

局所特微量による画像マッチング手法を用いた 建物維持管理のためのマーカレス AR システムの開発

○佐藤 佑亮*1 福田 知弘*2
矢吹 信喜*3 道川 隆士*4

キーワード：屋外型 AR 建物維持管理 Structure from Motion (SFM) 局所特微量 画像マッチング

1 はじめに

1.1 研究の背景

AR (Augmented Reality: 拡張現実感) は、ユーザが目に見えない情報を可視化する技術であり、肉眼で見ている視環境やビデオカメラでリアルタイム撮影した実写映像(以下、現実空間とする)に三次元仮想モデルを重畳させて実現する¹⁾。建築・建設分野において AR 利用が既に始まっている。

本研究では建造物が建つ屋外現場での AR 利用を想定する。建造物が建つ屋外現場での AR 利用は、計画・設計段階(新築、改築の検討など)、施工段階(施工シミュレーションなど)、維持管理段階(点検・修繕状況の把握、建物性能の可視化など)などで多様な応用が期待される。この利用シーンは、会議室での検討シーンに比べて三次元仮想モデル等の建物情報を現場で実物大で重畳させて確認できるため、より臨場感のある検討が可能になる²⁾。

AR の課題として、現実空間に三次元仮想モデルを如何に高い精度でマッチングするかという位置合わせの問題がある。本研究が対象とする屋外現場で AR を利用する場合、AR ユーザと三次元仮想モデルとの距離が大きくなる。位置合わせの基準は、GPS や 3D センサなどの物理センサを用いるセンサベース法³⁾ではセンサ位置となり、ビジョンベース法のひとつである人工マーカ法⁴⁾では人工マーカの位置となる。センサベース法では、位置合わせ基準が AR ユーザの近傍に置かれることになるため、センシング誤差が三次元仮想モデルの配置誤差に与える影響は大きくなってしまふ。また、人工マーカ法ではマーカのサイズを大きくすると三次元仮想モデルの近傍に置くことも可能になるが、マーカは AR カメラから見える必要があり、ユーザの可動範囲に限界がある。また巨大なマーカの設置方法も課題として残る。

一方、人工マーカを必要としないマーカレスな AR システムの開発が近年報告されている⁵⁾⁶⁾。Schubert ら⁷⁾は、対象建物の特徴となるパターンを用いて位置合わせを行った。しかしながら、多様な建造物が建つ屋外現場において高精度で連続的な位置合わせ手法は実現されていない。Yabuki ら⁸⁾は、点群データと現実空間の自然特徴点とを対応させる位置合わせ手法を開発した。しかし、位置合わせに利用した自然特徴点が常に AR カメラから見える必要が

あること、三次元レーザースキャナにより計測した点群を利用するために点群の取得に特殊な機材が必要であるといった課題が残る。他の点群取得手法として、複数視点から撮影した画像から三次元形状を復元する Structure from Motion (SFM) 法が期待されている。

1.2 研究の目的と開発するシステムの特徴

そこで本研究は、Structure From Motion (SFM) と局所特微量による画像マッチングを用いた位置合わせ手法を用いたマーカレス AR システムを開発することを目的とした。そして、開発したシステムを建造物の維持管理に応用することを検討した。

本研究で開発したシステムの特徴として、まず、ビジョンベースの位置合わせを行うため、実写映像と仮想モデルとの位置合わせのためにセンサ等の特殊な道具を必要としない。次に、人工マーカを必要としないため、AR 仮想カメラからマーカが常に見える必要がなく、ユーザの移動の自由度が高い。さらに、本システムで利用する点群データは SFM 法により作成するため、特殊な機材を利用することなく安価に屋外での AR を実現することが可能である。

2 システム開発

2.1 マーカレス AR システム

3D オブジェクトのスクリーンへの描画は一般に次式に基づいて行われる⁹⁾。

$$s \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f & 0 & c_x \\ 0 & f & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} (R_{3 \times 3} \quad T_{3 \times 1}) \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix}$$

ここで s は拡大・縮小係数、 u 、 v はスクリーン座標系でのオブジェクト描画位置である。 f はカメラの焦点距離、 c_x 、 c_y は画像の中心でカメラの内部パラメータと呼ばれる。 R はカメラの回転行列、 T はカメラの並進行列を表し、カメラの外部パラメータと呼ばれる。 X 、 Y 、 Z はワールド座標系でのオブジェクトの描画位置である。内部パラメータは、カメラキャリブレーションを行うことで求めることが可能で、レンズの倍率を変えない場合カメラに対して固有の値をとる。一方で、外部パラメータはカメラの位置・姿勢を表す行列であるため、各シーンに対して別の値をとる。すなわち、AR システムを開発するに当たり、外部パラメ

ータの算出が必要となる。マーカ AR システムの場合、カメラ画像中のマーカ位置を元に外部パラメータを算出するが、マーカレス AR システムの場合、人工マーカ等の明確な基準が存在しないため、別の算出方法が必要となる。そこで本研究では、SFM 法を用いて各シーンでのカメラの外部パラメータを算出し利用する。

2.2 システム概要

本研究で開発するシステムは、事前に行う前処理とリアルタイムで行う本処理の二つのプロセスで構成される。システムの概要を図 1 に示す。

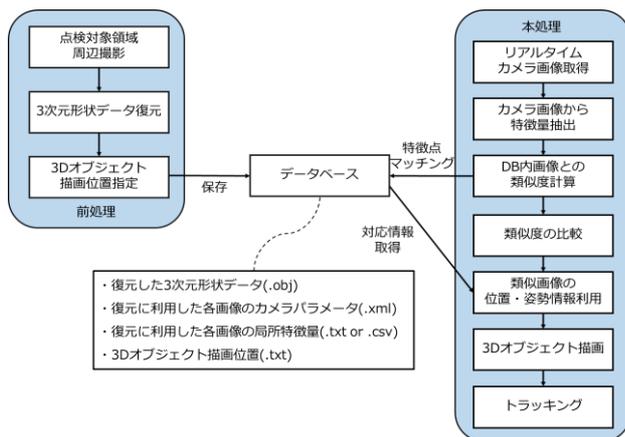


図 1 開発したマーカレスシステム概要図

前処理では、まず、SFM 法を用いて、対象となる既存建物の三次元形状モデルを復元する。SFM 法により、三次元形状モデルの復元と同時に、撮影した各視点でのカメラの位置・姿勢情報が取得できる。復元した三次元形状モデルと各視点でのカメラの位置・姿勢情報をデータベースに保存する。次に、AR により重畳する新たな三次元形状モデルの描画位置を SFM 法により復元した三次元形状モデルに対する相対座標で決定し、新たな三次元形状モデルとその描画位置をデータベースに保存する。最後に、SFM 法による三次元形状モデル復元に用いた画像群 (SFM 用画像データベース) から特徴点と特徴量を抽出しテキストファイルに出力する。各画像のファイルパスも同様に別のテキストファイルに出力する。特徴点及び特徴量抽出のために、本研究では局所特徴量の一つである Scale-Invariant Feature Transform (SIFT) を高速化した Speeded-up Robust Features (SURF) を利用した。

本処理では、まず、前処理で出力した二つのテキストファイルを入力する。次に、AR で表示するリアルタイムのカメラ画像 (以下、リアルタイムカメラ画像) から SURF 特徴量を抽出し、その全特徴量と、前処理で作成した SFM 法による三次元形状モデル復元に用いた各画像の特徴量をそれぞれ比較し、マッチする特徴量を有する画像に投票を行う。最も投票数の多い画像を類似画像として選定する。そして、AR に重畳する新たな 3D モデルを、その類似画像を撮影したカメラの位置・姿勢からの見え方で描画する。

新たな 3D モデルを重畳した後、AR カメラの移動・回転に伴う描画モデルの移動ベクトルを計算し、トラッキングを行う。

リアルタイム処理のために、計算をより高速化する必要がある。そのため、以下の三つの高速化の手法を取り入れて実装した。

- 1) リアルタイムカメラ画像と SFM 用画像データベース内画像との SURF 特徴量による比較を行う際、線形探索による全探索を行うと計算時間が膨大になる。よって、近似手法の一つである Locality Sensitive Hashing (LSH) 手法を用いた。
- 2) リアルタイムカメラ画像から SURF 特徴量を抽出する際、一つのスレッドで処理を行わず、複数のスレッドを用いて並列処理を行った。
- 3) リアルタイムカメラ画像と SFM 用画像データベース内画像との SURF 特徴量による比較を行う際、同一の位置・姿勢で撮影した画像であっても撮影時期が異なるために、空など時間や天候により変化する要素は画像マッチングする際のノイズとなる。そのため、リアルタイムカメラ画像中でこのような不要な部分を取り除いて画像マッチング処理を行う。本研究では建物等の構造物を検討対象としているため、対象構造物は画像中心部にあり、空などの不要な部分は画像の周辺にあると考えられる。そのため、カメラ画像のトリミングを行い、画像の中心部分を用いてマッチングを行う。

2.3 システムの実装

本研究では、複数のオープンソースのソフトウェア及びライブラリを利用し、プログラミング言語は C++ を用いて開発した。前処理では、SFM を実行するためにオープンソースのソフトウェアである OpenMVG (Open Multiple View Geometry. Ver. 0.7) を利用した。本処理では、リアルタイムカメラ画像の取得及びマッチングを行うために、オープンソースの画像処理ライブラリである OpenCV (Open Source Computer Vision Library. Ver. 2.4.9) を利用した。また、並列処理を行うために、オープンソースの並列処理用ライブラリである TBB (Threading Building Blocks. Ver. 4.4) を利用した。最後に、重畳するための 3D モデルを AR 描画するために、オープンソースのグラフィックス API である OpenGL (Open Graphics Library) によるプログラミングを構築するためのツールキット freeglut (Ver. 2.8.1) を用いた。

3 開発システムの検証

開発したマーカレス AR システムを建物維持管理に利用した際の有用性を検証するため、実存する建物を対象に実験を行う。対象は、大阪大学吹田キャンパスに位置する大阪大学総合研究棟 (M3 棟) とした。

3.1 実験概要

平成 27 年 10 月 8 日 15 時頃、M3 棟を対象に、タブレット PC を用いて AR の表示が可能か観察により評価した。

また、開発した AR システムが建物維持管理に有用であるか検討した。

建物維持管理段階での想定シーンとして、M3 棟の建築物環境性能評価制度 (CASBEE) による評価ラベルを AR 描画して、ユーザが建物性能を確認することとした。評価ラベルには、CASBEE の評価項目のうち、総合評価、CO2 削減、省エネ対策、みどり・ヒートアイランド対策の評価結果及び、大項目である環境品質、環境負荷低減性に関するレーダーチャートを記載した (図 2)。



図 2 描画用ラベル

以下に実験手順を示す。1)は事前準備、2)~5)は本番での実施事項である。実験風景を図 3 に示す。

- 1) SFM 法により M3 棟の三次元形状モデルを復元した。本研究では、デジタルカメラにより撮影した画像を利用して SFM を実行した。SFM には、M3 棟を対象に撮影した 100 枚の画像(解像度 900pixels×600pixels)を利用した。そして、復元した三次元形状モデルに対して CASBEE 評価ラベルの描画位置を指定した。AR システムの画面解像度は 900pixels×600pixels であった。図 4 に SFM 用に画像撮影したルートを、図 5 に SFM に利用した画像の例を、図 6 に SFM により復元した M3 棟の三次元形状モデルを、図 7 にラベル描画を行う正解領域を白色の四角形で示す。
- 2) タブレット PC を用いて、M3 棟のコンテンツを含むマーカレス AR システムを初期化した。
- 3) SFM に利用した画像を撮影したルート (図 4) 上の任意の地点でシステムを起動し、AR の表示が可能か確認した。
- 4) SFM に利用した画像を撮影したルート (図 4) の一部を歩いて移動し、トラッキングが可能か確認した。
- 5) 開発したマーカレス AR システムの、建造物維持管理シーンに対する有用性を評価した。



図 3 検証実験風景

3.2 実験結果及び評価

検証実験の結果、SFM に利用した画像を撮影したルート上で位置合わせが可能で、トラッキングも行えることを確認した。位置合わせを行った結果を図 8 に、視点変更後のトラッキング結果を図 9 に示す。

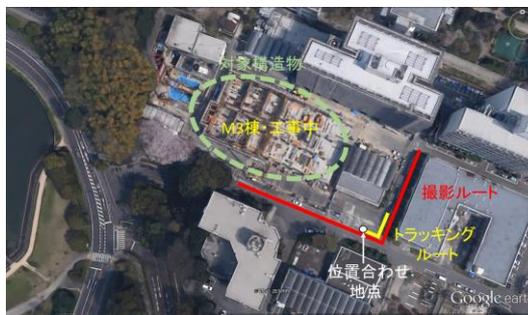


図 4 SFM 用画像撮影ルート



図 5 SFM に利用した画像例

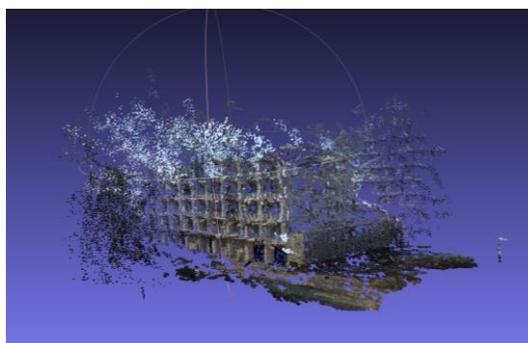


図 6 SFM により復元した三次元形状モデル



図 7 ラベル描画正解領域 (白色エリア)



図8 位置合わせ結果



図9 トラッキング結果

上記のように、開発したマーカレス AR システムは、位置合わせ及びトラッキングが可能であった。しかし、位置合わせにズレが生じており、4 頂点における本来位置からのズレの平均は水平方向で 19.8 pixels、垂直方向で 36.8 pixels であった。AR 画面全体に対するズレの割合は、それぞれ 2.2%、6.1%である。また、描画ラベルが折れ曲がったように描画された。

3.3 建物維持管理シーンの検討

今回行った検証実験では、SFM と画像マッチング手法により対象となる建造物を識別し、CASBEE 評価ラベルの AR 描画を行った。他に以下の維持管理シーンが考えられる。

- 1) 類似画像の選定による建造物の識別をトリガーとして、対象の過去の点検情報を取得するシステム。過去の点検情報の参照に加え、現在の点検情報の記述、保存を可能にすれば、構造物点検に要する時間を短縮することが可能である。
- 2) 経験の浅い点検実施者に点検手法を提示するシステム。事前に規定の点検マニュアルに従い、各点検場所での点検手法及び手順をデータベースに格納しておく。そして、点検実施時にデータベース内の情報を順に提示することで、経験の浅い点検実施者を支援することが可能である。

4 結論と今後の課題

本研究で得られた成果を以下に示す。

- 局所特徴量による画像マッチング手法を用いた位置合わせ及び SFM 技術を用いたマーカレス AR システムを実装した。
- 大阪大学吹田キャンパス M3 棟を対象に CASBEE 評価ラベルを AR 描画し、位置合わせ及びトラッキングが可能であることを確認した。

今後の課題として、3DCG モデルと実写映像との正確な前後関係の描画、位置合わせ精度の向上、トラッキング精度の向上が必要である。また、SFM に利用した画像の撮影ルート以外の視点場での AR システムの利用は困難であった。更なる検討が必要である。

【謝辞】

本研究の一部は JSPS 科研費 25350010 の助成を受けた。

【参考文献】

- 1) Milgram, P. and Kishino, F.: 1994, A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays. *IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems*, E77-D(12), 1321-1329.
- 2) Wither, J., DiVerdi, S., Hollerer, T.: 2009, Annotation in outdoor augmented reality, *Computers & Graphics* 33, 679-689.
- 3) Watanabe, S.: 2011, Simulating 3D Architecture and Urban Landscapes in Real Space, *CAADRIA2011*, 261-270.
- 4) Yabuki, N., Miyashita, K., Fukuda, T.: 2011, An invisible height evaluation system for building height regulation to preserve good landscapes using augmented reality, *Automation in Construction*, 20(3), 228-235.
- 5) Klein, G. and Murray, D.: 2007, Parallel Tracking and Mapping for Small AR Workspaces, *ISMAR '07 Proceedings of the 2007 6th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, 225-234.
- 6) Ventura, J., Hollerer, T.: 2012, Wide-area scene mapping for mobile visual tracking. In: *Proceedings of the IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, 3-12.
- 7) Schubert, G., et al.: 2015, Tangible Mixed Reality On-Site: Interactive Augmented Visualisations from Architectural Working Models in Urban Design, *Computer-Aided Architectural Design, Communications in Computer and Information Science* 527, 55-74.
- 8) Yabuki, N., Hamada, Y., Fukuda, T.: 2012, Development of an accurate registration technique for outdoor augmented reality using point cloud data, *14th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering*.
- 9) Z. Zhang: 2000, A flexible new technique for camera calibration, *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 22(11), 1330-1334.

- *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 工博
- *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 大阪大学 大学院工学研究科 環境・エネルギー工学専攻 特任助教 工博