

Swakalibrasi Kamera Menggunakan Matriks Fundamental

Eza Rahmanita¹, Eko Mulyanto², Moch. Hariadi³

¹Program Studi Teknik Informatika, Universitas Trunojoyo Madura
Jl. Raya Telang Po Box 2 Kamal, Bangkalan 69162, Indonesia

E-mail: ¹eza_rahmanita@yahoo.com

^{2,3}Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Jl. Arif Rahman Hakim, Keputih Sukolilo, Surabaya 60111, Indonesia

E-mail: 2eko@ee.its.ac.id, 3mochar@ee.its.ac.id

Abstrak

Makalah ini membahas proses kalibrasi yang memerlukan data koordinat citra untuk bisa mendapatkan semua informasi dari kamera. Data koordinat citra diambil dari 2 view kamera. Koordinat citra dari 2 view kamera tersebut dapat terkorresponden dengan adanya matrik fundamental. Metode yang digunakan dalam swakalibrasi ini menggunakan matrik fundamental. Matrik fundamental merupakan korespondensi antarkoordinat citra pada view 1 dengan garis epipolar pada view ke-2. Titik potong garis epipolar disebut dengan titik epipole. Data tersebut dapat digunakan dalam penelitian selanjutnya pada proses rekonstruksi objek 3D.

Kata kunci: swakalibrasi, matriks fundamental, garis epipolar, titik epipole

Abstract

This paper discusses process to get all information about parameter camera, the process only used information from two views of camera about image coordinate. The image coordinate from two views of camera is correspondence with fundamental matrix. For this selfcalibration using fundamental matrix. The fit of fundamental matrix can get the correspondence image coordinate at one view of camera with the epipolar line at another view of camera. All epipolar line intersection at a point called epipole. The fit from this research can be used for process for reconstruction object.

Keywords: selfcalibration, fundamental matriks, epipolar line, epipole point

Pendahuluan

Kalibrasi kamera merupakan proses awal yang dilakukan dalam banyak aplikasi bidang *machine vision*, fotogrametri, robotika, dan proses rekonstruksi objek 3D. Pada proses kalibrasi klasikal dilakukan untuk mencari parameter intrinsik dan parameter ekstrinsik menggunakan citra 2D suatu objek, yang dikorespondensikan dengan koordinat 3D objek tersebut, dengan kata lain korespondensi ini merupakan transformasi antar sistem koordinat. Citra memiliki sistem koordinat, kamera memiliki sistem koordinat, dan ruang kalibrasi juga memiliki sistem koordinat, disebut koordinat dunia. Objek yang digunakan untuk mencari korespondensi berupa kotak papan catur hitam-putih (*tsai grid*) berukuran 8×8 dengan 49 *initial point*, diletakkan pada ruang kalibrasi yang didesain khusus. Pada perhitungan parameter intrinsik, dilakukan transformasi antara sistem koordinat kamera (X_c, Y_c, Z_c) (koordinat kamera berhimpit dengan koordinat dunia) dengan sistem koordinat Citra (X_{pix}, Y_{pix}, f). Pada perhitungan parameter ekstrinsik,

dilakukan transformasi antara sistem koordinat kamera dengan koordinat dunia.

Dengan kerumitan dari proses kalibrasi klasikal maka pada proses swakalibrasi hanya diperlukan koordinat image untuk bisa mendapatkan semua informasi dari kamera baik berupa parameter intrinsik dan parameter ekstrinsik dari kamera. Semua informasi tersebut diperoleh dari nilai matriks fundamental. Sedangkan matriks fundamental diperoleh dari hubungan koordinat image yang diambil dari 2 view kamera.

Metode Penelitian

Koordinat Kamera dan Koordinat Dunia

Bila kedua sistem sumbu (kamera dan dunia) pada gambar 1 dihimpitkan, maka objek (pada ruang dunia) dan bayangan (pada bidang citra) akan membentuk segitiga sama dan sebangun, sehingga bentuk transformasi dari koordinat 3D dunia (x_S, y_S, z_S) ke koordinat kamera (x_i, y_i, f) adalah sebagai berikut:

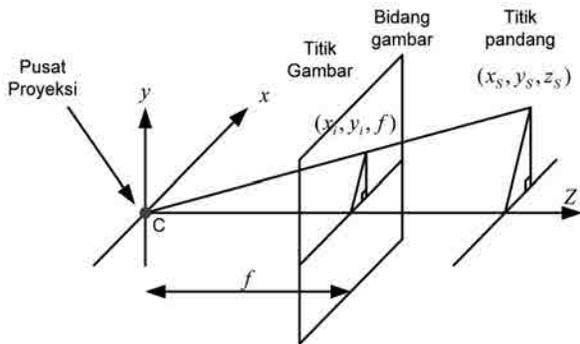
$$x_i = f \frac{x_s}{z_s} \dots\dots\dots (1)$$

$$y = f \frac{y_s}{z_s} \dots\dots\dots (2)$$

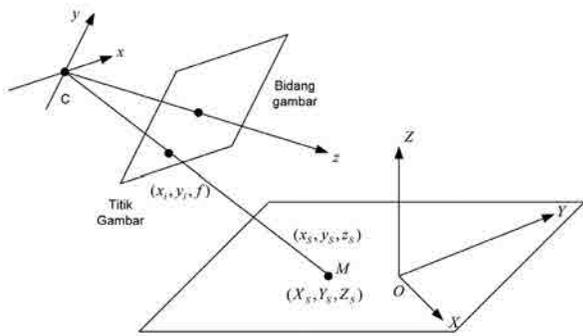
$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \\ 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (3)$$

$$x_i = u / w \dots\dots\dots (4)$$

$$x_s = v / w \dots\dots\dots (5)$$

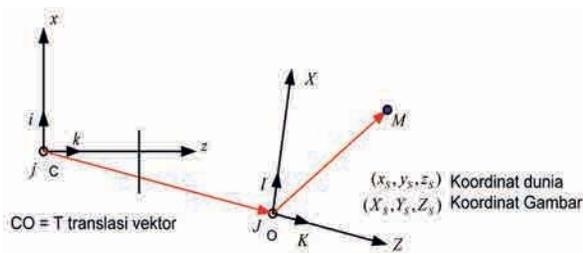


Gambar 1. Koordinat dunia dan gambar dalam vektor homogenous.



Gambar 2. Koordinat kamera ke koordinat dunia.

Berdasarkan gambar tersebut selanjutnya ditransformasikan ke dalam vektor pada seperti gambar 3.



Gambar 3. Transformasi ke dalam vektor

$$CM = CO + OM \dots\dots\dots (6)$$

$$x_s i + y_s j + z_s k = T_x i + T_y j + T_z k + A_s i + Y_s j + Z_s k \dots\dots\dots (7)$$

$$X_s = T_s + X_s I_i j + Y_s J_i i + Z_s K_i j \dots\dots\dots (8)$$

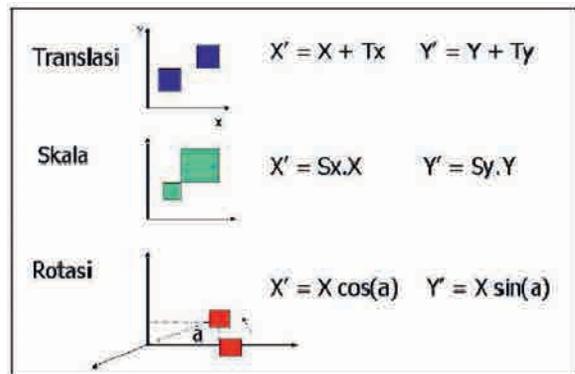
$$\begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_i & J_i & K_i \\ I_j & J_j & K_j \\ I_k & J_k & K_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{bmatrix} \dots\dots\dots (9)$$

$$\begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_i & J_i & K_i & T_x \\ I_j & J_j & K_j & T_y \\ I_k & J_k & K_k & T_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \\ 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (10)$$

$$\begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & T \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \\ 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (11)$$

Transformasi Geometrik

Transformasi Geometrik adalah transformasi berdasarkan perpindahan geometrik suatu titik. Transformasi ini terdiri dari translasi, skala dan rotasi. Gambar 4 adalah contoh dari masing-masing transformasi geometrik untuk model 2 dimensi. Diperlukan suatu representasi yang seragam (homogeneous representation) agar memungkinkan dilakukannya transformasi komposit secara efisien dan dapat menyimpan faktor normalisasi koordinat akibat transformasi yang dilakukan berturut-turut. Representasi hogeneous ini biasanya dalam bentuk matriks.



Gambar 4. Transformasi geometrik

Secara umum, transformasi geometrik ini dilakukan melalui proses perkalian dengan matriks transformasi. Bentuk matriks transformasi tersebut adalah sebagai berikut:

a) Translasi sejauh (T_x, T_y, T_z)

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & T_x \\ 0 & 1 & 0 & T_y \\ 0 & 0 & 1 & T_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (12)$$

b) Rotasi dengan sumbu pusat sebesar α derajat.

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & \sin(\alpha) & 0 \\ 0 & -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (13)$$

c) Skala dengan faktor S

$$\begin{bmatrix} S_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & S & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(14)$$

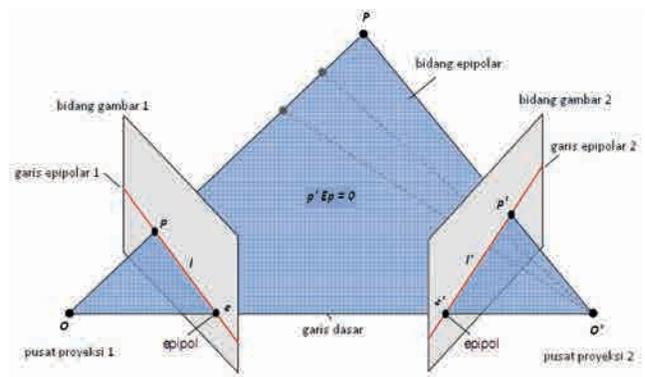
d) Matrix transformasi perspektif

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{\lambda} & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(15)$$

Tanda minus artinya gambar objek terbalik, adalah jarak pusat lensa, dan $\frac{1}{\lambda}$ merupakan faktor skala. Koordinat objek pada sistem kamera dapat diturunkan dari koordinat objek pada sistem dunia dengan menggunakan transformasi perspektif.

Epipolar Geometry

Epipolar geometry seperti terlihat pada gambar 5 ada beberapa istilah antara lain pusat proyeksi (*center of projection*) O, O' merupakan titik pusat kamera dari bidang gambar citra dalam sistem koordinat 3D (*image plane*), garis dasar (*base line*) merupakan garis yang menghubungkan antara pusat kamera 1 dengan pusat kamera 2. Bidang epipolar (*epipolar plane*) merupakan persamaan bidang yang dibentuk dari tiga titik P, O



Gambar 5. Epipolar Geometry [1]

dan O' , perpotongan antara bidang epipolar dengan bidang gambar disebut garis epipolar (*epipolar line*). Titik perpotongan antara garis epipolar dengan garis dasar pada bidang gambar e, e' disebut epipol.

Perhatikan gambar 2.5 $\overrightarrow{Op}, \overrightarrow{OO'}, \overrightarrow{O'p}, \overrightarrow{O'p}, \overrightarrow{Op}, \overrightarrow{OO'}, \overrightarrow{O'p}$ adalah sebidang maka didapatkan persamaan

$$p' [tx(Rp)] = 0 \quad (2.10)$$

$$p = (u, v, 1)^T$$

$$p' = (u', v', 1)^T \dots\dots\dots (16)$$

Sehingga didapatkan Fundamental matrik

$$F = [tx]R = SR$$

Jika F fundamental matrik dari camera (P, P') dan F^T fundamental matrik dari kamera (P', P) maka epipolar line l dan l' di mana p dan p' merupakan proyeksi dari titik P pada bidang gambar

$$l = Fp \quad l' = FT P' \dots\dots\dots (17)$$

Karena epipol berada pada garis epipolar $l'=Fp$ maka epipole e dapat dihitung dengan persamaan 18 berikut.

$$(e'^T F) p = 0 \text{ sehingga } e'^T F = 0 \text{ dan } F e = 0 \dots\dots (18)$$

Estimasi Matrik Fundamental

Berdasarkan persamaan (18) untuk menentukan nilai F di bawah ini akan ditulis F sebagai 9 vektor dari f dengan persamaan:

$$Af = 0$$

Dengan A =

$$A = \begin{bmatrix} x'_1 x_1 & x'_1 y_1 & x'_1 & y'_1 x_1 & y'_1 y_1 & y'_1 & x_1 & y_1 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ x'_n x_n & x'_n y_n & x'_n & y'_n x_n & y'_n y_n & y'_n & x_n & y_n & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

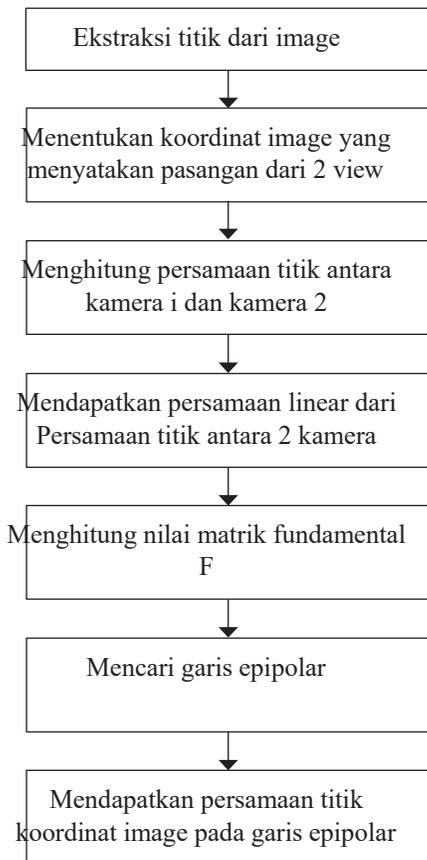
$$f = [F_{11}, F_{12}, F_{13}, F_{21}, F_{22}, F_{23}, F_{31}, F_{32}, F_{33}]^T \dots \dots \dots (20)$$

di mana

$$m_i = [x_i, y_i, 1]^T, m'_i = [x'_i, y'_i, 1]^T (i = 1, \dots, n)$$

Desain Umum

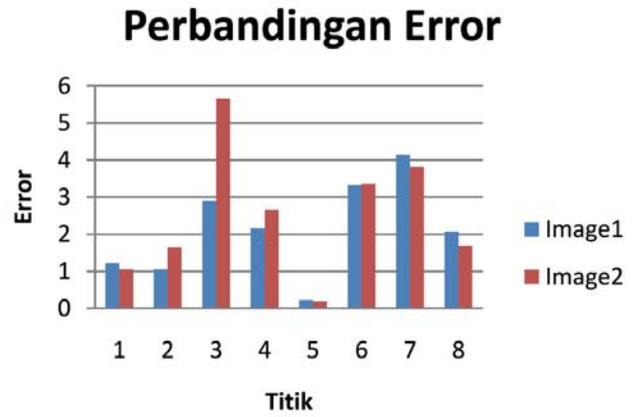
Secara umum, desain sistem swakalibrasi multiview kamera beberapa tahapan proses, tahap pertama sbb;



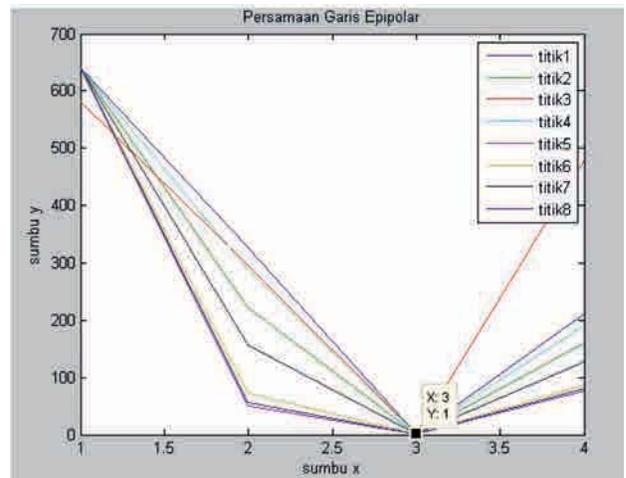
Gambar 6. Alur proses swakalibrasi kamera

Hasil dan Pembahasan

Untuk hasil eksperimen yang akan dibahas adalah hasil eksperimen untuk data masukan delapan titik dan data masukan sepuluh titik.



Gambar 7. Grafik Perbandingan Error Data Masukan Delapan Titik

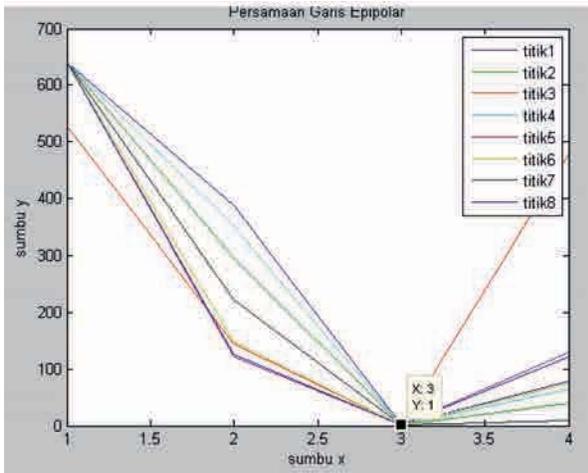


Gambar 8. Persamaan Garis Epipolar Pada Kamera 1

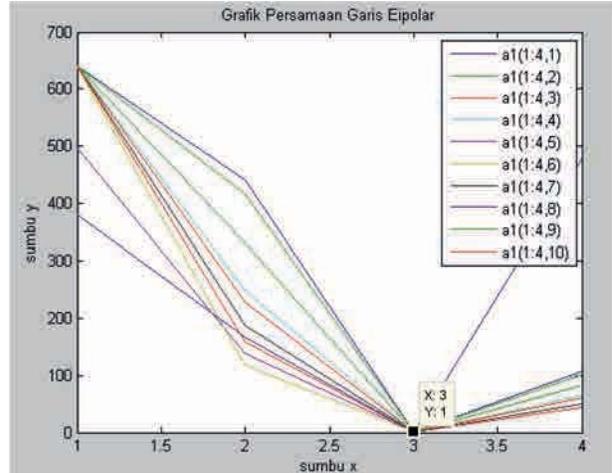
error untuk data masukan delapan titik ada kamera 1 dan kamera 2. Dapat dilihat pada gambar 8 error pada citra1 mempunyai rata-rata error sebesar 2,136 pixel dan simpangan baku sebesar 1,207 pixel. Sedangkan rata-rata error untuk citra 2 sebesar 2,51 pixel dan simpangan baku sebesar 1,629 pixel.

Berdasarkan informasi yang ada dapat digambarkan persamaan garis epipolar pada citra 1 (Gambar 8).

Berdasarkan gambar 8 dapat diamati bahwa semua garis epipolar berpotongan pada satu titik. Titik potong dari semua garis epipolar inilah yang disebut dengan epipole. Jadi epipole dari persamaan garis pada kamera 1 adalah (3,1). Sedangkan gambar dari persamaan garis epipolar untuk kamera 2 (Gambar 9).



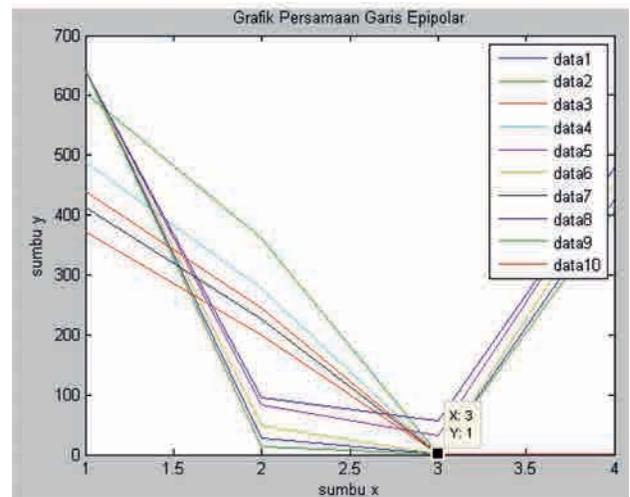
Gambar 9. Persamaan Garis Epipolar Pada kamera 2



Gambar 11. Persamaan Garis Epipolar Kamera 5



Gambar 10. Grafik perbandingan error data masukan sepuluh titik.



Gambar 12. Persamaan Garis Epipolar Kamera 6

Berdasarkan gambar 9 dapat diamati bahwa semua garis epipolar berpotongan pada satu titik. Titik potong dari semua garis epipolar inilah yang disebut dengan epipole. Jadi epipole dari persamaan garis pada image 2 adalah (3,1). Sedangkan eksperimen selanjutnya adalah simulasi data masukan sepuluh titik dengan hasil analisis berupa grafi perbandingan error (Gambar 10).

Pada grafik 10 untuk error pada citra 1 mempunyai rata-rata error sebesar 6,62 pixel dan simpangan baku sebesar 6,9 pixel. Sedangkan rata-rata error untuk citra2 sebesar 8,67 pixel dan simpangan baku sebesar 11,3 pixel.

Dari informasi yang ada dapat digambarkan persamaan garis epipolar pada citra 1 (Gambar 11).

Pada gambar 11 dapat diamati bahwa semua garis epipolar berpotongan pada satu titik. Titik potong dari semua garis epipolar inilah yang disebut dengan epipole. Jadi epipole dari persamaan garis pada kamera 5 adalah (3,1). Sedangkan gambar dari persamaan garis

epipolar untuk kamera 6 (Gambar 12).

Pada gambar 12 dapat diamati bahwa semua garis epipolar berpotongan pada satu titik. Titik potong dari semua garis epipolar inilah yang disebut dengan epipole. Jadi epipole dari persamaan garis pada kamera 6 adalah (3,1). Berdasarkan hasil eksperimen di atas baik untuk data masukan delapan titik dan data masukan sepuluh titik semua menunjukkan hasil bahwa garis epipolar menunjukkan korespondensinya dengan koordinat citra dengan adanya matrik fundamental. Dan keberhasilan korespondensi ini dengan memperoleh nilai error yang kecil. Error di sini adalah menunjukkan selisih antara garis epipolar dengan koordinan citra. Untuk semua eksperimen juga mendapatkan hasil titik epipole pada koordinat yang sama baik untuk eksperimen menggunakan data masukan delapan titik maupun data masukan sepuluh titik.

Simpulan

Pada makalah ini telah dibahas proses kalibrasi yang memerlukan data koordinat citra untuk bisa mendapatkan semua informasi dari kamera. Data koordinat citra diambil dari 2 view kamera. Koordinat citra dari 2 view kamera tersebut dapat terkorresponden dengan adanya matrik fundamental. Metode yang digunakan dalam swakalibrasi ini menggunakan matrik fundamental. Matrik fundamental merupakan korespondensi antarkoordinat citra pada view 1 dengan garis epipolar pada view ke-2. Titik potong garis epipolar disebut dengan titik epipole.

Berdasarkan hasil perhitungan dan pengujian terhadap matriks fundamental dengan menggunakan algoritma 8 titik, dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Hasil Simulasi 8 titik pengamatan mempunyai rata-rata error sebesar 2,13 dengan simpangan baku sebesar 1,2.

2. Hasil Simulasi 10 titik mempunyai rata-rata error sebesar 6,6 dengan simpangan baku sebesar 8,6.
3. Epipole adalah perpotongan semua persamaan garis epipolar. Dalam simulasi semua titik epipole berada pada koordinat (3,1).

Daftar Pustaka

- [1] Hartley, R. dan Zisserman, A. (2004), "*Multiple View Geometry in Computer Vision*," Cambridge University Press,
- [2] Svoboda, T., Martines, D. dan Pajdla, T., (2005) "A Convenient Multi-Camera Self-Calibration for Virtual Environments, *Center for Machine Perception*, vol. 14, no. 4. Pp. 1–24.