

SISTEM PELACAK GERAKAN MATA 3D

Sunu Wibirama

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada
Jl. Grafika No.2, Kampus UGM, Yogyakarta 55281
E-mail: sunu_wibirama@yahoo.com

ABSTRAK

Perancangan sistem pelacak gerakan mata dengan algoritma yang akurat adalah masalah mendasar pada bidang penelitian pengolahan citra biomedis dan pembelajaran sistem oculomotor mata manusia. Makalah ini menjelaskan perancangan sistem pelacak gerakan mata 3D dengan menggunakan algoritma *template matching* dan *Direct Linear Transformation (DLT)*. Posisi 2D, meliputi posisi vertikal dan horizontal dari bola mata, didapatkan dengan menggunakan dua buah kamera dan algoritma *template matching*. Posisi gerakan mata 3D diperoleh dengan algoritma DLT dan dimodelkan pada sistem koordinat 3D. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem yang dirancang memiliki tingkat akurasi yang cukup baik dengan nilai error pada gerakan X, Y, dan Z adalah 0.1768, 0.117, dan 0.3077 untuk skala error 0 sampai dengan 1.

Kata Kunci: sistem pelacak gerakan mata, template matching, direct linear transformation

1. PENDAHULUAN

Sistem pelacak gerakan mata adalah sebuah penelitian aplikasi di bidang pengolahan citra yang diterapkan mulai dari alat pendukung proses diagnosa penyakit *vestibular* dan kelainan *neurology* (Wilson et al., 1996) hingga antarmuka perangkat interaksi manusia dan komputer (Magistris, 1995).

Metode *Scleral Search Coil* (Robinson, 1963) dengan memasukkan lensa kontak pada mata telah digunakan secara luas oleh para peneliti dan praktisi untuk memperkirakan posisi horizontal, vertikal dan gerakan torsi mata. Akan tetapi, metode ini cukup mahal dan kurang nyaman digunakan dalam jangka waktu yang cukup lama, mengingat mata manusia akan mengalami kelelahan setelah menjalani 30 menit masa percobaan dengan lensa kontak (Ivins et al., 1998).

Makalah ini menyajikan sebuah metode alternatif pelacakan posisi mata pada bidang tiga dimensi berbasis teknik pengolahan citra dengan memanfaatkan peralatan berbiaya rendah. Metode ini diyakini lebih aman untuk digunakan karena tidak memerlukan keahlian khusus untuk memasang lensa kontak pada mata pasien. Selain itu, pemanfaatan peralatan berbiaya rendah, seperti *webcamera*, *tripod*, dan komputer dapat menekan biaya operasional penelitian. Kombinasi algoritma *template matching* dan DLT (Abdel-Aziz & Karara, 1971) digunakan untuk memperkirakan posisi gerakan mata 3D pada pasien. Koordinat X, Y, dan Z kemudian dimodelkan pada sistem koordinat 3D dengan memanfaatkan pustaka OpenGL.

2. ARSITEKTUR SISTEM

Sistem pelacak gerakan mata 3D ini terdiri atas tiga bagian: (i) Dua buah kamera, (ii) komputer *desktop*, dan (iii) perangkat lunak pemroses citra. Kami menggunakan *webcamera* merk Oker 177 (Shenzhen Golden Tiger & Dragon Technology

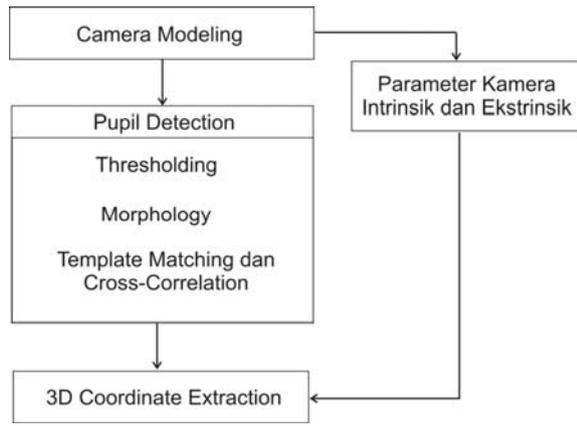
Develop Co., Ltd, Guangdong, China) dengan kecepatan *sampling* 60 Hertz dan resolusi kamera 2 megapixels. Dua buah kamera tersebut terpasang di atas tripod untuk memastikan kenyamanan dan stabilitas saat pengambilan data pada mata pasien. Komputer Intel Pentium 2.2 GHz dengan sistem operasi Windows XP digunakan pada sistem ini. Perangkat lunak untuk mengolah citra dan menghitung posisi 3D dari mata pasien dibuat dengan menggunakan bahasa pemrograman C++, pustaka OpenCV dan OpenGL. Arsitektur sistem pelacak gerakan mata 3D ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Sistem pelacak gerakan mata 3D.

3. METODE

Secara garis besar, proses pelacakan gerakan mata 3D dibagi dalam tiga langkah sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2. Langkah pertama adalah *Camera Modeling* untuk memperoleh parameter intrinsik dan ekstrinsik dua buah kamera. Langkah kedua adalah *Pupil Detection* dengan memanfaatkan teknik *thresholding*, *morphology* dan *template matching*. Langkah ketiga adalah *3D Coordinate Extraction*, memperoleh koordinat mata 3D dengan menggunakan algoritma DLT.



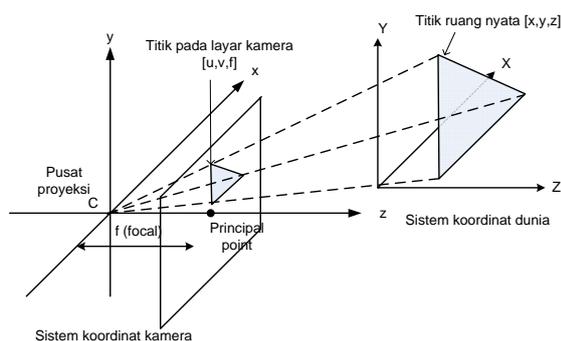
Gambar 2. Bagan alur sistem.

3.1 Camera Modeling

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 oleh Gambar 3. Titik $[u \ v \ w]^T$ pada sistem koordinat kamera diperoleh dengan formula koordinat homogen berikut ini:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = K [I_3 \mid O_3] \begin{bmatrix} R & -T \\ O_3^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}$$

atau $\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}$, dimana $M = [KR \ / \ -KRT]$. (1)



Gambar 3. Transformasi perspektif 3D ke 2D.

Matriks K dan $[I_3 \mid O_3]$ pada Persamaan (1) adalah parameter intrinsik kamera yang mendefinisikan unsur fisik kamera. Matriks K adalah matriks kalibrasi kamera yang didefinisikan sebagai berikut:

$$K = \begin{bmatrix} fa & 0 & u_0 \\ 0 & fb & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

di mana f adalah panjang focal pada proyeksi, a dan b adalah faktor konversi dari unit fisik (satuan milimeter) ke unit piksel dan (u_0, v_0) adalah *principal point* pada proyeksi. Matriks $[I_3 \mid O_3]$ adalah matriks

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

Matriks $\begin{bmatrix} R & -T \\ O_3^T & 1 \end{bmatrix}$ adalah parameter ekstrinsik

kamera yang mendefinisikan lokasi dan orientasi kamera terhadap sistem koordinat dunia. Matriks R berisi elemen rotasi sumbu sistem koordinat kamera terhadap sumbu 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 intrinsik dan ekstrinsik kamera yang bisa didapatkan dengan cara melakukan identifikasi titik-titik $[x \ y \ z \ 1]^T$ pada sistem koordinat dunia dan identifikasi titik-titik $[u \ v \ w]^T$ yang akan menghasilkan Persamaan (3):

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

atau $AX = 0$. (3)

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

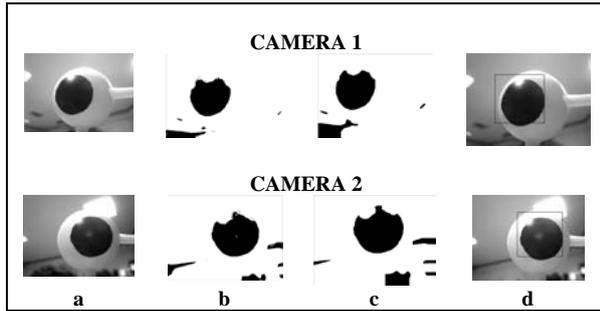
Untuk memisahkan parameter ekstrinsik, gunakan Persamaan (1) yakni $M = [KR / -KRT] = [A/b]$. Dengan demikian, kita bisa mendapatkan matriks translasi T dengan menyelesaikan persamaan $T = -A^{-1}b$.

Untuk memperoleh nilai matriks R , kita bisa menggunakan metode *QR Decomposition* dengan menguraikan matriks A menjadi matriks K dan R .

3.2 Pupil Detection

Proses *pupil detection* dijelaskan pada Gambar 4. Kami menggunakan bola mata tiruan untuk mensimulasikan proses ini. Gambar di-capture dari dua video yang berbeda yang dihasilkan oleh dua buah kamera. Gambar 4(a) adalah hasil *capture* sebelum diolah dengan teknik pengolahan citra. Gambar 4(b) adalah hasil segmentasi dengan proses *thresholding*.

Noise dan *artifact* pada pupil kemudian dihilangkan dengan proses *morphology*, sebagaimana pada Gambar 4(c). Proses *template matching* dengan *cross-correlation* kemudian diterapkan pada Gambar 4(c) dan hasilnya ditampilkan pada Gambar 4(d).



Gambar 4. Proses *pupil detection* dengan bola mata tiruan. (a) Sebelum proses deteksi, (b) segmentasi dengan *thresholding*, (c) proses *morphology* untuk menghilangkan *noise*, (d) *template matching* dengan *cross-correlation*.

Pada proses *template matching* ini, kami menggunakan *template* pupil berbentuk setengah lingkaran untuk mengantisipasi apabila proses *template matching* dilakukan pada saat mata terganggu oleh pelupuk mata. Untuk mengukur kesamaan antara *template* dan gambar hasil *capture*, *correlation coefficient* $\hat{\rho}_s(X, Y)$ digunakan:

$$\hat{\rho}_s(X, Y) = \frac{\hat{C}_s(X, Y)}{\sqrt{\hat{\sigma}_x^2 \hat{\sigma}_y^2}}, \quad -1 \leq \hat{\rho}_s(X, Y) \leq 1, \quad (4)$$

dimana X adalah gambar mata dan Y adalah *template*, $\hat{C}_s(X, Y)$ adalah nilai kovarian antara X dan Y , $\hat{\sigma}_x^2$ dan $\hat{\sigma}_y^2$ adalah nilai varian antara X dan Y .

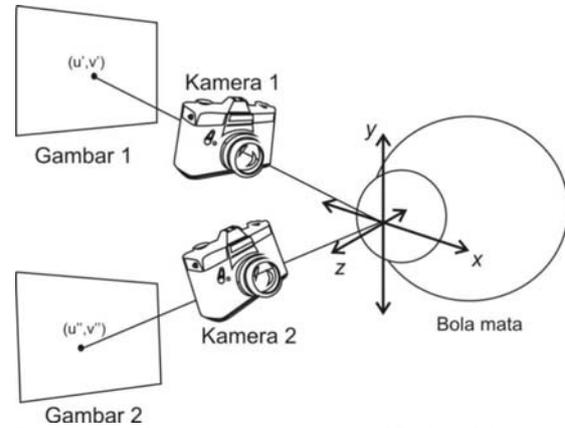
Deteksi sempurna terjadi apabila $\hat{\rho}_s(X, Y)$ sama dengan 1.

3.3 3D Coordinate Extraction

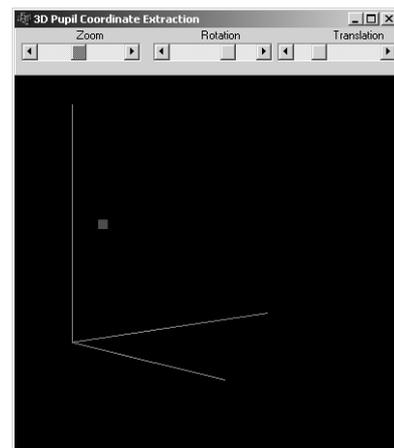
Direct Linear Transformation adalah sebuah algoritma untuk memperkirakan koordinat 3D dari sebuah obyek yang diperoleh dengan menghitung data koordinat 2D pada beberapa gambar yang diambil pada berbagai posisi di sekeliling obyek tersebut. Pada penelitian ini, kami menggunakan dua buah kamera yang diletakkan di depan bola mata tiruan. Proses kalibrasi kamera dilakukan untuk mendapatkan parameter intrinsik 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 *pupil detection*, maka untuk menghitung koordinat 3D pusat pupil, formula persamaan homogen di bawah ini digunakan:

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

di mana m_i^T adalah baris ke i pada matriks M dan X adalah matrix $[x \ y \ z \ 1]^T$. Hasil dari proses ini kemudian dimodelkan pada sebuah sistem koordinat 3D interaktif yang dibuat dengan menggunakan pustaka OpenGL.



Gambar 5. Memperoleh koordinat 3D dari 2 kamera.



Gambar 6. Pemodelan posisi 3D dari pupil.

4. HASIL PERCOBAAN

Untuk menguji validitas koordinat 3D yang dihasilkan, kami melakukan percobaan sebanyak lima kali dengan menggerakkan bola mata tiruan sejauh 5 mm pada sumbu X , Y dan Z . Selain itu, kami mengukur linearitas antara gerakan bola mata pada sistem koordinat dunia dan gerakan bola mata terukur yang dihasilkan oleh sistem pada sumbu X , Y , dan Z . Gerakan nyata pada sistem koordinat dunia diukur menggunakan alat ukur fisik dengan akurasi 0.1 mm. Gerakan terukur dihitung berdasarkan hasil komputasi algoritma DLT.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa saat bola mata tiruan digerakan pada sumbu X , Y , dan Z sebesar 5 mm, rerata gerakan terukur yang dihasilkan algoritma DLT sebesar 5.1768, 5.0117, and 5.3077 piksel pada sumbu X , Y , dan Z berturut-turut. Dengan demikian nilai *error* pada gerakan X , Y , dan Z adalah 0.1768, 0.0117, dan 0.3077 untuk

skala *error* 0 sampai dengan 1. Nilai *error* tersebut masih dalam batas yang bisa ditoleransi.

Tabel 1. Hasil perbandingan gerakan pada sumbu X

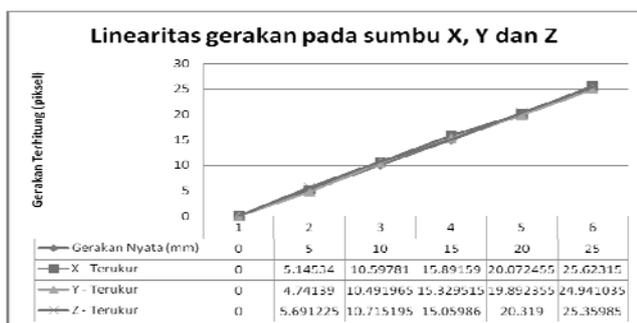
No. Percobaan	Gerakan nyata (mm)	Gerakan terhitung (piksel)
1	5	5.1453
2	5	5.2989
3	5	5.2972
4	5	5.0181
5	5	5.1246
Rerata	5	5.1768
Error	5	0.1768

Tabel 2. Hasil perbandingan gerakan pada sumbu Y

No. Percobaan	Gerakan nyata (mm)	Gerakan terhitung (piksel)
1	5	4.7414
2	5	5.2460
3	5	5.1098
4	5	4.9731
5	5	4.9882
Rerata	5	5.0117
Error	0	0.0117

Tabel 3. Hasil perbandingan gerakan pada sumbu Z

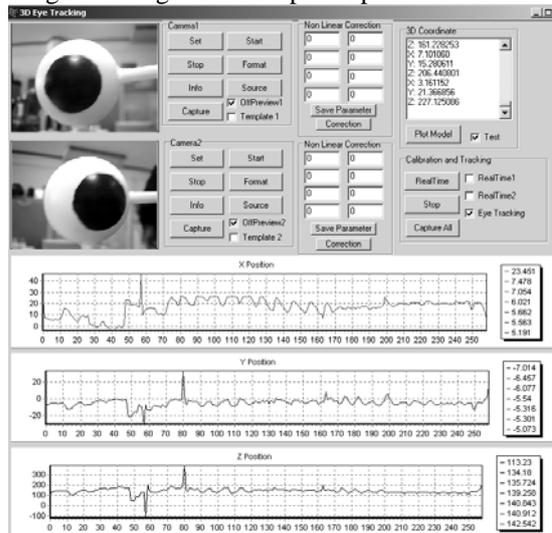
No. Percobaan	Gerakan nyata (mm)	Gerakan terhitung (piksel)
1	5	5.6912
2	5	5.3576
3	5	5.0199
4	5	5.2827
5	5	5.1872
Rerata	5	5.3077
Error	0	0.3077



Gambar 7. Pengujian linearitas gerakan bola mata tiruan pada sumbu X, Y dan Z.

Hasil pengujian linearitas ditunjukkan pada Gambar 7. Kami menggerakkan bola mata tiruan dari jarak 0 sampai dengan 25 mm dengan *step* 5 mm pada sumbu X, Y, dan Z. Hasil percobaan menunjukkan bahwa hasil perhitungan algoritma DLT pada sumbu X, Y, dan Z berbanding lurus (linear) dengan gerakan nyata. Dari dua percobaan di atas, kami menyimpulkan bahwa setiap gerakan

sebesar 1 mm pada sistem koordinat dunia akan menghasilkan gerakan ± 1 piksel pada sistem DLT.



Gambar 8. Antarmuka aplikasi

Gambar 8 adalah antarmuka aplikasi sistem pelacak gerakan mata 3D. Pada antarmuka tersebut, hasil *capture* dari dua buah kamera ditampilkan berikut grafik koordinat 3D dari pusat pupil. Nilai nominal dari masing-masing koordinat X, Y dan Z ditampilkan pada sisi kanan atas aplikasi.

5. KESIMPULAN

Makalah ini berisi penjelasan teknis tentang perancangan sistem pelacak gerakan mata 3D dengan memanfaatkan peralatan berbiaya rendah. Dua buah kamera digunakan untuk memperoleh gambar bola mata dari posisi yang berbeda. Algoritma *template matching* dan *Direct Linear Transformation* digunakan untuk menghitung koordinat 3D dari pusat pupil. Koordinat 3D yang dihasilkan kemudian diuji dengan membandingkan linearitas antara gerakan nyata dan gerakan terhitung.

Simulasi dan hasil percobaan menunjukkan bahwa sistem ini berhasil memperkirakan posisi 3D dari pusat pupil dengan tingkat akurasi yang baik.

6. RENCANA PENGEMBANGAN APLIKASI

Aplikasi sistem pelacak gerakan mata 3D dalam makalah ini adalah sebuah prototipe yang akan dikembangkan menjadi peralatan analisa penyakit *vestibular* pada dokter spesialis mata dan telinga. Dua buah kamera akan digantikan dengan dua *minicamera* yang terpasang pada sebuah kacamata khusus yang dikenakan di kepala pasien. *Minicamera* ini akan mengambil gambar mata pasien dari dua arah yang berbeda. Koordinat 3D yang dihasilkan digunakan oleh dokter untuk menganalisa kemungkinan dugaan adanya penyakit *vestibular* pada pasien.

PUSTAKA

- Abdel-Aziz, Y.I. & Karara, H.M. (1971). "Direct linear transformation into object space coordinates in close-range photogrammetry," dalam *Proc. Symp. Close-Range Photogrammetry*, p. 1-18.
- Ivins, J.P., Porrill, J. & Frisby, J.P. (1998). "Deformable model of the human iris for measuring ocular torsion from video images," dalam *IEEE Proc. Vision, Image, Signal Processing*, pp. 213-20.
- Magistris, S.D. (1995). "Eye movement tracking for advanced man-machine interaction," dalam *Department of Systems and Informatics*. Florence, Italy: University of Florence.
- Robinson, D.A. (1963). "A Method of measuring eye movement using a scleral search coil in a magnetic field," dalam *IEEE Trans. Biomed. Electron*, vol. 10, pp. 137-45.
- Wilson, B.A., Jones, R.D., Bones, P.J., & Anderson, T.J. (1996). "A Flying-Spot Laser Scanner for Tracking Eye Movements," dalam *Proceeding of 18th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (IEEE EMBS 1996)*, Amsterdam.