Vol.2012-CVIM-180 No.35
2012/1/20

平面板を用いたプロジェクタの効率的なキャリブレーション手法の提案

清田祥太[†1]　川崎洋[†1]
古川亮[†3]　佐川立昌[†2]

近年，プロジェクタとカメラを用いた 3 次元計測に関する研究が盛んになってきており，プロジェクタのキャリブレーションの必要性が高まってきている．しかし，プロジェクタのキャリブレーション方法は，今のところ完全には確立されていない．これまでのプロジェクタのキャリブレーション手法では，専用のツールや特殊な校正儀を用いたり，またグレーコードのような特殊なパターンを撮影するなどして，プロジェクタの座標情報を手に入れる必要があるため，多くの時間や手間を必要としていた．そこで，本研究ではプロジェクタとカメラを短時間でキャリブレーションでき，さらに特殊な校正儀も必要としない，効率的なキャリブレーション手法を提案する．

Efficient Projector Calibration Method using Plane with Checkerboard Pattern

Shota Kiyota,[†1] Hiroshi Kawasaki,[†1]
Ryo Furukawa[†3] and Ryusuke Sagawa[†2]

In recent years, development on 3D measurement system using camera and projector has been intensively conducted and stable and accurate projector calibration technique is strongly required. Although camera calibration algorithm is now widely available, *e.g.* OpenCV, projector calibration is not yet. Since current projector calibration method requires special calibration box and/or multiple projections of special patterns to retrieve one-to-one correspondences, it is a time consuming and labarious task. In this paper, we propose an efficient projector calibration method using plane with checkerboard pattern so that calibration process can be simple, accurate and stable. Successful experimental results are also shown in the paper.

1. はじめに

近年，様々な分野で 3 次元計測装置による 3 次元形状の取得の研究が盛んに行われている．３次元形状の復元手法は，これまでに様々な手法が提案されてきているが，大きくパッシブステレオ方式とアクティブステレオ方式に分ける事が出来る．パッシブステレオ方式は，複数の画像セットのみから 3 次元形状復元を行うことができる利点があるものの，対応点探索問題や密な形状計測が難しいといった問題がある．一方，アクティブステレオ方式は，レーザーやスリット光などを対象に投影し，その様子を撮影することで 3 次元計測を行う．この方式だと対応点問題がなく密な 3 次元形状が計測可能なため，実用上ではこの方式が用いられることが多い．一般にアクティブステレオ方式による 3 次元計測では，事前に計測装置の厳密な校正が必要である．光パターン投影法によるシステムにおいては，プロジェクタとカメラの内部パラメータおよび，計測装置間の外部パラメータが必要となってくる．特にプロジェクタはその性質上，プロジェクタから見た画像を取得できないため，プロジェクタの校正には特殊な校正儀を用いたり、対応点取得のためにグレーコードなどの特殊なパターンを投影するなどの必要性がある．また，外部パラメータは，カメラとプロジェクタの配置を変更するたびに必要となるため，計測システムとしての利便性がこれまで大きく損なわれていた。この問題を解決するため自己校正する手法も提案されているが[1),9),10)] 精度が対応点に依存するためグレーコードパターンの投影が必須であった[2)]．このように，プロジェクタの内部や外部パラメータ推定には多くの課題が残されたままであった．現在カメラの内部校正に関しては研究が進んでおり，校正手法が確立されている．一方プロジェクタの校正に関しては完全に確立されているとはいえない．

そこで, 本研究では，平面板を用いた校正手法により，効率的なプロジェクタの校正手法を提案する. 提案手法の目的は，短時間でキャリブレーションでき、さらに特殊な校正儀も必要としない手法の開発である．提案手法では，今まで空間コード化法により取得していたプロジェクタの座標情報を，カメラとプロジェクタの間のホモグラフィ行列を計算する事により取得する．具体的には平面板に市松模様を印刷し，さらにプロジェクタからも市松模

†1 鹿児島大学
Kagoshima University
†2 産業技術総合研究所
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology
†3 広島市立大学
Hiroshima City University

ⓒ 2012 Information Processing Society of Japan

様を投影する．それぞれのパターンは色情報により分離される．これにより，カメラとプロジェクタの両方を同時に校正する事が出来る．さらに平面板，カメラ及び，プロジェクタ間の位置姿勢が同時に最適化されるため，短時間で高精度な外部校正も実現出来る．

2. 関 連 研 究

アクティブ方式による 3 次元計測には事前の精密な校正 (キャリブレーション) が必要となる．具体的には焦点距離や画像中心やレンズ歪といった機器固有の内部パラメータと装置の位置姿勢を表す外部パラメータの校正が必要となる．そのため多くの校正手法が提案されているが，大別して強校正 (hard-calibration) と自己校正 (self-calibration)[5),6)] とに分けられる．前者は 3 次元形状が既知のパターンなどを観察することで校正を行う．後者は，シーンに何の情報も持たず画像上の対応関係のみから校正を行う手法である．強校正は，一般的に精度が高く安定してパラメータを推定することができるが，特殊な校正器具が必要であり手間が掛かるなど利便性が低いという問題がある．自己校正では，複数枚の画像の対応関係のみから校正を行うので利便性は高いが，ノイズの影響に弱く不安定であるという問題がある．

単純なプロジェクタの内部校正手法としては，グレーコードと呼ばれるプロジェクタの座標情報を持つ画像と既知のカメラキャリブレーション手法とを組み合わせる手法がある[2),8)](図 1)． この方法では形状が既知である市松模様を描いた平面板を，複数枚撮影する事でカメラの内部校正を行う. さらにグレーコードによる対応点情報を用いてプロジェクタから見た平面板を合成し, プロジェクタの内部校正を行う．この手法のメリットは，平面板は簡単に入手できる為，容易に校正を行える点にあり，カメラのキャリブレーション手法は OpenCV にも実装されている．一方，この手法のデメリットはグレーコード画像を取得するには空間コード化法による平面板のスキャンが必要であり，スキャン中は平面板を動かす事ができず，一枚スキャンするのに多くの時間が必要であるという点がある．さらに，この手法では，複数枚の画像を必要とする為に平面板とカメラ間の位置姿勢及び，平面板とプロジェクタ間の位置姿勢が毎回変わる為，プロジェクタとカメラ間の位置姿勢を推定することが難しい．もう一つの手法として，専用の校正儀を用いてカメラとプロジェクタの内部校正を行う手法がある．これは形状既知の特殊な校正儀 (キャリブレーションボックス) を用意し，それを用いて内部及び外部校正を行うものである[7),8)]．この手法のメリットは一度のスキャンで内部及び外部校正を行う事が出来る点である．一方でデメリットとして，特殊な校正儀を必要とする為に，どこでもすぐに校正を行う事が出来ないという点があげられる．

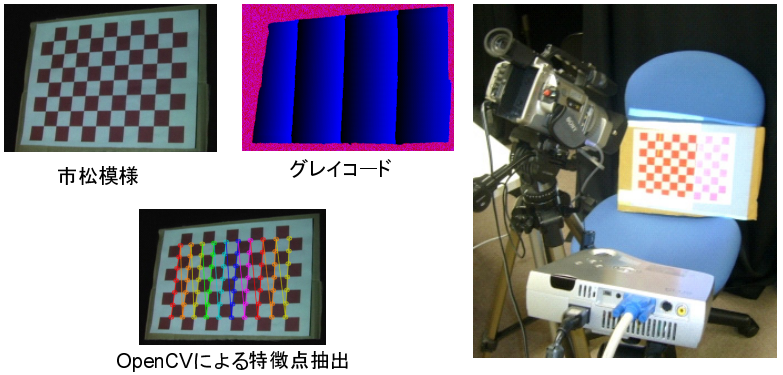


図 1 平面板とグレーコードを用いた校正

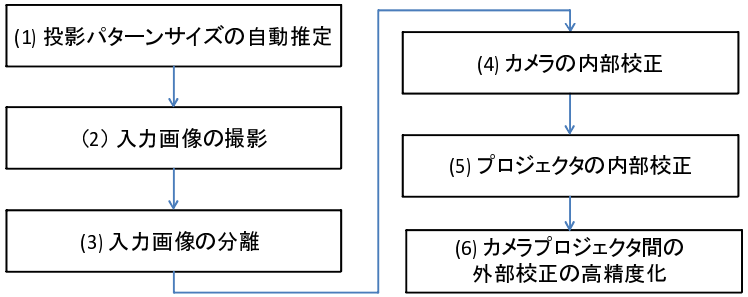


図 2 校正のフローチャート

3. プロジェクタ・カメラキャリブレーションシステム

3.1 手法の概要

提案手法は，図 2 に示される大きく 6 つの行程に分かれている． 提案手法では，まず投影パターンサイズの自動推定を行う．これはカメラとプロジェクタの画角や配置などが毎回異なるため効率的なキャリブレーションには必須である．次に入力画像を撮影し，入力画像の分離を行う．本手法では，入力画像として，市松模様を印刷した平面板に，プロジェクタから市松模様を投影しているが，2 つのパターンが重なりあったままでは校正することは出来ない．そこで，この画像を平面板側の画像と，プロジェクタ側の市松模様に分離し，

ⓒ 2012 Information Processing Society of Japan

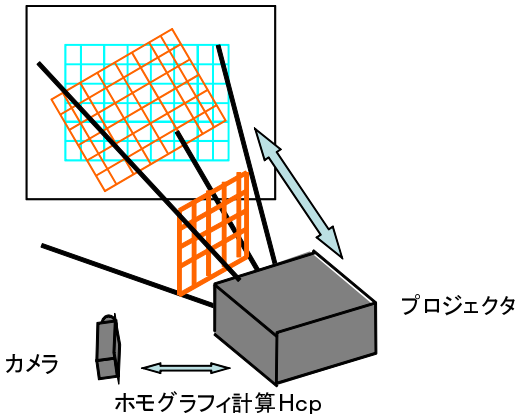


図 3 カメラ・プロジェクタシステムによる校正の様子

その分離した後の 2 枚 1 セットの画像を用いることで校正を行っている．その後カメラとプロジェクタの内部校正を行う．プロジェクタの校正は、カメラとプロジェクタ間のホモグラフィ行列を用いてカメラと同様の方法で行っている．その際，本論文では単純にホモグラフィ行列を求めるだけでなく，プロジェクタのレンズ歪を考慮した手法となっている点が従来と異なる．最後に推定した内部変数を用いて再投影誤差を求め平面板とカメラ，プロジェクタの位置姿勢を LM 法を用いて最適化を行う．このように提案手法では，平面のみによる簡易なセットアップで外部パラメータを高精度に求めることが出来る実用性の高い手法となっている．

3.2 システムの構成

提案手法における必要機材は，校正を行いたいカメラ，プロジェクタからなる (図 3)．校正儀としては Cyan 色の市松模様を印刷した平面板を利用し，これにプロジェクタから黄色の市松模様パターンを投影し校正を行う．使用する市松模様を図 4 に示す．

市松模様を印刷した平面板は市松模様のサイズよりも少し大きめのものを準備する．カメラとプロジェクタは位置を固定する必要があるため，三脚などの固定機材があれば望ましい．校正する際には，図 3 のような位置関係にカメラとプロジェクタを配置する．それぞれの位置関係に大きな制約は無い．校正に使用する入力画像は市松模様を印刷した平面板に，パターンサイズ既知の推定済みの投影パターンを投影し，撮影を行うことで取得する．このとき，平面板を動かしつつ複数枚の撮影を行う．撮影する際に注意すべき点は，平面板とプロジェクタの両方の市松模様がカメラの画角内に収まっていなければならないという点である．片方でも画角からはみ出していると，うまく特徴点が抽出されずその画像は無駄になってしまう．このため本論文では投影パターンの自動調整手法を実装した．十分な精度を実現するためには 30 枚ほどの撮影が望ましい．

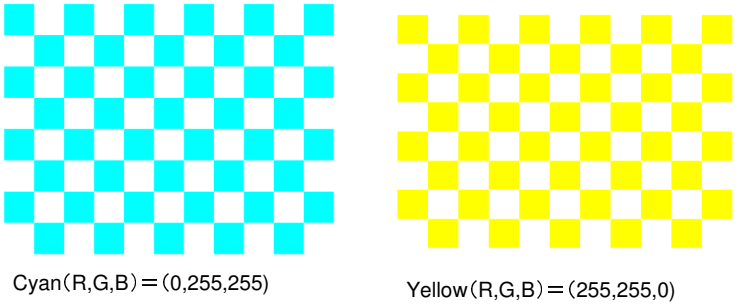


図 4 校正に使用するパターン

3.3 キャリブレーションの原理

本提案手法における，内部校正は OpenCV にも実装されている Z.Zhang の手法[3] を用いている．このため、平面板があれば実行可能である．Zhang による校正ではカメラの内部変数しか求めることが出来ない．そこで本手法では，カメラとプロジェクタ間のホモグラフィ行列を求める事で，プロジェクタの内部校正にも Zhang による校正を適応させる．カメラの内部校正の際に用いた座標を，ホモグラフィ行列を用いてプロジェクタ平面に投影し，投影された点をもとに Zhang の手法を用いてプロジェクタの内部校正を行う．ところで，レンズ歪はホモグラフィ変換では解消されないためそのための対応手法も合わせて提案する．この方法を用いれば，特殊な撮影方法をせずに，プロジェクタの座標情報を計算でき，効率的にカメラとプロジェクタの内部校正を行うことが出来る．また，プロジェクタ・カメラ間の校正は最後に LM 法による最適化により実現する．

4. アルゴリズム

4.1 投影パターンサイズの自動調整

入力画像の撮影を行う前に，投影するパターンサイズを調整する必要がある．これは，準備した平面板のサイズ及び，平面板とプロジェクタ・カメラ間の位置関係がどのようなセッ

ⓒ 2012 Information Processing Society of Japan

トアップであっても，ロバストかつ高精度なキャリブレーションを行えるようにする為に必須である．まず，初期投影パターンを，用意した平面板に投影し，投影している画像をカメラで撮影し，初期画像を得る．その際，平面板と，プロジェクタから投影している市松模様の両方がカメラの画角内に収まるように撮影する．カメラと平面板との距離はできる限り近づけて撮影を行うのが望ましい．撮影した画像はプログラムの内部で平面板の市松模様とプロジェクタの市松模様とに分離され，それぞれの画像において特徴点を抽出する．この特徴点の座標を用いて適切な投影パターンサイズを計算し新しい投影パターンを出力する．こうして撮影された画像を用いて，内部校正を行う．

4.2 パターンの分離

本手法では 1 枚の入力画像を，平面板側の市松模様と，プロジェクタから投影している市松模様に分離する必要がある．本手法では色情報を用いてこれを行う．分離の様子を図 5 に示す．平面板側の市松模様では Cyan(R,G,B)=(0,255,255)，プロジェクタから投影している市松模様は Yellow(R,G,B)=(255,255,0) を使用している．こうすることにより入力画像の赤プレーンでは平面板側の市松模様のみが，青プレーンではプロジェクタ側の市松模様のみが見える．このためカメラ用には各ピクセルの輝度値の R 以外を 0 にし，プロジェクタ用には B 以外の輝度値を 0 にする．そうすることで，鮮明にそれぞれの市松模様を確認することが出来る．次に分離したカラープレーンの画像において 2 値化処理を行う．ここで通常のカメラ校正と異なり，撮影されたパターンにはプロジェクタで投影されたことによる大きな色むらがある．そこで 2 値化処理は，画像を 12 分割した小さな領域でアダプティブに行っている。そうすることで，よりロバストに 2 値化処理を行うことができ，校正に使えるパターン数が増え精度も向上する．

4.3 カメラキャリブレーション

カメラの内部校正は分離した後の平面板の市松模様を用いて行なっている．本研究では，Zhang の手法を用いている．[3)]

4.4 プロジェクタキャリブレーション

本手法において，プロジェクタの内部校正はホモグラフィ変換を用いて行っている．本手法で用いるホモグラフィ変換の様子を図 6 に示す．ここでホモグラフィ行列の推定はプロジェクタから，市松模様パターンを投影し，これを撮影した画像上でそのコーナーを検出して行う．コーナー位置は，カメラの内部校正と同様に OpenCV を用いて市松模様の特徴点を抽出することで簡単に取得することが出来る．ホモグラフィ行列の計算には射影変換前の画像と射影変換後の画像における同一点の座標が必要である．プロジェクタの射影変換の

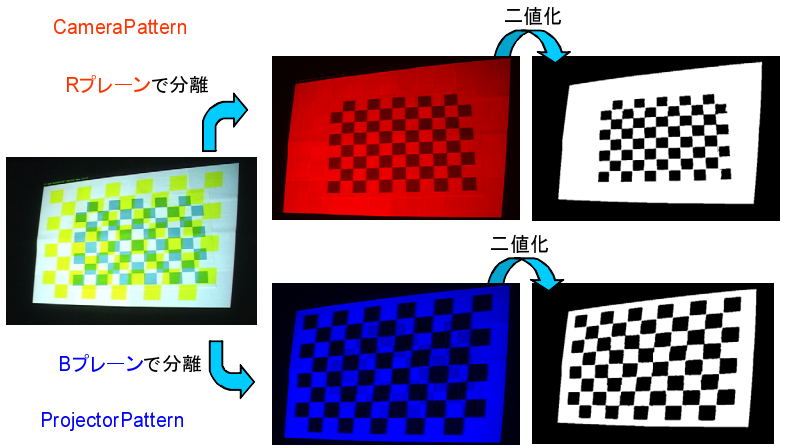


図 5 色情報による画像分離の様子

場合，プロジェクタによって投影している市松模様パターンと，平面板に投影されている市松模様との間の対応点を用いる．プロジェクタから投影される市松模様パターンは既知であり，平面板に投影されている市松模様は検出済みであるため，その対応関係を用いてこの 2 画像間のホモグラフィ行列を計算すれば良い[4)]．ここで一つ注意すべき点としては，検出されたコーナー座標はカメラとプロジェクタ両方のレンズの歪みが加えられている点がある．ホモグラフィ行列を計算する段階ではカメラの内部校正は終わっている為，そこで推定されたレンズ歪の値を用いて画像の歪み除去処理は行なえるものの，プロジェクタの歪みは残ったままである．このため全てのの特徴点を用いてホモグラフィ行列を計算した場合，歪の影響を直接受けてしまうことになる．そのため，本手法におけるホモグラフィ行列の計算には，市松模様の特徴点のうち 4 隅の 4 点だけを用いて初期の計算を行ない，一度プロジェクタの内部校正をした後に，得られたプロジェクタのレンズ歪を用いて平面板の分離画像からプロジェクタのレンズ歪を取り除いた画像を作成し，2 回目の内部校正を行なっている．こうすることで，プロジェクタのレンズ歪の影響が抑えられる．こうして得られたホモグラフィ行列を用いて，カメラの内部校正の際に使用した点を，射影変換前のプロジェクタ平面に逆射影変換を行う．逆射影変換により得られた座標を元に，カメラと同様 Z.Zhang の手法によりプロジェクタの内部校正を行うことができる．

ⓒ 2012 Information Processing Society of Japan

Vol.2012-CVIM-180 No.35
2012/1/20

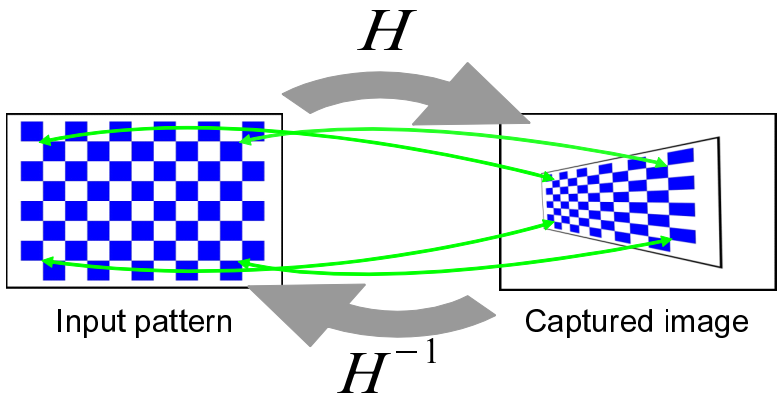


図 6 ホモグラフィ変換の様子

4.5 カメラ・プロジェクタ間の外部パラメータの高精度化

本手法では入力画像として約 30 枚の画像を使用している．そのため，推定された位置姿勢も各画像ごとに 6 変数ずつ存在していることになる．更に，平面板を動かしつつ撮影を行なっているために，得られた位置姿勢の値は全てが独立しており一定ではない．このため各画像から直接得られた位置姿勢を用いて，カメラとプロジェクタ間の位置姿勢を計算したとしても，全画像で首尾一貫した値を得ることはできない．そこで，本手法では Levenberg-Marquardt 法 (LM 法) を用いて各オブジェクト間の位置姿勢の最適化を行なっている．LM 法には推定した平面とカメラ間の位置姿勢と，カメラとプロジェクタ間の位置姿勢を最適化する値として用いた．そのため推定するパラメータ数は

6(平面とカメラ間の位置姿勢)*画像の枚数+6(カメラとプロジェクタ間の位置姿勢)

となる．従って，30 枚の入力がある場合は 186 個となる．また以下の再投影誤差の計算の際に必要となる平面とプロジェクタ間の位置姿勢は，平面とカメラ間の位置姿勢とカメラとプロジェクタ間の位置姿勢を合成することにより計算される．カメラとプロジェクタそれぞれで画像ごとの再投影誤差を計算し，それを合計したものを LM 法におけるコスト関数とする．画像の枚数を n 特徴点の数を p カメラ画像における再投影誤差を Ec プロジェクタ画像における再投影誤差を Ep と置くと，その値は以下のようになる

$$E = \sum_{i=0}^{num} \sum_{a=0}^{point} (E_c + E_p) \tag{1}$$

これにより，カメラ、プロジェクタ間の位置姿勢を画像データごとに独立して求めるのではなく，一つの位置姿勢パラメータとして推定することができ，安定性と精度の向上が期待される．

5. 実　　験

案手法の有効性を検証するために，以下の 2 点に関して実験および評価を行った．

5.1 内部パラメータの推定

提案した歪を考慮した手法と，考慮しなかった場合のそれぞれについて校正を行い，結果を比較した．校正結果を表 1 に示す．また推定した内部パラメータを用いて再投影した画像を図 7 に示す．提案手法によりずれが小さくなっていることがわかる．またそれぞれの手法で推定したパラメータでボックス (図 8) を 3 次元復元した結果を図 9 および表 3 に示す．提案手法により，コーナーが正解形状に近付いていることが確認でき，手法の有効性を確認することが出来た．

表 1 校正結果

	f_x	f_y	κ	$Center_x$	$Center_y$
歪考慮なし	2289.62378	2249.22729	-0.319219649	728.614807	782.718567
歪考慮あり	2265.19336	2240.27490	0.230868191	503.273682	363.877594

表 2 推定したカメラ・プロジェクタ間の位置姿勢を用いた 3 次元復元形状の精度

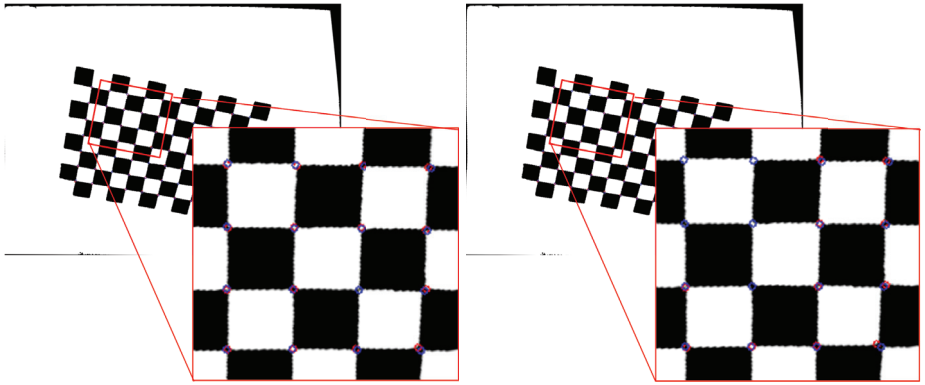
	角度 (degree)	2 乗誤差
真値	90	0
歪考慮なし	87.6	5.76
歪考慮あり	91.5	2.25

5.2 全体最適化による外部校正

次に，提案手法により推定した外部校正結果と，従来手法により推定した外部校正結果を比較した．推定するパラメータは，プロジェクタ・カメラ間の xyz 軸に関する 並進パラメータ t_x, t_y, t_z および各軸の回転パラメータ α, β, γ である．推定した外部パラメータを表 3 に示す．また，図 10 は，入力画像をそれぞれ別々に校正し，得られた位置姿勢を用いて再投

ⓒ 2012 Information Processing Society of Japan

Vol.2012-CVIM-180 No.35
2012/1/20



(a) 歪考慮なし　(b) 歪考慮あり

図 7 再投影結果の比較

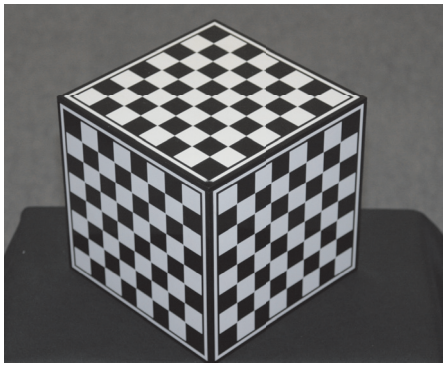
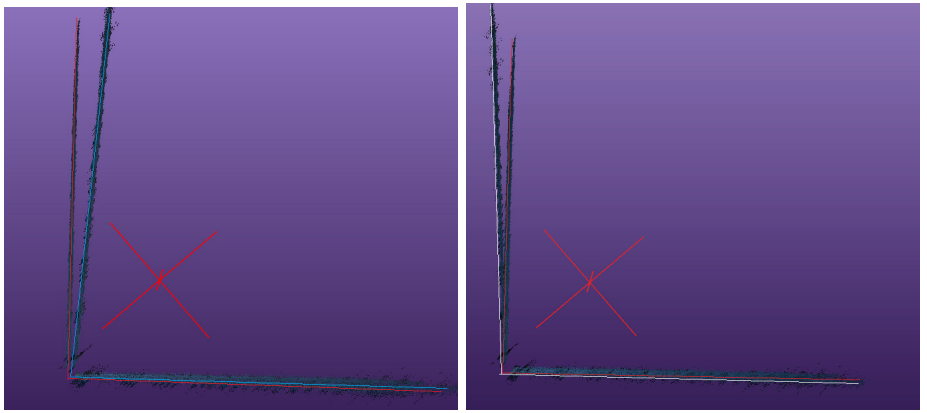


図 8 校正器具

影を行ったものである．それぞれで最適化されているためほとんどずれが見られないが，それぞれにおける位置姿勢パラメータが大きく異なっていることが表から確認できる．図 11 は，frame 0 の位置姿勢を用いて frame 0，10，23 において再投影した結果である．frame 0 ではずれが見られないが，それ以外では大きくずれていることが分かる．図 12 は LM 法により最適化を行った位置姿勢を用いた再投影の画像である．誤差が全体に分散しており，誤差の総和が減少している様子を見ることができる．以上のように，提案手法により，フレームを通して誤差の少ない首尾一貫した位置姿勢パラメータが求まったことが分かる．また，LM 法の前と後のピクセル誤差の値を表 4 に示す．誤差の値が小さくなっていることが数値的にも確認できる．



(a) 歪考慮なし　(b) 歪考慮あり

図 9 ボックスキャリブとの精度の比較

表 3 推定したカメラ・プロジェクタ間の位置姿勢

	t_x	t_y	t_z	α	β	γ
frame 0	-478.009857	-17.336088	877.849487	-12.171865	24.454166	8.629449
frame 10	-452.150696	29.933104	849.013672	-7.951396	22.494158	6.840254
frame 23	-449.629974	-14.970345	853.972412	-11.794601	21.880878	7.974008
LM 法	-475.722107	-17.478821	864.459595	-12.261743	24.570967	8.505109

表 4 特徴点におけるピクセル残差の平均

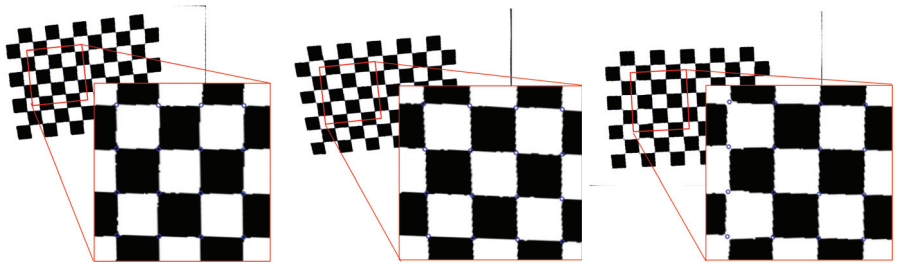
	ピクセル残差（pixel）
初期値	5.33
最適化後	2.33

6. 結　　論

本論文では平面板を用いた，高精度かつ効率的なキャリブレーション手法を提案した．こ

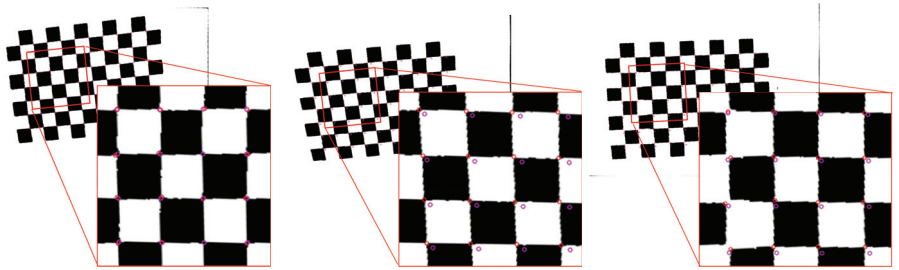
ⓒ 2012 Information Processing Society of Japan

Vol.2012-CVIM-180 No.35
2012/1/20



(a)frame 0 (b)frame 10 (c)frame 23

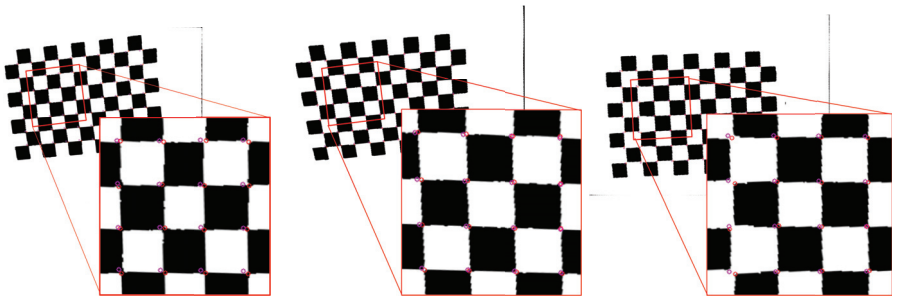
図 10 各画像独立で位置姿勢パラメータを推定し再投影した結果．それぞれで最適化されているためほとんどずれが見られないが，それぞれにおけるパラメータが大きく異なっている．



(a)frame 0 (b)frame 10 (c)frame 23

図 11 各画像独立で位置姿勢パラメータを推定し，frame 0 で求めた位置姿勢を用いて，各画像を再投影した結果．frame 0 ではずれが見られないが，それ以外では大きくずれていることが分かる．

の手法では，平面板を用いるだけで簡易に内部パラメータを推定を行うことがき，さらに外部キャリブレーションも同時に行うことが出来る．さらに提案手法では，プロジェクタのレンズ歪を考慮することでより高精度なキャリブレーションを実現することが出来る．また，LM 法による全体最適化により，首尾一貫したプロジェクタ・カメラ間の位置姿勢パラメータを推定する手法を提案し，その有効性を実験により確認した．提案手法により，今まで強校正を行うことが難しいような場面でも短時間で高精度なアクティブ三次元計測を行うことが出来るようなる．今後はよりインタラクティブなシステムを開発をする予定である．



(a)frame 0 (b)frame 10 (c)frame 23

図 12 提案手法により推定した位置姿勢を用いて再投影した結果．誤差が全体に分散していることが分かる．

7. 謝　　辞

本研究の一部は，総務省戦略的情報通信研究開発制度（SCOPE）ICT イノベーション創出型研究開発（101710002），文部科学省科学研究費補助金（21200002）および内閣府・最先端・次世代研究開発支援プログラム (LR030) の助成を受けて実施されたものである．ここに記して謝意を表す．

参 考 文 献

1) Furukawa, R. and Kawasaki, H.: Uncalibrated multiple image stereo system with arbitrarily movable camera and projector for wide range scanning, pp. 302–309 (2005).
2) Totsuka, S., Furukawa, R. and Kawasaki, H.: Precision improvement method for phase shifting based projector-camera stereo system using response function, *Meeting on Image Recognition and Understanding 2009(MIRU 2009)*, pp.1594–1599 (2009).
3) Zhang, Z.: A Flexible New Technique for Camera Calibration, *Technical Report MSR-TR-98-71* (1998).
4) 金谷健一，松永　力：基礎行列の分解：焦点距離の直接的表現，情報処理学会研究報告. CVIM, [コンピュータビジョンとイメージメディア]， Vol.2000, No.7, pp.49–56 (2000).
5) 徐　剛，辻　三郎：「3 次元ビジョン」，共立出版 (1998).
6) 佐藤　淳：「コンピュータビジョン-視覚の幾何学-」，コロナ社 (1999).
7) 見市伸裕，和田俊和，松山隆司：プロジェクタ・カメラシステムのキャリブレーショ

ⓒ 2012 Information Processing Society of Japan

Vol.2012-CVIM-180 No.35
2012/1/20

ンに関する研究，コンピュータビジョンとイメージメディア， No.133-1 (2002).
8) 木村　誠，持丸正明，金出武雄：任意の平面を用いたプロジェクタのキャリブレーション，第 12 回画像センシングシンポジウム予稿集，pp.444–448 (2006).
9) 岡崎智也，岡谷貴之，出口光一郎：構造化光投影と照度差ステレオを組み合わせた自動校正による仮想反射特性再現の質感向上，画像の認識・理解シンポジウム（MIRU2008），pp.1100–1107 (2008).
10) 川崎　洋，大澤　裕，古川　亮，中村泰明：空間コード化法を用いた未校正ステレオシステムによる密な 3 次元形状復元，*CVIM 15*, Vol.47, No.SIG10, pp.59–71 (2006).

ⓒ 2012 Information Processing Society of Japan