

魚眼ステレオカメラとプロジェクタを用いた液中物体の3次元形状計測 — 既知物体を用いた液体の屈折率推定 —

東京大学 ○坂本 一樹, 佐藤 貴亮, 藤井 浩光, 山下 淳, 浅間 一
有限会社ライテックス Alessandro MORO 静岡大学 金子 透

3D Shape Measurement of Objects in Liquid Using Fisheye Stereo Camera and Projector
— Estimation of Refractive Index of Liquid Using Known Object —

The University of Tokyo Kazuki SAKAMOTO, Takaaki SATO, Hiromitsu FUJII, Atsushi YAMASHITA, Hajime ASAMA
Ritecs Corporation Alessandro MORO Shizuoka University Toru KANEKO

This paper proposes methods for estimating refractive index of liquid and measuring the 3D shape of objects in water using a stereo fisheye camera and a projector. Refractive index is estimated using a camera and a known object. Projected pattern made by a projector is created on the surface of an object in water. Using the projected pattern, corresponding points are detected on the images of two fisheye cameras. 3D coordinates are calculated using the principle of triangulation. Experimental results show the validity of the proposed method.

1. 序論

近年, 水中構造物の建造, 保守, 点検作業や生物, 資源の調査が多く行われている. これらの作業を水中環境下で人間が直接行うことには多くの危険が伴う. そのため, 人間の代わりに水中ロボットにそれらの作業を行わせることができれば, 調査等における危険を回避することが可能となる.

そこで, 対象物体の正確な3次元計測手法が求められている. 水中計測ではカメラを防水ケースに格納するため, 水-防水ケース-空気といった屈折率の異なる物質間を光が通過するため水中の物体は歪んで見え, 実際の位置と異なる場所に見える. そのため, 光の屈折を考慮することが正確な測定には求められるが, そのためには水の正しい屈折率を推定する必要がある.

従来研究では, 液面の上下における物体の輪郭のズレを利用して液体の屈折率を推定する手法が報告されている¹⁾. しかしこの手法は, 液面で物体を計測する場合にしか用いることができず, カメラが完全に液中に入っている場合には使えない.

そこで本研究ではまずカメラとの位置関係が一定になるように板を設置し, 空気中, 液中においてカメラに対する板の3次元座標を計測する. その際, 光の屈折を考慮せずに取得画像上の情報から板の3次元座標を求める. その結果, 同一位置の板を計測しているにもかかわらず空気中と液中で得られる座標に違いが生じるが, その違いを生み出す原因は光の屈折だと考えられる. そこで, 得られた2つの座標を用いることで液体の屈折率を推定する.

また, 推定した屈折率を用いて液中物体の3次元形状を計測するが, 魚眼カメラ特有の取得画像上の歪みを除去して計測を行った従来研究²⁾とは異なり, 本研究では歪みを有したままの画像を用いて3次元形状を計測する.

2. 液体の屈折率推定

Fig. 1(a)に示すように, カメラとの位置関係が一定になるように板を設置する. また, 推定で用いる幾何学的関係をFig. 1(b)に示す. まず空気中で板の3次元座標 $A(a_1, a_2, a_3)^T$ を計測する. その後, 板を液体に入れて板の3次元座標 $B(b_1, b_2, b_3)^T$ を

計測する. 光は屈折率の異なる物質間を通過する際に屈折するため, カメラから同じ位置にある板を計測しても, 空気中と液中では得られる3次元座標が異なる.

ここではx軸方向とz軸方向の光の動き方に注目する. カメラと防水ケース間の距離 l_{air} , 防水ケースの厚み l_{glass} , 空気, 防水ケースの屈折率 n_1, n_2 を既知とする. カメラ中心 O から防水ケースへの入射角 θ は $\tan^{-1} \frac{b_1}{b_3}$ で求められるため, 屈折角 ϕ はスネルの法則 $\phi = \sin^{-1}(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta)$ を用いて求められる. ϕ と点 C の座標 $(l_{air} \cdot \tan \theta, l_{air})^T$, l_{glass} を用いて点 D の座標 $(l_{air} \cdot \tan \theta + l_{glass} \cdot \tan \phi, l_{air} + l_{glass})^T$ を求められるため, 点 A と点 D の座標を用いて光線が液体へ入る時の屈折角 ψ を求められる. ψ と ϕ, n_2 が既知となったため, 液体の屈折率 n_3 はスネルの法則 $n_3 = n_2 \cdot \frac{\sin \theta}{\sin \psi}$ から求められる.

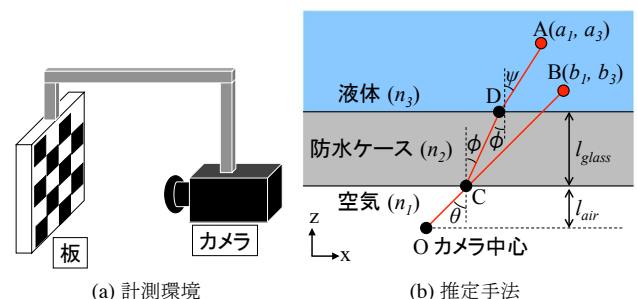


Fig. 1 屈折率推定

3. 3次元形状計測

実験系の構成をFig. 2に示す. 魚眼ステレオカメラの中間プロジェクタのレンズの真上になるようにした. 空気中に設置した計測装置を用いて, 前方の水槽内の物体を計測する.

プロジェクタで液中に置いた物体に複数の格子点を投影し, 左右2台の魚眼カメラで物体の画像を取得する. 本手法ではこの格子点の3次元座標を求めることで物体の3次元計測を行う. なお, 本研究で用いる魚眼レンズは等距離射影方式であるため, 光軸と光線がなす角 θ , 像高 r , レンズの焦点距離 f 間に式 $r = f\theta$ が成り立つ. この式を用いる光線追跡を後述のエ

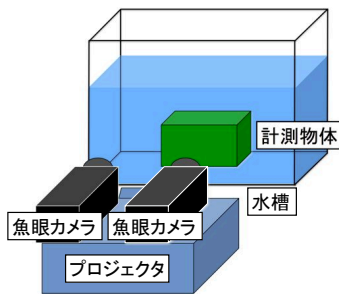


Fig. 2 計測環境

エピポーラ線生成や3次元座標算出の際に行うことで、歪みを有したままの画像で計測を行うことを可能とする。

格子点の3次元座標を求めるためには、左右カメラの取得画像で格子点の対応付けを行う必要がある。そこで3台の装置間で光の屈折を考慮しながら光線追跡を行うことでエピポーラ線を生成し、対応点を特定する。エピポーラ線の生成は³⁾を参考にして実装を行った。

プロジェクタから投影されている1つの光線に対する対応点を左右画像上で求める。まず注目している光線を用いて左右画像上にエピポーラ線 ab, cd を生成する。ここで左画像上においてエピポーラ線 ab と重なる格子点が点 E, 点 F と複数あるため、どちらが対応点かわからない (Fig. 3(a))。そこで、この2点に対応する右画像上のエピポーラ線 ef, gh を生成する (Fig. 3(b))。ここでも右画像上で重なる格子点が点 G, 点 H と複数あるが、対応点はエピポーラ線 cd と重なることから、対応点は点 G と決定することができる。よってエピポーラ線 ef 上にあることが分かったため、左画像上における対応点は点 E だと分かる。また、右画像上における対応点の候補が複数となる場合は既に対応点として決定している点を除去することで候補を減らし、1点となった場合に対応点と決定する。

その後、左右画像上での対応点を用いて、2章で行ったように光線を追跡することで格子点の3次元座標を求める。

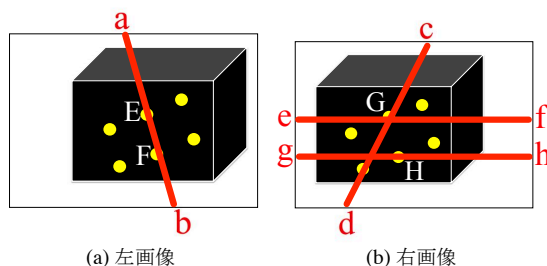


Fig. 3 対応点検出手法

4. 実験

実験は、高さ 300mm, 幅 870mm, 奥行き 270mm の水槽に水と計測物体を入れ、水槽の外に設置した魚眼ステレオカメラとプロジェクタを用いて行った。

4.1 液体の屈折率推定

格子点の数が縦、横方向に 10 個、7 個で、格子点間の距離が 23mm である格子模様が描かれた板を、カメラとの位置関係が一定になるように設置した (Fig. 4)。空気中で板の 3 次元座標を計測すると $(276, 111, 299)^T$ [mm] となり、板を液中に入れて 3 次元座標を計測すると $(269, 114, 247)^T$ [mm] となった。これらの値とカメラから水槽までの距離 181mm, 水槽のガラスの厚さ 2mm, 空気の屈折率 1.0, ガラスの屈折率 1.5 を用いて計算すると $\sin \phi = 0.491$, $\sin \psi = 0.557$ となるので、スネルの法則

より液体の屈折率は 1.322 と分かった。一般的に用いられる水の屈折率は 1.33 であるため、その屈折率に近い値が得られた。



Fig. 4 実験環境 (屈折率推定)

4.2 3次元形状計測

水槽に一辺の長さが 180mm の立方体を入れ、プロジェクタで 2 つの面に格子点を投影し、格子点の座標を算出した。その後、格子点により構成される平面を最小二乗法で求め、2 つの平面がなす角度を算出した。真値は 90deg である。屈折を考慮した場合と考慮しなかった場合における、2 つの平面がなす角度を Table 1 に、すべての計測点の 3 次元座標を Fig. 5 に示す。

計測の結果、Table 1 に示すように 2 つの平面がなす角度の誤差は、屈折率を考慮しなかった場合の 23.2deg に対し、考慮した場合は 2.7deg となり、誤差を小さくすることができた。

Table 1 角度の計測結果

	角度	誤差
屈折考慮	87.3deg	2.7deg
屈折未考慮	113.2deg	23.2deg

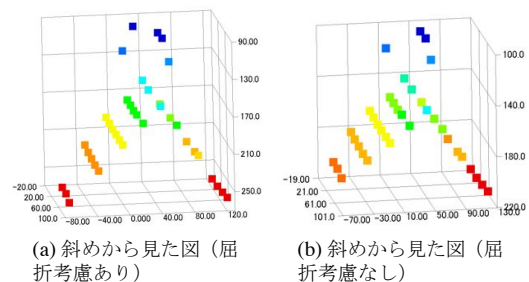


Fig. 5 対応点検出手法

5. 結論

本研究では、カメラが完全に液中に入っていることを想定した環境において液体の屈折率を推定する手法を提案し、実験により提案手法の有効性を確認した。

謝 辞

本研究の一部は、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 災害対応無人化システム研究開発プロジェクト、科研費若手研究 (A)22680017, および財団法人旭硝子財団の援助を受けた。

参 考 文 献

- 1) Atsushi Yamashita, Akira Fujii and Toru Kaneko: "Three Dimensional Measurement of Objects in Liquid and Estimation of Refractive Index of Liquid by Using Images of Water Surface with a Stereo Vision System", *Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2008)*, pp. 974-979, 2008.
- 2) 坂本一樹, Alessandro Moro, 佐藤貴亮, 金子透, 山下淳, 浅間一: "魚眼ステレオカメラと格子点投影プロジェクタを用いた水中物体 3 次元計測", 動的画像処理実用化ワークショップ 2013 講演論文集 (DIA2013), pp. 325-330, 2013.
- 3) 青木則夫, 谷内田正彦, 辻三郎: "パターン投影法と 2 台のカメラを用いた 3 次元物体の計測", 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. J68-D, No. 3, pp. 384-391, 1985.