

AR マーカーと平面版を用いた簡易な プロジェクタキャリブレーション手法の提案

清田 祥太^{1,a)} 川崎 洋^{1,b)} 古川 亮^{3,c)} 佐川 立昌^{2,d)}

概要:

近年プロジェクタを用いた 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。以前我々は市松模様と平面版を用いたキャリブレーション手法を提案した。これにより特殊な校正儀を必要としないプロジェクタのキャリブレーションが可能となった。しかし、市松模様は同じブロックパターンの繰り返しで構成されるため、パターン全体が検出されなければ曖昧性が残り、これが撮影する際の制約となっていた。さらに、プロジェクタのキャリブレーションのためには、プロジェクタから投影されたパターンが平面上に全て投影されていなければならないが、そのように平面を配置することは直感的には困難な作業であった。そこで本研究では、市松模様の代わりに AR マーカーを使用することで、これらの問題を解決する簡易なキャリブレーション手法の提案を行う。

Abstract:

In recent years, development on 3D measurement system using a camera and a projector has been intensively ves. Therefore to improve accuracy and stability of projector calibration is strongly required. Although camera calibration algorithm is now widely available, e.g. OpenCV, projector calibration technique is still under way. Previously, we proposed a calibration method using a plane with a checkerboard pattern. In this method we realized the method without using a special calibration object. However, we have to capture the entire checkerboard pattern to detect feature points of it. Therefore placing the plane properly requires some experience and skill. In this paper, we proposed an improved plane based projector calibration method using AR maker.

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キャリブレーションが必要である。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、プロジェクタのキャリブレーション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を行う手法も提案されているが [2], [10], [11], 精度の良い対応点を取得するために複数枚パターンを投影する必要が

¹ 鹿児島大学 理工学研究科 情報生体システム
Faculty of Engineering, Kagoshima University
² 産業技術総合研究所 知能システム研究部門 サービスロボティクス研究グループ
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology
³ 広島市立大学 情報科学研究科 知能工学専攻
Faculty of Information Sciences, Hiroshima City University
a) sc107016@ibe.kagoshima-u.ac.jp
b) kawasaki@ibe.kagoshima-u.ac.jp
c) ryo-f@hiroshima-cu.ac.jp
d) ryusuke.sagawa@aist.go.jp

あった．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ている．

上記の解決方法として，平面板と市松模様を用いたキャリブレーション手法が提案されている [8]．この手法では，プロジェクタから市松模様を投影することで，特殊な校正儀や特殊なパターンを使用せずともプロジェクタのキャリブレーションが可能となった．しかし，この手法では，市松模様の特徴点を検出するために，市松模様全体がカメラで撮影される必要があるため，しばしば撮影を行うことが困難となり，それにより精度が低下するなどの問題が生じていた．そこで，提案手法では市松模様の代わりに AR マーカーを使用することで，これらの問題の解決を行う．具体的には AR マーカーパターンを使用することで，特徴点の検出失敗によりキャリブレーションの精度が低下するという問題を解決する．

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キャリブレーション (校正) 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キャリブレーションが必要となる．そのため多くのキャリブレーション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キャリブレーションを行う．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キャリブレーションを行う手法である．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キャリブレーション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キャリブレーション手法としては，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．この手法では，専用の校正儀 (キャリブレーションボックス) を用いてカメラとプロジェクタの内部キャリブレーションを行う．これは形状既知の特殊な校正儀を用意し，それを用いて内部及び外部キャリブレーションを行うものである [7], [9]．この手法のメリットは一度のスキャンで内部及び外部キャリブレーション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，どこでもすぐにキャリブレーションを行う事が出来ないという点があげられる．もう一つの手法として，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キャリブレーションを行う手法がある [3], [9](図 1)．プロジェクタの内部キャリ

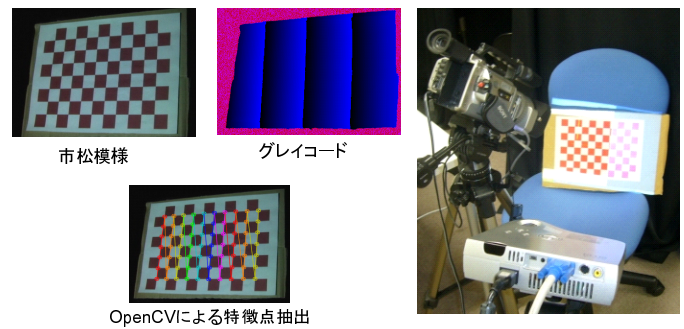


図 1 平面板とグレーコードを用いたキャリブレーション

ブレーションは，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，容易にキャリブレーションを行える点にあり，キャリブレーション手法は OpenCV にも実装されているものをそのまま用いる事ができる．一方，この手法のデメリットとして，複数枚のパターンを投影する必要があり，その間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手間と時間が必要であるという点がある．さらに，この手法では，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首尾一貫して推定することが難しい．

上記の 2 つの手法の共通の問題として，プロジェクタの座標情報を取得するために，グレーコードのような特殊な画像を得るために，複数枚のパターンを投影する必要があるという点が挙げられる．そこでグレーコードを用いずに，市松模様のみを使用してプロジェクタの座標情報取得し，キャリブレーションを行う手法が提案されている [8]．この手法では，平面板に市松模様を投影し，さらにプロジェクタからも市松模様を投影することで，カメラとプロジェクタ間におけるホモグラフィの計算を行い，プロジェクタの座標情報を取得する．この手法により，効率よくプロジェクタのキャリブレーションが行えるようになった．しかし，いくつかの問題点も存在している．一つ目の問題点として，パターンとして使用している市松模様は，市松模様全体を撮影しなければ特徴点の検出が出来ない点である．そのため，しばしばカメラとプロジェクタの構成に制約が生じ，実験環境によってはキャリブレーション精度が下がることがある (図 2)．さらに，プロジェクタから投影する市松模様は平面板より大きいと特徴点の検出に失敗するため，平面版のサイズよりも小さいサイズのものを投影する必要がある (図 3)．それによりプロジェクタの一部しかパターン投影が行われず，プロジェクタの画角全体を使って内部キャリブレーションを行うことは難しい．



図 2 撮影失敗例

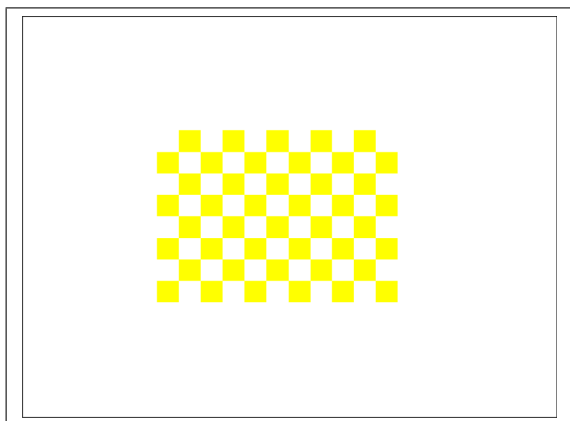


図 3 小さな市松模様

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 4 のように大きく 4 つの行程に分かれている。

まずはじめにキャリブレーションに必要なデータの取得し、撮影画像の分離を行う。本手法では、入力画像として、AR マーカーを平面版に印刷し、印刷した AR マーカーに重なり合うように、プロジェクタからも同様のマーカーを投影し撮影したものを入力画像とする。しかし、2 つのパターンが重なりあったままではキャリブレーションすることが出来ない。そこで、この画像を色情報を用いて平面版側のマーカーと、プロジェクタから投影しているパターン側のマーカーに分離し、その分離した後の 2 枚 1 セットの画像を用いる事でキャリブレーションを行なう。まず、分離した画像に対してマーカーの自動検出を行う。マーカーの自動検出には ARToolKit を用いて行う。次に、検出した特徴点の座標を元にカメラとプロジェクタの内部キャリブレーションを行い初期値を推定する。最後に推定した初期値を用いて再投影誤差を求め平面版とカメラ、プロジェクタの位置姿勢及び内部パラメータをバンドル調整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。

提案手法が清田らの手法 [8] と異なる点として、検出するマーカーとして AR マーカーを用いる点が挙げられる。これにより市松模様をマーカーとして使用した場合に起こっ

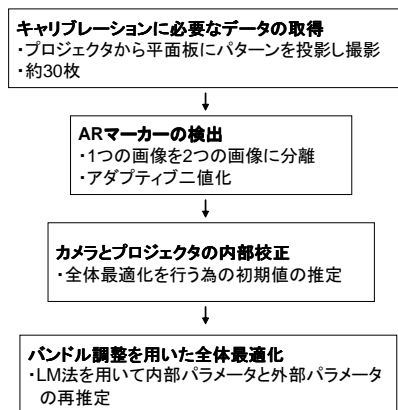


図 4 本手法におけるキャリブレーションの流れ

ていた、いくつかの問題を解決する事ができる。まず一つ目に市松模様の場合には市松模様全体がカメラで撮影される必要があるが、AR マーカーの場合は一つ一つのマーカーが独立しているため、各マーカー毎に特徴点の検出が可能である。これにより、パターンの全体を撮影する必要がなくなり、あらゆる環境下でのキャリブレーションが可能となる。さらに、プロジェクタから投影するパターンが平面版からはみ出している問題なくキャリブレーションを行うことが出来るため、平面版を動かせる自由度があがり、キャリブレーション精度も向上する。

次にカメラとプロジェクタの内部キャリブレーションを行う。本提案手法における、内部キャリブレーションは OpenCV にも実装されている Z.Zhang の手法 [1], [4] を用いている。このため、平面版があれば実行可能である。Zhang によるキャリブレーション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、カメラの内部キャリブレーションによって得られたパラメータを用いて 3 次元空間中に再投影を行い、プロジェクタの内部キャリブレーションにも Zhang によるキャリブレーションを適応させる。

最後にカメラとプロジェクタのキャリブレーションによって推定したパラメータを、バンドル調整法を用いた全体最適化を行うことにより再推定を行う。これにより首尾一貫したカメラとプロジェクタの姿勢位置を推定している。

3.2 システムの構成

提案手法における必要機材は、キャリブレーションを行うカメラ、プロジェクタからなる (図 5)。校正儀としては Cyan 色の AR マーカーパターンを印刷した平面版を利用し、これにプロジェクタから黄色の AR マーカーパターンを投影しキャリブレーションを行う。本手法で、使用するマーカーパターンを図 6 に示す。また、カメラとプロジェクタの位置は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。キャリブレーションを行う際には、図 5 のような位置関係にカメラとプロジェクタを配置する。

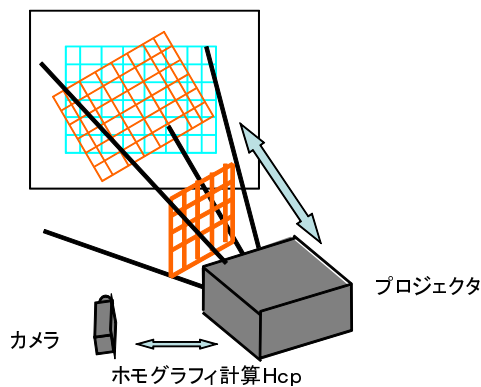


図 5 カメラ・プロジェクタシステムによるキャリブレーションの様子

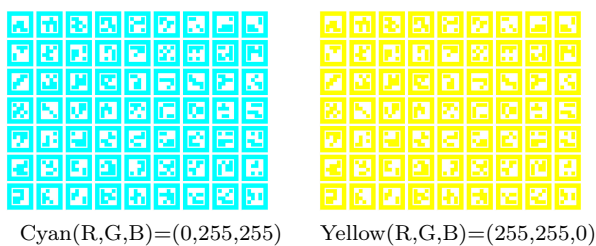


図 6 キャリブレーションに使用するパターン

それぞれの位置関係に大きな制約は無い。これは清田の手法 [8] と異なり、提案手法のメリットの一つである。キャリブレーションに使用する入力画像はマーカーターンを印刷した平面版に、パターンサイズ既知の投影パターンを投影し、撮影を行うことで取得する。撮影の際の注意事項としては、なるべくカメラの画角をすべて使うように、平面版を幅広く動かすことである。その際平面版の全ての領域が撮影される必要はない。また、プロジェクタから投影されている AR マーカーの個数が少なすぎると、キャリブレーション精度の低下に繋がるため、一定数以上のマーカーターンが平面版に投影されていることを確認しつつ撮影を行う。十分な精度を実するためには 30 枚ほどの撮影が望ましい。

4. アルゴリズムの詳細

4.1 投影パターンの生成

印刷するパターンと投影するパターンは、AR マーカーを 7 行 9 列に並べたパターンを使用する。AR マーカーをキャリブレーションマーカーとして使用する際に重要となるのは、63 個の AR マーカーがそれぞれ独立して違う ID として検出できるという点である。1 つでも AR マーカーの ID を誤って検出してしまうと、キャリブレーションに失敗する。そこで、各 AR マーカーをそれぞれ異なる特徴を持つように、1 つ 1 つの AR マーカーを作成する必要がある。通常の AR マーカーは、文字や絵など視覚的にもわかりやすいマーカーを使用するが、本手法では 63 個すべての AR マーカーが、できるだけ異なる特徴を持つように 2



(a) 一般的な AR マーカー (b) 本手法で用いる AR マーカー

図 7 AR マーカーの例

次元バーコードのようなマーカーを作成して検出を行った (図 7)。マーカー生成は、 $5 * 5$ のブロックの中に 0 か 1 かのフラグを立てハミング距離が最大となるように生成した。

4.2 パターン検出

本手法では 1 枚の入力画像を、平面版側の AR マーカーパターンと、プロジェクタから投影している AR マーカーパターン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 8 に示す。平面版側の AR マーカーパターンでは Cyan(R,G,B)=(0,255,255)、プロジェクタから投影している AR マーカーパターンは黄色(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版側の AR マーカーパターンのみが、青プレーンではプロジェクタ側の AR マーカーパターンのみが見える。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 AR マーカーパターンを確認することが出来る。次にそれぞれの画像に対してグレースケール化を行う。この際に単純にグレースケール化を行うと、それぞれのピクセルの輝度が一定になってしまうため、R プレーンに対しては R の輝度値を用いてグレースケール化し、B プレーンに関しては B の輝度値を用いてグレースケール化を行なった。こうすることで、1 つの画像を完全に分離することが可能である。

分離した画像に対して、ARToolKit を用いてマーカー検出を行えば、各 AR マーカーのが検出され、マーカーの ID や頂点の座標を取得できる。AR マーカーをカメラで撮影するだけであれば非常に高精度なマーカー検出が可能であるが、内部キャリブレーションを行う際は平面版の角度を変えつつ撮影を行うため、しばしば AR マーカーの検出に失敗することがある。これは、マーカーを検出する際に、ARToolKit の内部で二値化処理を行っているが、平面の角度を変えて撮影するため、画像上で明るさのムラができ、一定の閾値で二値化しようとする二値化に失敗してしまうことが要因である (図 9)。

そこで、本手法では ARToolKit を用いてマーカー検出

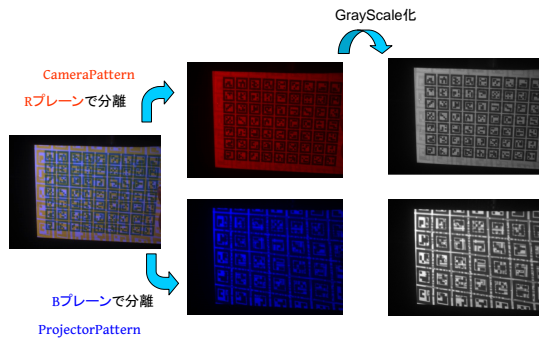


図 8 分離の様子

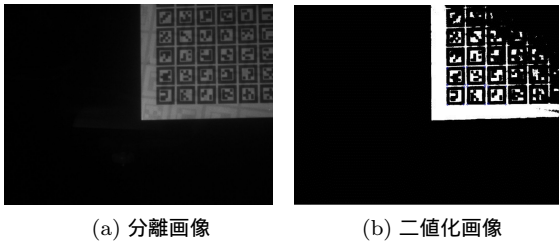


図 9 二値化失敗の例

を行う前に、画像に対して予め高精度な二値化を行うことで、マーカー検出の精度を向上させた。具体的には、画像中から平面版の領域のみを抽出し、抽出した領域をさらに小さな領域に分割することによってアダプティブな二値化を行った。平面版の領域を抽出するために、まず分離した平面版の AR マーカーパターンに対し、マーカー検出を行い、AR マーカーの ID を取得する。この時には一定の閾値を使って二値化しているため、二値化に成功した領域でしか AR マーカー ID を取得できていないことが分かる(図 10a)。次に取得した AR マーカーの ID を元に、領域を拡張し、拡張した領域内で二値化を行う。二値化を行った領域では、二値化の精度が向上したことにより、AR マーカーの検出精度も向上している(図 10b)。それにより、一回目のマーカー検出よりも多くマーカーが検出されているため、二回目の領域拡張部分は大きくなる(図 10c)。これを繰り返すことで最終的には平面版の領域を抽出できる。最終的な二値化結果と AR マーカー検出の結果を図 11 に示す。二値化が高精度に行われたことにより、マーカー検出精度も向上していることが分かる。

プロジェクタから投影している AR マーカーパターンの二値化は、平面版のマーカー検出の際に取得した平面版の領域を、そのままプロジェクタから投影している AR マーカーパターンにも使用することで行う。

4.3 初期値の推定

カメラの内部キャリブレーションは Zhang の手法を用いている [4]。しかし、Zhang によるキャリブレーションではカメラの内部変数しか求めることが出来ないため、プロジェクタの内部キャリブレーションは、再投影を行うこ

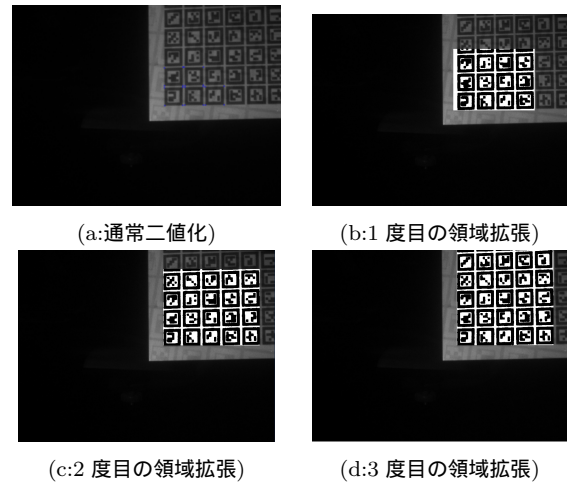


図 10 アダプティブ二値化



図 11 アダプティブ二値化による二値化結果

とにより行う。撮影画像上のプロジェクタから投影している AR マーカーパターンに対してマーカー検出を行なって取得した二次元座標を、カメラの内部キャリブレーションで推定したパラメータを用いて 3 次元空間中に再投影を行う。3 次元空間中に再投影した 3 次元点と、プロジェクタから投影しているパターン画像上の 2 次元点との関係により、プロジェクタの内部キャリブレーションをカメラと同様の方法で行う。プロジェクタから投影しているパターンを用いるのは、歪がまったく含まれていない理想的な点との対応関係を用いて内部キャリブレーションを行うことで、高精度化を行うことを目的としている。ここで推定したパラメータは、バンドル調整による全体最適化によってパラメータを再推定を行うための初期値として用いる。

4.4 バンドル調整による全体最適化

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。さらに、平面版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、本手法ではバンドル調整により、各オブジェクト間の位置姿勢の最適化を行なう。初期

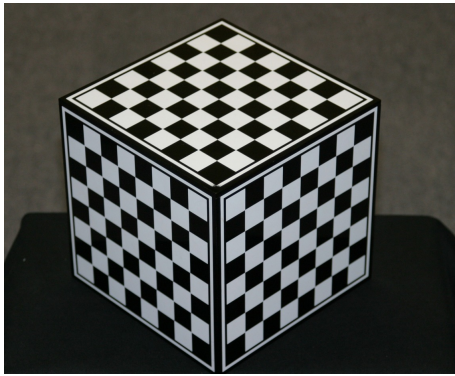


図 12 90度のボックス

値として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。それに加え、本手法ではカメラとプロジェクタの焦点距離(4変数)も同時に最適化を行う。

そのため撮影した画像の枚数を n とすると、推定するパラメータ数は $6 \cdot n + 6 + 4$ となる。従って、30枚の入力がある場合は190個のパラメータの最適化を行う事となる。また以下の再投影誤差の計算の際に必要な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最適化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 E_c 、プロジェクタ画像における再投影誤差を E_p と置くと、その値は以下ようになる

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

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。最適化には Levenberg-Marquardt 法 (LM 法) を用いた。

5. 実験

5.1 キャリブレーションの精度評価

提案手法の基本性能調査を行った。提案手法によって推定した内部、外部キャリブレーション結果を用いて、角度が90度であるボックスの復元を行い、キャリブレーションが正しく行われているかどうかを評価した(図12)。正解としてはボックスとグレーコードを用いて行なったキャリブレーション結果を用いた。ボックスの復元結果の比較を図13に示す。数値を表1に示す。ボックスを復元した結果は真値に近くなっていることが分かる。

次に、プロジェクタにおける最適化前と最適化後の再投影誤差を示す。最適化前と最適化後の再投影誤差は表2に示す。それぞれの再投影座標は図14に示す。赤の点は、

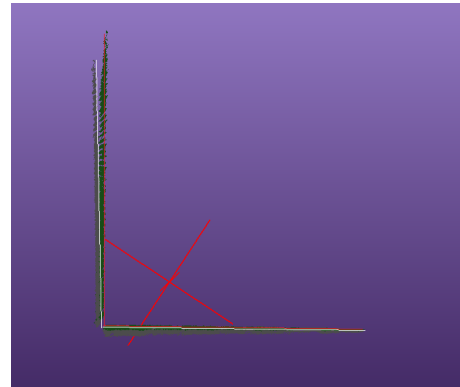


図 13 ボックスキャリブとの精度の比較

表 1 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) |
|------|-------------|
| 真値 | 90.0 |
| 提案手法 | 90.65 |

表 2 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 | 1.28 |
| 最適化後 | 1.15 |

マーカー検出によって得られた点、緑の点が初期値を用いて行なった再投影点、青の点は最適化後の値を用いて行なった再投影結果である。最適化により再投影誤差が減少していることが確認できる。

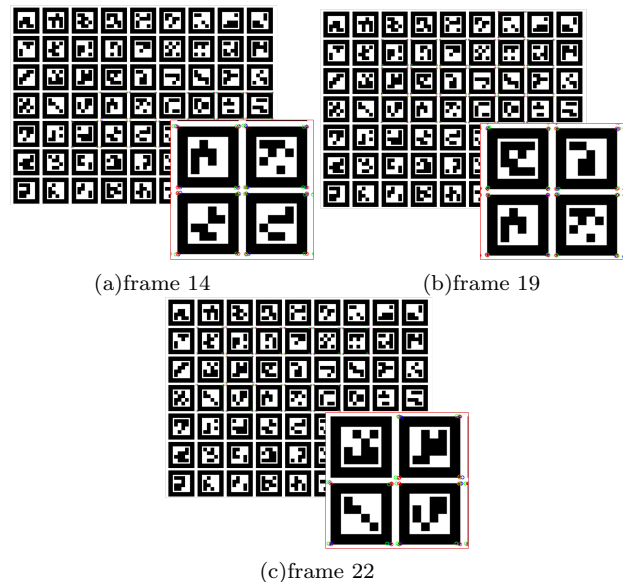


図 14 提案手法により推定した位置姿勢を用いて再投影した結果。誤差が全体に分散していることが分かる。

5.2 二値化手法の違いによる比較

アダプティブな二値化を行った際のキャリブレーション結果と、通常二値化を行った際のキャリブレーション結果

表 3 アダプティブ二値化と通常二値化における再投影誤差の比較

| 二値化手法 | 誤差の種類 | 初期値 (px) | 最適化後 (px) |
|--------------|---------|----------|-----------|
| 通常二値化 | 再投影誤差 | 1.64 | 1.49 |
| | カメラ側 | 1.28 | 1.30 |
| | プロジェクタ側 | 2.52 | 2.05 |
| adaptive 二値化 | 再投影誤差 | 1.25 | 1.15 |
| | カメラ側 | 1.05 | 1.05 |
| | プロジェクタ側 | 2.20 | 1.53 |

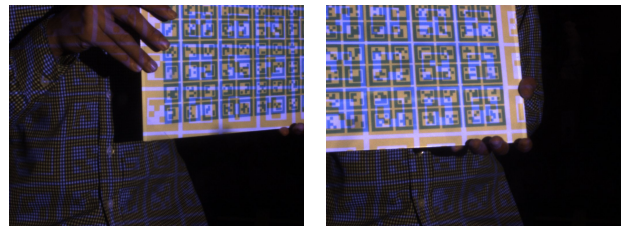


図 16 AR マーカーを用いての撮影

表 4 二値化手法の違いによる角度の比較

| | 角度 (degree) |
|-----------|-------------|
| 通常二値化 | 88.73 |
| アダプティブ二値化 | 90.65 |

を比較する．比較には再投影誤差による比較と，推定したパラメータを用いて，5.1 で用いた 90 度のボックスの形状復元を行い比較する．以下に結果を示す．アダプティブ二値化を行なったほうがより高精度にパラメータ推定を行えることが分かる (表 3)．さらに実際の復元結果と角度の比較においてもアダプティブ二値化の有効性を検証できた (図 15, 表 4) ．

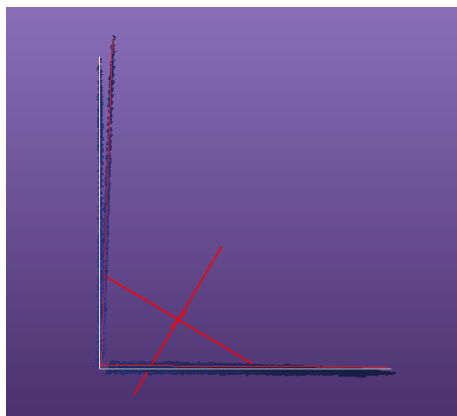
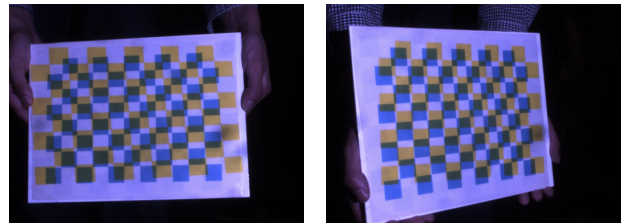


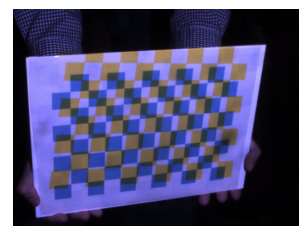
図 15 二値化手法の違いによる復元結果の比較

5.3 市松模様と AR マーカーパターンの精度の比較

次に先行研究である，市松模様パターンを使用した時のキャリブレーション結果と，提案手法である AR マーカーパターンを使用した時のキャリブレーション結果とを比較する．実験は，同じカメラとプロジェクタのセットアップでキャリブレーションを行い，その後 90 度のボックスを復元することに角度のより比較を行なった．さらに，再投影誤差の比較も行う．初めに入力画像を比較する．図 16 は AR マーカーパターン使用時の入力画像で，図 17 は市松模様パターン使用時の入力画像である．市松模様使用時には，カメラの中央部分でしか，撮影が行われていないが，AR マーカー使用時にはカメラの画角全体を使用できている事が確認できる．さらに，撮影を行なった画像の枚数と，



検出に成功した画像例



検出に失敗した画像例 (黄色い市松模様が平面板からはみ出ている)

図 17 市松模様を用いての撮影

マーカーの検出に成功し，実際にキャリブレーションに使用した画像の枚数を表 5 に示す．AR マーカーを使用した時の方が，マーカー検出精度が上がっている事が確認できる．また，キャリブレーションにはマーカー検出に成功した全枚数をそれぞれの手法で使用した．

次に 90 度のボックスを用いた形状復元による比較を行う．復元結果とその時の角度を示す (図 18, 表 6) ．市松模様を用いてキャリブレーションしたパラメータを用いた復元結果は赤い線で，提案手法を用いてキャリブレーションしたパラメータを用いた復元結果は赤い線で示す．最後に再投影誤差の比較を行う (表 6) ．これらの比較によって AR マーカーを使用したキャリブレーションの方がより高精度であることが確認できた．

最後にキャリブレーションに使用する枚数をそれぞれ 27 枚で統一した時の精度の比較を行なった．この枚数は市松模様使用時のマーカー検出に成功した枚数に合わせた．精度の比較には，同様にボックスの復元による角度の比較と，再投影誤差の比較を行なった．その結果を表 7 に示す．キャリブレーションに使用する枚数が少ない場合でも，AR マーカー使用時の方がより高精度にキャリブレーションを行えることが確認できた．

6. 結論

本論文では AR マーカーを用いた，高精度かつ実用的なキャリブレーション手法を提案した．この手法では，平

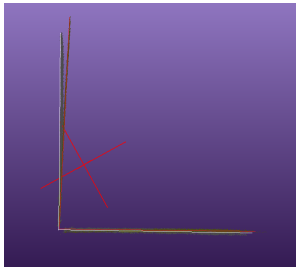


図 18 復元結果の比較

表 5 撮影枚数とマーカー検出成功枚数の比較

| | 撮影枚数 | マーカー検出成功枚数 |
|---------|------|------------|
| 市松模様 | 40 | 27 |
| AR マーカー | 40 | 37 |

表 6 特徴点におけるピクセル残差の平均と角度の比較

| | 初期値 (px) | 最適化後 (px) | 角度 (degree) |
|---------|----------|-----------|-------------|
| 市松模様 | 2.803 | 1.841 | 87.53 |
| AR マーカー | 1.279 | 1.179 | 89.34 |

表 7 使用枚数固定の時の精度の比較 (それぞれ 27 枚使用)

| | 初期値 (px) | 最適化後 (px) | 角度 (degree) |
|---------|----------|-----------|-------------|
| 市松模様 | 2.803 | 1.841 | 87.53 |
| AR マーカー | 1.165 | 1.139 | 90.650 |

面板を用いるだけで簡単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、マーカーとして AR マーカーを使用することで、データの取得がより容易になり、カメラとプロジェクタの全ての画角に対してキャリブレーションを行うことが可能となった。また、バンドル調整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になる。

7. 謝辞

本研究の一部は、内閣府・最先端・次世代研究開発支援プログラム (LR030)、および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) 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] Bradski, G.: The OpenCV Library, *Dr. Dobb's Journal of Software Tools* (2000).
 [2] Furukawa, R. and Kawasaki, H.: Uncalibrated multiple image stereo system with arbitrarily movable camera and projector for wide range scanning, pp. 302-309 (2005).

[3] 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).
 [4] Zhang, Z.: A Flexible New Technique for Camera Calibration, *Technical Report MSR-TR-98-71* (1998).
 [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] 清田祥太, 川崎 洋, 古川亮, 佐川立昌: 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, *情報処理学会 CVIM 研究会*, Vol. 2012-CVIM-180, pp. 1-8 (2012).
 [9] 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).
 [10] 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).
 [11] 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).