魚眼カメラと3D-LIDARを用いた自由視点画像による See-Through Vision

See-Through Vision Using a Fish-Eye Camera and a 3D-LIDAR

大石 圭[†], 森 尚平[†], 正会員 斎藤 英雄[†]

Kei Oishi[†], Shohei Mori[†] and Hideo Saito[†]

あらまし 現実世界から実物体を消し去る隠消現実感 (Diminished Reality; DR) 技術は、見通しの悪い交差点における See-Through Vision など、さまざま応用例が考えられている。しかし、そこにはいくつかの課題が存在した。第一に隠背景を観測するカメラと、体験者のカメラの直接的なカメラの位置関係を取得することが困難であること。第二に、屋外において隠背景が平面で近似できる場面でしか応用できなかったことである。本稿では、魚眼カメラと 3D-LIDAR を組み合わせた、高画角の RGB-D カメラを用いて、両者のカメラの共通の視野を獲得することにより上記の問題解決を図る。また、屋外実験を通して、提案手法による See-Through Vision の実現可能性について議論する。

キーワード：隠消現実感，自由視点，魚眼カメラ，3D-LIDAR

1. ま え が き

現実世界に CG オブジェクトを重畳させる拡張現実感 (Augmented Reality; AR) とともに、現実世界から実物体を視覚的に消し去る隠消現実感 (Diminished Reality; DR) 技術の研究も盛んに行われてきた¹⁾。中でも、遮蔽物体とその背景（隠背景）を同時に可視化する透視映像生成手法は See-Through Vision²⁾³⁾ と呼ばれる。

その多くは、遮蔽物体の背後を観測できるカメラを設置し、その映像を体験者の視点に変換・重畳することで透視映像を生成する。しかし、See-Through Vision における背景画重畳方法には、いくつかの課題が存在する。第一に、隠背景観測用カメラと体験者用カメラの較正が挙げられる。両カメラ間には一般に共通の可視領域が存在しないため、直接的な対応関係を取得することが困難なのである。第二に、隠背景の平面近似が挙げられる。多くの手法が、位置合わせや視点変換処理を簡単化する目的で、背景を平面に近似している。こうした近似は、都市部での利用を想定していることに起因するが、応用範囲を限定する要因となる。

そこで、我々の提案する手法では、魚眼カメラと 3D-LIDAR を組み合わせた広視野 RGB-D 隠背景観測用カメラを用いて、上記 2 つの課題解決を図る。本稿では、これに関連した、以下の 2 つの課題解決について述べる。

- 魚眼・ピンホールカメラ間の特徴点対応付け

- 広視野 RGB-D カメラを用いた隠背景の再構成
最後に、屋外実験を通して、提案手法による See-Through Vision の実現可能性について議論する。

2. 関 連 研 究

Kameda²⁾ らは監視カメラを隠背景観測用カメラとして使用し、その映像を建物等に重畳させることによって建物によって生じる死角の可視化を行った。視点変換には可視化範囲が十分に距離が離れていると仮定することで射影変換が用いられている。この研究では CAD モデルを、隠背

図 1 従来手法と提案手法における座標系変換回数の比較。提案手法のみが、隠背景観測用カメラと体験者視点カメラ間で直接的な対応付けを行う。

2017 年 6 月 12 日受付，2017 年 8 月 25 日再受付，2017 年 10 月 17 日採録
[†]慶應義塾大学

(〒 223-8522 横浜市港北区日吉 3-14-1, TEL 045-566-1454)

図 2 魚眼カメラと 3D-LIDAR を組み合わせた RGB-D カメラ

図 3 魚眼カメラとユーザカメラの画像間の特徴点マッチング結果

景や、隠背景観測用カメラと体験者視点用カメラの位置姿勢推定に利用しているが、その生成には時間を要するため任意の環境において現実的ではない。Barnum³⁾らは隠背景観測用カメラと体験者視点用カメラの視野を観測できるカメラを使用することで、2つのカメラ間の位置姿勢を推定し、透視映像の生成を行った。この研究でも視点変換には射影変換が用いられている。Tsuda⁴⁾らはARマーカーを用いることで、カメラの位置姿勢推定を行っている。またこの研究では、あらかじめ取得している建物の3DCGモデルを、体験者の視点でレンダリングすることにより透視映像を生成している。

一方、提案手法では、3D-LIDARと魚眼カメラを組み合わせた隠背景観測用カメラを用いることで、隠背景観測用カメラと体験者視点カメラの共通視野を獲得し、両カメラ間の直接的な対応付けを可能にするとともに、3D-LIDARで得られる奥行情報を用いることで、3次元的な隠背景の再構成を行う。従来手法と提案手法の座標系変換回数を示した模式図を、図1に示す。

3. 提案手法

提案手法では、図2に示す隠背景観測用カメラ（魚眼カメラ+3D-LIDAR）と体験者視点カメラのみを用いて透視映像を生成する。この際、問題となる、両カメラ間の対応付け方法と隠背景を自由視点画像として再構成する方法について、それぞれ3.1節、3.2節にて述べる。

3.1 体験者視点用カメラの位置姿勢推定

体験者視点用カメラの位置姿勢を、隠背景観測用カメラとの特徴点マッチングと、3.2節にて述べる3D-LIDARを使って生成される3次元メッシュ上の3次元位置により計算する。しかし、提案手法では、隠背景観測用カメラに魚眼カメラを用いているため、体験者カメラとの歪みの差が大きく、そのままでは、特徴点の対応をとることは困難である。そこで、提案手法では、魚眼カメラの画像から、体験者視点用カメラと同様の内部パラメータを持つ仮想的なピンホールカメラの画像をレンダリングし、その画像の特

徴点と対応をとることで特徴点マッチングを実現する。その際、体験者視点用カメラに対し隠背景観測用カメラは魚眼カメラであるためその観測範囲が広域であり、体験者視点用カメラの観測範囲を魚眼カメラの観測範囲内で特定できないため、ピンホールカメラモデルに基づいた画像を体験者視点の視点位置及び方向をある程度推定し複数レンダリングすることで対応する。

理想的な魚眼カメラは、画面の中心からの距離と角度が比例する等距離射影が用いられるが、実際の魚眼カメラは理想的な射影方式に従わない。そこで、我々はScaramuzza⁵⁾の提案する魚眼カメラモデルを用いて、魚眼カメラの内部パラメータを推定する。内部パラメータの推定された魚眼カメラでは、各画素に相当する光線を計算することができ、その光線情報から仮想的なカメラのレンダリングを行う。仮想的なカメラ C_v を魚眼カメラ C_f の原点位置に配置すると、そのカメラの各画素 $\mathbf{p}_v$ は、魚眼カメラの各画素の光線情報 $\mathbf{p}_f = (X_f, Y_f, Z_f)^T$ を用いて、以下の式のように表される。

$$\mathbf{p}_v \approx \mathbf{A}\mathbf{R}\mathbf{p}_f \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{A}$ は仮想カメラの内部パラメータ、 $\mathbf{R}$ は魚眼カメラの原点を中心とした回転行列である。

レンダリングした画像から得られる特徴点と、体験者視点用カメラの特徴点でマッチングを取り、対応した点の3次元位置から、PnP問題を解くことで体験者視点用カメラの位置姿勢を推定する。このときRANSACを用いることで、外れ値の除去を行う。提案手法によるマッチング実行結果の一例を図3に示す。

3.2 透視映像の生成

3D-LIDARから得られる3次元点群は疎であるために、体験者視点の隠背景もまた疎になってしまう。また、魚眼カメラの映像は歪みが大きく、そのままではピンホールカメラ画像に合わせた射影変換による視点変換は難しい。そこで、得られた点群から三角メッシュを構成し、三角メッシュに魚眼カメラの画像をテクスチャマッピングする。こ

表 1 使用デバイスとその性能

デバイス	製品名と性能
3D-LIDAR (隠背景観測用カメラ)	HOKUYO 社製 YVT-X002 最大 10360 点, 走査範囲 ($210^{\circ} \times 40^{\circ}$)
魚眼カメラ (隠背景観測用カメラ)	Kodak 社製 PIXPRO SP360 4K 解像度 (1440×1440), 画角 ($235^{\circ} \times 235^{\circ}$)
USB カメラ (体験者視点用カメラ)	Logicool 社製 C905 解像度 (640×480), 画角 ($61^{\circ} \times 46^{\circ}$)

図 4 カメラ配置

のテクスチャ付き 3 次元メッシュを体験者視点の画像に投影することで、広範囲かつ歪みのない体験者視点の隠背景をレンダリングする。三角形の辺の長さが、ある定数以上、もしくは、3D-LIDAR から三角形の重心位置までの距離の乗算によって定まる閾値より大きい場合、三角メッシュを構成しないことで、過度に歪んだ三角メッシュを排除する。

4. 実験

提案手法を利用して、実際に透視映像を生成できるか確認した。また、以下の 2 つを屋外シーンにて遂行し、性能評価実験を行った。

- 実時間性：実時間透視映像生成
- 安定性：透視映像生成成功率の計測

4.1 実験用セットアップ

使用したカメラと 3D-LIDAR を表 4 にまとめる。OS は Windows10, CPU は Intel(R) Core(TM) i7-5820K CPU 3.30GHz, GPU は NVIDIA GeForce GTX 960 を用いた。今回、特徴点検出・マッチングアルゴリズムとして、GPU を用いて実装された SURF⁶⁾ を用いた。

4.2 実時間性の評価

図 4 に示すように、建物の背後に隠背景観測用カメラを設置し、建物を通してその背後を見通すように体験者視点カメラによって建物を撮影した。既存の See-Through Vision²⁾³⁾ では、原理的に透視映像を生成が困難なシーンとして、隠背景に植木といった立体的な物体を含むシーンを選択した。また、動的な隠背景とするため、See-Through Vision 実行中に、隠背景中で人が動き回るようにした。提案手法による See-Through Vision の実行結果を図 6 に示す。この結果より、立体的かつ動的なシーンの透視映像を生成できていることが分かる。

実験では異なる向きに設置した仮想視点を 4 つ分レンダ

図 5 透視映像生成の成功率計測結果

リングした。この際の、全体のフレームレートは 1.76fps であった。ビデオレート (30fps) には遠いが、カメラの動きにインタラクティブに追従する程度であった。最も時間のかかった処理は、体験者視点用カメラの位置姿勢推定処理で、全体の約 80% であった。またその内訳は、仮想カメラのレンダリングに約 52% (1 枚あたり約 13%) マッチングに 18% (1 枚あたり約 5%) PnP 問題に約 10% であった。レンダリングで最も処理時間を要しているが、レンダリングは CPU のみを用いて計算しているため、GPU を用いた処理の並列化によって今後改善できると考える。

4.3 安定性の評価

提案手法では、隠背景観測用カメラの情報を利用して仮想的にピンホールカメラモデルに基づいた視点をレンダリングするため、隠背景観測用カメラから距離が離れるに従って、透視映像生成の成功率が下がると考えた。そこで、カメラの相対位置を系統的に変化させて提案手法を実行し、各点での透視映像生成率を計測した。透視映像生成率は、See-Through Vision 実行中の 10 秒間で隠背景が正しく推定されたフレームの全体での割合、と定義した。このとき、提案手法では RANSAC と最小二乗法を用いて体験者視点用カメラの位置姿勢を推定するため、見た目的には位置推定ができていなくても、マッチング点の再投影誤差は小さくなってしまったといった問題が生じ、マッチング点の再投影誤差を用いた評価は難しくなる。また、魚眼カメラと体験者視点の正確な位置姿勢を取得することは困難であるため、マッチング点とは異なる他の 3 次元点を用いた再投影誤差を用いた評価もまた難しくなる。そこで壁が透視できたと判断されたフレームを目視によって確認し、そのとき隠背景を推定されたと判断した。

実験では、隠背景観測用カメラから、横方向に 1m、後方に 2m 離れた 2m^2 の空間の 0.5m 間隔で敷いたグリッド上

図 6 提案手法による See-Through Vision の結果. 透視した先で、人が歩いている。

の各点で、透視映像生成率を計測した。この際、体験者視点の映像が 50%以上遮蔽物によって遮られるよう体験者視点用カメラを配置した。図 5 にその結果を示す。円内に示す数字がその位置での正しく位置姿勢が推定された割合である。図 5 から、予想通り、隠背景観測用カメラからの距離によって、安定性が落ちることがわかった。

遮蔽物体の近辺で極端に安定性が低いのは、今回植木付近でマッチングが行われることが多かったことから、遮蔽物によってマッチングのとれる特徴点が遮られてしまったからだと考えられる。体験者視点カメラの位置姿勢には、2つのカメラの共通の可視領域を用いているが、その中でも、3D-LIDAR で観測している領域のマッチングにより位置姿勢の推定を行っている。今後 3D-LIDAR の技術が向上し、その取得点群、走査範囲が広がれば、本手法でさらなる安定性の向上が見込まれる。

5. む す び

提案手法では、隠背景観測用カメラ（魚眼カメラ+3D-LIDAR）と体験者視点用カメラの共通の可視視野領域における特徴点マッチングから、体験者視点カメラの位置姿勢の推定を行うことで、従来までの手法とは異なり、直接的な対応関係を取得することが可能となった。屋外実験を行うことで、3D-LIDAR を用いた隠背景の自由視点画像への再構成が、その応用範囲を拡大させていることを確認した。また、実時間性、安定性を検証する実験も行い、その性能を評価をした。

謝辞 本研究の一部は、学振・特別研究員奨励費（課題番号 16J05114）を受けたものである。

〔文 献〕

- 1) 森尚平, 一刈良介, 柴田史久, 木村朝子, 田村秀行: “隠消現実感の技術的枠組と諸問題～現実世界に実在する物体を視覚的に隠蔽・消去・透視する技術について～”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, **16**, 2, pp. 239–250, (2011)
- 2) Y. Kameda, T. Takemasa, and Y. Ohota: “Outdoor Seethrough Vision Utilizing Surveillance Cameras,” Proc. Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality (ISMAR), pp.151–160, (2004)
- 3) P. Barnum, Y. Sheikh, A. Datta, and T. Kanade: “Dynamic Seethroughs: Synthesizing Hidden Views of Moving Objects,” Proc. Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality (ISMAR), pp.111–114, (2009)
- 4) T. Tsuda, H. Yamamoto, and Y. Kameda: “Visualization Methods for Outdoor See-Through Vision,” IEICE Trans. on Information

and Systems, **89**, 6, pp.1781–1789, (2006)

- 5) D. Scaramuzza, A. Martinelli, and R. Siegwart: “A Toolbox for Easy Calibrating Omnidirectional Cameras,” Proc. Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp.5695–5701, (2006)
- 6) H. Bay, A. Ess, T. Tuytelaars, and L. Van Gool: “Speeded-up Robust Features (SURF),” Computer Vision and Image Understanding, **110**, 3, pp.346–359, (2008)

おおいし 圭 2017 年、慶應義塾大学理工学部情報工学科卒業。現在、同大学院理工学研究科前期博士課程に在学中。コンピュータビジョンやその隠消現実感への応用に関する研究に従事。

もり 尚平 2016 年、立命館大学大学院情報理工学研究科博士後期課程修了。同年 4 月より、慶應義塾大学理工学部訪問研究員（学振・特別研究員 PD）。主に、複合現実感及び隠消現実感の研究に従事。博士（工学）。

さいとう ひでお 斎藤 英雄 1987 年慶應義塾大学理工学部電気工学科卒。1992 年同大学院理工学研究科電気工学専攻博士課程修了。その後、同大学助手、専任講師、助教授を経て 2006 年より教授。博士（工学）。この間、1997 年から 99 年までカーネギーメロン大学ロボティクス研究所訪問研究員。コンピュータビジョンとその応用に関する研究に従事。電子情報通信学会フェロー、日本 VR 学会フェロー、IEEE、情報処理学会シニア会員。