

景観面を中心とした建築設計検討用 Augmented / Diminished Reality の トラッキング性能向上

○井上 和哉*¹ 福田 知弘*² 矢吹 信喜*³
大抜 久敏*⁴ 市村 剛*⁵

キーワード：建築・都市設計 Augmented Reality Diminished Reality 可視化 トラッキング
Structure from Motion (SfM)

1. はじめに

建築設計の検討手法の一つとして、Augmented Reality (AR) が着目されている^{1), 2)}。AR による景観面を中心とした設計検討は、新設建造物の周辺環境を実写映像で表現するため、Virtual Reality (VR) の課題である周辺環境のモデリングにかかる時間・費用が削減できる。また、AR による設計検討は、事業予定地で新設建造物の三次元モデルを実物大で重畳させて確認できるため、会議室での検討と比較して、より臨場感のあるシミュレーションを可能にする。しかし、既設建造物の解体撤去前に、跡地に新設される建造物の景観を AR で表示すると、新設後には存在しない既設建造物も見えろという課題がある。この課題を解決する技術として、実世界に存在する物体を消去したように見せる Diminished Reality (DR) がある³⁾。

筆者らの既往研究^{4), 5)}では、DR に着目し、既設建造物を解体撤去した後に新設される建造物の設計検討を行うシステム「PhotoDR-2015」、及び、PhotoDR-2015 に景観指標の一つである緑視率をリアルタイム測定する機能を加えた「PhotoAR+DR2016」を開発した。これらのシステムでは、写真から三次元形状を復元した既設建造物とその背面に位置する建造物の三次元モデルを使用することで、既設建造物解体撤去後の景観シミュレーションを可能とした。また、幾何学的整合性を担保するため、カメラの初期位置合わせとして、Structure from Motion (SfM) から算出されたカメラ位置・姿勢情報を利用し、トラッキング技術として、予めワールド座標系（三次元）で定義したトラッキング基準点をカメラ画像上、すなわち、スクリーン座標系（二次元）で追跡することで現在のカメラ位置・姿勢を算出している。しかし、トラッキングの安定性は利用シーンに依存しており、長時間の安定したトラッキングの実現のためには、ユーザーは技術的側面を考慮しながらシステムを利用する必要がある。また、利用シーンに合わせて Character User Interface (CUI) ベースで光源の定義やマテリアル設定、トラッキングのための事前準備が必要となる。実際の建築設計に鑑みると、施主や設計者など情報技術に精通していない利害関係者が利用することも想定され、実用には敷居が高いと推測される。

そこで、本研究は、実際の建築設計への適用を想定し、景観面を中心とした建築設計検討用 AR/DR システムの開発を目的とする。まず、Graphical User Interface (GUI) ベースのシステムを開発するため、開発環境を見直し、システムの操作性向上を図った。次に、AR 表示する計画建造物の奥行きが把握が困難なため、オクルージョン処理機能を加え AR/DR における表現の正確性向上を図った。更に、RANSAC 法を用いた外れ値の除去機能を加え、検証実験の結果を考慮してトラッキング基準点を配置することで、より安定したトラッキングの実現を目指した。加えて、実際の建築設計プロジェクトを想定して、開発したシステム（以降、本システム）の実証実験を実施した。

2. AR / DR の操作性・表現の正確性向上

2.1. 開発環境の変更

初期のカメラ位置合わせ、並びに、トラッキング基準点を定義するために、周辺環境を撮影した数十～百枚の写真から三次元モデル（点群）を復元する。既往研究^{4), 5)}では、点群復元ソフトウェアとして OpenMVG⁶⁾を使用していたが、復元される点群が粗く、位置合わせやトラッキング基準点の定義作業が困難な場合があった。そのため、より安定して高精度の点群が復元可能な Agisoft PhotoScan を使用する（図 1）。

また、システムの開発環境として、Visual Studio (Visual C++, OpenGL, OpenCV) を使用していた^{4), 5)}。しかし、光源の定義やマテリアル設定時のコーディング量の増大、設計内容の更新・変更が生じた際の三次元モデルの入れ替えのような実用場面を考慮すると、ユーザーへの負担が大きいの。そこで、ゲームエンジンの一つである Unity と Unity プラグインである OpeCV for Unity を用いて本システムを開発した。これにより、記述が煩雑になりがちな GUI プログラムが簡単かつ効率的に作成可能となり、ユーザーが直接コードとして記述する必要性が低減された。

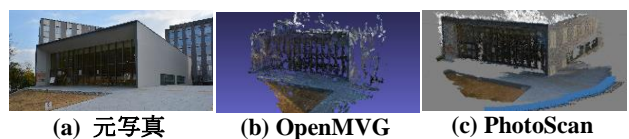


図 1 点群の復元例

2.2. オクルージョン処理

AR の課題の一つとして、前後関係を正しい順番で表示できないオクルージョン問題がある。オクルージョン問題は、AR では三次元モデルをカメラから得られた画像上に重畳表示するため生じる。オクルージョンは人間の奥行き知覚に大きな影響を与えるため、建築設計検討において正確に表現すべき要素の一つである。

オクルージョン問題を解決するためには、周辺環境の奥行き情報が必要となる。本システムでは、写真から復元した周辺環境の三次元モデルを利用して奥行き情報が取得可能である。周辺環境の三次元モデルに隠れる部分は AR 表示しないことで、オクルージョン処理を実現した(図 2)。

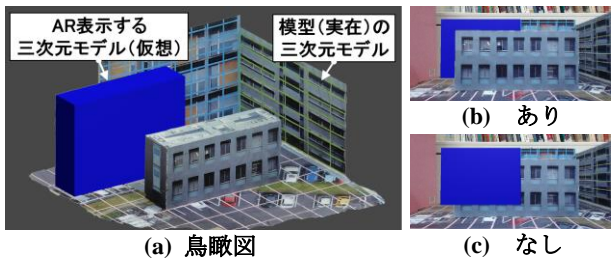


図 2 オクルージョン処理

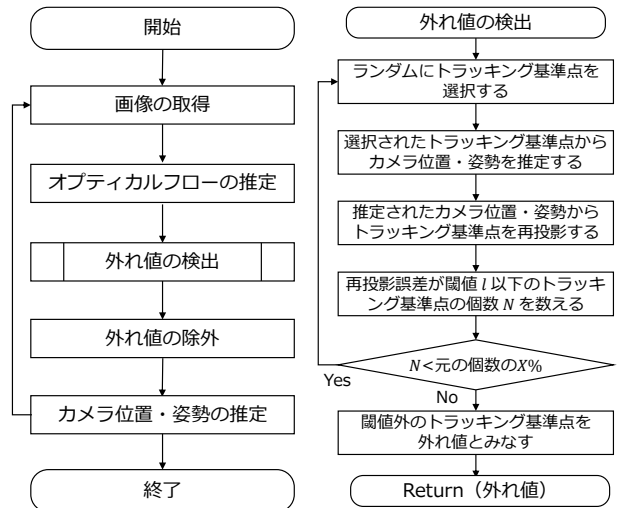
3. トラッキング性能向上

3.1. 外れ値の除外

従来のシステムでは、最小二乗法によりトラッキング基準点全ての誤差が最小化されるようにカメラ位置・姿勢を推定していた。そのため、外れ値の影響を受けやすいという問題があった。そこで、外れ値を除外した上でカメラ位置・姿勢を推定することでトラッキング精度を向上させた。

本システムのトラッキングフローを説明する(図 3(a))。本システムでは、トラッキングに使用するデータとして、Web カメラから取得された画像、予め定義したトラッキング基準点、Web カメラのキャリブレーションデータを必要とする。まず、Web カメラから画像を取得する。次に、トラッキング基準点が二次元画像上でどれだけ移動したかを推定する。これをオプティカルフローの推定という。次に、推定されたオプティカルフローの中で、外れ値を検出する。外れ値の検出方法の詳細については後述する。更に、任意のトラッキング基準点のオプティカルフローが外れ値として検出された場合、そのトラッキング基準点を以降のトラッキングから除外する。最後に、残りのトラッキング基準点を基にカメラ位置・姿勢を推定する。

続いて、トラッキングフローにおける外れ値の検出方法について説明する(図 3(b))。外れ値の検出には、再投影誤差を基にした Random Sampling Consensus (RANSAC) 法を使用する⁷⁾。まず、ランダムにトラッキング基準点を選択する。本システムでは、5つのトラッキング基準点を選択する。選択されたトラッキング基準点を基に最小二乗法を用いてカメラ位置・姿勢を推定する。次に、推定され



(a) トラッキングフロー (b) 外れ値の検出フロー

図 3 トラッキングフロー

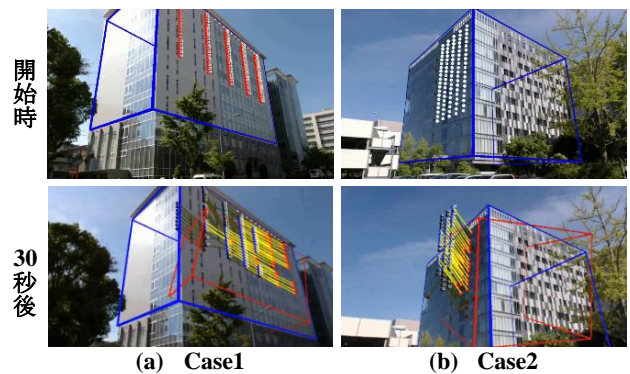


図 4 外れ値の除外機能

たカメラ位置・姿勢を用いて、トラッキング基準点を再投影する。更に、再投影されたトラッキング基準点と元のトラッキング基準点との誤差(以降、再投影誤差とする)が閾値以下のトラッキング基準点の個数を数える。この個数が閾値よりも小さい場合、トラッキング基準点の選択に戻る。個数が閾値よりも大きい場合は、再投影誤差が閾値よりも大きかったトラッキング基準点を外れ値とみなす。

RANSAC 法を用いた外れ値の検出方法は、外れ値が比較的多い場合でも、ロバストな検出が可能という特徴を持つ。

外れ値の除外機能を追加して、屋外実験を実施した(図 4)。図 4 中、赤色のワイヤーモデルは従来のトラッキング方法で、青色のワイヤーモデルは新しいトラッキング方法で描画されている。また、黄線は、トラッキング基準点のオプティカルフローを示しており、青色の端点はトラッキング開始時の二次元座標を、赤色の端点は現在のフレームにおける二次元座標を示している。図 4 (a) Case1, (b) Case2 共に、従来のトラッキング方法では 30 秒後の時点でトラッキングが保持できず、不適切な結果であることが明らかであるが、新しいトラッキング方法では、適切なトラッキングが保持できていることが分かる。

3.2. トラッキング基準点の配置

本システムでは、カメラ位置・姿勢を推定するために、トラッキング基準点を予め定義する必要がある。トラッキング基準点の定義は利用シーンに合わせて任意に配置する。そこで、トラッキング基準点の配置とトラッキングの安定性の関係について検証を実施した。

トラッキング基準点の配置に関する指標として、トラッキング基準点のバウンディボックスが画像に占める割合に着目し、推定されたカメラ位置・姿勢の誤差との関係について仮想空間上で検証を行った。検証方法について説明する。まず、画像中に占める割合が任意の値になるようにトラッキング基準点を配置する。次に、人為的にオプティカルフロー推定に誤差を与え、カメラ位置・姿勢を推定する。最後に、推定されたカメラ位置・姿勢と正しいカメラ位置・姿勢とを比較し、誤差を求める。トラッキング基準点のバウンディボックスが画像中に占める割合は 2% から 100% の間、オプティカルフロー推定の誤差は 1 pixel と 2 pixel の 2 種類で設定した。ただし、画像サイズは 1024 pixel × 576 pixel である。

結果を図 5 に示す。図 5 からトラッキング基準点の画像中に占める割合が小さくなるほど、カメラ位置・姿勢算出時における相対的誤差が大きくなることが明らかである。特に、トラッキング基準点の画像中に占める割合が 30% 以上の場合、推定されたカメラ位置の平均誤差は 0.1m 以下、姿勢の平均誤差は 1° 未満であった。そのため、トラッキング基準点を配置する際は、可能な限り画像中に占める割合が大きくなるように配置し、特に、画像中に占める割合が 30% 以上となるように配置するとトラッキングの安定性が向上すると考えられる。

しかし、トラッキング基準点を画像中の広範囲に配置した場合、カメラを動かした際にトラッキング基準点が画面外に出やすくなり、オプティカルフロー推定が出来なくなる。そこで、オプティカルフロー推定が出来なくなったトラッキング基準点の復元機能を実装し、画面外に出た点も再度追跡可能にした。

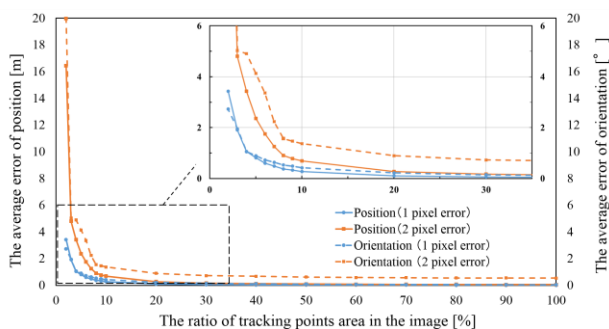


図 5 トラッキング基準点画像中に占める割合と推定されたカメラ位置・姿勢の誤差との関係

4. 実証実験

実際の建築プロジェクトを想定し、本システムの実証実験を実施した。本実験では、大阪大学吹田キャンパス内の生命機能ナノバイオロジー棟横駐車場で解体し研究棟を建設する仮想プロジェクトを想定し、計画建物の外観を検討するため、4つの視点で本システムを適用した。対象地を図 6 に、本実験に使用した三次元モデルを図 7 に示す。周辺環境の三次元モデルは各視点場付近、及び、計画建物付近から撮影した写真計 109 枚を用いて PhotoScan により復元した。計画建物と周辺環境の三次元モデルの位置や向き、大きさは手で調整し、統合した。実験日は、2017 年 10 月 5 日、天候は晴れであった。



図 6 実証実験対象地 (平面図)

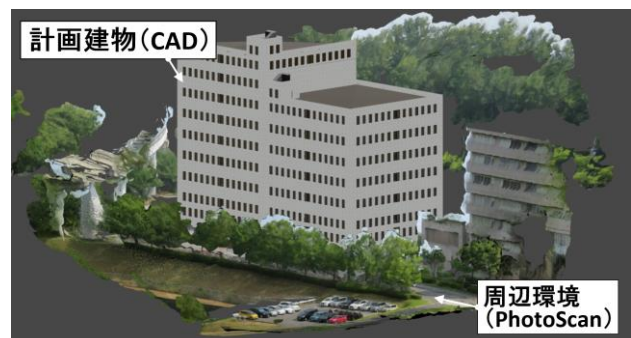


図 7 実証実験に使用した三次元モデル

各視点場において、AR を実施した結果を図 8 に示す。実証実験の結果、視点場 2, 3, 4 において樹木の淵に沿ってオクルージョン処理されているが、視点場 1 においては樹木でない部分もオクルージョン処理されている。これは、周辺環境の復元に用いた写真の撮影日である 2017 年 7 月 15 日より、樹木の葉が減ったためである。図 9 は、視点場 2 におけるトラッキングの様子を示している。図 9 中の黄線は、トラッキング基準点のオプティカルフローを示している。従来のシステムにおいて、カメラ位置・姿勢の推定に用いられたトラッキング基準点が外れ値として除外され、より長時間の安定したトラッキングが可能となった。また、トラッキング基準点が画面外に出たトラッキング基準点も復元することで、再度トラッキングしやすくなった。



(a) 現況 (b) AR 画像

図 8 実証実験結果
(ただし、白丸はトラッキング基準点)



(a) 現況 (b) AR 画像

図 9 視点場 2 におけるトラッキング

5. まとめ

本研究では、実際の建築設計での適用を想定し、景観面を中心とした建築設計検討用 AR/DR システムを開発し、操作性・表現の正確性の向上とトラッキング性能の向上を行った。本研究の結論は以下の通りである。

- GUI ベースのシステムを開発するため、開発環境を見直し、システムの操作性や表現の正確性を向上させた。
- RANSAC 法を用いてオプティカルフロー推定の外れ値を除去することで、より安定したトラッキングを可能とした。また、トラッキング基準点の配置をより広い配置にすることで、カメラ位置・姿勢算出時における相対的誤差を減らし安定したトラッキングを可能とした。
- 実際の建築プロジェクトを想定した実証実験を実施し、計画建物の外観検討のため、4つの視点場から本システムを適用し、操作性・表現の正確性の向上とトラッキング性能の向上を実証した。

本研究において、外れ値の除外を行うことで、より長時間の安定したトラッキングが可能となったが、カメラを長距離移動させ、連続した景観を検討するためには、更なるトラッキングの安定性向上が必要である。また、素早い移動への対応はオプティカルフロー推定での制限があり、使用機材の性能向上も必要である。実証実験で確認されたように、事前に作成したモデルを使用するオクルージョン処理機能では、AR を実施する際と形状が異なる可能性がある。そのため、リアルタイムで物体を認識し、オクルージョン処理を行うことが要求される。

謝辞

本研究は、株式会社アルモ設計との共同研究により実施された。謹んで感謝の意を表する。

【参考文献】

- 1) Gudrun, K., Didier, S., and Dirk, R., 2001, "Augmented reality for exterior construction applications", *Fundamentals of wearable computers and augmented reality*, 379-427.
- 2) Wang, X., Kim, M. J., Love, P. E., D., and Kang, S., C., 2013, "Augmented Reality in built environment: Classification and implications for future research", *In Automation in Construction*, 32, 1-13.
- 3) Mori, S., Ikeda, S., and Saito, H., 2017, "A survey of diminished reality: Techniques for visually concealing, eliminating, and seeing through real objects", *IPSI Transactions on Computer Vision and Applications*, 9, 1-17.
- 4) Inoue, K., Fukuda, T., Yabuki, N., Ali, M. and Michikawa, T., 2016, "Post-Demolition Landscape Assessment Using Photogrammetry-Based Diminished Reality (DR)", *Proceedings of the 16th International Construction Application of Virtual Reality*, 689-699.
- 5) Fukuda, T., Inoue, K., and Yabuki, N., 2017, "PhotoAR+DR2016 : Integrating Automatic Estimation of Green View Index and Augmented and Diminished Reality for Architectural Design Simulation", *Proceedings of the 35th eCAADe Conference*, 2, 495-502.
- 6) Moulon, P., Monasse, P., Perrot, R., and Marle, R., 2016, "OpenMVG: Open multiple view geometry", *International Workshop on Reproducible Research in Pattern Recognition*, 60-74.
- 7) Fraundorfer, F., and Scaramuzza, D., 2012, "Visual Odometry: Part II: Matching, Robustness, Optimization, and Applications", *IEEE Robot & Automation Magazine*, 19, 2, 78-90.

- *1 大阪大学 大学院工学研究科 環境・エネルギー工学専攻 博士前期課程
- *2 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)
- *3 大阪大学 大学院工学研究科 環境・エネルギー工学専攻 教授 Ph.D.
- *4 株式会社 アルモ設計 常務取締役
- *5 株式会社 アルモ設計 デジタルソリューション部 関西プロボウザルグループ/BIM グループ チーフ