

REKONSTRUKSI TIGA DIMENSI (3D) RELIEF CANDI MENGUNAKAN SEGMENTASI GRAYSCALE CITRA DUA DIMENSI (2D) TUNGGAL

Dedi Ary Prasetya¹, Indah Soesanti², Rudy Hartanto³

¹Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surakarta
Jl. A. Yani Tromol Pos 1 Pabelan Kartasura 57102 Telp 0271 717417

^{2,3}Jurusan Teknik Elektro dan Teknologi Informasi Fakultas Teknik
Universitas Gadjah Mada Yogyakarta
Email : dediary@ums.ac.id

Abstrak

Metode rekonstruksi 3D obyek relief candi ini menggunakan asumsi sederhana, yaitu berdasarkan gelap terang dari citra. Pertama kali adalah proses memperoleh point cloud dari dengan cara: citra dibuat menjadi grayscale lalu dikelompokkan berdasarkan tingkat keabuannya untuk kemudian diambil fiturnya menggunakan algoritma SIFT. Fitur yang dihasilkan lalu disusun secara bertingkat. Fitur paling gelap pada layer terbawah kemudian diberikan jarak tertentu untuk menempatkan tiap layer di atasnya. Point cloud ini lalu direkonstruksi menjadi sebuah obyek 3D dengan menghubungkan tiap titik yang ada menggunakan algoritma Ball-Pivoting untuk membentuk mesh 3D.

Kumpulan titik dapat disusun dari hasil ekstraksi fitur tiap segmen citra dengan jarak antar lapisan yang sangat dekat untuk memudahkan proses rekonstruksi 3D. Proses rekonstruksi dengan algoritma Ball Pivoting sebagai pembentukan permukaan 3D dapat dilakukan dengan menggunakan beberapa nilai radius bola, pada penelitian ini hasil rekonstruksi lebih baik pada nilai 7,5% dari set point. Proses rekonstruksi bisa menghasilkan permukaan 3D yang lebih baik saat menggunakan citra relief yang sederhana, kedalaman relief yang relatif dekat dan seragam serta tidak mempunyai lekukan permukaan yang rumit.

Kata kunci: *algoritma Ball Pivoting; kumpulan titik; relief candi; segmentasi tingkat keabuan; SIFT*

Pendahuluan

Digitalisasi dalam bentuk 3D sangat diperlukan dalam bidang arkeologi untuk perekaman, dokumentasi, dan keperluan rekonstruksi bangunan sebagai bagian dari perlindungan dan pelestarian cagar budaya. Pemodelan 3D bangunan Candi Borobudur telah dilakukan dengan beberapa metode, di antaranya dengan *image and range modeling*, *range based modeling*, dan kombinasi dari *image and range modeling* yang dilakukan dengan bantuan *Terrestrial Laser Scanner* dan kamera digital (Andaru, Ruli, 2010)

Perkembangan teknologi yang digunakan untuk merekonstruksi bangunan maupun objek bersejarah bervariasi mulai menggunakan 3D laser scanner hingga menggunakan input banyak citra yang diambil menggunakan kamera atau *video recorder*. Rekonstruksi 3D yang hanya menggunakan sumber satu citra dua dimensi (2D) tidak membutuhkan biaya besar karena cukup menggunakan sebuah citra sumber. Rekonstruksi ini lebih banyak menggunakan asumsi untuk menentukan kedalaman obyek bentuk yang tidak banyak membutuhkan titik.

Untuk membuat rekonstruksi relief candi yang baik, dapat menggunakan pemindai laser 3D, namun dari sisi biaya masih yang sangat mahal. Untuk itu, salah satu metode yang sederhana dapat dilakukan rekonstruksi 3D relief candi adalah dengan memanfaatkan citra 2D tunggal. Di sisi lain, rekonstruksi relief candi membutuhkan banyak titik sebagai dasar dari pembentukan obyek 3D, khususnya pada bagian permukaan relief dan bagian lekuk relief yang menjorok ke dalam. Penelitian ini mempunyai tujuan untuk mengembangkan metode yang menghasilkan kumpulan titik (*point cloud*) dari sebuah citra relief 2D, kemudian menganalisa hasil rekonstruksi 3D menggunakan Algoritma *Ball Pivoting* dari kumpulan titik yang didapatkan dari sebuah citra 2D.

Hipotesis

Gambar relief candi banyak dijumpai diberbagai media elektronik, internet, dan media cetak sebagai media promosi wisata maupun berita, beberapa di antaranya mempunyai kualitas yang bagus. lumut ataupun lapuk yang mengubah warna batu sebagai media relief.

Relief candi memiliki ukiran yang khas bercampur dengan tekstur batu. Kedalaman dari relief candi di Indonesia hanya berkisar 1 – 7 cm dalam bingkai-bingkai persegi empat. Di sekeliling relief bergambar manusia atau hewan dihiasi relief ornamen yang menempel pada dinding batu yang sama. Jenis relief candi pun berbeda-beda tergantung pada proses pembuatan, dan bahan yang digunakan. Sementara itu citra relief yang didapatkan juga menunjukkan perbedaan-perbedaan tersebut. Sudut pengambilan citra, jenis kamera, dan pencahayaan saat pengambilan citra juga mempengaruhi citra relief candi yang digunakan dalam penelitian ini. Beberapa hipotesis yang dikembangkan dalam penelitian ini sebagai berikut:

- Sebuah citra dapat dipisah-pisahkan berdasarkan level keabuaannya.
- Bentuk dari beberapa relief batu dapat dilihat dari gelap terangnya citra relief.
- Sebuah citra dapat diekstraksi fiturnya menggunakan SIFT.
- Beberapa matriks titik dapat disusun menjadi sebuah kumpulan titik.
- Kumpulan titik (*point cloud*) yang cukup rapat direkonstruksi menjadi obyek 3D menggunakan BPA.

Tinjauan pustaka

Teknik rekonstruksi yang menggunakan dengan tiga tahapan telah dikembangkan yaitu dengan tahapan estimasi disparitas, perkiraan gabungan, dan pendekatan volumetric (Narayana 1998). Tahapan yang pertama adalah membuat sebuah estimasi disparitas *pair-wise* untuk pandangan yang berbatasan secara langsung menggunakan skema pemrograman dinamis yang menghasilkan *depth map* padat namun tidak lengkap dengan cara memberlakukan berbagai kendala pada solusi. Kemudian sebuah perkiraan gabungan yang optimal untuk setiap pandangan dikomputasikan dengan menambahkan estimasi disparitas yang sesuai secara gradual dari pandangan yang jauh pada basis per piksel sepanjang tidak diklasifikasikan sebagai garis luar terhadap estimasi kedalaman untuk pixel yang sedang dilakukan. Pada tahap ketiga, gabungan dari *depth map* disatukan menggunakan pendekatan volumetrik.

Penggunaan *robust window-based matching* dilakukan untuk komputasi pada estimasi *depth map* (Pollefeys, 2004). Komputasi dilakukan pada *local maxima* dari kurva korelasi antara pandangan referensi dengan citra di dekatnya. Hal ini digunakan untuk mencari *depth range* dimana global maximum ditentukan dari semua pandangan yang termasuk dalam kriteria pemilihan berbasis *thresh-hold*. Kombinasi dari *volume filtering*, evolusi *mesh* berbasis sebuah formula *snake* dan siluet tambahan untuk menutup model secara utuh. Penggunaan teknik perbaikan lokal yang menggunakan formula *snake* membutuhkan estimasi yang begitu rapat untuk bentuk yang diperkirakan dan juga topologi objek sama dengan *visual hull*-nya. Dengan demikian data siluet harus diekstraksikan. Keunggulannya ada pada output yang dihasilkan merupakan model dengan permukaan lengkap dan dapat diisi menggunakan regularisasi dan siluet.

Pendekatan baru telah dikembangkan berdasarkan apa yang telah dilakukan oleh Hernandez dan Schmitt (2004) dengan membuat algoritma rekonstruksi yang jauh lebih sederhana dalam implementasi maupun reproduksinya. Algoritma yang mereka kembangkan terdiri atas dua tahapan. Yang pertama adalah merekonstruksi *depth map* untuk setiap pandangan input dan yang kedua menggabungkan hasilnya menjadi sebuah model *mesh*. *Depth map* dikomputasikan menggunakan versi robust dan sederhana dari *window-matching* dengan sedikit pandangan di dekatnya. Estimasi dilakukan dengan nilai yang *confidence* untuk setiap piksel dan hanya menggunakan titik-titik dengan nilai keyakinan tinggi untuk proses penggabungan.

Pendekatan lain dengan menerapkan teknik rekonstruksi pasif, dimana rekonstruksi objek 3D dilakukan dengan menggunakan citra yang diambil dari posisi yang berbeda yang mengarah ke obyek yang sama menggunakan sebuah kamera *Digital Single Lens Reflection* (DSLR). Proses teksturisasi objek 3D dilakukan dengan memanfaatkan algoritma *Convex Hull* dan *Random Sample Consensus* (RANSAC). Percobaan dilakukan pada objek patung miniatur Merlion Singapore dan bangunan Herz-Jesu (Goesele, 2006). Pendekatan dilanjutkan dengan penggunaan kamera digital sederhana untuk menentukan titik-titik persamaan dari kedua citra 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 (Wibirama, 2012).

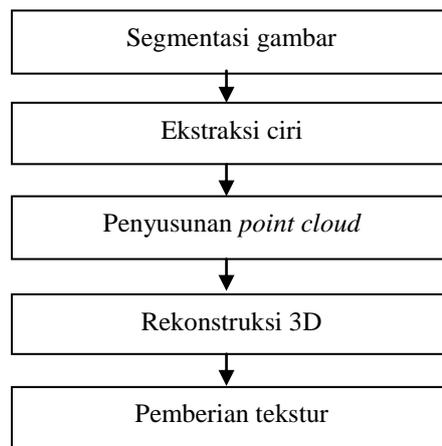
Beberapa penelitian dan publikasi terkait rekonstruksi objek 3D pada objek-objek peninggalan bersejarah telah banyak dilakukan. Rekonstruksi 3D situs penggalian di Monte Polizzo bagian barat Sisili, Italia (Benko, 2004) ditampilkan kembali dalam virtual reality dengan perangkat yang mereka sebut sebagai *Visual Interaction Tool for Archaeology*. Rekonstruksi situs peninggalan Budha di Taxila, Pakistan menggunakan laser scanner dengan memperhatikan aspek sejarah, arsitektur, kelestarian, nilai seni, dan pariwisata secara global. Demikian juga dengan beberapa bangunan peninggalan Yungang Grotto dan patung Qinlin di Cina yang telah direkonstruksi menggunakan

3D laser scanner dan kamera CCD (Shao-xing, 2005).

Situs Anyang Yinxu di Cina juga telah direkonstruksi (Xinyu, 2007) menggunakan teknik pemodelan 3D berbasis *stereo photo-pairs*, teknik tampilan berbasis pada sistem CAVE (*cave automatic virtual environment*), teknik jelajah menggunakan animasi virtual, dan teknik control interaksi citra berbasis VRML (*Virtual Reality Modeling Language*).

Metodologi Penelitian

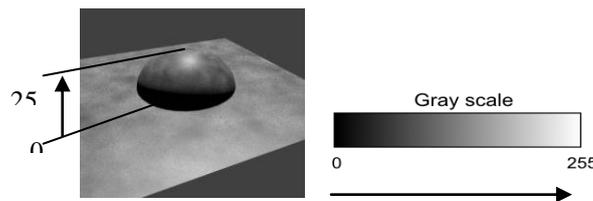
Jalan penelitian yang dilakukan mengikuti alur pada Gambar 1. Proses ekstraksi citra dan yang ketiga adalah mengambil titik-titik dari citra teresttrak. Setelah itu tahap keempat menyusun titik-titik dari citra teresttrak menjadi kumpulan titik yang sesuai dengan asumsi kedalaman permukaan. Setelah terbentuk point cloud, tahap selanjutnya adalah pembentukan permukaan 3D menggunakan algoritma *Ball Pivoting*. Setelah proses rekonstruksi 3D dapat dilakukan, selanjutnya dilakukan pengamatan dan analisis atas hasil. Jika masih ada beberapa kelemahan yang bisa diperbaiki maka proses akan diperbaiki dengan mengulang beberapa tahapan sebelumnya.



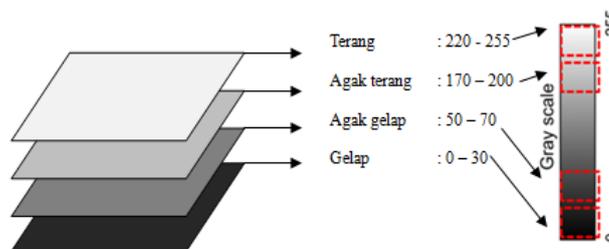
Gambar 1. Blok diagram perancangan sistem

Segmentasi citra grayscale

Proses segmentasi citra dilakukan berdasarkan gelap terang yang diasumsikan perbedaan pada level keabuannya (*grayscale*). Gambar 2 memberikan sedikit gambaran tentang asumsi gelap terang berdasarkan level keabuan sekaligus menjadi asumsi kedalaman bagi rekonstruksi 3D.



Gambar 2. Asumsi kedalaman relief



Gambar 3. Segmentasi citra berdasarkan level keabuan

Segmentasi dilakukan dengan memisahkan citra menjadi empat bagian dengan tujuan untuk membagi citra menjadi dua bagian utama yaitu bagian pertama untuk memperoleh bentuk relief dari segmen gelap dan agak gelap serta bagian yang kedua untuk memperoleh bentuk permukaan relief yang didapat dari segmen terang dan agak terang.

Penentuan batas segmentasi dilakukan secara tetap untuk memudahkan proses. Nilai 0 – 30 untuk gelap dan 50 – 70 untuk segmen citra agak gelap. Hal ini untuk memperoleh bentuk relief pada segmen paling gelap dan segmen agak gelap yang ada di sekitar pixel paling gelap. Bagian permukaan diharapkan bisa didapatkan dari dua segmentasi, yaitu pada nilai 220 – 255 untuk mendapatkan pixel paling terang dan ambang nilai 170 – 200 untuk mendapatkan pixel agak terang. Nilai 70 – 170 tidak digunakan dalam segmentasi karena pada nilai tersebut tidak cukup memberi informasi apakah sebagai bentuk relief atau permukaannya.

Metode yang digunakan untuk proses segmentasi ini adalah dengan cara membandingkan pixel yang ada satu persatu dari citra sumber yang telah diubah terlebih dahulu menjadi sebuah citra format *grayscale*. Jika pixel yang dibandingkan tersebut nilai keabuannya ada di dalam nilai batas maka pixel diubah warnanya menjadi nilai maksimal (255) atau putih. Sebaliknya, jika nilai keabuan pixel di luar batas, maka pixel tersebut diubah menjadi nilai minimal (0) atau hitam. Dengan menggunakan beberapa nilai batas seperti pada Gambar 3, proses segmentasi ini mengubah sebuah citra sumber relief candi *grayscale* menjadi empat citra hitam putih yang berbeda-beda.

Ekstraksi ciri citra menggunakan algoritma sift

Algoritma SIFT ini sudah banyak digunakan untuk berbagai keperluan, khususnya pada berbagai algoritma rekonstruksi 3D, yaitu pada proses pencarian titik-titik menarik pada citra dan pencocokan antar beberapa citra. Dalam penelitian ini, algoritma SIFT digunakan untuk memperoleh titik-titik dari citra hasil proses segmentasi. Algoritma ini masih mampu menghasilkan ekstraksi ciri walaupun dari citra hitam putih yang dihasilkan dari proses segmentasi.

Penyusunan *point cloud*

Salah satu komponen penting dalam sebuah pembentukan permukaan (mesh) 3D adalah adanya titik-titik dalam ruang 3D yang merepresentasikan posisi tertentu. Titik-titik disusun sesuai dengan asumsi yang telah ditentukan, yaitu dari citra ekstraksi yang mewakili sisi gelap pada bagian terbawah, citra ekstraksi agak gelap berada di atasnya, kemudian citra ekstraksi agak terang pada posisi lebih atas lagi, dan citra ekstraksi terang berada pada lapisan paling atas. Penempatan titik-titik hasil pencarian ciri dari tiap citra hasil ekstraksi ditunjukkan oleh Gambar 3, dimana penempatan titik-titik tersebut menggunakan jarak yang sama antar lapisan. Algoritma sederhana ini digunakan untuk mendapatkan kumpulan titik (*point cloud*) dengan asumsi kedalaman berdasarkan level keabuan.

Jarak antar lapisan harus cukup dekat agar titik-titik antar lapisan dapat terhubung menjadi satu permukaan 3D. Jika penempatan titik-titik tersebut sedikit lebih jauh, maka bisa jadi akan terbentuk beberapa lapisan permukaan 3D yang tidak menyambung antara lapisan satu dengan yang lain.

Rekonstruksi 3d menggunakan algoritma *ball pivoting*

Algoritma Ball Pivoting banyak digunakan untuk rekonstruksi 3D yang menggunakan banyak titik terutama yang dihasilkan dari proses scan 3D. Pembentukan segitiga lebih sederhana dan waktu proses yang relatif tidak lama. Pembentukan obyek 3D yang menggunakan BPA ini dilakukan dengan bantuan software MeshLab yang di dalamnya sudah terdapat fungsi untuk merekonstruksi dari kumpulan titik (*point cloud*) menjadi sebuah obyek 3D (*mesh*).

Pemberian tekstur pada obyek 3d yang terbentuk

Kesan permukaan 3D akan semakin terlihat saat tekstur citra relief dilekatkan pada permukaan yang telah terbangun. Penempatan tekstur disesuaikan dengan posisi permukaan yang terbentuk agar tampilan menyesuaikan dengan kedalaman relief candi. Tampilan obyek 3D menjadi sangat lebih menarik dengan menambahkan tekstur ke atas obyek bentuk sekaligus untuk melihat kecocokan kedalaman dari obyek 3D. Proses ini menggunakan software Blender dengan cara UV mapping, yaitu menempelkan citra sumber sebagai tekstur.

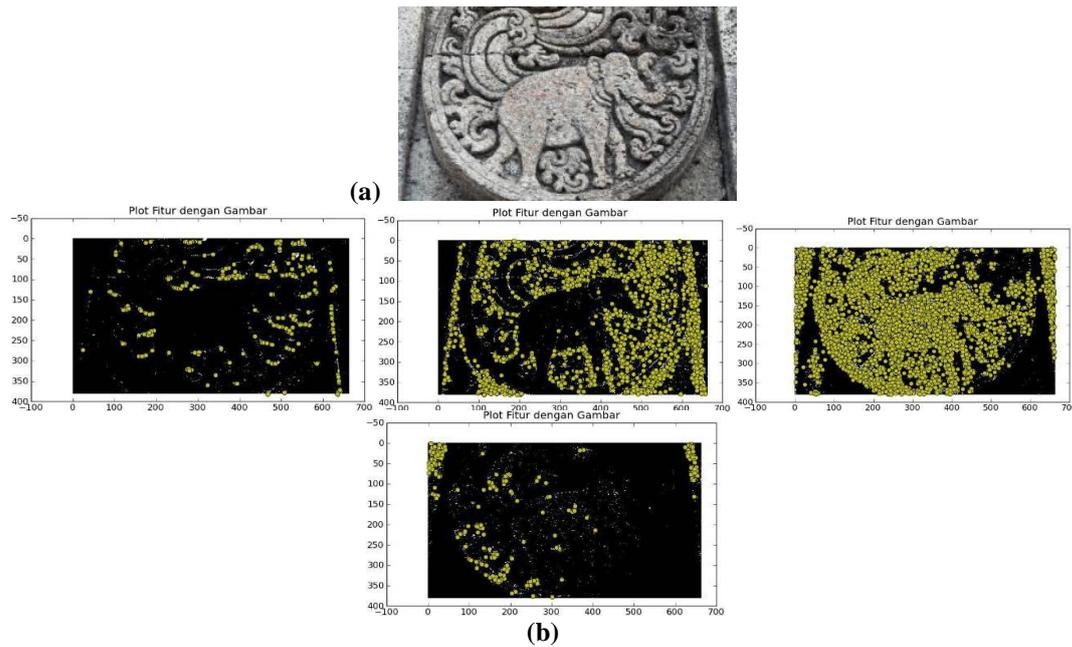
Hasil Penelitian

Segmentasi dan ekstraksi fitur citra relief candi

Gambar 4 menunjukkan hasil segmentasi dan ekstraksi fitur pada sebuah citra relief. Dengan membandingkan citra sumber dengan citra hasil segmentasi dan ekstraksi fitur terlihat ada kecocokan dari sisi gelap terangnya dengan bentuk relief itu sendiri. Bentuk relief terlihat dari citra segmen gelap dan agak gelap sementara bagian permukaan juga terlihat pada citra segmen terang dan agak terang.

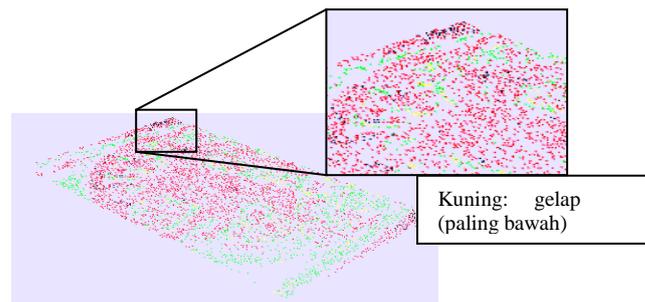
Hasil Penyusunan *Point Cloud*

Point cloud atau kumpulan titik dihasilkan dengan menyusun kumpulan titik dari tiap segmen citra yang sama, mulai kumpulan titik dari citra gelap di bagian paling bawah, agak gelap di atasnya, agak terang di atasnya lagi, dan yang paling terang ada di lapisan paling atas. Jarak antar lapisan sangat tipis untuk menghasilkan satu permukaan saja pada proses rekonstruksi dengan BPA. Gambar 5 menunjukkan salah satu susunan kumpulan titik.



(a) citra sumber dan (b) hasil segmentasi beserta titik-titik hasil SIFT di atasnya dari kiri ke kanan: citra gelap-agak gelap-agak terang-terang

Gambar 4. Hasil segmentasi dan pencarian fitur dengan SIFT dari citra relief candi



Gambar 5. Point Cloud yang disusun dari kumpulan titik hasil ekstraksi ciri

Rekonstruksi citra relief candi

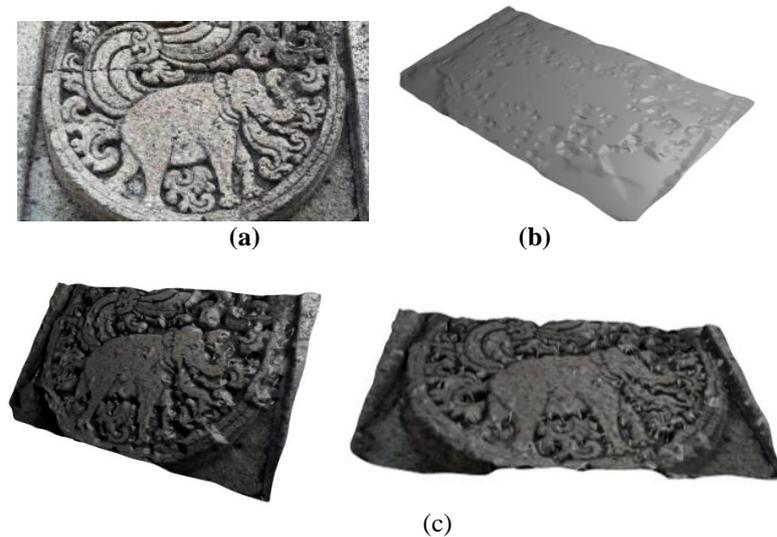
Tabel 1 menunjukkan hasil rekonstruksi 3D dari citra-citra relief candi, dimana atas dua hasil rekonstruksi dari beberapa citra yang menggunakan pendekatan nilai R pada BPA sebesar 2,5% dan 7,5%, yaitu radius dari bola putar (ball pivoting) dalam sebuah set point. Gap yang lebih besar daripada nilai radius tidak akan diisi. Rekonstruksi menggunakan radius *clustering* sebesar 20% dari radius bola yang digunakan untuk mencegah pembentukan segitiga yang terlalu kecil, jika sebuah vertex ditemukan terlalu dekat dengan yang lain. Jika ada yang berdekatan (di bawah 20% radius bola) maka vertex tersebut digabung. Besarnya sudut *threshold* yang digunakan sebesar 90° yang digunakan untuk membatasi putaran bola. Dapat dilihat perbedaan pada nilai radius aktualnya dimana citra sumber dengan resolusi rendah akan didapatkan nilai R yang lebih kecil daripada citra sumber yang beresolusi lebih tinggi. Nilai radius 7,5% mampu menutup permukaan lebih baik. Untuk menghasilkan obyek 3D yang lebih menarik bisa ditambahkan tekstur citra relief sumber sekaligus sebagai pencocokan lekuk hasil rekonstruksi. Obyek dengan sedikit lubang akan menghasilkan tampilan yang lebih baik daripada yang mempunyai banyak lubang.

Hasil dari penambahan tekstur citra candi ke atas obyek rekonstruksi ditunjukkan oleh Tabel 2. Permukaan yang mempunyai sedikit lubang dihasilkan citra relief gajah (relief candi keempat). Hal ini lebih disebabkan lebih banyaknya titik yang terbentuk dari citra candi tersebut dibandingkan citra yang lain.

Citra yang lebih besar dari proses rekonstruksi 3D dapat dilihat dari Gambar 6 dimana citra relief gajah bisa menghasilkan permukaan 3D yang lebih baik dibandingkan yang lain. Hal ini disebabkan bentuk reliefnya lebih sederhana dengan sebaran gelap terang yang lebih merata, kedalaman relief yang relatif dekat dan tidak mempunyai lekukan rumit dari permukaan hingga ke dasar relief.

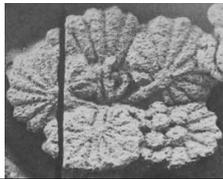
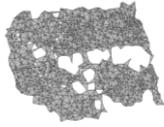
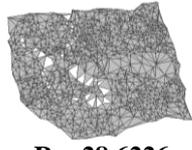
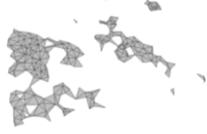
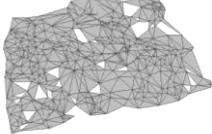
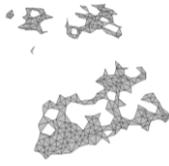
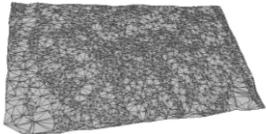
Dari paparan hasil di depan, dapat dilihat ada beberapa kelebihan dan kekurangan dari metode rekonstruksi 3D yang digunakan ini untuk obyek relief candi. Beberapa kelebihannya adalah komputasi lebih sederhana dan cukup menggunakan satu sumber citra 2D. Selain itu juga mempunyai beberapa kekurangan, seperti metode belum

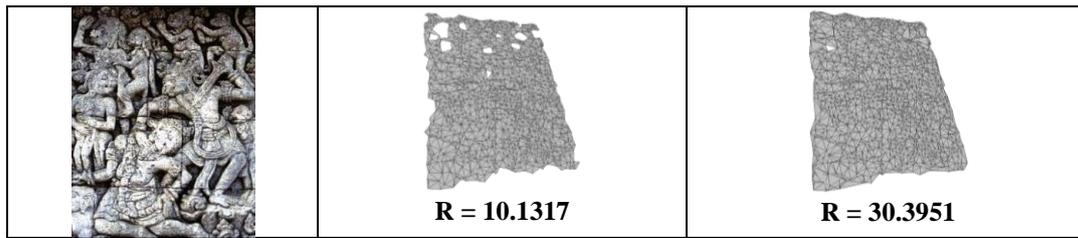
dikemas dalam satu aplikasi yang mudah dalam pengoperasiannya, dan asumsi kedalaman belum tepat saat diterapkan pada relief candi yang mempunyai lekukan permukaan yang sangat bervariasi. Selain itu relief yang dapat direkonstruksi menjadi 3D terbatas pada jenis relief yang mempunyai lekukan permukaan yang hampir seragam dan warna tekstur tidak banyak berbeda.



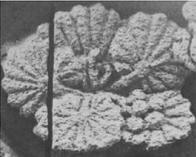
(a) Citra sumber, (b) rekonstruksi 3D tanpa tekstur, (c) rekonstruksi 3D dengan tambahan tekstur
 Gambar 6 Hasil rekonstruksi citra relief candi.

Tabel 1. Hasil rekonstruksi dari citra relief candi

Citra 2D	Tampak 1 R = 2,5%	Tampak 2 R = 5%
	 R = 9.5409	 R = 28.6226
	 R = 6.1345	 R = 18.4035
	 R = 6.3105	 R = 18.9314
	 R = 19.0554	 R = 57.1662



Tabel 2. Pemberian tekstur citra asli ke permukaan 3D

No.	Citra 2D	Hasil Rekonstruksi 3D dengan tekstur gambar	
1			
2			
3			
4			
5			

Kesimpulan

Rekonstruksi 3D relief candi yang menggunakan satu citra sumber untuk mendapatkan kumpulan titik sekaligus sebagai tekstur bagi obyek 3D, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Dengan metode segmentasi citra pada nilai tetap dan algoritma SIFT, kumpulan titik dapat disusun dari hasil ekstraksi ciri tiap segmen citra dengan jarak antar lapisan yang sangat dekat untuk memudahkan proses rekonstruksi 3D.
2. Proses rekonstruksi dari citra 2D tunggal dengan asumsi kedalaman berdasarkan level keabuan dengan algoritma *Ball Pivoting* sebagai pembentukan permukaan 3D dapat dilakukan dengan menggunakan beberapa *set point*, pada penelitian ini hasil rekonstruksi lebih baik pada nilai 7,5% dari *set point*.
3. Proses rekonstruksi bisa menghasilkan permukaan 3D yang lebih baik saat menggunakan citra relief yang sederhana, kedalaman relief yang relatif dekat dan seragam serta tidak mempunyai lekukan permukaan rumit.

Saran

Hasil dari penelitian ini masih jauh dari kesempurnaan, untuk itu perlu dikembangkan lagi dengan beberapa pertimbangan untuk perbaikan sebagai berikut:

1. Perlu diteliti metode lain untuk mendapatkan kumpulan titik yang mempunyai kecocokan lekuk relief dan kedalaman yang lebih baik lagi agar semua permukaan dapat direkonstruksikan, termasuk lebih baik dalam memodelkan kedalaman lekuk relief candi.
2. Pada penelitian ini masih menggunakan batas nilai *grayscale* yang tetap sehingga tidak cocok untuk citra yang mempunyai tipe sebaran warna lebih sempit. Untuk itu perlu dikembangkan model segmentasi warna yang lebih adaptif sehingga bisa digunakan untuk semua jenis citra *grayscale*.
3. Metode untuk menempatkan titik dalam penelitian ini masih sangat sederhana yang hanya berdasarkan asumsi gelap-terang, untuk itu perlu dikembangkan metode lain untuk memperoleh kedalaman titik yang lebih baik.
4. Penggunaan model 3D buatan yang mirip dengan relief candi dapat diujicobakan terlebih dahulu untuk pengembangan lebih lanjut agar dapat diketahui error obyek rekonstruksi 3D terhadap model.
5. Pemberian tekstur dalam penelitian ini masih dilakukan secara manual yang menuntut ketrampilan pengguna dalam *UV mapping*, untuk itu perlu dikembangkan juga pemberian tekstur yang bersifat lebih otomatis.
6. Perlu lebih banyak dikembangkan penelitian-penelitian yang mengangkat berbagai peninggalan budaya Indonesia yang sangat beraneka ragam.

Daftar Pustaka

- Andaru, Ruli, *Kombinasi Data Laser Scanning dan Fotogrametri Digital untuk Pemodelan Tiga Dimensi Candi Borobudur*, Thesis, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 2010.
- Benko, Hrvoje; Ishak, Edward W; and and Feiner, Steven, *Collaborative Mixed Reality Visualization of an Archaeological Excavation*, Proc. IEEE and ACM ISMAR. - Arlington, VA , 2004.
- Goesele, M.; Brian, Curless; dan Steven, M. Seitz, *Multi-View Stereo Revisited*, CVPR '06 Proceedings, 2006.
- Hernandez, C; and F. Schmitt. *Silhouette and Stereo Fusion for 3D Object Modeling*, Computer Vision and Image Understanding, 2004. - Vol. 96.
- Narayana, P. J.; Rander, P.; and Kanade, T., *Constructing Virtual Worlds Using Dense Stereo*, Proc. ICCV, Vol. 10, 1998.
- Pollefeys, M; Van Gool L.; Vergauwen, M.; Verbiest, F.; Cornelis, K.; Tops, J.; and Koch, R., *Visual Modeling with a Hand-held Camera*, International Journal of Computer Vision, Vol. 59, 2004.
- Shao-xing, HU; Hong-bin, ZHA; Ai-wu, ZHANG, *Real 3D Digital Method for Large Scale Cultural Heritage Sites*, Proceedings of the Ninth International Conference on Information Visualisation (IV'05), IEEE, 2005.
- Wibirama, Sunu; dan Hidayat, Risanuri, *Rekonstruksi dan Visualisasi Objek 3-D Berbasis Algoritma Direct Linear Transformation*, JNTETI - Vol. 1. 2, Yogyakarta, 2012.
- Xinyu, Duan; Baoqing, Gu; and Chuangming, Shi, *Virtual Exploration Application of Cultural Heritage for Anyang Yinxu*, IEEE, 2007.