

DETEKSI FITUR CITRA STEREO TERPOLARISASI

Mohammad Iqbal^{1,2}, Imam Ahmad Trinugroho²

¹Laboratoire Le2i - UMR CNRS 5158, Université de Bourgogne, IUT Le Creusot, Perancis

²Fakultas Ilmu Komputer, Universitas Gunadarma, Jl. Margonda Raya 100, Depok, Indonesia

E-mail: mohiqbal@staff.gunadarma.ac.id

ABSTRAK

Pengolahan citra terpolarisasi membutuhkan penanganan khusus, terlebih jika kita menggunakan citra ini dalam sistem stereo. Citra terpolarisasi yang terbentuk dari instalasi sistem optik pada sistem pencitraan (imaging system) konvensional akan menghasilkan citra yang berkualitas rendah. Pasangan citra yang cenderung 'gelap' jika diterapkan begitu saja dalam sistem stereo untuk melakukan pencocokan citra (image matching) kiri dan kanan akan menghasilkan kecocokan yang rendah pula. Dalam makalah ini, penulis mencoba melakukan penyetaraan histogram pada tiap pasang citra terpolarisasi yang diambil, lalu memanfaatkan algoritma SIFT untuk melakukan pencocokan citra, kemudian membandingkan hasilnya dengan pencocokan citra SIFT pada pasangan citra terpolarisasi orisinal. Selain itu, dalam makalah ini juga dibahas beberapa kemungkinan konfigurasi parameter SIFT untuk pencocokan citra dan instalasi sistem polarisasi citra yang memungkinkan untuk mendapatkan hasil citra terpolarisasi yang berkualitas cukup, tanpa mengurangi informasi polarisasi yang ada di dalamnya.

Kata Kunci: polarisasi citra, sistem stereo, pencocokan citra

1. FUNDAMENTAL POLARISASI CAHAYA DAN SISTEM STEREO

Ada dua terminologi besar yang akan di bahas pada makalah ini, yaitu polarisasi citra dan sistem stereo. Pada bagian ini akan dipaparkan teori yang mendasari polarisasi citra dan sistem stereo, kemudian bagian selanjutnya menjelaskan mengenai konfigurasi dasar percobaan deteksi fitur citra terpolarisasi dari sistem stereo tersebut sampai dengan melakukan pencocokan citra stereo. Setelah itu pada bagian akhir akan dipaparkan kesimpulan yang didapat dari hasil percobaan sebelumnya.

1.1 Polarisasi Citra

Pada umumnya kejadian polarisasi cahaya di alam, diakibatkan oleh pantulan dan hamburan cahaya.

Polarisasi cahaya akibat pantulan cahaya terjadi ketika cahaya *unpolarized* dari matahari (panel kiri) akan menjadi terpolarisasi secara parsial linier ketika terpantul oleh permukaan air (atau bahan-bahan lain yang dapat memantulkan cahaya). Cahaya yang terpantul akan menjadi terpolarisasi secara horizontal (panel kanan).

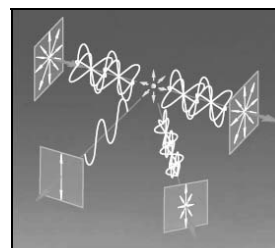


Gambar 1. Polarisasi oleh pantulan cahaya dari permukaan air (Wehner, 2001)

Status polarisasi akibat pantulan dapat dihitung menggunakan hukum Fresnel yang menyatakan

bahwa untuk permukaan yang tidak menghamburkan cahaya sudut pantul selalu sama dengan sudut datang. Hal ini dapat digunakan untuk menghitung intensitas pantulan. Selanjutnya, dengan menambahkan karakteristik polarizer kita bisa mendapatkan status polarisasi.

Selanjutnya adalah polarisasi akibat hamburan cahaya (*scattering*). Contoh fenomena ini dapat disaksikan pada langit biru. Warna di langit diciptakan oleh cahaya yang terhambur yang dipantul-pantulkan ke segala arah dengan acak oleh molekul di atmosfer. Prosesnya dapat dilihat pada gambar 2 di bawah ini.



Gambar 2. Polarisasi oleh hamburan cahaya pada atmosfer di langit (Wehner, 2001)

Cahaya matahari yang tidak terpolarisasi (panel kiri atas) tetap tidak terpolarisasi jika langsung mencapai observer (dengan sudut hambur 0° , lihat panel kanan atas). Namun cahaya ini akan menjadi polarisasi linier jika terhambur oleh molekul atmosfer (O_2 dan N_2). Berdasarkan teori Rayleigh, derajat polarisasi akan mencapai maksimum jika sudut hamburnya 90° (lihat panel bawah kiri), dan sebagian sudut hambur yang lainnya akan menyebabkan cahaya terpolarisasi dengan derajat polarisasi yang lebih rendah (lihat panel kanan bawah).

Polarisasi cahaya parsial linier dapat diukur pada level piksel dengan mentransmisikan radiasi cahaya melalui filter polarisasi. Radiasi cahaya ini akan bervariasi secara sinusoidal sesuai dengan orientasi filter. Hal ini sesuai dengan riset yang telah dikerjakan oleh Wolf (1997) yang dapat dilihat dalam persamaan di bawah ini.

Fase Polarisasi :

$$\theta = 0.5 * \arctan ((I_0 + I_{90} - 2I_{45}) / I_{90} - I_0) \quad (1)$$

$$\text{Jika } I_{90} < I_0 \text{ [if } (I_{45} < I_0) \theta = \theta + 90 \text{ selain itu } \theta = \theta + 90] \text{ Intensitas } I = I_0 + I_{45} \quad (2)$$

Polarisasi parsial atau derajat polarisasi :

$$P = (I_{90} - I_0) / (I_{90} + I_0) \cos 2\theta \quad (3)$$

Dimana I_0 , I_{45} dan I_{90} adalah representasi pengukuran citra intensitas yang diambil pada sudut 0, 45 dan 90 di lensa polarizer.

Status polarisasi cahaya oparsial linier pun dapat dihitung dengan memanfaatkan stokes parameter. Ini dilakukan berdasarkan riset yang dilakukan oleh Morel (2007). Metode ini akan meningkatkan detail informasi polarisasi yang bisa ditangkap. Mereka memanfaatkan metode *least mean square* terhadap rangkaian citra intentitas dengan sudut α lensa polarizer yang berbeda. Persamaan di bawah ini yang digunakan untuk menghitung status polarisasi dengan metode ini.

$$I_p(\alpha) = \frac{1}{2}(S_0 + S_1 \cos 2\alpha + S_2 \sin 2\alpha) \quad (4)$$

Dengan mengetahui S_0 , S_1 dan S_2 kita bisa menghitung status polarisasi dengan persamaan di bawah ini.

$$\left\{ \begin{array}{l} I = S_0 \\ \rho = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{S_0} \\ \phi = \arctan \frac{S_2}{S_1} \end{array} \right. \quad (5)$$

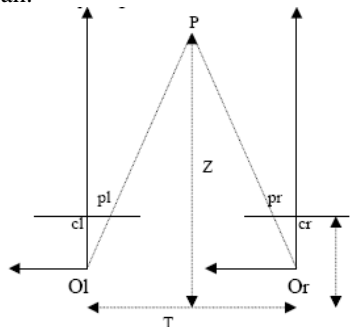
1.2 Sistem Stereo

Dalam pengembangan penelitian akuisisi citra terpolarisasi, teknik ini mengarah ke penggunaan sistem akuisisi stereo. Sistem stereo ini akan memberikan perluasan pandangan dari suatu obyek, yang memungkinkan mendapatkan informasi tidak hanya secara dua dimensi tetapi juga mendapatkan kedalaman dari suatu obyek. Selain itu juga akan mendapatkan informasi jarak dari dua atau lebih citra yang diambil dari titik pandang (view point) yang berbeda. Kemampuan ini tentu saja sangat penting untuk aplikasi-aplikasi rekonstruksi 3D dan juga aplikasi segmentasi area.

1.2.1 Teori Sistem Stereo

Ada dua masalah besar yang harus dipecahkan dalam sistem stereo, yaitu korespondensi item

(correspondence) dan rekonstruksi. Korespondensi item adalah teknik menentukan item yang mana di di citra kiri yang berhubungan dengan item yang ada di citra kanan. Sedangkan Rekonstruksi adalah proses konversi ke peta 3D dari *scene* obyek, berdasarkan pada pengetahuan geometri dari sistem stereo dan peta dispariti (*disparity map*). Dispariti disini adalah perbedaan yang dihitung antar obyek yang saling berhubungan.



Gambar 3. Sistem Stereo sederhana (Hartley, 2000)

Sebuah sistem stereo dapat dilihat pada gambar 3 di atas. T adalah baseline, Ol dan Or adalah pusat optik (*optical centers*), Z adalah jarak antara titik P dengan baseline dan f adalah focal length.

Dari segitiga yang similiar (pl, P, Pr) dan (Ol, P, Or), kita memiliki :

$$\frac{T + xl - xr}{Z - f} = \frac{T}{Z} \quad (6)$$

Dimana xl dan xr adalah koordinat dari pl dan pr . Dari sini kita mendapatkan :

$$Z = f \frac{T}{d} \quad (7)$$

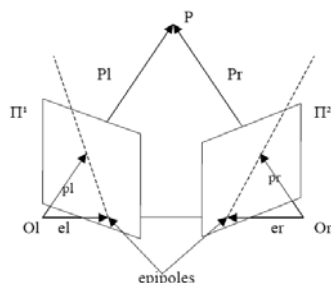
Dengan $d = xr - xl$ adalah dispariti. Kedalaman Z proporsional invers pada dispariti. Dispariti sendiri adalah *sum* dari perbedaan letak pl dan pr dari posisi sebelumnya di citra pertama, misalnya pada $|xl| + |xr|$, sejak $xl < 0$ maka sekarang kita memiliki $xr - xl$.

Selanjutnya adalah parameter sistem stereo, yang terdiri dari :

- Parameter instrinsik, yang menandai transformasi pemetaan titik pada citra dari kamera ke koordinat piksel, pada setiap kamera.
- Parameter ekstrinsik menggambarkan posisi relatif antara dua kamera.

Dengan memiliki informasi f , T , cl dan cr sebagai parameter dari sistem stereo, maka kita dengan mudah dapat melakukan kalibrasi stereo. Namun, ada pula kemungkinan untuk menghitung informasi 3D citra stereo ini tanpa memiliki pengetahuan lebih dulu dari parameter ini. Teknik ini dikenal dengan istilah melakukan *uncalibrated stereo* menggunakan metode epipolar geometri (Humenberger, 2007).

Epipolar geometri memungkinkan mengklarifikasi informasi yang dibutuhkan untuk meningkatkan pencarian elemen yang berkorespondensi pada sepanjang garis citra secara geometris.



Gambar 4. Ilustrasi Epipolar geometri (Hartley, 2000)

Segitiga besar adalah bidang epipolar, segitiga pojok bawah (*Ol dan Or*) adalah pusat optik. Perpotongan antara pusat segitiga dengan bidang citra disebut epipole, yang merepresentasikan pusat dari oposit kamera pada bidang citra. Garis putus-putus adalah garis epipolar yang merepresentasikan citra garis oposit pada bidang citra.

Parameter Ekstrinsik yang merupakan adalah translasi vektor $T=(Or - Ol)$ dan matrik rotasi adalah R . Relasi antara Pr dan Pl didefinisikan oleh $Pr = R(Pl - T)$. relasi antara titik dan proyeksinya (Hartley, 2000) :

$$\begin{aligned} pl &= Pl.(f_l/Z_l) \text{ untuk kiri} \\ pr &= Pr.(f_r/Z_r) \text{ untuk kanan} \end{aligned} \quad (8)$$

Esensi epipolar geometri adalah fakta bahwa bidang epipolar berpotongan dengan setiap citra pada garis yang disebut garis epipolar. Jadi jika kita mengetahui pl , maka P akan dapat terletak dimana saja melewati Ol dan pl . Namun saat citra pada lintasan yang sama pada citra kanan berada dalam garis epipolar yang melewati titik koresponden pr , maka pencocokan yang tepat akan melewati garis epipolar tersebut. Inilah yang disebut *epipolar constraint*. Atau dengan kata lain, titik koresponden Pr untuk titik Pl harus terletak pada garis epipolar.

Dari sini kita dapat membentuk matrik Esensial (E) menghasilkan hubungan antara epipolar constrain dan parameter ekstrinsik sistem stereo. Matrik ini adalah pemetaan antara titik dan garis epipolar yang kita cari. Namun, karena ini belum cukup lengkap untuk dapat melihat hubungan antara sistem stereo, maka parameter instrinsik dibutuhkan untuk menghubungkan koordinat piksel titik citra dengan koordinat koresponden dalam masing-masing kamera. Hubungan ini dapat dicari dengan matrik fundamental (F).

1.2.2 Algoritma Pencocokan Citra

Prinsip-prinsip dasar pencocokan citra dimulai dari penentuan titik-titik yang ingin diekstrak dari

suatu citra. Prinsip ini berkaitan dengan skenario obyek yang akan dipilih untuk diekstrak. Pada umumnya ekstraksi diawali dengan pemilihan kondisi unik dari suatu citra yang meliputi :

- Berdasarkan jenis obyeknya, seperti obyek sederhana atau obyek bertekstur.
- Berdasarkan geometris, misalnya perubahan titik pandang, rotasi, proses zooming, atau perubahan dalam penskalaan obyek.
- Berdasarkan intensitas, seperti perubahan pencahayaan, fenomena polarisasi citra.
- Berdasarkan perlakuan terhadap citra sumber, seperti citra blur atau proses konversi.

Prinsip selanjutnya adalah ditemukannya titik-titik korespondensi antara citra pertama dengan citra yang dibandingkan. Prinsip ini berkaitan dengan bagaimana proses instalasi sistem akuisisi citra. Sistem stereo dapat dibentuk dengan berbagai konfigurasi peralatan pencitraan. Ada yang hanya menggunakan satu kamera dan ada pula memanfaatkan multi kamera. Penggunaan satu kamera untuk mendapatkan citra stereo dimungkinkan dengan menginstalasi peralatan optik biprisma di depan sensor (Lee, 1998), atau dengan membuat *slider* sebagai *baseline* kamera, sehingga setiap proses penangkapan citra dilakukan berurutan dengan mengubah posisi kamera. Namun, penggunaan multi kamera tentu saja lebih mudah. Bahkan kini, kamera stereo terintegrasi sudah bisa didapatkan secara komersial dalam satu paket.

Jika ditinjau dari pendekatan algoritma, terdapat dua kelas algoritma pencocokan citra, yaitu :

- Correlation-based ; algoritma untuk membentuk korespondensi dengan pencocokan intensitas citra, biasanya memanfaatkan jendela piksel tertentu pada setiap bagian citra. Algoritma ini akan menghasilkan peta disparitas yang lengkap (dense disparity map) dimana jarak yang tepat dapat ditemukan pada setiap titik citra. Contoh dari algoritma ini adalah NCC, (Brown, 2003)
- Feature-based ; algoritma untuk membentuk korespondensi dengan pencocokan fitur citra yang unik - biasanya dengan cara menghasilkan peta disparitas tepi (edge) yang terdiri dari pola titik yang berhubungan dengan identitas fitur citra tertentu, dispariti map tidak terlalu lengkap, dan jumlah titik yang teridentifikasi terkait dengan jumlah fitur yang ditemukan.

2. DETEKSI FITUR CITRA STEREO TERPOLARISASI

Berdasarkan prinsip pencocokan fitur citra yang telah dijabarkan pada bagian sebelumnya, maka dalam penulisan penulis mencoba mengasumsikan skenario pada penangkapan citra stereo terpolarisasi, sebagai berikut:

- titik-titik yang ingin diekstrak dari suatu citra adalah dari obyek bertekstur sederhana dan juga obyek dengan bertekstur kompleks.
- Citra dari polarisasi cahaya akan menghasilkan perbedaan iluminasi yang tergantung dengan variabel α polarizer.
- Perubahan titik pandang yang tidak radikal, posisi dua kamera statik, tidak ada sudut pada titik pandang kamera.
- Deteksi akan dimanfaatkan dalam aplikasi navigasi visual mobil robot.

2.1 Instalasi Sistem

Dua metode umum pencocokan citra yaitu Correlation-based dan feature-based memiliki kelemahan dan kelebihan masing-masing. Metode pertama yang mudah untuk diimplementasikan, serta menghasilkan peta dispariti yang lengkap sehingga akan sangat berguna untuk rekonstruksi permukaan obyek, namun tidak bekerja baik ketika titik pandang sangat berbeda yang salah satunya dapat disebabkan oleh perubahan arah iluminasi. Lalu adanya masalah pada ekstrak perspektif dan perlu waktu cukup lama untuk selesai, juga perlu diperhatikan.

Metode Feature-based yang bekerja dengan memilih fitur unik obyek, akan menjadi sangat handal ketika fitur yang tepat dapat diekstrak dari scene citra. Tentu ini akan lebih cepat dari correlation-based yang menggunakan jendela pencocokan yang memeriksa setiap area piksel citra. Namun metode ini hanya menghasilkan map dispariti yang tidak lengkap, relatif kurang sensitif pada perubahan iluminasi, tetapi masih baik dibandingkan metode pertama.

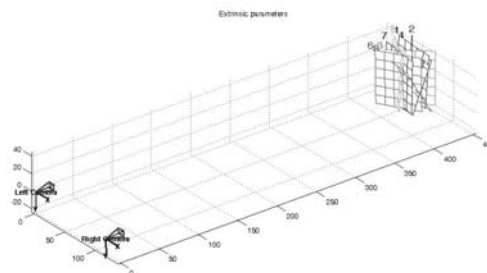
Berdasarkan pertimbangan inilah, maka dengan mengacu pada asumsi yang penulis buat di atas, maka penulis memilih metode feature-based. Dalam percobaan penulis akan tetap mencoba obyek bertekstur sederhana sekaligus yang bertekstur kompleks. Aplikasi navigasi visual robot, tentu tidak membutuhkan peta dispariti yang terlalu detil dan untuk menghadapi perbedaan iluminasi karena polarisasi cahaya (Pandian, 2008), penulis harus mendapatkan parameter yang tepat agar dapat tetap terdeteksi dengan baik.



Gambar 5. Konfigurasi dasar Akuisisi citra dengan komputer

Instalasi perangkat pencitraan dapat dilihat pada gambar 5 di atas. Menggunakan kamera AVT Guppy F-080B (kamera non-warna) yang dirangkai secara stereo dengan ekstrinsik parameter yang didapatkan dari toolbox kalibrasi stereo Bouguet.

Rotation vector: $om = [-0.04846 \quad 0.02979 \quad -0.00937]$
Translation vector: $T = [-113.86373 \quad -1.18865 \quad 7.36452]$



Gambar 6. Parameter ekstrinsik dua kamera Guppy F-080B yang dirangkai Stereo

Pada lensa kamera dipasang filter polarizer linier dengan α kiri di set 45° dan α kanan di set -45° . Hal ini untuk mendapatkan informasi polarisasi yang dapat terukur dengan baik (Goldstein, 2003)

2.2 Algoritma Pencocokan citra SIFT (Scale Invariant Feature Transform)

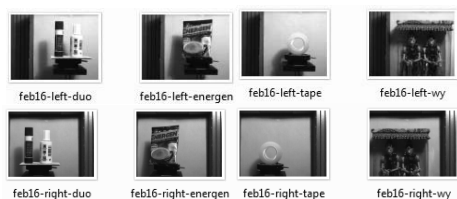
Algoritma ini cukup handal untuk perubahan-perubahan akibat iluminasi, noise, titik pandang yang dapat kita temui pada citra-citra hasil polarisasi cahaya. Contoh algoritma dapat dilihat dalam Gambar 7 (Lowe, 1999).

- Temukan titik interes atau 'keypoint' :
 - keypoint diambil sebagai maksima/minima dari piramid DoG (Difference of Gaussian)
 - Temukan tetangga ekstrima pada 3D DoG Space (jika piksel adalah ekstrima dalam wilayah yang bertetangga, maka piksel tersebut adalah kandidat keypoint)
 - Jika terlalu banyak keypoint maka : hilangkan kontras rendah dan hilangkan tepi
- Temukan dominasi orientasi keypoint :
 - Hitung gradien magnitude dan orientasi.
 - Buat histogram orientasi
 - Orientasi keypoint (s) = puncak (s)
- Hitung deskriptor
- Cocokkan dengan citra lainnya :
 - memilih tetangga terdekat
 - Hough transform voting
 - least square

Gambar 7. Algoritma SIFT

2.3 Pengolahan Citra terpolarisasi dan pencocokan citra

Gambar di bawah ini adalah 4 macam pasangan citra yang didapatkan dari instalasi sistem dengan konfigurasi di atas. Akuisisi citra dilakukan secara serentak dalam satu waktu antara dua pasang citra kiri dan kanan untuk dapat menangkap scene cahaya polarisasi saat yang bersamaan. Perbedaan titik pandang kamera akan memberikan informasi polarisasi dalam amplitudo yang berbeda.



Gambar 8. Pasangan stereo citra terpolarisasi

Penerapan algoritma SIFT kemudian dilakukan pada tiap pasangan citra terpolarisasi tersebut dengan mengatur parameter rasio distribusi untuk mendapatkan pencocokan terbaik. Hasilnya dapat dilihat pada tabel 1 di bawah ini.

Tabel 1. Hasil Ekstraksi keypoint dan pencocokan stereo menggunakan algoritma SIFT

Citra	Dist Ratio	keypoint		Match
		Kiri	Kanan	
duo	0.1	522	752	0
	0.6	522	752	85
	0.9	522	752	275
	0.48	522	752	47
energen	0.1	638	754	0
	0.6	638	754	194
	0.9	638	754	372
	0.48	638	754	143
tape	0.1	143	203	0
	0.6	143	203	9
	0.9	143	203	60
	0.48	143	203	6

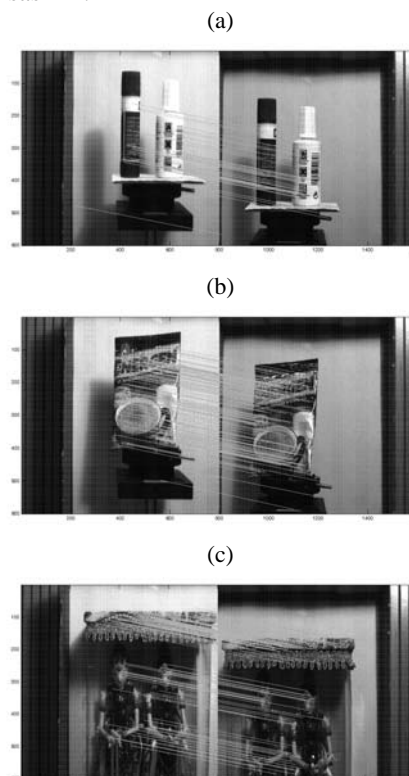
Tabel 2. Hasil Ekstraksi keypoint dan pencocokan stereo menggunakan algoritma SIFT (Lanjutan)

Citra	Dist Ratio	keypoint		Match
		Kiri	Kanan	
wy	0.1	1331	1287	0
	0.6	1331	1287	228
	0.9	1331	1287	608
	0.48	1331	1287	133

Dengan mengatur parameter distribusi rasio sebaran fitur unik pada citra yang berada dalam skala 0 sampai 1, penulis mencoba memilih nilai yang memiliki kecocokan yang paling banyak benarnya. Untuk itu penulis mencoba mengambil nilai dalam kisaran 0.1, 0.2, 0.48, 0.6 dan 0.9. Penulis menemukan, semakin tinggi parameter distribusi rasio, maka menghasilkan kesalahan pencocokan yang makin tinggi pula. Begitu pun sebaliknya, semakin kecil parameter distribusi rasio sehingga mendekati 0, akan memperkecil kemampuan algoritma ini untuk mendeteksi kecocokan.

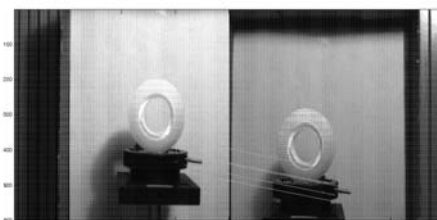
Dari percobaan yang berulang kali, penulis dapat menyimpulkan bahwa, nilai distribusi rasio pada batas optimal untuk menemukan pencocokan yang tepat adalah pada 0.47 – 0.49. Gambar berikut

ini adalah hasil pencocokan pada distribusi rasio 0.48 yang memberikan hasil terbaik untuk citra terpolarisasi ini.



Gambar 9. Ilustrasi Hasil Pencocokan SIFT untuk citra duo (a), energen (b) dan wayang (c)

Fakta yang menarik ditemukan pada citra *tape* yang tidak memiliki tekstur yang kompleks, ternyata algoritma ini tidak bisa mendapatkan kecocokan citra yang optimal, walau pun set parameter rasio sudah menggunakan nilai yang optimal yaitu 0.48. Nilai kecocokannya yang sangat sedikit, sangat kontras jika dibandingkan dengan kecocokan pada tiga citra lainnya yaitu citra duo, citra energen dan citra wayang. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 10. Ilustrasi Hasil Pencocokan SIFT untuk citra tape

3. KESIMPULAN

Penggunaan algoritma SIFT untuk melakukan pencocokan citra terpolarisasi yang cenderung memiliki perbedaan iluminasi yang tinggi dan terdapatnya gangguan noise dapat mencapai titik optimal pencocokan dengan terlebih dahulu

mengatur parameter distribusi rasio sebaran fitur unik pada citra. Dalam percobaan penulis adalah pada kisaran nilai 0.47 – 0.49.

Banyaknya titik berfitur unik yang dapat diekstrak, belum menjamin ketepatan dalam pencocokan. Walaupun pada hasil menunjukkan kecocokan yang banyak, namun kesalahan dalam pencocokan pun sangat banyak pula, sehingga garis yang *outlier* yang dihasilkan pun sangat banyak.

PUSTAKA

- Brown, Myron Z.(2003), *Advances in Computational Stereo*, IEEE TRANSACTIONS ON PATTERN ANALYSIS AND MACHINE INTELLIGENCE, VOL. 25, NO. 8.
- Doo Hyun Lee, In So Kweon, Roberto Cipolla (1998), “*Single Lens Stereo with a Biprism*”, IAPR Workshop on Machine Vision Applications, Nov. 17-19, Makuhari, Chiba, Japan
- Di Stefano, Luigi (2003), A fast area-based stereo matching algorithm, Elsevier Image and Vision Computing 22(2004) 983-105.
- GOLDSTEIN, DENNIS (2003), *Polarized Light*, Second Edition, CRC Press, ISBN-13: 9780824740535
- Humenberger, Martin (2007), Evaluation of Stereo Matching Systems for Real World Applications Using Structured Light for Ground Truth Estimation, MVA2007 IAPR Conference on Machine Vision Applications, May 16-18, 2007, Tokyo, JAPAN.
- J.Bouguet. Matlab camera calibration toolbox, (2008).Website Caltech. Edu <http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calibdoc/index.html>.
- L.B.Wolff (1997), “*Polarization Vision : a new sensory approach to Image Understanding*”, Image and Vision Computing Elsevier Journal, Vol 15.
- L.B. Wolff and A. Andreou (1995), “*Polarization Camera Sensor*” Image and Vision Computing Journal, Vol 13 Number 16.
- Lowe, David G. (1999). “*Object recognition from local scale-invariant features*”. Proceedings of the International Conference on Computer Vision 2: 1150–1157, ICCV.1999.790410.
- R. Hartley and A. Zisserman (2000), *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Cambridge: UK, Cambridge Univ. Press.
- Pandian, Arun Kumar (2008), *Robot navigation using stereo vision and Polarization imaging*, VIBOT Master thesis.
- Wehner, Rudiger (2001), *Polarization Vision – A Uniform Sensory Capacity ?*, The Journal of Experimental Biology 204.