

APPLICATION OF STRUCTURE FROM MOTION (SfM) FOR PHYSICAL GEOGRAPHY AND NATURAL HAZARD (APLIKASI FOTOGRAMETRI SfM DALAM KAJIAN GEOGRAFI FISIK DAN KEBENCANAAN)

Aditya Saputra^{1,3}, Trias Rahardianto^{2,3}, dan Christopher Gomez³

¹ *Geography Faculty UMS*, ² *Civil Engineering Politeknik Negeri Malang*, ³ *Geography Department University of Canterbury New Zealand*

E-mail: aditya.saputra@pg.canterbury.ac.nz

ABSTRACT - *Terrain model construction and analysis is one of the fastest growing areas of research in physical geography. It benefits from an array of relatively newly developed tools, such as Differential Global Positioning Systems (dGPS/dGNSS), Total Station (TS), Airborne Laser Scanning (ALS) Terrestrial Laser Scanning (TLS), and various digital photogrammetric techniques. Structure from Motion (SfM) is one of these photogrammetric method and although it was developed as early as the 1970s, it has only reached geosciences within the last 5 years. It is the growing computing capacity that has allowed the adaptation of this method to complex geo-surfaces. The aim of this paper is to discuss the SfM technique by first presenting a review of SfM applications in physical geography. Second, it details the SfM framework, the practical detail of implementing SfM in various physical geography studies and the process of controlling the quality of the models. Finally, it concludes with a brief description of the SfM prospect to support the physical geography studies especially in the natural hazard and risk assessment.*

Keyword: Terrain Model, Structure from Motion, Natural Hazard

INTISARI - *Pemodelan dan analisis permukaan bumi merupakan salah satu topik penelitian yang berkembang dengan pesat di dalam disiplin ilmu geografi fisik. Hal ini dikarenakan majunya berbagai peralatan di bidang fotogrametri seperti Differential Global Positioning Systems (dGPS/dGNSS); Total Station (TS), Airborne Laser Scanning (ALS) Terrestrial Laser Scanning (TLS), dan berbagai teknik fotogrametri digital. Structure from Motion (SfM), merupakan bagian dari metode fotogrametri yang relative baru ini sudah dikembangkan sejak tahun 1970 an, dan dalam lima tahun terakhir, SfM telah menjadi suatu cabang dalam bidang ilmu geo-sains. Kapasitas komputasi yang terus berkembang telah menjadikan metode ini sebagai salah satu metode yang banyak digunakan dalam berbagai pemodelan permukaan bumi. Tujuan dari artikel ini adalah untuk mendiskusikan teknik SfM dengan memberi ulasan dari berbagai implementasi SfM di cabang ilmu geografi fisik dan memberikan informasi detail mengenai cara kerja SfM, komponen utama dalam implementasi SfM pada berbagai kajian geografi fisik dan proses-proses yang mempengaruhi kualitas dari model yang dihasilkan. Di bagian akhir, akan disampaikan diskripsi singkat mengenai prospek SfM untuk mendukung kajian geografi fisik dalam penentuan bahaya dan risiko bencana.*

Kata Kunci: Pemodelan permukaan bumi, Structure from Motion, bencana alam.

PENDAHULUAN

Model permukaan bumi (*digital elevation model* (DEM), *digital surface model* (DSM) atau *digital terrain model* (DTM) merupakan komponen utama pada berbagai kajian geografi fisik. Selama satu dekade terakhir, DEM, DSM, dan DTM diperoleh melalui survei terestrial secara tradisional menggunakan diferensial GPS (dGPS) dan total station (Barsington, Rumsby dan McVey 2000; Keim, Skaugest dan Bateman 1999; Fuller, Large dan Milan 2003). Perkembangan selanjutnya model permukaan digital dapat diperoleh melalui teknologi penginderaan jauh dan fotogrametri. Metode ini merupakan teknik pemodelan yang relatif baru, namun selama beberapa tahun terakhir permukaan bumi telah banyak dimodelkan dengan pemanfaatan teknologi penginderaan jauh dan fotogrametri, seperti teknologi *airborne*, *terrestrial laser scanning*, dan teknik fotogrametri digital (Tarolli, 2014; Lohani dan Mason 2001; Notebaert, et al. 2009; Brasington dan Smart 2003). Beberapa teknik pemodelan tersebut sangat bermanfaat dalam kajian geo-sains terutama kajian geografi fisik dan geomorfologi yang obyek kajian utamanya adalah permukaan bumi. Data topografi yang akurat dengan tingkat akuisisi data yang sangat cepat merupakan hal yang fundamental dalam kajian ini.

Perkembangan teknologi penginderaan jauh dan fotogrametri saat ini mampu menghasilkan model permukaan bumi dengan resolusi yang cukup detil, akurasi yang sangat tinggi, dan cakupan spasial yang semakin luas (Westoby, et al. 2012). Meskipun demikian, implementasi dan realisasi metode penginderaan jauh dan fotogrametri untuk menghasilkan model permukaan beresolusi tinggi membutuhkan biaya yang sangat besar. Semakin detil, akurat, dan cakupan wilayah yang semakin luas, maka semakin besar pula biaya yang dikeluarkan. Begitu juga dengan survei terestrial, biaya yang dibutuhkan akan berbanding lurus dengan alat yang digunakan dan luasan wilayah yang diobservasi (Fonstad, et al. 2013; Gomez, Hayakawa dan Obanawa 2015; C. Gomez, Structure-from-Motion dan Wavelet Decomposition for outcrop analysis 2014; Smith, Carrivick dan Quincey 2016; Dietrich 2014).

Meningkatnya kapasitas komputasi di dunia komputer memberikan alternatif lain dalam pemodelan permukaan bumi. Dirilisnya prosesor komputer dengan inti banyak (*multi-core*) memberikan kesempatan kepada pengguna untuk membangun model permukaan bumi yang kompleks dan beresolusi tinggi hanya menggunakan komputer berkapasitas komputansi yang relatif kecil (Gomez dan Soltanzadeh 2012). Berbasis pada konsep cepat, murah, dan metode fotogrametri yang mudah, teknik *structure from motion* (SfM) mulai diadopsi untuk kajian-kajian geosains sejak tahun 2011. SfM merupakan suatu teknik analisis digital berbasis gambar dua dimensional yang dapat menghasilkan model tiga dimensional dengan pendekatan otomatis *image-to-image* registrasi.

Dalam beberapa tahun terakhir, SfM telah banyak diimplementasikan dibidang geosains termasuk geografi fisik. Teknik ini berpotensi menjadi metode alternatif dalam pemodelan permukaan bumi tiga dimensional dengan kemampuan akuisisi tiga dimensi *point cloud* yang relatif cepat. Banyak ahli

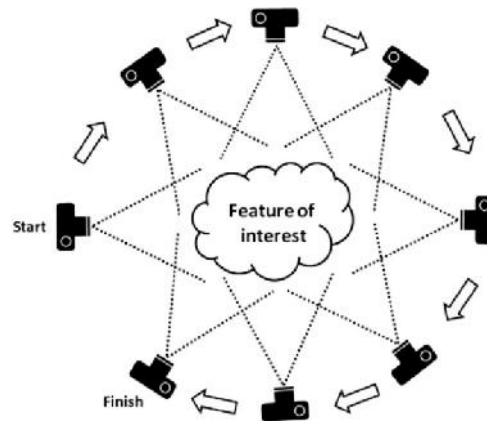
di bidang geomorfologi dan geografi fisik yang mengadopsi SfM untuk mendukung kajian yang dilakukannya. Hal ini dapat terlihat dari meningkatnya penggunaan SfM diberbagai kajian lingkungan, geografi fisik, dan geomorfologi (Smith, Carrivick and Quincey 2016), misalnya analisis erosi (Eltner , et al. 2015; Frankl , et al. 2015), vulkanologi (Tuffen , et al. 2013; James, et al. 2012; C. Gomez, *Historical 3D topographic reconstruction of the Iwaki vocano using structure from motion from uncalobrated aerial photographs* 2012), *landslide studies* (Lucieer, De Jong dan Turner 2014); kajian kepeosisiran (Leon, et al. 2015); kajian hidrologi (Javernick, Brasington dan Caruso 2014); kajian geomorfologi (Gomez, Hayakawa dan Obanawa 2015), dan kajian geologi (C. Gomez, *Structure-from-Motion dan Wavelet Decomposition for outcrop analysis* 2014; Bemis, et al. 2014; Vasuki, et al. 2014; Fonstad, et al. 2013)

Di Indonesia, teknologi SfM masih tergolong sangat baru dan belum digunakan dalam kajian geosains. Penggunaan SfM di Indonesia masih banyak dilakukan dalam pemodelan tiga dimensional bangunan dibidang arsitektur. Beberapa penerapan teknik SfM dalam kajian arsitektur di Indonesia adalah Hidayat dan Cahyono (2016) dan Harintaka (2008). Kedua penelitian tersebut berhasil membangun gambaran detil tiga dimensional dengan foto stereoskopis yang diambil dengan kamera digital biasa. Hidayat dan Cahyono (2016) menyebutkan bahwa gambaran tiga dimensional hasil teknik SfM dapat menggambarkan detil dinding pada obyek dengan tingkat kesalahan 3D mencapai 6,20 cm.

Berkembangnya teknologi SfM dan masih rendahnya penggunaan SfM di Indonesia khususnya dalam kajian geosains, mendorong penulis untuk memperkenalkan SfM kepada masyarakat Indonesia melalui penulisan artikel ini. Artikel ini bertujuan untuk memberikan gambaran secara singkat mengenai aplikasi fotogrametri SfM untuk mendukung berbagai kajian geosains khususnya geografi fisik.

Structure from Motion (SfM)

Pada awalnya teknologi SfM dikembangkan untuk membangun model tiga dimensional dari obyek dua dimensional seperti foto (*image*). Meskipun tergolong baru dalam kajian geografi, namun pada dasarnya teknologi SfM ini telah dikembangkan sejak akhir tahun 1970 dibidang teknik komputer (Ullman 1979). Konsep utama dari SfM adalah ilmu fotogrametri yaitu melakukan pengukuran secara kuantitatif menggunakan gambar hasil fotografi kamera. Perbedaan yang mendasar diantara keduanya adalah pada teknik SfM tidak diperlukan seting awal kamera seperti posisi dan arah kamera. Dalam tehnik SfM juga tidak diperlukan kalibrasi gambar stereoskopis yang dihasilkan. SfM menggunakan gambar stereoskopis yang banyak (tiga atau lebih) dan melakukan perhitungan trigonometri seperti pada teknik fotogrametri untuk menghasilkan dataset yang bersifat tiga dimensional. SfM berbasis multi gambar atau foto, sehingga sangat direkomendasikan untuk menggunakan sensor yang bergerak (*moving sensor*) seperti terlihat pada Gambar 1 di bawah ini.



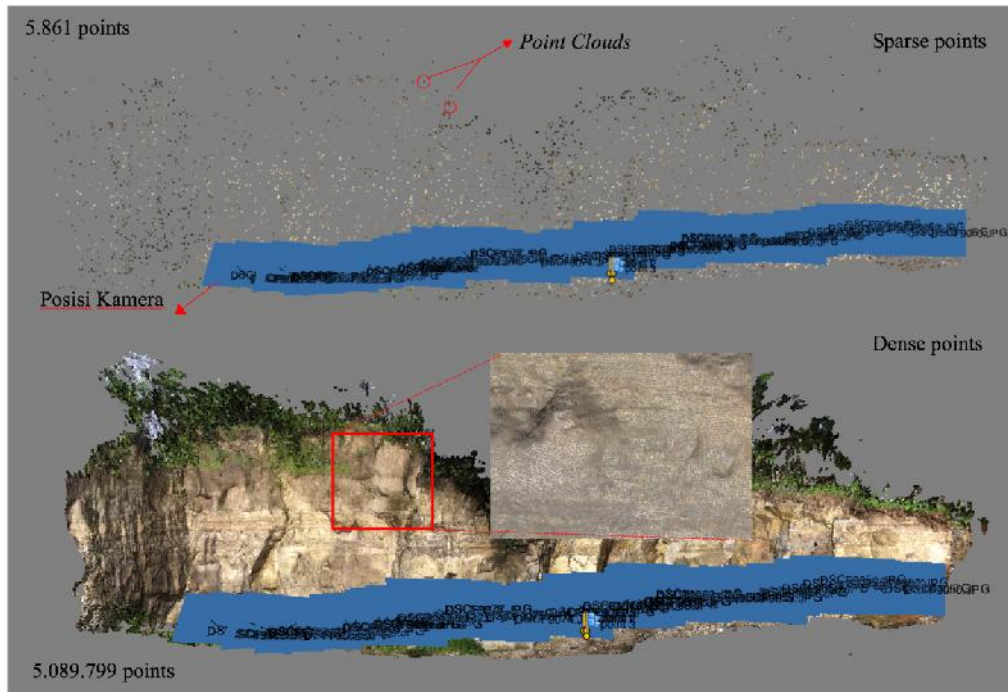
Gambar 1. Bagan SfM dengan konsep *moving sensor* (Westoby, et al. 2012)

Gambaran tiga dimensi dihasilkan berdasarkan perhitungan tertentu menggunakan proyeksi relatif geometri dari setiap posisi kamera. Perangkat lunak akan melakukan perhitungan dan rekonstruksi tiga dimensional secara otomatis berdasarkan hasil dari interpolasi seluruh titik yang bertampalan pada setiap foto atau gambar. Saat ini, banyak sekali perangkat lunak yang dapat digunakan untuk menerapkan teknik SfM, diantaranya adalah *Agisoft Photo Scan Profesional*, *Pix4D mapping*, *Photo Modeler Scanner*, *Autodesk Image Modeler*, dan *D-Scuptor*. Dengan menggunakan perangkat lunak ini, perhitungan fotogrametri dan proses rekonstruksi tiga dimensional dapat dilakukan dalam waktu yang relatif singkat.

Prosedur SfM

Secara garis besar SfM menghasilkan dua dataset yaitu *sparse point cloud* dan *dense point cloud*. *Sparse point cloud* adalah kumpulan titik-titik dengan tingkat kepadatan yang jarang pada seluruh foto yang diikutkan dalam analisis yang memiliki lokasi dan nilai piksel yang sama, sedangkan pada tahap selanjutnya *sparse point cloud* ini akan ditingkatkan densitasnya menjadi *dense point cloud*. Titik yang sama pada setiap gambar ini sangat membantu proses penjajaran foto (*foto alignment*) dalam proses rekonstruksi tiga dimensional. Semakin banyak titik yang dapat diidentifikasi sebagai titik ikat pada setiap foto, maka semakin detail dan cepat proses rekonstruksi yang dilakukan.

Sparse point cloud dan *dense point cloud* dihasilkan setelah proses penjajaran seluruh gambar. Kedua titik tersebut dihasilkan berdasarkan perhitungan trigonometrika awal. Untuk area survei yang kecil ($10 - 100 \text{ m}^2$) *sparse point clouds* memiliki densitas rata-rata sebesar 10 sampai 100 titik per meter persegi, sedangkan densitas rata-rata pada *dense point clouds* dapat mencapai 1.000 – 10.000 titik per meter persegi. Gambaran mengenai *sparse point clouds* dan *dense point clouds* dapat dilihat pada Gambar 2, sedangkan informasi detail mengenai gambar yang berhasil disejajarkan dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 2. *Sparse point clouds* dan *dense point clouds* pada singkapan batuan berdimensi panjang: 45 m, tinggi: 10 m, difoto dengan kamera Fujifilm tipe FinePix S2980 (12.2 megapiksel) dengan 29 gambar berukuran 4000x3000.

Label	Size	Aligned	Quality	Date & time	Make	Model	Focal length	F-stop	ISO	Shutter	35mm focal	Sensor X res	Sensor Y res
DSCF9094.JPG	4000x3000	✓	✓	2015.01.07 04:25:10	FUJIFILM	FinePix S1600	5	F/6.4	64	1/125		649.4	649.4
DSCF9092.JPG	4000x3000	✓	✓	2015.01.07 04:24:59	FUJIFILM	FinePix S1600	5	F/6.4	64	1/125		649.4	649.4
DSCF9091.JPG	4000x3000	✓	✓	2015.01.07 04:24:54	FUJIFILM	FinePix S1600	5	F/6.4	64	1/125		649.4	649.4
DSCF9101.JPG	4000x3000	✓	✓	2015.01.07 04:25:53	FUJIFILM	FinePix S1600	5	F/6.4	64	1/125		649.4	649.4
DSCF9100.JPG	4000x3000	✓	✓	2015.01.07 04:25:47	FUJIFILM	FinePix S1600	5	F/6.4	64	1/140		649.4	649.4
DSCF9066.JPG	4000x3000	✓	✓	2015.01.07 04:19:53	FUJIFILM	FinePix S1600	5	F/6.4	64	1/140		649.4	649.4
DSCF9090.JPG	4000x3000	✓	✓	2015.01.07 04:24:48	FUJIFILM	FinePix S1600	5	F/6.4	64	1/140		649.4	649.4
DSCF9095.JPG	4000x3000	✓	✓	2015.01.07 04:25:17	FUJIFILM	FinePix S1600	5	F/6.4	64	1/140		649.4	649.4
DSCF9098.JPG	4000x3000	✓	✓	2015.01.07 04:25:36	FUJIFILM	FinePix S1600	5	F/6.4	64	1/140		649.4	649.4
DSCF9087.JPG	4000x3000	✓	✓	2015.01.07 04:22:49	FUJIFILM	FinePix S1600	5	F/6.4	64	1/160		649.4	649.4

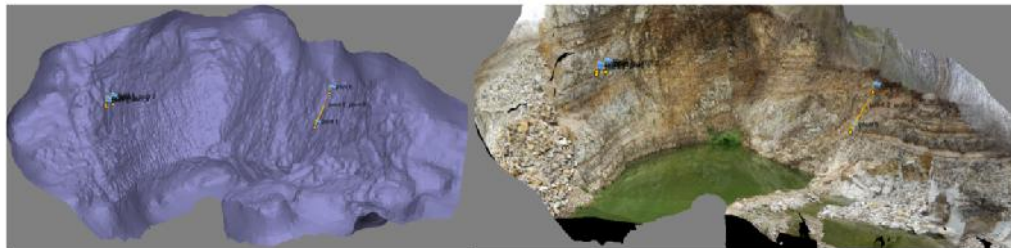
Gambar 3. Status foto yang berhasil disejajarkan (*photos alignment*) pada perangkat lunak AgisoftPhotoScan-Pro

Pada tahap ini, *point clouds* yang dihasilkan dari proses *photo alignment* belum terreferensi secara geografis. Sehingga sifat jarak yang ada pada *point clouds* (jarak antara semua titik 3D dengan kamera) masih bersifat non matrik tetapi konsisten satu sama lain. Proses georeferensing model yang dihasilkan dapat dilakukan dengan menambahkan titik ikat atau yang sering disebut sebagai *ground control point*. Opsi lain yang dapat digunakan adalah dengan menggunakan kamera yang dilengkapi dengan fasilitas *global positioning system* (GPS). Perbedaan proses rekonstruksi tiga dimensional dengan menggunakan kamera biasa dan kamera yang dilengkapi GPS dapat dilihat pada Gambar 4 dibawah ini.

Cameras	Longitude	Latitude	Altitude	Cameras	X (m)	Y (m)	Z (m)
<input checked="" type="checkbox"/> DSCN3091.JPG	110.404945	-7.892960	156.600000	<input type="checkbox"/> DSCF9105.JPG			
<input checked="" type="checkbox"/> DSCN3092.JPG	110.404945	-7.892978	156.600000	<input type="checkbox"/> DSCF9106.JPG			
<input checked="" type="checkbox"/> DSCN3093.JPG	110.404948	-7.892978	156.600000	<input type="checkbox"/> DSCF9107.JPG			
<input checked="" type="checkbox"/> DSCN3094.JPG	110.404950	-7.892978	156.600000	<input type="checkbox"/> DSCF9108.JPG			
<input checked="" type="checkbox"/> DSCN3095.JPG	110.404953	-7.892978	156.600000	<input type="checkbox"/> DSCF9109.JPG			
<input checked="" type="checkbox"/> DSCN3096.JPG	110.404972	-7.892975	156.600000	<input type="checkbox"/> DSCF9110.JPG			
<input checked="" type="checkbox"/> DSCN3097.JPG	110.404979	-7.892977	156.700000	<input type="checkbox"/> DSCF9111.JPG			
<input checked="" type="checkbox"/> DSCN3098.JPG	110.404985	-7.892993	156.700000	<input type="checkbox"/> DSCF9112.JPG			
<input checked="" type="checkbox"/> DSCN3099.JPG	110.404987	-7.892993	156.800000	<input type="checkbox"/> DSCF9113.JPG			
<input checked="" type="checkbox"/> DSCN3100.JPG	110.404987	-7.892965	156.800000	<input type="checkbox"/> DSCF9114.JPG			
<input checked="" type="checkbox"/> DSCN3101.JPG	110.404985	-7.892965	156.700000	<input type="checkbox"/> DSCF9115.JPG			
<input checked="" type="checkbox"/> DSCN3102.JPG	110.404985	-7.892965	156.700000	<input type="checkbox"/> DSCF9116.JPG			

Gambar 4. Kamera ber-GPS (Kiri) dan kamera tidak ber-GPS

Tahap selanjutnya setelah menghasilkan *point clouds* adalah mengkonversi *dense clouds* menjadi *mesh* dan *texture* dataset. *Mesh* merupakan bentuk model permukaan yang pertama sedangkan *texture* merupakan model permukaan yang terakhir. Keduanya merupakan produk akhir dari SfM yang dapat memberikan informasi tiga dimensional yang sangat detil. *Mesh* berbentuk gambaran permukaan secara kasar yang sangat bermanfaat untuk mengetahui tekstur obyek yang dikaji. Pada tahap *mesh* morfologi seperti cekungan dan tonjolan baik dengan ukuran mikro maupun ukuran yang cukup besar dapat disajikan dengan baik dengan akurasi yang tinggi. Tahap akhir *texture* sangat berguna baik bagi aspek visualisasi data maupun analisis lebih lanjut. Hal ini dikarenakan *texture* mampu memberikan gambaran yang relatif sama dengan obyek yang asli di lapangan. Secara garis besar tahapan SfM dapat dilihat pada **Gambar 6**.



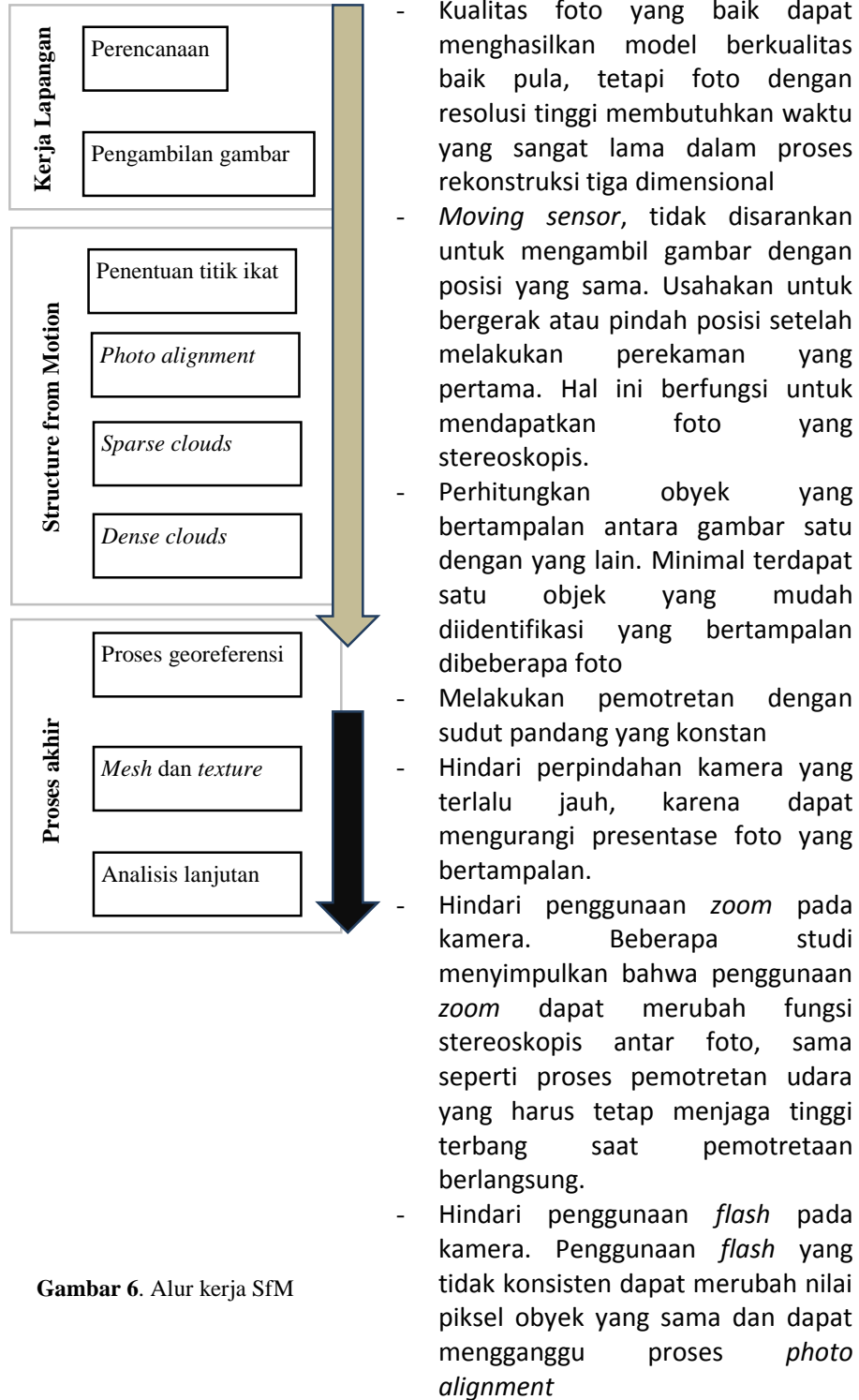
Gambar 5, *Mesh* (kiri) dan *texture* (kanan)

Implementasi teknik SfM

Beberapa aspek perlu diperhatikan dalam mengimplementasikan SfM terutama pada proses awal akuisisi data. Berikut beberapa rekomendasi yang disampaikan berbagai penelitian sebelumnya (James, et al. 2012; Westoby, et al. 2012; Smith, Carrivick dan Quincey 2016; Bemis, et al. 2014):

- SfM ideal dilakukan dengan mengambil gambaran obyek secara 360⁰ walaupun tidak semua obyek dapat diambil penuh dari berbagai sudut pandang. Model tiga dimensional obyek dari hasil perekaman secara 360⁰ (berbagai sudut pandang) akan memudahkan peneliti untuk melakukan analisa ataupun modeling lanjutan (Westoby, et al. 2012)
- Jika obyek yang diambil terlalu luas (membutuhkan banyak foto), SfM dapat dilakukan dengan dua input atau lebih. Hal ini dilakukan karena

pada tahap akhir rekonstruksi model (*mesh* dan *texture*) membutuhkan waktu yang relatif lama daripada tahap awal (*photo alignment*). Gambar yang banyak dapat menyebabkan proses komputasi dan interpolasi yang sangat lama.



Gambar 6. Alur kerja SfM

- Hindari obyek yang tertutup rapat oleh vegetasi, obyek bergerak, dan obyek yang memantulkan cahaya.

Aplikasi SfM dalam Kajian Geografi Fisik dan Prospek Implementasi pada Kajian Kebencanaan

Secara umum kajian SfM dalam geografi fisik dapat dikategorikan menjadi tiga berdasarkan tujuannya (Smith, Carrivick dan Quincey 2016), yaitu 1) SfM untuk mendapatkan pola spasial dan pengukuran planimetris suatu obyek, 2) SfM untuk mendapatkan informasi tiga dimensional seperti volume dan topografi dari *point clouds*, dan 3) penggunaan SfM untuk melakukan analisis kuantitatif perubahan permukaan bumi.

Kemampuan SfM untuk menghasilkan ortofoto dari obyek yang dikaji memberikan keuntungan melebihi TLS survei yang merupakan sumber informasi penting bagi para ahli geografi fisik. Beberapa produk ortofoto dari proses SfM telah digunakan untuk menggantikan TLS pada kajian-kajian penting dalam geografi fisik. Beberapa diantaranya seperti ekstraksi data topografi dari drainase pada alur glasial yang aktif (Rippin, Pomret dan King 2015); deleniasi patahan dan rekahan geologi (Vasuki, et al. 2014); kajian dan karakterisasi singkapan batuan (Bemis, et al. 2014); dan bahkan kajian mengenai analisis ukuran butir sedimen hasil proses fluvial (Carbonneau, Lane dan Barger 2004) (de Haas, et al. 2014). Dalam kajian oseanografi dan geomorfologi kepesisiran, SfM banyak digunakan dalam ekstraksi data topografi resolusi tinggi bentuklahan asal proses marin seperti pantai, gumuk pasir, dan *clif* (Mancini, et al. 2013; Ruzic, et al. 2014). Tidak sedikit pula yang menggunakan SfM untuk melakukan monitoring perubahan terumbu karang, seperti yang dilakukan oleh Leon, et al. (2015).

Kajian kebencanaan akhir-akhir ini SfM mulai dikembangkan sebagai input data analisis model permukaan seperti pemodelan hidrolis 2D dalam kajian banjir perkotaan, pemodelan spasial dan pemodelan kedalaman banjir. SfM juga dapat digunakan sebagai input data dalam estimasi jarak terjauh dari sebuah skenario tsunami. Dalam kajian tanah longsor, SfM dapat dijadikan sebagai metode alternatif untuk monitoring stabilitas lereng, amblesan tanah, dan analisis laju erosi. Sama halnya dengan kajian-kajian pada geografi fisik, pada kajian kebencanaan SfM dapat menggantikan survei terestrial, teknik penginderaan jauh, dan fotogrametri dalam memproduksi data topografi beresolusi tinggi. Dengan demikian SfM memiliki potensi yang sangat besar untuk dapat digunakan dalam kajian kebencanaan, mengingat data topografi beresolusi tinggi merupakan salah satu informasi yang penting yang dibutuhkan pada berbagai kajian kebencanaan. Khusus pada kajian kegempaan, teknik SfM dapat digunakan dalam identifikasi patahan pada singkapan batuan. Hal ini sangat bermanfaat dalam menentukan blok mana yang relatif bergerak jika terjadi gempa bumi.

PENUTUP

Structure from motion terbukti dengan efektif dapat menghasilkan data topografi dengan resolusi tinggi yang merupakan komponen utama kajian

geografi fisik (Javernick, Brasington dan Caruso 2014). *Point clouds* yang dihasilkan dari SfM jauh lebih baik jika dibandingkan dengan TS, dGPS, ALS dan TLS. Namun demikian SfM hanya cocok digunakan pada akuisisi jarak dekat (Keim, Skaugest dan Bateman 1999). Keterbatasan SfM yang utama adalah dibutuhkannya TS atau dGPS untuk melakukan georeferensi *point clouds* yang dihasilkan. SfM sangat cocok diterapkan di Indonesia yang merupakan daerah rawan bencana yang memiliki ketersediaan data yang relatif rendah. SfM dapat digunakan sebagai metode alternatif ekstraksi data topografi beresolusi tinggi, mengingat biaya pelaksanaan survei terestris atau pengadaan citra penginderaan jauh dan foto udara masih sangat mahal di Indonesia.

REFERENSI

- Barsington, J, B.T. Rumsby, and R.A. McVey. "Monitoring and modelling morphological change in a braided gravel-bed river using high resolution GPS-based survey." *Earth Surface Processes and Landform*, 25 2000.
- Bemis, S.P., et al. "Ground-based and UAV-based photogrammetry: A multi-scale, high-resolution mapping tool for structural geology and palaeoseismology." *Journal of Structural Geology* 69 (2014): 163-178.
- Brasington, J, and R.M.A Smart. "Close range digital photogrammetric analysis of experimental drainage basin evolution." *Earth Surface Processes and Landforms* 28 (2003): 231-247.
- Carbonneau, P.E., S. N. Lane, and N.E. Barger. "Catchment-scale mapping of surface grain size in gravel bed rivers using airborne digital imagery." *Water Resources Research* 40, no. 7 (2004).
- de Haas, T, D Ventra, P. E. Carbonneau, and M.G Kleinhaus. "Debris-flow dominance of alluvial fans masked by runoff reworking and weathering." *Geomorphology* 217 (2014): 165-181.
- Dietrich, James Thomas. "Application of structure-from-motion photogrammetry to fluvial geomorphology." Geography, University of Oregon, 2014.
- Eltner, A, P Baumgart, H.G. Maas, and D Faust. "Multi-temporal UAV data for automatic measurement of rill and interrill erosion on losses soil." *Earth Surface Processes and Landforms* 40, no. 6 (May 2015): 741-755.
- Fonstad, Mark A., James T Dietrich, Brittany C Courville, Jennifer L Jensen, and Patrice E Carbonneau. "Topographic structure from motion: a new development in photogrammetric measurement." *Earth Surface Processes and Landforms* (Wiley) 38 (November 2013): 421-430.
- Frankl, A, et al. "Detailed recording of gully morphology in 3D through image-based modelling." *Catena* 127 (2015): 92-101.
- Fuller, I.C., A.R.G Large, and D Milan. "Quantifying channel development and sediment transfer following chute cutoff in a wandering gravel-bed river." *Geomorphology* 54 (2003): 307-323.
- Gomez, C, and I Soltanzadeh. "Boundary crossing and non-linear theory in earth system science-a proof of concept based on tsunami and post eruption scenarios on Java Island, Indonesia." *Earth Surf. Process. Landf* 37 (2012): 790-796.

- Gomez, Christopher. *HAL archives-ouvertes.fr*. January 31, 2014. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00939994> (accessed July 18, 2016).
- . "HAL: Open Archives." *HAL*. 2012. <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00765723>.
- Gomez, Christopher, Yuichi Hayakawa, and Hiroyuki Obanawa. "A study of Japanese landscapes using structure from motion derived DSMs and DEMs based on historical aerial photographs: New opportunities for vegetation monitoring and diachronic geomorphology." *Geomorphology* (Elsevier) 242 (August 2015): 11-20.
- Harintaka. "Pemodelan Virtual Bangunan Arkeologi Candi Kelir di Taman wisata Candi Prambanan menggunakan kamera amatir digital ." *Media Teknik* 4 (2008).
- Hidayat, Husnul, and Agung Budi Cahyono. "Digital reconstruction of Sigosari Temple using structure from motion methods." *Geoid* 02 (2016): 211-218.
- James, M.R., S Robson, H Pinkerton , and M Ball. "Oblique photogrammetry with visible and thermal images of active lava flows." *Bulletin of Volcanology* 69 (2012): 105-108.
- Javernick, L, J Brasington, and B Caruso. "Modelling the topography of shallow braided ruves using structure from motion photogrammetry." *Gemorphology*, 2014.
- Keim, R.F., A.E. Skaugest, and D.S. Bateman. "Digital terrain modelling of small stream channels with a total-station theodolite. ." *Advances in Water Resources* , no. 23 (1999): 42-48.
- Leon, J.X, Chris M Roelfsema, Mega I Saundres, and Stuart R Phinn. "Measuring coral reef terrain roughness using structure from motion close-range photogrammetry." *Geomorphology* (Elsevier) 242 (February 2015): 21-28.
- Lohani, B, and D.C. Mason . "Application of airborne scanning laser altimetry to the study of tidal channel geomorphology." *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 56 (2001): 100-120.
- Lucieer, Arko, Steven M De Jong, and Darren Turner. "Mapping landslide displacement using structure from motion (SfM) and image correlation of multi-temporal UAV photography." *Progress in Physical Geography* (SAGE) 38, no. 1 (2014): 97-116.
- Mancini, F, M Dubbini, M Gatteli, F Stecci , S Fabbri, and G Gabbianelli. "Using unmanned aerial vehicle (UAV) for hig-resoution reconstruction to topography: the structure from motion approach on coastal environmnets." *Remote Sensing* 5, no. 12 (2013).
- Notebaert, B, G Verstraeten, G Govers, and J Poesen. "Qualitative and quantitative applications of LiDAR imagery in fluvial geomorphology." *Earth Surface Processes and Landforms* 34 (2009): 217-231.
- Rippin, D.M., A Pomret, and N King . "High resolution of supraglacial drainage pathways reveals link between micro-channel drainage density, surface roughness, and surface reflectance." *Earth Surface Process and Landforms*, 2015.

- Ruzic, I, I Marovic, C Benac, and C Ilic. "Coastal cliff geometry derived from structure-from-motion photogrammetry at Stara Baska, Krk Island." *Geo-Marine Letters* 34, no. 6 (2014): 555-565.
- Smith, M.W., J Carrivick, and D Quincey. "Structure from motion photogrammetry in physical geography." *Progress in physical geography* 40, no. 2 (2016): 247-275.
- Tarolli, Paolo. "High-resolution topography for understanding earth surface process: Opportunities and challenges." *Geomorphology* (Elsevier) 216 (March 2014): 295-312.
- Tuffen, Hugh, Mike R James, Jonathan M Castro, and C Ian Schipper. "Exceptional mobility of an advancing rhyolitic flow at Cordón Caulle Volcano in Chile." *Nature Communication* (Nature Publishing Group) 4 (November 2013): 2709.
- Ullman, S. "The interpretation of structure from motion." *Proceeding of the Royal Society of London. Series B. Biological Science*. Royal Society, 1979. 405-426.
- Vasuki, Y, E.J. Holden, P Kovesi, and S Micklethwaite. "Semi-automatic mapping of geological structure using UAV-based photogrammetry data: An image analysis approach." *Computers & Geosciences* 69 (2014): 22-32.
- Westoby, M.J., J Brasington, N.F Glasser, M.J. Hambrey, and J.M. Reynolds. "Structure-from-motion photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience application." *Geomorphology* (Elsevier) 179 (August 2012): 300-314.