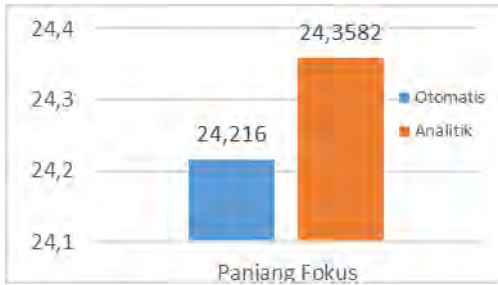
Kemudian hasil tersebut diakarkan untuk mencari RMSE. Nilai RMSE masing-masing foto dapat dilihat pada tabel 4.11. Tabel tersebut memiliki nilai $RMSE < 1$ mm pada koordinat X maupun koordinat Y, dimana nilai RMSE terkecil memiliki nilai 0,084 mm dan terbesar memiliki nilai 0,134 mm sehingga hasil ini dapat digunakan untuk melakukan georeferencing foto pada keperluan CRP.

Tabel 4.11 Nilai RMSE Foto (satuan mm)

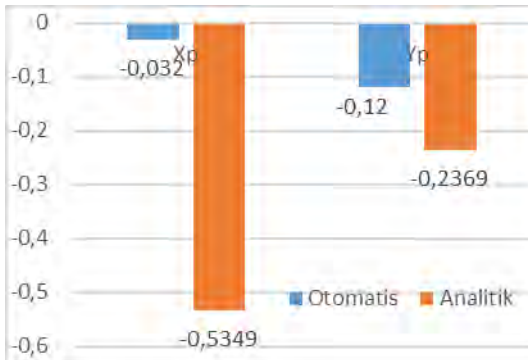
Foto	RMSE	
	X	Y
Atas Kiri	0,100	0,046
Atas Kanan	0,084	0,054
Tengah	0,134	0,054
Bawah Kanan	0,084	0,050
Bawah Kiri	0,129	0,051

4.2.3 Analisa Perbandingan Kalibrasi Otomatis dan Kalibrasi Analitik

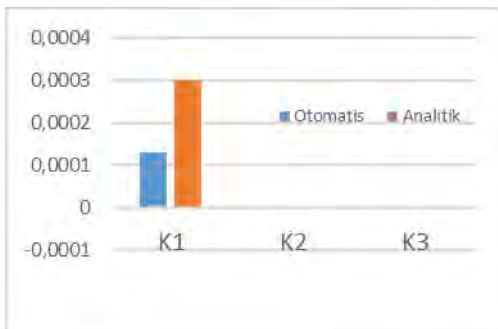
Berdasarkan hasil kalibrasi yang telah dilakukan, dapat dilihat bahwa nilai panjang fokus memiliki perbedaan yang relatif kecil sebesar 0,142 mm. Nilai koordinat pusat kamera memiliki perbedaan selisih sebesar 0,503 mm untuk sumbu x dan 0,117 mm untuk sumbu y. Selisih nilai K_1 , K_2 , dan K_3 pada kedua kalibrasi sebesar 0,00002; 0,000 dan 0,000. Sedangkan nilai koefisien P_1 dan P_1 memiliki selisih sebesar 0,0005 ; 0,000. Sehingga dapat disimpulkan selisih nilai parameter tidak memiliki nilai relatif besar dan setiap parameter hasil kalibrasi kamera analitik memiliki nilai lebih besar dari hasil kalibrasi otomatis.



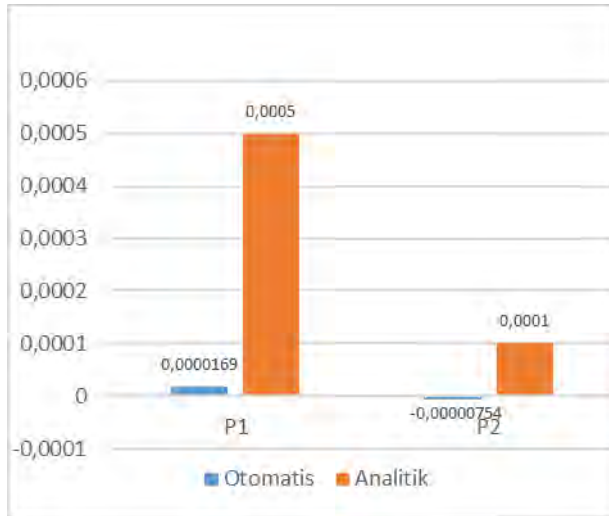
Gambar 4.11 Perbandingan Nilai Panjang Fokus Kamera



Gambar 4.12 Perbandingan Nilai Koordinat Pusat Kamera



Gambar 4.13 Perbandingan Nilai K_1 , K_2 , dan K_3 Kamera



Gambar 4.14 Perbandingan Nilai P_1 dan P_2 Kamera

Perbedaan nilai kalibrasi kamera diatas dapat dipengaruhi oleh kondisi objek kalibrasi. Pengambilan foto kalibrasi otomatis dinilai lebih teratur dalam penempatan titik GCP yang ditandai dengan perbedaan warna, sehingga faktor kualitas foto dapat ditentukan dari pencahayaan pemotretan dan area ter-cover titik GCP, hal ini diketahui area tercover sebesar 79 %, tetapi hasil kalibrasi analitik berpengaruh pada ketelitian ekstraksi koordinat piksel foto maupun teknik pengambilan foto. Sehingga dalam melakukan kalibrasi Analitik harus memperhatikan variasi jarak antara stasiun pemotretan dengan objek untuk mengurangi kesalahan.

4.3 **Pembentukan 3D Model Objek**

4.3.1 **Pembentukan 3D Model Objek Hasil Pengolahan Kalibrasi Otomatis**

Perangkat lunak untuk pembuatan 3D model dari suatu objek berbasiskan data foto dengan menggunakan pendekatan *Structure From Motion* (SFM). Untuk merekonstruksi objek yang akan dibuat modelnya, dibutuhkan minimal 2 foto yang memuat objek tersebut. SFM akan mencari fitur yang sama antar foto (*featured based*). SFM secara otomatis menghitung posisi dan orientasi kamera. Pembentukan 3D model pada software menggunakan metode *image matching* dengan algoritma SIFT.

Pengolahan foto menjadi 3D Model dilakukan beberapa tahapan seperti, reseksi spasial secara otomatis dan secara manual, georeferencing, pembentukan *Digital Surface Model* (DSM) untuk mendapatkan bentuk permukaan objek, dan pada akhirnya dapat dilakukan perhitungan volume. Reseksi spasial secara otomatis dilakukan untuk mendapatkan posisi stasiun kamera dan orientasi sudut terhadap posisi objek, sedangkan reseksi spasial secara manual digunakan sebagai titik GCP lapangan. Adapun data koordinat lapangan dapat dilihat dalam tabel 4.12.

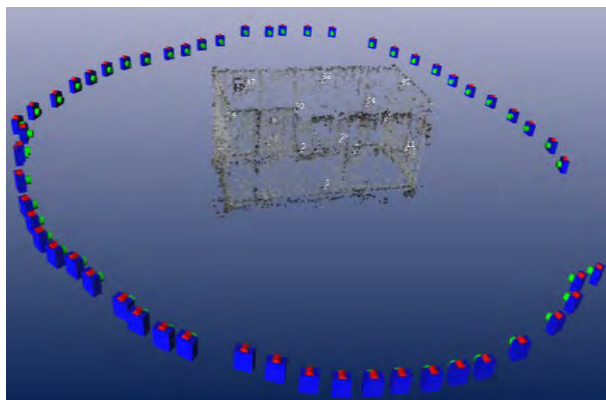
Tabel 4.12 Titik GCP Lapangan (satuan meter)

Titik	X	Y	Z	Keterangan
1	1,235	0,000	2,195	Depan
2	2,906	0,000	0,338	
3	3,740	0,000	1,263	
4	4,582	0,000	2,275	
5	5,427	0,000	1,289	
6	6,040	0,829	0,526	Kiri
7	5,140	2,430	1,370	Belakang

Tabel 4.12 Titik GCP Lapangan (lanjutan)

Titik	X	Y	Z	Keterangan
8	4,308	2,430	0,353	Belakang
9	3,469	2,430	2,175	
10	1,795	2,430	0,416	
11	0,992	2,430	2,062	
12	0,050	0,485	2,040	Kanan

Foto yang digunakan untuk membentuk model 3D berjumlah 56 buah foto dengan jarak antara stasiun adalah 1 meter dan jarak antara kamera terhadap objek rata-rata 4 m. Posisi pengambilan foto kamera tegak lurus terhadap objek. Bagian atas objek tidak dilakukan pengambilan foto karena dianggap memiliki permukaan yang rata. Gambar 4.15 merupakan hasil reseksi spasial foto bertampalan dan tampilan posisi stasiun kamera.

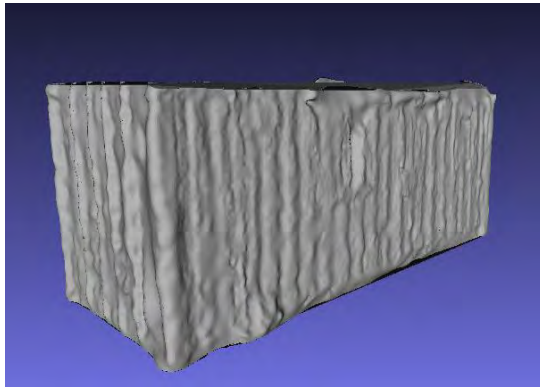


Gambar 4.15 Posisi Stasiun Kamera dan Reseksi Spasial Secara Otomatis dan Manual



Gambar 4.16 Hasil *Dense Surface Modelling* Untuk Pembentukan *Point Cloud*

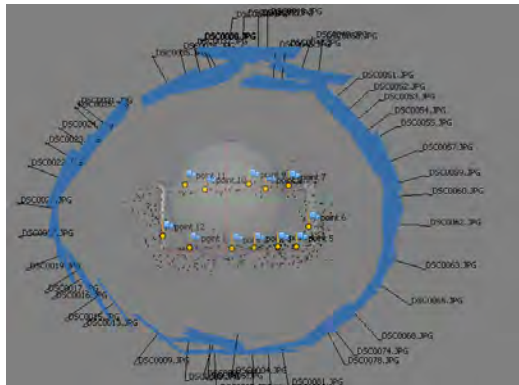
Point Cloud hasil pengolahan data dapat dibentuk setelah melakukan proses pembentukan DSM dan triangulasi. Gambar 4.16 merupakan hasil *point cloud* yang dilakukan pada foto yang bertampalan. Selanjutnya melakukan *triangulation* untuk mendapatkan 3D Model solid (gambar 4.17).



Gambar 4.17 Hasil 3D Model Setelah Melakukan Proses *Triangulation*

4.3.2 Pembentukan 3D Model Objek Hasil Pengolahan Kalibrasi Analitik

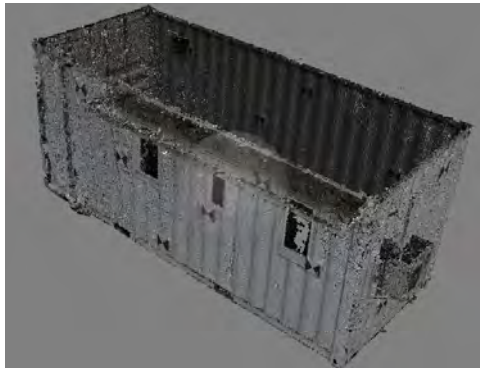
Pengolahan foto 3D CRP dilakukan secara otomatis menggunakan perangkat pengolahan CRP. Proses tersebut terdiri dari proses reseksi spasial yang dilakukan secara otomatis antar foto yang sesuai, pembentukan *point cloud*, serta pembentukan DEM. Jumlah foto yang digunakan berjumlah 48 foto. Teknik pengambilan foto sesuai dengan *frame* (area) pengambilan foto pada saat melakukan kalibrasi dengan jarak antara stasiun rata-rata 1 meter.



Gambar 4.18 Stasiun Pengambilan Foto Objek Dilihat dari Atas

Proses pembentukan *point cloud* dilakukan untuk mendapatkan permukaan dari objek. Software akan mencari titik yang bertampalan dari foto keseluruhan menggunakan metode *Image Matching* algoritma SIFT. *Point cloud* tersebut dilakukan setelah melakukan poses georeferencing pada titik GCP yang telah ditentukan. *Point cloud* tersebut dilakukan proses *Mesh* untuk mendapatkan bentuk 3D solid. Proses ini menggunakan pendekatan

interpolasi *Triangulated Irregular Networks* (TIN). Bentuk inilah kemudian dapat dibentuk DEM dan perhitungan volume. Untuk mendapatkan hasil yang lebih baik dapat dilakukan proses editing 3D model, seperti kalsifikasi bentuk objek dengan cara melakukan *selection* atau menghilangkan *noise* diluar objek, untuk menutupi lubang, serta pemberian tekstur untuk mendapatkan visualisasi 3D Model yang lebih baik.



Gambar 4.19 Hasil Pembentukan *Point Cloud* Sebelum Proses *Editing*



Gambar 4.20 Hasil Pembentukan *Point Cloud* Setelah Melakukan Proses *Editing*

4.3.3 Analisa Hasil Bentuk 3D Objek

Analisa hasil bentuk 3D objek dapat dilihat dari ketelitian planimetris model dan visualisasi 3D Model. Koordinat GCP diperlukan dalam proses gereferencing. Koordinat GCP yang digunakan adalah koordinat pada tabel 4.12. Perbedaan posisi titik GCP pada satu foto dengan foto yang lain dapat mempengaruhi kesalahan GCP, sehingga harus dipastikan titik GCP pada foto harus sesuai.

Analisa bentuk 3D Model hasil kalibrasi otomatis pada pengolahan foto masih terdapat kekurangan. Pada gambar 4.16 diatas proses pembentukan *point cloud* belum sempurna. Dilihat dari bentuk DSM yang tidak tertutupi. Adapun faktor penyebabnya seperti kualitas foto, metode pengambilan foto serta terdapat objek lain yang dapat menghalangi pembentukan 3D Model. Kualitas foto dapat dipengaruhi dengan pencahayaan yang kurang, hal ini mengakibatkan pembentukan DEM yang kurang baik. Analisa Planimetris dapat dilihat dari data orientasi relatif secara otomatis dan manual. Secara otomatis berjumlah 11.706 titik, sedangkan jumlah titik orientasi relatif secara manual berjumlah 12 titik.

Hasil Pada pengolahan foto dengan 12 titik GCP pada model kalibrasi analitik memiliki RMSE 0,359 piksel atau 0,002 mm. Nilai RMSE tersebut < 1 piksel. Ukuran 1 piksel pada foto sama dengan 0,006 mm pada koordinat foto. Analisa bentuk 3D Model hasil kalibrasi objek kontainer dapat dilihat pada gambar 4.20. Gambar tersebut terlihat sempurna dan memiliki tekstur yang jelas pada permukaan objek. Pada bagian atas dan bawah dapat tertutup secara otomatis sehingga pembuatan DEM dapat dilakukan dengan sempurna. Bentuk

permukaan yang bergelombang juga dapat dibedakan dari bentuk 3D Model ini. Hal ini metode *image matching* pada pengolahan foto ini memiliki kualitas yang bagus. Data DEM dan perhitungan volume secara akurat dapat dilakukan pada perangkat lunak perhitungan volume. Perangkat lunak tersebut juga bisa menampilkan bentuk 3D Model objek kontainer.

4.4 Hasil dan Analisa Pengukuran Pita Ukur

4.4.1 Pengukuran titik GCP

Pengukuran jarak horisontal dengan pita ukur merupakan penerapan panjang yang diketahui pada pita berpembagian skala langsung pada sebuah garis beberapa kali. Metode pengukuran jarak dengan pita ukur dengan mengurangi bacaan skala pita ukur dibelakang dengan bacaan skala pita ukur didepan. Untuk mengurangi kesalahan dalam pengukuran ini maka dilakukan pengukuran berulang kali. Jika panjang objek yang diukur lebih kecil dari panjang pita ukur yang digunakan, maka langsung dapat ditentukan jarak ketia titik tersebut. Dalam hal ini menggunakan pita ukur 30 m, sedangkan jarak objek kontainer maksimal sebesar 6,040 meter sehingga dapat ditentukan jarak antara titik tanpa dilakukan pengukuran bertahap. Untuk mendapatkan koordinat X, Y dan Z pada suatu titik, maka dilakukan pengukuran jarak horisontal. Pengukuran horisontal dilakukan jika potongan garis antar titik terletak pada bidang yang datar. Sehingga diperlukan pembagian grid pada objek kotak dalam penempatan titik-titik GCP. Adapun penggunaan pengukuran dalam penelitian ini adalah untuk mengukur posisi 16 titik GCP kalibrasi analitik (tabel 4.3), pengukuran GCP

lapangan (tabel 4.12) dan pengukuran perhitungan volume.

Pengukuran perhitungan volume objek kotak menggunakan perhitungan volume bangun ruang balok, sehingga data yang digunakan adalah jarak panjang, lebar dan tinggi. Panjang diukur searah pada sumbu X, lebar pada sumbu Y dan tinggi pada sumbu Z. Untuk mengurangi kesalahan pengukuran volume tersebut maka dilakukan pengukuran lebih pada masing-masing sisi sebanyak 2 kali, sehingga jumlah pengukuran sebanyak 8 kali.

Tabel 4.13 Hasil Pengukuran Data Volume Bangun Ruang

Pengukuran	Nilai Terukur (m)		
	Panjang	Lebar	Tinggi
1	6,042	2,431	2,570
2	6,042	2,430	2,570
3	6,043	2,432	2,571
4	6,042	2,432	2,572
5	6,042	2,431	2,572
6	6,043	2,432	2,571
7	6,043	2,432	2,570
8	6,042	2,433	2,572
Jumlah	48,339	19,453	20,568
Rata-rata	6,042	2,432	2,571
Std. Deviasi	0,0005	0,0009	0,0009

4.4.2 Analisa Pengukuran Pita Ukur

Hasil pengukuran volume bangun ruang menggunakan pita ukur memiliki standar deviasi panjang, lebar dan tinggi sebesar 0,0005 m ; 0,0009 m ; dan 0,0009. Dari tabel diatas dapat dilihat range pada data panjang sebesar 1 mm, data lebar dan tinggi sebesar 2 mm. Standar

deviasi pengukuran tersebut relatif kecil sehingga perhitungan volume lebih teliti. Tetapi kondisi dilapangan membutuhkan waktu yang banyak dalam melakukan pengukuran. Untuk meminimalisir kesalahan sebaiknya tidak hanya melakukan pengukuran berulang, tetapi juga melakukan kalibrasi alat pita ukur.

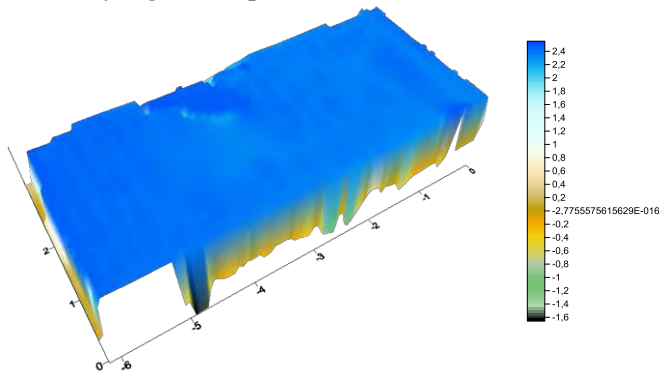
4.5 Analisa Hasil Perhitungan Volume

Hasil perhitungan volume metode CRP dan pita ukur dapat dilihat pada tabel 4.14. Perhitungan volume menggunakan metode *Gridding* pada perangkat pengolahan Volume. Volume objek kontainer berbentuk kotak jika dihitung menggunakan alat ukur pita ukur adalah 37,76 m³. Perhitungan volume tersebut menggunakan data panjang, lebar dan tinggi. Adapun hasil volume kontainer dengan menggunakan metode CRP hasil kalibrasi otomatis adalah sebesar 38,098 m³ dengan selisih 0,887 %, sedangkan perhitungan volume hasil kalibrasi analitik sebesar 38,288 m³ dengan selisih 1,398 % terhadap hasil pita ukur.

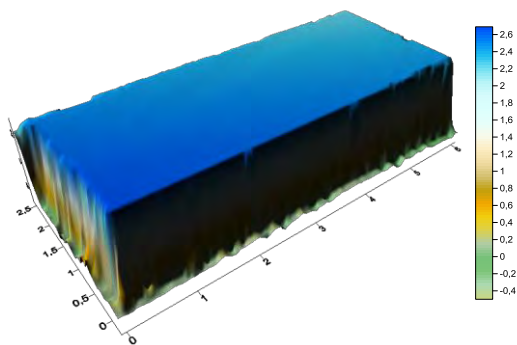
Tabel 4.14 Hasil Perhitungan Volume Objek

Hasil Pengolahan Data	Pita ukur	CRP hasil kalibrasi Otomatis	CRP hasil kalibrasi Analitik
X Minimum (m)	0,000	0,0005	-0,068
X Maximum (m)	6,042	6,166	6,130
Y Minimum (m)	0,000	-0,126	-0,025
Y Maximum (m)	2,431	2,52	2,590
Elevasi Minimum (m)	0,000	0,013	-0,499
Elevasi Maximum (m)	2,571	2,607	2,690
Volume (m ³)	37,760	38,098	38,288
Selisih Volume (m ³)		0,335	0,528
Persentase Selisih Volume (%)		0,887	1,398

Dari hasil tersebut maka dapat disimpulkan bahwa hasil volume kalibrasi otomatis memiliki perbedaan lebih kecil dari hasil volume kalibrasi analitik. Perbedaan nilai ini dipengaruhi oleh hasil pembentukan DEM pada *software* yang berbeda terhadap kedua hasil kalibrasi. Selain itu terdapat perbedaan elevasi maksimum dan minimum serta perbedaan koordinat maksimum dan minimum sumbu x dan sumbu y kedua model DEM terhadap pita ukur. Perbedaan selisih terbesar terdapat pada model kalibrasi analitik sebesar 0,499 m elevasi minimum jika dibandingkan dengan hasil kalibrasi otomatis sebesar 0,013 m. Hal ini terjadi karena pada saat pembentukan 3D Model terdapat *noise* yang disebabkan oleh buruknya kualitas foto, sehingga mengurangi kesempurnaan model objek. Karena metode SIFT sangat berpengaruh terhadap gradasi warna dalam menentukan titik-titik yang bertampalan.



Gambar 4.21 Tampilan DEM hasil Kalibrasi Otomatis



Gambar 4.22 Tampilan DEM hasil Kalibrasi Analitik

4.5.1 Analisa Uji Stastistika Validasi Koordinat 3D Model

Analisa uji statistika pada pemodelan 3D dilakukan dengan membandingkan koordinat hasil 3D Model dengan koordinat ICP (*Independent Check Point*). Kordinat ICP merupakan kordinat GCP yang tidak dimasukkan pada saat melakukan georeferencing. Perbandingan hasil koordinat ICP 3D Model dengan koordniat ICP hasil pengukuran pita ukur dilakukan menggunakan uji stastistik *t-student*. Titik ICP hasil pengukuran pita ukur berjumlah 5 titik. Distribusi persebaran titik ICP dapat dilihat dalam tabel 4.15 berikut ini.

Tabel 4.15 Koordinat ICP Hasil Pita Ukur

Titik ICP	Data Pengukuran Pita Ukur (meter)		
	X	Y	Z
1	2,070	0,000	1,403
2	6,040	1.835	2,143
3	2,635	2,43	1,358
4	0,050	2,182	0,414
5	0,000	2,430	2,570

Tabel 4.16 Koordinat ICP 3D Model

Nama	3D Model Kalibrasi Analitik			3D Model Kalibrasi Otomatis		
	X	Y	Z	X	Y	Z
ICP 1	2,076	-0,024	1,418	2,076	-0,028	1,416
ICP 2	6,061	1,933	1,869	6,031	1,897	2,138
ICP 3	2,62	2,447	1,174	2,646	2,425	1,339
ICP 4	0,047	2,044	0,372	0,071	2,074	0,414
ICP 5	0,0912	2,493	2,510	0,039	2,416	2,52
	X		Y		Z	
Standar deviasi	0,018		0,050		0,041	

Titik 1 terletak pada bagian muka kotak, titik 2 terletak pada samping kanan, titik 3 terletak pada belakang, titik 4 terletak pada samping kiri, dan titik 5 terletak pada pojok atas samping kiri kotak.

Formulasi hipotesa yang dilakukan pada uji statistika koordinat ICP dengan Koordinat 3D Model adalah sebagai berikut:

Hipotesa nol $H_0 : \mu_{\text{pitaukur}} = \mu_{\text{3DModel}}$

Hipotesa alternatif $H_1 : \mu_{\text{pitaukur}} \neq \mu_{\text{3DModel}}$

Hipotesa nol diterima atau ditolak maka dibutuhkan konsultasi terhadap tabel distribusi *t-student* dimana derajat kepercayaan yang digunakan adalah 90% dengan metode berupa *two-tailed test* dimana H_0 ditolak jika $T > t_{\alpha/2,n}$ atau $T < -t_{\alpha/2,n}$ maka $\alpha = 10\%$, maka nilai t pada tabel *t-student* bernilai 2,92 dengan derajat bebas n adalah 2. Rumus interval kesalahan yang digunakan adalah sebagai berikut :

$$\mu_{\text{pitaukur}} - t_{\alpha/2,n} \frac{s}{\sqrt{n}} < \mu_{\text{3DModel}} < \mu_{\text{pitaukur}} + t_{\alpha/2,n} \frac{s}{\sqrt{n}}$$

Koordinat 3D Model dapat diterima jika berada diantara interval kesalahan minimum dan

interval kesalahan maksimum dengan kepercayaan 90%. Hasil uji *t-student* koordinat X, Y dan Z dapat dilihat dalam tabel berikut.

Tabel 4.17 Hasil Uji *t-student* Koordinat X dalam Satuan Meter

Nama	Min. Interval	Max. Interval	3D Model Kalibrasi Analitik	3D Model Kalibrasi Otomatis
ICP1	2.039	2.101	2.076	2.076
ICP2	6.009	6.071	6.061	6.031
ICP3	2.604	2.666	2.62	2.646
ICP4	0.019	0.081	0.047	0.071
ICP5	-0.031	0.031	0.0912	0.039

Tabel 4.18 Hasil Uji *t-student* Koordinat Y dalam Satuan Meter

Nama	Min. Interval	Max. Interval	3D Model Kalibrasi Analitik	3D Model Kalibrasi Otomatis
ICP1	-0.084	0.084	-0.024	-0.028
ICP2	1.751	1.919	1.933	1.897
ICP3	2.346	2.514	2.447	2.425
ICP4	2.098	2.266	2.044	2.074
ICP5	2.346	2.514	2.493	2.416

Tabel 4.19 Hasil Uji *t-student* Koordinat Z dalam Satuan Meter

Nama	Min. Interval	Max. Interval	3D Model Kalibrasi Analitik	3D Model Kalibrasi Otomatis
ICP1	1.334	1.472	1.418	1.416
ICP2	2.074	2.212	1.869	2.138
ICP3	1.289	1.427	1.174	1.339
ICP4	0.345	0.483	0.372	0.414
ICP5	2.501	2.639	2.51	2.52

Hipotesa nol ditolak pada sumbu X dilihat pada Tabel 4.17 untuk koordinat 3D Model kalibrasi analitik hanya pada titik ICP 5, sumbu Y pada tabel

4.18 ditolak di titik ICP 2 dan ICP 4, sumbu Z pada tabel 4.19 ditolak di titik ICP2. Sedangkan koordinat 3D Model Kalibrasi otomatis ditolak hanya pada ICP5, sumbu Y ditolak di titik ICP4, dan Sumbu Z ditolak di titik ICP4. Secara umum, Koordinat hasil 3D Model Objek kalibrasi analitik dilihat dari prosentase diterimanya hipotesa nol pada koordinat X, Y dan Z berturut-turut adalah 80%, 60%, dan 80%, sedangkan koordinat 3D Model kalibrasi otomatis diterimanya hipotesa nol berturut-turut adalah 80%, 80%, dan 80%.

Predikat prosentase dapat dibagi menjadi lima kategori, yaitu sangat baik (81-100%), baik (61-80%), cukup (41-60%), kurang baik (21-40%) dan tidak baik (0-20%) (Arikunto 2010 dalam Qoyimah, 2015). Sehingga kualitas koordinat 3D Model Objek Kalibrasi Kontainer dikategorikan baik untuk sumbu X dan Z, dan cukup untuk sumbu Y. Sedangkan kualitas koordinat 3D Model Objek kalibrasi otomatis dikategorikan baik untuk sumbu X, Y dan Z. Dari penjelasan tersebut dapat disimpulkan bahwa koordinat 3D Model kalibrasi otomatis lebih akurat dari koordinat 3D Model kalibrasi analitik. Kesalahan koordinat tersebut disebabkan bentuk 3D model objek yang tidak sempurna.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

Lampiran 1

Spesifikasi Kamera DSLR NIKON D300



<i>Effective Pixel</i>	: 10 megapixel, 11 megapixel sensor photo detector
<i>Image Sensor</i>	: CCD sensor, APS-C (23.6 x 15.8 mm) sensor size
<i>Image Size (pixels)</i>	: Max resolution 3872 x 2592 other resolution 2896 x 1944 and 1936 x 1296, 3:2 image ratio
<i>Sensitivity</i>	: ISO (Auto, 100, 200, 400, 800, 1600 plus 3200 with boost), 12 white balance presets, RAW uncompressed format, JPEG quality levels (fine, normal, basic)
<i>Storage Media</i>	: SD / SDHC card
<i>Monitor</i>	: 3" screen size, 230000 screen dots, 95% viewfinder coverage, 0.8x viewfinder magnification
<i>Exposure Metering</i>	: Multi, center-weighted, spot
<i>Exposure Modes</i>	: 30 sec minimum shutter speed, 1/4000 sec maximum shutter speed, aperture priority shutter priority, manual exposure mode, subject/scene modes, built-in flash (pop-up), 12.00 m (at ISO 100) flash range, external flash, (Auto, on, off, red-eye, slow sync, rear curtain) flash modes, 3.0

	fps continuous drive, (2, 5, 10 or 20 sec) self-timer, (+ 5 at 1/3 EV, ½ EV steps) exposure compensation
Interface	: USB 2.0 (480 Mbit/sec), EyeFi wireless connected, Optional ML-L3 remote control
Power Sources	: Battery pack, Lithium-Ion ENEL9a rechargeable battery and charger, Battery life 500 CIPA
Dimensions (W x H x D)	: 126 x 97 x 64 mm (4.96 x 3.82 x 2.52")
Weight	: 536 g (1.18 lb / 18.91 oz) inc. battery

Spesifikasi Pita Ukur KOMELON UNIGRIP FLX KMC 1800 Fiber Glass



Jenis bahan	: Fiberglass
Panjang	: 30 m
Satuan	: Milimeter, cm, feet.
Buatan	: Korea
Lebar pit	: 18 mm

Lampiran 2

Kalibrasi Kamera Otomatis

Status Report Tree

Project Name: kalibrasiotomatis.pmr

Problems and Suggestions (2)

Project Problems (2)

Problem: A large percentage of your points are sub-pixel marked so it is assumed you are striving for a high accuracy result. The largest residual (Point5 - 1.32) is greater than 1.00 pixels.

Suggestion: In high accuracy projects, strive to get all point residuals under 1.00 pixels. If you have just a few high residual points, study them on each photo to ensure they are marked and referenced correctly. If many of your points have high residuals then make sure the camera stations are solving correctly. Ensure that you are using the best calibrated camera possible. Remove points that have been manually marked unless you need them.

The total photo area covered by points is 79%, which is less than the recommended 80%.

Try to take photos of the calibration grid so that marked points fill as much of the photo frame as possible. Also move the grid around the frame so overall there is good coverage across all photos. This will result in a better calibration as more of the lens will be calibrated to account for variability throughout the lens.

Problems related to most recent processing (0)

Information from most recent processing

Last Processing Attempt: Tue Nov 24 12:30:56 2015

PhotoModeler Version: 2013.0.0.911 - final,full (64-bit)

Status: successful

Processing Options

Orientation: off

Global Optimization: on

Calibration: on (full calibration)

Constraints: off

Total Error

Number of Processing Iterations: 2

Number of Processing Stages: 2

First Error: 2.123

Last Error: 2.123

Precisions / Standard Deviations

Camera Calibration Standard Deviations

Camera1: NIKON D3000 [24.00]

Focal Length

Value: 24.215677 mm

Deviation: Focal: 0.003 mm

Xp - principal point x

Value: 11.968910 mm

Deviation: Xp: 0.003 mm

Yp - principal point y

Value: 7.885502 mm

Deviation: Yp: 0.004 mm

Fw - format width

Value: 24.016717 mm

Deviation: Fw: 7.6e-004 mm

Fh - format height

Value: 16.066116 mm

K1 - radial distortion 1

Value: 1.315e-004

Deviation: K1: 1.8e-006

K2 - radial distortion 2

Value: -2.985e-008

Deviation: K2: 1.0e-008

K3 - radial distortion 3

Value: 0.000e+000

P1 - decentering distortion 1

Value: 1.654e-005

Deviation: P1: 1.8e-006

P2 - decentering distortion 2

Value: -7.089e-006
Deviation: P2: 2.0e-006

Quality

Photographs

Total Number: 12

Bad Photos: 0

Weak Photos: 0

OK Photos: 12

Number Oriented: 12

Number with inverse camera flags set: 0

Cameras

Camera1: NIKON D3000 [24.00]

Calibration: yes

Number of photos using camera: 12

Average Photo Point Coverage: 79%

Photo Coverage

Referenced points outside of the camera's calibrated coverage region:

Point Marking Residuals

Overall RMS: 0.272 pixels

Maximum: 1.317 pixels

Point 5 on Photo 12

Minimum: 0.205 pixels

Point 23 on Photo 7

Maximum RMS: 0.502 pixels

Point 9

Minimum RMS: 0.107 pixels

Point 74

Point Tightness

Maximum: 0.00083 m

Point 80

Minimum: 0.00017 m

Point 23

Point Precisions

Overall RMS Vector Length: 8.89e-005 m

Maximum Vector Length: 0.000137 m

Point 108

Minimum Vector Length: 8.54e-005 m

Point 91

Maximum X: 5.55e-005 m

Maximum Y: 6.7e-005 m

Maximum Z: 0.000108 m

Minimum X: 3.75e-005 m

Minimum Y: 3.71e-005 m

Minimum Z: 6.62e-005 m

Point Angles

Maximum: 73.65 degrees

Point 55

Minimum: 60.52 degrees

Point 2

Average: 69.52 degrees

Lampiran 3

Tabel Selisih Setiap Iterasi Kalibrasi Laboratorium pada Kelima Foto

Tabel Selisih Iterasi						
IOP	1	2	3	4	5	6
X0	-4,16980000000	-0,98350000000	-3,21160000000	1,37620000000	7,15010000000	-0,33270000000
Y0	0,00290000000	-0,00480000000	0,00093549000	-0,00120000000	0,00200000000	0,00006012200
F	-0,00003840100	0,00003896400	-0,00000040792	0,00000252860	-0,00000047615	-0,00000213010
K1	0,00000016964	-0,00000016721	-0,00000000160	0,00000000007	-0,00000000279	0,00000000654
K2	0,00014907000	0,01550000000	-0,00630000000	-0,00500000000	-0,00900000000	0,00430000000
K3	-0,00018616000	0,00740000000	-0,00460000000	-0,00090972000	-0,00240000000	0,00054335000
P1	-0,08370000000	-0,25180000000	0,15500000000	0,40950000000	-0,18920000000	-0,05010000000
P2	0,00400000000	-0,32940000000	0,19640000000	0,22860000000	-0,08320000000	-0,01040000000
B1	17,00710000000	-0,06960000000	-0,95250000000	-12,55470000000	-1,89980000000	-0,60830000000
B2	4,03650000000	-0,02870000000	-0,75110000000	-3,44810000000	-0,41220000000	0,52990000000

Tabel Selisih Setiap Iterasi Kalibrasi Laboratorium pada kelima foto (lanjutan)

IOP	7	8	9	10	11	12
X0	-0,17350000000	-0,02270000000	0,01150000000	-0,00410000000	0,00300000000	-0,00100000000
Y0	0,00000412830	-0,00010766000	0,00001208400	-0,00002419400	0,00000344840	-0,00000605390
F	-0,00000043586	0,00000225660	-0,00000024933	0,00000052918	-0,00000007181	0,00000013332
K1	0,00000000267	-0,00000001341	0,00000000147	-0,00000000320	0,00000000042	-0,00000000081
K2	-0,00015703000	-0,00003526200	0,00003754300	-0,00000596050	0,00000962850	-0,00000170780
K3	0,00002004800	0,00000818380	-0,00000179620	0,00000146090	-0,00000048932	0,00000037440
P1	0,01170000000	-0,00032138000	-0,00015863000	-0,00003840800	-0,00003787800	-0,00001058500
P2	-0,00550000000	0,00042239000	-0,00002432900	0,00001108000	-0,00000905500	0,00000266950
B1	-0,34170000000	0,04090000000	-0,08040000000	0,01140000000	-0,02080000000	0,00330000000
B2	0,29420000000	0,01280000000	0,00210000000	0,00085410000	0,00048361000	0,00023576000

Lampiran 4

Tabel Nilai Rerojection Error pada Kelima Foto (satuan mm)

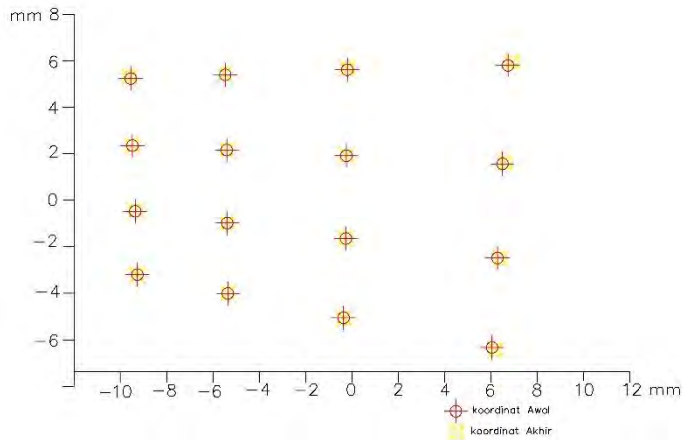
Titik	Atas Kiri		Atas Kanan		Tengah	
	X	Y	X	Y	X	Y
1	-0,008	-0,027	-0,009	-0,008	-0,010	-0,019
2	-0,006	-0,002	-0,011	0,007	-0,009	0,001
3	-0,012	0,017	-0,019	0,026	-0,016	0,020
4	-0,029	0,061	-0,035	0,064	-0,031	0,058
5	0,003	0,040	-0,012	0,050	-0,002	0,037
6	0,002	0,002	-0,001	0,010	0,003	0,003
7	0,003	0,001	0,005	0,002	0,005	0,001
8	0,006	-0,014	0,002	-0,008	0,004	-0,013
9	0,043	-0,032	0,012	-0,022	0,044	-0,040
10	0,031	-0,005	0,001	-0,001	0,025	-0,007
11	0,039	0,019	0,003	0,005	0,029	0,015
12	0,069	0,073	0,019	0,059	0,057	0,068
13	0,230	0,124	0,208	0,147	0,295	0,146
14	0,192	0,050	0,150	0,038	0,255	0,053
15	0,174	-0,004	0,137	-0,032	0,245	-0,021
16	0,175	-0,053	0,161	-0,106	0,260	-0,095

Tabel Nilai Rerojection Error pada 5 foto sataun
mm(lanjutan)

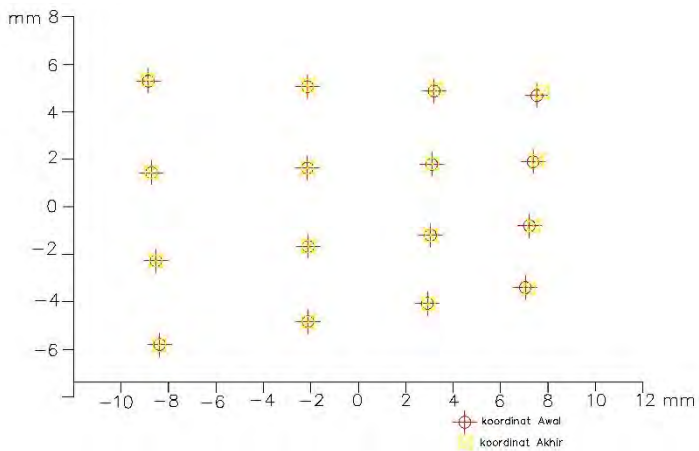
Titik	Bawah Kanan		Bawah Kiri	
	X	Y	X	Y
1	-0,009	-0,016	-0,006	-0,020
2	-0,008	0,001	-0,004	0,002
3	-0,012	0,014	-0,013	0,022
4	-0,020	0,036	-0,027	0,069
5	-0,006	0,030	0,006	0,047
6	0,002	0,005	0,002	0,004
7	0,005	0,001	0,001	0,001
8	0,002	-0,012	0,007	-0,014
9	0,013	-0,021	0,075	-0,046
10	0,002	-0,001	0,075	-0,046
11	0,005	0,007	0,055	0,024
12	0,021	0,052	0,080	0,077
13	0,195	0,153	0,252	0,121
14	0,155	0,059	0,235	0,051
15	0,144	-0,009	0,238	-0,011
16	0,171	-0,082	0,261	-0,077

Lampiran 5

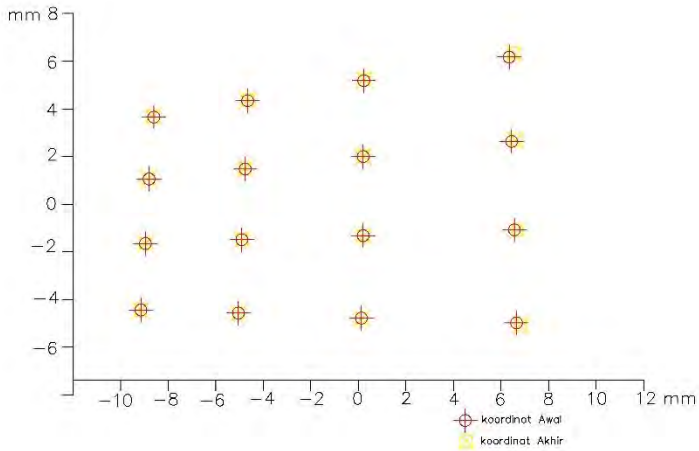
Visualisasi Kesalahan Koordinat Awal dan Koordinat Akhir Pada Foto Atas Kanan



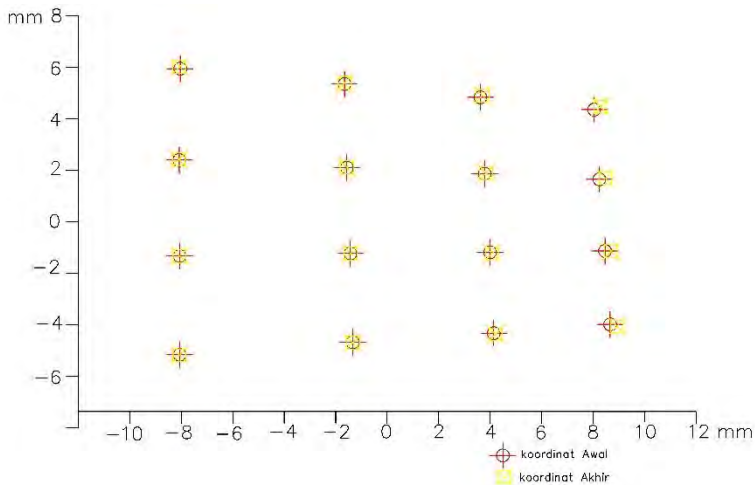
Visualisasi Kesalahan Koordinat Awal dan Koordinat Akhir Pada Foto Atas Kiri



Visualisasi Kesalahan Koordinat Awal dan Koordinat Kahir Pada Foto Bawah Kanan



Visualisasi Kesalahan Koordinat Awal dan Koordinat Kahir Pada Foto Bawah kiri



Lampiran 6

Tabel Nilai Kesalahan Radial pada kelima Foto

Titik	Atas Kiri		Atas Kanan		Tengah		Bawah kanan		Bawah kiri	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
1	-0,101	-0,026	-0,125	-0,042	-0,136	-0,072	-0,129	-0,063	-0,105	-0,068
2	-0,101	-0,026	-0,120	-0,003	-0,121	-0,019	-0,110	-0,019	-0,086	-0,012
3	-0,105	0,021	-0,129	0,037	-0,125	0,026	-0,106	0,017	-0,091	0,032
4	-0,131	0,087	-0,152	0,092	-0,145	0,084	-0,112	0,054	-0,114	0,094
5	-0,012	0,039	-0,055	0,063	-0,023	0,041	-0,035	0,039	-0,009	0,043
6	-0,003	0,003	-0,034	0,017	-0,009	0,006	-0,023	0,009	-0,002	0,004
7	-0,002	-0,002	-0,029	-0,004	-0,008	-0,004	-0,023	-0,007	0,000	-0,001
8	-0,009	-0,027	-0,041	-0,032	-0,020	-0,032	-0,040	-0,038	-0,004	-0,023
9	0,023	-0,025	0,001	-0,028	0,023	-0,034	0,004	-0,024	0,041	-0,036
10	0,013	-0,004	0,000	-0,001	0,011	-0,005	0,000	-0,001	0,041	-0,036
11	0,017	0,009	0,000	0,003	0,012	0,007	0,001	0,004	0,025	0,012
12	0,033	0,046	0,003	0,047	0,027	0,043	0,005	0,039	0,039	0,048
13	0,119	0,072	0,107	0,089	0,154	0,086	0,101	0,094	0,131	0,070
14	0,099	0,027	0,076	0,019	0,133	0,027	0,079	0,032	0,122	0,026
15	0,091	-0,007	0,073	-0,024	0,130	-0,019	0,075	-0,009	0,126	-0,013
16	0,095	-0,040	0,091	-0,085	0,145	-0,072	0,095	-0,063	0,144	-0,058

PROFIL PENULIS



Penulis dilahirkan di Gunungtua pada tanggal 25 Agustus 1993, merupakan anak kedua dari 5 bersaudara pasangan Muhammad Nasir Harahap, S.Pd dan Juraida Siregar. Penulis telah menempuh pendidikan SDN 104840 (3) Gunung Tua, SMPN 1 Padang Bolak, dan melanjutkan sekolah tingkat menengah di SMAN 1 Plus Matauli Pandan.

Penulis melanjutkan pendidikan S-1 di Jurusan Teknik Geomatika ITS melalui jalur SNMPTN Undangan pada tahun 2011 dengan NRP 3511 100 004. Penulis aktif dalam organisasi kampus, seperti menjabat sebagai Ketua Departemen Pengembangan Sumber Daya Mahasiswa HIMAGE-ITS periode 2013-2014. Penulis juga aktif mengikuti kegiatan pelatihan Kemahasiswaan seperti LKMM Pra-TD, LKMM TD, dan LKMM-TM. Pada tahun 2012-2015 tercatat sebagai penerima beasiswa berprestasi dari Yayasan Karya Salemba Empat, dan aktif dalam kegiatan paguyuban dibidang sosial masyarakat. Hingga pada tahun 2015 mendapat kesempatan mengikuti pelatihan *XL Future Leaders The Scholarship Camp I-II Batch 3* di Akmil Magelang, dan *XL Future Leaders The Scholarship Camp III-IV* Bumi Perkemahan Cibubur Jakarta.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian tugas akhir ini adalah :

1. Parameter orientasi dalam kamera pada hasil kalibrasi otomatis yaitu panjang fokus = 24,216 mm, posisi titik utama foto $X_p = 11,97$ mm, $X_p = 7,884$ mm, $K_1 = 0.0001$, $K_2 = 0.000002$, $K_3 = 0$, $P_1 = 0.00002$, dan $P_2 = 0.0000008$. Sedangkan hasil kalibrasi analitik (manual) yaitu panjang fokus = 23,358 mm, posisi titik utama foto $X_p = -0,535$, $Y_p = -0,237$ mm, $K_1 = 0,0003$, $K_2 = -0,000002$, $K_3 = 0$, $P_1 = 0,0005$ dan $P_2 = 0,0001$.
2. Perhitungan volume suatu objek dengan metode CRP dapat dilakukan dengan pembentukan 3D Model. 3D Model tersebut menghasilkan *point cloud* dan data DEM.
3. Hasil volume metode CRP dengan metode pita ukur pada objek kontainer tidak terlalu signifikan, Hasil volume kalibrasi otomatis lebih akurat terhadap perhitungan volume pita ukur, yaitu memiliki selisih 0,887 % , sedangkan hasil kalibrasi laboratorium memiliki selisih 1,398 % terhadap hasil volume pita ukur.
4. Hasil koordinat 3D model kalibrasi otomatis lebih akurat terhadap koordinat ICP pita ukur, yaitu 80% kordinat X, Y, dan Z dapat diterima, sedangkan hasil koordinat 3D model kalibrasi analitik yaitu 60 % titik koordinat Y dapat diterima dan 80 % koordinat X dan Z dapat diterima.

5.2 Saran

Saran yang diberikan untuk pengembangan tugas akhir ini adalah :

1. Titik GCP kalibrasi Laboratorium secara manual hendaknya memiliki nilai Elevasi yang berbeda terhadap posisi kamera untuk mendapatkan IOP yang lebih baik.
2. Untuk mendapatkan hasil kalibrasi kamera yang lebih teliti menggunakan *bundle adjustment self calibration* hendaknya dilakukan untuk semua foto dalam pembentukan 3D Model.
3. Perhitungan volume selanjutnya dapat dilakukan dengan objek beraturan dan tidak beraturan dengan membandingkan hasil volume CRP dengan metode Tachimetri atau *Laser Scanner*.