

スタティックな Wave パターンとバンドル調整法による 水中アクティブワンショット

森永 寛紀¹ 馬場 博久¹ 三嶋 道弘¹ ヴィゼンティーニスカルツァネツラ マルコ¹ 川崎 洋¹
古川 亮² 佐川 立昌³

概要：構造化光（Structured Light）を用いた 3 次元復元は様々な目的で広く利用されている。近年，構造化光を水中環境において利用する研究が行われるようになってきている。構造化光を空中で利用する際，求める 3 次元点と，対応するカメラとプロジェクタによる平面上の 2 次元点の共平面性から，ステレオの対応問題はエピポーラ幾何を用いて効率的に解かれる。一方，水中では，水中とガラス，ガラスと空中の境界面にて屈折が起きることで，対応探索において重要なエピポーラ幾何が成立しなくなる。本論文では，以下の手順により水中における前記問題を解消する。まず，複数の深度でキャリブレーションを行うことで，各深度で閉じた解を得る。これは，各深度の近くにおいては正しい形状となるが，奥行きが異なると正しく復元されない。そこで，この形状を初期値とし，屈折の物理モデルを用いて，バンドル調整法により最適化することで，物理的に正しい形状を得る。提案手法の有効性を示すために，回折光学素子（DOE）レーザーと水中ハウジングからなる，プロトタイプを用いて手法を検証した。

キーワード：プロジェクタ・カメラシステム，ワンショット復元，水中 3 次元計測

1. はじめに

パターン投影によるアクティブ 3 次元計測は，さまざまなアプリケーション，たとえば拡張現実や健康診断，ゲームや映画などにおいて広く用いられている。典型的なアクティブ 3 次元計測システムはカメラとプロジェクタから構成される。通常，プロジェクタは対象物体の表面にコード化されたパターンを投影し，カメラで撮影された対象物体上のパターンを解析し，プロジェクタ画像との対応点を得る。このため，プロジェクタを用いるアクティブ方式は，自然特徴量のみを用いるパッシブステレオより簡単な処理で頑健かつ高密度な対応点が得られる。その結果，産業用や検査目的ではパターン投影型アクティブ 3 次元計測システムは重要な非接触 3 次元形状計測方法のひとつとなって

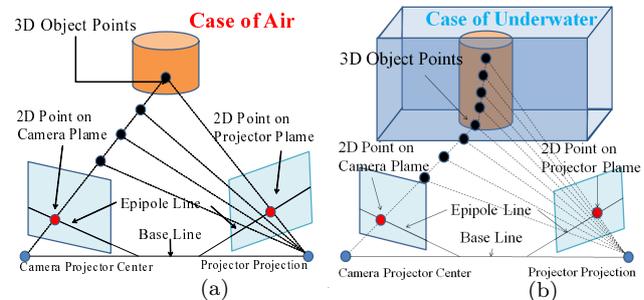


図 1 (a) 水なしのエピポーラ幾何。(b) 水ありのエピポーラ幾何。

いる [1], [2]。特に，ワンショットアクティブ 3 次元計測システムは，一枚の入力のみで形状復元可能なため，動的な環境における高精度計測の主な技術の一つとして近年注目されている [3], [4]。

アクティブ 3 次元計測システムの精度に影響を及ぼす主な要因としてシステムのキャリブレーションがある。これは一定のパターンを使って物体を復元する前にカメラとプロジェクタの内部パラメータ，ならびにそれらの外部パラメータを推定することで行われる。推定したパラメータを用いて，3 次元復元はエピポーラ幾何を用いて行われる。撮影された画像上の特徴点に対応するエピポーラ線をプロジェクタ上に描写し，そのエピポーラ線に沿ってマッチン

¹ 鹿児島大学学術研究院理工学域工学系情報生体システム工学専攻
Department of Information and Biomedical Engineering,
Kagoshima University, 1-21-40, Kohrimoto, Kagoshima,
890-0065 Japan
² 広島市立大学大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Sciences, Hiroshima City
University, 3-4-1, Otsuka Higashi, Asaminami-ku, Hi-
roshima, 731-3194 Japan
³ 産業技術総合開発機構
National Institute of Advanced Industrial Science and Tech-
nology, Dai2, Tsukuba-chuo, 1-1-1, Umesono, Tsukuba,
Ibaraki, 305-8568 Japan

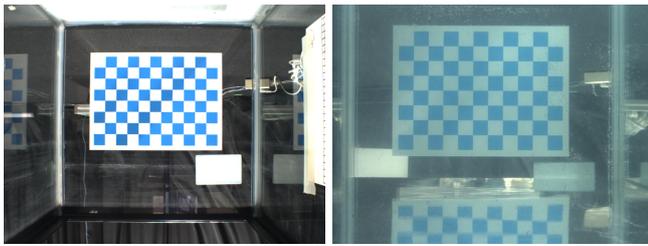


図 2 (a) 空中での撮影画像. (b) 水中での撮影画像.

グを行うことで対応点が見つけれられる. この対応点を三角測量の原理により 3 次元復元する [5].

アクティブ 3 次元計測システムを空気中で使用するとき, 前述のようにカメラ・プロジェクタ平面上の 3 次元点と 2 次元点の共面性によるエピポーラ幾何を用いて効率的に解決することができる. しかし, 水中環境においては, カメラとプロジェクタは通常特別なハウジング内に設置され [6], 屈折が水/ガラスとガラス/空気の境界で発生するので, 図 1(b) に示すように共面性が成立しない. 図 2(a) と (b) はそれぞれ空中と水中において全く同じセットアップで同じターゲットを撮影した画像であるが, 水中の場合拡大され歪んでいることが分かる.

本論文はこのような屈折による問題を解決するため, 3 つのアプローチを提案する. まず, 我々はエピポーラ幾何が近似的に成立する範囲ごとに, デプス依存のキャリブレーションを行う. 次に, 近似による影響でエピポーラ線上に正確には対応点が乗らなくなることが起こるため, ある程度ずれがあっても対応点を正しく発見できるグリッドベース・アクティブ計測法を導入する. 最後に, 各デプス毎に得られる 3 次元形状を入力として, これを物理モデルに基づき再投影し, その誤差を最小化するバンドル法を提案する. 我々はシミュレーションによる実験および, 水槽を用いてカメラとパターンプロジェクタをハウジングに封入し実際に水中に設置し, 提案手法による形状復元を行った.

2. 関連研究

水中カメラ用のキャリブレーション手法はこれまで数多く提案されてきた [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13]. しかし, これらはいずれも, プロジェクタのキャリブレーション手法に言及していない. プロジェクタの光学系はカメラと等価なため, 同様のキャリブレーションを使用できる可能性があるが, プロジェクタの “blindness” のためにカメラのキャリブレーションとは少し異なるものとなる [14].

水中における 3 次元復元手法としては, パッシブステレオを基にしたものがこれまでも数多く提案されている [6], [7], [8], [9]. Queiroz-Neto ら [7] は, 水中の屈折を無視して水中でステレオ復元するモデルを提案しているが,

非線形の屈折による効果により, 低い精度の結果となっている. 近似による手法もいくつか提案されており, 焦点距離を調整する手法 [7] や, レンズ歪みを用いた近似 [8], 両者の組み合わせ [9] などの手法がある. しかしながら, これらの近似手法はいずれも精度の問題から, エピポーラ幾何を用いた対応探索によらない手法となっており, これを基本とするアクティブ 3 次元計測システムに対しては不適である. また, 複数のカメラで水中の対象を周囲から撮影し, スペース・カービング法による 3 次元形状復元手法も提案されている [17], [19].

近年, 水中計測の精度向上のための, 新しいカメラモデルや 3 次元復元手法が提案されている [6], [11], [12], [13], [15], [16], [18]. Agrawal ら [11] は, 物理的な屈折モデルを基にした, 水中カメラ用の一般的なキャリブレーション手法を提案している. 彼らは全ての屈折面が平面であると考え, 屈折モデルのための順投影と逆投影の方程式を定義している. しかし, この手法を用いて 1 つの屈折平面へ順投影を行うためには 4 次元方程式を, 2 平面では 12 次元方程式を解く必要がある. これらの計算によりエピポーラ線は複雑な曲線となるため, アクティブ 3 次元計測システムにこの手法を用いるのは困難である. また, Sedlazeck ら [6] の手法では, 画像平面上の画素とその画素に投影される水中の光路の対応関係に焦点を当てている. しかし, この手法においても, 順投影の計算には複雑な反復計算が必要となり, 実用上の問題がある. Kang ら [12] や Sedlazeck ら [13] は, Structure from Motion (SfM) による水中での 3 次元復元を行っている. SfM は物体の 3 次元形状を得るためのパッシブステレオ手法の 1 つだが, 対応点探索の難しさのため密な復元結果を得ることは困難である. また, 川原らは, 屈折を考慮して各画素が別々の焦点距離を持つ画素依存型パフォーカルカメラモデルを提案している [15], [16], [18].

3. 概要

3.1 システム構成

本研究では, プロジェクタ・カメラシステムを用いたシステムにより水中でアクティブ 3 次元計測を行う. カメラとプロジェクタはそれぞれハウジング内に封入しており, 図 3 に示すような構成で計測を行う. 図 4 が実際に試作した防水性のハウジングの様子である. 左右にあるのは 2 台のカメラ用のハウジングであり, 中央は波状パターンの回折光を用いるレーザープロジェクタ用である.

3.2 屈折による光線の記述方法

3.2.1 厳密解による順投影計算

計算を単純化するために, 我々では定義される 1 枚のみの屈折層における順投影を考える. この時, カメラとプロジェクタは全て各ハウジング内に設置されており, ハウジ

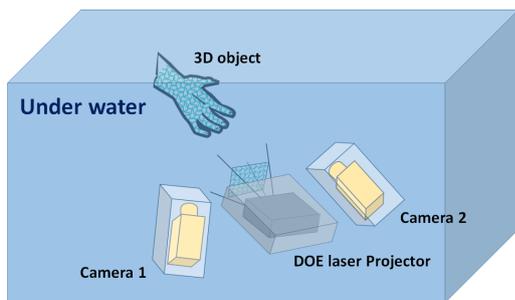


図 3 水中用カメラ-プロジェクタのセットアップ



(a) (b)

図 4 水中実験用器具 (a) ハウジング (b)DOE レーザプロジェクタ

ングのガラス面の厚みは無視できると仮定する。

図 5 はカメラモデルを示している。座標 x は屈折面を示し、この面の上下の媒体の屈折率はそれぞれ μ_1 と μ_2 である。青矢印は 3 次元点 b から飛ぶ光線を示しており、屈折は点 $p_1 = (x_1, 0)$ で平面との交点で発生する。 d は b とカメラのハウジングのガラス平面との間の、 x_b は b と光軸 z との間の距離である。 y_c はカメラの焦点である。発生角は α 、反射角は β と仮定する。この時、スネルの法則に基づき、以下の方程式が得られる

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{\mu_2}{\mu_1} = n, \quad (1)$$

$$\sin \alpha = \frac{x_1}{\sqrt{x_1^2 + y_c^2}}, \sin \beta = \frac{x_b - x_1}{\sqrt{(x_b - x_1)^2 + d^2}}. \quad (2)$$

上記式の変形により、次の式が得られる。

$$(n^2 - 1)x_1^4 + (-2x_b n + 2x_b)x_1^3 + (x_b^2 n + y_c^2 n - x_b^2 - d^2)x_1^2 - 2x_b y_c^2 n x_1 + x_b^2 y_c^2 n^2 = 0 \quad (3)$$

この 4 次元方程式を解くことで、水中の 3 次元点をカメラ画像上に順投影した際の座標が得られる。

3.2.2 多項式近似による中心投影画像生成

3 次元位置が分かっている場合は、前述の 4 次元方程式を解くことで順投影が可能であるため、対応点関係が既知であれば、バンドル調整法などにより 3 次元推定が可能である。しかし、そうでない場合、何らかの手法で対応点関係を得る必要がある。中心投影カメラモデルで良く利用される手法として、エピポーラ拘束により探索範囲を限定し、

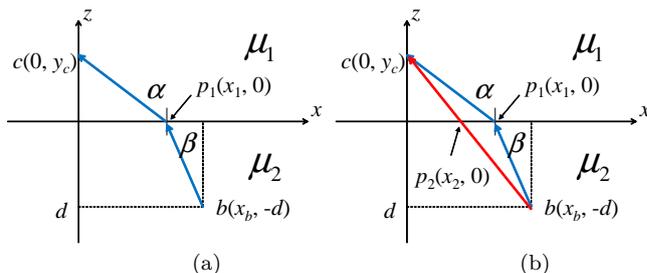


図 5 (a) 物理カメラ屈折モデル (b) 多項式近似カメラ屈折モデル

効率よく対応点を獲得する手法がある。しかし、水中の場合、屈折により中心投影カメラモデルでは無くなるため、エピポーラ線を引くことができず、この手法を利用できない。そこで、本論文では、多項式近似による中心投影画像を生成し、エピポーラ拘束による対応点探索を行う。

図 5(b) で示すように、我々は 2 種類の光路を考える。青線は 3 次元点から出る光線が屈折を通してカメラに撮影される光路を示している。一方、赤線は中心投影モデルを仮定した光路を示している。 p_1 は青線とカメラの画像平面の交点、 p_2 は赤線との交点である。本論文では、 p_1 と p_2 との間の距離 E を、以下の多項式により近似する。

$$E(p_1) = \alpha_1 r^2 + \alpha_2 r^4 \quad (4)$$

式 (4) の r は、3 次元座標軸 xyz におけるカメラの中心と p_1 間の 2 次元ユークリッド距離を表す。キャリブレーションの際に、外部パラメータだけでなく多項式近似パラメータ α_1 と α_2 を推定する。このパラメータを用いて撮影した画像を変換することで、近似的に中心投影カメラで撮影した画像が合成できるため、これによりエピポーラ線を引くことができ、効率的な対応点探索が可能となる。

ただし、この近似は特定の距離を仮定した場合にのみ成立する。さらに近似による誤差により、厳密なエピポーラ拘束は成立しない。これらの問題点は以下に述べる手法により解消する。

4. デプスに依存したキャリブレーション

4.1 キャリブレーションの概要

前述の近似はカメラとの距離 (デプス) に依存するため、本論文では複数のデプスでキャリブレーションを行うことで、その問題を回避する。まず、カメラとプロジェクタをそれぞれのハウジング内に格納し、水槽に沈める。その後、特定のデプスで、カメラの内部パラメータや近似パラメータを、チェッカーボードを用いて推定する [20]。続いて、サイズが既知の球を用いて、プロジェクタの内部パラメータと、カメラ-プロジェクタ間の外部パラメータを推定する (次節)。これをデプスを変えながら複数回行う。

4.2 球ベースのプロジェクタおよび外部パラメータのキャリブレーション

図 6(a) に、投光器からパターンを投影した球面物体を、カメラで撮影した画像を示す。球面の半径は既知であるとする。レンズ歪みは、補正されている。このような画像から、球体の輪郭上の点をサンプリングする。3 個以上の点をサンプリングすれば、それらの情報から、カメラに対する球面の 3 次元位置を推定することができる。

さらに、球面上で観測される格子点の、画像上での位置がわかれば、球面に対してレイトラシングを行うことで、その格子点の 3 次元位置を推定できる。この格子点について、投光器のパターン画像上での 2 次元位置がわかれば、投光器をカメラと見なした場合の 3 次元点と 2 次元点の組が獲得でき、内部パラメータのキャリブレーションが可能になる。この場合の 3 次元点は、カメラ座標系であるため、カメラ座標系と投光器座標系との変換パラメータも同時に求められ、外部パラメータのキャリブレーションも行われる。

実際にキャリブレーションを行う場合には、キャリブレーションの精度を上げるために、投光器の内部パラメータ、外部パラメータ、及び球面の中心の 3 次元位置を変数として、誤差最小化基準による最適化を行う。これらの内部、外部パラメータを変数とし、これらの変数を利用して、投光器からのレイトラシングで格子点の 3 次元位置を求め、さらにカメラ画像に投影する。この投影位置と、観測で得られた像の位置との距離は、カメラ画像面上での誤差となる。図 6(b) の例では、投光パターン上のグリッド点 g_{p1} から、球面上のグリッド点 g_{c1} がレイトラシングで計算され、カメラ画像上の g_{i1} に投影される。レイトラシングで球面上にグリッド点が無い場合、球面の中心を通りカメラに正対する補助平面との交点を利用すると、最適化を安定して実行できる。

また、サンプリングされた輪郭点に対応する視線をカメラ座標系で求めた場合、その視線は 3 次元空間で球体に接することから、球体との距離は既知半径に等しい。このことから、変数から求められた球体との距離と、半径との差を誤差と見なす (図 6(b))。この式は、 $(\sqrt{|c|^2 - (\vec{s} \cdot \vec{c})} - r)$ となる。これらの誤差の自乗和を、Levenberg-Marquardt 法で最小化する。

5. アクティブ 3 次元復元手法

5.1 Wave グリッド復元

3 次元形状復元を行うにあたって、撮影画像とプロジェクタ画像との対応点を見つける必要がある。そこで我々は効率良く対応点探索を行うために、単色波形パターンを用いた手法を用いる。図 7(b) にパターンのサンプルを示す。この手法はエピソード幾何による対応点探索を行うが、波形グリッドの交点の間隔が画素幅よりも更に大きいため、

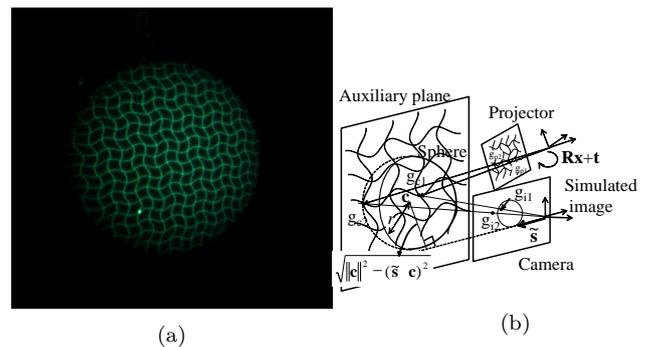


図 6 球を用いたパターンプロジェクタの内部・外部パラメータのキャリブレーション: (a) 球上のパターン投影画像, (b) 再投影誤差の様子

探索時の多項式近似による精度への影響は、数ピクセルの誤差であれば対応点探索には影響しない。この性質は我々の水中計測について重要な要素である。多項式による近似誤差や、深さごとのキャリブレーションが、ある程度広い間隔で行われることにより、エピソード拘束は必然的に誤差を含む。Wave グリッドにより、これらの誤差は吸収され、正しい対応点と初期値が得られる。残る誤差は、次節で述べるバンドル調整法による最適化プロセスにより解消される。

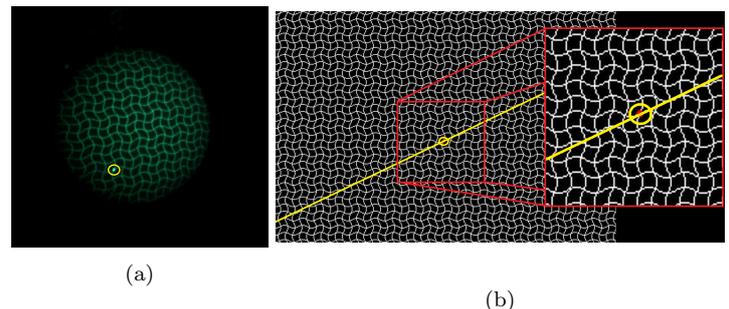


図 7 (a) 対応点, (b)(a) に対するエピソード線

5.2 バンドル調整法を用いた誤差の解消

3 次元形状の最適化は、空中におけるカメラ・プロジェクタにおけるバンドル調整法と同様に以下のように行われる。まず、2 次元点の対応点は前節の Wave グリッドによる 3 次元形状復元の際に取得できているため、これを利用できる。バンドル調整法において、従来の手法と異なる点は以下の 2 つである。一つ目は、再投影の際に屈折を考慮しているという点である。今回屈折層はハウジングによるガラス平面の一層を想定しているため、既に述べた 4 次元方程式による厳密計算により再投影を行う。二つ目はハウジングのガラス平面のパラメータを同時に最適化する点である。ハウジングのガラスは理想とは異なり多少の傾きを生むため、精度の良い復元のためにはそれらも推定する必要がある。具体的には、近似モデルを用いて計算された 3 次元形状を初期値として、LM 法により最適化を行う。

6. 実験

6.1 デプス依存のキャリブレーション

二台の Point Grey Research 社製のカメラと、DOE レーザーを用いて実験を行った。その実験の様子を図 8 に示す。水中でのセットアップ後、提案手法を用いてカメラ及びプロジェクタのキャリブレーションを行う。図 9(a) に、キャリブレーションのための球体を実際に撮影した画像を示す。各々のデプスでの内部パラメータ及び外部パラメータを推定した後、次にキャリブレーション用の球体の 3 次元復元を行った。その結果を図 10 に示す。二台のカメラから二つの復元結果が得られた。これらの復元は、各カメラとプロジェクタ間のキャリブレーション及び形状復元において独立したプロセスとして行われるため、二つの復元結果が一致していないことが分かる。

6.2 Wave ワンショット復元

次にマネキンの撮影及び単色波形パターンを用いた 3 次元形状復元を行う。図 9(b) に撮影画像のサンプルを示し、図 11 にその復元結果を示す。これらの画像からマネキンの 3 次元形状が復元できていることがわかる。しかしこれらの復元結果は前節の結果と同様に、異なるカメラで独立したキャリブレーション及び形状復元を行っているためずれが生じている。これらは、バンドル調整法により統合され、正しい結果を得ることができる。

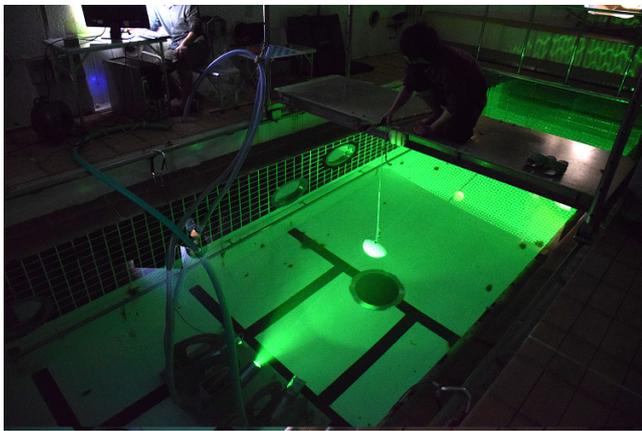


図 8 水中計測の実験環境

6.3 バンドル調整法による形状統合より精度改善

続いてバンドル調整法による 3 次元形状の統合及び精度改善を行う。最初に、手法の有効性をシミュレーションにより確認した。まず水中環境を想定し、プロジェクタから 7×10 のドットパターンを 2m 先の板に投影する。次に仮想カメラを用いてこれを撮影した画像を作成する。撮影画像とパターン画像、そして指定したパラメータを用いて 3 次元形状を得るが、それらは屈折により、実際とは異なる

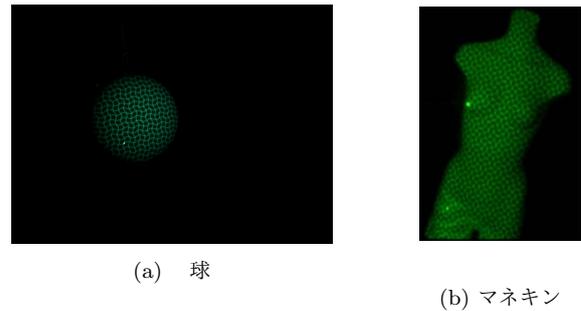


図 9 撮影画像。球上の明るい点を得る。その点は世界座標における位置を決める四つのマーカーのうちの一つである。キャリブレーションの詳細は節 4.2 で説明している。

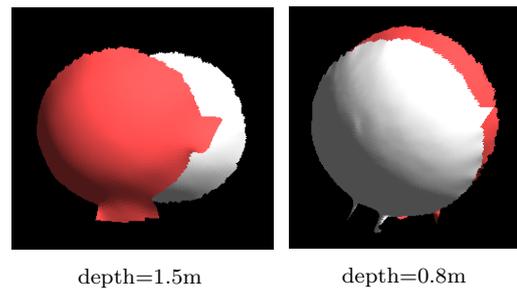


図 10 キャリブレーションに使われる球の復元結果。

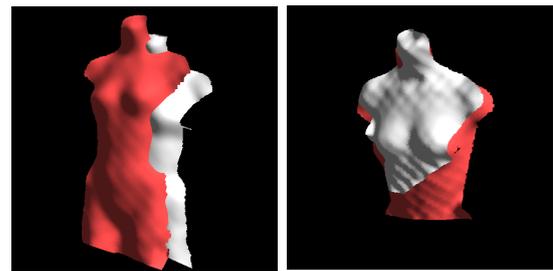


図 11 異なる深度におけるマネキンの復元結果。白い形状は左のカメラで復元され、赤い形状は右のカメラで復元されたもの。

位置に復元される。これらを再投影誤差を最小とするようにバンドル調整法により最適化する。図 12 にその結果を示す。この結果から、4 次元方程式とバンドル最適化を用いて正しい形状が得られたことが確認できる。

最後に、実際に水中で撮影された板の復元結果にバンドル調整法を適用した。図に示すように、提案手法により、再投影誤差が大幅に小さくなったことが確認でき、さらに独立したカメラで復元された形状が正しく統合されたことが確認できる。復元形状を平面にフィッティングしその平面からずれを RMSE として計算したところ、バンドル調整前が 9.7mm であったのに対して、最適化後は 0.5mm まで減少し、我々の手法の有効性が示された。

7. まとめと今後の方針

本論文では、水中環境でのワンショットによるアクティブ 3 次元計測を提案した。この目的を達成するため、以下の三つの手法を提案した。はじめに、多項式近似を用いた

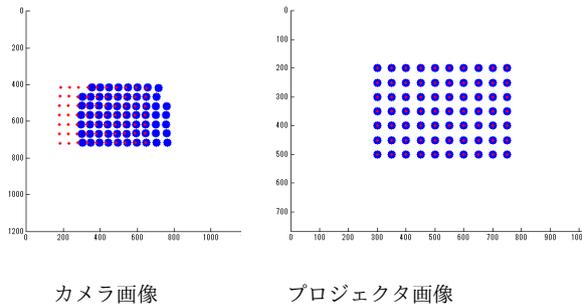


図 12 最適化前のカメラとプロジェクタの再投影。青: 計測点, 赤: 再投影点。

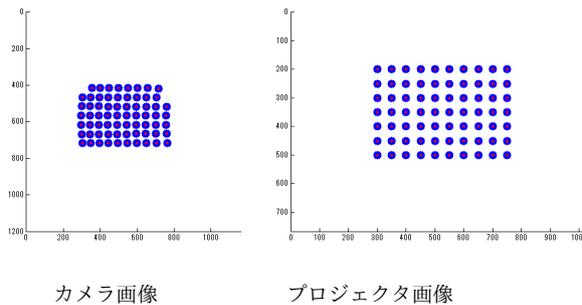


図 13 最適化後のカメラとプロジェクタの再投影。青: 計測点, 赤: 再投影点。

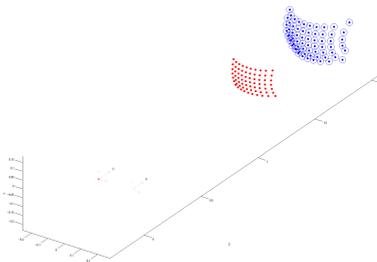


図 14 球の形状復元 (赤:初期位置, 青点:Ground truth, 青の円:正確な結果)

デプス依存のカメラ・プロジェクタのキャリブレーション手法を提案した。次に、単色波形パターンによる復元手法を用いることで、エピポーラ幾何における誤差を解決し効率的に特徴点探索手法を提案した。最後に、得られた3次元点を4次元方程式を用いて再投影し、2次元上での誤差を計算することで、バンドル調整法による3次元形状の統合および高精度化手法を提案した。シミュレーションと実環境での実験によってこれらの有効性が示された。今後の予定としては、水中における動く物体の撮影を行い、動的シーンの形状復元を目指す予定である。

参考文献

[1] M. Young, E. Beeson, J. Davis, S. Rusinkiewicz and R. Ramamoorthi, “Viewpoint-coded structured light,” CVPR, June 2007.
 [2] O. Hall-Holt and S. Rusinkiewicz, “Stripe boundary codes for real-time structured-light range scanning of moving objects,” ICCV, vol. 2, pp. 359–366, 2001.
 [3] R. Sagawa, Y. Ota, Y. Yagi, R. Furukawa, N. Asada and

H. Kawasaki, “Dense 3D reconstruction method using a single pattern for fast moving object,” ICCV, 2009.
 [4] H. Aoki, R. Furukawa, M. Aoyama, S. Hiura, N. Asada, R. Sagawa, H. Kawasaki, T. Shiga and A. Suzuki, “Non-contact measurement of cardiac beat by using active stereo with waved-grid pattern projection,” Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2013 35th Annual International Conference of the IEEE IEEE, pp. 1756–1759, 2013.
 [5] M. Mazaheri and M. Momeni, “3d modeling using structured light pattern and photogrammetric epipolar geometry,” The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. 37, pp. 87–90, 2008.
 [6] A. Sedlazeck and R. Koch, “Calibration of housing parameters for underwater stereo-camera rigs,” BMVC, 2011.
 [7] J. P. Queiroz-Neto, R. Carceroni, W. Barros and M. Campos, “Underwater stereo,” Computer Graphics and Image Processing, 2004. Proceedings. 17th Brazilian Symposium on IEEE, pp. 170–177, 2004.
 [8] R. Ferreira, J. P. Costeira and J. A. Santos, “Stereo reconstruction of a submerged scene,” Pattern Recognition and Image Analysis, Springer, pp. 102–109, 2005.
 [9] O. Pizarro, R. Eustice and H. Singh, “Relative pose estimation for instrumented, calibrated imaging platforms,” DICTA Citeseer, pp. 601–612, 2003.
 [10] J.-M. Lavest, G. Rives and J.-T. Lapresté, “Underwater camera calibration,” Computer Vision—ECCV 2000, Springer, pp. 654–668, 2000.
 [11] A. Agrawal, S. Ramalingam, Y. Taguchi and V. Chari, “A theory of multi-layer flat refractive geometry,” CVPR, 2012.
 [12] L. Kang, L. Wu and Y.-H. Yang, “Two-view underwater structure and motion for cameras under flat refractive interfaces,” Computer Vision—ECCV 2012, Springer, pp. 303–316, 2012.
 [13] A. Jorrdt-Sedlazeck, D. Jung and R. Koch, “Refractive plane sweep for underwater images,” GC Pattern Recognition, Springer, pp. 333–342, 2013.
 [14] X. Fu, Z. Wang, H. Kawasaki, R. Sagawa and R. Furukawa, “Calibration of the projector with fixed pattern and large distortion lens in a structured light system,” The 13th IAPR Conference on Machine Vision Applications, 2013.
 [15] 川原僚, 延原章平, 松山隆司, “水中撮影のための画素依存型バリフォーカルカメラモデル,” 研究報告コンピュータビジョンとイメージメディア (CVIM), 2013.
 [16] 川原僚, 延原章平, 松山隆司, “画素依存型バリフォーカルカメラモデルによる水中多視点カメラ群の線形外部キャリブレーション,” 研究報告コンピュータビジョンとイメージメディア (CVIM), 2014.
 [17] R. Kawahara, S. Nobuhara, T. Matsuyama, “Underwater 3D Surface Capture Using Multi-view Projectors and Cameras with Flat Housings,” IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications, 2014.
 [18] R. Kawahara, S. Nobuhara, T. Matsuyama, “A pixel-wise varifocal camera model for efficient forward projection and linear extrinsic calibration of underwater cameras with flat housings,” Computer Vision Workshops (ICCVW), 2013.
 [19] 矢野智彦, 延原章平, 松山隆司, “水中物体向け視体積交差法,” CVIM, 2013.
 [20] Z. Zhang, “A flexible new technique for camera calibration,” Technical Report MSR-TR-98-71, 12 1998.

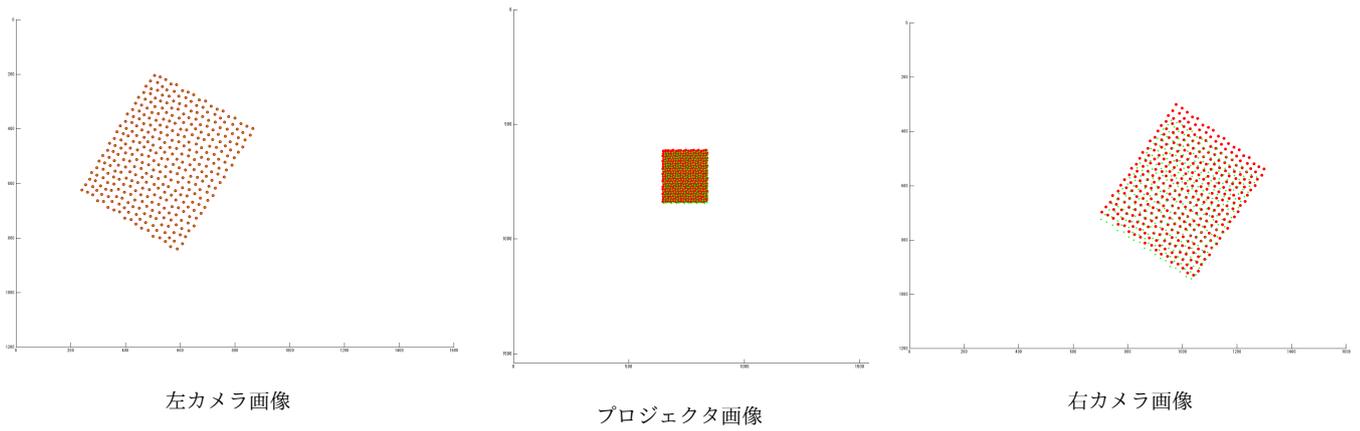


図 15 最適化前のカメラとプロジェクタ画像の再投影. 赤点は計測点で緑点は再投影点. 初期形状は左カメラとプロジェクタで復元されたもの. そして左カメラ画像は右カメラ上に現れる大きい誤差に正しい対応関係がある.

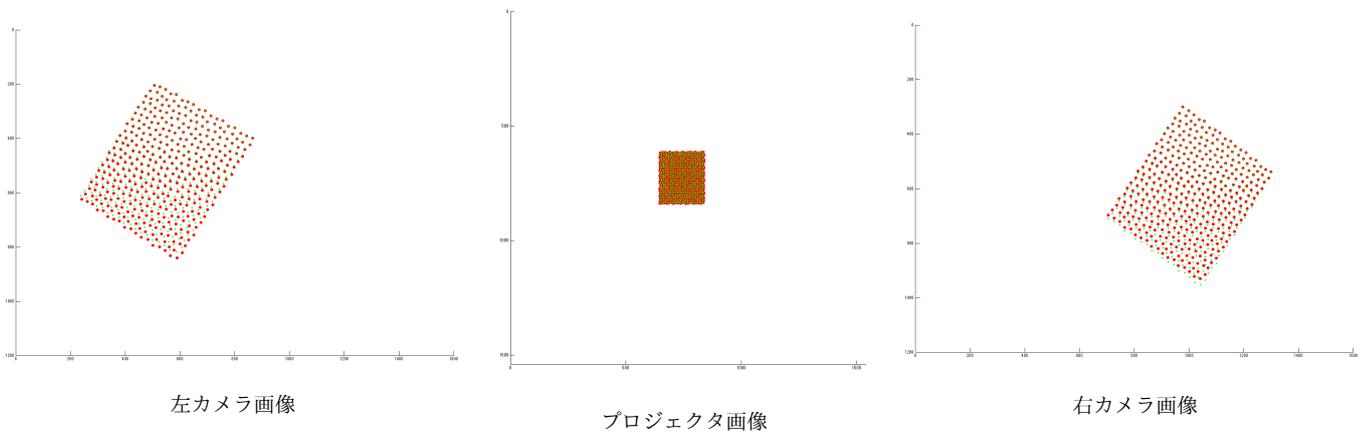


図 16 最適後のカメラとプロジェクタ画像の再投影. 赤点は計測点, 緑点は再投影点. 初期位置において左カメラの誤差は増えているが, 右カメラでは減少している, それは合計誤差が LM アルゴリズムにより減った為である.

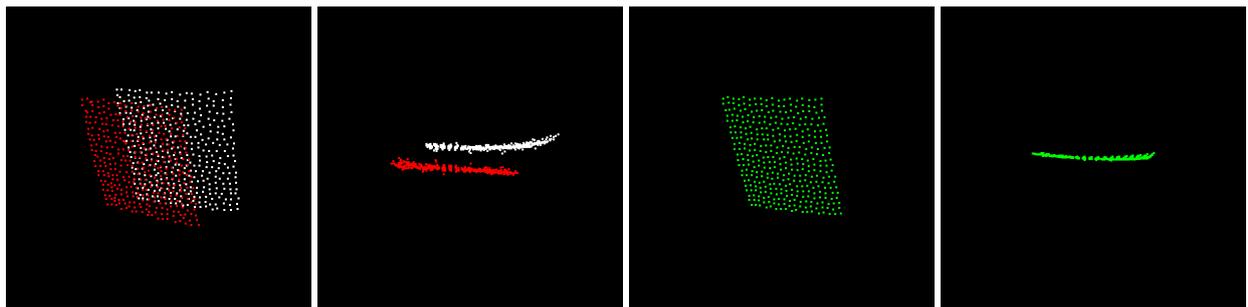


図 17 平面板の形状復元 (赤: 左カメラにおける初期位置, 白: 右カメラにおける初期位置, 緑: 最適化後の最終形状).

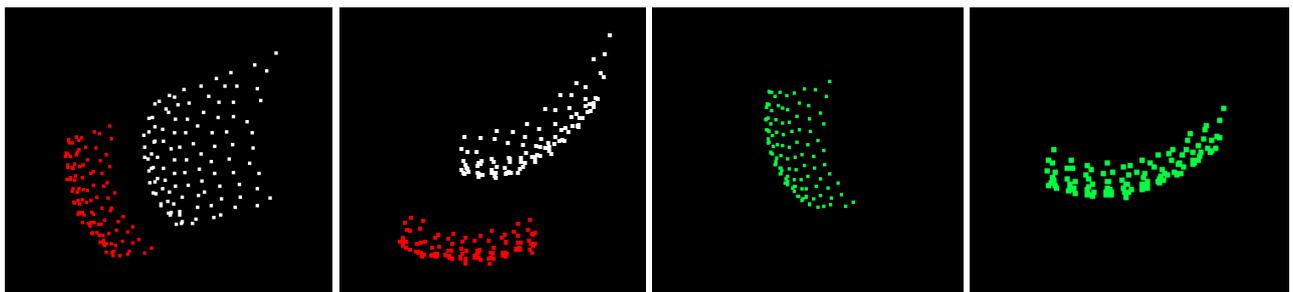


図 18 メッシュのバージョンが図 10 に示される球の形状復元 (赤: 左カメラにおける初期位置, 白: 右カメラにおける初期位置, 緑: 最適化後の最終形状).