

Structure from Motionにより生成した三次元モデルを含む 都市空間 Virtual Reality の構築

- 境港市水木しげるロードリニューアル計画を対象として -

○福田 知弘*¹ 灘 英樹*² 足立 晴夫*³
清水 駿太*⁴ 武井 千雅子*⁵

キーワード：Structure from Motion (SfM) 写真測量 都市設計 景観 Virtual Reality (VR)

1. はじめに

建築・都市分野において、現存する何かを3次元モデリングする行為は、一般的である。例えば、景観シミュレーションのために設計対象の周辺に存在する建物や地形などを3次元モデリングすることや、リノベーションや維持管理のために現状の設計対象を3次元モデリングすることが挙げられる。Structure from Motion (SfM) は、フォトグラメトリ技術のひとつであり、複数の画像群からカメラの位置・姿勢と空間点位置の復元を行う技術である¹⁾。SfMを建築・都市分野で応用した先行研究として、CAD/BIM (Computer Aided Design / Building Information Modeling) の代わりにSfMを用いて現存する建築物の記録を試みたもの、災害調査・観測への活用可能性に関するものが散見される²⁾³⁾⁴⁾。SfMは、低コストで身近な機材 (デジタルカメラやスマートフォンなど)、そして、無料もしくは低コストのソフトウェアを用いて、点群やポリゴンの生成を可能とするため、現存する何かを3次元モデリングするためのツールとして、専門家のみならず非専門家にとっても、急速に人気が高まってきた⁵⁾。

本研究は、建築・都市分野におけるSfMの応用法として、VR (Virtual Reality) のようなリアルタイムレンダリング (実時間描画) 条件下における3次元モデリング手法について考察することを目的とした。SfMにより3次元オブジェクトを生成する時、まず、入力された写真群の特徴量を基に点群が生成され、次に、その点群を基にポリゴンとテクスチャが生成される。一方、多数のポリゴンが生成された場合には、リアルタイムレンダリングの実現指標であるフレームレート (frames per second; fps) を低下させることになる。このような、リアルタイムレンダリング条件下で、実用を考慮しながら、SfMによる3次元モデリング手法について考察した研究は報告されていない。

研究の方法は、問題解決型アプローチとし、アーバンデザイン・プロジェクトにおける問題の把握、問題の解決に向けたSfMの応用、実験の実施、評価を行った。尚、リアルタイムレンダリングを満たすフレームレートは、地上デジタルテレビ放送やデジタルビデオカメラに近い30fpsを目標値とした。

2. アーバンデザイン・プロジェクトにおける問題の把握：境港市水木しげるロードリニューアル計画

水木しげるロードは、JR 境港駅前から水木しげる記念館のある本町アーケード商店街までの延長約800mの道路と沿道の店舗などで構成されている。1992 (平成4) 年、衰退する商店街の活性化を目的として、一部歩道の拡幅と併せ、境港市出身の漫画家水木しげるの代表作である「ゲゲゲの鬼太郎」に登場する妖怪などのブロンズ像を歩道内に設置し、親しみの持てる街路としての整備が開始された。当初23体でスタートしたブロンズ像は年々その数を増やし、現在は153体までになった。境港市の人口は3.4万人であるが、地元の人々の継続的な努力により、年間200万人以上の人々が水木しげるロードを訪問している。

一方、水木しげるロードの賑わいを将来に渡って維持するために、「誰もが訪れたいくなるおもてなしとエンターテインメントのロードづくり」を基本理念として、2014年よりリニューアル計画を検討してきた。主なリニューアル項目は、(1)車道の一方通行化と蛇行化、(2)変化に富んだ広い歩道空間の確保、(3)ゾーンコンセプトに合わせた妖怪ブロンズ像の再配置、(4)夜間照明デザイン、である。この実施設計の具体的な検討、そしてプレゼンテーションのために、VRを制作した。

制作過程において、現存する153体の妖怪ブロンズ像と沿道建物の3次元モデルを作成する必要があった。ブロンズ像はそれぞれ異なる形状である。また、穴の開いた複雑な形状を含む。これらをモデリングするために、通常、3DCAD/CGソフトウェア (例: Autodesk 3ds MAX, Trimble SketchUP) を使用するが、正確に作成するためには現地測量とモデリングの工程に膨大な時間とコストを要する。これらの制約を緩和するため、SfM由来の3次元モデリングを検討した。

2.1. SfMによるブロンズ像モデリング

ブロンズ像設置に伴うリアルタイムレンダリングの影響を検討するため、フィージビリティスタディとして、以下の実験を実施した (図1)。

1)VR 仮想空間を構築する。

2)SfMにより1体のブロンズ像 (砂かけ婆) を、再現レベ

ル高 (4286 ポリゴン), 再現レベル中 (1025 ポリゴン), 再現レベル低 (298 ポリゴン) で構築する.

3)構築した VR 仮想空間に, a)再現レベル高のブロンズ像 100 体を設置した場合, b)再現レベル中のブロンズ像 100 体を設置した場合, c)再現レベル低のブロンズ像 100 体を設置した場合, d)ブロンズ像を設置しない場合, の 4 パターンの VR 仮想空間を構築し, フレームレートを測定する.

実験の結果, フレームレートは以下となった.

- a)再現レベル高のブロンズ像 100 体を設置: 16.4fps
- b)再現レベル中のブロンズ像 100 体を設置: 24.1fps
- c)再現レベル低のブロンズ像 100 体を設置: 27.1fps
- d)ブロンズ像を設置しない場合: 30.1fps

実験結果より, 全てのブロンズ像を再現レベル高で設置した場合には, リアルタイムレンダリングの実現が困難であることが明らかになった. そこで, ブロンズ像をランク付けした. すなわち, 有名なキャラクターでありランドマークとなるブロンズ像は再現レベル高 (27 体), 続いて, 再現レベル中 (46 体), 再現レベル低 (80 体) とした. 尚, SfM による 3 次元復元には, 参考文献⁶⁾を参考に筆者^{*4*5}らが開発した SfM システム, 商用の SfM ソフトウェア (Agisoft PhotoScan ver.1.2.5, Autodesk Remake ver.17.24.1.4) を用いた.

結果は, 以下の通りである. 作成したブロンズ像モデルの例を図 2 に示す. また, 再現レベル別のポリゴン数と頂点数を図 3 に示す.

- ・使用したカメラ: カシオ EX-ZS210, EX-ZS190
- ・使用した写真: PhotoScan 80~100 枚, Remake 24
- ・画像サイズ: 2048×1536pixels
- ・写真撮影時間 (1 体): 10~20 分
- ・点群数: Photoscan 60000~70000 点, Remake は不明
- ・制作時間 (1 体): 自動生成に約 30 分, 生成後の調整に 30~60 分

2.2. SfM による沿道建物モデリング

沿道建物の 3 次元モデリングを SfM 由来の手法で検討した. 沿道建物 1 棟を対象に (図 4 (a)), 従来手法である, 3DCG ソフトウェアを用いて, 地図より得た建物平面情報と立面写真より得た立面情報より簡易に 3 次元モデリングした (図 4 (b)). 次に, 2 種類の SfM ソフトウェア (Agisoft PhotoScan ver.1.2.5, Autodesk Remake ver.17.24.1.4) を用いて, 写真群より 3 次元モデルを作成した (図 4(c)-(f)).

SfM により生成された沿道建物モデルを観察した結果, まず, データ量について, (b)従来手法では, ポリゴン数 19, 頂点数 48 であった. 一方, (d)SfM ソフト(PhotoScan) で作成した場合には, ポリゴン数 242 万, 頂点数 121 万, (e)SfM ソフト(Remake)で作成した場合には, ポリゴン数 79 万, 頂点数 42 万と大きく増加した. これは 1 棟のみのデータ量であり, 沿道には約 120 棟の建物があるため, リ

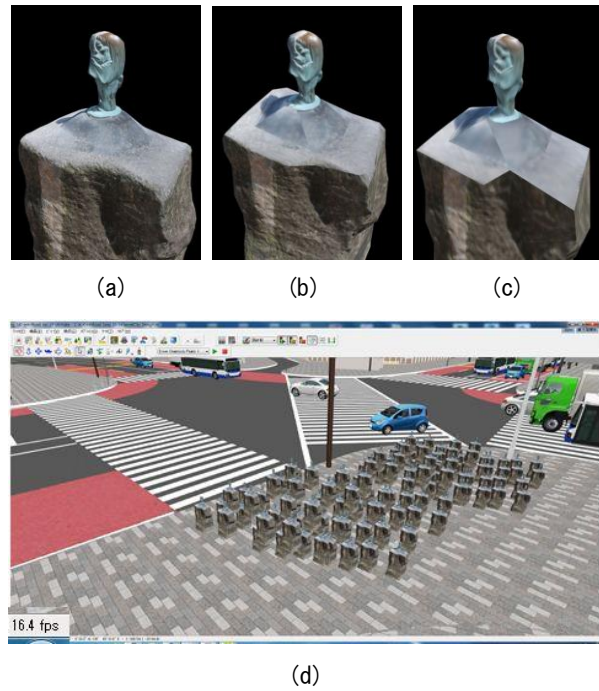


図 1. フィージビリティスタディ: (a)再現レベル高, (b)再現レベル中, (c)再現レベル低, (d)VR 仮想空間にブロンズ像 100 体を配置 (再現レベル高の場合)

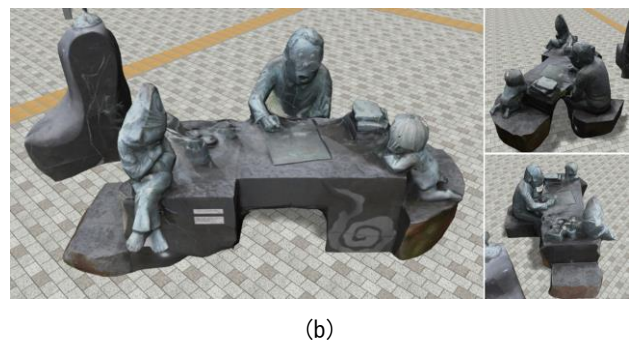


図 2. SfM 由来の 3 次元モデル: (a)入力した写真群の例, (b)生成したブロンズ像(再現レベル高)

アルタイムレンダリングに影響を与えうる. 必要以上のポリゴンを軽減する自動処理が望まれ, 研究が進められているが⁷⁾, 現状は限定的な対象に留まる.

次に, 生成されたモデルは, 内容の不足, 不備, 余剰が見られた. 内容不足とは, 本来モデリングされるべき箇所

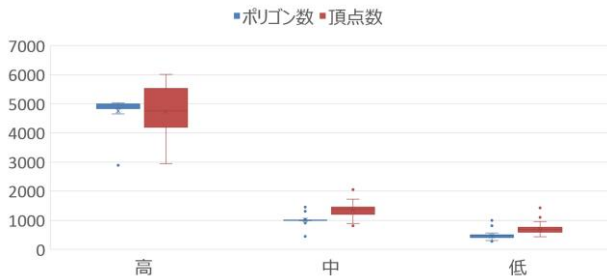


図3. ブロンズ像の再現レベル別ポリゴン数と頂点数

がモデリングされていないことである。今回の例では、屋根部分が該当した。次に、内容不備とは、モデリングされているものの、形状が正確に定義されていないことである。今回の例では、建物看板、アーケード、電柱などが該当した。また、内容余剰とは、不要なオブジェクトがモデリングされてしまったことである。今回の例では、電線に空の要素が多く含まれた。SfMによる3次元モデル生成後、内容不備のオブジェクトを修正したり内容余剰のオブジェクトを削除したりという調整作業が可能であるが、本対象では、この調整作業に要する時間が多大である上に複雑な作業内容となったため、最終的に従来手法により周辺建物を作成した。内容不備、余剰が発生した理由として、撮影できる建物立面が限られており、全ての面を撮影できな



図4. 水木しげるロード周辺建物3次元モデル: (a) 現況写真, (b) 従来手法で作成, (c) SfMソフト(PhotoScan)で作成した点群, (d) 同 ポリゴン, (e) SfMソフト(Remake)で作成したポリゴン, (f) 同メッシュ表現

ったことが挙げられる。また、建物の前面にはアーケード、電線など建物をモデリングする際の障害要素が多く含まれていたことも一因と考えられる。

2.3. SfM用の撮影方法に関する考察

SfM用のブロンズ像の撮影は、ブロンズ像を上空から見た時にブロンズ像に対して8方向の角度から撮り、さらに8地点それぞれにおけるカメラ位置の高さを、低、中、高の3地点、計24地点を基本とした。この地点間の補完写真として、連続写真も撮影した。撮影は、曇りの日に、観光客が少ない時間帯を選んで撮影した。曇りの日とした理由は、VR仮想空間とSfM由来の3次元モデルとの光学的整合性を確保するためである。すなわち、後工程であるVRシステム上でVR仮想空間全体の陰影を付与するため、SfM由来の3次元モデリングの時点では、テクスチャに陰影を付与しないようにした。また、観光客が少ない時間帯とした理由は、可能な限りブロンズ像の全体を撮影すること、及び、ブロンズ像以外の要素を撮影しないためである。

また、本プロジェクトの設計者とVR制作者の就業地は東京と大阪であり現地と離れているため、設計者やVR制作者が現地に赴いてSfM用の写真を撮影するならば、時間とコストがかかってしまう。そのため、現地の境港市役所職員が手持ちのカメラで撮影を実施した。結果、約1か月(2016年6月10日~7月11日)の期間で撮影することができた。ブロンズ像1体当たりの撮影時間は10~20分であった。このように、SfMは身近なデジタルカメラを用いて、撮影ノウハウを労せず伝えることができたため分担作業が可能になることを確認できた。

最終的に、水木しげるリニューアル計画の実施設計である、道路本体(路面、マーキングなど)、道路植栽(並木、植栽柵など)、道路付属物(信号機、153体のブロンズ像、照明柱など)、道路占有物(電柱、アーケード、サインなど)、沿道の建築物、広告看板、空地(公園など)、遠景の自然要素(地形、海など)、人工要素(周辺建築物など)、人間活動(歩行者、自転車、自動車など)を含めた、VRアプリケーションを構築した(図5)。VR上でLOD(Level of Detail)などの設定を行い、フレームレートは常に30fps以上となることを確認した。

3. まとめ

本研究は、VRのようなリアルタイムレンダリング条件下におけるSfM由来の3次元モデリング手法について考察した。アーバンデザイン・プロジェクトで直面した課題、すなわち、現存する数多くのブロンズ像と周辺建物を3次元モデリングするために、3DCAD/CGソフトウェアを用いた従来手法に代わり、SfMを用いた手法を試行した。

リアルタイムレンダリング条件下、並びに、実用面から考察した結果、ブロンズ像のモデリングは再現レベルを3段階にランク付けすることで、データ量の全体調整を図っ

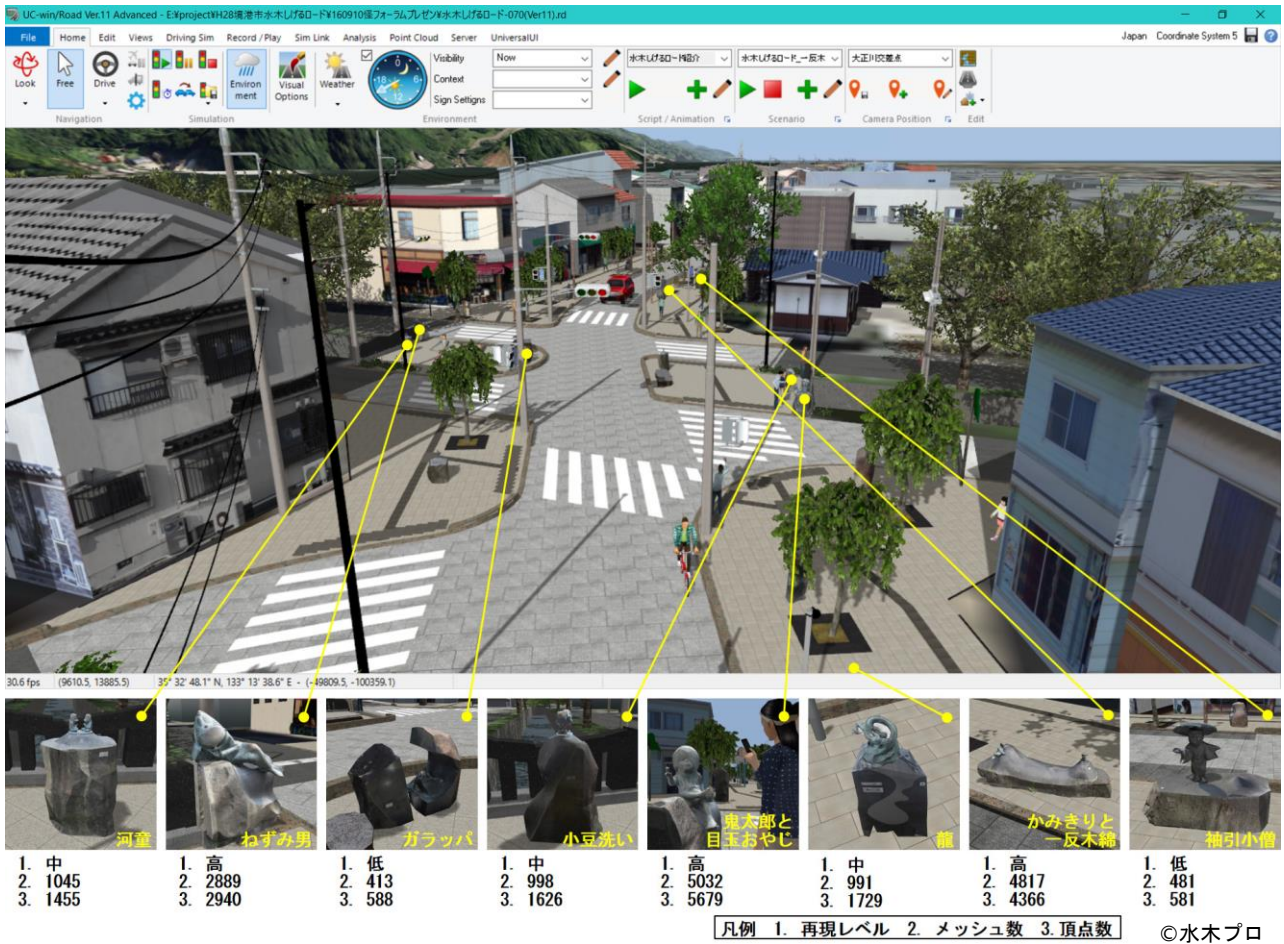


図5. 水木ロードリニューアル計画 VR: 大正川付近全景と SfM による 3 次元ブロンズ像の例

た。また、周辺建物についてモデリング内容の不足、不備、余剰の観点から実用に向けた課題を整理した。

今回用いた SfM はある期間に撮影した写真群を用いて 3 次元復元を行ったが、動きのある対象などは動画撮影しつつ 3 次元復元を行う必要がある。今後の課題としたい。

謝辞

本研究は、境港市と大阪大学との共同研究「水木しげるロード地区検討のためのコンピュータ設計システムに関する研究」により実施した。水木しげるロードリニューアル設計関係者（有限会社 ユープラネット、株式会社 LEM 空間工房、法政大学高見公雄研究室）には VR 制作に関する資料ご提供並びに貴重な助言を頂いた。謹んで感謝の意を表する。

[参考文献]

- 1) Tomasi, C. and Kanade, T.: Shape and motion from image streams under orthography: a factorization method, International Journal of Computer Vision, Vol.9, No.2, 137-154 (1992)
- 2) Datta, S., Beynon, D.: A Computational Approach to the Reconstruction of Surface Geometry from Early Temple Superstructures, International Journal of Architectural

Computing, 3(4), 471-486 (2005)

- 3) Agarwal, S., Snavely, N., Simon, I., Seitz, S.M., Szeliski, R.: Building Rome in a Day, 2009 IEEE 12th International Conference on Computer Vision (ICCV), 72-79 (2009)
- 4) 内山庄一郎, 井上公, 鈴木比奈子: SfM を用いた三次元モデルの生成と災害調査への活用可能性に関する研究, 防災科学技術研究所研究報告, 第 81 号, 37-60 (2014)
- 5) Nagakura, T., Tsai, D. and Choi, J.: Capturing history bit by bit - Architectural database of Photogrammetric Model and Panoramic Video, Proceedings of the 33rd eCAAD Conference - Volume 1, 685-694 (2015)
- 6) 半澤悠樹, 鳥居秋彦, 奥富正敏: オンライン撮影に適した実用的な SfM システム, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. J96-D, No.8, 1753-1763 (2013)
- 7) Hidaka, N., Michikawa, T., Motamedi, A., Yabuki, N. and Fukuda, T.: Polygonization of Point Cloud of Elongated Civil Infrastructures Using Lofting Operation, conVR2016, (2016) (accepted)

- *1 大阪大学 大学院工学研究科 環境・エネルギー工学専攻 准教授 博士(工学)
- *2 境港市 建設部 水木しげるロードリニューアル推進課 課長 博士(工学)
- *3 境港市 建設部 水木しげるロードリニューアル推進課 課長補佐
- *4 株式会社フォーラムエイト 東京本社 VR サポート Gr.
- *5 株式会社フォーラムエイト 代表取締役副社長