

デプスに依存したレンズ歪みで屈折を近似した 水中アクティブワンショットスキャンシステム

中井 英晶¹ 馬場 博久¹ 蛭川 琢斗¹ 佐川 立昌³ 古川 亮² 川崎 洋¹

概要: 近年水中における3次元形状の計測手法の需要が拡大している。Structured Light Systems(SLS)は空中環境下で広く利用されており、水中環境においても適用可能である。しかし、水中では通常カメラ・プロジェクタはハウジング内にあるため、空中/ガラス/水中の屈折の影響を受ける。本研究では、キャリブレーションにより得られた、カメラ中心と屈折層との距離と、屈折層の法線方向を用いて、任意のデプスにおける屈折の影響をレンズ歪みで近似する手法を提案する。近似された歪みパラメータをもとに、画像を疑似的に屈折のない透視投影変換画像へと変換することで、既存のアクティブ・3次元形状計測手法を適用することが可能となる。提案手法では、動いている物体の計測に適した、レーザー・グリッドパターン・プロジェクタとカメラによるシステムを使用し、水中における動く物体を計測するシステムを作成した。また、本実験では高速で動く魚を効率よく計測するため、背景差分法による計測物体の検出機能を実装することで、実際に水族館において生きた魚の自動撮影を実現したので報告する。

キーワード: アクティブワンショット、3D形状復元、SLS

Underwater active oneshot scanning system using approximated refraction by lens distortion depending on depth

HIDEAKI NAKAI¹ HIROHISA BABA¹ TAKUTO HIRUKAWA¹ RYUSUKE SAGAWA³ RYO FURUKAWA²
HIROSHI KAWASAKI¹

Abstract: Underwater 3D shape scanning technique becomes popular. Structured light systems (SLS) based active 3D scanning systems are widely used in the air and also promising to apply underwater environment. When SLS is used in the air, the stereo correspondences can be efficiently retrieved by epipolar constraint. However, in the underwater environment, the camera and projector are usually set in special housings and refraction occurs at the interfaces between water/glass and glass/air. In this paper, we propose an efficient technique to calibrate the underwater SLS systems as well as robust 3D shape acquisition technique. In order to avoid the calculation complexity, we approximate the system with central projection model. Although such an approximation produces an inevitable errors in the system, such errors are eliminated by the grid based SLS technique followed by a bundle adjustment algorithm. We tested our method with a real underwater SLS, consisting of custom-made laser pattern projector and underwater housings, showing the validity of our method. And also, we have treated fast objects like fish, so we made an auto-capture system. In fact, we could capture many frames of fish.

Keywords: acitive oneshot scanning system, 3D shape shape reconstruction, SLS

1. はじめに

近年、海洋の水中探査目的の地図作成や、水生生物の形状計測など様々な目的のために、水中での3次元形状計測

¹ Faculty of Engineering, Kagoshima University, Kagoshima, Japan

² Faculty of Information Science, Hiroshima City University, Hiroshima, Japan

³ National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Ibaraki, Japan

に注目が集まっている。また、アクティブ 3D スキャンシステムベースの Structured light systems(SLS) は空中での多くの目的に広く使われており、水中環境でも適用され始めている。

一般的な SLS は、投影されたパターンが対象物体の表面に投影されるようにカメラとプロジェクタを配置しており、対象の画像はそのカメラから撮影され、3D 形状を取得するように変換される。本技術では、アクティブパターンプロジェクターを採用しているため、対応関係の探索手順は独特な固有のパターンによって安定して求められる。その結果、高精度で密な復元ができる。これらのうち、ワンショットの SLS は最近動的な対象を計測する技術として多くの研究者に興味を持たれている [2], [12]。水中環境に SLS を適用するためには、いくつかの問題を解決する必要がある。まずキャリブレーションがある。SLS において、通常カメラとプロジェクタの内部パラメータと外部パラメータは、プロジェクタから投影されたパターンとカメラで撮影された画像との対応関係を用いて測定される。その対応関係の問題は空気中ではエピポーラ幾何を用いて効果的に解かれるが、水中環境では屈折のためエピポーラ幾何を用いることが出来ず解くことが出来ない。また別の問題として、一般的な 3D 復元技術は中心投影モデルを元に行っているが、水中環境へは適用されない。本論文では、前述した問題を解決する 3つの方法を提案する。

一つ目は、平板に AR マーカーを印刷した校正儀を用いた水中環境におけるキャリブレーション手法である。ここで得られる特徴点を用いて、カメラとプロジェクタを効率よくキャリブレーションすることが出来る。特に、屈折による幾何的な問題を対処するために、特定のデプスを対象として中心投影モデルを用いた近似を行う。これは、計測環境における、屈折環境（カメラと屈折層との距離や、屈折層の法線）を用いてシミュレーションにより、特定のデプスの屈折量を計算し、これをレンズ歪モデルで近似することで実現される。次に、近似モデルによる誤差をバンドル調整法によって改善する 3D 復元アルゴリズムを提案する。提案手法は、デプス依存であることと、近似モデルであることにより、必然的に誤差を持つため、実際の屈折モデルを用いて、2つのカメラと1つのプロジェクタによるバンドル調整法により精度向上が可能である。最後に、背景差分を用いた自動撮影システムを開発した。これは、泳ぐ魚を長時間に渡り計測し続けるためには必須のシステムである。

実際に、カメラとプロジェクタをハウジングに封入し、水族館内の水槽で本キャリブレーションシステムを試行し計測実験を行ったところ、泳ぐ魚の形状計測を実現することに成功した。

2. 関連研究

水中カメラ用の校正手法はこれまで数多く提案されてきた [1], [6], [7], [9], [11], [14]。しかし、これらはいずれもプロジェクタの校正手法に言及していない。また、Agrawalらは、共平面性を用いて画像平面上の画素と光線との対応関係に注目した手法を提案した [1]。Kawaharaらは画素毎に異なった仮想焦点距離を設定することで高精度な形状復元の手法を提案した [9]。しかし、いずれも中心投影を仮定しないためエピポーラ幾何による 3次元形状復元を行うことはできず、カメラとプロジェクタを用いたアクティブ 3次元計測に直接利用できなかった。

また、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 Agrawalら [1]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校正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、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次元方程式を解くことで順投影座標を計算する手法を示した。提案手法においても、プロジェクタとカメラ間で近似的なエピポーラ幾何を利用することで対応点を得て、最終的には 4次元方程式を解くことで順投影を計算することで、バンドル調整法による高精度な解を得る

森永らは、グリッドパターンと DOE を用いたアクティブスキャンシステムを提案しており、2台のカメラで得た初期形状をバンドル調整法により高精度化し、再投影誤差を最小化することで、復元形状の精度を向上させる手法を提案した [5]。しかし、水中でのキャリブレーションについては、計測可能なデプス範囲を最初に固定し、そこに校正儀を沈めるという手法であり、計測範囲が限定されるものであった。

3. 水中アクティブワンショットスキャンシステム

3.1 システムの構成

水中環境でもカメラとプロジェクタから成る SLS を用いるために、カメラとプロジェクタはそれぞれハウジング内に設置される。加えて、我々は全てのカメラが同期していると仮定する。パターンが特有のものであるため、同期がなければプロジェクタは求められない。実際の構成を図. 1 に示す。我々は図 2 のような防水のハウジングを作成した。左と右のハウジングにはカメラがあり、真ん中には Wave パターンを投影する回折光学素子 (DOE) レーザープロジェクタがある。DOE のエネルギー効率率は 90% を超えており、水中環境のような環境でも安定して利用できる。しかしながら、単一の固有パターンが投影されるため、

SLS を適用する技術には限界がある。そこで我々はグリッドベースの手法 [13] を採用する。我々は以下の 2 つの理由のため本システムを作成した。

- (1) 2 つのカメラとベースラインを用いると、1 つの視点内の限定された範囲を復元できる。それにより、従来の単眼カメラシステムを用いるよりもより広い範囲を復元できる。
- (2) プロジェクタは画像を撮影することはできないため、誤差を最小化するバンドル調整法は複数のカメラなしでは適用されない。

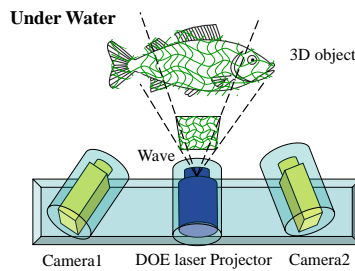


図 1 防水ハウジング内のカメラとプロジェクタの構成

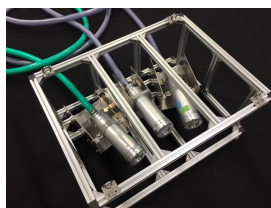


図 2 2 台のカメラと DOE プロジェクタを用いた実際の水中スキャンシステム

3.2 アルゴリズム概要

我々のシステムは主にキャリブレーション処理と、形状計測・復元処理の 2 つで構成される。キャリブレーション処理では、まずはじめに空中でカメラの内部パラメータを計測する。そして水中内にシステムを沈め、まるで空中であるかのようにシステム全体を校正する。その際、中心投影モデルを用いて行う。水中の光学モデルは屈折のため中心投影ではない、そのため必然的な誤差が発生するのでこれを補わなければならない。我々の手法では、多項式近似を用いて疑似的な中心投影による画像を得る。一度そのような中心投影画像を得ると、エピソード幾何学が適用でき、対応関係は許容誤差を設定することで効率的に得ることができ、同時に既存のステレオ手法による形状復元が実現できる。さらに、この対応関係を用いて、屈折モデルを用いたバンドル調整法により、近似による誤差は最終的に解消される。

また計測・復元パートでは、我々は 2 段階のアプローチを用いる。まず、近似された中心投影モデルを用いて、wave

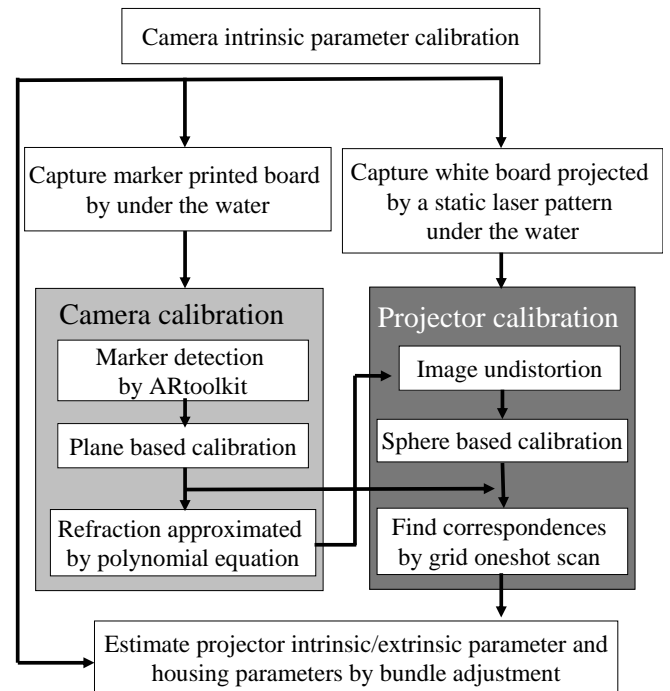


図 3 水中のキャリブレーション手順

グリッド計測手法により初期形状を得る。これは誤差を含むため、推定された 3 次元点を初期として物理的に正しい屈折モデルを用いたバンドル調整法によってこれを改善する。計測に際しては背景差分法を用いて計測物体の検出を行う自動撮影システムを開発する。これにより、泳ぐ魚のみを効率よく計測できる。

4. 平面板を使用した水中キャリブレーション

図 3 に示すワークフローでキャリブレーションを行う。この手法では、まず空中でカメラの内部パラメータが平面板 [15] を使って推定される。その後、カメラとプロジェクタがそれぞれハウジングに設置され、水で満ちたプールに沈められる。最後に、ハウジング内のパラメータと同様にキャリブレーション板の内部と外部パラメータが推定される。

4.1 AR マーカーを用いたカメラキャリブレーション

カメラキャリブレーションには AR マーカーが印刷された、平面板を用いて行われる。この平面板を空中と水中で撮影する。空中でのカメラキャリブレーションは AR マーカーの対応点を用いて、既存の手法で行うことができる [15]。水中でも同様に、平面キャリブレーション手法に

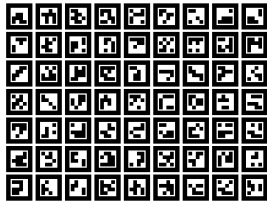


図4 AR マーカーを用いたキャリブレーション. 最短ハミング距離は5

より, まるで空中にあるかのようにカメラの内部と外部パラメータが推定される. 水中での撮影の様子を図5(a)に示す. 我々の手法では図5(c)に示すようにチェッカーパターンの代わりに複数のAR マーカー [8] を使用し. 独立したマーカー検出を行うことで, パターンの一部が計測に失敗したとしても, キャリブレーションを安定して実現することができる. こうして水中で推定されたパラメータは物理的には正しくないが, 以降の処理のための対応関係を求めるために使用することが出来る.

4.2 グリッド復元による対応点の取得

次に, プロジェクターパターンと撮影画像の対応を推定する. プロジェクターは画像を撮影できないため, 対応は別の手段によって相対的に得る必要がある. 本論文では, 2段階のアプローチを取る. まず最初に球を用いたキャリブレーション [4] で初期キャリブレーションを行い, 続いて得られたパラメータを用いてグリッドベースのワンショットスキャンアルゴリズムで対応を得る.

球ベースのキャリブレーションでは, 球に映った投影パターンを撮影し, 画像上で, 球の輪郭上の点を手でサンプリングする. 同様に, 撮影画像のグリッド点と投影パターンのグリッド点の対応は手で割り当てられる. そうして, 球状に投影されたグリッド点と疑似的なグリッド点の位置との再投影誤差がプロジェクターの内部パラメータ, 外部パラメータおよびキャリブレーション球の位置により最適化される.

球キャリブレーションによって初期パラメータを取得すれば, 効率的に対応を見つけるためのエピポーラ幾何を利用することが出来る. 本論文では3次元計測に wave グリッドパターン [13] を用いるため, 同様の3D復元アルゴリズムを使用して対応を得ることが出来る. 結果は図5(d)の緑の点に示されるように密な対応関係が推定されていることが確認できる.

4.3 バンドル法によるプロジェクターの内部/外部およびハウジングパラメータの推定

前節で推定されたカメラおよびプロジェクターの内部と外部パラメータは, 近似中心投影モデルによるものである. そこで, 実際のパラメータを求めるために, 前節で得られた対応関係を使ってバンドル調整法を行う. バンドル調整

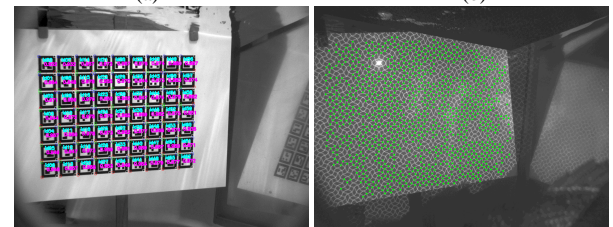
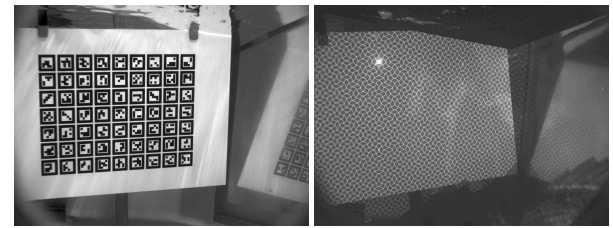


図5 (a)(b) 撮影画像, (c)(d) 特徴検出結果

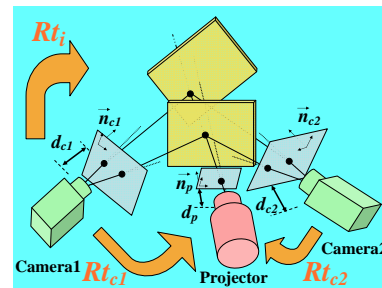


図6 ガラスの位置 (d と \vec{n}) は水中でのキャリブレーション手順中に推定される

法の誤差を評価するために, カメラ座標系のプロジェクターに逆投影された3D点を, 推定されたプロジェクターの内部パラメータ A とプロジェクターとカメラの外部パラメータ Rt とフレーム i における平面板に対する外部パラメータ Rt_i およびハウジングパラメータ θ を使って図6のようにプロジェクター座標系へ移す. これらの移された3D点は投影面に投影され, それぞれの点とプロジェクター面上に対応する検出点とのそれぞれの距離の平方和は以下の式で計算される.

$$\{\hat{A}, \hat{R}t, \hat{R}t_i, \hat{\theta}\} = \underset{A, Rt, Rt_i, \theta}{\operatorname{argmin}} \sum_i \sum_j \operatorname{Reproj}(\operatorname{Proj}(p_{ij})) - c_{ij}, \quad (1)$$

ここで, p_{ij} はプロジェクター・パターンの i フレーム目の j 番目の点, c_{ij} は撮影画像上の対応点, $\operatorname{Proj}()$ はキャリブレーション板上の3次元点を計算する関数で, $\operatorname{Reproj}()$ は屈折を考慮した再投影位置を計算する4次式(2)である. 本論文では, 我々は最適化に Levenberg-Marquardt アルゴリズムを採用している.

4.4 レンズ歪みモデルを利用した屈折の近似

我々は形状復元にステレオを用いるため, 屈折をレンズ歪みで近似することを考える. また, ハウジングのガラスの厚みは無視できると考える. Snell の法則から得られる

式を変形することで、3次元点が屈折平面上で次式で与えられる座標に投影される [1].

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

ここで、 x は屈折面を示し、上と下の媒質の屈折率はそれぞれ μ_1 と μ_2 である。 b は境界面の点である $p_1 = (x_1, 0)$ からくる光線上の3D点であり、 d は b とカメラ平面との距離である。 y_c はカメラの焦点であり、 α は光線の角度で β は屈折後の角度である。この4次元方程式を解くことで、プロジェクタパターンの板上に対応したエピポーラ線がそれぞれの対応点毎に計算される。しかし、全ての点でこれを計算するのは計算時間がかかるため、以下の手法により近似する。

近似の概要を図7に示す。まず、最初に前節で説明したバンドル手法で得られたカメラ・プロジェクタから屈折面までのそれぞれの距離 d と法線 n を用いて、空中上にある複数の座標点のシミュレーション画像を作成する。これを式(2)の屈折の計算を各座標点で行うことで、屈折がある場合の撮影画像が作成できる。この屈折がある場合の画像に対し、レンズ歪み補正モデルを使用することで、屈折がレンズ歪みにより近似される。されに補正された屈折点から最初の空中上の座標点へホモグラフィ変換を行うことで、屈折画像を中心投影画像に変換した画像が作成される。レンズ歪みによる近似を行うことで、OpenCV や ARtoolkit といった既存のライブラリを使用することが画像変換が可能となる。今回は以下に示されるレンズ歪みの補正式を用いて補正を行った。

$$\begin{aligned} x &= s(x_i - x_0), y = s(y_i - y_0) \\ d^2 &= x^2 + y^2, p = 1 - d^2 \\ x_d &= px + x_0, y_d = py + y_0 \end{aligned} \quad (3)$$

x_i と y_i は画像平面上の x 座標、 y 座標で、 x_0 、 y_0 と f, s は ARtoolkit の歪み計算によって求まる歪みパラメータで、それぞれ歪み中心 (x_0, y_0) と歪み係数 f 、スケールファクター s である。

5. 計測及び形状復元システム

5.1 動物体検出による自動撮影システム

我々の研究では計測をより効率的に行うために背景差分法を用いた自動撮影システムを作成した。我々の自動撮影システムでは、2つの処理を並行して行わせている。1つ目の処理で撮影を行い続ける。その画像は一時的にバッファへとため込まれる。この時点では単純な連続撮影ののだが、我々のシステムでは、並行した2つ目の処理で背景差分をおこなっている。バッファに格納されている画像に端から背景差分をかけていき、マスク画像を生成する。こ

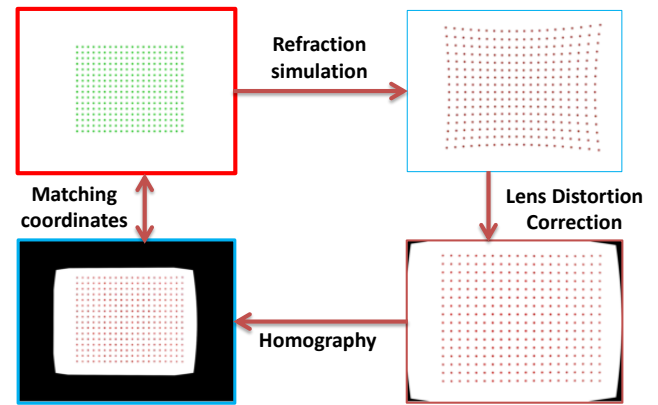


図7 計測画像の屈折補正手順

こで作成されたマスク画像の例が図8である。このマスク画像の変化ピクセル数に閾値を設けることで、計測対象の有無を判断し、計測対象を撮影しているフレームだけを保存するような設計になっている。2つの処理を平行化したことにより、背景差分処理による遅延が、撮影速度の遅延につながらないというメリットがある。また、このシステムを導入したことにより、手動で撮影していたころよりも計測対象を撮り逃す危険性が減少し、計測時の作業の手間も低下した。

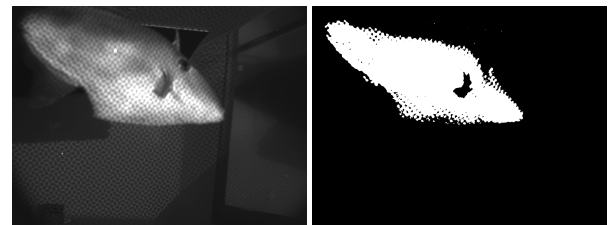


図8 背景差分法によるマスク画像

5.2 波形格子パターンを用いたワンショット形状復元

3次元復元のためには、画像平面上の点と既知のプロジェクタパターンとの間の一致箇所を見つける必要がある。我々の方法では、その特徴の特異性と一意性および復元密度のために、「Wave パターン」を使用する。図7はパターンの一例である。対応関係は、エピポーラ探索によって求められる。探索中に、多項式近似が精度に及ばず影響は、wave グリッドにおける交点間の間隔がピクセル幅よりもはるかに大きく、数ピクセルの誤差が対応検索に影響を与えないため、制限されている。多項式近似は必然的にエピポーラ線上に誤差を生じるため、この機能は水中計測手法にとって重要である。復元された結果は、近似モデルによるいくらかの誤差を持っているため、これらの誤差は形状の改善手順で効率的に解決される。

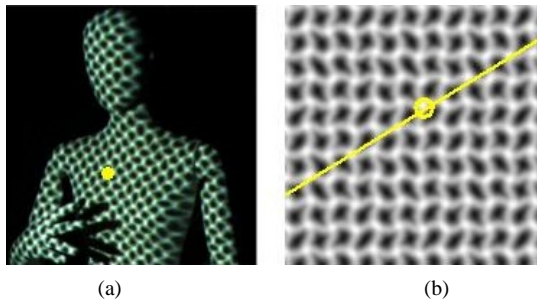


図9 (a) 対応点, (b) (a) に対するエピポーラ線

5.3 バンドル調整法による復元形状の高精度化

3次元形状の精緻化は、以下のようにして行われる。バンドル調整で推定する3D点を設定する。Wave復元手法により、カメラ画像とプロジェクタ画像の100点の対応点を取り出すことができるので、4次多項式を解くことで再投影誤差を計算することができる。近似モデルによって計算された初期形状から最適化を開始することができるので、我々の実装ではLeaven-Marquardtアルゴリズムを用いて迅速に収束する。水中環境における近似モデルのパラメータによって画像を歪ませて初期形状を検索するので、画像はもう一度近似パラメータによって歪められ、バンドル調整法の前に空中でopenCVによって推定される通常の歪みパラメータによって歪みをとる必要がある。

6. 実験

6.1 実際のシステムキャリブレーション



図10 水中撮影時の実験環境

まず、図10に示すように、実際の環境で水中キャリブレーションを実施した。解像度1024 * 768のカメラと回折光学素子(DOE)を使用した特殊パターンプロジェクタを使用する。キャリブレーションのためのARマーカーが印刷された平面板は、カメラとプロジェクタから1.5mの距離に設置されている。平面板の角度を変えて撮影するが、その位置は保持したままである。ハウジングをタンクに沈める前に、我々は空気中のカメラプロジェクタシステムをキャリブレーションするための平面ボードの30枚の写真を撮影し、カメラとプロジェクタの内部パラメータおよび外部パラメータを推定する[10]。その後、ハウジングをタンクに沈める。図11(a), (b)に示すように、水中でキャリブレーションするための30枚の写真を撮影し、この時点での外部パラメータ、多項式近似パラメータ、およ

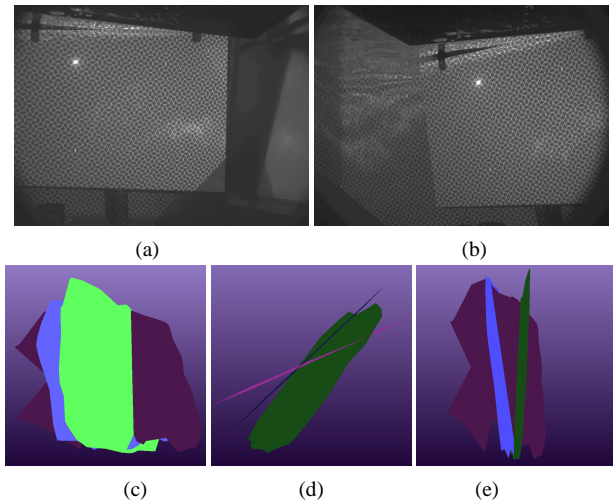


図11 (a)と(b)はARマーカーの付いた平面板を撮影したシーン、(c)-(e)はバンドル調整アルゴリズムを用いてそれぞれの板の外部パラメータを推定した後の復元形状

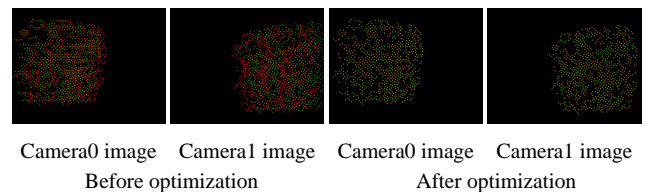


図12 カメラとプロジェクタ画像の再投影。
青: 計測点, 赤: 再投影点

びハウジングガラスの位置を推定した。最適化後の最終的なキャリブレーション結果は、図12に示すように、カメラの再投影誤差が0.74 pix, プロジェクタが0.53 pixであり、再投影誤差が最適化後に大幅に減少することが確認できる。また、図11(c-e)に示すように、キャリブレーション手順を検証した結果、平面板がほぼ平坦であることを確認することができた。

また、撮影したデータを元にシミュレーションを作成し、実際のデプスに対する撮影画像の歪みをARtoolkitを用いて推定した。その後、ARtoolkitで推定した歪み係数を元に画像を補正することで、デプスに依存するレンズ歪みを補正でき、屈折を近似した。

6.2 屈折の近似によるワンショット復元

前述の屈折近似の手法を用い、水中で撮影した画像を、屈折がない状態の像へと変換する。このことにより、空中で求めた中心投影モデルの内部、外部パラメータでのエピポーラ探索が可能となる。図13は魚にシミュレーションのデプスを合わせた結果である。(a)はエピポーラ線を引いた結果で、魚上の点を取っているのに対し、デプスが奥にある壁に対しては点を大きくズレた位置にエピポーラ線が引かれていることがわかる。(b)は(a)の画像の復元結果である、対象デプスの魚は復元されているのに対し、壁は崩れていることがわかる。

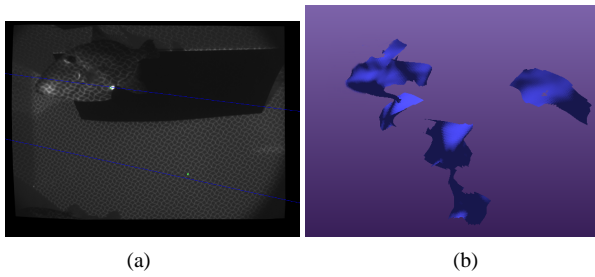


図 13 任意デプスでのワンショット復元

6.3 バンドル調整法による形状の精緻化

次に、Wave 復元を用いて球と泳いでいる魚を撮影し、3 次元形状を行った。図 14 (a) (b) (g) (h) は撮影画像の例を示し、図 14 (c) (d) (i) および (j) は復元結果を示す。ハウジングには 2 台のカメラが使用されており、両方のカメラが独立してキャリブレーションされているため、各カメラで復元された形状は一致しない。図 14 (e) (f) (k) と (l) に示すように、我々の改良アルゴリズムが 2 つの形状を単一の貫した形状にうまく統合していることが確認できる。定量的評価のために、板に平面を合わせることによって平面板の RMSE を計算する。その誤差は 9.7mm から 0.7mm へと大幅に減少しており、我々のアルゴリズムの有効性が確認された。

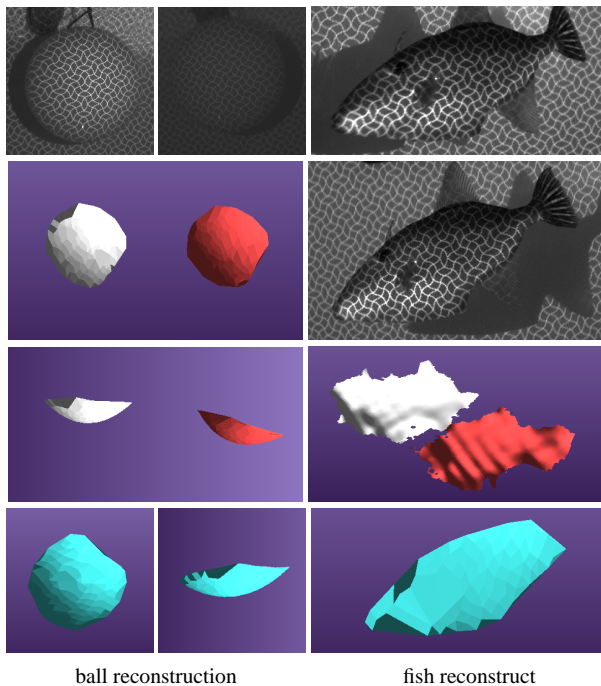
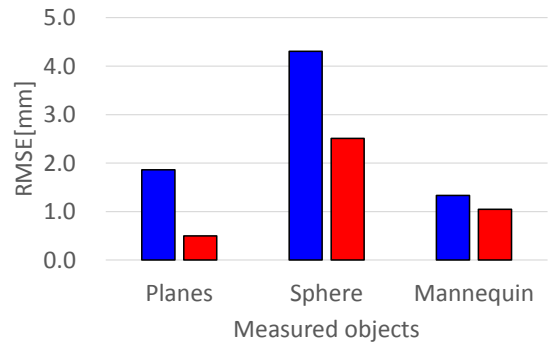


図 14 球と泳いでいる魚の復元結果. 白: 左カメラによる復元形状
赤: 右カメラによる復元形状, 淡青: バンドル調整アルゴリズムにより精緻化された形状

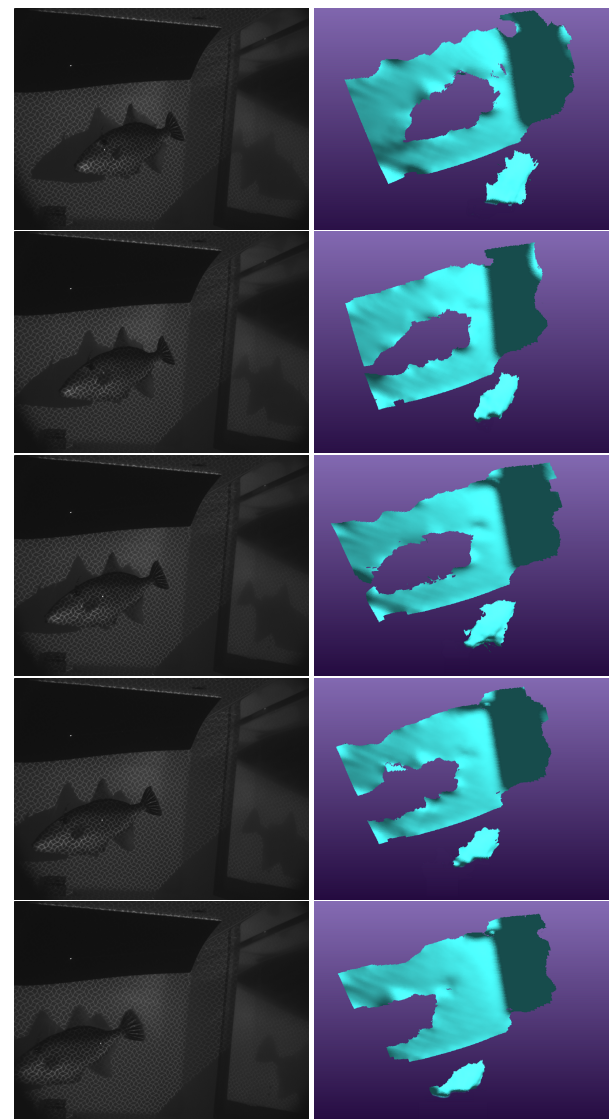
6.4 高精度化した 3 次元形状の評価

次に、5.3 節の精緻手順前後の 3D 形状の精度を評価した。平面、ボール、マネキンの 3 種類の形状を測定した。カ



■ Before refinement ■ After refinement

図 15 節 5.3 の精緻手順前後の形状の精度



Swimming fish sequence

図 16 撮影シーン (左行), 復元した 3D 形状 (右行)

メラと物体からの距離は約 500mm に設定されている。平面の集合に対して、復元された点は、PCA によって平面にフィッティングされ、RMSE 残差が計算される。球とマネキンの形状に対しては、ICP アルゴリズムを用いてグラントルースを復元された点集合に適合させ、ICP の RMSE

残差を評価に使用する。球体のグラントルースは人工的に生成されるが、マネキンのグラントルースは、空气中でグレイコード投影を用いて、予め計測されたものである。結果を図 15 に示す。結果から、最終結果の形状の RMSE は小さく見える（大きいところでは 0.5mm 未満、小さくてもおよそ 2.5mm 未満）。すべての場合において、グラントルースからの残差は、精緻化プロセスによって改善されている。

6.5 水族館での生きた魚の計測実験

最後に、水族館のプールにて泳ぐ魚の計測を行った。幅 233cm, 奥行き 99cm, 深さ 57cm の水槽にて、3 匹の魚を撮影した。撮影は自動化されているため、魚の動きに合わせて複数フレーム撮影される。我々の技術は復元のために、ただ 1 枚の画像が有れば良いので、非剛体かつ動く対象の形状を自然に復元することができる。我々は、水中環境で泳いでいる魚を復元できる他のシステムはないと考えている。図 16 において、左の列は撮影された画像のシーケンスを示し、右の列は復元された形状を示す。復元結果から、我々は泳いでいる魚が効率的に復元されたことを確認することができた。

7. まとめと今後の課題

本論文では、水中環境におけるワンショットアクティブ 3 次元計測手法を適用するための実用的なキャリブレーション手法を提案した。多項式近似と平面板ベースのキャリブレーション手法を使用して、カメラとプロジェクタのパラメータを計測する。そして、Wave パターンを用いた復元によって形状が復元され、エピソード幾何における不可避的な誤差が許容される。3 次元形状は、バンドル調整アルゴリズムによって精緻化される。シミュレーションと ARtoolkit を用いることでマルチデプスに対応した計測が 1 セットのパラメータで可能となった。また、計測時には高速な魚に対応するため背景差分手法を用いた計測の自動化も行った。実際に水族館の水槽内で実験を行い、評価実験を通して本手法の有効性を示した。より大きな対象物体での検証や復元技術の精度向上が今後の我々の課題である。

参考文献

- [1] Amit Agrawal, Srikumar Ramalingam, Yuichi Taguchi, and Vishesh Chari. A theory of multi-layer flat refractive geometry. In *CVPR*, 2012.
- [2] Hiroaki Aoki, Ryo Furukawa, Masahito Aoyama, Shinsaku Hiura, Naoki Asada, Ryusuke Sagawa, Hiroshi Kawasaki, Tsuyoshi Shiga, and Atsushi Suzuki. Noncontact measurement of cardiac beat by using active stereo with waved-grid pattern projection. In *Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2013 35th Annual International Conference of the IEEE*, pp. 1756–1759. IEEE, 2013.
- [3] G. Bradski. The OpenCV Library. *Dr. Dobb's Journal of*

- Software Tools*, 2000.
- [4] R. Furukawa, M. Aoyama, S. Hiura, H. Aoki, Y. Komiyama, Y. Sanomura, S. Yoshida, S. Tanaka, R. Sagawa, and H. Kawasaki. Calibration of a 3d endoscopic system based on active stereo method for shape measurement of biological tissues and specimen. In *EMBC*, pp. 4991–4994, 2014.
- [5] Morinaga Hiroki, Baba Hirohisa, Visentini-Scarzanella Marco, Kawasaki Hiroshi, Furukawa Ryo, and Sagawa Ryusuke. Underwater active oneshot scan with static wave pattern and bundle adjustment. In *Image and Video Technology: 7th Pacific-Rim Symposium, PSIVT 2015*, pp. 404–418, Auckland, New Zealand, 2015. Springer International Publishing.
- [6] Anne Jorrdt-Sedlazeck and Reinhard Koch. Refractive structure-from-motion on underwater images. In *Computer Vision (ICCV), 2013 IEEE International Conference on*, pp. 57–64. IEEE, 2013.
- [7] Lai Kang, Lingda Wu, and Yee-Hong Yang. Two-view underwater structure and motion for cameras under flat refractive interfaces. In *Computer Vision–ECCV 2012*, pp. 303–316. Springer, 2012.
- [8] H. Kato and Mark Billinghurst. Marker tracking and hmd calibration for a video-based augmented reality conferencing system. In *Proceedings of the 2nd International Workshop on Augmented Reality (IWAR 99)*, San Francisco, USA, October 1999.
- [9] Ryoichi Kawahara, Shohei Nobuhara, and Takashi Matsuyama. A pixel-wise varifocal camera model for efficient forward projection and linear extrinsic calibration of underwater cameras with flat housings. In *Computer Vision Workshops (ICCVW), 2013 IEEE International Conference on*, pp. 819–824. IEEE, 2013.
- [10] Shota Kiyota, Hiroshi Kawasaki, Ryo Furukawa, and Ryusuke Sagawa. Efficient projector calibration method using plane with checkerboard pattern. In *Information Processing Society of Japan (IPSI) Technical Report*, Vol. 2012-CVIM-180, pp. 1–8, 2012.
- [11] Jean-Marc Lavest, Gérard Rives, and Jean-Thierry Lapresté. Underwater camera calibration. In *ECCV*, pp. 654–668. Springer, 2000.
- [12] Ryusuke Sagawa, Yuichi Ota, Yasushi Yagi, Ryo Furukawa, Naoki Asada, and Hiroshi Kawasaki. Dense 3D reconstruction method using a single pattern for fast moving object. In *ICCV*, 2009.
- [13] Ryusuke Sagawa, Kazuhiro Sakashita, Nozomu Kasuya, Hiroshi Kawasaki, Ryo Furukawa, and Yasushi Yagi. Grid-based active stereo with single-colored wave pattern for dense one-shot 3D scan. In *3DIMPVT*, pp. 363–370, 2012.
- [14] Anne Sedlazeck and Reinhard Koch. Calibration of housing parameters for underwater stereo-camera rigs. In *BMVC*, 2011.
- [15] Zhengyou Zhang. A flexible new technique for camera calibration. *Technical Report MSR-TR-98-71*, 12 1998.