一般社団法人 電子情報通信学会
THE INSTITUTE OF ELECTRONICS,
INFORMATION AND COMMUNICATION ENGINEERS

HCGシンポジウム2017
HUMAN COMMUNICATION GROUP SYMPOSIUM 2017
HCG2017-A-1-6

大規模 Projector-Camera システムに適したキャリブレーション手法

謝 淳† 宍戸 英彦§ 亀田 能成§ 鈴木 健嗣‡ 北原 格§

†筑波大学 エンパワーメント情報学プログラム
‡筑波大学 システム情報系
§筑波大学 計算科学研究センター
†‡§〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1

E-mail: †s1730541@s.tsukuba.ac.jp, §{shishido, kameda, kitahara}@ccs.tsukuba.ac.jp, ‡kenji@iit.tsukuba.ac.jp

あらまし Projector-camera システムを構成するプロジェクタとカメラのキャリブレーションは，投影型 AR アプリケーションを構築するための重要な課題である．従来手法では，実物のチェッカーボードなど実世界の位置姿勢や形状が既知なランドマーク物体に規定パターンを投影し，その様子をカメラで撮影することによって，プロジェクタとカメラのパラメータを推定しているが，大規模空間において投影システムを構築する場合，投影領域のサイズに合わせた巨大なキャリブレーションボードを利用することになるため実用的ではない．本稿では，ランドマーク物体を用いることなく，大規模空間におけるプロジェクタとカメラのキャリブレーションを実現する手法を提案する．

キーワード Projector-camera システム，キャリブレーション，大規模投影，レンズ歪み，射影歪み

1. はじめに

大規模空間で投影システムを構築する際，プロジェクタの画角，最大投影距離，設置可能な場所などの兼ね合いにより，複数台のプロジェクタを用いて空間全体をカバーするケースがある．複数の投影画面を合わせて一つの大画面を実現する方法はよく使用されているが，複数の投影画面を統合する際の位置合わせの精度が最終的な投影結果の質を左右することが知られている．理論的には，キャリブレーション処理によってプロジェクタ毎に適切な形状補正を施し，それを所定領域に投影すればよい．この形状補正処理には，プロジェクタと投影面との間の相対な距離と角度によって生じる射影歪みの補正と，プロジェクタのレンズ歪みや光学中心のズレによって生じる投影歪みの補正が含まれている．小規模投影，あるいはプロジェクタを一台だけ使用する投影システムでは，レンズ歪みの影響は微小であり，無視することが可能であるが，投影システムが大規模になる場合，プロジェクタから投影面までの距離の増加に伴い投影歪みの影響も増大し，画面間の位置ずれによって投影画質が劣化する問題が発生する．このように，複数台のプロジェクタによって構成される大規模投影システムでは，投影歪の補正の重要性が高い．

従来のプロジェクタのキャリブレーション法では，投影領域をカバーするサイズのランドマーク物体（チェッカーボードなど）の利用が一般的だが，大規模投影システムでは，空間全体を覆う巨大なランドマーク物体を準備することは困難であるため，ユーザがプロジェクタの投影結果を目で確認しながら投影歪みや射影歪を手動で調整している．しかし，プロジェクタの台数の増加に伴い作業ロードが急激に増加する．それに加え，我々がプロジェクションマッピングの応用事例として考えている床面投影システムでは，観客と投影面の距離が近いため，わずかな投影の位置ずれであっても確認することが可能であるため，より高いキャリブレーション精度が求められている．

本稿では，カメラとプロジェクタを組み合わせた投影システムを用いた大規模投影システムの自動キャリブレーション手法を提案する．カメラで撮影した投影領域の画像を解析することにより，投影歪み補正パラメータを調整する．

2. 関連研究

2.1. 大規模投影

複数のプロジェクタ画面を組み合わせて一つの大画面を構成する手法が活発に研究開発されている．K.li ら[1]は 8 台の市販プロジェクタの画面を統合して 4096 画素×1536 画素の大画面投影を作成している．しかし，このシステムの画面位置合わせでは，ユーザがプロジェクタの位置と射影歪みの補正を手動で調整しながら，投影パターンの見た目から結果を確認しているため，多大な時間と労力が必要である．Rasker ら[2]はカメラ 1 台とプロジェクタ 4 台（2 行×2 列）からなる自動位置合わせ可能なプロジェクタ・カメラシステムを提案している．このシステムの構築環境は，プロジェクタ・カメラと投影面の距離が比較的小さいため，プロジェクタやカメラの投影歪みは無視できるとされている．計算誤差による投影画面間のオーバーラップとギャップを解消するために，画面の継ぎ目の部分をある程度重ね合わせ，重なる部分の輝度値を適切に調

整することで違和感を軽減する．しかし，レンズ歪みの影響が大きくなると射影歪みの補正の精度が低下し，継ぎ目部分で大きな位置ずれが発生してしまい，前述のブレンディング方法はこの状況に対応困難である．また，1 台の固定カメラで全てのプロジェクタの投影結果をキャプチャーするのが必要のため，全体の投影領域のサイズはカメラの撮影範囲に制限されている．

撮影範囲の問題に対し，pan-tilt-zoom カメラを用いた手法が提案されている[3][4]. これらの手法のメリットとして，カメラの向きを回転させることで広い投影領域へ対応可能であることが挙げられるが，カメラの回転を正確に制御する必要がある．また，カメラのレンズ歪みの影響を考慮し，プロジェクタの投影パターンを撮影した結果からカメラレンズ歪みパラメータを推定しているが，投影結果自身がプロジェクタのレンズ歪みの影響を受ける場合は正確なキャリブレーションが困難である．

2.2. Projector-Camera システムのレンズ歪み補正

大規模空間における Projector-Camera システムでは，前述の通り，プロジェクタとカメラの光学系に無視できないレンズ歪みが共に存在する．キャリブレーションの精度を向上させるためには，まずカメラのレンズ歪みを補正し，続いて投影結果を観測しながらプロジェクタのレンズ歪みを補正するのが一般的である．

カメラのレンズ歪みパラメータの推定手法は，大まかに二種類に分類できる．一つは Zhang[5]の手法である．この手法は複数の視点から撮影したチェッカーボード画像を用いて簡易に内部パラメータとレンズ歪みパラメータを同時に推定可能であるため，キャリブレーションに多用される．しかし，チェッカーボード画像を多様な角度から撮影するためにカメラもしくはチェッカーボードを移動させながら撮影する必要があり手間と時間を要する．体育館のような空間では，カメラが手の届かない場所に設置されていることが多く，カメラを移動させるのは困難である．一方で，カメラの撮影範囲に応じて巨大なキャリブレーション物体を用意し，それを移動させながら撮影することは非現実的である．二つ目の手法は Straight lines have to be straight[6]の方法論を用いた手法である．この手法では，現実世界で直線状の物体を画像中で直線として観測されるためのレンズ歪みパラメータとして推定するため，撮影シーンに直線状の物体が存在してさえいれば，歪みパラメータを推定することができるため，大規模空間を対象とした Projector-Camera システムとの親和性が高い．その中で我々は Alvarez ら[7]の提案手法を採用する．

プロジェクタのレンズ歪み補正法として，カメラの逆投影モデルを用いて Zhang[5]の手法から派生した方法が多く提案されている[8][9][10][11]．しかし，それらの多くではカメラのレンズ歪み補正と同様に，プロジェクタもしくチェッカーボードを動かしながら撮影する必要がある．本稿では，ここでも“Straight lines have to be straight”を活用し，プロジェクタを移動させながらの投影や実物のキャリブレーション物体の撮影を必要とせず，かつ，自動的にプロジェクタのレンズ歪みパラメータを推定する補正手法を提案する．

3. 大規模床面投影システムの概要

3.1. システムの構成

図 1 に示すように，本投影システムは，プロジェクタの上部にカメラを取り付けた複数台の Projector-Camera システムによって構成される．このシステムを天井に設置し，床面に映像コンテンツを提示する．各プロジェクタに取り付けたカメラを用いてプロジェクタの投影像を撮影・分析することにより，プロジェクタ自身のレンズ歪みと，床面と各プロジェクタ面の間の２次元射影変換（ホモグラフィ変換）を推定し，プロジェクタの歪みを補正すると同時に，複数台のプロジェクタからの投影像を統合し，１枚の大きな画面を構成する．キャリブレーション物体としては平面上に格子状の模様が描かれたチェッカーボードを利用する．

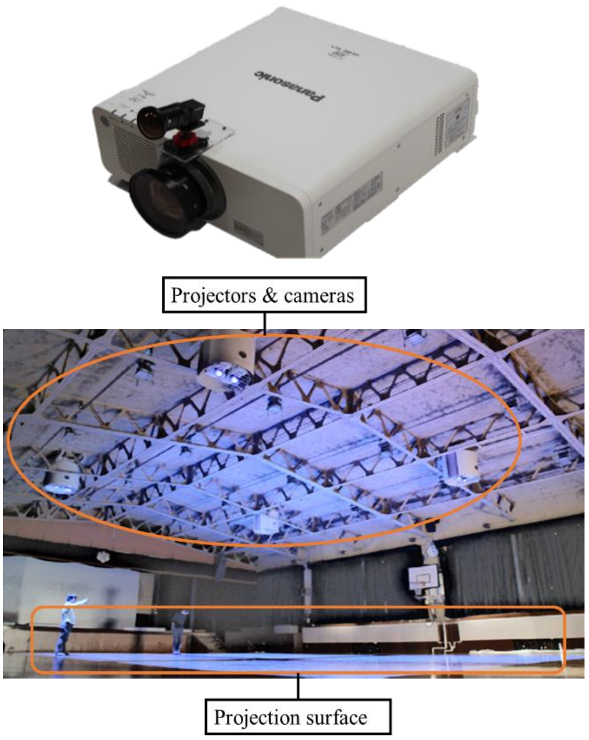

図 1 複数の projector-camera システムで構成される大規模床面投影システム

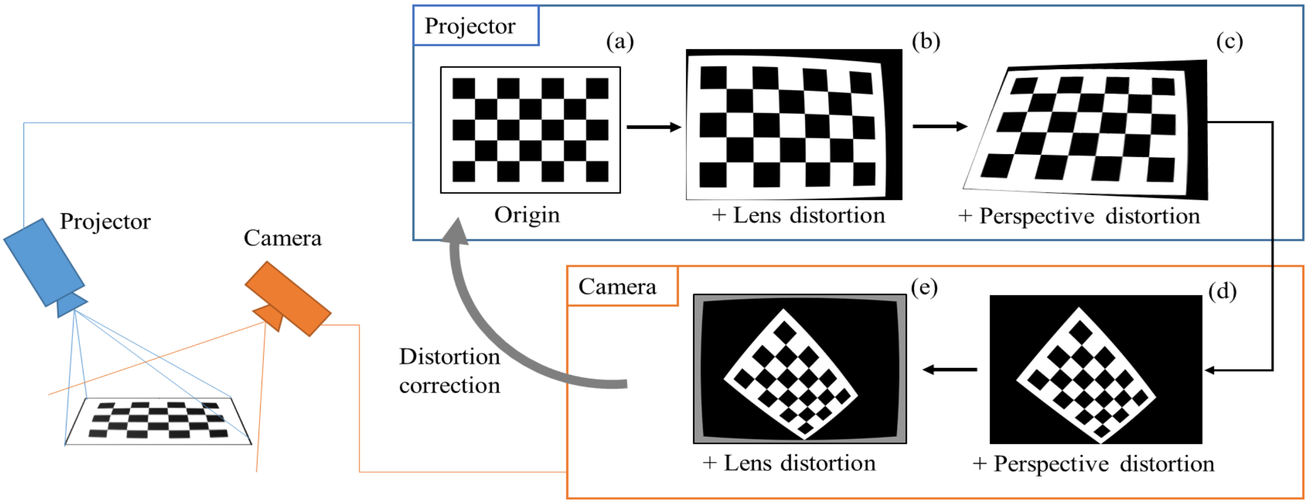

図 2 大規模 Projector-camera システムの歪みモデル：(a)プロジェクタで投影する元画像，(b)プロジェクタのレンズ歪みの影響を受けた投影画像，(c)プロジェクタと投影面との射影変換の影響を受けた投影結果，(d)カメラのレンズ歪みがない状態で撮影した投影結果画像，カメラと投影面との射影歪みの影響が含まれている，(e)カメラのレンズ歪みの影響を受けた撮影結果．

3.2. 歪み及び補正方法

図２は，一つの Projector-Camera システムに存在する歪みモデルを示す．プロジェクタからの投像をカメラで撮影した画像には，以下の４種類の歪みが含まれる．

- プロジェクタのレンズによるレンズ歪み．
- プロジェクタの光軸と投影平面の角度によって発生する射影歪み．
- カメラの光軸と投影平面の角度によって発生する射影歪み．
- カメラのレンズによるカメラレンズ歪み．

このような混在する複数の歪みのパラメータを同時に推定するのは複雑かつ困難な問題である．そこで我々は，四つの歪みのパラメータを一つずつ推定する．理想的な射影歪みパラメータの推定は，投影画像と撮影画像の間が線形変換を満たすことを前提とするが，レンズ歪みの存在によって非線形変換が含まれるため，複数の視点からチェッカーボード画像を撮影することが不可能な状況においては正確な射影歪みパラメータの推定が困難である．一方で，射影歪みが存在しても，Straight lines have to be straight の方法論により，それに影響されずにレンズ歪みパラメータを推定することが可能であるため，我々はレンズ歪みを先に補正し，その上で射影歪み補正を行う．

プロジェクタのレンズ歪みパラメータの推定にはカメラで投影結果を撮影した画像が必要であり，その際にはカメラレンズ歪みが存在しないことが望ましいため，提案手法では，カメラレンズ歪補正を先に行い，その後にプロジェクタのレンズ歪み補正を行い，最後にレンズ歪みのない状態で射影歪みパラメータを推定する．

4. カメラのレンズ歪み補正

カメラレンズ歪みのモデルは式(1)で表される．(x,y)は補正前の座標であり，$(\hat{x},\hat{y})$は補正後の座標である．r は点(x,y) と歪み中心(x_c,y_c)との距離を表しており，(x_c,y_c) はカメラで撮影した画像の中心に位置する．k_1,k_2 は歪みパラメータである．

$$\begin{cases}(\hat{x}-x_c)=(1+k_1r^2+k_2r^4)(x-x_c)\\(\hat{y}-y_c)=(1+k_1r^2+k_2r^4)(y-y_c)\end{cases} \tag{1}$$

実世界中のある直線l をカメラ画面へ写像した点群を$\{(x_{l,i},y_{l,i})\}$とし（l = 1,…, N, i =1,…, N_l），それらを補正した結果を$\{(\hat{x}_{l,i},\hat{y}_{l,i})\}$とする．$\{(\hat{x}_{l,i},\hat{y}_{l,i})\}$ の分散共分散行列を式(2)によって算出する．ここで，$\overline{\hat{x}_{l,i}}$，$\overline{\hat{y}_{l,i}}$ は$\{\hat{x}_{l,i}\}$と$\{\hat{y}_{l,i}\}$ の平均値を表す．

$$\hat{S}^l(k_1,k_2)=\begin{pmatrix}\hat{S}^l_{xx} & \hat{S}^l_{xy}\\ \hat{S}^l_{xy} & \hat{S}^l_{yy}\end{pmatrix} \tag{2}$$
$$\equiv\frac{1}{N_l}\begin{pmatrix}\sum_{i=1}^{N_l}(\hat{x}_{l,i}-\overline{\hat{x}_{l,i}})^2 & \sum_{i=1}^{N_l}(\hat{x}_{l,i}-\overline{\hat{x}_{l,i}})(\hat{y}_{l,i}-\overline{\hat{y}_{l,i}})\\ \sum_{i=1}^{N_l}(\hat{x}_{l,i}-\overline{\hat{x}_{l,i}})(\hat{y}_{l,i}-\overline{\hat{y}_{l,i}}) & \sum_{i=1}^{N_l}(\hat{y}_{l,i}-\overline{\hat{y}_{l,i}})^2\end{pmatrix}$$

直線 l が画面中に N 本存在する場合，画面のレンズ歪みの度合いは，N 本の直線上に並ぶ点群の真直度によって表される．式(3)は，真直度を反映するエネルギー関数であり，E の値が低いほど真直度が高い．

$$E(k_1,k_2)=\frac{1}{N}\sum_{l=1}^{N}\left(\hat{S}_{xx}^{l}\hat{S}_{yy}^{l}-\left(\hat{S}_{xy}^{l}\right)^2\right) \tag{3}$$

Cauchy-Schwarz 不等式により，$E(k_1,k_2)$の値はレンズ歪みの程度が小さいほど減少し，歪みのない場合に 0 になる．Alvarez ら[7]が提案した代数アプローチを用いて$E(k_1,k_2)$の最小化問題を解決することによって，最適なk_1,k_2を推定する．

図 3 レザー墨出し器

但し，カメラの視野には，信頼性の高い結果を推定するための十分な直線が存在することが保証できないため，我々は図３に示すレザー墨出し器を用いて投影面に直線を数本投影する．投影したレザーラインの撮影結果から，Molder ら[12]が提案したレザーライン検出手法を用いて，サブピクセル精度で点群$\{(x_{l,i},y_{l,i})\}$を生成することが可能である．レザーライン検出結果の一例は図４に示す．

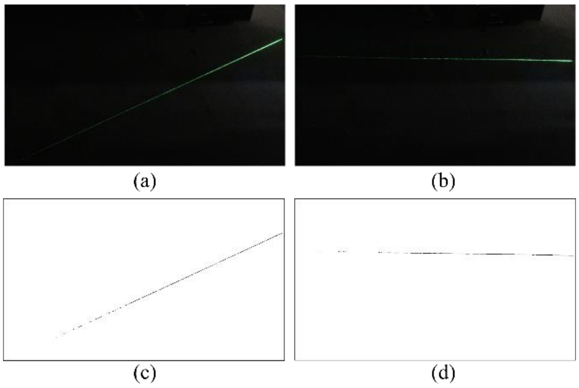

図 4 (a)(b)レザー墨出し器で投影したレザーライン，(c)(d) レザーライン検出アルゴリズムで生成したサンプル点群．

5. プロジェクタレンズ歪み補正

プロジェクタの光学系はカメラの逆モデルと見なせるため，プロジェクタのレンズ歪みモデルを以下の式とする．

$$\begin{cases}\hat{x}-x_c=\left(1+k_1r^2+k_2r^4\right)(x_0-x_c)\\ \hat{y}-y_c=\left(1+k_1r^2+k_2r^4\right)(y_0-y_c)\end{cases} \tag{4}$$

このモデルは式(1)と似ているが，ここでは(x_0,y_0)はプロジェクタのイメージバッファにある元画像ピクセルの正確な座標であり，$(\hat{x},\hat{y})$は投影結果において歪んだピクセル位置である．rは(x_0,y_0) と (x_c,y_c)の距離である．歪を補正するために，式(5)を用いて元画像ピクセル位置(x_0,y_0)を(x',y')に pre-warp する．すると投影結果において $(\hat{x},\hat{y})$は正確な座標(x_0,y_0)に補正される．ここで，k_1'とk_2'は pre-warp 用の歪みパラメータである．

$$\begin{cases}x'-x_c=\dfrac{x_0-x_c}{1+k_1'r^2+k_2'r^4}\\ y'-y_c=\dfrac{y_0-y_c}{1+k_1'r^2+k_2'r^4}\end{cases} \tag{5}$$

プロジェクタの光軸と一致しないカメラを用いて投影結果を観測しているため，実際の投影結果における点群のプロジェクタ面座標$(\hat{x},\hat{y})$が獲得できず，$(\hat{x},\hat{y})$のカメラ面への投影座標のみが直接に獲得可能である．それをプロジェクタ面座標に逆投影するために，プロジェクタ面とカメラ面の間のホモグラフィ行列を用いて２次元射影変換を施す必要があるが，それが目標関数にさらに 8 個の未知数を加え，Alvarez ら[7]が提案した代数アプローチが通用できなくなる．

この問題を解決するために，我々は反復的に数本の直線を投影し，その結果を撮影する．そしてカメラ面において式(2)と式(3)を用いて線の真直度を計算して最適なパラメータを推定する．尚，目標のエネルギー関数は線の真直度だけを評価しており，それが２次元射影変換に影響されず，故にレンズ歪み補正の段階でホモグラフィ行列の推定は不要である．

5.1. レンズ歪み中心の初期推定

大規模空間に映像を投影するプロジェクタは，レンズシフト機能によってレンズ歪み中心が投影画面の中心座標と一致しないケースがあるため，プロジェクタの歪み中心(x_c,y_c) を推定する必要がある．本節では，図５に示すように歪み中心のおおよその位置を推定する方法について述べる．この推定結果をさらなる最適化のための初期推定値として使用する．

式(4) に示すレンズ歪みモデルから，k_1,k_2及び r の値に関わらず歪み中心を通過する横線は縦方向に歪まず，同様に歪み中心を通過する縦線は横方向に歪まないことが分かる．即ち，歪み中心を通過する横線，縦線の投影結果は，カメラから観測しても直線となる．この性質を利用し，プロジェクタ面に於ける全ての横線と縦線を一本ずつ投影し，その内一番真直度の高い横線と縦線の交点座標を結果とする．

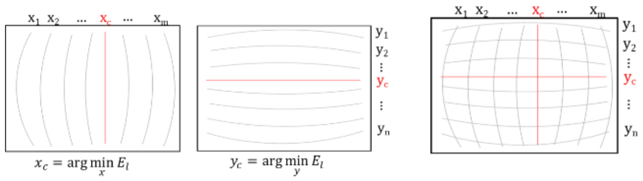

図 5 プロジェクタのレンズ歪み中心の初期推定方法：推定結果は最も真直ぐとなっている縦線と横線の交点である.

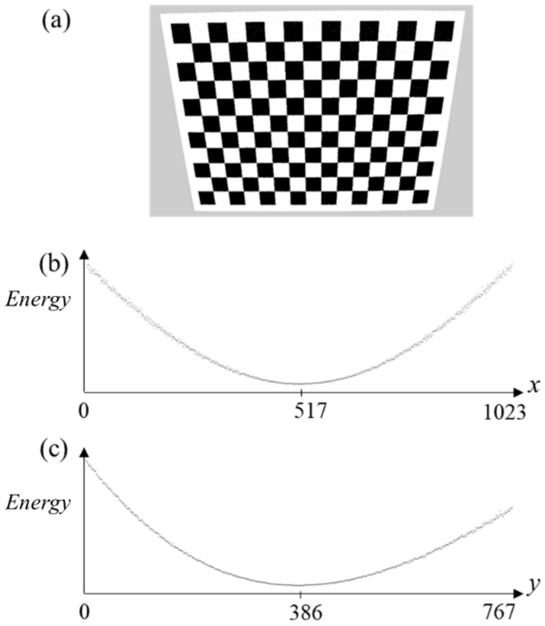

図 6 (a)シミュレーションで生成したチェッカーボード画像の投影をカメラで撮影した結果，(b)縦線のエネルギー，(c)横線のエネルギー.

この方法の有効性についてシミュレーション実験を行って検証した．実験ではプロジェクタ(1024 画素×768 画素)のピクセルをプロジェクタレンズ歪みと射影歪み両方を含めた状態でカメラ面にマッピングすることで，投影の撮影結果をシミュレートする．プロジェクタのレンズ歪み中心を画面の中心に設定してある．レンズ歪みパラメータ k_1，k_2 の値はそれぞれ-0.5e-7, 0.5e-14 である．射影歪みを表すホモグラフィ行列 H_{pc} は撮影結果を再現できるように適切に設定される．全部のピクセルマッピングに[-0.2,+0.2]のホワイトノイズを加えてピクセルマッピングの誤差を再現する．図 6 (a)はチェッカーボード画像を投影する際にカメラから観測した画像のシミュレーション結果の一例である．図 6 (b)と(c)はそれぞれ縦線の x 座標と横線の y 座標の変化と伴う線のエネルギー推移である．エネルギーの全域最小値は x=517, y=386 に位置する．結果から，線エネルギーへの影響が，ノイズより線の座標の方が圧倒的に大きいことが分かる．従って，線同士の真直度の違いは微小なように見えても，推定結果はノイズに大きく左右されない．但し，ここの推定結果はピクセル精度だけであり，ノイズの影響で数ピクセルの誤差が存在するが，さらなる最適化のための初期推定値としては十分である.

5.2. レンズ歪みパラメータ推定

プロジェクタのレンズ歪みパラメータ k_1', k_2', x_c, y_c,を推定するために，Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno (BFGS)法を用いて式(6)に表す最適化問題を解く．E はカメラ画像から検出した線の平均エネルギーであり，線はプロジェクタで床面に投影したものである.

$$\{\hat{k}_1', \hat{k}_2', \hat{x}_c, \hat{y}_c\} = \boldsymbol{argmin}_{k_1', k_2', x_c, y_c} \boldsymbol{E} \qquad (6)$$

BFGE 法は反復法のため，反復ごとに以下の手順で目標関数の値 E と偏微分の近似値を計算する.（１）現在のパラメータの中間推定結果を用いて pre-warp したパターン画像を投影する.（２）投影結果を撮影する.（３）撮影結果から直線を検出し, 平均エネルギーE を計算する.（４）中間推定結果を微小に変更してから（１）～（３）を繰り返すことで，数値計算で E の偏微分値を求める.

この最適化問題には四つのパラメータがあるため，反復ごとに最低 9 枚のパターン画像（目標関数の値の計算で 1 枚と偏微分の計算で 8 枚）を投影する必要がある．また，偏微分の近似値を計算する際に，パラメータの微小な変更による E の変化も微小のため，結果は線の検出誤差に敏感である．さらに，画像 1 枚から検出可能な線の本数と線上の点の数はカメラの解像度によって制限されている．線と点の数の減少により画像の信号ノイズ比（SNR）が低減し，推定誤差が増加する．この問題は毎回の反復で多くのパターン画像を投影し, より密な点群を検出することで解決できるが，処理時間が著しく増加する．次の節で，予めプロジェクタからカメラへのピクセルマップを生成することで上述の問題を解決する方法について述べる.

5.3. プロジェクタ･カメラ･ピクセルマップ

前述のとおり，反復ごとに投影と撮影を繰り返すのは時間がかかる．そこで我々は，パターン光投影法 *line-shift*[13]を用いて, 全てのプロジェクタピクセルをサブピクセル精度でカメラ座標に変換するマップを予め作成する．それにより，以降の投影画像は実際に投影せず，作成したマップを用いて投影と撮影を仮想的に行うことで，投影結果の全ピクセルのカメラ面座標をサブピクセル精度で獲得することができる．この方法により，実際の投影で必要なパターン画像枚数が大幅に減少するため，処理時間を大幅に短縮できる．線の検出誤差の問題が残るが，全ての仮想的撮影におい

て同一のマップを使用するため，誤差は静的で同一である．結果として，目標関数の値 E の変化は完全にパラメータの変化によるものであり，ランダム性のある検出誤差とは無関係であることが保証できる．図 7 は，幅が 32 ピクセルの投影パターンの例を示す．その中の 3 枚は Gray code パターンであり，他の 10 枚は互いに 10 画素を空いている線を 1 画素ずつずらす Line-shifting パターンである．

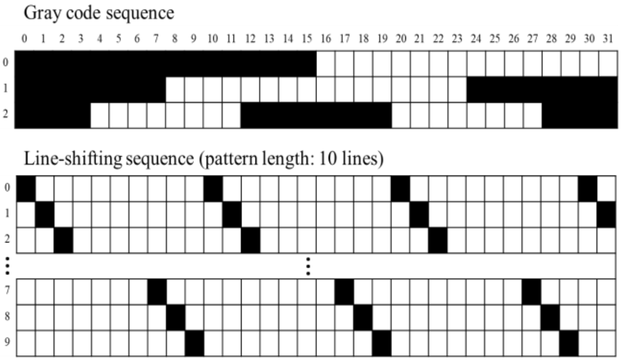

図 7 幅が 32 画素の一次元画像の Gray code と line-shifting パターン．

一般的に，幅 N 画素で線間距離が 10 画素のパターンを使用する場合に，必要な Gray code パターンの枚数は($\log_2$(N)-2) × 2 （逆パターンを含む）で，line-shifting パターンの枚数は 10 である．解像度 1024 画素×768 画素のプロジェクタの場合に，必要な投影パターン数は 26×2（行と列パターンを両方含む）．反復ごとに実際に投影する場合に，ピクセルマップと同様な分解能を得るために投影する線の本数はプロジェクタ画面の幅＋高さ（画素）である．複数の線を同時に投影しても曖昧さの問題がないと想定して，歪み中心の初期推定で最低 10×2 枚のパターンが必要であり，最適化の反復ごとに 10×2×9 枚のパターンが必要である．従って，ピクセルマッピングによって，必要とされる投影パターン数が大幅に減少している．

6. 射影歪み補正

プロジェクタとカメラのレンズ歪みが補正された状態で射影歪み補正を行う．まず，床面にチェッカーボードなどの特定パターンを投影し，カメラで投影結果を撮影する．その後，特徴点を検出することによって撮影画像と投影画像間の対応点を獲得し，特徴点座標の対応関係からプロジェクタとカメラのホモグラフィ行列 H_{pc} が計算できる．

同様に，床面座標系を定義することで，特徴点（e.g., 体育館床面のコートラインの交点など）の床面座標とカメラ面座標の対応関係から，カメラと床面のホモグラフィ行列 H_{cf} が計算できる．

最後に，以上で計算した二つのホモグラフィ行列と式(7)から，プロジェクタと床面のホモグラフィ行列 H_{pf} が計算できる．

$$\boldsymbol{H_{pf}} = \boldsymbol{H_{pc}} \times \boldsymbol{H_{cf}} \tag{7}$$

H_{pf}^{-1}を用いてプロジェクタの元画像を pre-warp することで,投影面において正しい投影結果が獲得できる．ここで, H_{pf} がプロジェクタ座標を床面の絶対座標に変換するように，定義された床面座標系は全てのプロジェクタとカメラに対してグローバルである．

7. 実験

7.1. 定量的実験

シミュレーションで定量的実験を行った．実験でプロジェクタのレンズ歪み中心座標は(512,384)に設定され，k_1', k_2'の真値はそれぞれ-1.023e-7 と 4.387e-14 に設定されている．ホワイトノイズの範囲が異なる三つのプロジェクタ・カメラ・ピクセルマップ（noise =±0.1，±0.3，±0.5）を生成し，三つのマップに基づいたキャリブレーション結果は表 1 に示す．

表 1． プロジェクタレンズ歪み推定結果

Variables	***k₁'* *(1e-7)***	***k₂'* *(1e-14)***	**Distortion center**
Ground truth	-1.023	4.387	(512, 384)
Noise = ±0.1	-1.025	4.428	(512.104, 383.858
Noise = ±0.3	-1.024	4.404	(511.214, 383.966
Noise = ±0.5	-1.012	4.138	(512.726, 384.681)

実験結果から，k_1'とk_2'と歪み中心座標が真値に収束することが分かる．k_2'の収束結果が若干不安定な原因として，k_1'と比べてk_2'は目標関数への貢献が少ないからと考えられる．また，三つの結果共に，歪み中心の推定誤差は 1 画素以下である．

7.2. 投影実験

我々は研究室で投影実験を行った．実験環境では，投影領域の大きさはおおよそ 2.5×2.5m^2 で，プロジェクタと投影面の距離はおおよそ 3.5m である．この環境は我々が実際に体育館で構築した投影システム[14]のスケールより小さいが，実験用のプロジェクタは体育館での投影と類似な結果を生み出すように調整され

た．

投影結果の見た目を評価するための投影画像は二種類ある．一つ目は幅 1 画素の線からなるグレードパターンであり，二つ目はカラーブロックパターンである．図 8 (a)に示すように，プロジェクタのレンズ歪みを施さないグレードパターンの投影結果で，線が曲がっており，投影間の継ぎ目の周りに目立つ位置ずれが発生している．図 8 (b)はプロジェクタのレンズ歪みを施さないカラーブロックパターンの投影結果を示す．この結果では，投影間のギャップが線の曲がりと位置ずれより目立つ．図 8 (c)は，提案手法を用いてレンズ歪みを補正した後のグレードパターンの投影結果である．この結果では歪んだ線が真直ぐに戻されており，継ぎ目付近の位置ずれとギャップが殆ど見えなくなっている．図 8 (d)は(c)と同様な結果を得ている．結果の投影面の継ぎ目に細い重なる領域があり，周辺より輝度が高くてシームレスではないが，この問題は輝度正規化処理を追加すれば解決できる．

8. まとめ

本稿では，我々は大規模 Projector-camera システムに適したキャリブレーション手法を提案した．”Straight lines have to be straight”の方法論を活用することで，提案手法はプロジェクタとカメラ，或いは投影面を移動させる必要がなく，且つパターン画像を刷ってあるキャリブレーションボードの使用も不要である．提案手法は投影と撮影の繰り返しに基づいた方法で，処理時間の長い問題が懸念されるが，Projector-camera ピクセルマップを使用すること殆どの投影結果の観測は仮想的に行え，実際に必要な投影パターン数は 52 枚までに減少した．

定量的実験によって，一定のノイズが存在しても，真値に近い推定結果が獲得できることを確認した．投影実験の結果から，射影歪み補正だけを施した投影結果と比べ，提案手法の結果はよりシームレスであることが確認された．

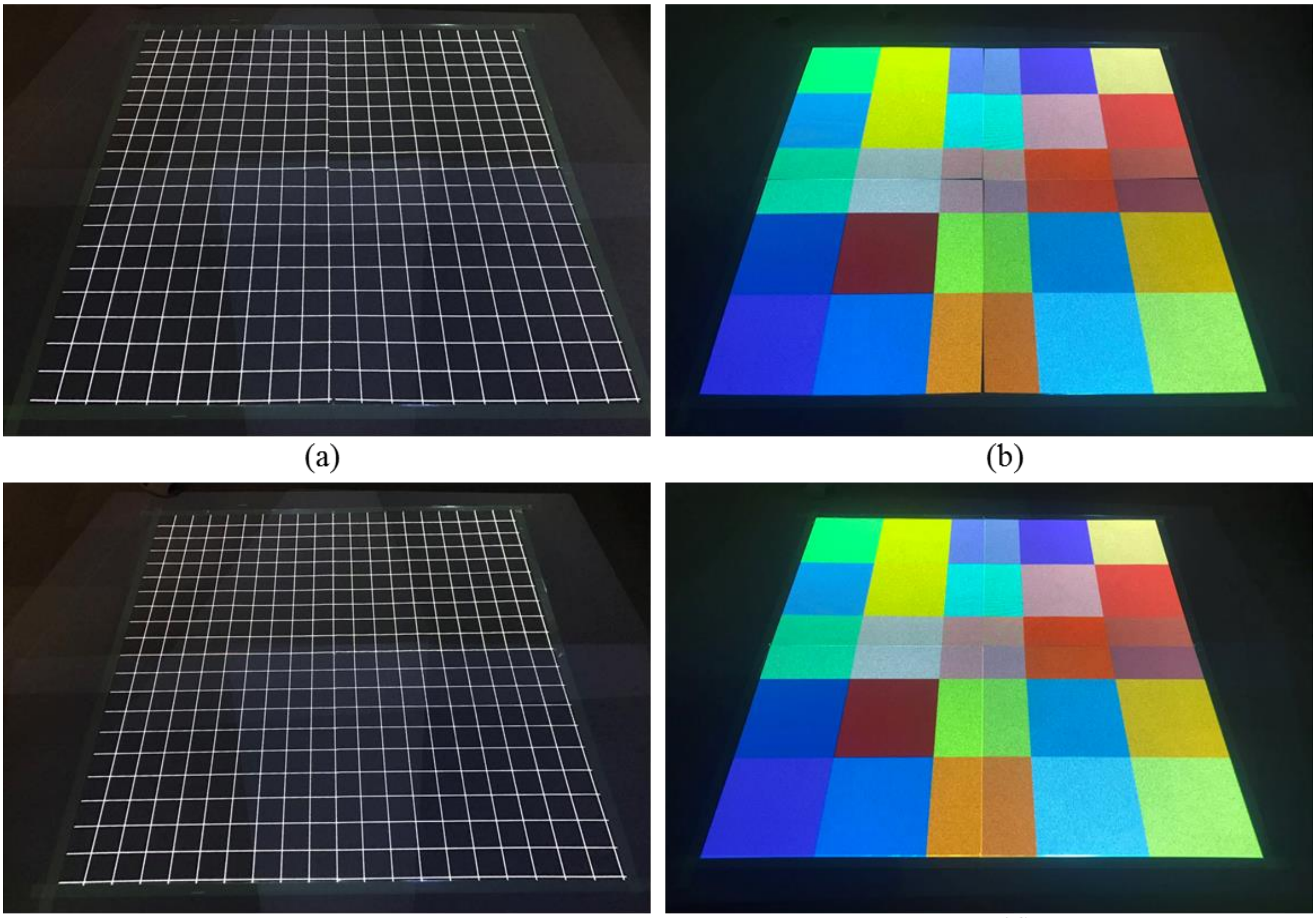

図 8 (a)(b) 射影歪み補正だけを施したグレード画像とカラーブロック画像の投影結果，(c)(d) 提案手法でレンズ歪み補正と射影歪み補正を両方施した投影結果．

文　献

[1] K.Li, H.Chen, Y.Chen, D.Clark, P.Cook, S.Daminakis, G.Essl, A.Finkelstein, T.Funkhouser, A.Klein, Z.Liu, E.Praun, R.Samanta, B.Shedd, J.Singh, G.Tzanetakis, and J.Zheng. Building and Using a Scalable Display Wall System. *Computer Graphics and Applications* vol.20, no.4, pp.29-37, 2000.

[2] R.Raskar, J.Baar, and JX.Chai. A low-cost projector mosaic with fast registration. *Proc.ACCV.* Vol.3. no.3, 2002.

[3] Y.Chen, D.Clark, A.Finkelstein, T.Housel, and K.Li. Automatic alignment of high-resolution multi-projector display using an un-calibrated camera. *Proc. of the conference on Visualization'00.* pp.125-130, 2000.

[4] H.Chen, R.Sukthankar, G Wallace, K.Li. Scalable alignment of large-format multi-projector displays using camera homography trees. *Proc. of the conference on Visualization'02.* pp.339-346, 2002

[5] Z,Zhang. A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence,* vol.22, no.11, pp.1330-1334, 2000.

[6] F.Devernay, and O.Faugeras. Straight lines have to be straight. *Machine vision and applications,* vol.13, no.1, pp.14-24, 2001.

[7] L.Alvarez, L.Gómez, and JR.Sendra. An algebraic approach to lens distortion by line rectification. *Journal of Mathematical Imaging and Vision,* vol.35, no.1, pp.36-50, 2009.

[8] R.Legarda-Sa, T.Bothe, and WP.Ju. Accurate procedure for the calibration of a structured light system. *Optical Engineering,* vol.43, no.2 , 464-471, 2004.

[9] Martynov, JK.Kamarainen, and L.Lensu. Projector calibration by ‘inverse camera calibration’. *Image Analysis 2011*, pp.536-544, 2011.

[10] X.Fu, Z.Wang, H.Kawasaki, R.Sagawa. Calibration of Projector with Fixed Pattern and Large Distortion Lens in a Structured Light System. *MVA 2013*, pp.222-225, 2013.

[11] D. Moreno and G. Taubin. Simple, accurate, and robust projector-camera calibration. In *Proc. IEEE 3D Imaging, Modeling, Processing, Visualization & Transmission 2012*, pp.464–471, 2012.

[12] Molder, A., Martens, O., Saar, T., Land, R. Laser line detection with sub-pixel accuracy, *Elektronika ir Elektrotechnika,* vol.20, no.5, pp.132-135, 2014.

[13] Gühring, Jens. Dense 3-D surface acquisition by structured light using off-the-shelf components. *Proc. of Videometrics and Optical Methods for 3D Shape Measurings*, vol. 4309, pp. 220-231, 2001

[14] 謝淳, 亀田能成, 北原格, 大田友一, 鈴木健嗣, “大規模空間における Interactive Projection Mapping システム,” 電子情報通信学会 HCG シンポジウム論文集, pp.283-286, Dec. 2015.