

ANALISIS PENGARUH VARIASI SUDUT ANTAR CITRA TERHADAP HASIL REKONSTRUKSI OBYEK 3D DARI CITRA 2D

Rachmawati¹

¹Dosen Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Lhokseumawe
rachma_sy@yahoo.com

ABSTRAK

Rekonstruksi 3D merupakan proses untuk memperoleh kembali informasi geometri 3D dan warna. Pada penelitian ini dilakukan rekonstruksi visual obyek tiga dimensi yang didasarkan pada teknik rekonstruksi pasif, dengan memanfaatkan karakteristik epipolar geometri dari pasangan citra. Sebagai input hanya dibutuhkan pasangan citra yang memiliki bagian yang bersesuaian dari sebuah obyek, dan semua parameter kamera intrinsik dan ekstrinsik yang dibutuhkan untuk proses rekonstruksi dapat diekstrak dari citra itu sendiri. Dari hasil eksperimen untuk beda sudut antar citra 10^0 diperoleh residual error dari hasil perhitungan matrik fundamental untuk obyek patung 9.9051 x 10^{-04} piksel dan akurasi hasil rekonstruksi 99,87%. Hasil pengujian variasi sudut antar citra menunjukkan bahwa semakin besar sudut antar citra maka semakin besar error yang dihasilkan. Besarnya sudut antar citra input mempengaruhi bentuk hasil rekonstruksi secara visualisasi, karena bagian yang bersesuaian untuk setiap pasangan citra berbeda. Perubahan sudut objek pada citra yang baik adalah kurang dari 40^0 atau sebaiknya dibawah 20^0 untuk mendapatkan error korespondensi dan reproyeksi yang kecil.

Kata Kunci : Rekonstruksi 3D, citra, DLT, fundamental matrik

I. PENDAHULUAN

Seiring berkembangnya teknologi di bidang Teknologi Informasi dan Komputer, teknologi tiga dimensi (3D) juga ikut berkembang pesat. Pada awalnya, 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. 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 pengindraannya.

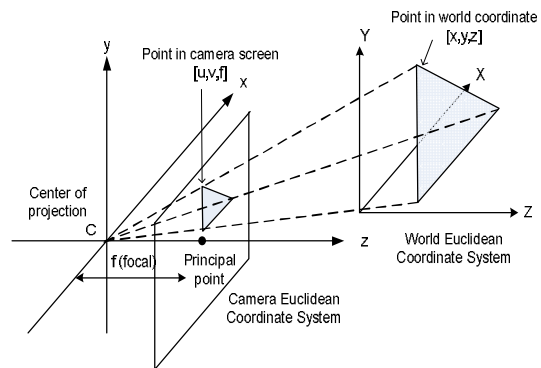
Dengan memahami cara kerja penginderaan manusia, algoritma rekonstruksi visual objek 3D dari citra 2D dapat dikembangkan. Teknik rekonstruksi objek tiga dimensi terbagi menjadi 2 kategori, yaitu teknik aktif dan teknik pasif. Teknik aktif memerlukan kendali pada cahaya yang terstruktur. Beberapa peneliti menggunakan sebuah kamera dan sebuah proyektor atau *viewer* untuk menghasilkan cahaya terstruktur[2]. Peneliti lain menggunakan *laser beam* dan sebuah kamera video[3],[8]. Pada teknik aktif ini, rekonstruksi objek 3D dapat dilakukan dengan mengukur perbedaan pola cahaya yang terproyeksi pada obyek riil yang akan direkonstruksi. Teknik pasif dilakukan dengan mengambil menggunakan dua atau lebih citra dari sebuah obyek dari berbagai macam posisi dengan kamera[4]. Teknik ini sering dikenal dengan adopsi *photogrammetry* atau *structure from motion*. Pada

awalnya penelitian di bidang ini terfokus pada kamera terkalibrasi, namun pada perkembangan selanjutnya rekonstruksi 3D dapat juga dilakukan dengan kamera tidak terkalibrasi. Menentukan parameter kamera tanpa mengasumsikan parameter lain pada kamera disebut *self-calibration*. Parameter kamera ditentukan dari korespondensi antar citra yang berbeda dalam satu urutan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Transformasi perspektif

Gambar dua dimensi (2D) adalah tampilan perspektif scene 3D secara fisik pada scene kamera. Untuk memodifikasi suatu citra yang diobservasi dengan mensimulasikan pada sudut pandang alternatif, digunakan transformasi perspektif [5],[7].



Gambar 1. Transformasi Perspektif 3D ke 2D

Sebuah kamera pinhole dapat dimodelkan sebagai pusat proyeksi dari titik dalam ruang kedalam bidang gambar. Pusat proyeksi merupakan

origin dari system koordinat Euclidean, dan $Z = f$ merupakan bidang gambar atau focal plane. Sebuah titik yang terletak di ruang 3D bisa diekspresikan sebagai $X = [X \ Y \ Z]^T$ yang terletak di *world coordinate system*, titik tersebut dipotret dengan kamera dan mengalami transformasi linier dari ruang 3D ke ruang proyeksi 2D sebagaimana diilustrasikan oleh Gambar (1).

Titik X dalam ruang dipetakan ke titik $x = [fX/Z \ fY/Z \ f]^T$ pada bidang gambar. Dengan mengabaikan koordinat terakhir, maka menjadi:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} fX/Z \\ fY/Z \end{bmatrix} \dots\dots\dots (1)$$

Persamaan di atas menggambarkan pemetaan pusat proyeksi dari koordinat dunia (*world coordinate*) ke koordinat gambar (*image coordinate*), yang merupakan pemetaan dari ruang 3 dimensi ke 2 dimensi. Pusat proyeksi disebut pusat camera atau pusat optic, garis dari pusat kamera tegak lurus ke bidang gambar disebut *principal axis* atau *principal ray* kamera, dan titik dimana *principal axis* berpotongan dengan bidang gambar disebut *principal point*.

Secara garis besar 3D vision membahas bagaimana manusia mempersepsikan objek 3D pada sistem penginderaannya. Persepsi ini sangat penting, terutama terkait dengan memperkirakan jarak antara objek 3D dengan manusia. Tujuan 3D vision adalah 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. 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. Sebuah titik yang terletak di dalam ruang nyata 3D diekspresikan sebagai titik $[x \ y \ z \ 1]^T$ di sistem koordinat dunia. Sebuah 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. Titik $[u \ v \ w]^T$ pada sistem koordinat kamera diperoleh dengan persamaan koordinat homogen berikut: [6]

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = K [I_3 \ | \ 0_3] \begin{bmatrix} R & -T \\ 0_3^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2)$$

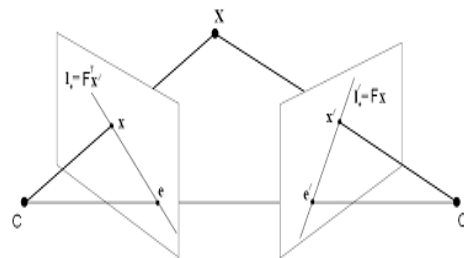
Matriks K dan $[I_3 \ | \ 0_3]$ adalah parameter intrinsik yang mengandung variabel-variabel fisik pada kamera, seperti fokus dan *principal point*. Matrik R adalah parameter ekstrinsik kamera yang mendefinisikan lokasi dan orientasi kamera terhadap sistem koordinat dunia. Matriks translasi T berisi tiga buah elemen translasi dari pusat sistem koordinat dunia terhadap sistem koordinat kamera.

Matrik fundamental

Matrik fundamental merupakan representasi aljabar dari epipolar geometri dan berisi informasi tentang posisi relatif dan orientasi antara 2 view. Anggap kita mempunyai 2 image yang diperoleh dengan kamera dari sudut pandang berbeda, seperti pada Gambar 2 Matrik fundamental memetakan sebuah titik pada citra ke garis epipolar yang bersesuaian pada citra yang lain 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:

$$[x' \ y' \ 1] \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \dots\dots\dots (3)$$

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.



Gambar 2. Two views Geometry

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.

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.

$$E = K^T F K \dots\dots\dots (4)$$

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 $M = [I \ 0]$ dan $M' = [R \ t]$, 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 $R_b = UW^T V^T$.

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 (u',v') dan (u'',v'') adalah koordinat 2D yang diperoleh dari proses deteksi titik, maka untuk menghitung koordinat 3D obyek, persamaan homogen di bawah ini digunakan

$$\begin{bmatrix} u' m_3^{i'T} - w' m_1^{i'T} \\ v' m_3^{i'T} - w' m_2^{i'T} \\ u'' m_3^{i'T} - w'' m_1^{i'T} \\ v'' m_3^{i'T} - w'' m_2^{i'T} \end{bmatrix} X = AX = 0 \quad \dots(5)$$

Dimana m_i^T 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

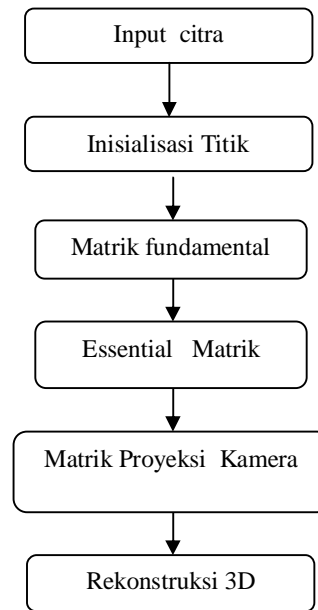
III. METODOLOGI PENELITIAN

Pada penelitian ini dilakukan rekonstruksi visual obyek tiga dimensi yang didasarkan pada teknik rekonstruksi pasif, dengan memanfaatkan karakteristik epipolar geometri dari pasangan citra.

Sebagai input hanya dibutuhkan pasangan citra yang memiliki bagian yang bersesuaian dari sebuah obyek, dan semua parameter kamera instrinsik dan ekstrinsik yang dibutuhkan untuk proses rekonstruksi dapat diekstrak dari citra itu sendiri. Gambaran tentang sistem yang digunakan dalam penelitian ini diilustrasikan Gambar 3.

Tahap awal, dari citra input dilakukan inialisasi titik-titik yang berhubungan dari setiap bagian yang ada pada objek dari pasangan citra

sehingga diperoleh titik-titik yang bersesuaian berupa data koordinat masukan dari kedua citra. Inialisasi titik tersebut berguna untuk tahap selanjutnya. Dalam penelitian ini inialisasi titik-titik dilakukan secara manual.



Gambar 3. Blok diagram alur penelitian

Perhitungan matrik fundamental menggunakan algoritma delapan titik dengan menyelesaikan persamaan (3). 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.

Parameter instrinsik kamera diekstrak dari informasi yang terdapat pada file EXIF dari citra itu sendiri. Selanjutnya dari parameter instrinsik dan matrik fundamental dihitung matriks essential, dan dari dekomposisi matrik essential diperoleh parameter ekstrinsik kamera yang berupa matrik Rotasi R dan vektor translasi T. Matrik proyeksi kamera merupakan gabungan dari parameter tersebut. Apabila parameter instrinsik dan ekstrinsik kamera telah diketahui, maka dapat dilakukan proses rekonstruksi titik 3D dari titik 2D yang diperoleh pada citra dengan teknik *Direct Linear Transformation (DLT)*. 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.

Pengujian terhadap matriks fundamental yang diperoleh akan dilakukan dengan menentukan

jarak titik terhadap garis epipolarnya. Setiap pasangan citra harus memenuhi epipolar constraint 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 sebagaimana digambarkan pada Gambar 5 dianggap sebagai error yang disebut Residual error[9].



Gambar 5. Residual Error

Residual error dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut ini:

$$\frac{1}{N} \sum_i^N d(x'_i, Fx_i)^2 + d(x_i, F^T x'_i)^2 \dots\dots(6)$$

Untuk setiap titik x pada citra pertama, garis epipolar yang bersesuaian adalah $l' = Fx_i$. Begitu juga $l = F^T x'_i$ menyatakan garis epipolar yang sesuai untuk x' dalam citra kedua. Perhitungan error korespondensi tersebut di uji untuk citra input yang mempunyai perbedaan sudut antar gambar $10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ dan 40° .

Pengujian hasil rekonstruksi, dilakukan reproyeksi titik 3D sehingga diperoleh kembali koordinat 2D. Kemudian dapat dihitung besarnya selisih antara titik sebenarnya dari data masukan dan titik hasil reproyeksi. Selisih antara kedua koordinat tersebut dianggap sebagai kesalahan (error) reproyeksi.

$$\varepsilon(x, x') = d(\hat{x}, x)^2 + d(\hat{x}', x')^2 \dots\dots\dots(7)$$

Dimana d adalah jarak Euclidean.

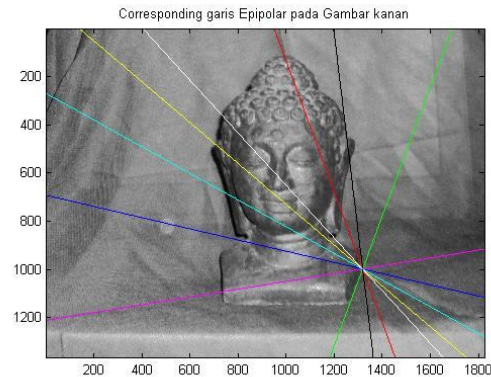
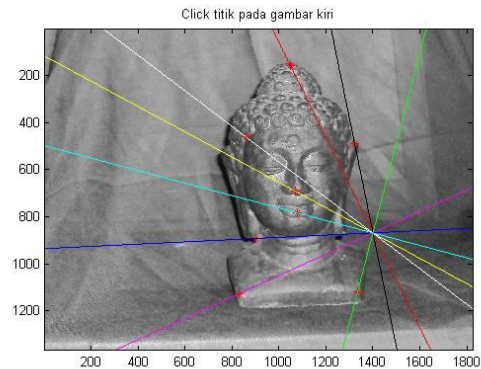
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk menguji sistem rekonstruksi dilakukan percobaan dengan menggunakan citra patung yang masing-masing memiliki resolusi 1824 x 1368 piksel dengan tipe JPEG. Kamera yang digunakan adalah Sony CyberShot DCS-W180, posisi obyek pada saat pengambilan gambar tetap tidak menggunakan zooming.

Sebagai input hanya dibutuhkan pasangan citra yang memiliki bagian yang bersesuaian dari sebuah obyek, dan semua parameter kamera intrinsik dan ekstrinsik yang dibutuhkan untuk proses rekonstruksi dapat diekstrak dari citra itu sendiri. Gambaran tentang sistem yang digunakan dalam penelitian ini diilustrasikan Gambar 3.

Tahap awal, dari citra input dilakukan inialisasi titik-titik yang berhubungan dari setiap bagian yang ada pada objek dari pasangan citra sehingga diperoleh titik-titik yang bersesuaian

berupa data koordinat masukan dari kedua citra. Inialisasi titik tersebut berguna untuk tahap selanjutnya. Dalam penelitian ini inialisasi titik-titik dilakukan secara manual.



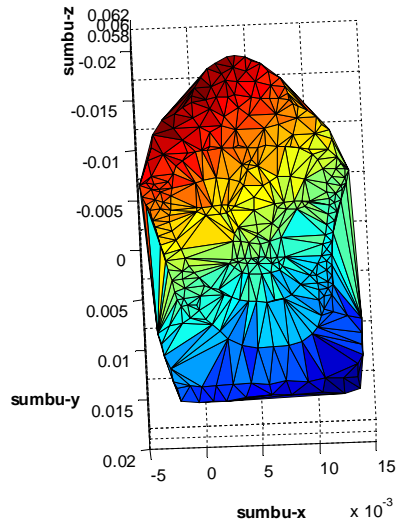
Gambar 6. Garis epipolar citra patung

Dua citra dari *scene* yang sama dihubungkan oleh two views geometri. 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 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. Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 6. Secara teoritis, pasangan citra harus memenuhi *epipolar constraint* yang dinyatakan 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*.

Dari data koordinat titik 2D dan parameter kamera, selanjutnya komputasi koordinat 3D dari pasangan citra tersebut dilakukan dengan algoritma DLT. Hasil dari proses ini kemudian dimodelkan pada sebuah koordinat 3D. Gambar 6 menunjukkan hasil rekonstruksi obyek patung dari dua citra dengan beda sudut 10^0 .

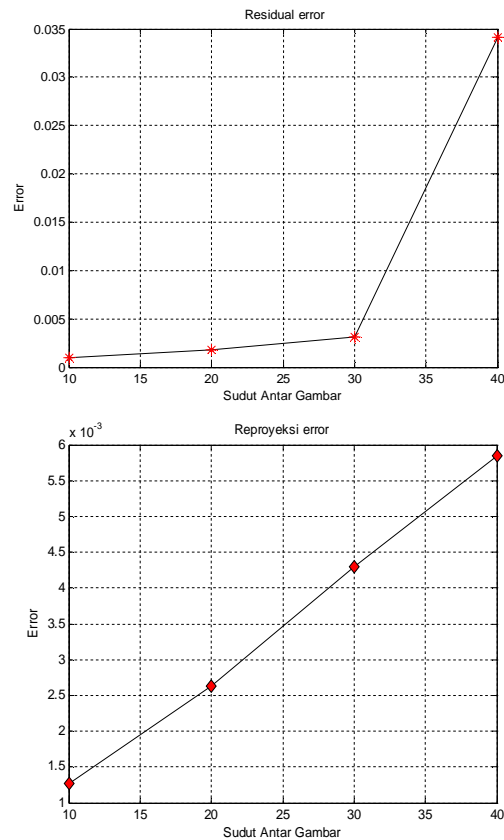


Gambar 6. Hasil Rekonstruksi

Pengujian hasil rekonstruksi, dilakukan reprojeksi titik 3D sehingga diperoleh kembali koordinat 2D. Kemudian dapat dihitung besarnya selisih antara titik sebenarnya dari data masukan dan titik hasil reprojeksi. Selisih antara kedua koordinat tersebut dianggap sebagai kesalahan (error) reprojeksi. Gambar 4 memperlihatkan obyek yang digunakan dalam penelitian ini dan hasil rekonstruksi 3D nya. Untuk mengetahui pengaruh besarnya sudut antar citra terhadap hasil rekonstruksi dilakukan percobaan, sebagai input di ambil dua buah citra patung dengan perubahan sudut antar citra yaitu 10^0 , 20^0 , 30^0 dan 40^0 , sedangkan jarak antara objek dan kamera adalah tetap yaitu 50 cm.

Dari hasil rekonstruksi diketahui bahwa besarnya perbedaan sudut antara dua citra mempengaruhi keakuratan hasil rekonstruksi. Besarnya nilai sudut berbanding lurus dengan besarnya error korespondensi dan reprojeksi hasil rekonstruksi objek dari pasangan citra. Gambar 7 menunjukkan grafik perbandingannya. Error korespondensi atau residual error dari perhitungan matrik fundamental terbesar diperoleh pada pasangan citra dengan beda sudut 40^0 yaitu 3.417×10^{-02} dan error terkecil pada citra yang mempunyai beda sudut 10^0 yaitu 9.9051×10^{-04} . Nilai korespondensi error

tersebut mempengaruhi besarnya reprojeksi error, karena parameter untuk merekonstruksi objek 3D sangat ditentukan oleh matrik fundamental yang menyatakan korespondensi titik dalam kedua citra. Sehingga nilai reprojeksi error terbesar diperoleh dari pasangan citra dengan beda sudut dan residual error terbesar pula.



Gambar 7. Pengujian Variasi sudut antar citra terhadap Error

Perbedaan sudut antar citra input juga mempengaruhi bentuk hasil rekonstruksi secara visualisasi, di mana bagian yang bersesuaian untuk setiap pasangan citra berbeda, tergantung pada besarnya sudut yang merupakan jarak antara keduanya, rekonstruksi hanya dilakukan pada bagian yang terlihat atau tampak dalam kedua citra saja

V. KESIMPULAN

Dari hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa besarnya perbedaan sudut antara dua citra mempengaruhi keakuratan hasil rekonstruksi. Besarnya nilai sudut berbanding lurus dengan error korespondensi dan reprojeksi hasil rekonstruksi objek dari pasangan citra. Error korespondensi atau residual error dari perhitungan matrik fundamental

terbesar diperoleh pada pasangan citra yang mempunyai beda sudut 40° yaitu 3.417×10^{-02} dan error terkecil pada citra dengan beda sudut 10° yaitu 9.9051×10^{-04} . Nilai korespondensi error tersebut mempengaruhi besarnya reproyeksi error, karena parameter untuk merekonstruksi objek 3D sangat ditentukan oleh matrik fundamental yang menyatakan korespondensi titik dalam kedua citra. Sehingga nilai reproyeksi error terbesar diperoleh dari pasangan citra dengan beda sudut dan residual error terbesar pula. Perbedaan sudut antar citra input juga mempengaruhi bentuk hasil rekonstruksi secara visualisasi, di mana bagian yang bersesuaian untuk setiap pasangan citra berbeda, tergantung pada besarnya sudut yang merupakan jarak antara keduanya, rekonstruksi hanya dilakukan pada bagian yang terlihat atau tampak dalam kedua citra saja.

Electrical Engineering Gadjah Mada University, Indonesia, 2011.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Koutsoudis, F. Arnaoutoglou, and C. Chamzas, **On 3D reconstruction of the old city of Xanthi. A minimum budget approach to virtual touring based on photogrammetry**, *Journal of Cultural Heritage*, vol. 8, pp. 26-31.
- [2] A. Dipanda and S. Woo, **Towards a real-time 3D shape reconstruction using a structured light system**, *Pattern Recognition*, vol. 38, pp. 1632-1650, 2005.
- [3] S. Prakoonwit and R. Benjamin, **3D surface point and wireframe reconstruction from multiview photographic images**, *Image and Vision Computing*, vol. 25, pp. 1509-1518, 2007
- [4] J.S.Park, **Interactive 3D reconstruction from multiple images: A primitive-based approach**, in *Pattern Recognition Letters*, vol. 26, pp. 2558-2571, 2005.
- [5] Reinhard Koch, Marc Pollefeys dan luc van Gool, **Realistic 3-D Scene modeling From Uncalibrated Image sequences**.
- [6] Lingyun Liu, et.al, **Multiview Geometry for Texture Mapping 2D Images Onto 3D Range Data**, in *IEEE CVPR*, 2006
- [7] R. Hartley and A. Zisserman, **Multiple View Geometry in Computer Vision**, Second Edition, Cambridge University Press, 2003
- [8] T. Moons, L. J. V. Gool, and M. Vergauwen, **3D Reconstruction from Multiple Images - Part 1 : Principles**, in *Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision*. vol. 4, 1st ed.: Now Publishers, pp. 287-404, 2009.
- [9] Sunu Wibirama, **Fundamental Techniques for 3D Computer Vision**, Department of