

## REKONSTRUKSI PERMUKAAN TIGA DIMENSI PADA PHOTOMETRIC STEREO BERBASIS JARINGAN SYARAF

Anny Yuniarti<sup>1</sup>, Fitria Nur Andini<sup>2</sup>, Agus Zainal Arifin<sup>3</sup>

Jurusan Teknik Informatika, Fakultas Teknologi Informasi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Email: <sup>1</sup> anny@cs.its.ac.id, <sup>2</sup> fitria@cs.its.ac.id, <sup>3</sup> agus.za@cs.its.ac.id

**Abstrak** – Photometric stereo merupakan metode untuk merekonstruksi permukaan 3 (tiga) dimensi suatu objek. Photometric stereo menggunakan tiga citra objek yang sama, dengan posisi pencahayaan yang berbeda. Namun, photometric stereo juga membutuhkan posisi sumber cahaya yang diketahui secara akurat. Dalam makalah ini digunakan jaringan syaraf untuk melakukan proses photometric stereo terhadap tiga citra dengan hanya mengandalkan nilai intensitas citra tanpa posisi sumber cahaya yang diketahui. Komputasi dilakukan pada tiap-tiap piksel secara independen dengan menggunakan model permukaan Lambertian. Jaringan syaraf ini akan mengekstraksi informasi surface normal objek yang diperoleh pada bobot jaringan syaraf. Informasi surface normal ini kemudian diproses dengan metode enforcing integrability untuk mendapatkan bentuk permukaan 3D objek.

**Kata Kunci:** Rekonstruksi 3D, photometric stereo, jaringan syaraf, enforcing integrability, model Lambertian.

### 1. PENDAHULUAN

Beberapa tahun terakhir, ekstraksi bentuk permukaan tiga dimensi (3D) objek dari suatu citra objek telah menjadi masalah utama di bidang visi komputer. Rekonstruksi bentuk permukaan 3D ini dibutuhkan untuk mendesain suatu sistem yang dapat mengenali objek pada situasi pencahayaan yang kompleks.

Salah satu metode yang digunakan untuk merekonstruksi bentuk permukaan objek 3D adalah *photometric stereo*. Pendekatan *photometric stereo* ini menggunakan beberapa citra objek yang sama dengan suatu pose tertentu, namun dengan posisi sumber cahaya yang berbeda dan diketahui secara akurat.

Hayakawa telah mengembangkan metode *photometric stereo* tanpa data *prior* mengenai arah sumber cahaya [1]. Namun, metode tersebut masih menggunakan batasan tambahan, yaitu mengasumsikan bahwa sumber cahaya memiliki *magnitude* yang konstan untuk minimal enam citra.

Belhumeur, Geoghiades, dkk [2] telah membuktikan bahwa suatu transformasi dari bentuk permukaan dan koefisien pemantulan permukaan (*albedo*) untuk sembarang permukaan *Lambertian* adalah transformasi *bas-relief* general. Metode ini memungkinkan untuk memperkirakan geometri permukaan dari citra wajah dalam pose tertentu dengan

posisi pencahayaan tidak diketahui untuk mentransformasi *bas-relief*-nya. Namun, metode ini masih membutuhkan beberapa batasan tambahan atau lebih banyak citra.

Makalah ini menitikberatkan pada penggunaan metode *photometric stereo* berbasis jaringan syaraf tanpa mengetahui posisi sumber cahaya untuk rekonstruksi permukaan objek 3D. Dari bobot jaringan syaraf, akan didapat vektor normal permukaan. Estimasi tinggi permukaan suatu objek dilakukan dengan algoritma *enforcing integrability* pada vektor normal permukaan. Diharapkan dari makalah ini proses rekonstruksi permukaan 3D dapat dilakukan hanya dengan data masukan berupa intensitas citra saja.

### 2. MODEL PERMUKAAN LAMBERTIAN

Model *Lambertian* memodelkan suatu permukaan yang jika diberi satu titik pencahayaan, maka permukaan tersebut akan tampak sama terang dari semua arah pandang. Permukaan yang demikian disebut dengan permukaan yang terdifusi sempurna (*ideal diffuse*).

Asumsikan sebuah citra hasil proyeksi orthogonal sebuah objek. Maka, persamaan permukaan objek adalah :

$$z(x, y) = f(x, y), \dots\dots\dots(1)$$

dimana  $z(x, y)$  adalah tinggi permukaan objek pada posisi  $(x, y)$ , dan  $f(x, y)$  adalah fungsi yang merepresentasikan tinggi permukaan objek.

Fungsi  $f(x, y)$  disebut dengan fungsi *reflectance map* nilai intensitas untuk suatu permukaan. *Reflectance map* untuk suatu permukaan *Lambertian*, dapat didefinisikan sebagai:

$$R(n(x, y)) = \alpha n(x, y)^T s, \dots\dots\dots (2)$$

dengan  $\alpha$  adalah koefisien pemantulan permukaan (*albedo*),  $n(x, y)^T$  adalah vektor normal, dan  $s$  adalah vektor sumber cahaya.

Vektor normal pada permukaan  $(x, y)$  adalah :

$$n(x, y) = \frac{[-z_x \quad -z_y \quad 1]^T}{\sqrt{z_x^2 + z_y^2 + 1}}, \dots\dots\dots (3)$$

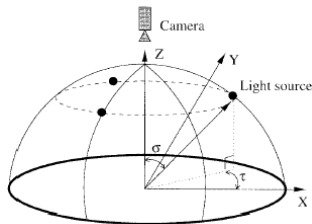
dimana  $z_x$  dan  $z_y$  adalah turunan parsial dari  $z(x, y)$  terhadap sumbu  $-x$  dan sumbu  $-y$ .

Gambar 1 merepresentasikan sudut sumber cahaya terhadap suatu permukaan objek. Jika diketahui sudut *slant* ( $\sigma$ ) dan sudut *tilt* ( $\tau$ ) sumber cahaya terhadap koordinat X, Y, Z, maka vektor sumber cahaya terhadap koordinat X, Y, Z adalah:

$$s = (\cos(\tau)\sin(\sigma), \sin(\tau)\sin(\sigma), \cos(\sigma))^T, \dots (4)$$

$$s = [s_x \quad s_y \quad s_z]^T$$

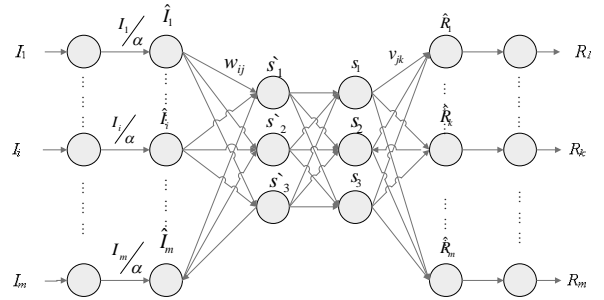
dimana  $s$  adalah vektor posisi sumber cahaya,  $s_x, s_y, s_z$  adalah posisi sumber cahaya pada koordinat  $x, y$ , dan  $z$ , berurutan.



Gambar 1. Sudut slant dan tilt sumber cahaya

### 3. PHOTOMETRIC STEREO BERBASIS JARINGAN SYARAF

Desain jaringan syaraf yang digunakan, ditampilkan pada Gambar 2 [3]. Data masukan dan data keluaran dari jaringan syaraf disusun sedemikian rupa dengan jumlah neuron data masukan sama dengan jumlah neuron data keluaran, sehingga membentuk jaringan syaraf simetris.



Gambar 2. Desain jaringan syaraf

#### Fungsi aktivasi jaringan

Asumsikan sebuah citra masukan memiliki  $m$  piksel secara keseluruhan, maka data masukan jaringan syaraf akan memiliki variabel input sejumlah  $m$ . Citra 2D disusun menjadi sebuah vektor kolom berukuran  $(m \times 1)$ , yaitu  $I = (I_1, I_2, I_3, \dots, I_m)^T$ , dan dimasukkan ke dalam jaringan syaraf. Data keluaran dari jaringan syaraf ini adalah *reflectance map*  $R = (R_1, R_2, R_3, \dots, R_m)^T$  dengan ukuran yang sama seperti data masukan  $(m \times 1)$ .

Fungsi-fungsi aktivasi ( $f^{(l)}$ ) pada tiap-tiap layer dijabarkan sebagai berikut:

Layer 1: Layer ini mengumpulkan nilai intensitas dari citra masukan sebagai data masukan *network*.

$$f^{(1)} = \frac{I_i}{\max(I)}, i=1, \dots, m. \dots\dots\dots (5)$$

$I_i$  adalah nilai intensitas pada piksel ke- $i$  citra.

Layer 2: Layer ini menyesuaikan nilai intensitas citra masukan dengan nilai *albedo* yang bersesuaian.

$$f^{(2)} = f_i^{(1)} / \alpha_i, i=1, \dots, m. \dots\dots\dots (6)$$

$\alpha_i$  adalah nilai albedo ke- $i$  yang bersesuaian dengan piksel ke- $i$  pada citra. Bobot antara layer 1 dan layer 2 adalah  $1/\alpha_i$ .

Layer 3: Layer ini akan memisahkan parameter sumber cahaya dari citra 2D. Parameter arah sumber cahaya ( $s'_1, s'_2, s'_3$ ) pada layer ini belum ternormalisasi.

$$f_j^{(3)} = \sum_{i=1}^m f_i^{(2)} w_{ij}, i=1, \dots, m. j=1,2,3. \dots\dots\dots (7)$$

$$s'_j = f_j^{(3)}, j=1,2,3.$$

Bobot antara layer 2 dan layer 3 dilambangkan dengan  $w_{ij}$ .

Layer 4: Layer ini menormalisasi vektor sumber cahaya. Tiap node pada layer ini

merepresentasikan parameter arah sumber cahaya  $(s_1, s_2, s_3)$ .

$$f_j^{(4)} = \frac{s_j}{\sqrt{s_1^2 + s_2^2 + s_3^2}} \cdot j = 1,2,3. \dots\dots (8)$$

$$s_j = f_j^{(4)} \cdot j = 1,2,3.$$

Layer 5: Layer ini menghitung *reflectance map* citra masukan. Bobot antara layer 4 dan layer 5 dinotasikan sebagai  $v_{jk}$ , dan merepresentasikan vektor normal permukaan.  $(v_{1k}, v_{2k}, v_{3k})^T$  melambangkan vektor normal permukaan di titik  $k$ , dengan  $k = 1, \dots, m$ .

$$f_k^{(5)} = \sum_{j=1}^3 s_j v_{jk} \cdot k = 1, \dots, m. \dots\dots (9)$$

$$\hat{R}_k = f_k^{(5)} \cdot k = 1, \dots, m.$$

Layer 6: Layer ini menormalisasi *reflectance map* dari layer 5 ke dalam interval  $\{0 \dots 1\}$ .

$$R_k = \frac{(\hat{R}_k - \min(\hat{R}))}{\max(\hat{R}) - \min(\hat{R})} \cdot k = 1, \dots, m. \dots\dots (10)$$

**Algoritma Backpropagation**

Metode *backpropagation* dilakukan untuk meminimalisasi fungsi error:

$$E_T = \sum_{i=1}^m (R_i - D_i)^2, \dots\dots\dots(11)$$

dengan  $m$  adalah total keseluruhan piksel dari citra 2D,  $R_i$  menotasikan data keluaran ke- $i$  dari jaringan syaraf, dan  $D_i$  melambangkan target ke- $i$  yaitu nilai intensitas ke- $i$  dari citra 2D yang sudah dinormalisasi.

Vektor normal pada jaringan dinotasikan sebagai  $\mathbf{n}_k = (v_{1k}, v_{2k}, v_{3k})^T$  untuk titik ke- $k$  pada permukaan. Tiap elemen vektor normal diperbarui secara iteratif menggunakan metode *gradient descent* :

$$v_{jk}(t+1) = v_{jk}(t) + 2\eta s_j(t)[D_k(t) - R_k(t)] \cdot j = 1,2,3 \dots\dots (12)$$

dimana  $s_j(t)$  menotasikan elemen ke- $j$  dari arah sumber cahaya  $s$ . Parameter  $v_{jk}$  yang telah diperbarui tersebut perlu dinormalisasi sebagai berikut :

$$v_{jk}(t+1) = \frac{v_{jk}(t+1)}{\|\mathbf{n}_k(t+1)\|} \cdot j = 1,2,3. \dots\dots\dots(13)$$

Bobot antara layer 2 dan layer 3,  $W$ , dapat dihitung dengan metode *least-square* dimana  $W(t+1)$  adalah *pseudo-inverse* dari  $V(t+1)$ .

$$W(t+1) = (V(t+1)^T V(t+1))^{-1} V(t+1)^T, \dots\dots (14)$$

dengan  $V(t+1)$  melambangkan bobot antara layer luaran dan layer pusat dari jaringan simetris. Nilai  $\|\mathbf{n}_k(t+1)\|$  dinotasikan sebagai *albedo*  $\alpha_k$  dimana  $k = 1,2, \dots, m$ .

**Inisialisasi bobot**

Ketiga matriks citra masukan berukuran  $m \times n$  diubah menjadi bentuk vektor kolom berukuran  $mn \times 1$ . Ketiga vektor kolom tersebut digabungkan menjadi sebuah matriks  $X$ , dengan jumlah kolom sama dengan jumlah citra masukan, dan *singular value decomposition* (SVD) dikalkulasi dari matriks  $X$  tersebut.

SVD untuk matriks  $X$  tersebut adalah :

$$X = U \Sigma V^T, \dots\dots\dots (15)$$

$U$  adalah matriks berukuran  $(mn \times 3)$ .  $\Sigma$  adalah matriks diagonal  $(3 \times 3)$ , dengan nilai diagonalnya berisi nilai *singular value*.  $V$  adalah matriks berukuran  $(3 \times 3)$ .

Hasil SVD dari matriks  $X$  tersebut, dapat digunakan untuk menginisialisasi posisi sumber cahaya,  $s$ , untuk ketiga citra masukan.

$$s = V \sqrt{\Sigma}. \dots\dots\dots(16)$$

Dengan menginisialisasikan *albedo*,  $\alpha$ , sebagai rata-rata per-kolom matriks  $X$ , maka *surface normal*,  $n$ , dapat diinisialisasi sebagai :

$$n = (s^{-1} X) / \alpha \dots\dots\dots(17)$$

**Pemrosesan surface normal dan albedo**

Ketiga citra yang diproses pada jaringan syaraf akan menghasilkan tiga *surface normal* dan tiga *albedo*. Oleh karena itu, perlu adanya pemrosesan lebih lanjut agar didapat satu *surface normal* dan satu *albedo*.

**Pemrosesan dengan PCA**

Data masukan dalam proses ini adalah matriks komponen *surface normal* dan matriks *albedo* dari ketiga citra. Langkah-langkahnya adalah :

- Untuk *surface normal*, lakukan pemisahan masing-masing komponen *surface normal*, sehingga satu matriks hanya berisi satu komponen *surface normal*, kemudian matriks komponen ini ditranspose. Untuk *albedo*, matriks

*albedo* dari ketiga citra digabungkan menjadi satu matriks.

- Hitung matriks kovarian dari *transpose* matriks komponen *surface normal* dan dari matriks *albedo* gabungan.
- Hitung *eigenvector* dan *eigenvalue* dari matriks kovarian.
- *Transpose* dari *eigenvector* kolom ke-tiga dikalikan dengan matriks komponen *surface normal* atau matriks *albedo* gabungan.
- Untuk *surface normal*, ketiga komponen hasil dari langkah sebelumnya digabungkan menjadi satu matriks *surface normal* yang baru. sedangkan untuk *albedo* hasil dari langkah sebelumnya di *transpose* untuk mendapatkan matriks *albedo* yang baru.

**Pemrosesan dengan penjumlahan vektor**

Surface normal pada suatu titik pada citra adalah berupa vektor arah. Karena ada tiga surface normal yang dihasilkan, maka pada satu titik piksel citra terdapat tiga vektor dengan arah yang berbeda. Oleh karenanya, untuk mendapatkan satu vektor arah, dilakukan penjumlahan terhadap ketiga vektor tersebut.

Lakukan penjumlahan terhadap masing-masing elemen yang bersesuaian untuk ketiga matriks *surface normal*. Hal yang sama juga diterapkan dalam penjumlahan *albedo*.

**Pemrosesan dengan penghitungan rata-rata**

Pada algoritma *photometric stereo* [4], vektor *surface normal* didapatkan sebagai rata-rata dari ketiga vektor *surface normal* yang berada di satu titik piksel citra, dengan syarat nilai *reflectance map* dari piksel tersebut pada ketiga citra beririsan. Sedangkan pada makalah ini, nilai rata-rata ketiga vektor *surface normal* dihitung tanpa memperdulikan apakah nilai *reflectance map*nya beririsan atau tidak. Hal ini untuk menghindari adanya nilai *NULL* untuk suatu titik piksel citra.

**Enforcing integrability**

Metode *enforcing integrability* merupakan salah satu teknik *shape from shading* yang menggunakan pendekatan minimasi fungsi.

Metode ini diperkenalkan oleh R.T Frankot dan Rama Chellappa [5]. Merupakan suatu metode untuk mengestimasi nilai permukaan  $z(x, y)$  dari *surface normal* suatu permukaan.

Asumsikan permukaan  $z(x, y)$  sebagai himpunan dari fungsi dasar yang dapat diintegrasikan,  $\phi(x, y, \omega)$ , dengan batasan tertentu.

$$z(x, y) = \sum_{\omega \in \Omega} c(\omega) \phi(x, y, \omega) , \dots\dots\dots (18)$$

dengan  $\omega \in \Omega$  adalah indeks dua dimensi dimana operasi penjumlahan tersebut dilakukan.  $\phi(x, y, \omega)$  adalah himpunan terbatas fungsi dasar yang dapat diintegrasikan.

Dalam makalah ini digunakan fungsi dasar dari fungsi Discrete Fourier Transform (DFT), sehingga  $\phi(x, y, \omega) = \exp(j\omega_x x + j\omega_y y)$  dan  $c(\omega)$  adalah DFT dari  $z(x, y)$ .  $c(\omega)$  dapat dihitung dengan :

$$c(\omega) = \frac{-j\omega_x \hat{c}_x(\omega) - j\omega_y \hat{c}_y(\omega)}{\omega_x^2 + \omega_y^2} \dots\dots\dots (19)$$

dengan  $\hat{c}_x(\omega)$  adalah DFT dari  $\hat{z}_x(x, y)$  dan  $\hat{c}_y(\omega)$  adalah DFT dari  $\hat{z}_y(x, y)$ . Setelah koefisien  $c(\omega)$  diketahui, maka rekonstruksi  $z(x, y)$  bisa didapatkan dengan cara menjalankan inverse DFT pada  $c(\omega)$ .

**4. IMPLEMENTASI DAN ANALISIS**

Pengujian terhadap implementasi photometric stereo berbasis jaringan syaraf untuk rekonstruksi 3D dilakukan pada dua jenis citra, yaitu citra sintesis dan citra objek wajah. Proses uji coba dilakukan dengan menggunakan Matlab 6.5, pada komputer *desktop* dengan prosesor Intel Pentium IV 3.0 GHz, RAM 480MB, dan sistem operasi Microsoft Windows XP SP2.

**Citra sintesis**

Objek sintesis yang digunakan pada uji coba ini adalah objek sintesis *sphere* dan objek sintesis *sombrero*. *True depth map* dari kedua objek ini dibuat secara matematis.

Untuk citra sintesis *sphere*, persamaan matematika yang digunakan adalah :

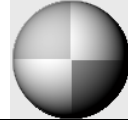


$$z(x, y) = \begin{cases} \sqrt{r^2 - x^2 - y^2} & \text{jika } x^2 + y^2 \leq r^2 \\ 0 & \text{lainnya} \end{cases} , (20)$$

dimana  $r = 48$ ,  $0 < x, y \leq 100$ , dan pusat *sphere* berada pada koordinat  $(x, y) = (51, 51)$ . Untuk

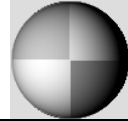
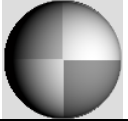
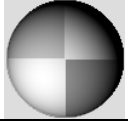
nilai albedo, diasumsikan permukaan sphere memiliki nilai albedo yang berbeda. Untuk bagian kiri-atas sphere nilai albedonya adalah 0.6. Sedangkan nilai albedo untuk bagian kanan bawah sphere adalah 0.8. Bagian permukaan sphere yang lain memiliki nilai albedo 1.

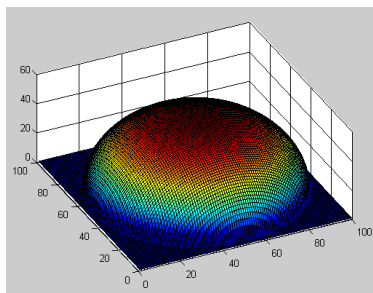
Posisi sumber cahaya yang digunakan beserta citra sintesis *sphere* ditampilkan pada Tabel 1 dan Tabel 2. Gambar 3 menampilkan bentuk permukaan dari objek sintesis *sphere*.

Tabel 1. Citra Sintesis Sphere dengan Beberapa Sumber Cahaya

Nama	S1	S2	S3
Citra			
Sudut Cahaya	Tilt : -140 Slant : 30	Tilt : 0 Slant : 0	Tilt : -40 Slant : 30

Tabel 2. Citra Sintesis Sphere dengan Beberapa Sumber Cahaya (Lanjutan)

Nama	S4	S5	S6
Citra			
Sudut Cahaya	Tilt : -180 Slant : 30	Tilt : 0 Slant : 30	Tilt : 140 Slant : 30



Gambar 3. Permukaan Objek Sintesis Sphere

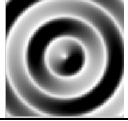
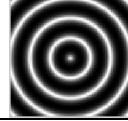
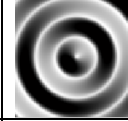
Citra sintesis kedua yang digunakan adalah citra sintesis *sombbrero*, dimana persamaan matematika yang digunakan adalah:

$$z(x, y) = 15 + 15 \cos\left(\frac{\pi\sqrt{x^2 + y^2}}{17}\right), \dots\dots\dots(21)$$

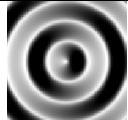
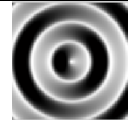
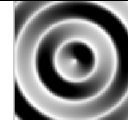
dimana  $0 < x, y \leq 100$ , dan pusat *sombbrero* berada pada koordinat  $(x, y) = (51, 51)$ . Nilai albedo untuk citra *sombbrero* ini diasumsikan konstan untuk setiap titik permukaan, yaitu bernilai 0,4.

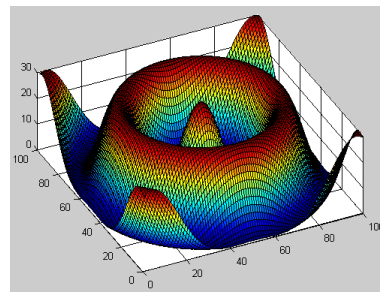
Tabel 3 dan Tabel 4 menampilkan keenam citra beserta sumber cahaya masing-masing citra. Gambar 4 menampilkan bentuk permukaan objek sintesis *sombbrero*.

Tabel 3. Citra Sintesis Sombbrero dengan Beberapa Sumber Cahaya

Nama	Som1	Som2	Som3
Citra			
Sudut Cahaya	Tilt : -140 Slant : 30	Tilt : 0 Slant : 0	Tilt : -40 Slant : 30

Tabel 4. Citra Sintesis Sombbrero dengan Beberapa Sumber Cahaya (Lanjutan)

Nama	Som4	Som5	Som6
Citra			
Sudut Cahaya	Tilt : -180 Slant : 30	Tilt : 0 Slant : 30	Tilt : 140 Slant : 30



Gambar 4. Permukaan Objek Sintesis Sombbrero

Uji coba dilakukan pada kedua objek sintesis dengan tiga metode pemrosesan *surface normal* dan *albedo* yang berbeda. Untuk mengukur keakuratan hasil rekonstruksi digunakan metode *mean absolute depth error* (MAE).

$$MAE = \frac{\sum_{x=M}^{x=1} \sum_{y=N}^{y=1} |z(x, y) - \bar{z}(x, y)|}{MN}, \dots\dots\dots(22)$$

dimana  $z(x, y)$  adalah tinggi objek sebenarnya pada posisi  $(x, y)$ , dan  $\bar{z}(x, y)$  adalah tinggi objek hasil rekonstruksi.

MAE hasil uji coba dengan menggunakan sintesis *sphere* ini ditampilkan pada Tabel 5. Sedangkan Tabel 6 menampilkan waktu

proses pada masing-masing uji coba dengan sintesis *sphere*.

Tabel 5. Hasil Uji Coba Dengan Citra Sintesis Sphere

Uji Coba	Citra	MAE		
		PCA	SUM	AVG
I	S1,S2,S3	11,51	11,57	11,57
II	S4,S2,S5	12,37	12,12	12,12
<b>III</b>	<b>S6,S2,S3</b>	<b>11,29</b>	<b>11,27</b>	<b>11,27</b>
IV	S4,S2,S3	11,25	12,69	12,69
V	S1,S2,S5	12,34	12,94	12,94
VI	S6,S2,S5	715,4	38553	38553

Tabel 6. Waktu Proses Hasil Uji Coba Dengan Citra Sintesis Sphere

Uji Coba	Citra	Waktu (detik)		
		PCA	SUM	AVG
I	S1,S2,S3	17,95	18,69	18,95
II	S4,S2,S5	11,85	11,67	11,98
<b>III</b>	<b>S6,S2,S3</b>	<b>11,83</b>	<b>11,92</b>	<b>12,02</b>
IV	S4,S2,S3	17,92	17,58	17,94
V	S1,S2,S5	18,92	18,95	19,17
VI	S6,S2,S5	19,86	20,44	20,25

Dari Tabel 5 dan Tabel 6, dapat disimpulkan bahwa hasil rekonstruksi untuk objek sintesis *sphere* terbaik, yaitu yang memiliki nilai error terendah, adalah pada uji coba ketiga. Uji coba ketiga ini juga memiliki waktu proses yang baik untuk ketiga metode pemrosesan *surface normal* dan *albedo*, yaitu berada dalam kisaran 11 detik.

Hasil uji coba dengan menggunakan sintesis *sombrero* ditampilkan pada Tabel 7 dan Tabel 8. Pada uji coba dengan objek sintesis *sombrero*, nilai MAE terendah berada pada uji coba keempat. Waktu proses pada uji coba keempat ini juga cukup baik, yaitu sekitar 13 detik. Pada uji coba dengan menggunakan objek sintesis *sombrero* ini, nilai MAE masing-masing uji coba memiliki perbedaan yang relatif besar.

Pada keempat tabel hasil uji coba ini, kolom PCA menandakan pemrosesan *surface normal* dan *albedo* dilakukan dengan metode PCA. Sedangkan SUM menandakan bahwa pemrosesan dilakukan dengan metode penjumlahan vektor, dan AVG menandakan bahwa pemrosesan dilakukan dengan metode penghitungan rata-rata.

Dari keseluruhan uji coba dengan menggunakan objek sintesis ini, MAE hasil uji coba antara metode penjumlahan dan metode rata-rata memiliki nilai yang sama. Hal ini dikarenakan *surface normal* pada suatu titik piksel merupakan sebuah vektor, sehingga hasil penjumlahan dan rata-ratanya akan menghasilkan sebuah vektor dengan arah yang sama. Sehingga permukaan yang dibentuk dari vektor *surface normal* tersebut juga akan sama. Namun, waktu proses untuk metode penjumlahan relatif lebih cepat daripada metode rata-rata.

Tabel 7. MAE Hasil Uji Coba Dengan Citra Sintesis Sombrero

Uji Coba	Citra	MAE		
		PCA	SUM	AVG
I	Som1,Som2,Som3	10,43	10,99	10,99
II	Som4,Som2,Som5	7195	505.13	505.13
III	Som6,Som2,Som3	348,15	333,73	333,73
<b>IV</b>	<b>Som4,Som2,Som3</b>	<b>9,4139</b>	<b>9,4130</b>	<b>9,4130</b>
V	Som1,Som2,Som5	11,02	11,29	11,29
VI	Som6,Som2,Som5	14,17	6,79	6,79

Tabel 8. Waktu Proses Hasil Uji Coba Dengan Citra Sintesis Sombrero

Uji Coba	Citra	Waktu (detik)		
		PCA	SUM	AVG
I	Som1,Som2,Som3	18,90	19,35	20,03
II	Som4,Som2,Som5	10,83	10,17	10,25
III	Som6,Som2,Som3	10,36	10,56	10,48
<b>IV</b>	<b>Som4,Som2,Som3</b>	<b>13,92</b>	<b>13,83</b>	<b>13,95</b>
V	Som1,Som2,Som5	15,03	15,27	15,55
VI	Som6,Som2,Som5	15,64	15,28	15,41

### Citra objek wajah

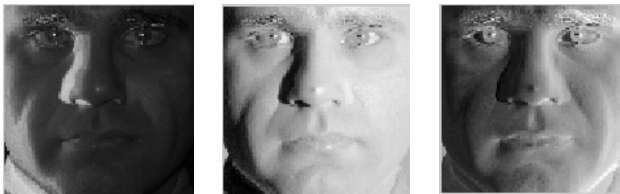
Citra wajah yang digunakan adalah citra wajah Yalefaces Database B yang tersedia secara online dan dapat diperoleh dari <ftp://plucky.cs.yale.edu/CVC/pub/images/yalefacesB/>. Uji coba dilakukan pada enam orang yang berbeda. Untuk tiap orang, diambil tiga citra dengan pose tetap dan diambil dari sudut pengambilan gambar yang sama serta dengan tiga pencahayaan yang berbeda.



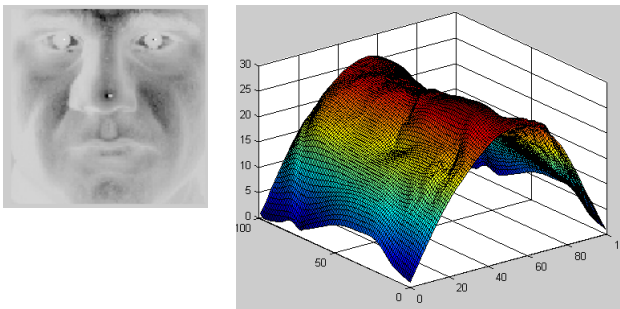


### Gambar 5. Tiga Citra Wajah yang Digunakan

Ketiga citra wajah yang digunakan pada uji coba, ditampilkan pada Gambar 5. Hasil uji coba dengan citra wajah ini ditampilkan pada Gambar 6 dan Gambar 7. Gambar 6 menampilkan komponen pertama, komponen kedua, dan komponen ketiga dari *surface normal* secara berurutan. Sedangkan Gambar 7 menampilkan *albedo* dan hasil rekonstruksi permukaan 3D pada objek wajah tersebut.



Gambar 6. Komponen Pertama, Kedua dan Ketiga dari Surface Normal



Gambar 7. Albedo dan Hasil Rekonstruksi 3D Permukaan Wajah

Pada uji coba dengan citra wajah, hasil rekonstruksi tinggi permukaan yang paling baik terdapat pada bagian dagu, mulut, dan sekitar mata. Sedangkan hasil rekonstruksi yang kurang memuaskan adalah pada bagian hidung. Hal ini dikarenakan adanya *shadow* yang diakibatkan oleh bentuk hidung.

## 5. KESIMPULAN DAN SARAN

Metode photometric stereo berbasis jaringan syaraf ini, memungkinkan untuk mendapatkan surface normal dari bobot jaringan syaraf, walaupun hanya diketahui nilai intensitas citra saja. Namun, untuk mendapatkan hasil yang terbaik, dibutuhkan inialisasi bobot jaringan syaraf yang sesuai. Pada makalah ini digunakan metode *Singular Value Decomposition* untuk menginisialisasi bobot jaringan syaraf. Surface normal yang dihasilkan oleh masing-masing citra diproses

dengan tiga metode pemrosesan, yaitu PCA, penjumlahan, dan rata-rata untuk mengetahui metode mana yang performanya lebih baik. Hasil uji coba menampilkan bahwa hasil ketiga metode pemrosesan tersebut relatif sama, namun waktu tercepat diperoleh dari metode penjumlahan.

Bentuk permukaan objek berpengaruh terhadap hasil rekonstruksi. Metode photometric stereo berbasis jaringan syaraf ini menghasilkan bentuk 3D yang lebih baik jika permukaan objek berbentuk cembung.

Agar hasil surface normal yang didapat lebih akurat, diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mendapatkan algoritma jaringan syaraf yang dapat mengekstraksi *surface normal* dan *albedo* dengan lebih optimal. Selain itu, perlu memperbanyak jenis objek yang akan direkonstruksi agar dapat diketahui apakah metode ini efektif pada sembarang objek. Dapat juga digunakan model permukaan selain permukaan *Lambertian* untuk mengatasi permukaan yang mengkilap.

## 6. DAFTAR PUSTAKA

- [1]. A.L Yuille and D.Snow, Shape and Albedo from Multiple Images using Integrability, *IEEE Trans on PAMI*, 2002.
- [2]. P.N. Belhumeur, A.S. Geoghiades, and D.J Kriegman, From Few To Many: Illumination Cone Models for Face Recognition Under Variable Lighting And Pose, *IEEE Trans on PAMI*, Vol 23, No 6, pp.643-660, June 2001.
- [3]. Wen-Chang Chen. Neural-Network-Based Photometric Stereo for 3D Surface Reconstruction, *International Joint Conference on Neural Networks*, 2006. IJCNN '06.
- [4]. Linda G. Shapiro and George C. Stockman, *Computer Vision*, New Jersey, Prentice Hall, 2001.
- [5]. R.T. Frankot and R.Chellappa, A Method for Enforcing Integrability in Shape From Shading Algorithms, *IEEE Trans on PAMI*, Vol.10, No. 4, pp.439-451, July 1988.
- [6]. R.J. Woodham, Photometric Method for Determining Surface Orientation from Multiple Images, *Jour of Optical Engineering*, Vol. 19, No. 1, 1980.

- 
- [7]. K.M Lee, C.J Kuo, Shape Reconstruction from Photometric Stereo, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992.
- [8]. P. Belhumeur, A. Georghiades and D. Kriegman, *Illumination Based Image Synthesis*,  
<http://www.patentstorm.us/patents/>
- [9]. Amit Agrawal, Ramesh Raskar and Rama Chellappa, *What is the Range of Surface Reconstructions from a Gradient Field?*, Berlin, Springer Berlin/Heidelberg, 2006.  
*online* :  
<http://www.cfar.umd.edu/~aagrwal>
- [10]. Parikshit Prasad, *Shape from Shading and Photometric Stereo Algorithm Modification and Experiments*, Master Thesis, Department of Electrical & Computer Engineering and Computer Science, University of Cincinnati, 2004.
- [11]. T. J. Chin, D. Suter, *A Study of The Illumination Cones Method for Face Recognition Under Variable Illumination*, Technical Report MECSE-7-2004 Department of Electrical and Computer System Engineering, Monash University, 2004.