

Rekonstruksi Objek 3D dari *Multiple Images*

Rachmawati¹, Risanuri Hidayat², Sunu Wibirama³

Abstract - 3D reconstruction is a task of recovering 3D geometry and color information. There are two categories of 3D object reconstruction: active method, 3D model acquisition can be performed by laser scanner or structured light. Passive methods, reconstruct 3D models by image sequences from a single camera or multiple cameras. Object scanning often demand expensive equipment and special skill to operate. As a simple and low cost approach, 3D reconstruction based images became more popular among the researches. In this study apply passive reconstruction technique, the reconstruction of 3D objects made using images taken from different viewpoint leading to the same object using a digital camera. To determine the corresponding points of the two views used *epipolar geometry* and Direct Linear Triangulation algorithm (DLT). All required parameters are extracted from the image itself, without any calibration of the camera before. The reconstruction process can be divided into four parts: first, feature point extraction. Second estimate the fundamental matrix from point correspondences, third compute the camera matrix, and the end compute 3D point from image points. All the required parameters are recovered from the images. As objects of experiment used a miniatur of a statue. Experiment result show the residual error from estimation fundamental matrix is 9.9051×10^{-04} , and reprojection error 1.714×10^{-03} pixel. Visually, the reconstructed 3D model resemble the shape of the original object.

Intisari - Rekonstruksi 3D merupakan proses untuk memperoleh kembali informasi geometri 3D dan warna. Teknik rekonstruksi objek tiga dimensi terbagi menjadi 2 kategori, yaitu metode aktif: akuisisi model 3D dapat dilakukan dengan laser scanner atau cahaya terstruktur. Metode pasif: rekonstruksi model 3D dengan sekumpulan gambar dari sebuah atau beberapa kamera. *Object scanning* terkadang membutuhkan peralatan yang mahal dan keahlian khusus untuk mengoperasikan. Sebagai pendekatan yang sederhana dan murah, rekonstruksi objek berdasarkan gambar menjadi lebih populer bagi para peneliti. Pada penelitian ini menerapkan teknik rekonstruksi pasif, rekonstruksi objek 3D dilakukan dengan menggunakan citra yang diambil dari posisi yang berbeda yang mengarah ke obyek yang sama menggunakan sebuah kamera digital sederhana. Untuk menentukan titik-titik persamaan dari kedua citra tersebut digunakan *epipolar geometry* dan komputasi titik 3D menggunakan algoritma *Direct Linear Triangulation* (DLT). Semua parameter yang dibutuhkan diekstrak dari citra itu sendiri, tanpa dilakukan kalibrasi kamera sebelumnya. Tahapan rekonstruksi dapat dibagi menjadi empat bagian: pertama, ekstraksi titik fitur, kedua menghitung fundamental matrik dari titik - titik yang

berkoresponden, ketiga menghitung matrik kamera dan terakhir mendapatkan titik-titik 3D untuk semua pasangan titik citra. Sebagai obyek penelitian adalah sebuah miniatur patung. Dari hasil rekonstruksi patung dari menggunakan citra dengan resolusi 1824×1368 pixel diperoleh residual error 9.9051×10^{-04} dan reproyeksi error 1.714×10^{-03} . Secara visualisasi model 3D yang dihasilkan menyerupai bentuk obyek aslinya.

Kata Kunci - rekonstruksi 3D, citra, matriks fundamental, *epipolar geometry*.

I. PENDAHULUAN

Seiring berkembangnya teknologi di bidang Teknologi Informasi dan Komputer, teknologi tiga dimensi (3D) juga ikut berkembang pesat. Para peneliti telah melakukan berbagai upaya untuk melakukan rekonstruksi objek 3D dari citra dua dimensi. Pada masa lampau, proses pengenalan dan rekonstruksi objek 3D ini banyak digunakan pada aplikasi robotika. Saat ini, kebutuhan untuk memvisualisasikan objek 3D banyak digunakan dalam aplikasi animasi dan grafis, arsitektur, pendidikan dan pengenalan budaya, maupun *virtual reality* [1]. Pemodelan 3D dari bangunan bersejarah pun sudah menjadi perhatian dalam beberapa dekade terakhir. Rekonstruksi 3D dapat merupakan dokumentasi untuk rekonstruksi atau restorasi jika bangunan tersebut hancur, dan dapat dijadikan sumber untuk pendidikan bagi pelajar sejarah dan budaya serta para peneliti. Banyak aplikasi membutuhkan keakuratan aspek geometri, detail dan kualitas tampilan yang tinggi.

Penelitian di bidang rekonstruksi objek 3D dan pemodelan berbasis citra 2D sering dikategorikan pada lingkup 3D *vision* di bidang pengolahan citra digital atau *computer vision*. 3D *vision* secara garis besar membahas bagaimana manusia mempersepsikan objek 3D pada sistem penginderaannya. Teknik rekonstruksi objek tiga dimensi terbagi menjadi 2 kategori, yaitu teknik aktif dan teknik pasif. Teknik aktif (*object scanning*) memerlukan kendali pada cahaya yang terstruktur. Beberapa peneliti menggunakan sebuah kamera dan sebuah proyektor atau *viewer* untuk menghasilkan cahaya terstruktur [1]. Peneliti lain menggunakan *laser beam* dan sebuah kamera video. Teknik pasif dilakukan dengan mengambil menggunakan dua atau lebih citra dari sebuah obyek dari berbagai macam posisi dengan kamera [2][3]. Teknik ini sering dikenal dengan adopsi *photogrammetry* atau *structure from motion*. *Object scanning* terkadang membutuhkan peralatan yang mahal dan keahlian khusus untuk mengoperasikan. Sebagai pendekatan yang sederhana dan murah, rekonstruksi objek berdasarkan gambar menjadi lebih populer bagi para peneliti [4]. Pada awalnya penelitian di bidang ini terfokus pada kamera terkalibrasi, namun pada perkembangan selanjutnya rekonstruksi 3D dapat juga

¹Jurusan Teknik Elektro dan Teknologi Informasi Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia, Yogyakarta, Indonesia (email: zata_ama@yahoo.com)

^{2,3}Jurusan Teknik Elektro dan Teknologi Informasi Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia (email: risanuri@te.ugm.ac.id, sunu@jtet.ugm.ac.id)

dilakukan dengan kamera tidak terkalibrasi. Parameter kamera ditentukan dari korespondensi antar citra yang berbeda dalam satu urutan. Semua parameter yang dibutuhkan untuk proses rekonstruksi diekstrak dari pasangan citra tersebut.

II. KAJIAN PUSTAKA

A. Model Kamera dan Transformasi Perspektif

3D vision bertujuan untuk mendapatkan informasi 3D dari tampilan 2D, yang memiliki kesulitan dalam hal geometris dan radiometri [5]. Masalah geometris berkaitan dengan citra tunggal yang tidak menyediakan informasi yang cukup tentang struktur 3D dan masalah radiometric berkaitan dengan kompleksitas proses dari pembentukan intensitas citra. Secara garis besar 3D vision membahas bagaimana manusia mempersepsikan objek 3D pada sistem pengindraannya. Persepsi ini sangat penting, terutama terkait dengan memperkirakan jarak antara objek 3D dengan manusia. Dengan memahami cara kerja penginderaan manusia, algoritma rekonstruksi visual objek 3D dari citra 2D dapat dikembangkan. Sebagian besar citra 2D adalah hasil proyeksi adegan 3D (3D scene) yang dihasilkan oleh sistem kamera. Proses proyeksi adegan 3D ke citra 2D ini didapatkan dengan mengolah persamaan transformasi perspektif (perspective transformation). Model geometri kamera yang paling umum dan sederhana adalah model kamera pinhole untuk menangani persamaan transformasi perspektif. Pinhole adalah sebuah bidang pencitraan dengan lubang kecil di tengah yang menahan semua sinar kecuali yang melewati lubang lensa di tengah.

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = K [I_3 | 0_3] \begin{bmatrix} R & -T \\ 0_3^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Atau

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix},$$

dimana $M = [KR | -KRT]$ (2)

Matriks K dan $[I_3 | 0_3]$ pada persamaan (1) adalah parameter intrinsik yang mengandung variabel-variabel fisik pada kamera, seperti fokus dan principal point. Matriks K adalah matriks kamera kalibrasi yang didefinisikan sebagai berikut:

$$K = \begin{bmatrix} fa & 0 & u_0 \\ 0 & fb & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

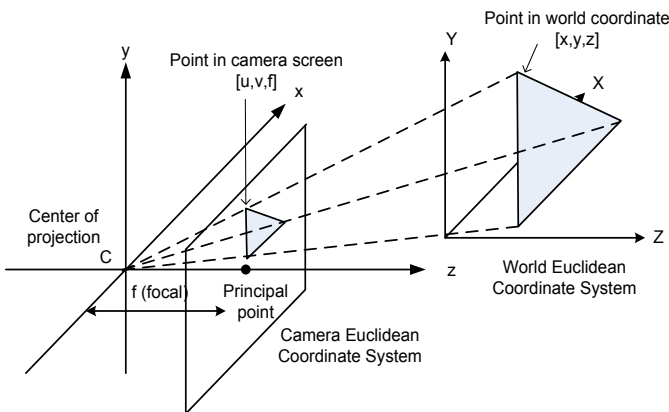
Dimana f adalah panjang fokus pada proyeksi kamera, a dan b adalah faktor konversi ukuran citra dari unit fisik (misal: cm atau mm) ke unit pixel pada - sumbu x dan y , (u_0, v_0) adalah principal point pada proyeksi kamera.

Matriks $[I_3 | 0_3]$ didefinisikan sebagai :

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

matriks $\begin{bmatrix} R & -T \\ 0_3^T & 1 \end{bmatrix}$ adalah parameter ekstrinsik kamera

yang mendefinisikan lokasi dan orientasi kamera terhadap sistem koordinat dunia. Matriks translasi T berisi tiga buah elemen translasi dari pusat sistem koordinat dunia terhadap sistem koordinat kamera. Matriks M adalah gabungan dari parameter instrinsik dan ekstrinsik kamera yang bisa didapatkan dengan cara melakukan identifikasi titik-titik $[x y z 1]^T$ pada koordinat dunia dan identifikasi titik-titik $[u v w]^T$ yang akan menghasilkan persamaan :



Gbr. 1 Transformasi perspektif 3D ke 2D[6]

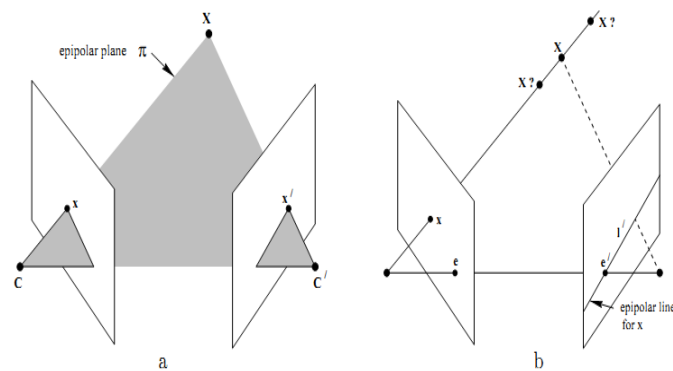
Sebuah titik yang terletak di dalam ruang nyata 3D diekspresikan sebagai titik $[x y z 1]^T$ di sistem koordinat dunia. Titik $[x y z 1]^T$ yang direkam dengan sebuah kamera akan mengalami transformasi perspektif dari ruang 3D sistem koordinat dunia ke ruang 2D sistem koordinat kamera sebagaimana ditunjukkan Gbr. 1 Titik $[u v w]^T$ pada sistem koordinat kamera diperoleh dengan persamaan koordinat homogen berikut: [6]

$$\begin{bmatrix} x & y & z & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -ux & -uy & -uz & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x & y & z & 1 & -vx & -vy & -vz & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{11} \\ m_{12} \\ \vdots \\ m_{34} \end{bmatrix} = 0 \quad (4)$$

Apabila terdapat n buah titik pada sistem koordinat dunia, matriks A akan berukuran $2n \times 12$. Untuk memperoleh X digunakan metode *Singular Value Decomposition* (SVD) pada matriks A sehingga diperoleh $A = UDV^T$. Kolom terakhir pada V adalah solusi dari M .

B. Epipolar Geometry

Dalam rekonstruksi 3D *Epipolar geometry* merupakan teknik yang digunakan untuk mendapatkan persesuaian antara dua citra. Jika dua kamera melihat sebuah *scene*, maka terdapat geometri yang menghubungkan antara titik-titik 3D yang diamati dengan 2D proyeksinya [7]. Jika X adalah sebuah titik 3D dicitrakan dalam dua sudut pandang, pada citra pertama x dan citra kedua x' . Titik citra x dan x' , titik ruang X , dan pusat kamera C dan C' adalah sebidang (*coplanar*), dan semua terletak pada bidang *epipolar* π seperti diperlihatkan pada Gbr. 2.a.



Gbr. 2 Epipolar geometry [7]

Semua bidang yang berhimpit dengan *baseline* yang menghubungkan dua pusat kamera adalah bidang *epipolar*. Jika hanya diketahui sebuah titik x dalam citra pertama, maka bagaimana titik yang bersesuaian x' ditentukan dalam citra kedua. Bidang *epipolar* π ditentukan oleh *baseline* dan sinar yang memotong pusat kamera C yaitu x . Perpotongan antara π dan bidang citra kedua membentuk sebuah garis l' dimana x' seharusnya terletak. Garis l' adalah garis *epipolar* berhubungan dengan x , seperti diilustrasikan pada Gbr. 2.b. *Epipolar* dapat digunakan agar memudahkan untuk melakukan pencocokkan untuk rekonstruksi citra, wilayah pencarian akan disempitkan pada garis *epipolar*.

C. Matriks Fundamental

Matrik fundamental F adalah sebuah matriks 3×3 yang merepresentasikan hubungan geometri tersebut. Algoritma 8-titik pertama dikembangkan oleh Longuet-Higgins. Merupakan metode yang paling sering digunakan untuk

menghitung fundamental matrik dari delapan atau lebih titik-titik yang berkoresponden. Algoritma ini memiliki keuntungan sederhana dan mudah diimplementasikan. Jika $x = [x \ y \ 1]^T$ dan $x' = [x' \ y' \ 1]^T$, setiap titik terdapat dalam sebuah persamaan linier dalam F yang tidak diketahui. Persamaan ini dapat ditulis sebagai:

$$[x' \ y' \ 1] \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \quad (5)$$

Solusi f diperoleh dengan menggunakan SVD dari $A : A = UDV^T$ dan f merupakan kolom terakhir dari V . Untuk mengurangi pengaruh noise, koordinat dari titik-titik yang berkoresponden dinormalisasi. Titik titik yang berkoresponden di translasi dan skala, sehingga centroidnya terdapat di tengah koordinat dan jarak rata-rata titik dari origin sama dengan $\sqrt{2}$. Nilai fundamental matrik didapat dengan melakukan denormalisasi kembali dari hasil yang diperoleh.

D. Matrik Essential

Matrik *essential* menyatakan relasi antara dua citra dengan menggunakan hubungan matrik rotasi dan vektor translasi. Melalui matrik *essential* diketahui posisi relatif antar kamera.

$$E = K^T F K \quad (6)$$

- Dimana: E = Matrik *essential*
- K = Matriks instrinsik kamera 1
- K' = Matriks instrinsik kamera 2
- F = Matriks fundamental

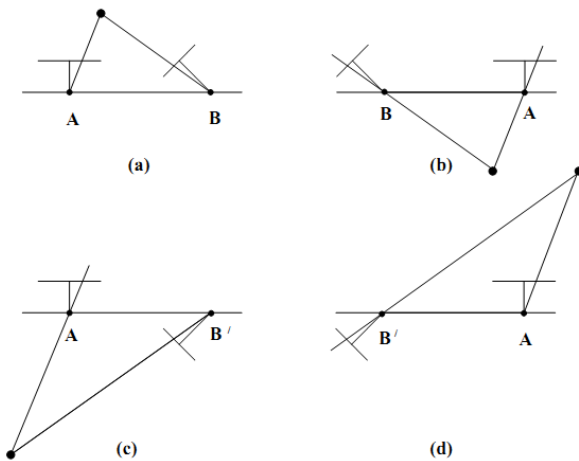
Dari perhitungan matrik *essential* dapat diperoleh posisi relatif antara dua kamera dengan skala yang tidak diketahui. Dengan matrik kamera $P = [I \ 0]$ dan $P' = [R \ t]$, posisi relatif dinyatakan dengan matrik rotasi R dan vektor translasi t . SVD dari matrik *essential* dapat ditulis sebagai $E = U \text{diag}(1, 1, 0) V^T$, dengan U dan V dipilih $\det(U) > 0$ dan $\det(V) > 0$. Vektor translasi t sama dengan $+u_3$ atau $-u_3$, dan $\|t\| = 1$. Dengan menggunakan matrik orthonormal W , matrik rotasi R adalah sama dengan $R_a = UWV^T$ atau $R_b = UW^T V^T$.

$$W = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Maka dari matrik *essential* yang diketahui dapat menghasilkan empat kemungkinan solusi untuk marik kamera kedua M' , yaitu:

$$M_2 = [UWV^T | +u_3] \text{ atau } [UWV^T | -u_3], \text{ atau } [UW^T V^T | +u_3] \text{ atau } [UW^T V^T | -u_3]$$

Keempat solusi tersebut diilustrasikan pada Gbr. 3, dapat dilihat bahwa hanya satu solusi yang terbaik yaitu (a) yang menghasilkan titik X yang direkonstruksi berada di depan kedua kamera.



Gbr. 3 Ilustrasi empat kemungkinan solusi matrik kamera[7].

E. Ekstraksi Koordinat 3D

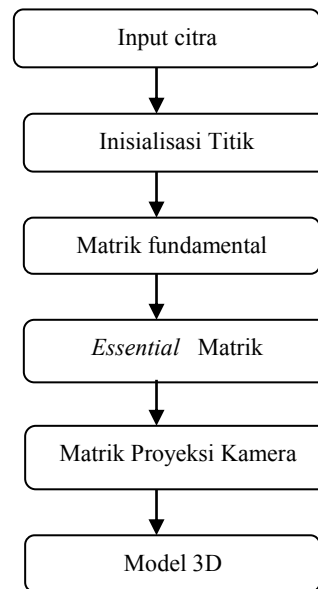
Direct Linear Transformation (DLT) adalah sebuah algoritma untuk memperkirakan koordinat 3D dari sebuah obyek yang diperoleh dengan menghitung data koordinat 2D pada beberapa gambar yang diambil pada berbagai posisi di sekeliling obyek tersebut. Proses kalibrasi dapat dilakukan untuk mendapatkan parameter instrinsik dan ekstrinsik kamera. Parameter untuk kamera 1 disimpan pada matriks M dan parameter untuk kamera 2 disimpan pada matriks M' . Jika koordinat (x,y) dan (x',y') adalah koordinat 2D yang diperoleh dari proses deteksi titik, Dengan memasukkan dua persamaan untuk setiap citra, maka diperoleh empat persamaan dalam bentuk $AX = 0$, yang berupa matrik 4×4 , maka untuk menghitung koordinat 3D obyek, persamaan homogen berikut ini digunakan:

$$\begin{bmatrix} u^1 m_3^T - w^1 m_1^T \\ v^1 m_3^T - w^1 m_2^T \\ u^{1'} m_3^{1'} - w^{1'} m_1^{1'} \\ v^{1'} m_3^{1'} - w^{1'} m_2^{1'} \end{bmatrix} X = AX = 0 \quad (8)$$

Dimana m_i^j adalah baris ke- i pada matriks M dan X adalah matriks $[x \ y \ z \ 1]^T$. Hasil dari proses ini kemudian dimodelkan pada sebuah koordinat 3D.

III. METODOLOGI PENELITIAN

Secara garis besar, diagram alur proses rekonstruksi 3D pada penelitian ini dapat dilihat pada Gbr. 4



Gbr. 4 Bagan alur penelitian

Pada tahap *preprocessing* dilakukan proses pengambilan citra objek menggunakan sebuah kamera yang sama dari dua posisi yang berbeda, sedangkan posisi objek tidak berubah, dan pada saat pengambilan citra tidak menggunakan *zooming*. Sebagai bahan penelitian digunakan dua buah citra dari miniatur patung yang masing-masing memiliki resolusi 1824×1368 dengan tipe JPEG. Gbr. 5 menunjukkan hasil pengambilan citra dari dua posisi.

Selanjutnya dilakukan pemilihan titik-titik yang bersesuaian untuk setiap pasangan citra, yang akan digunakan untuk input pada proses rekonstruksi berikutnya. Langkah kedua perhitungan matriks fundamental dengan algoritma delapan titik, yang menyatakan korespondensi antara citra pada *view* pertama dengan citra pada *view* kedua. Langkah ketiga menghitung Matrik *essential*, karena menggunakan satu kamera yang sama, maka $K_1 = K_2$. Matriks proyeksi kamera diperoleh dari dekomposisi matrik *essential*. Hanya satu dari empat kemungkinan solusi tersebut yang terbaik, dilakukan pengujian dengan triangulasi untuk menentukan pasangan M dan M' yang menghasilkan titik 3D hasil rekonstruksi yang terletak di depan kedua kamera.

Setelah diperoleh data koordinat titik-titik 2D x dan x' , serta matrik proyeksi kamera M dan M' , maka dapat dilakukan rekonstruksi koordinat 3D menggunakan triangulasi *Direct Linear Transformation* (DLT). Merupakan sebuah algoritma untuk memperkirakan koordinat 3D dari sebuah obyek dengan menghitung data koordinat 2D pada beberapa citra yang diambil dari berbagai posisi di sekeliling obyek tersebut.



(a) View 1

(b) View 2

Gbr. 5 Citra patung dari dua posisi

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian dilakukan menggunakan citra dari objek miniatur patung yang diambil dari dua posisi berbeda menggunakan kamera digital Sony Cybershot DCS-W180 10.1 Mega pixel yang mempunyai focus 6.2 mm. Jarak antara kamera dan objek kurang lebih 50 cm, posisi objek adalah tetap. Kedua citra harus mempunyai bagian obyek yang bersesuaian satu dengan yang lain. Selanjutnya pemilihan titik-titik yang akan direkonstruksi untuk masing-masing citra dilakukan secara manual, proses ini untuk menentukan titik yang mana dari citra pertama yang berhubungan dengan titik dari citra kedua.

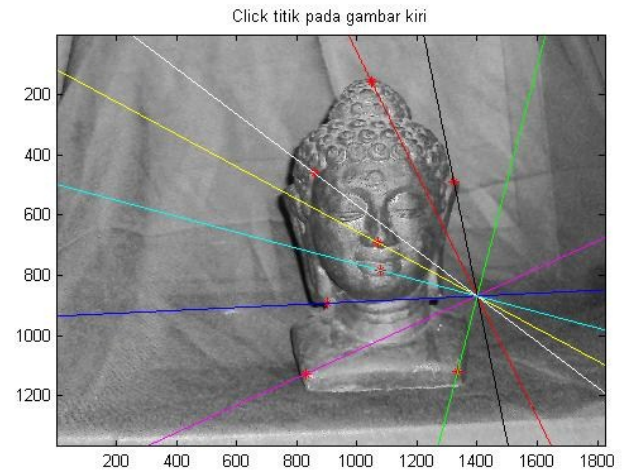
Proses menentukan perbandingan antara titik dalam pasangan citra disebut korespondensi. Tetapi, salah satu kesulitan menemukan korespondensi adalah tidak semua titik di sebelah kiri terlihat dengan jelas karena orientasi yang berbeda dari kamera. Jika ditemukan titik – titik yang cocok antara citra kiri dan kanan maka disebut pasangan konjugasi atau *conjugated pair*. Cara menentukan pasangan konjugasi dari sebuah titik dalam dua citra, adalah dengan memilih sebuah titik di salah satu citra dan menentukan baris pencarian pada citra lain, yang disebut dengan garis *epipolar* atau *epipolar line*.

Setelah diperoleh data posisi koordinat pasangan citra, selanjutnya dilakukan perhitungan matrik fundamental. Citra pertama dan citra kedua dapat berkorespondensi dengan adanya matrik fundamental kedua citra tersebut. Matrik fundamental diperoleh dengan menggunakan algoritma 8-titik dengan cara mendapatkan minimal delapan titik posisi koordinat citra pada *view* pertama yang berpasangan dengan delapan titik posisi koordinat citra pada *view* kedua. Dari hasil perhitungan diperoleh matrik fundamental untuk kedua citra patung adalah sebagai berikut:

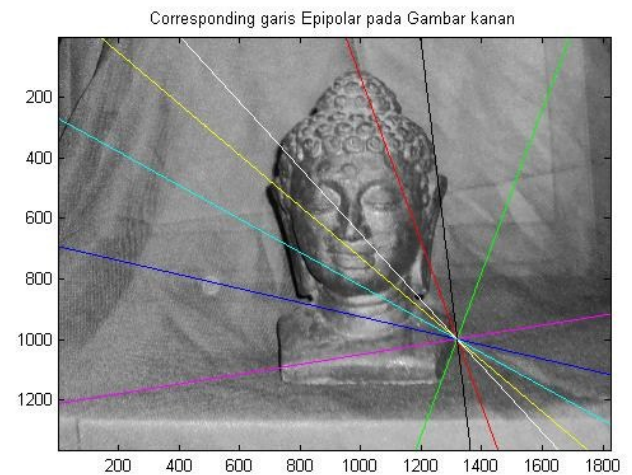
Matrik Fundamental:

$$F = \begin{bmatrix} 9.8161e-009 & 1.3383e-007 & 0.00050633 \\ -1.56e-007 & -1.0565e-007 & -0.0033186 \\ -0.00042372 & 0.0034823 & -0.19654 \end{bmatrix}$$

Dari hasil perhitungan matrik fundamental, kemudian mencari garis *epipolar* dengan persamaan $l'=Fx$ adalah garis *epipolar* yang berkorespondensi dengan x . Sedangkan $l=F^T x'$ adalah garis *epipolar* yang berkorespondensi dengan x' . Sehingga dapat diplot garis *epipolar* yang menggambarkan korespondensi kedua citra. Gbr. 6 menunjukkan plot garis *epipolar* dalam citra kanan yang berkoresponden dengan delapan titik yang ditentukan pada citra kiri.



(a)



(b)

Gbr. 6 Garis *epipolar* citra patung

Gbr. 6.a merupakan gambar kiri dengan delapan titik yang ditandai dengan *, garis yang melalui titik yang ditandai pada citra kiri merupakan garis *epipolar* yang berkoresponden dengan titik yang dipilih pada citra kiri. Gbr. 6.b adalah citra kanan dengan garis *epipolar* berkoresponden terhadap titik yang dipilih atau ditandai pada gambar kiri. Garis berwarna merah merupakan garis *epipolar* yang berhubungan dengan titik yang ditandai dengan * pada garis merah dalam citra kiri demikian seterusnya. Garis *epipolar* berpotongan pada satu titik yang disebut *epipole*. Secara teoritis, pasangan citra harus memenuhi *epipolar constraint* yang dinyatakan pada

persamaan (5) dan terletak pada garis *epipolar* yang bersesuaian. Akan tetapi titik citra kadangkala tidak memenuhi *epipolar constraint* tersebut, dan dalam kasus ini, jarak dari titik citra ke garis *epipolar* dianggap sebagai *error* yang disebut *Residual error*. Pengujian hasil perhitungan matrik fundamental ini dilakukan dengan menghitung residual error untuk semua pasangan korespondensi titik citra. Untuk semua pasangan titik pada kedua citra tersebut diperoleh *residual error* sebesar 9.9051×10^{-04} .

Selanjutnya dihitung parameter-parameter yang dibutuhkan untuk proses rekonstruksi seperti dijelaskan pada bagian sebelumnya, maka diperoleh beberapa matriks yang akan digunakan sebagai parameter dalam proses rekonstruksi selanjutnya, yaitu:

Matrik *Essential*:

$$E = \begin{bmatrix} 0.033082 & 0.45103 & 1.114 \\ -0.52575 & -0.35606 & -6.4861 \\ -0.95732 & 6.4842 & -0.064323 \end{bmatrix}$$

Matrik Proyeksi Kamera:

$$M = \begin{bmatrix} 1835.8 & 0 & 912 & 0 \\ 0 & 1835.8 & 684 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$M_2 = \begin{bmatrix} -0.99947 & 0.023064 & 0.023112 & -0.98375 \\ -0.022234 & -0.99912 & 0.035553 & -0.16955 \\ -0.023912 & -0.03502 & -0.9991 & 0.059118 \end{bmatrix}$$

Apabila telah diperoleh data koordinat titik-titik 2D x dan x' , serta matrik proyeksi kamera M_1 dan M_2 , maka dapat dilakukan rekonstruksi koordinat 3D menggunakan triangulasi *Direct linear Transformation* (DLT). Merupakan sebuah algoritma untuk memperkirakan koordinat 3D dari sebuah obyek dengan menghitung data koordinat 2D pada beberapa citra yang diambil dari berbagai posisi di sekeliling obyek tersebut. Gbr. 7 menunjukkan hasil rekonstruksi untuk objek patung dari dua citra yang digunakan.

Pengujian hasil rekonstruksi akan dilakukan dengan menghitung error reprojeksi, yaitu dengan membandingkan koordinat data masukan dengan koordinat dua dimensi dari reprojeksi hasil rekonstruksi koordinat 3D ke koordinat citra 2D. Error merupakan besarnya selisih antara titik deteksi dan titik hasil reprojeksi untuk sumbu x dan sumbu y . Untuk mencari jarak antara 2 titik dapat menggunakan rumus *Euclidean distance*. Dari hasil rekonstruksi objek patung dari dua citra ini didapat rata-rata selisih koordinat untuk sumbu $x = 2.87 \times 10^{-04}$ dan $y = 3.18 \times 10^{-04}$ atau error reprojeksi dalam RMSE-nya (*Root Mean Square Error* sebesar 1.714×10^{-03}).

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan analisis dari percobaan yang ditunjukkan pada bab sebelumnya, dapat disimpulkan bahwa:

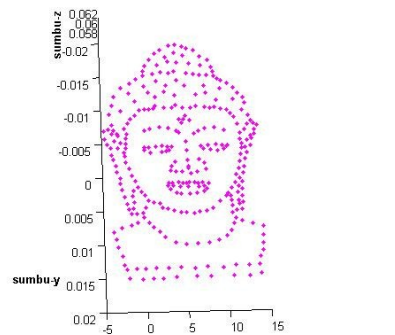
1. Rekonstruksi objek 3D dari citra 2D dapat dilakukan dengan beberapa tahap yaitu: Ekstraksi koordinat citra, menghitung matrik fundamental, menghitung matrik

kamera, dan rekonstruksi titik 3D untuk setiap pasangan titik-titik dari citra 2D.

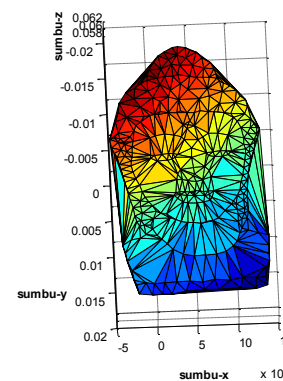
2. Korespondensi antara koordinat citra dari view yang berbeda dapat ditentukan dengan matrik fundamental yang dihitung menggunakan algoritma delapan titik.
3. Untuk hasil rekonstruksi objek patung dari dua citra ini didapat rata-rata selisih koordinat $x = 2.87 \times 10^{-04}$ dan $y = 3.18 \times 10^{-04}$ atau RMSE = 1.714×10^{-03} .

REFERENSI

- [1]. Dipanda. A and S. Woo, "Towards a real-time 3D shape reconstruction using a structuredlight system," Pattern Recognition, vol. 38, pp. 1632-1650, 2005.
- [2]. Prakoonwit.S and R. Benjamin, "3D surface point and wireframe reconstruction from multiview photographic images," Image and Vision Computing, vol. 25, pp. 1509-1518,2007.
- [3]. Park.J.S "Interactive 3D reconstruction from multiple images: A primitive-based approach," Pattern Recognition Letters, vol. 26, pp. 2558-2571, 2005.
- [4]. Dianyong Zhang, Zhenjiang Miao," Photorealistic 3D Volumetric Model Reconstruction By Voxel Coloring", IAPRS vol.XXXVIII, Part 3B, 2010
- [5]. Sonka.M, V. Hlavac, and R. Boyle, "3D Vision," in Image Processing, Analysis, and Machine Vision, H. Gowans, Ed., 3rd ed. Toronto: Thomson, pp. 592-594,2008.
- [6]. Wibirama.S "Fundamental Techniques for 3D Computer Vision," Department of Electrical Engineering Gadjah Mada University, Indonesia, 2011.
- [7]. Hartley. A and A. Zisserman, *Multiple View Geometry in Computer Vision*, Second Edition, Cambridge University Press, 2003.



(a) Hasil rekonstruksi



(b) Triangulasi delaunay

Gbr. 7 Hasil rekonstruksi 3D objek patung