

複数台カメラを用いた投影パターン直接受光による 複数台プロジェクタの同時三次元位置推定

河野 巧 岩井 大輔 佐藤 宏介^{*1}

Simultaneous Three-Dimensional Position Estimation of Multiple Projectors
using Direct Capture of Projected Patterns with Multiple Cameras

Takumi KAWANO, Daisuke IWAI and Kosuke SATO^{*1}

Abstract – We have proposed a method for simultaneous geometric calibration of projectors by separating superimposed projection patterns on the projection surface with cameras embedded on it. Our previous research proved the concept while suffering from errors due to imperfect alignment of the camera. In this study, we reduce the errors by taking the slight displacement of the optical center of the camera into account. Additionally, we estimate the three-dimensional coordinates of the projector from the direction of light that the camera receives directly from the projector.

Keywords : プロジェクションマッピング、幾何較正、幾何補正

1 はじめに

複数台のプロジェクタを同時に利用するとき、自由にプロジェクタを置いて投影することがほとんどであり、その場合、その表示内容に幾何的なずれが発生する。このずれを低減するために、予め投影領域やプロジェクタの位置姿勢を把握する必要がある。

既存の幾何較正の手法として次のものがある。プロジェクタから対象面に、各画素の画像座標値を一意に示す、グレイコードパターン等の符号化パターンを投影し、カメラでその投影結果を撮影することで、カメラ画像座標と投影画像座標の対応関係を取る。複数台のプロジェクタを用いる場合、同時に符号化パターンを投影すると対象面でそれらが重畳してしまい（図 1）、各プロジェクタからの符号化パターンを分離することができない。そのため、逐次的に各プロジェクタから符号化パターンを投影して撮影する他なく、較正に掛かる時間がプロジェクタの台数に対して線形に増加するという問題がある。

これに対して我々は、カメラを投影対象面に埋め、プロジェクタからの光を直接受けることによって、重畳した投影パターンを分離し（図 2）、プロジェクタの同時幾何較正を行う手法を提案した [1]。しかしながら、そのホモグラフィ変換による補正結果には僅かながらずれがあった。本稿ではそのずれを低減する技術について述べる。さらに、カメラがプロジェクタから直接受けた光の方向からプロジェクタの三次元座標



図 1: 複数台プロジェクタでの同時グレイコードパターン投影。重なりあったパターンを分離しなければ、それぞれのプロジェクタを独立に較正することができない。

を推定する技術についても述べる。

投影対象面に光センサを搭載して較正を行う先行研究として、以下の 3 つが挙げられる。埋込光ファイバを用いる Johnny C. Lee らの研究は、グレイコードパターンを用いるという点で本研究に近い [2]。ただし、当該研究では光センサを用い 1 台のプロジェクタの幾何較正を行っており、我々の研究ではカメラを用い複数台プロジェクタの同時幾何較正を行った点において異なる。宮武らの研究では高リフレッシュレートで映像を操作可能な DLP プロジェクタを用い [3]、北嶋らによる研究ではレーザープロジェクタのラスタスキャンの特性を利用して座標推定を行う [4]。我々の提案す

^{*1}大阪大学基礎工学研究科

^{*1}Graduate School of Engineering Science, Osaka University

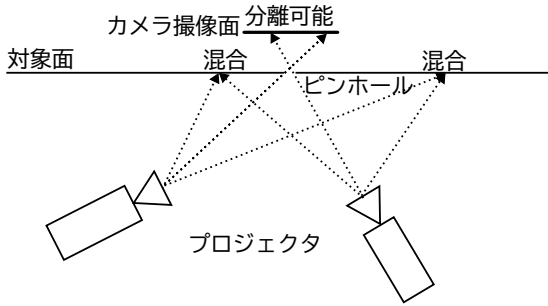


図 2: 提案手法模式図。投影対象にカメラを埋めることで、その一点に重畳した光を分離できる。

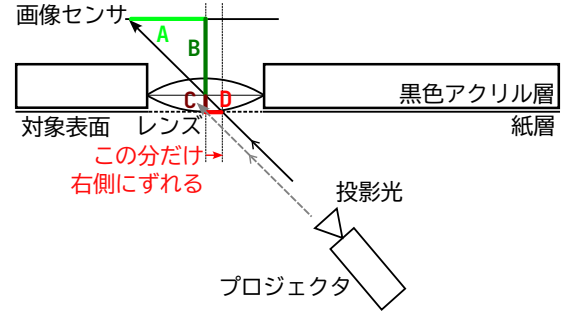
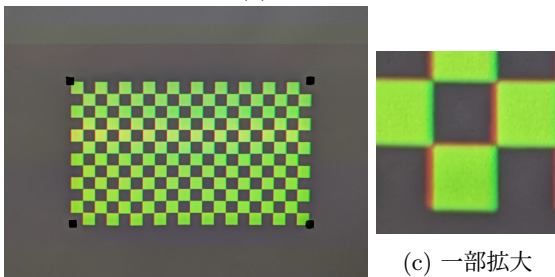


図 4: ずれの発生原因



(a) 全体



(b) 投影部拡大

(c) 一部拡大

図 3: 同時幾何較正・ホモグラフィ補正の検証結果。概ね正しく補正できているが、一部にずれが確認できる。

る手法は、使用するプロジェクタ自体の映像投影方式や性能への依存度が低いため、より幅広いプロジェクタに対して応用可能である。

2 ホモグラフィ幾何補正精度の改善

2.1 ずれ発生の考察

我々は幾何較正を行うために、横 200 mm×縦 120 mm の矩形の頂点に、4 台のカメラ (Raspberry Pi Camera Module 3 Wide) を埋め込んだ黒色アクリル板を較正板として用いた。我々の提案した手法では、この較正板に対してグレイコードを投影し、4 点の世界座標と投影画像座標の対応関係を取る。この情報を用いてホモグラフィ変換により幾何補正した後、2 台のプロジェクタから赤色と緑色で、それぞれチェッカーパターンを投影すると、赤色の方は少し左側に、

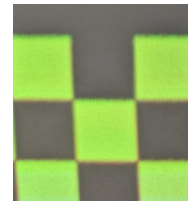


図 5: 補正後の投影結果一部拡大。赤と緑のチェッカーパターンを投影している。ずれはほとんどない。

緑色の方は少し右側にずれていることが確認された (図 3a、図 3b、図 3c)。また、そのずれ幅は最大で 1.2 mm (= 投影領域の横幅の 0.6%) 程度であった [1]。このずれは、

- 理想ピンホールカメラではなく、レンズカメラを使用していること
- レンズの前方表面が対象面に一致するように設置していること

により、光学中心の位置が対象面の表面より後方にずれていることが原因であると考えられる。この様子を図 4 で説明する。本手法では、カメラの光学中心は、破線の矢印で示す光が対象表面に入射する位置になければならない。しかし、プロトタイプ実装では、対象表面に凸部を設けないようにするために、カメラのレンズが対象表面から突出しないように設置した。このように設置すると、光学中心は画像センサのある側に後退してしまう。このとき、カメラの光学中心を通る光は実線の矢印で示す光であり、本来計測すべき破線の矢印で示す光とは異なることからずれが発生する。

2.2 ずれの補正方法の検討

上記ずれを補正するために以下の手法を検討した。図 4 の記号を用いて説明する。この図を見ると、 $A : B = D : C$ の関係があることがわかる。すなわち、 $D \propto A$ 。A は画像センサの受光位置から得られるため、比例定数をあらかじめ求めておくことで D を求め、画像センサで受けた光の対象表面上の実際の受光位置を推定できる。

2.3 ずれ補正実験

前節の内容を実装し幾何補正を行い、改めて赤色・緑色のチェッカーパターンを二台のプロジェクタから投影を行った。図 5が投影結果であり、図 3cと比較して明確にずれが低減されたことが確認できる。ずれは、最大で0.26 mm(= 投影領域の横幅の0.13%)程度であり、5倍程度の精度改善が認められた。なお、このずれの大きさは本投影環境でプロジェクタの一画素の大きさよりも小さかった。

3 画像センサ上での投影パターン受光位置を用いた複数台プロジェクタの同時位置推定

この節では、較正板に複数の小型カメラを埋め込んで個々に撮影したプロジェクタ光の輝点像より、プロジェクタの三次元位置を推定する手法について検討する。

以降、各種計測・推定を正確に行うために、あらかじめカメラの内部及び外部パラメータを計測していることを前提とする。内部パラメータにより、画像座標からそこに入射する光源の向きをカメラ座標系で求めることが、外部パラメータにより、カメラ座標系と世界座標系の相互変換が可能となる。

3.1 動作原理

カメラの内部及び外部パラメータを用いることで、画像センサの各画素に入射する光線の光源方向を、世界座標系で求めることが可能となる。また同一光源からの光線を複数台のカメラで観測すれば、光源の位置を推定することができる。一方で実際には、これらの光線は誤差によって厳密に一点で交わることはない。そのため、これら直線の「最も交点らしい」箇所を求める必要がある。これを次の最小二乗法によって求める。

三次元直線は次の方程式で表せる。

$$\frac{x - x_0}{x'_0} = \frac{y - y_0}{y'_0} = \frac{z - z_0}{z'_0}$$

$$\Leftrightarrow y'_0 z'_0 (x - x_0) = x'_0 z'_0 (y - y_0) = x'_0 y'_0 (z - z_0)$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} y'_0 z'_0 x - x'_0 z'_0 y = (x_0 y'_0 - x'_0 y_0) z'_0 \\ x'_0 z'_0 y - x'_0 y'_0 z = x'_0 (y_0 z'_0 - y'_0 z_0) \end{cases}$$

したがって、複数の直線についてその交点 \mathbf{x} は

$$A = \begin{bmatrix} y'_0 z'_0 & -x'_0 z'_0 & -x'_0 y'_0 \\ & x'_0 z'_0 & \\ & & \vdots \\ y'_{n-1} z'_{n-1} & -x'_{n-1} z'_{n-1} & -x'_{n-1} y'_{n-1} \\ & x'_{n-1} z'_{n-1} & \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} (x_0 y'_0 - x'_0 y_0) z'_0 \\ x'_0 (y_0 z'_0 - y'_0 z_0) \\ \vdots \\ (x_{n-1} y'_{n-1} - x'_{n-1} y_{n-1}) z'_{n-1} \\ x'_{n-1} (y_{n-1} z'_{n-1} - y'_{n-1} z_{n-1}) \end{bmatrix}$$

を用いて、

$$A\mathbf{x} = \mathbf{b}$$

と表せる。

この方程式は解を持たない場合でも、擬似逆行列 $A^+ = (A^T A)^{-1} A^T$ を用いて、

$$\mathbf{x}^* = A^+ \mathbf{b}$$

の通り、最小二乗法により近似解が得られる。

3.2 1台のプロジェクタの位置推定実験

4台のカメラを埋め込んだ較正板の前にプロジェクタを置き、これまで述べた手法でプロジェクタの位置を求める実験を行った。図 6aに示すように、較正板の右側のカメラ設置位置、及び左側のカメラ設置位置の正面 300 mm の 2点と、較正板中心より 300 mm の位置から 50 mm ずつ後退させた 6点について、プロジェクタを置き、その位置を推定した。

その実験結果を図 6bに示している。この図の座標系は、基準カメラ(図 3aにおいて対象板上右上に設置されたカメラ)のカメラ座標系となっている。

位置推定に4台のカメラを用いることのできた中央6点について、概ね正しい位置推定ができたことを確認した。位置推定に2台のカメラしか用いることのできなかった左右2点については、計測結果のずれが大きかった。ただし、カメラの光軸と垂直な方向(y 軸方向)の値については、カメラが2台しか使えない場合でもミリメートル単位の精度があった。

また z 軸方向について、全体的に 25 mm 程度後方に計測されている。これはプロジェクタの投射レンズの先端を推定の真値としていたが、実際の光学中心がより後方(プロジェクタ内部)にあることにより生じているものと考えられる。

3.3 複数のプロジェクタの位置推定実験

較正板の 500 mm 前方に2台のプロジェクタを設置した環境を用意した(図 7)。この環境で2台のプロジェクタの位置を同時推定する実験を行った。プロジェクタは両方とも4台のカメラの画角に入っており、位置推定にこれら4台のカメラからの情報を利用することができた。

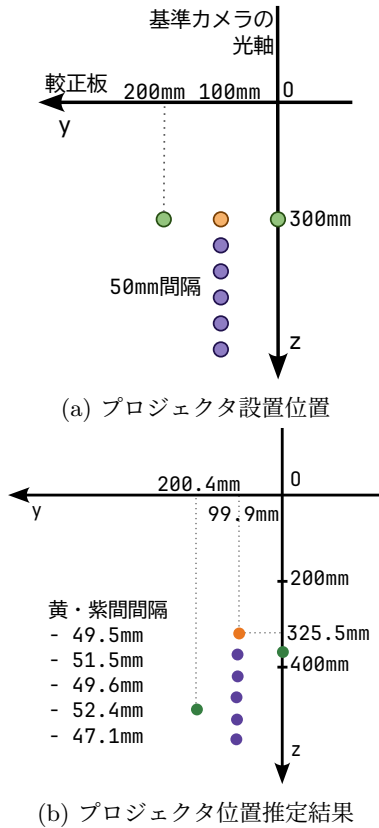


図 6: 実験結果

実験の結果得られた座標は、基準カメラの正面にある外装が黒色のプロジェクタが $(-200.8, 5.6, 526.4)$ で、その隣に設置された外装が白色のプロジェクタが $(-201.8, 118.8, 519.5)$ であった。実際のプロジェクタの投射レンズは、両機とも床面から同一の高さにあり、また両機のレンズ間の水平方向の距離は 112mm であった。実験より、レンズの高さ方向 (x 軸) の座標が約 2mm のずれであり、また、 y 軸方向の距離が約 113mm という結果が得られたことから、この実験でも、カメラの光軸に垂直な x 軸と y 軸方向の特に相対位置について正確に計測できることが確認できた。

4 プロジェクタのパラメータ取得についての検討

プロジェクタもカメラと同様にピンホールカメラモデルでモデル化できる。このため、世界座標系における任意の三次元位置に対して、プロジェクタから光を照射するためには、カメラと同様に内部及び外部パラメータを推定する必要がある。カメラのパラメータを計測する場合は一般に、チェッカーパターンを印刷した板を撮影し、世界座標 (三次元) とカメラ画像座標 (二次元) の組を複数得ることで達成する。

今回の実験で用いた校正板は、画像センサ (小型埋込カメラ) が埋め込まれた位置について、プロジェクタ画像座標を計測することができる。さらに外部パラ

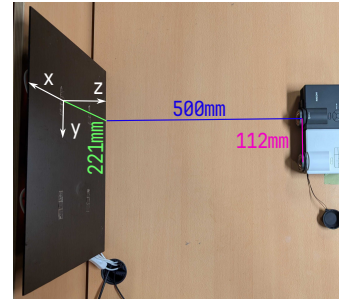


図 7: 実験環境。基準カメラの座標系を世界座標系として用いており、 z 軸はそのカメラの光軸である。

メータにより世界座標系における各カメラの埋込み位置が分かれば、世界座標とプロジェクタ画像座標の組が複数得られる。したがって、校正板に複数のプロジェクタが同時にグレイコードパターンを投影して、プロジェクタのパラメータを取得することが可能となる。

5 おわりに

本稿では、我々が過去に提案した、投影光直接受光による幾何較正の技術で発生していた投影内容のずれについて、そのずれの発生原因やその補正方法を検討し改善した。また、カメラで投影光を直接受光する本手法を用いれば、プロジェクタの三次元位置が推定できることを定式化し検証した。今後は、4章で述べた通り、プロジェクタの内部及び外部パラメータの取得方法について検討する。

参考文献

- [1] 河野巧, 岩井大輔, 佐藤宏介. 対象表面埋込カメラによる投影パターン直接受光を用いた複数台プロジェクタの同時幾何較正. 第 68 回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集 (SCI'24), pp. 1136–1139, 2024.
- [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*, UIST '04, p. 123–126, New York, NY, USA, 2004. Association for Computing Machinery.
- [3] Yamato Miyatake, Takefumi Hiraki, Daisuke Iwai, and Kosuke Sato. Haptomapping: Visuo-haptic augmented reality by embedding user-imperceptible tactile display control signals in a projected image. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 29, No. 4, pp. 2005–2019, 2023.
- [4] Yuki Kitajima, Daisuke Iwai, and Kosuke Sato. Simultaneous projection and positioning of laser projector pixels. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 23, No. 11, pp. 2419–2429, 2017.