

STUDI AWAL VISUALISASI DAN AKURASI GEOMETRI MODEL 3 DIMENSI PADA *TEXTURELESS-OBJECT*

Shofiyatul Qoyimah^{1*}, Hana Sugiastu Firdaus¹, Muhammad Aldila Syariz²

¹Departemen Teknik Geodesi-Fakultas Teknik Universitas Diponegoro, Jawa Tengah Indonesia

Jl. Prof Soedarto, SH, Tembalang, Semarang, Indonesia-75123 Telp./Faks: (024) 736834

²Departemen Teknik Geomatika, Fakultas Teknik Sipil Perencanaan dan Kebumihan, Institut Teknologi

Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia

e-mail: shofiyatulqoyimah@lecturer.undip.ac.id*

(Diterima 25 Oktober 2024, Disetujui 20 November 2024)

ABSTRAK

Model 3 dimensi yang dibentuk dari proses rekonstruksi objek dengan berbagai metode, memiliki informasi visual dan geometri yang penting untuk diketahui. Metode fotogrametri berbasis *Structure from Motion* (SfM) mampu menghasilkan model dengan akurasi geometri yang tinggi. Namun, tantangan terkait visualisasi model, muncul jika rekonstruksi dilaksanakan pada objek dengan kekasaran permukaan yang rendah (*textureless-object*). Lebih lanjut, proses rekonstruksi membutuhkan waktu yang lama dan ruang penyimpanan yang besar. *Gaussian Splatting* (GS) sebagai metode baru, dapat diaplikasikan untuk merekonstruksi objek yang memiliki tingkat kekasaran permukaan yang bervariasi. Sehingga metode ini berpotensi sebagai metode pilihan dalam rekonstruksi objek yang bersifat *textureless*. Akan tetapi, kajian terkait akurasi geometri model menggunakan metode ini masih sedikit dijumpai. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk membandingkan metode fotogrametri berbasis SfM dengan *Gaussian Splatting* dalam rekonstruksi objek yang bersifat *textureless* ditinjau dari visualisasi dan akurasi geometri dari model. Papan kayu yang memiliki titik kontrol, digunakan sebagai representasi dari *textureless-object*. Model 3 dimensi direkonstruksi dari data berupa foto papan kayu pada aplikasi *Agisoft Metashape* dan *Polycam Web-based* software. Visualisasi model 3 dimensi dalam format digital dianalisa berdasar 7 kunci interpretasi. *Root Mean Square Error* dari koordinat *Independent Check Point* pada objek dihitung untuk mendapatkan akurasi geometri model. Secara visual, model 3 dimensi dari metode *Gaussian Splatting* dinilai lebih unggul dan mampu membentuk *textureless-object* dengan baik dan detail. Dalam hal akurasi geometri, metode fotogrametri berbasis SfM mampu menghasilkan model 3D lebih akurat dengan nilai RMSE terkecil sebesar 0,748 mm dan 0,569 mm pada arah horizontal dan vertikal secara berurutan. Begitu juga dari segi performa rekonstruksi, metode ini mampu membentuk model dengan lebih cepat dan memori penyimpanan yang lebih sedikit.

Kata kunci : *Gaussian Splatting, Model 3 Dimensi, Structure from Motion, Textureless-Object.*

ABSTRACT

A 3D model created from an object reconstruction process using any method has the fundamental information including visualization and geometric accuracy. *Structure from Motion*-based (SfM) photogrammetry is one of the common-used methods that is superior to delivering a high geometric accuracy. However, the challenges from model visualization appear if the reconstruction is conducted on an object that has a low texture level (*textureless-object*). As well as the concern of how long time and high memory usage during the process. *Gaussian Splatting* (GS) as a new method can be applied in the varying texture levels of the object reconstruction process. Thus, focusing on the *textureless-object*, GS has the potential to be chosen as the optional method. The finding shows that the report talks about the geometric accuracy is very limited. Therefore, research has been conducted to analyze the visualization and geometric accuracy comparison of 3D model created from SfM-based photogrammetry and *Gaussian Splatting* on a *textureless-object*. A wooden board marked with control points was used as the *textureless-object*. A 3D model reconstructed from the object's photos utilizing *Agisoft Metashape* and *Polycam Web-based* software. The digital model's visualization was analyzed based on the 7 keys of interpretation. Meanwhile, *Root Mean Square Error* (RMSE) of the *Independent Check Points* (ICPs) coordinate was calculated to assess the geometric accuracy. The result discovered that the 3D model produced by GS can represent the object more realistic and detail.

About geometric accuracy, SfM-based photogrammetry can generate the best result with RMSE values around 0,748 mm and 0,569 mm for the horizontal and vertical directions, respectively. For the software's performance comparison, GS can provide a faster processing time and save more memory usage.

Keywords : Gaussian Splatting, 3D Model, Structure from Motion, Textureless-Object.

1. PENDAHULUAN

Kini, model 3 dimensi dari suatu benda secara digital telah banyak digunakan dalam berbagai bidang, seperti kesehatan, agrikultur dan biologi, industri dan keteknikan, serta transportasi. Di bidang kesehatan, model 3 dimensi digunakan untuk memantau pergerakan struktur gigi pasien (Hage et al., 2024) dan merekonstruksi kondisi sebelum dan setelah tindakan operasi *acetabular fracture* (Nijsink et al., 2023). Lebih lanjut, pada bidang agrikultur, struktur dan bagian tanaman dapat dimodelkan untuk meningkatkan akurasi dalam memprediksi masa tumbuh, panen dan adanya penyakit pada tanaman (Mitsanis et al., 2024). Model 3 dimensi sebagai *digital twin* juga digunakan untuk memonitoring keamanan terowongan terhadap bahaya kebakaran secara *real-time* (Zhang et al., 2023). Kaitannya dengan sarana transportasi, model 3 dimensi dari kendaraan yang bergerak dapat diperhitungkan sebagai kunci dalam *Building Information Modelling* (BIM) untuk pemantauan arah aliran pada kejadian kemacetan di jalan raya (Niskanen et al., 2021).

Model 3 dimensi dapat dibuat dengan cara merekonstruksi objek dengan metode pengukuran dan interpretasi gambar dari satu atau beberapa foto objek, untuk menghasilkan bentuk dan posisi dari objek tersebut. Metode ini disebut sebagai fotogrametri (Luhmann et al., 2020). Untuk membentuk model 3 dimensi, data foto dari kamera digunakan untuk membentuk point cloud yang nantinya akan menyusun representasi objek 3 dimensi secara detail (Harahap & Handayani, 2016).

Luaran utama dari metode ini adalah rekonstruksi objek dalam bentuk digital, termasuk di dalamnya aspek koordinat, elemen geometri, maupun visualisasi secara grafis (Luhmann et al., 2020). Model yang paling umum dihasilkan berupa model foto tegak 2 dimensi (*orthophoto*) (J. Chen et al., 2023), model permukaan digital (digital surface model) (Nakata et al., 2023), maupun model 3 dimensi (Higueras et al., 2021), (Kenarsari et al., 2017), (Carrière & Tallman, 2024).

Keunggulan model 3 dimensi yang dihasilkan oleh fotogrametri berbasis SfM adalah kemampuannya dalam memberikan akurasi geometri yang tinggi (Elkhill et al., 2023), (Zhao et al., 2021). Akan tetapi, beberapa kelemahan dari

teknik ini meliputi: waktu pemrosesan yang relatif lama (Gené-Mola et al., 2021), kebutuhan ruang penyimpanan yang besar (Qoyimah, 2016), serta performanya yang dipengaruhi oleh kondisi kekasaran permukaan yang rendah (*textureless*) (Wang & Gan, 2023).

Tekstur (kekasaran permukaan) dari suatu objek dapat digunakan sebagai referensi untuk mengidentifikasi, mengklasifikasikan, atau mengestimasi posisi objek. Dalam dunia nyata, terdapat suatu objek yang tidak memiliki tekstur atau memiliki tingkat kekasaran yang rendah (*textureless-object*). *Textureless-object* tidak memiliki fitur untuk mengidentifikasi, mengklasifikasikan, atau mengestimasi posisi objek sehingga pengukuran posisi lebih sulit dilakukan (Clement dkk., 2019). Kesulitan ini juga dialami dalam penggunaan metode fotogrametri untuk mengukur posisi dan akurasi suatu objek *textureless* dan pembentukan model 3 dimensi. Namun, metode baru bernama *Gaussian Splatting* mampu memproses suatu objek menjadi 3 dimensi dengan cepat, detail, dan mampu bekerja pada objek yang bersifat *textureless* (Kerbl dkk., 2023).

Gaussian Splatting merupakan teknik rasterisasi titik ke bentuk 3 dimensi dengan memperkirakan pengaruhnya terhadap nilai piksel dalam bentuk *Gaussian* (Barrelas et al., 2021). Model 3 dimensi hasil dari *Gaussian* dipengaruhi oleh memiliki 4 (empat) parameter utama dalam pembentukan model 3D, yaitu posisi (μ), *opacity* (α), matriks kovarian 3D (Σ), dan *spherical harmonics* (c) (Kerbl dkk., 2023). Bentuk 3 dimensi dari *Gaussian* ini kemudian di proyeksikan menjadi ruang gambar 2 dimensi (*splatting*) untuk selanjutnya dilakukan proses *rendering* pada setiap pikselnya untuk mendapatkan 3 dimensi *gaussian* akhir (G. Chen & Wang, 2024). Tujuan utama dari metode ini adalah untuk mendapatkan visualisasi model yang menyerupai aslinya pada objek dengan tingkat kekasaran permukaan yang bervariasi. Keunggulan dari metode ini ada pada kecepatan proses *rendering* dan visualisasi model 3 dimensi pada objek yang bersifat *textureless* (Kerbl et al., 2023). Di balik keunggulannya, kajian terkait akurasi geometri pada model masih sedikit dijumpai.

Dari penjelasan yang diberikan, dapat dibuat suatu dugaan bahwa metode *Gaussian Splatting* dapat menjadi pilihan dalam menyajikan visualisasi

model 3 dimensi dari *textureless-object*. Akan tetapi, topik yang berhubungan dengan akurasi geometri model perlu dikaji lebih lanjut. Oleh karena itu, analisa mengenai akurasi geometri menjadi salah satu tujuan utama dari penelitian. Akurasi geometri dari model yang dihasilkan baik menggunakan metode fotogrametri berbasis SfM maupun *Gaussian Splatting*, akan dibandingkan untuk mendapatkan metode terbaik dalam menyajikan informasi metrik model. Akurasi geometri didapatkan dengan perhitungan *Root Mean Square Error* dari koordinat *Independent Check Point* yang terdapat pada objek. Selain itu, perbandingan visualisasi dari model digital yang dihasilkan oleh kedua metode turut dibahas berdasar tujuh kunci interpretasi. Hal ini bertujuan untuk mengetahui metode terbaik dalam penyajian informasi visual model. Lebih lanjut, keunggulan dari *software* yang mengusung masing-masing metode akan ditelaah berdasarkan perbandingan performa. Aspek dari performa akan dinilai adalah waktu dan ruang penyimpanan yang dipakai dalam proses pembentukan model 3 dimensi.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Data

2.1.1 Foto Objek

Objek penelitian adalah papan kayu (*wooden board*) dengan panjang 36 cm dan lebar 23,7 cm sebagai representasi *textureless-object*. Objek ini memiliki jumlah titik kontrol (*ground control points* dan *independent check point*) yang digunakan untuk mengevaluasi ketelitian ukuran dari model 3D yang dihasilkan.



Gambar 1. Objek, pusat koordinat dan posisi titik kontrol pada objek papan kayu

2.1.2 Posisi (Koordinat) Titik Kontrol

Terdapat 33 titik kontrol yang digambar pada objek papan kayu. Semua posisi (koordinat) titik kontrol dalam koordinat lokal, diukur dan dicatat untuk

perhitungan akurasi model 3 dimensi. Titik kontrol pada papan kayu berupa koordinat 2 dimensi (X, Y).

2.2 Peralatan

2.2.1 Kamera Digital

Kamera digital digunakan untuk memotret (mengambil foto) objek papan kayu. Kamera yang digunakan untuk memotret objek adalah Canon EOS 1300D dengan parameter lensa: panjang fokus 18 mm, ISO 400, *shutter speed* $\frac{1}{4}$ dan *aperture* F/10. Kamera ini memiliki ukuran sensor sebesar 22,3 mm x 14,9 mm (5196 x 3464 piksel), sehingga memiliki ukuran untuk satu piksel (*pixel pitch*) sebesar 4,29 μm .

2.2.2 Tripod Kamera

Tripod kamera digunakan sebagai tempat peletakan kamera saat melakukan pengambilan foto objek. Ketinggian tripod diatur bervariasi dari 92,5 cm hingga 132,5 cm. Hal ini bertujuan untuk mendapatkan foto dari semua sisi objek, terutama dari sisi atas objek.

2.2.3 LED Ring Lamp

LED *Ring Lamp* digunakan sebagai sumber cahaya buatan yang diberikan pada objek. Hal ini untuk mempelajari pengaruh dari faktor pencahayaan terhadap model 3 dimensi yang terbentuk.

2.2.4 Meja Kayu

Meja kayu digunakan untuk meletakkan objek yang akan diambil fotonya. Meja kayu memiliki ketinggian 90 cm dengan jarak pemotretan dari titik tengah meja menuju titik tengah tripod kamera sebesar 40-50 cm.

2.2.5 Kertas Kalibrasi

Kertas kalibrasi (*calibration sheet*) digunakan dalam proses kalibrasi kamera. Kamera digital akan memotret kertas kalibrasi dari berbagai arah dan orientasi. Foto kertas kalibrasi kemudian akan diolah pada *software* Agisoft Metashape untuk melaksanakan proses kalibrasi kamera.

2.2.6 Penggaris Besi

Posisi (koordinat) dari titik kontrol dan jarak titik tengah meja menuju titik tengah tripod diukur menggunakan penggaris besi.

2.2.7 Penanda Permanen

Penanda permanen digunakan untuk memberi tanda posisi titik kontrol maupun membuat garis jarak pemotretan dari titik tengah meja menuju titik tengah tripod kamera.

2.2.8 Unting-Unting

Penentuan titik tengah tripod kamera dilaksanakan berdasarkan posisi dari unting-unting yang dipasang menggantung secara vertikal pada bagian bawah tripod sebagai dudukan langsung kamera.

2.3 Aplikasi

2.3.1 Polycam Web-based Software

Pembuatan model 3 dimensi dengan metode *Gaussian Splatting* dilaksanakan menggunakan

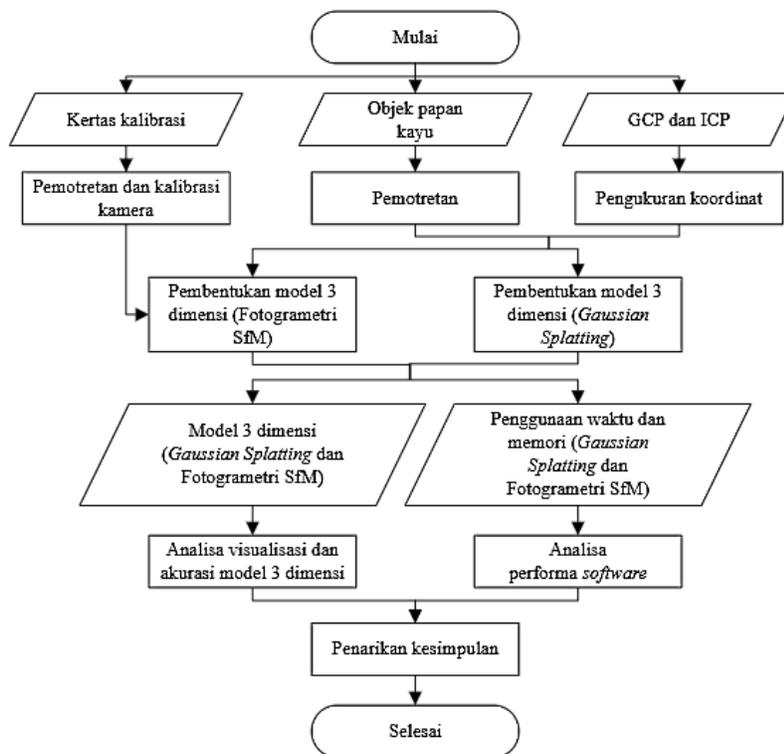
aplikasi berbasis website, yaitu Polycam dengan tool *Gaussian Splat Creator & Viewer*.

2.3.2 Agisoft Metashape

Pembuatan model 3 dimensi berbasis fotogrametri *Structure from Motion* dilaksanakan menggunakan aplikasi Agisoft Metashape yang terlebih dahulu diawali dengan pengolahan kalibrasi kamera.

2.3.3 Cloud Compare

CloudCompare adalah aplikasi yang digunakan untuk melakukan registrasi model 3 dimensi hasil dari pengolahan metode *Gaussian Splatting* dengan posisi sebenarnya di lapangan. Selain itu, melalui aplikasi ini, akurasi dari proses registrasi model dapat diketahui dengan melihat nilai *Root Mean Square* (RMSE) dari posisi – posisi kontrol point.



Gambar 2. Diagram alir penelitian

2.3 Tahapan Pelaksanaan

Tahapan pelaksanaan penelitian seperti yang tertera pada **Gambar 2** terdiri dari pemotretan kertas kalibrasi dan kalibrasi kamera, pengambilan foto objek dan koordinat titik kontrol, pembentukan model 3 dimensi, analisa visualisasi dan akurasi

model 3 dimensi, serta analisa performa *software* dalam proses pembentukan model 3 dimensi.

2.3.1 Pemotretan Kertas Kalibrasi dan Kalibrasi Kamera

Sebelum tahapan kalibrasi kamera dilaksanakan, kertas kalibrasi terlebih dahulu dipotret menggunakan kamera yang telah diatur berbagai parameter pemotretannya. Setelah mengatur segitiga exposure, dilakukan proses pengambilan data foto dengan objek lembar kertas kalibrasi (*calibration sheet*) pada kertas A3. Pengambilan dilakukan pada berbagai sisi dan sudut kertas lembar kalibrasi. Data foto kalibrasi dari *calibration sheet* kemudian dilakukan pemrosesan kalibrasi pada *software* Agisoft Photoscan Metashape sehingga didapatkan parameter internal kamera dan distorsi lensa.

2.3.2 Pengambilan Foto Objek dan Koordinat Titik Kontrol

Foto objek baik papan kayu diambil menggunakan kamera digital dari berbagai variasi ketinggian (92,5 – 130,5 cm), arah yang mengelilingi objek, tetapi memiliki jarak yang sama dari titik tengah meja sejauh 40 – 50 cm. Hal ini dilakukan karena untuk menghasilkan model 3D dengan setiap point feature yang baik, setidaknya dibutuhkan 3 (tiga) buah gambar atau foto dari posisi atau perspektif yang berbeda untuk satu titik yang sama sehingga setiap fotonya akan saling bertampalan. Nantinya, foto – foto ini direkonstruksikan menjadi model 3D dengan metode *Structure-from-Motion* (SfM) (Snavely dkk., 2006). Lebih lanjut, LED Ring Lamp sebagai sumber cahaya buatan diletakkan dekat dengan objek untuk menambah kecerahan *tone* pada objek.

Selain pengambilan foto objek, juga dilakukan penggambaran dan pengukuran koordinat titik kontrol. Posisi titik kontrol digambar pada objek secara seragam dan diukur menggunakan penggaris besi. Pada objek papan kayu, koordinat ditentukan dalam sistem 2 dimensi dengan jarak antar titik adalah 4 x 4 cm (sumbu x dan y).

2.3.3 Pembentukan Model 3 Dimensi (Gaussian Splatting)

Gaussian Splatting adalah sebuah metode representasi objek menggunakan perangkat komputer yang menggunakan representasi eksplisit dengan jutaan Gaussian 3D. *Gaussian Splatting* mampu menjalankan proses *rendering real-time* dengan kualitas visual yang tinggi. Tahapan pembentukan model 3 dimensi berdasar metode *Gaussian Splatting* meliputi: *Structure from Motion*, konversi ke bentuk Gaussian, *training*, *rendering*, dan *optimizations* (Kerbl dkk., 2023).

Pada penelitian ini, pembentukan model 3 dimensi menggunakan metode *Gaussian Splatting* selesai dilakukan menggunakan tool *Gaussian Splat*

Creator & Viewer pada aplikasi berbasis website Polycam. Beberapa foto objek dari papan kayu (dalam format .jpg) diunggah ke website dan secara langsung diolah untuk menghasilkan model 3 dimensi. Dikarenakan nama foto tidak menunjukkan urutan pengambilannya, sehingga pilihan "sequential" pada tahapan unggah foto tidak dipilih. Setelah sebuah model 3 dimensi terbentuk, selanjutnya, jarak di antara kedua titik kontrol diukur dan dilakukan perubahan skala (*rescale*) untuk memastikan bahwa jarak antar titik kontrol pada model sama dengan jarak sesungguhnya pada objek.

2.3.4 Pembentukan Model 3 Dimensi (Fotogrametri berbasis SfM)

Fotogrametri adalah sebuah ilmu yang merepresentasikan sebuah objek di permukaan bumi yang diukur tanpa menyentuh objek secara langsung. Pembentukan model 3D dengan metode fotogrametri berbasis SfM melalui beberapa tahapan: akuisisi data, pemrosesan foto, pembentukan 3D, dan peningkatan kualitas model (Moyano, 2020).

Agisoft Metashape merupakan salah satu aplikasi fotogrametri berbasis SfM dengan yang berfungsi dalam pemrosesan foto, pembentukan model 3D dan peningkatan kualitas model. Tahapan awal aplikasi ini berupa proses unggah beberapa foto objek yang telah diambil sebelumnya.

Setelah foto berhasil diunggah, foto kemudian diorientasikan satu sama lain sehingga terbentuk kumpulan awan titik (*point cloud*) (pemrosesan foto). Kumpulan awan titik merupakan dasar dalam pembentukan model 3 dimensi dengan sistem koordinatnya yang terlebih dahulu didefinisikan sesuai dengan sistem koordinat objek. Cara pendefinisian ini adalah dengan memberikan tanda dan informasi koordinat titik kontrol pada awan titik sesuai dengan posisi dan koordinat sebenarnya pada objek. Tahap selanjutnya adalah pembentukan model 3 dimensi dengan memperbanyak awan titik (*dense cloud*), serta peningkatan kualitas berupa pembentukan model dasar (*mesh*) dan pemberian tekstur pada model dasar.

2.3.5 Analisa Visualisasi dan Akurasi Model 3 Dimensi

Visualisasi model 3 dimensi baik dari pengolahan berbasis *Gaussian Splatting* maupun fotogrametri SfM, dianalisa berdasar tujuh kunci interpretasi yang terdapat pada model. Kunci interpretasi tersebut meliputi rona/ warna, ukuran, bentuk, tekstur, pola, tinggi, bayangan, situs dan asosiasi.

Lebih lanjut, untuk menghitung akurasi model, perhitungan *Root Mean Square Error* (RMSE)

digunakan dengan memasukkan selisih koordinat titik-titik kontrol pada model dengan hasil ukuran sebenarnya pada objek. Pada model hasil proses *Gaussian Splatting*, model terlebih dahulu disimpan dalam format *standard 3D image* (.obj) dan dibuka pada aplikasi CloudCompare. Setelah itu, dilakukan proses registrasi model terhadap ukuran objek sebenarnya dengan menggunakan pasangan titik kontrol (*CP pairs registration*).

Titik kontrol yang digunakan dalam registrasi model menggunakan titik kontrol tanah (*Ground Control Point*). Titik kontrol yang tersisa digunakan sebagai *Independent Check Point*, di mana, koordinatnya dibutuhkan dalam perhitungan RMSE. Terdapat lima skenario registrasi model pada *Cloud Compare* untuk mendapatkan nilai RMSE terkecil dan nilai faktor skala model terbaik. Perbedaan skenario bergantung pada dua fitur penskalaan, yaitu fitur *Adjust Scale* yang ada pada menu *Align (point pairs picking)* yang berfungsi untuk merubah skala model sesuai dengan ukuran asli secara otomatis. Fitur kedua adalah, *Scale* pada menu *Edit* yang berfungsi merubah skala model sesuai dengan konstanta yang ditentukan secara manual. Informasi detail terkait dengan skenario registrasi model pada *Cloud Compare* berdasarkan *Adjust Scale* dan *Scale* dapat dilihat pada **Tabel 1** di bawah ini.

Tabel 1. Skenario registrasi model pada Cloud Compare

Skenario	1	2	3	4	5
<i>Scale</i>	1	1	0,4	0,5	0,6
<i>Adjust Scale</i>	<i>Off</i>	<i>On</i>	<i>Off</i>	<i>Off</i>	<i>Off</i>

Untuk model 3 dimensi hasil dari pengolahan berbasis fotogrametri SfM, nilai RMSE didapatkan dari koordinat ICP setelah posisi titik kontrol tanah (GCP) didefinisikan pada *point cloud* dan model 3 dimensi terbentuk. Baik pada model 3 dimensi yang dibentuk berdasar metode *Gaussian Splatting* maupun fotogrametri berbasis SfM, nilai RMSE didapatkan dari koordinat *independent check point* yang berjumlah 28 titik. Sedangkan titik kontrol tanah (GCP) yang digunakan dalam *referencing* atau *registration*, berjumlah 5 titik.

2.3.6 Analisa Performa Software dalam Proses Pembentukan Model 3 Dimensi

Performa dari proses pembentukan model 3 dimensi dianalisa berdasar waktu pemrosesan, dan jumlah memori yang digunakan dalam pemrosesan maupun penyimpanan hasil pembentukan model 3 dimensi. Kedua aspek tersebut dibandingkan antara pembentukan model 3 berbasis *Gaussian Splatting* dengan fotogrametri SfM.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Kalibrasi Kamera

Hasil dari proses kalibrasi kamera berupa parameter internal kamera (*camera parameters / interior orientation parameter*) yang meliputi panjang fokus (F), titik tengah foto (*principal point*) (Cx dan Cy), parameter distorsi radial (K1, K2, K3) dan parameter distorsi tangensial (P1 dan P2) seperti yang dapat dilihat pada **Tabel 2**. Dari tabel tersebut didapat bahwa panjang fokus dan Cx memiliki distorsi yang cukup besar, yaitu 0,144 mm dan -1,490 mm.

Tabel 2. Parameter internal kamera dan distorsi lensa

	Value (pix)	Value (mm)
F	4229,452850	18,144352
Cx	-347,381000	-1,490264
Cy	2,793910	0,011986
K1	-0,054849	-0,000235
K2	0,072931	0,000313
K3	-0,070233	-0,000301
P1	-0,037091	-0,001591
P2	0,003642	0,000016

3.2 Visualisasi Model 3 Dimensi

3.2.1 Metode *Gaussian Splatting*

Model 3 dimensi objek papan kayu yang dihasilkan oleh aplikasi Polycam berbasis *Gaussian Splatting* ditampilkan pada **Gambar 3a**. Secara visual, model dapat merepresentasikan bentuk dan warna secara realistis. Termasuk visualisasi pada sudut model dan adanya fitur cekungan pada objek. Tekstur permukaan model terlihat halus. Tanda *pre-mark* pada model juga dapat diidentifikasi dengan jelas.

Di samping keunggulannya dalam visualisasi, terdapat efek transparan yang ditemui pada model ini. Efek tersebut menyebabkan model terlihat memiliki permukaan yang tidak solid/ tembus pandang. Sehingga bagian dalam/bawah model dapat terlihat. Walaupun begitu, efek ini tidak secara kasat mata atau jelas terlihat. Dibutuhkan pengamatan mendalam dan rotasi model sehingga efek ini dapat diidentifikasi. Efek transparan ini divisualisasikan pada **Gambar 3b**.



(a) (b)
Gambar 3. Model 3 dimensi dari metode *Gaussian Splatting*: (a) visualisasi, dan (b) efek tembus pandang/transparan

3.2.2 Metode Fotogrametri berbasis SfM

Model 3 dimensi yang dihasilkan dengan aplikasi Agisoft berbasis fotogrametri SfM divisualisasikan pada **Gambar 3** Secara visual, model mampu merepresentasikan bentuk, warna, ukuran, dan tinggi yang baik dan sesuai dengan kondisi sebenarnya pada objek. Jika dibandingkan dengan model 3 dimensi hasil dari pembentukan metode *Gaussian Splatting*, model ini memiliki *tone* warna sedikit lebih gelap dengan tekstur permukaan lebih kasar. Akan tetapi posisi dan tanda *pre-mark* masih terlihat dengan jelas. Termasuk sudut objek dan fitur cekungan yang teridentifikasi dengan jelas. Efek bayangan juga teridentifikasi pada model ini, sama halnya dengan model yang dibentuk dengan metode *Gaussian Splatting*.



Gambar 4. Model 3 dimensi dari metode fotogrametri berbasis SfM

Secara keseluruhan, tidak terdapat efek transparan/ tembus pandang pada model ini. Permukaan model terlihat solid sehingga bagian dalam/ bawah permukaan model tidak dapat dilihat dari luar model. Analisa lebih lanjut mengenai perbandingan visualisasi model 3 dimensi yang dibentuk dari metode *Gaussian Splatting* (GS) dan fotogrametri berbasis SfM (SfM) diterangkan lebih lanjut pada **Gambar 5-9** dan **Tabel 3**.



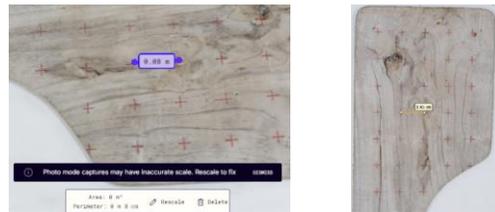
(a) (b)
Gambar 5. Visualisasi *Tone* dan warna pada model 3D: (a) *Gaussian Splatting*, dan (b) fotogrametri berbasis SfM



(a) (b)
Gambar 6. Visualisasi tekstur pada model 3D: (a) *Gaussian Splatting*, dan (b) fotogrametri berbasis SfM



(a) (b)
Gambar 7. Visualisasi bentuk pada model 3D: (a) *Gaussian Splatting*, dan (b) fotogrametri berbasis SfM



(a) (b)
Gambar 8. Visualisasi ukuran pada model 3D: (a) *Gaussian Splatting*, dan (b) fotogrametri berbasis SfM



(a) (b)
Gambar 9. Visualisasi bayangan pada model 3D: (a) *Gaussian Splatting*, dan (b) fotogrametri berbasis SfM

Tabel 3. Analisis visual model 3 dimensi dari metode *Gaussian Splatting* (GS) dan fotogrametri berbasis SfM (SfM) berdasar kunci interpretasi

Kunci Interpretasi
Tone dan warna

GS	Model memiliki warna dominan coklat muda dan terlihat sama dengan warna objek sebenarnya. Warna model dominan coklat muda. Jika dibandingkan dengan metode <i>Gaussian Splatting</i> , model ini memiliki <i>tone</i> yang lebih gelap.
SfM	Tekstur
GS	Model memiliki permukaan yang lebih halus dan mirip dengan kondisi objek sebenarnya
SfM	Permukaan model sedikit lebih kasar jika dibandingkan dengan metode <i>Gaussian Splatting</i>
	Bentuk
GS	Model memiliki bentuk yang sama dengan objek sebenarnya
SfM	Model memiliki bentuk yang sama dengan objek sebenarnya
	Ukuran
GS	Model memiliki ukuran yang berbeda dengan objek sebenarnya. Sehingga perlu untuk dilakukan penskalaan ulang (<i>rescale</i>) dan <i>referencing</i>
SfM	Model memiliki ukuran yang sama dengan objek sebenarnya
	Bayangan
GS	Terlihat efek bayangan pada sekeliling model sesuai dengan arah datangnya cahaya
SfM	Terlihat efek bayangan pada sekeliling model sesuai dengan arah datangnya cahaya. Bayangan pada model lebih samar jika dibandingkan dengan model hasil dari metode <i>Gaussian Splatting</i>
	Tinggi
GS	Tinggi model secara geometri masih kurang sesuai karena ukuran model juga tidak sesuai dengan objek sebenarnya.
SfM	Sesuai dengan objek. Karena ukuran model telah sesuai
	Pola
GS	Tidak terdapat pola khusus
SfM	Tidak terdapat pola khusus

3.3 Akurasi Model 3 Dimensi

3.3.1 Metode *Gaussian Splatting*

Untuk mengetahui akurasi geometri dari model 3 dimensi objek papan kayu, maka nilai RMSE dihitung pada ICP setelah dilakukan proses *georeferencing* menggunakan aplikasi CloudCompare. Nilai RMSE ICP pada arah horizontal dan vertikal serta nilai LOA dari kelima skenario *georeferencing* dapat dilihat pada **Tabel 4**.

Tabel 4. Nilai RMSE ICP model 3 dimensi menggunakan metode *Gaussian Splatting* arah horizontal (XY) dan vertikal (Z)

Skenario	RMSE ICP (m)		LOA ICP
	XY	Z	
1	0,214985	0,165534	10
2	0,000809	0,000610	40
3	0,000963	0,000607	40
4	0,028127	0,000755	20
5	0,056714	0,000910	10

Berdasarkan **Tabel 4** dapat diketahui bahwa nilai RMSE arah horizontal terkecil berada pada skenario 2 sebesar 0,362 mm dan 0,809 mm untuk GCP dan ICP. Hal ini juga berlaku pada RMSE arah vertikal sebesar 0,460 mm dan 0,610 mm untuk GCP dan ICP. Hal ini mengindikasikan bahwa model 3 dimensi dengan akurasi geometrik terbaik didapatkan jika faktor skalanya adalah 1 dan model telah mengalami penyesuaian (*adjusted scale: ON*). Akurasi geometrik semakin menurun dengan pengurangan nilai faktor yang tidak disertai dengan penyesuaian ukuran model (*Adjusted scale: OFF*), yang ditunjukkan pada skenario 3 hingga 5. Hingga didapatkan akurasi terendah terjadi jika model memiliki faktor skala 1 dan tidak disertai penyesuaian ukuran model (*adjusted scale: OFF*) yang ditunjukkan pada skenario 1. Jika penyesuaian ukuran model tidak diperhatikan, maka faktor skala terbaik untuk mendapatkan akurasi geometrik model yang tinggi adalah sebesar 0,4 (skenario 3).

3.3.2 Metode Fotogrametri berbasis SfM

Untuk mengetahui akurasi geometri dari model 3 dimensi objek papan kayu dengan metode fotogrametri berbasis SfM, maka nilai RMSE dihitung baik pada GCP maupun ICP. Nilai RMSE didapatkan setelah dilakukannya proses *marking* GCP dan ICP pada model dam dilakukan optimasi parameter kalibrasi kamera. Nilai RMSE GCP dan ICP model hasil dari metode fotogrametri berbasis SfM dapat dilihat pada **Tabel 5**.

Tabel 5. Nilai RMSE ICP model 3 dimensi menggunakan metode fotogrametri berbasis SfM arah horizontal (XY) dan vertikal (Z)

	RMSE ICP (m)		LOA ICP
	XY	Z	
	0,000748	0,000569	40

Tabel 5 menunjukkan bahwa nilai RMSE ICP model 3 dimensi papan kayu menggunakan metode fotogrametri berbasis SfM berada pada angka 0,748 mm dan 0,569 mm pada arah horizontal dan vertikal secara berurutan. Nilai RMSE ini berada pada skala

LOA 40 yang menunjukkan kedetilan objek yang tinggi. Jika dibandingkan dengan pengolahan *Gaussian Splatting*, fotogrametri berbasis SfM mampu memberikan model 3 dimensi dengan nilai RMSE lebih kecil. Hal ini menunjukkan bahwa metode fotogrametri berbasis SfM lebih akurat dalam memodelkan objek nyata secara 3 dimensi.

3.4 Performa Software dalam Pembentukan Model 3 Dimensi

Dalam pembentukan model 3 dimensi, *software* Polycam (berbasis *Gaussian Splatting*) dan Agisoft Metashape membutuhkan jumlah waktu dan ruang penyimpanan yang berbeda. Informasi waktu dan

ruang penyimpanan ini dapat dilihat pada *Report* dan informasi proyek, pada Agisoft Metashape dan Polycam secara berurutan. Di mana, pada Agisoft Metashape, detil durasi dan ruang penyimpanan dapat secara jelas dibedakan dan diketahui. Akan tetapi pada *software* Polycam, pengguna hanya dapat mengestimasi waktu pemodelan sesuai dengan informasi yang ditemukan pada *project website*. Sedangkan detil proses pemodelan 3 dimensi tidak dapat dilihat. Detil waktu pemrosesan dan ruang penyimpanan yang terpakai dalam proses pembentukan model 3 dimensi objek papan kayu dengan *software* Agisoft dan Polycam dapat dilihat pada **Tabel 6**.

Tabel 6. Waktu pemrosesan dan ruang penyimpanan *software* Agisoft dan Polycam dalam pembentukan model 3 dimensi objek papan kayu

Parameter	Waktu pemrosesan		Ruang penyimpanan	
	Agisoft	Polycam	Agisoft	Polycam
<i>Import Data</i>	0 jam 0 menit 2 detik		-	
<i>Image matching and alignment</i>	0 jam 6 menit 2 detik		1,63 GB	
<i>Build dense cloud</i>	0 jam 24 menit 39 detik		4,81 GB	
<i>Build mesh</i>	0 jam 1 menit 55 detik		3,38 GB	
<i>Build texture</i>	0 jam 1 menit 56 detik		2,66 GB	
<i>Tiled model</i>	3 jam 2 menit 0 detik		3,32 GB	
Total	3 jam 36 menit 34 detik	0 jam 37 menit 42 detik	15,8 GB	3,4 MB

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Model 3 dimensi yang dihasilkan oleh metode *Gaussian Splatting* merepresentasikan warna yang lebih terang, tekstur permukaan yang lebih halus dan mengkilap, serta dapat menunjukkan adanya bayangan. Secara visual metode ini dapat menghasilkan model yang lebih mirip dengan kondisi objek sebenarnya, jika dibandingkan dengan metode fotogrametri berbasis SfM. Isu yang ditemukan pada metode *Gaussian Splatting* adalah adanya efek transparan (*translucent effect*) pada model sehingga model nampak terlihat sebagai benda berongga (tidak solid/padat).

Akurasi geometri terbaik pada model dicapai dengan menggunakan metode fotogrametri berbasis SfM dengan RMSE berkisar pada nilai 0,748 mm (XY) dan 0,569 mm (Z). Model yang dibentuk dengan metode *Gaussian Splatting* memiliki akurasi terbaik dan serupa dengan metode fotogrametri berbasis SfM jika skenario *scale factor* berada pada

angka 1 dan penyesuaian model (*Adjusted scale*) diterapkan.

Analisa performa menunjukkan bahwa *software* Polycam membutuhkan waktu pemrosesan dan ruang penyimpanan yang lebih sedikit. Akan tetapi, detil proses pembentukan model 3 dimensi tidak dapat diketahui secara langsung pada *software* maupun pada informasi proyek yang tertera pada *website*.

DAFTAR PUSTAKA

- Barrelas, J., Dias, I. S., Silva, A., de Brito, J., Flores-Colen, I., & Tadeu, A. (2021). Impact of environmental exposure on the service life of façade claddings—A statistical analysis. *Buildings*, *11*(12), 1–20. <https://doi.org/10.3390/buildings11120615>
- Carrière, C., & Tallman, S. D. (2024). Assessing the utility of 3D modeling with photogrammetry in assigned sex estimation from the greater

- sciatic notch. *Forensic Imaging*, 36(January).
<https://doi.org/10.1016/j.fri.2023.200576>
- Chen, G., & Wang, W. (2024). A Survey on 3D Gaussian Splatting. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1–15.
- Chen, J., Sasaki, J., Guo, Z., & Endo, M. (2023). UAV-based seagrass wrack orthophotos classification for estimating blue carbon. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 293(August 2022), 108476.
<https://doi.org/10.1016/j.ecss.2023.108476>
- Elkhill, C., Liu, J., Linguraru, M. G., LeBeau, S., Khechoyan, D., French, B., & Porras, A. R. (2023). Geometric learning and statistical modeling for surgical outcomes evaluation in craniosynostosis using 3D photogrammetry. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 240, 107689.
<https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2023.107689>
- Gené-Mola, J., Sanz-Cortiella, R., Rosell-Polo, J. R., Escolà, A., & Gregorio, E. (2021). In-field apple size estimation using photogrammetry-derived 3D point clouds: Comparison of 4 different methods considering fruit occlusions. *Computers and Electronics in Agriculture*, 188(July).
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106343>
- Hage, L., Kmeid, R., & Amm, E. (2024). Comparison between 2D cephalometric and 3D digital model superimpositions in patients with lateral incisor agenesis treated by canine substitution. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 165(1), 93–102.
<https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2023.07.015>
- Higueras, M., Calero, A. I., & Collado-Montero, F. J. (2021). Digital 3D modeling using photogrammetry and 3D printing applied to the restoration of a Hispano-Roman architectural ornament. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 20(September 2020).
<https://doi.org/10.1016/j.daach.2021.e00179>
- Kenarsari, A. E., Vitton, S. J., & Beard, J. E. (2017). Creating 3D models of tractor tire footprints using close-range digital photogrammetry. *Journal of Terramechanics*, 74, 1–11.
<https://doi.org/10.1016/j.jterra.2017.06.001>
- Kerbl, B., Côte, U., Kopanas, G., Côte, U., Leimkühler, T., Informatik, M., Drettakis, G., & Côte, U. (2023). 3D Gaussian Splatting for Real-Time Radiance Field Rendering. *ACM Trans Graph*, 42(4), 1–14.
<https://doi.org/10.1145/3592433>
- Luhmann, T. (Thomas), Robson, S. (Engineering professor), Kyle, S. (Engineering professor), & Boehm, J. (Engineering professor). (2020). *Close-range photogrammetry and 3D imaging, 3rd edition*.
- Mitsanis, C., Hurst, W., & Tekinerdogan, B. (2024). A 3D functional plant modelling framework for agricultural digital twins. *Computers and Electronics in Agriculture*, 218(August 2023), 108733.
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108733>
- Nakata, Y., Iwasaki, K., Shimoda, S., & Torita, H. (2023). Understanding microtopography changes in agricultural landscapes through precision assessments of digital surface models by the UAV-RTK-PPK method without ground control points. *Smart Agricultural Technology*, 5(June), 100269.
<https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100269>
- Nijsink, H., Arts, E., Verhamme, L., Biert, J., Bemelman, M., Brouwers, L., & van Wageningen, B. (2023). The value of digital 3D models in evaluating surgical outcomes using the uninjured contralateral acetabulum after acetabular fracture repair. *Injury*, 54(4), 1169–1175.
<https://doi.org/10.1016/j.injury.2023.02.014>
- Niskanen, I., Immonen, M., Hallman, L., Yamamuchi, G., Mikkonen, M., Hashimoto, T., Nitta, Y., Keranen, P., Kostamovaara, J., & Heikkila, R. (2021). Time-of-flight sensor for getting shape model of automobiles toward digital 3D imaging approach of autonomous driving. *Automation in Construction*, 121.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-323-46294-5.00028-5>
- Qoyimah, S. (2016). *Empirical accuracy assessment of UAV photogrammetric mapping*. National Cheng Kung University.
- Wang, T., & Gan, V. J. L. (2023). Automation in Construction Automated joint 3D reconstruction and visual inspection for buildings using computer vision and transfer learning. *Automation in Construction*, 149(May 2022), 104810.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104810>
- Zhang, X., Jiang, Y., Wu, X., Nan, Z., Shi, J., Zhang, Y., Huang, X., & Huang, G. G. Q. (2023).

AIoT-enabled Digital Twin System for Smart Tunnel Fire Safety Management. *Developments in the Built Environment(Under Review)*, 18(November 2023), 100381.
<https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100381>

Zhao, S., Kang, F., Li, J., & Ma, C. (2021). Structural health monitoring and inspection of dams based on UAV photogrammetry with image 3D reconstruction. *Automation in Construction*, 130.