

平面制約を用いたアクティブ全周計測システムの 自動キャリブレーション手法

佐世 晶彦^{1,a)} トマ ディエゴ^{1,b)} 内山 英昭^{1,c)} 佐川 立昌² 古川 亮³ 川崎 洋^{1,d)}

概要: 我々はこれまでカメラとプロジェクタを用いたアクティブステレオによる全周の3次元計測システム開発に取り組んできており、高精度なカメラ-プロジェクタシステムのキャリブレーション手法を提案してきた。カメラ-プロジェクタシステムにおけるキャリブレーションでは、通常プロジェクタから特殊なパターンを校正儀に投影してパターン平面とカメラ画像との間で対応する座標を手に入れるため、多くの時間と手間を必要としていた。特に本研究において使用される6台のカメラと6台のプロジェクタを用いたシステムにおいては、校正儀を6回動かしながらパターンを投影する必要があるため、非常に煩雑な手続きが必要であり、計測を行うまでにかなりの時間を要していた。そこで本研究では短時間で簡易にキャリブレーションを行うため自動回転テーブルを利用した自動キャリブレーションシステムを開発した。さらに校正儀が平面であることを利用して、平面拘束によるキャリブレーションの高精度化を試みたのでここに報告する。

キーワード: キャリブレーション, アクティブステレオ, 制約付き最適化

Automatic Calibration System for Active Multi-view Stereo Using Plane Constraints

AKIHIKO SAYO^{1,a)} DIEGO THOMAS^{1,b)} HIDEAKI UCHIYAMA^{1,c)} RYUSUKE SAGAWA² RYO FURUKAWA³
HIROSHI KAWASAKI^{1,d)}

Abstract: We capture and measure 3D object by active multi view stereo system using projectors which allows us to capture non-rigid object (e.g. human). In order to achieve stable and accurate 3D capture, high-accuracy calibration for camera and projector system is required. In the system, calibration takes time and effort so far, because we have to project specific pattern from projector to calibrate device and obtain correspondence between cameras and projectors. Especially 6 cameras and 6 projectors system which we use in our experiments has many steps to conduct calibration and takes so long time before scanning objects. In this paper, to solve the problem, we propose an automatic calibration system using motorized stage, which can eliminate the human task. We also propose a new optimization approach which uses plane constraints of calibration board. In the experiments, it is proved that accuracy was improved by our method by scanning objects with known shape.

Keywords: calibration, active stereo, optimization with constraints

¹ 九州大学大学院システム情報科学研究科情報工学部門

² 産業技術総合研究所知能システム研究部門

³ 広島市立大学大学院情報科学研究科知能工学専攻

a) 2IE18335N@s.kyushu-u.ac.jp

b) diego.thomas@limu.ait.kyushu-u.ac.jp

c) uchiyama@limu.ait.kyushu-u.ac.jp

d) kawasaki@ait.kyushu-u.ac.jp

1. 研究の目的と背景

近年、HMD やスマートフォンにおける顔認証の高精度化の必要性から3次元形状計測への需要が高まっている。その中でも、動きのある物体や形状が変化する物体の形状計測が強く求められている。通常は単眼画像を用いた一方

向からの形状復元が用いられる [1] [2]. しかし、動きのある対象物体の全周の形状を高精度に計測するには、複数台のカメラによる全周計測が有効である [3] [4] [5]. このような形状計測を行う手法としてパッシブステレオ [6] とアクティブステレオ [7] [8] が考えられるが、我々はカメラとプロジェクタを用いたアクティブステレオ法によって高精度な形状復元が可能な手法を提案してきた [9]. 物体の形状計測を行う際、カメラと対象物体の位置姿勢やカメラの内部パラメータを知るためにキャリブレーションが必要となるが、その手続きは一般に煩雑なことが多い. 特に先行研究で用いられている 6 台のカメラ、6 台のプロジェクタを用いた全周アクティブ計測システムにおけるキャリブレーションでは時間と手間がかかってしまい、計測を行うまでかなりの時間を要していた. そこで本研究では上記の全周アクティブ計測システムにおいて短時間かつ簡易にキャリブレーションを行う手法を提案する. これは自動回転テーブルを利用したアクティブ全周計測システムのキャリブレーションを自動で行うことで実現される. さらに本研究で用いた校正儀が平面であることを利用し、キャリブレーションに平面制約を加えることによる精度向上を試みる.

2. 関連研究

2.1 カメラキャリブレーション

アクティブステレオでの形状計測を行う際には事前にキャリブレーションを行う必要がある. 具体的には焦点距離や画像中心、歪みパラメータを表す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を求める必要がある. カメラのキャリブレーション手法には多くの手法が提案されているが、大別して 3 次元形状が既知の校正器具を用いる手法 (強校正) と、未知の対象物体から対応関係を求めて校正を行う手法 (自己校正) の 2 つが存在する. 強校正では精度の高いパラメータの推定が可能になるが、特殊な校正器具を用いる必要がある. 自己校正では撮影された画像のみから推定を行うため利便性は高いが、安定した推定ができないという問題がある. また、強校正では大きな校正器具を用意することの難しさから広いシーンには適用しづらいという問題もある. 我々の想定するシーンは人体計測のため、同等のサイズの校正器具を用意することが難しく当初は自己校正を用いていたが、精度が不安定になることがあった. そこで本研究では平面であれば人間と同等サイズの校正器具を用意できることに着目し、拘束条件を付与することで精度と安定性の向上を試みる.

2.2 プロジェクタキャリブレーション

プロジェクタは投影用のデバイスであり、プロジェクタ視点の画像を直接取得することができず、間接的なキャリブレーション手法にならざるを得ない. そのため、プロ

ジェクタのキャリブレーション手法はカメラの場合よりも複雑になる. 一般にプロジェクタのキャリブレーションを行う場合、プロジェクタから投影されたパターンをカメラで撮影することで内部パラメータとカメラに対する相対的な位置姿勢を知ることができる [10]. カメラ-プロジェクタのシステムにおいて高精度なキャリブレーションを行う方法として特殊な校正儀 (キャリブレーションボックス) を用いる手法が挙げられる (図 1). この手法では特殊な校正儀を必要とするものの、1 度のスキャンでキャリブレーションを行うことができる. また、市松模様が描かれた平面板の位置姿勢を変えながら複数枚撮影する手法も挙げられる. これは市松模様が描かれた平面板に対して色が分離できるような市松模様を投影し撮影する手法である. この手法は OpenCV にも実装されているためキャリブレーションを容易に行えるという利点がある (図 2). しかし、市松模様すべてをカメラの画角に収めなければ座標情報が得られないため撮影自体が困難となってしまう. 一方、本研究においては平面に対して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複数枚のパターン画像 (図 11) をプロジェクタから投影することでキャリブレーションを行う. 前述の特殊な校正儀を用いる強校正手法に比べ時間がかかるが、平面さえあれば容易にキャリブレーションを行うことができるというメリットがある.

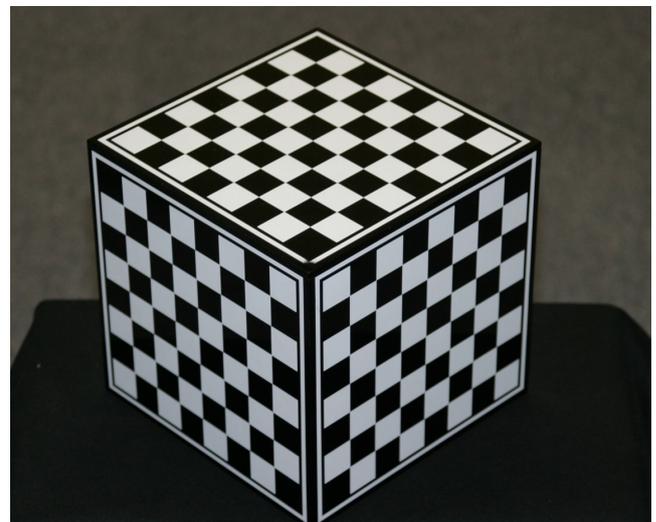


図 1 特殊な校正儀の例

3. システムの概要

3.1 機器の構成

本研究で使用する全周アクティブ計測システムの機器の構成について説明する. カメラは Point Grey 社の grasshopper を 6 台、プロジェクタは EPSON 社の EB-1945W を 6 台使用する (図 3). カメラおよびプロジェクタは交互に 1 台ずつ計測対象に対して周りを囲むように設置した (図 4).

また、キャリブレーションの際の平面校正儀を図5(a)に示している。この校正儀を図5(b)の自動回転テーブルに乗せることでPCからの制御によって回転を調整することができる。

3.2 キャリブレーション

上記の機器を用いてキャリブレーションを行う。図5(a)に示された平面校正儀に対してプロジェクタからグレーコードパターン及びフェイズシフトパターンを投影することで3次元中での座標情報を取得する。各カメラプロジェクタ、カメラカメラにおいて取得された3次元中の点からその相対位置と各カメラ、プロジェクタの内部パラメータを取得する。キャリブレーションの詳細については第4章において説明する。

3.3 復元手法

計測・復元手法については先行研究 [9] の手法を用いる。その流れを図6に示す。まず、各プロジェクタから図7(b)のようなDe Bruijn 系列に基づいた2色の平行なラインパターンを投影する(図7(a))。このときパターンの検出、分離を容易にするため同じ色のパターンは直交するように投影する。

そして、ラインパターンが投影されている計測対象をカメラによって撮影し、投影されているラインパターンを縦、横別々に検出する。それらのラインパターン同士が作る交点を見つけることによって交点の隣接情報を得る。(投影するパターンがそれぞれ45度ずつ傾いているのは計測対象上により多くの交点を作るためである。) その隣接情報を用いることにより、線形解法によって形状復元を行う。その際カラーパターンによって割り当てられたIDを用いて投影パターンとのマッチングを行うことで形状復元の精度を向上させる。また、最後に各カメラプロジェクタ、カメラカメラにおいて得られた解を初期値として3次元



図3 使用するカメラ, プロジェクタ

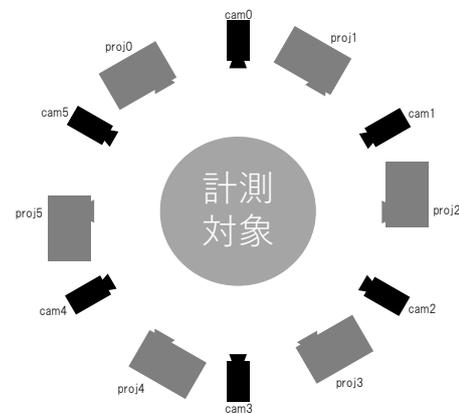


図4 機器の構成

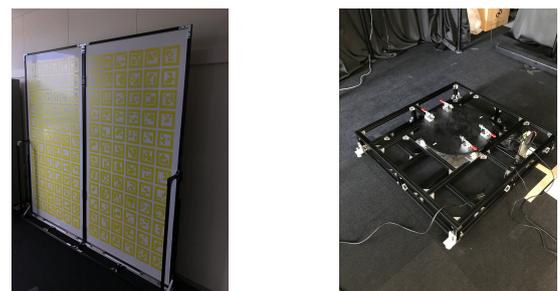
点のバンドル調整を行う。このように一つのパターンを投影し撮影することで動きのある対象の形状を高密度かつ高フレームレートで計測、復元することができる。また、カメラとプロジェクタの間で同期をとる必要もない。撮影の様子および復元結果をそれぞれ図8と図9に示す。

4. 平面板を用いた校正手法

本研究での全周アクティブ計測システムのキャリブレーションは図10のような流れで行う。はじめにパターン投影用のスクリーンを計測対象を設置する位置に置く。そし



図2 市松模様を用いたキャリブレーションの様子



(a) 平面校正儀

(b) 自動回転テーブル

図5 回転式平面校正儀

てプロジェクタからグレーコードパターン及びフェイズシフトパターンを投影し、カメラで撮影する。この操作を1台のカメラにつき両隣の2台のプロジェクタについて行い、スクリーンを回転させる。この時、できるだけ各カメ

ラにスクリーンが正対するようにスクリーンを回転させる。以上の操作をすべてのカメラ、プロジェクタについて行う。その後、それらの観測画像から座標情報を RGB の値によって保持するコード画像を作成する。最後にコード画像における座標情報とその対応関係を入力として自己校正を行う。さらにバンドル調整を行い、カメラおよびプロジェクタの内部パラメータ、外部パラメータを求める。

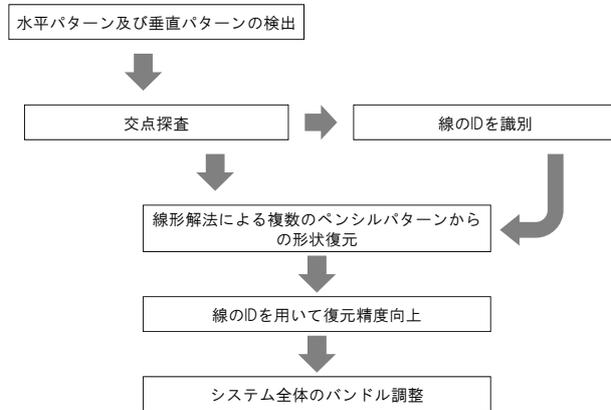


図 6 計測および復元の流れ

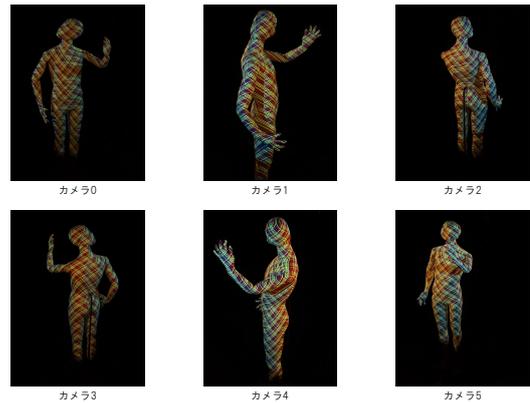
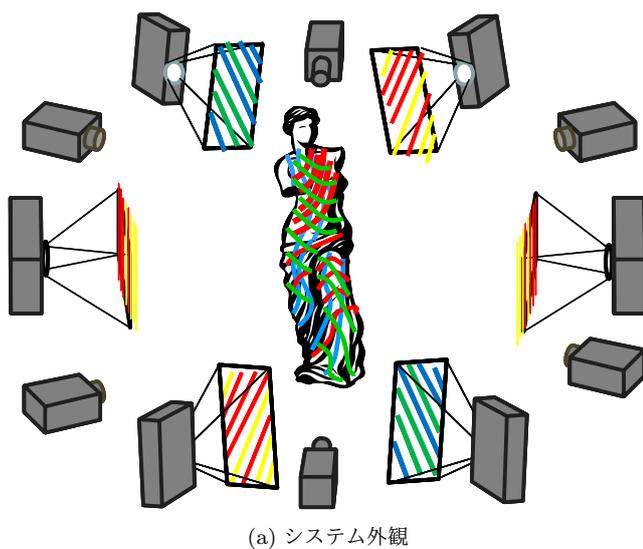
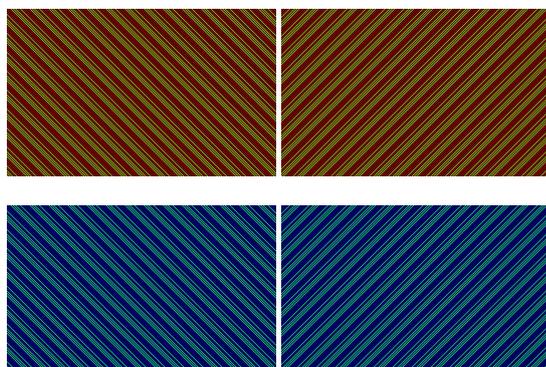


図 8 撮影の様子



(a) システム外観



(b) 投影パターン

図 7 全周計測システム外観

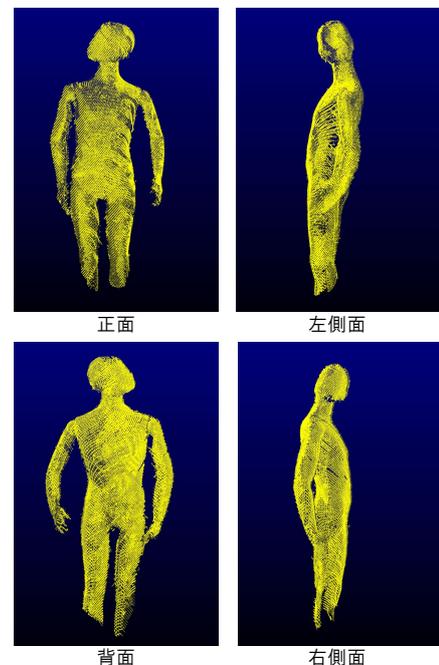


図 9 復元結果

4.1 撮影の自動化

提案手法においてキャリブレーションを行うプロジェクトタから投影するグレーコードパターン及びフェイズシフトパターンを図 11 に示す。従来手法において、投影および撮影は自動で行われていた。しかし、スクリーンの回転は人力で行う必要があった(図 12)。そのため人為的なミスが起こる可能性やキャリブレーション中にカメラやプロジェクトタを取り付けているポールを動かしてしまう可能性があった。また、投影と撮影を行うたびにプロジェクトタのレンズカバーを開閉する必要があり、このときにプロジェクトタを直接触れることでプロジェクトタの位置がずれてしまう恐れがあった。以上のように従来手法を用いてキャリブレーションを行う場合、実験者が手で装置を動かす必要があるため時間と手間がかかっていた。そこで提案手法では投影、撮影、スクリーンの回転を自動で行うように変更を加えた(図 10 点線枠)。これによりキャリブレーションにかかる時間を大幅に短縮することができ、実験者の手間の大部分を省くことができた。スクリーンの回転は位置決め機能内蔵タイプのドライバを用いて自動回転テーブル(図 5(b))を PC から制御することで行った。カメラ 1 にスクリーンを正対させたときのカメラ 1 でのパターン投影時の撮影画像を図 13 に示す。

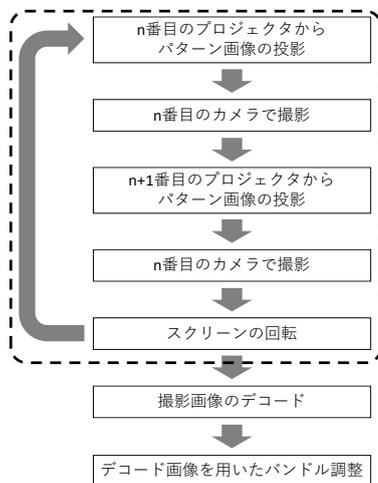
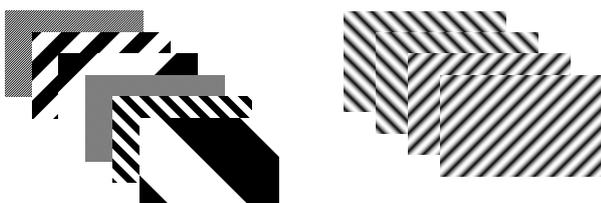


図 10 本手法における校正の流れ



(a) グレーコードパターン (b) フェイズシフトパターン
図 11 パターン画像

4.2 グレーコード画像による対応関係の取得

すべてのカメラプロジェクトタの組み合わせでの撮影が終了した後、図 13 に示す画像から各ピクセルごとにグレーコードパターンに基づいたバイナリコードを得る。グレーコードパターンは縦横それぞれのパターンを 45 度回転させたものを投影する。これにより各ピクセルごとに一意にプロジェクトタの画素との対応関係を得ることができる。また、正弦波パターンによって構成されているフェイズシフトパターンを投影することで画素ごとに濃淡に基づく周期を観測できるのでグレーコードパターンよりも高精度に対応関係を得ることができる。

こうして得られた対応関係を図 14 に示す。このコード画像は各カメラおよび各プロジェクトタにおける対応座標を RGB 値にエンコード保持していたものである。同時に各カメラおよび各プロジェクトタでの画像上の特徴点についての対応関係を生成する。これを次のバンドル調整で用いる。

4.3 平面制約を加えたバンドル調整

キャリブレーションの手順の最後としてコード画像の特



図 12 従来手法で用いられたスクリーン

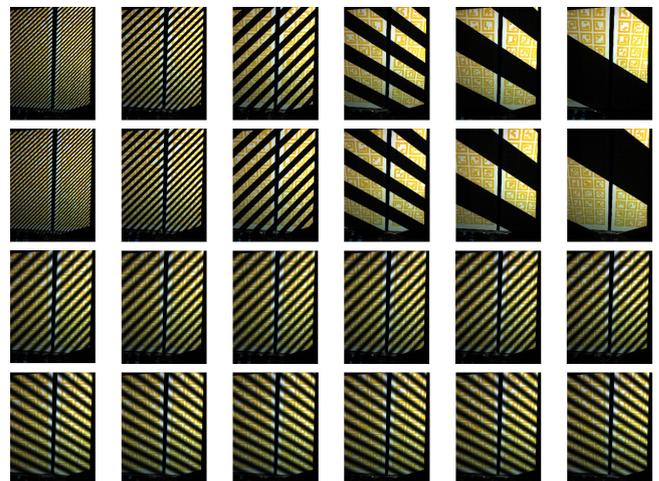


図 13 パターン投影時の撮影画像(カメラ 1)

微点の画像座標およびその各カメラ間、各カメラプロジェクト間での対応関係を用いたバンドル調整を行う [11]. バンドル調整の流れを図 16 に示す. まず, コード画像から特徴点の画像座標を取得し, 対応関係に基づいて各カメラ間および各カメラプロジェクト間でのホモグラフィ行列を求める. そして, 対応関係の多い 2 つのカメラ, もしくはカメラとプロジェクトから順次 RANSAC を用いて相対的な位置姿勢を推定する. この操作を 6 台のカメラ, 6 台のプロジェクトについて行い自己校正による初期パラメータを得る (図 16(a)).

続いて図 16(b) に示した平面拘束付き全体最適化によってカメラ, プロジェクトの内部パラメータおよび外部パラメータを求める. 全体最適化において初期値を基に 3 次元空間中での平面推定を行い, 平面に関するパラメータを取得し, それらを最適化パラメータに加える. 次に推定した平面パラメータを用いて各 3 次元点を平面上に定義した 2 次元座標系へと変換を行い, 2 パラメータで各点を表現する. こうすることで各点が平面上のみを移動するようになり, 平面制約に基づく SBA (Sparse Bundle Adjustment) を行うことができる. SBA を行った後, 再投影誤差および推定された平面からの特徴点の距離に基づいて外れ値除去を行う. これらの操作を外れ値がなくなるまで行うことでバンドル調整が完了する.

平面拘束付きバンドル調整によるキャリブレーションの結果を図 15 に示す. (a) は提案手法, (b) は従来手法による結果を示しているが, 提案手法ではスクリーンを自動回転テーブルによって回したことで平面が一つの軸について回転対称になっていることが確認できた. また, 平面制約による外れ値除去を行っているため平面が正しく復元されていることが確認できる. 従来手法ではカメラとプロジェクトの位置からの目安のみでキャリブレーションが正しく行っているかの判断をしていたが, 提案手法ではそれに加えて中心に位置するスクリーンが正しく交差しているか, 平面性が失われていないかという点においてもキャリブ

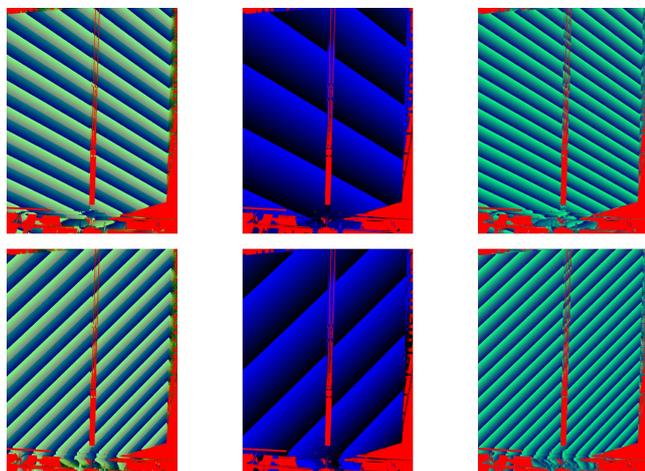
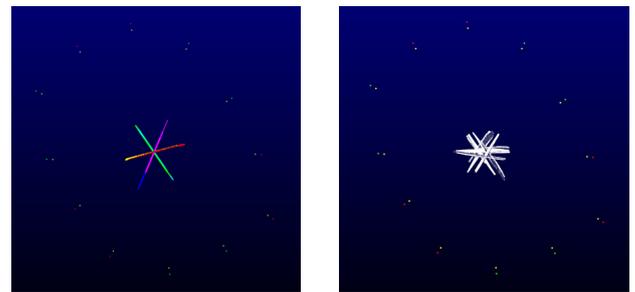


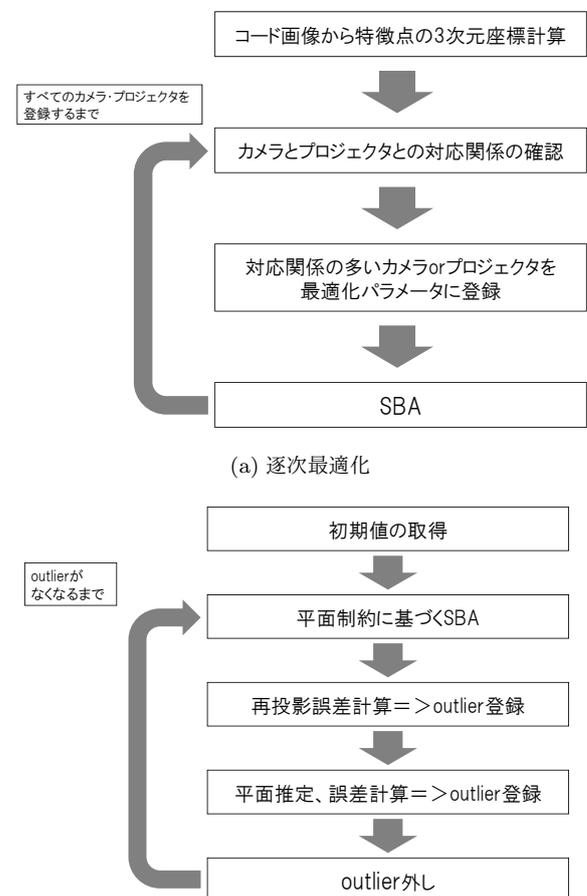
図 14 コード画像

レーションが正しく行っているかどうかの判断が下せるようになり精度の確認が容易になった. 精度向上の定量的評価については第 5 章で示す.



(a) 提案手法 (b) 従来手法

図 15 キャリブレーションの結果



(a) 逐次最適化

(b) 平面拘束付き全体最適化

図 16 バンドル調整の流れ

5. 評価実験

手でスクリーンを回す従来手法との比較実験として直方体の箱の計測・復元を行った. また, 計測対象に形状変化のない物体を用いたので Ground Truth として時間コード法の一つであるグレーコードパターンによる復元を行っ

た. 評価方法として箱のある面に対してその復元結果の点群から推定される平面とのずれの大きさを確認した. 復元手法については先行研究 [9] の手法を用いた. 撮影の様子は図 17 に示す. 第 3 章 3.3 節において説明した復元手法を用いた復元結果と Ground Truth としてのグレーコードパターンを用いた復元結果を図 18 に示す. 図中の赤丸で示

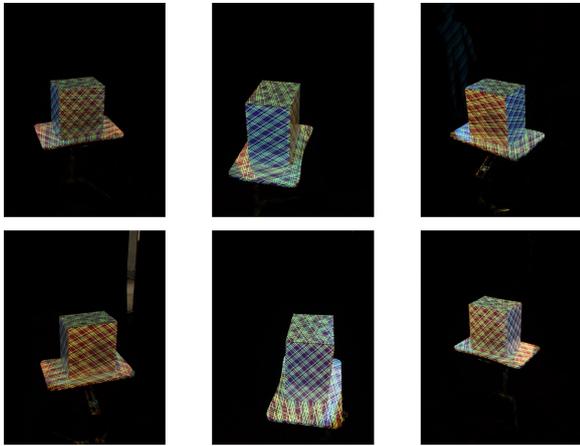
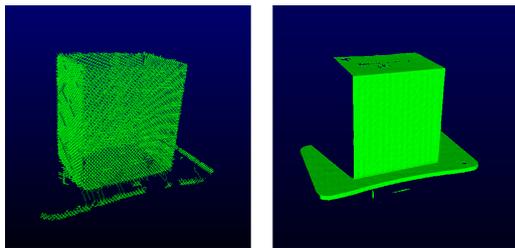
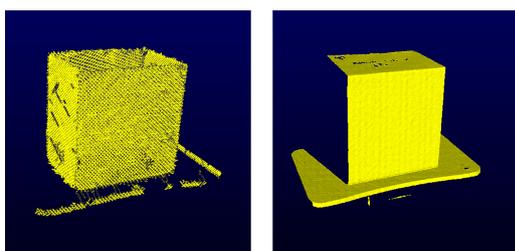


図 17 撮影の様子



(a) 提案手法での復元結果 (左) および Ground Truth(右)



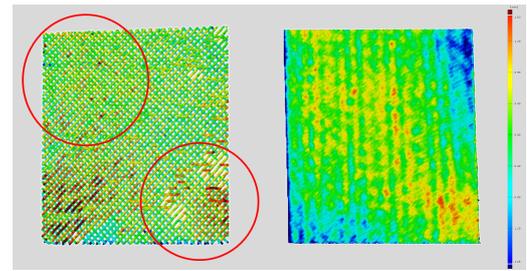
(b) 従来手法での復元結果 (左) および Ground Truth(右)

図 18 復元の結果

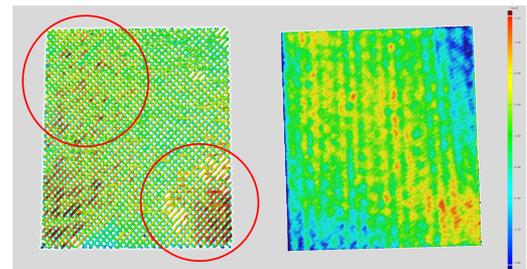
表 1 それぞれの復元結果から推定された平面と点群との距離の標準偏差

	復元結果	Ground Truth
従来手法	0.6275 mm	0.5622 mm
提案手法	0.5855 mm	0.5505 mm

された部分について回転式平面校正儀を用いた手法のほうが平面のたわみが軽減されていることが確認できた. ま



(a) 提案手法での精度評価 (左) および Ground Truth(右)

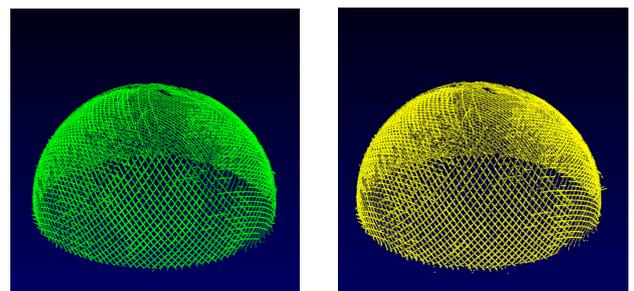


(b) 従来手法での精度評価 (左) および Ground Truth(右)

図 19 精度評価

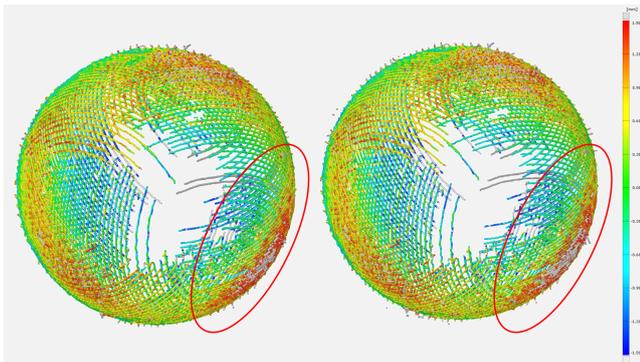
た, それぞれの復元結果から推定された平面と点群との距離に関する標準偏差を表 1 に示している. 表に示してある通り定量的にも精度が向上し, 安定した復元ができていたことが確認できた. 加えて, 従来手法で 50 分かかっていたキャリブレーションを 20 分で行えるようになった.

続いて, 平面制約を加えたことによる精度向上についての評価実験として半球と平面板の計測・復元を行った. 評価方法としてそれぞれを復元した結果得られる点群から推定される球面もしくは平面と点群との距離を確認した. 復元した半球を図 20 に示す. 推定された球面または平面と点群との距離をヒートマップで表したものを図 21 に示す. 図中の赤丸で示された部分について平面制約を加えた手法のほうが半球, 平面板ともに推定された球面または平面からのずれが小さくなっていることが確認できた. また, 推定した球面または平面と点群との距離に関する標準偏差は表 2 に示している. 平面制約を加えることで更に精度が向上したことを定量的に確認できる.

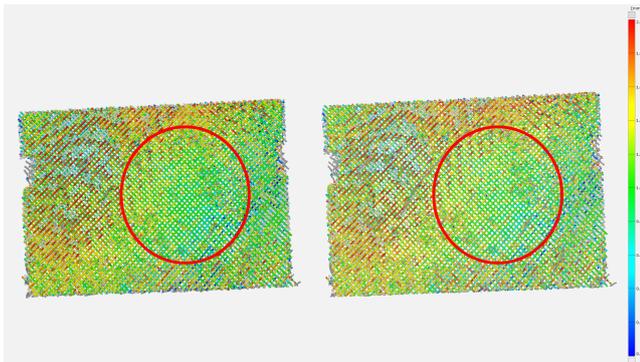


(a) 平面制約ありの復元結果 (b) 平面制約なしの復元結果

図 20 復元結果



半球を復元した場合の精度評価



平面板を復元した場合の精度評価

図 21 (左) 平面制約あり (右) 平面制約なし

表 2 それぞれの復元結果から推定された
球面または平面と点群との距離の標準偏差

	復元結果 (半球)	復元結果 (平面板)
平面制約なし	0.8092 mm	1.5247 mm
平面制約あり	0.7780 mm	1.4473 mm

6. 結論

本研究において回転式平面校正儀を用いたキャリブレーションの自動化システムを提案した。このシステムによって従来手法よりも簡易かつ短時間で全周形状計測システムのキャリブレーションが行えることが示された。また、平面校正儀を用いることによる平面拘束付きキャリブレーション手法を提案した。提案手法により平面板や半球の計測精度の向上が確認されたことからシステムのキャリブレーション精度が向上したと考えられる。今後の課題として平面校正儀に描かれた AR マーカを用いたキャリブレーション手法の構築およびそれによるキャリブレーションの更なる簡素化・精度向上を行う予定である。

参考文献

- [1] Apple. iPhoneX. <https://www.apple.com/jp/iphone-x/>.
- [2] Microsoft. Xbox 360 Kinect, 2010. <http://www.xbox.com/en-US/kinect>.
- [3] Mingsong Dou, Sameh Khamis, Yury Degtyarev, Philip Davidson, Sean Ryan Fanello, Adarsh Kowdle, Sergio Orts Escolano, Christoph Rhemann, David Kim, Jonathan Taylor, Pushmeet Kohli, Vladimir Tankovich, and Shahram Izadi. Fusion4d: Real-time performance capture of challenging scenes. *ACM Trans. Graph.*, Vol. 35, No. 4, pp. 114:1–114:13, July 2016.
- [4] Alvaro Collet, Ming Chuang, Pat Sweeney, Don Gillett, Dennis Evseev, David Calabrese, Hugues Hoppe, Adam Kirk, and Steve Sullivan. High-quality streamable free-viewpoint video. *ACM Trans. Graph.*, Vol. 34, No. 4, pp. 69:1–69:13, July 2015.
- [5] Ryo Furukawa and Hiroshi Kawasaki. Uncalibrated multiple image stereo system with arbitrarily movable camera and projector for wide range scanning. pp. 302–309, 2005.
- [6] Jongwoo Lim, Jeffrey Ho, Ming-Hsuan Yang, and David Kriegman. Passive photometric stereo from motion. In *Computer Vision, 2005. ICCV 2005. Tenth IEEE International Conference on*, Vol. 2, pp. 1635–1642. IEEE, 2005.
- [7] Joan Batlle, E. Mouaddib, and Joaquim Salvi. Recent progress in coded structured light as a technique to solve the correspondence problem: a survey. *Pattern recognition*, Vol. 31, No. 7, pp. 963–982, 1998.
- [8] Mark Young, Erik Beeson, James Davis, Szymon Rusinkiewicz, and Ravi Ramamoorthi. Viewpoint-coded structured light. June 2007.
- [9] Ryo Furukawa, Ryusuke Sagawa, Hiroshi Kawasaki, Kazuhiro Sakashita, Yasushi Yagi, and Naoki Asada. One-shot entire shape acquisition method using multiple projectors and cameras. In *4th Pacific-Rim Symposium on Image and Video Technology*, pp. 107–114. IEEE Computer Society, 2010.
- [10] Jamil Draréni, Sébastien Roy, Peter Sturm, et al. Projector calibration using a markerless plane. In *International Conference on Computer Vision Theory and Applications*, Vol. 2, pp. 377–382, 2009.
- [11] Noah Snavely. Bundler v0. 4 user's manual, 2009.