



近接配置ピンホールアレイマスクを用いた プロジェクタ校正の精度改善

杉本正暁¹⁾, 岩井大輔¹⁾, 佐藤宏介¹⁾

Masatoki SUGIMOTO, Daisuke IWAI, and Kosuke SATO

1) 大阪大学大学院 基礎工学研究科 (〒 560-8531 豊中市待兼山町 1-3, sugimoto@sens.sys.es.osaka-u.ac.jp)

概要: 従来のプロジェクタ校正法は、プロジェクタの合焦位置までの距離に依存した校正儀、作業空間を用意する必要があるという制約がある。たとえば、合焦位置までの距離が遠い場合、非現実的なほど大きな校正儀、容易に準備ができないほど広い作業空間が必要となる。そこで本稿では、プロジェクタに近接配置したピンホールアレイマスクと撮像プレートを用いて、合焦位置に依存せず常に一定のセットアップで校正が可能な手法を提案する。実験では提案手法の実装と、新たな画像処理アルゴリズムの適用による汎用性の向上、精度改善を行った。結果から、従来手法と比肩する精度でのプロジェクタ校正が可能であることを示すことができた。

キーワード: プロジェクタ, キャリブレーション, プロジェクションマッピング

1. はじめに

拡張現実感の一つであるプロジェクションマッピング (Projection Mapping: PM) は、対象物体に映像を重畳投影することで、その物体の色や質感などの見た目を変化させる技術である [1, 2]。エンタテインメントをはじめ、医療や教育など幅広い分野での活用が期待されている。

PM の対象物体は平面ばかりでなく、非平面で複雑な形状をもつ物体であることが多い。そのため、対象物体の形状に合わせて投影像に適切な幾何補正を施し、正確に重畳投影をする必要がある。この幾何補正のために、使用するプロジェクタの画角、レンズの焦点距離等の情報が必要となる。これらの情報はプロジェクタの内部パラメータとして表され、プロジェクタを校正することで推定することができる。

既存のプロジェクタ校正法は多数存在しているが、その多くが校正儀として平面マーカボードを用いた手法 [3, 4, 5, 6] である。しかしこれらの手法には共通して、プロジェクタのピントがマーカボードに合っている必要があるという制約がある。例として、建物ほどの大きい物体を対象とした PM を行う際、対象全体に映像を投影しようとする必然的にプロジェクタと対象物体の距離が大きくなる。そのため、プロジェクタ校正のために非現実的なほど大きな平面マーカボード、容易に準備できないほど広い作業空間が必要となる。

そこで本稿ではこの課題を解決し、投影対象の大きさに依存せず、常に一定程度狭い作業空間でプロジェクタ校正が可能な手法を提案する。

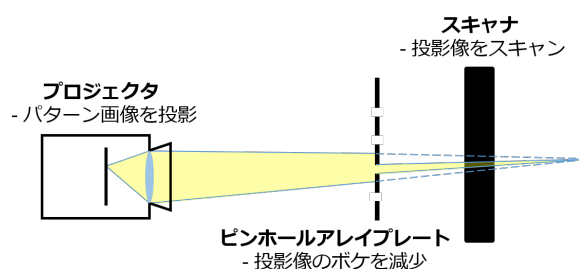


図 1: 提案システム概要図

2. 提案手法

提案システムは、プロジェクタ、ピンホールアレイマスク、撮像プレートを配置したものを用いる (図 1)。本稿では、比較的安価で入手が容易な個人用のフラットベッドスキャナを撮像プレートとして用いる。提案システムでは、まずプロジェクタから空間コード化法の一つであるグレイコードパターンを投影する。投影像の一部のみがマスク上のホールを通過してスキャナ上へ到達し像を作るので、これらをスキャンし画像として取得する。撮影画像から、校正に必要なプロジェクタ画像平面と現実空間の参照平面 (ここでは、マスク平面とスキャナ平面の 2 種類) 間の対応点を推定する。最後に、Zhang の手法 [7] の計算アルゴリズムに基づいて内部パラメータを推定する。以降で、ピンホールアレイマスクと提案アルゴリズムのより詳細な説明をする。

2.1 ピンホールアレイマスクによるボケ減少の原理

プロジェクタから映像が投影される際、ある画素から発せられた光のうちレンズに到達したものが屈折されることで結像面上のある一点へと集光する。以降、プロジェクタレ

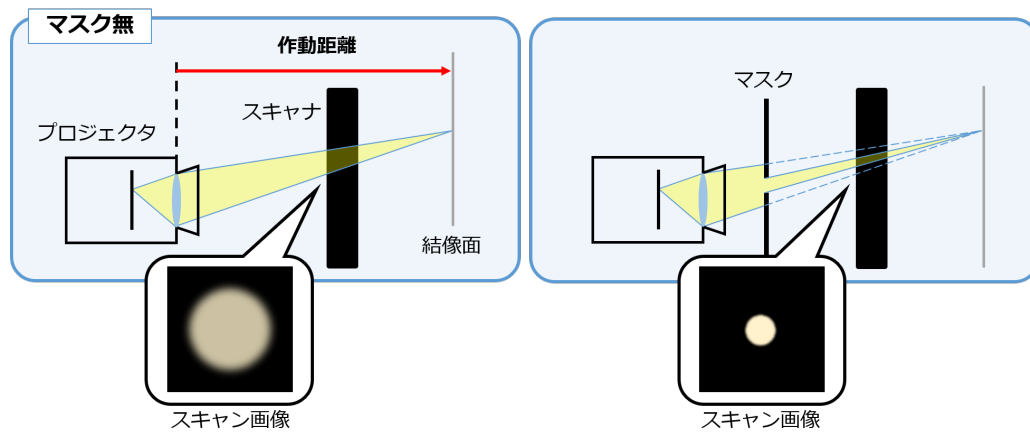


図 2: マスクによるボケ減少の仕組み (左: マスク無 右: マスク有)

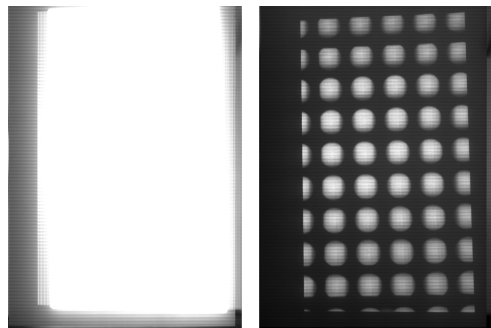


図 3: マスク有無それぞれの条件でのスキャン画像 (左: 無 右: 有)

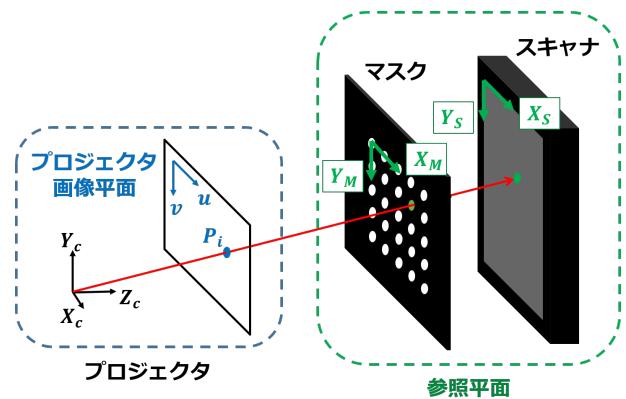


図 4: 各座標系の対応関係

レンズから結像面までの距離を作動距離と呼称する。提案システムではプロジェクトの作動距離に依存せず常に一定の距離にスキャナを設置しているため、そのままグレイコードパターンを投影すればスキャナ上でボケてしまう場合がほとんどであり、精度良く校正できない。そこで、プロジェクトとスキャナの間ピンホールアレイマスクを挿入することでこのボケを小さくする。提案システムの鍵となる要素であるピンホールアレイマスクには微小なホールがグリッド上に均等に配置されており、ホール同士の間隔は既知である。マスク上の微小なホールによって、プロジェクトからスキャナに届く投影像の開口が絞られることでボケを減少させることができる。(図 2)

白黒の細かい縦縞パターンを投影した際に、マスクの有無それぞれの条件でスキャンした画像を図 3 に示す。プロジェクト-スキャナ間の距離は 30cm、作動距離は 100cm とした。マスク非挿入時ではボケによって縦縞パターンが潰れているが、マスク挿入時では縦縞パターンがはっきり認識できるほどボケが減少されていることがわかる。マスクを挿入することによって投影像の一部のみしかスキャナ面へ到達しないが、本手法ではホールの中心を通過した光線のみを使用するので問題とはならない。

2.2 対応点推定

本手法では、パラメータ推定に Zhang の方法による計算アルゴリズムを用いるにあたり、各ホールの中心を通過した光線について、その光線のプロジェクト画像内での画素位置と、光線が通過したホールのマスク上での座標、スキャナ面に到達してできた像のスキャナ面での座標の対応関係を求める。ここで、マスク座標系はプロジェクトから見て最も左上にあるホールを原点とし、スキャナ座標系はスキャナ面の最も左上を原点として、各座標系の X 軸、 Y 軸はそれぞれ図 4 のように定める。

まずプロジェクト-マスク間の対応関係について、投影像のどの部分がホールを通過したかという情報は、スキャン画像内のグレイコードをデコードすることで得られる。また、マスク上のホール同士の位置関係は既知であり、その部分が通過したホールのマスク座標系での座標は容易にわかる。次にプロジェクト-スキャナ間の対応関係について、投影像のどの部分がホールを通過しスキャナ面に到達したのかという情報は先と同様にグレイコードをデコードすることで得られる。しかし、スキャナ座標系のどこに到達したのかを手動で測定するのは困難である。そこで本手法では、

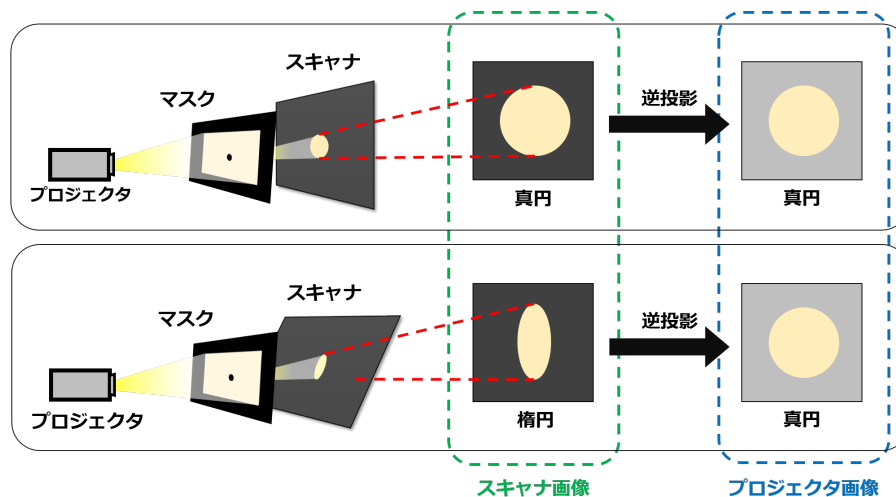


図 5: スキャナ画像からプロジェクタ画像へのマッピング

スキャナの空間解像度（単位：dpi）を用いることでスキャン画像内の光線到達箇所の座標をスキャナ座標系へと変換する。このようにして、投影像内の特徴点、マスク座標系の特徴点、スキャナ座標系の特徴点それぞれの対応関係を推定することができるため、Zhang の方法に基づく計算アルゴリズムによってパラメータを推定する。

ここで、プロジェクタレンズは一定の大きさをもっていることから、スキャナ上のホール像もある程度の大きさを持つ円となる。そのためその円形の像内の、ホールの中心を通過した光線にあたる部分を推定する処理が必要となる。この処理はプロジェクタ校正の精度にも大きく影響を与えるものであり、次節でより詳細に述べる。

3. ホール中心通過光の推定

提案手法ではこれまで、スキャナ上にできたホール像に真円フィッティングを施し、そのフィッティング円の中心点にあたる位置にホール中心を通過した光線が到達していると仮定してきた [8]。しかし、この手法ではスキャナ上にできるホール像を真円で近似しており、精度を高めるには投影像の結像面とスキャナ面を平行にしなければならないという制約があった。そこで本稿では、スキャナの傾きに依存せずホール中心を通過した光線を特定する方法を提案する。

提案システムでは、プロジェクタとマスクの位置関係が変わらない限り、投影像のうちマスクを通過する部分も変わらない。つまり、スキャナを傾けてもスキャナ面にできる像が持つ情報は変わらないためそのため、スキャナ面上の像の持つパターンをデコードすることで得られるスキャン面からプロジェクタ画像面への逆投影結果は、スキャナの位置姿勢に依然せず一意に定まる。さらに、図 5 のようにプロジェクタ画像側への逆投影によってできるホール像は常に真円となる。この原理を利用し、プロジェクタ画像側にマッピングされたホールに対して真円フィッティングを施す。次に、フィッティングされた真円の中心にある画素の持つ空間コードと同一の空間コードを持つスキャナ画像側の

画素を探索する。ここで、プロジェクタ画像とスキャナ画像の逆投影是一对多対応であり、スキャナ画像上の候補点は複数存在するため、代表点を決める必要がある。本手法では、逆投影時に生じるノイズのに対する頑健性を高めるために、候補点群の X 座標、 Y 座標それぞれの中央値を代表点として用いる。

以上の処理によって、スキャナの傾きに依存せず常にホール中心を通過した光線を利用できる。

4. パラメータ推定

本節では提案手法を用いた校正精度の評価実験を行った。実験に用いたプロジェクタを Falcao らの手法によって校正した結果を本稿での真値とする。

実験システムでは、精度向上のためマスクを 2 枚使い、マスク同士が平行とならないよう図 6 のように設置した。プロジェクタの作動距離は約 100cm、プロジェクタとマスク間の距離はそれぞれ約 13cm、約 15cm とし、プロジェクタとスキャナ間の距離は約 40cm とした。また、新たに提案したホール中心推定法の有効性を示すため、プロジェクタ画像平面に対するスキャナのおよその傾きを 45 度とし、スキャナ画像上で円フィッティングを施す従来アルゴリズム、プロジェクタ画像上へマッピングした後に円フィッティングを施す新アルゴリズムどちらにおいても推定を行った。実験は暗室環境下で行った。パラメータの推定結果を真値と併せて表 1 に示す。再投影誤差は平均平方二乗誤差を用いており、単位はすべて pixel である。

スキャナが傾いているため、従来アルゴリズムではホール中心通過光の推定精度が低くなってしまい、どのパラメータも真値から大きく離れた値となっている。対して、新アルゴリズムでは精度よくホール中心通過光を推定できたため、各パラメータともより真値に近い値となっている。また再投影誤差についても従来アルゴリズムでは大きい値になっているが、新アルゴリズムでは 1 pixel 未満と小さくなっている。しかし c_y については唯一真値から離れた値となっ

表 1: 実験結果 (pixel)

	提案手法		真値
	従来アルゴリズム	改良アルゴリズム	
f_x	3501.28	2031.61	2044.56
f_y	3773.40	2046.11	2027.58
c_x	39.04	407.44	396.30
c_y	874.11	691.88	584.84
再投影誤差	9.91	0.65	0.34

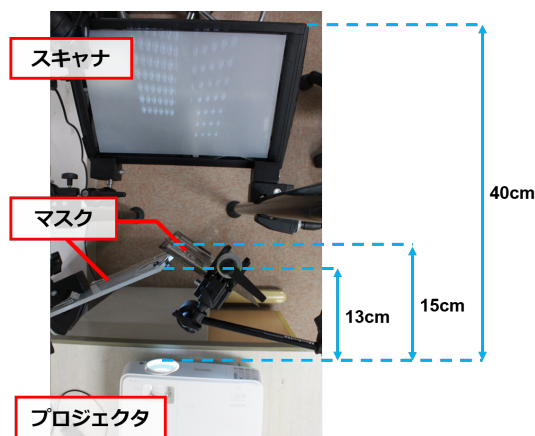


図 6: 実験システム

いる。この差が実物体への投影時にどの程度の誤差を生じさせるのか、今後検証していく必要がある。

5. 結論

本稿では、投影対象の大きさや投影対象までの距離に依存せず、常に一定のある程度狭い作業空間で実行可能なプロジェクタ較正法を提案した。また、提案手法の鍵となるピンホールレイマスクが投影像のボケを減少させること、提案手法によって従来手法と比肩する精度でプロジェクタ較正が可能であることを実験によって確認した。加えて、対応点推定時の画像処理フローを改善することで、より汎用性の高い手法となることも確認した。

本稿では各種パラメータの値が真値にある程度近い値になっていることを確認できたが、その実用性までは確認できていない。そこで、推定したパラメータを用いた実物体への投影実験を行い、提案手法の実用性の検証を今後の課題とする。

参考文献

[1] Ramesh Raskar, Greg Welch, Kok-Lim Low, and Deepak Bandyopadhyay. Shader lamps: Animating real objects with image-based illumination. In

Rendering Techniques 2001, pages 89–102. Springer, 2001.

- [2] Johnny C Lee, Paul H Dietz, Dan Maynes-Aminzade, Ramesh Raskar, and Scott E Hudson. Automatic projector calibration with embedded light sensors. In *Proceedings of the 17th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pages 123–126, 2004.
- [3] Makoto Kimura, Masaaki Mochimaru, and Takeo Kanade. Projector calibration using arbitrary planes and calibrated camera. In *2007 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 1–2. IEEE, 2007.
- [4] Samuel Audet and Jeremy R. Cooperstock. Shadow removal in front projection environments using object tracking. *2007 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 1–8, 2007.
- [5] Andreas Griesser and Luc Van Gool. Automatic interactive calibration of multi-projector-camera systems. In *2006 Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshop (CVPRW'06)*, pages 8–8. IEEE, 2006.
- [6] Gabriel Falcao, Natalia Hurtos, and Joan Massich. Plane-based calibration of a projector-camera system. *VIBOT master*, 9(1):1–12, 2008.
- [7] Zhengyou Zhang. A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 22, 2000.
- [8] 杉本正暁, 岩井大輔, 佐藤宏介, et al. ピンホールマスクプレートを用いたプロジェクタ較正. 研究報告コンピュータビジョンとイメージメディア (CVIM), 2020(14):1–6, 2020.