



複数の ProCam ユニットを用いた 室内広域投影システムにおける自動校正の検討

A Study of Automatic Calibration for Indoor Wide-Area Projection System using Multiple ProCam Units

羽田理恵, 橋本直己

Rie HANEDA, Naoki HASHIMOTO

電気通信大学 大学院情報理工学研究科 情報学専攻

(〒 182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1, {haneda, naoki}@hashimoto.lab.uec.ac.jp)

概要: 広域な空間への映像演出に用いられるマルチプロジェクション技術は、投影空間の計測や投影面による投影映像の歪み補正を行う必要がある。これらのマルチプロジェクションを実現するための校正作業には、時間と労力を要する。そこで本研究では、形状が未知な室内空間において、プロジェクタとカメラを校正済みの一体化した ProCam ユニットとして使用するマルチプロジェクションの自動校正手法について検討する。さらに、レンダリング速度向上を目指し、平面主体の室内空間に特化した計測とレンダリング手法についても検討する。

キーワード: マルチプロジェクション, 幾何補正, 三次元復元, ProCam ユニット

1. はじめに

近年、マルチプロジェクション技術は、高い表現力の空間演出として、商業施設や娯楽施設などでエンターテインメントや広告として利用されている。マルチプロジェクションを行う場合、投影面の形状による投影映像の歪みや、投影の重複領域での投影映像のずれが生じないように校正する必要がある。そのため、投影空間の形状を高精度に計測する必要があり、機材の校正作業も含めて時間と労力を要し、多様な環境で利用していく際の大きな足枷となっている。

ホモグラフィ変換を用いた平面形状に対するマルチプロジェクションに関する研究は多くあり、Park ら [1] らは、複数平面で構築された投影面に対して、特殊な計測コードとホモグラフィ変換を用いてマルチプロジェクションを構築している。しかし、ホモグラフィ変換を用いたマルチプロジェクションは、投影面に対して法線方向に正しい歪み補正を行っているため、CAVE などの視点位置に対する歪み補正を行う投影空間を構築することは難しい。Raskar ら [2] らは、プロジェクタ 1 台に 1 セットのステレオカメラを用いることで投影空間の形状を高精度に計測し、投影面の形状に基づいて幾何補正を行うマルチプロジェクションを提案している。しかし、計測環境に合わせて設置されるステレオカメラの校正には、物理的な校正儀が必要であり、プロジェクタの校正には立体面が必要であり、校正作業は容易ではない。RoomAlive[3] では、複数台のプロジェクタと深度カメラで構成された ProCam ユニットによって、室内空間の形状に合わせた校正作業を自動化したマルチプロジェクションを実現している。しかし、3 次元計測に用いられている深度カメラは、一般的に解像度が低く、十分な精度の計測が行

えるとは言い難い。また、プロジェクタの校正には、平面以外を投影する必要があるため、ProCam ユニットの投影を平面以外に移動させる工夫が必要になる。Tehrani ら [4] は、校正済みのカメラを用いて、ステレオカメラペアを SfM 法で校正することで自動化されたマルチプロジェクションを実現している。しかし、SfM 法を利用するには、投影面の形状が平面以外である制約があり、室内空間での適用は困難である。

そこで本研究では、プロジェクタとカメラを校正済みの一体化されたユニット (ProCam ユニット) とすることで、形状が未知な室内空間において、人手を介さずに自動的にマルチプロジェクションを構築する手法を提案する。

2. 提案手法

本研究では、形状が未知な室内空間において、プロジェクタとカメラを校正済みの一体化されたユニット (ProCam ユニット) として用いることにより、マルチプロジェクションにおける校正作業の自動化を実現する。ProCam を校正済みのユニットとすることで、設置後に必要となっていたステレオカメラの校正作業 [2] や平面では次元の縮退によって自動化できないプロジェクタの校正作業 [3, 4] を省き、室内空間での投影を可能にする。また、平面推定を導入し、レンダリング速度向上と投影精度の低下を両立した投影を目指す。

2.1 提案概要

提案システムの概要を図 1 に示す。事前校正された ProCam ユニットの複数台を用いてマルチプロジェクション投影までの校正作業を自動化する。

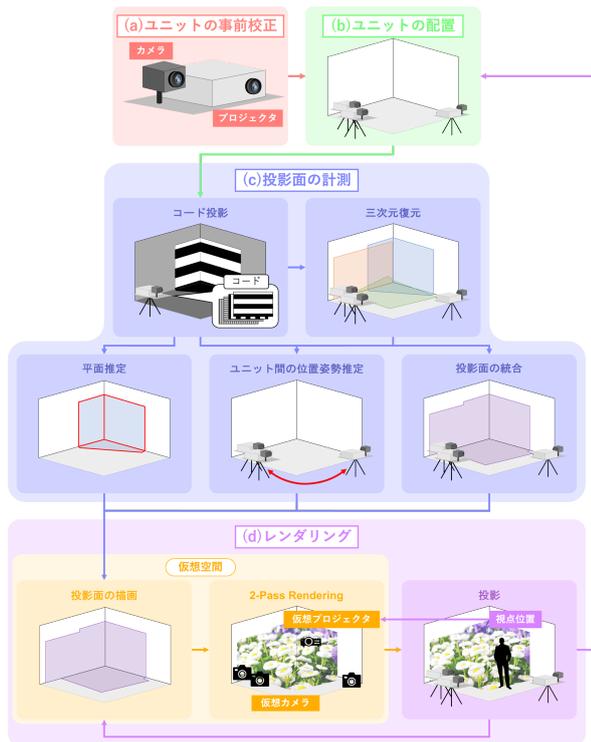


図 1: 提案システムの概要

2.1.1 ProCam ユニットの作成と事前校正

各 ProCam ユニットは、室内空間でのプロジェクタの配置自由度を上げるために投影距離の範囲を 1m~3.5m で設定でき、投影面の三次元形状計測において十分な精度になるように設計する。各 ProCam ユニットの事前校正 (図 1a) には、Zhang の手法を用いて、カメラの内部パラメータ、プロジェクタの内部パラメータ、カメラとプロジェクタの相対的な位置姿勢の外部パラメータの計測を行い、これ以降 ProCam ユニット内の計測されたパラメータは変化しないものとして扱う。

2.1.2 投影面の自動計測

投影面に対して、校正済みの ProCam ユニートを配置し、投影面の計測をする (図 1c)。計測では、グレイコードと正弦波位相シフトコードを用いたコード投影を行い、各 ProCam ユニットのカメラで撮影をする。撮影された画像を用いて、投影面形状の三次元復元、平面推定、ユニット間の位置姿勢推定、投影面の統合を行う。

ユニット間の位置姿勢推定は、三次元復元された点群と、隣接するユニットのプロジェクタで投影されたコードの撮影画像から、PnP 問題を解くことで推定する。

投影面の統合では、各 ProCam ユニット投影の重複領域内で復元された三次元点に関して、一意の三次元点を求め、各 ProCam ユニットの事前校正時の誤差を吸収する。これにより、誤差によって引き起こされる重複領域の投影ズレを解消することができる。重複領域内で一意の三次元点を求めるには、重複した領域において、投影面上で一一致する各カメラの座標の対応付けが必要になる。この対応付けには、重複領域内のあるプロジェクタの画素を使用する。本実装

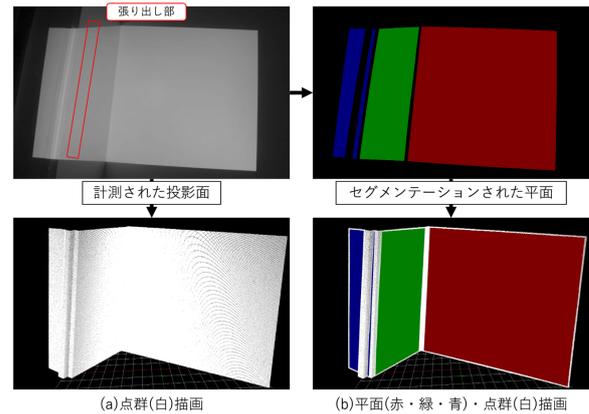


図 2: 平面推定と仮想空間上の描画の例

では、撮影されたグレイコードで 1 番細かい 10px×10px のグレイコードの重心点を用いて対応付けを行っている。しかし、対応付けの精度を上げるためには、位相シフトを用いた最近傍点を探索する方法なども考えられる。

レンダリングでは、計測した投影面を仮想空間上に描画し、2-Pass Rendering を行うことで、ユーザの視点位置において歪み補正された投影を行う (図 1d)。

提案システムでは、マルチプロジェクションにおける計測から投影までを自動化することにより、校正作業における人的コストを抑えている。そのため、投影環境を変更したい場合は、プロジェクタを再配置 (図 1b) し、自動計測を行うだけでマルチプロジェクションを実現することができる。

2.2 レンダリングにおける平面推定の導入

本システムのレンダリングでは、投影面の計測で得られた三次元復元された点群を用いて投影面の描画 (図 1d 左) を行っていた (図 2a)。点群を用いて投影面の描画を行った場合、レンダリングには時間がかかってしまう。加えて、投影画像には、点群描画の影響によりぼやけが生じてしまう。しかし、通常の点群データの処理でデータ量を軽くする方法では、角などの詳細な情報は丸め込みが起きてしまい高精度な幾何補正が難しい。そこで、本提案では、室内空間の多くは平面の組み合わせで構成されているという特徴を利用し、平面推定を行い、平面とそれ以外の点群を分離し、各平面を 1 つのポリゴンとして描画を行うことでレンダリング速度の向上と投影の綺麗さの向上を行う (図 2b)。

まず、復元された三次元点かどの平面に属するか推定を行う (図 2 右上)。図 2 右上は、平面に属していると推定された点群に対して、同一平面を同一の色で表している。この平面推定では、壁の角付近などの複数の平面に属していると判定された箇所に関しては、曖昧性が高いとし、セグメンテーションには含めないようにする。また、図 2 の平面推定の例では、投影面左方にある赤枠で囲われた張り出し部に関するも、平面と判定するには投影面全体に対して範囲が小さいことからセグメンテーションされなかった。

次に、平面推定した結果 (図 2 右上) と三次元点群を用いて、各平面方程式を計算する。レンダリングでは、平面推定

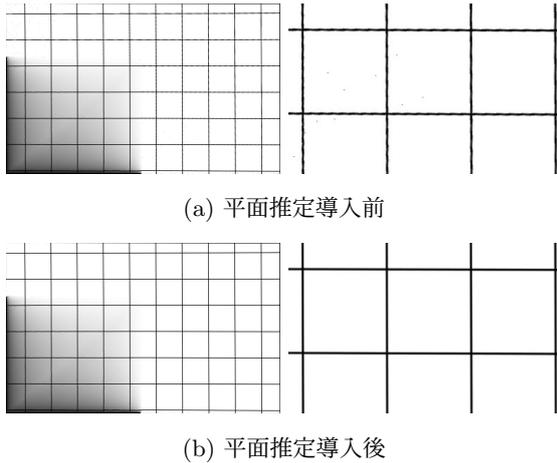


図 3: レンダリング結果

表 1: レンダリング速度

	平面推定導入前	平面推定導入後
レンダリング速度 [ms]	41.08	20.88
fps 換算	24.34	47.89

で推定された各平面における頂点を検出し、それらの頂点を用いて各平面のポリゴンとセグメンテーションされなかった部分を点群で描画する(図 2 右下)。図 2 右下では、右上でセグメンテーションに対応付けた色で各平面をポリゴンで描画している。また、セグメンテーションされなかった点群に関しては、白色で点群として描画している。実際のレンダリングに関しては、これらの処理に加えて、ブレンディング加工された重複領域部分を合わせて、仮想空間に投影面として描画する。そして、この描画された投影面を用いて 2-Pass Rendering を行うことで、投影画像を作成する。

3. 評価実験

作成した ProCam ユニットを用いて評価実験を行った。プロジェクタは EPSON EB-1776W (解像度 1280×800)、カメラは XIMEA 社製 MC023CG-SY-UB (解像度 1936×1216)、レンズは μ TRON 社製 HS1214V を使用した。計測における計算とレンダリングには、Windows PC (Intel(R) Core(TM) i7-10700 CPU @ 2.90GHz, RAM 32.0 GB, NVIDIA GeForce RTX 2060) を使用した。

3.1 レンダリング結果の比較

図 3 は、1 平面の投影面に対して、1m 離れた地点から計測、投影を行ったときの平面推定導入前後のレンダリング結果である。図 3 の左は、レンダリング結果の全体図であり、右は、レンダリング結果の拡大図である。図 3 左の左下は、他のユニットと投影が重複していることからブレンディング処理を行っている。

平面推定導入前のレンダリング結果(図 3a)では、黒く穴抜けした部分が少しあり、グリット線には、うねりが見ら

れる。一方で、平面推定導入前のレンダリング結果(図 3b)では、図 3a で見られた穴抜けは減っており、グリット線のうねりは改善されていることがわかる。また、平面推定導入前後におけるレンダリング時の投影面の描画は、平面推定導入前に約 95 万点の点群で描画していた部分が、平面推定導入後に 1 ポリゴンの平面の描画に置き換わった。

表 1 は、平面推定導入前後における 1frame レンダリング時間 [ms] の 100frame 平均を示している。投影においては、OpenCV, OpenGL を用いて C++ で実装を行っている。平面推定を導入することによって、レンダリング時間が約半分には抑えられていることがわかる。また、現状では Shader の導入ができていないため、更なるレンダリング速度向上が期待できる。

平面推定導入によって、レンダリング速度が向上することにより、投影できるコンテンツを画像のみではなく、動画や仮想空間を映すことが可能になることが考えられる。加えて、観察者視点のトラッキングを行うことで、ProCam ユニットを用いた広域投影システムを用いて CAVE のような没入感の高い投影が可能になると考えられる。

3.2 投影実験

形状が未知な環境に対応して自動校正できるかどうかを確かめるため、ProCam ユニット 2 台を用いて投影実験を行った(図 4)。実験は、ProCam ユニットを投影距離 1m の 1 平面(図 4a)、投影距離 1.75m の点線位置で直角に交わっている 2 平面(図 4b)に配置した 2 条件で行った。

投影距離 1m の 1 平面に投影した結果を図 5a、投影距離 1.75m の 2 平面に投影した結果を図 5b に示す。図の左はグリット線を投影した結果であり、右は画像を投影した結果である。図 5 より、2 台の ProCam ユニットで自動校正されたマルチプロジェクションは、重複領域でも投影ずれがなく、投影が行えていることがわかる。また、図 5b 左より、カメラ撮影位置から投影の歪み補正が行われていることがわかる。

投影距離 1.75m の 2 平面における描画分布を図 6 に示す。2 平面において、面が交わる角となる付近は平面として判断されないため、点群で描画されている。角付近や投影の重複領域以外では、平面で描画されている。

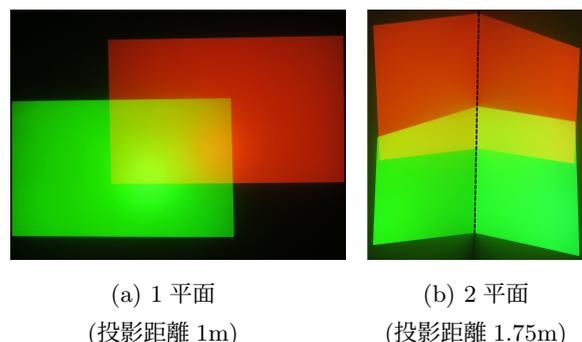
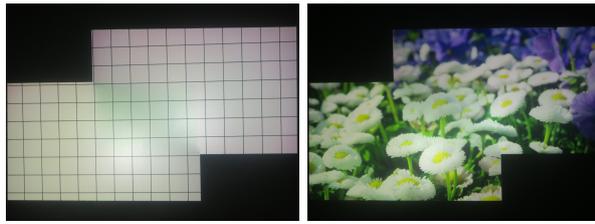


図 4: 各 ProCam ユニットの投影領域



(a) 1 平面
(投影距離 1m)



(b) 2 平面
(投影距離 1.75m)

図 5: 各条件における投影結果

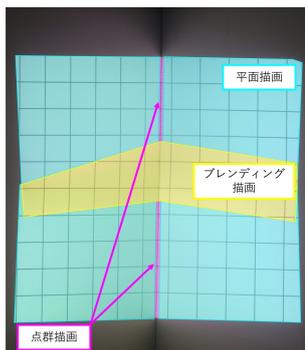


図 6: 2 平面における描画分布

4. おわりに

本研究では、形状が未知な室内空間において、プロジェクタとカメラを校正済みの一体化された ProCam ユニットとすることで、マルチプロジェクションにおける校正作業を

自動化する手法を提案し、投影環境を変える際にユニットを配置し直すだけで、自動的に校正ができることを確認した。ProCam ユニット 2 台を用いたマルチプロジェクションの校正作業は、コード投影に約 33 秒、自動計測における計算に約 42 秒で処理できることを確認した。また、レンダリングにおいて、平面推定を導入することで、レンダリング速度と投影精度の向上を確認した。

今後の課題としては、投影範囲拡大のためにユニットの台数の増加、リアルタイムの観察視点トラッキングの導入、動画や仮想空間などの投影コンテンツの増加などが挙げられる。

謝辞本研究は JSPS 科研費 JP21K19789 の助成を受けた。

参考文献

- [1] Park, Sanghun, Seo, Hyunggoog, Cha, Seunghoon, Noh, Junyong : Auto-calibration of multi-projector displays with a single handheld camera, 2015 IEEE Scientific Visualization Conference, pp. 65-72, 2015.
- [2] Raskar, R., Brown, M.S., Ruigang Yang, Wei-Chao Chen, Welch, G., Towles, H., Scales, B., Fuchs, H : Multi-projector displays using camera-based registration, Proceedings Visualization '99, pp.161-522, 1999.
- [3] Brett Jones, Rajinder Sodhi, Michael Murdock, Ravish Mehra, Hrvoje Benko, Andrew Wilson, Eyal Ofek, Blair MacIntyre, Nikunj Raghuvanshi, Lior Shapira : RoomAlive: magical experiences enabled by scalable, adaptive projector-camera units, In Proceedings of the 27th annual ACM symposium on User interface software and technology (UIST '14), pp.637-644, 2014.
- [4] Tehrani, Mahdi Abbaspour, Gopi, M., Majumder, Aditi : Automated Geometric Registration for Multi-Projector Displays on Arbitrary 3D Shapes Using Uncalibrated Devices, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, pp. 2265-2279, 2021.