



単一レンズ型同軸広角プロジェクタ-カメラシステムによる動的プロジェクションマッピングの基礎検討

Dynamic Projection Mapping with a Single Lens Coaxial Wide-Angle Projector-Camera System

山本健太¹⁾, 岩井大輔¹⁾, 佐藤宏介¹⁾

Kenta YAMAMOTO, Daisuke IWAI, and Kosuke SATO

1) 大阪大学 大学院基礎工学研究科 (〒 560-8531 大阪府豊中市待兼山町 1-3, yamamoto@sens.sys.es.osaka-u.ac.jp, {daisuke.iwai, sato}@sys.es.osaka-u.ac.jp))

概要: 広角投影 - 撮像により, 対象の移動範囲を拡張した動的プロジェクションマッピングが可能となる. 広角プロジェクタ-カメラシステムにおいて, 従来のキャリブレーションでは投影像の幾何学的位置合わせに必要な正確な画素対応の取得が困難である. 本研究では, 投影面と撮像面を光学的に一致させ画素対応が一意となる同軸プロジェクタ-カメラシステムに, 単一の魚眼レンズを組み合わせた広角のシステムを提案する.

キーワード: 動的プロジェクションマッピング, プロジェクタ-カメラシステム, 投影型複合現実感

1. はじめに

投影型複合現実感技術 (プロジェクションマッピング) は, プロジェクタを用いて実物体に映像を投影し, 実物体の見かけの性質を変化させることが可能である [1]. 特に近年では, プロジェクションマッピングの表現の幅が広がり, ユーザの没入感を高めることができると期待され, 動く物体への投影である動的プロジェクションマッピング (Dynamic Projection Mapping: DPM) が注目されている [2][3].

動的な物体に映像を幾何学的に位置合わせするためには, プロジェクタに対する対象の位置姿勢を逐次推定し投影画像を幾何補正する必要がある. そこで DPM では, プロジェクタ-カメラ (Projector-Camera: ProCam) システム [4] が用いられる. ProCam システムを用いた投影では, カメラに対する投影対象の 6 自由度の位置姿勢情報から対象上の各点とプロジェクタ画素との対応を求める [5]. しかし, 較正儀を設置した空間以外では較正誤差が大きくなり, 投影像の位置ずれが生じる.

Fufu らは ProCam システムにハーフミラーを組み合わせて, プロジェクタとカメラの光軸を同軸にし, プロジェクタ投影像とカメラ撮像像の画素対応が対象の位置に関わらず一意となる同軸系を提案した [6]. しかし, プロジェクタとカメラの光軸の位置を正確に定めることは困難であるため, 光軸の位置合わせには高度な技術が必要となる [7]. 光軸が完全に一致しなければ画素対応にずれが生じ, 投影像に位置ずれが起こる.

これらの問題を解決するために, プロジェクタとカメラが単一のレンズを共有し, 光軸が完全に一致した ProCam システムが提案されている. レンズ共有型の ProCam システムにおけるプロジェクタ投影像とカメラ撮像像の画素対

応は, 原理上対象の位置に依存せず一意となる. 著者らは, 撮像面と画像表示面が一体化されたデバイスとレンズを組み合わせて, 画素一致 ProCam システムを実装した [8]. しかしながら, 構築したプロトタイプは画像表示面の発光強度が従来のプロジェクタと比較して低く, 投影像を目視で観測することが困難であった. Pyo らは, CCD センサ, LCD ディスプレイとビームスプリッタを組み合わせて, レンズ共有型 ProCam システムを実装した [9]. このシステムは, LCD ディスプレイとレンズ間にビームスプリッタ分の光路長を必要とするため, 焦点距離の短いレンズが使用困難である. このため投影像の大きさが従来のプロジェクタと比較して小さく, 対象が広範囲に移動する DPM への利用が困難である.

そこで本研究では, リレーレンズ系とビームスプリッタを用いてプロジェクタ投影面とカメラ撮像面を光学的に同一平面上に配置し, 単一レンズ型同軸 ProCam システムを構築する. プロジェクタとカメラが共有する単一のレンズには, 広角に投影 - 撮像可能な魚眼レンズを使用する. プロジェクタとカメラが別々のレンズを有する一般的な同軸系で魚眼レンズを使用する場合, 投影, 撮像範囲がハーフミラーあるいはビームスプリッタ内に収まらない. このため一般的な同軸系では, 魚眼レンズの使用が困難である. 一方で本提案システムは, プロジェクタとカメラが単一のレンズを共有し, リレーレンズ系によりプロジェクタ投影面とカメラ撮像面を他の位置に配置可能であることから, 焦点距離の短い魚眼レンズを使用可能である. 本稿では, 単一レンズ型同軸広角 ProCam システムの, DPM での利用可能性を検証する.

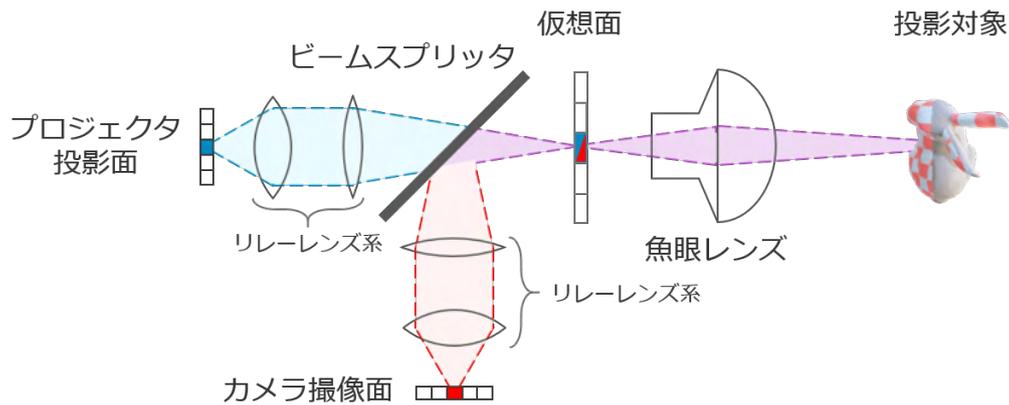


図 1: 単一レンズ型同軸広角 ProCam システムの構成

表 1: 計測したプロジェクタとカメラの画角（理論値）

画角	プロジェクタ	カメラ
水平	約 94 °(99 °)	約 120 °(125 °)
垂直	約 66 °(70 °)	約 100 °(115 °)

2. 提案手法

本研究では、リレーレンズ系と魚眼レンズを用いた、単一レンズ型同軸広角 ProCam システムを提案する。提案システムの構成を、図 1に示す。投影面と撮像面の前部に、それぞれリレーレンズ系を配置する。リレーレンズ系を用いた拡大倍率は、2枚のレンズの焦点距離の比となる。対物レンズの焦点距離の位置に投影面、撮像面を配置することで、結像レンズの焦点距離の位置に投影面、撮像面の光情報を転送できる。このためリレーレンズ系とビームスプリッタを組み合わせることで、投影面、撮像面を光学的に同一平面上に配置できる。さらに魚眼レンズを組み合わせることで、プロジェクタとカメラの光軸が完全に一致した単一レンズ型同軸広角 ProCam システムが構築できる。光軸が完全に一致していることから、プロジェクタ投影面とカメラ撮像面の画素対応は対象の位置に依存せず完全に一意となる。魚眼レンズを使用することで投影、撮像範囲を拡張でき、投影対象の移動範囲を拡張できる。またプロジェクタとカメラが単一のレンズを共有しているため、カメラの較正を行うことでプロジェクタとカメラ両方の内部パラメータを計測できる。

3. システム実装

レンズを取り外したプロジェクタ（Acer C200, 画素数：854 × 480 px, DMD サイズ：5 mm × 3 mm）、カメラ（Ximea MQ013MG-ON, 画素数：1264 × 1016 px, CMOS センササイズ：6.2 mm × 5 mm）、魚眼レンズ（Canon F4L Fisheye USM, 焦点距離：8 mm）を用いて作成した、単一レンズ型同軸広角 ProCam システムを図 2に示す。プロ

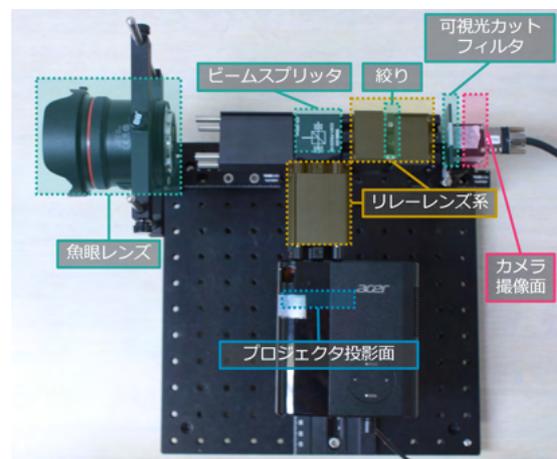


図 2: 実装した単一レンズ型同軸広角 ProCam システム

ジェクタ投影面前部のリレーレンズ系は、焦点距離 40 mm の対物レンズ（THORLABS, AC254-040-A）と焦点距離 150 mm の結像レンズ（THORLABS, AC254-150-A）を使用した。プロジェクタ投影面の、拡大倍率は 3.75 倍、大きさは約 18.75 mm × 11.25 mm となった。カメラ撮像面前部のリレーレンズ系は、焦点距離 30 mm の対物レンズ（THORLABS, AC254-030-A）と焦点距離 150 mm の結像レンズ（THORLABS, AC254-150-A）を使用した。カメラ撮像面の、拡大倍率は 5 倍、大きさは約 31 mm × 25 mm となった。プロジェクタとカメラの水平、垂直画角の計測結果を表 1に示す（カッコ内は理論値）。プロジェクタ投影面とカメラ撮像面を光学的に同一平面上に配置するために、偏光ビームスプリッタ（THORLABS, CCM1-PBS251/M）を使用した。プロジェクタとカメラを一台の PC（DELL G3 3590, CPU：Intel Core i7-9750H 2.6 GHz, メモリ：16 GB）で制御した。

本研究で提案する ProCam システムは、プロジェクタ投影光が魚眼レンズに反射しカメラ撮像面に入射することで、投影光と撮影光のクロストークが生じた。プロジェクタ投影光の発光強度は高く、カメラの露光時間を調整しても、カメラ撮像面が外界の光情報を取得することが困難であった。

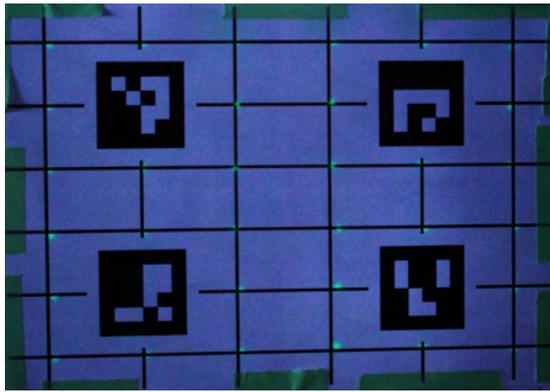


図 3: ボードへの投影結果 (レンズから 600 mm の位置)

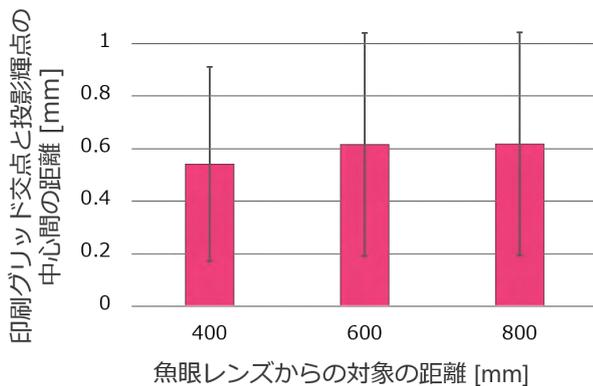


図 4: 魚眼レンズからの対象の距離と、印刷グリッド交点と投影輝点の中心間の距離の関係 (バーは標準偏差)

そこで本研究では、カメラ撮像面の前部に可視光カットフィルタを配置して、対象に赤外光を照射し赤外画像を使用して投影対象の位置姿勢推定を行った。

実装した ProCam システムにおける、プロジェクタ投影像とカメラ撮影像の画素対応をグレイコード投影により求めた。グレイコード投影の際は、カメラ撮像面前部の可視光カットフィルタを取り外し、絞りとプロジェクタ投影光の輝度を調節した。そして、リレーレンズ系によりプロジェクタ投影面とカメラ撮像面が光学的に同一平面となる位置に白色板を配置してグレイコード投影を行った。求めた画素対応より、カメラ撮像面からプロジェクタ投影面へ射影変換するホモグラフィ行列を算出した。算出したホモグラフィ行列の再投影誤差は、3.78 px であった。本研究の以降の実験では、このホモグラフィ行列を用いて、カメラ撮影像から得た投影対象の位置姿勢情報を基に生成した画像を幾何変換し、プロジェクタ投影像とした。また、魚眼レンズは収差が大きく投影結果、撮影画像に歪みが生じる。そこで校正により求めた内部パラメータを用いて、投影画像に歪み逆補正処理、撮影画像に歪み補正処理を施した。

4. システム評価実験

図 2 に示す、本研究で実装した単一レンズ型同軸広角 ProCam システムにおいて、実装システムからの投影対象の距

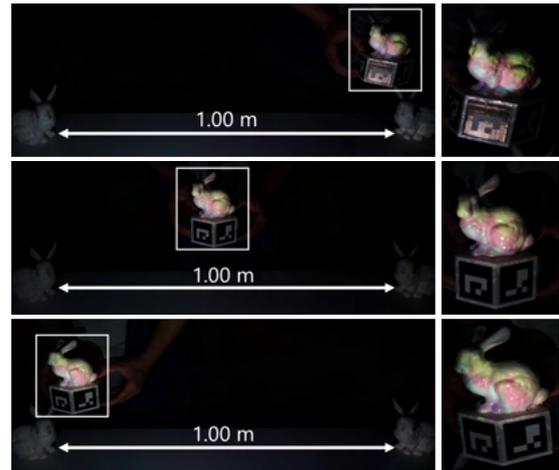


図 5: 動的物体への投影結果 (レンズから 600 mm の位置で、ProCam システムに対して右から左に移動、右列は対象を拡大した図)

離による、投影像の幾何学的位置合わせ精度評価を目的とした実験を行った。

4.1 手法

4 個の AR マーカ (45 mm × 45 mm) とグリッドを印刷した紙を平面上に張り付けたボードを、光軸に対して垂直に配置した。ボードの AR マーカを、実装した ProCam システムで撮影し、AR マーカから検出した位置情報を基に、ボード上の各印刷グリッド交点に対して輝点を投影した。投影結果は、外部カメラを用いて撮影した (図 3)。この撮影を、魚眼レンズからの距離が 400, 600, 800 mm の計 3 箇所ボードを配置して行った。投影結果の撮影を各ボード位置で 3 回ずつ行い、印刷グリッド交点と投影輝点の中心間の距離を求めた。

4.2 結果

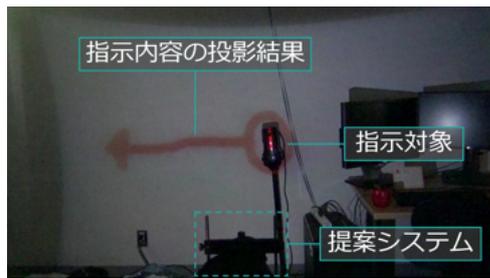
実験結果を図 4 に示す。同図は、32 個の印刷グリッド交点と各投影輝点の中心間の距離を、ボードの配置距離ごとに求めた結果である。これより対象の位置が 400 mm から 800 mm の範囲における、推定結果からの投影像の位置ずれ平均は、いずれも 0.62 mm 以内であった。この結果から、本研究の提案する単一レンズ型同軸広角 ProCam システムは、プロジェクタ投影像とカメラ撮影像の画素対応が対象の位置に依存せず一意であることを確認した。

5. アプリケーション

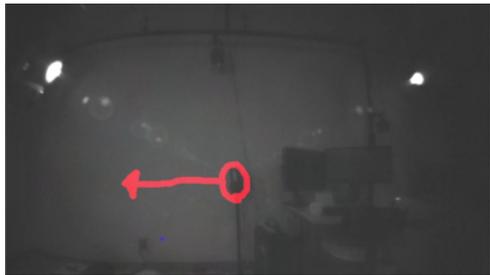
プロジェクタ投影像とカメラ撮影像の画素対応が対象の位置に依存せず一意であり、広角に投影・撮影可能である単一レンズ型同軸広角 ProCam システムの性質を活かし、動的物体への投影と遠隔指示システムのアプリケーションを実装した。

5.1 動的物体への投影

動的な物体へ投影を行うアプリケーションを実装した。投影対象は、正六角柱と、その上に配置したバニーからなる。正六角柱の各側面に AR マーカを張り付けることで、立体物



(a) 投影結果



(b) ディスプレイ上で指示内容を書き込む様子

図 6: 壁に立て掛けられている掃除機を提案システムに対して左側に移動させる指示を提示した結果

が回転した場合でもマーカを認識できる構造とした。投影対象の AR マーカ 1 個の大きさは、45 mm × 45 mm とした。また、バニーの外接直方体の大きさは、縦 74 mm × 横 93 mm × 高さ 92 mm とした。投影の流れとしては、まず赤外画像に歪み補正処理を施して AR マーカを認識し、投影対象の位置姿勢推定を行った。そして、推定結果と 3 章で述べたホモグラフィ行列から作成した画像に歪み逆補正処理を施して投影画像を作成し、投影した。投影結果は、外部カメラを用いて撮影した。図 5 は、レンズから 600 mm の位置で、実装した ProCam システムに対して右から左に移動するバニーへの投影結果である。対象の移動範囲は、ProCam システムに対して水平方向の向きに 1.00 m であった。この結果から、本研究の提案する単一レンズ型同軸広角 ProCam システムを用いて、広角に動く物体への投影が可能であることを確認した。

5.2 遠隔指示システム

実装した ProCam システムで撮影した画像を遠隔地に送信し、遠隔地にて指示内容を描画し、その指示内容を実環境に投影提示するアプリケーションを実装した。図 6(a) は、魚眼レンズから壁までの距離が 2.00 m の時に、実装したアプリケーションを用いて遠隔指示を行った様子である。図 6(b) は、遠隔地で指示を出す際の操作画面である。これらの結果から、本研究の提案する単一レンズ型同軸広角 ProCam システムを用いて、遠隔地にいる人の指示内容を正確に実環境に提示可能であることを確認した。

6. おわりに

本研究では、DPM を行う上で位置ずれのない投影を実現するために、プロジェクタとカメラが同一の魚眼レンズ

を共有する、単一レンズ型同軸広角 ProCam システムを提案した。実験から、提案システムにおけるプロジェクタ投影像とカメラ撮像像の画素対応が一意であることを確認し、実装したアプリケーションから提案システムの有効性を示した。今後、複数台のプロジェクタを連結させ、広角投影による投影像の低輝度問題の改善に取り組む。

参考文献

- [1] Raskar, Ramesh and Welch, Greg and Low, Kok-Lim and Bandyopadhyay, Deepak : Shader lamps: Animating real objects with image-based illumination, *Rendering Techniques 2001*, pp. 89–102, 2001.
- [2] Miyashita, Leo and Watanabe, Yoshihiro and Ishikawa, Masatoshi : Midas projection: Markerless and modelless dynamic projection mapping for material representation, *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, Vol. 37, No. 6, pp. 1–12, 2018.
- [3] Bermano, Amit H and Billeter, Markus and Iwai, Daisuke and Grundhöfer, Anselm : Makeup lamps: Live augmentation of human faces via projection, *Computer Graphics Forum*, Vol. 36, No. 2, pp. 311–323, 2017.
- [4] Grundhöfer, Anselm and Iwai, Daisuke : Recent advances in projection mapping algorithms, hardware and applications, *Computer Graphics Forum*, Vol. 37, No. 2, pp. 653–675, 2018.
- [5] Audet, Samuel and Okutomi, Masatoshi : A user-friendly method to geometrically calibrate projector-camera systems, *2009 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*, pp. 47–54, 2009.
- [6] Fujii, Kensaku and Grossberg, Michael D and Nayar, Shree K : A projector-camera system with real-time photometric adaptation for dynamic environments, *2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05)*, Vol. 1, pp. 814–821, 2005.
- [7] Amano, Toshiyuki : Projection center calibration for a co-located projector camera system, *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*, pp. 443–448, 2014.
- [8] 山本健太, 岩井大輔, 佐藤宏介 : 画素一致プロジェクタカメラシステムによる動的プロジェクションマッピング, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol. 26, No. 1, pp. 107–116, 2021.
- [9] Pyo, Seyoung and Shim, Jaewon and Lee, Geehyuk : iProCam: a lens-sharing projector-camera system for augmented reality applications, *CHI'07 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, pp. 2615–2620, 2007.