

水中センシングのための魚眼ステレオカメラを用いた液体の屈折率推定

Estimation of Refractive Index of Liquid for Underwater Sensing Using Fisheye Stereo Camera

坂本一樹¹ Alessandro Moro^{1,2} 藤井浩光¹ 山下淳¹ 浅間一¹

Kazuki Sakamoto¹ Alessandro Moro^{1,2} Hiromitsu Fujii¹ Atsushi Yamashita¹ and Hajime Asama¹

¹ 東京大学 ² ライテックス

¹ The University of Tokyo ² Ritecs

ABSTRACT This paper proposes a method to estimate the refractive index of liquid using a fisheye stereo camera. Sensing in aquatic environment is important to maintain underwater structures and research aquatic lives and resources. Therefore, refractive index of liquid which is necessary to sensing in aquatic environment is important. The refractive index, however, is changed by temperature, pressure, concentration of solute and substance. Our method estimates the refractive index based on the distance between two feature points on an object. 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おり、これらの作業を水中環境下で人間が直接行うことは多くの危険が伴う。そのため、人間の代わりにロボットが用いられる場合が多く¹⁾²⁾³⁾、その際、調査対象の位置や形状を把握するために、3次元情報の取得が必要となる。したがって、水中環境下における3次元計測は重要である。

水中環境下における3次元計測手法として、カメラを使用する手法⁴⁾⁵⁾が多く報告されている。これらカメラを使用する手法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ことになり、水中の計測物体は歪んで見え、実際と異なる位置に見える。Fig. 1はカメラを防水ケースに入れ、下半分が水に浸っている物体を水平方向から撮影した画像である。光の屈折により、水中に入っている部分が拡大され、左右の輪郭がずれて見える。

つまり、正確な計測には光の屈折を考慮することが必要だが、従来の手法の多くは計測対象が浸っている液体を水に限定し、屈折率に文献値を使用している。しかし、液体の屈折率は温度、圧力、濃度、物質によって異なる値をとるため、様々な種類の液体が混ざり合っており、温度や濃度も様々である実際の計測環境では、液体の屈折率と



Fig. 1 光の屈折

して一定の値を用いると3次元計測結果に誤差が生じてしまう。したがって、実際の計測環境における液体の正しい屈折率を、その場で推定する必要がある。

液体の屈折率推定に関する従来研究として、プリズムを通して入射した光の全反射角より推定する手法⁶⁾がある。しかしこの手法は、液体に加熱や冷却を行わなければならないため、調査等で液体の中に入っている際にその場で屈折率を推定することができない。また、別の手法として、Fig. 1に示すような液面の上下における物体の輪郭のズレを利用し、液体の屈折率を推定する手法⁷⁾が報告されている。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ある場合には使えない。また、カメラと既知物体の位置関係を一定に保つことにより、カメラが液中にある場合でも液体の屈折率を推定可能な手法⁸⁾も報告されているが、この手法では位置関係を一定に保つという強い拘束条件があるため、実環境で適用することは困難である。

そこで本研究では、カメラが完全に液中にある場合でも用いることができ、さらにカメラと既知物体の位置関係が一定である必要がない、液体の屈折率推定手法を提案する。また、提案手法では取得画像の中心付近に3次元計測対象の物体を写すだけでなく、画像の端に辺の長さが既知の直方体を写すために広い視野が必要であるため、カメラに180度程度の広い視野角を持つ魚眼カメラを使用する。

2. 液体の屈折率推定

Fig. 2に示す液中の直方体のように、2つの特徴点(点A, 点B)の距離(L)が既知である物体を液中に設置する。液体の屈折率を、実環境として想定しうる範囲内で細かく変化させながら、平行に設置した魚眼カメラ2台を用いて両特徴点の3次元座標を算出する。つまり、様々な屈折率に対応する両特徴点の3次元座標が求まる。その後、算出される2点間距離と、既知である両特徴点の距離(L)の差が最小になる際の屈折率を求める。次節以降で手法を詳細に説明する。

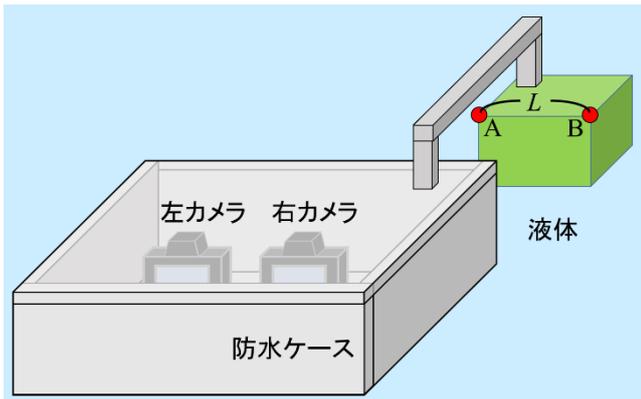


Fig. 2 計測環境

2.1. 物体上の特徴点の3次元座標算出

点A, 点Bの画像上の座標を用いて、以下のような光線追跡⁹⁾(Fig. 3)を行い、点A, 点Bの3次元座標を算出する。なお、この処理は細かく変化させた液体の屈折率 n_3 の値ごとに行う。

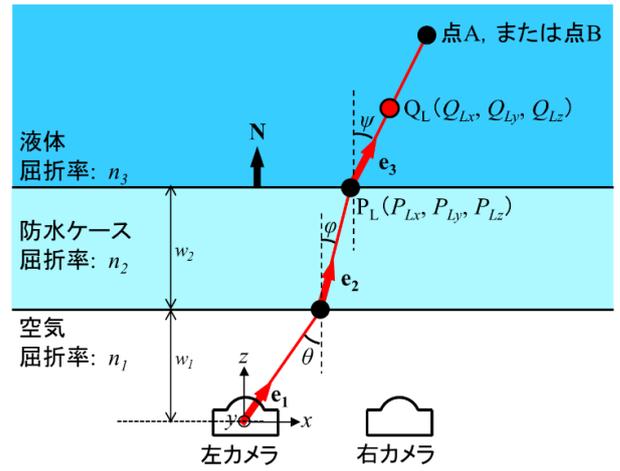


Fig. 3 光線追跡

空気の屈折率 n_1 , 防水ケースの屈折率 n_2 , 左カメラから防水ケースまでの距離 w_1 , 防水ケースの厚さ w_2 , 防水ケースの法線ベクトル \mathbf{N} を既知とする。取得画像より、左カメラ光線の空気中における単位光線ベクトル \mathbf{e}_1 , 空気から防水ケースへの入射角 θ が求められる。よって、防水ケースに入った後の単位光線ベクトル \mathbf{e}_2 は、

$$\mathbf{e}_2 = \frac{n_1}{n_2} \mathbf{e}_1 + a \quad (1)$$

より求められる。このとき a は、

$$a = \left[\sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \sin^2 \theta} - \frac{n_1}{n_2} \cos \theta \right] \mathbf{N} \quad (2)$$

である。また、空気から防水ケースへの屈折角 φ はスネルの法則

$$\varphi = \sin^{-1} \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta \right) \quad (3)$$

より求められる。次に、防水ケースから液中に入った後の単位光線ベクトル \mathbf{e}_3 は、

$$\mathbf{e}_3 = \frac{n_2}{n_3} \mathbf{e}_2 + b \quad (4)$$

より求められる。このとき b は、

$$b = \left[\sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_3}\right)^2 \sin^2 \varphi} - \frac{n_2}{n_3} \cos \varphi \right] \mathbf{N} \quad (5)$$

である。よって、左カメラ光線と液体側の防水ケース面との交点 P_L の位置ベクトルを \mathbf{P}_L とすると、液中における左カメラ光線上の任意位置の座標 Q_L の位置ベクトルを \mathbf{Q}_L は、任意

定数 s を用いて,

$$\mathbf{Q}_L = s\mathbf{e}_3 + \mathbf{P}_L \quad (6)$$

より求められる. このとき \mathbf{P}_L は, w_1 と w_2 を用いて光線追跡を行うことで求められる.

同様の処理を右カメラに対しても行うことで, 液中における右カメラ光線の任意位置の座標 \mathbf{Q}_R を求められる. \mathbf{Q}_L と \mathbf{Q}_R の距離が最も小さくなる時の, \mathbf{Q}_L と \mathbf{Q}_R 中心の座標を点A, または点Bの3次元座標とする.

2.2. 液体の屈折率算出

前節で, 実環境として想定しうる範囲内で変化させた屈折率に対し, それぞれ点A, 点Bの3次元座標が求まる. そして, これらの3次元座標を用いることで, 各屈折率に対する2点間距離 $l(n_3)$ が求まる. ここで, 2点間距離の真値を L として, 評価関数

$$J(n_3) = |L - l(n_3)| \quad (7)$$

を設計する. このとき, $J(n_3)$ が最小の時の屈折率 n_3 を液体の屈折率の推定値 \hat{n}_3 とする. つまり, \hat{n}_3 は以下の式を満たす値である.

$$\hat{n}_3 = \underset{n_3}{\operatorname{argmin}}\{J(n_3)\} \quad (8)$$

3. 3次元形状計測

求められた液体の屈折率を用いて, 形状が未知の計測対象の3次元形状計測を行う. 具体的には魚眼カメラ特有の歪みを考慮してエピポーラ線を生成することで対応点探索の範囲を限定し, テンプレートマッチングで左右の魚眼カメラによる取得画像間での対応点を求める. その後, 対応点を用いて三角測量の原理により計測対象の3次元形状を求める.

4. シミュレーション実験

提案手法の有効性を確認するために, シミュレーションによる実験を行った. 2台の魚眼カメラは同じ姿勢であり, 両者の距離は100mm, カメラの光軸は防水ケースに直角に交わるとした. また, カメラから防水ケースまでの距離 w_1 を100mm, 防水ケースの厚さ w_2 を2mm, 空気の屈折率 n_1 を1.00, 防水ケースの屈折率 n_2 を1.50とした. 座標系の原点は左カメラの光学中心とし, Fig. 4のように座標軸を取った.

4.1. 液体の屈折率推定

Fig. 4に示すように, 点Aの座標を(150, 0, 150), 点Bの座標を(200, 0, 150)とし, それぞれが結合する画像座標を左右のカメラに関して算出し, 提案手法を用いてそれら画像座標から液体の屈折率を2.2節の手法で求めた. その際, 液体の屈折率 n_3 には, 実環境として想定しうる範囲である1.00から1.80を0.01刻みで代入し, それぞれに対して算出された屈折率と真の屈折率とを比較した.

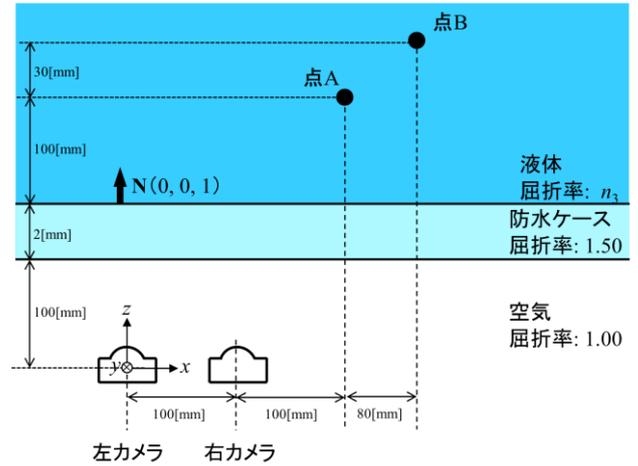


Fig. 4 屈折率推定

屈折率推定シミュレーションの結果をFig. 5に示す. 図に示すように, 提案手法により算出した屈折率は真の屈折率と一致した. 同様のシミュレーション実験を点A, 点Bの座標を変えて行って同様の結果が得られた. 以上より, 液体の屈折率の値に関わらず, 提案手法を用いることで液体の屈折率を推定可能なことが示された.

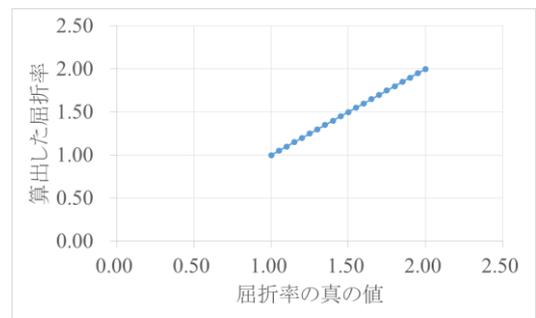


Fig. 5 屈折率推定結果

4.2. 3次元形状計測

計測物体の3次元形状復元において, 屈折率の値による影響を調べるために3次元形状計測シミュレーションを行った. Fig. 6に示すように直角に交わる2つの平面を想定し, 与える点の間隔を10mm刻みとした. また, y座標に関して

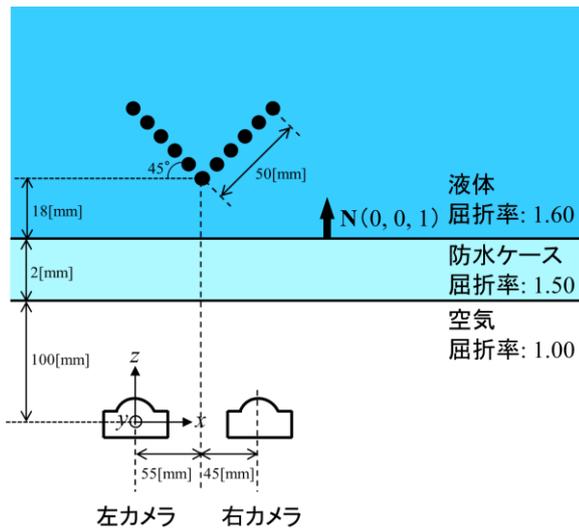


Fig. 6 3次元形状計測

は、-50mmから50mmである領域に10mm刻みで与えた。液体の屈折率の真値を1.60とし、屈折率を1.33と1.60の2通りにして3次元復元を行った。

3次元形状計測シミュレーションの結果をFig. 7, Fig. 8に示す。屈折率を1.33とした時は2面の角度が90度より大きくなったが、屈折率を1.60とした時は90度となった。

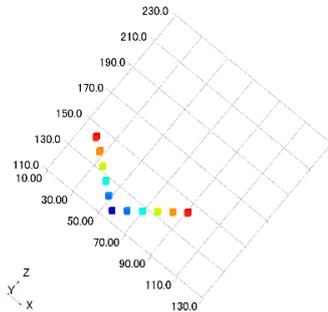


Fig. 7 屈折率(1.33)

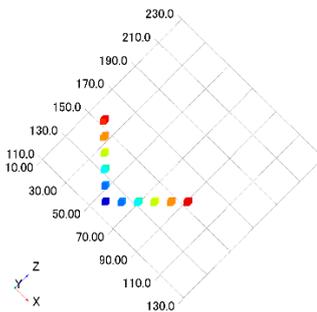


Fig. 8 屈折率(1.60)

5. 結論

本研究では、カメラが液中に入っている環境において液体の屈折率を推定する手法を提案し、シミュレーション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、財団法人旭硝子財団の援助を受けた。

参考文献

1) 巻 俊宏, 近藤 逸人, 浦 環, 能勢 義昭, 坂巻 隆: 自律型水中ロボットによる人工構造物の観測, 日本船

舶海洋工学会論文集, 17/26(2005)

- 2) 巻 俊宏, 近藤 逸人, 浦 環, 坂巻 隆, 水島 隼人, 柳澤 政生: 自律型水中ロボットによる鹿児島湾たぎり噴気帯の3次元画像マッピング, 海洋調査技術, 1/16 (2008)
- 3) 高川 真一: 水中ロボットによる海中調査技術, 日本船舶海洋工学会誌, 19/24(2010)
- 4) Atsushi Yamashita, Etsukazu Hayashimoto, Toru Kaneko and Yoshimasa Kawata: 3-D Measurement of Objects in a Cylindrical Glass Water Tank with a Laser Range Finder, Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2003), 1578/1583 (2003)
- 5) Tatsuya Naruse, Toru Kaneko, Atsushi Yamashita and Hajime Asama: 3-D Measurement of Objects in Water Using Fish-eye Stereo Camera, Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP2012), 2773/2776 (2012)
- 6) 伊藤 昭彦, 後藤 昭和: 液体の屈折率および温度係数の測定, 日本機械学会論文集. B編, 2875/2881(1994)
- 7) 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), 974/979 (2008)
- 8) 坂本 一樹, Alessandro Moro, 佐藤 貴亮, 藤井 浩光, 金子 透, 山下 淳, 浅間 一: 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次元形状計測ー既知物体を用いた液体の屈折率推定ー, 2014年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 983/984 (2014)
- 9) Rongxing Li, Haihao Li, Weihong Zou, Robert G. Smith and Terry A. Curran: Quantitative Photogrammetric Analysis of Digital Underwater Video Imagery, IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 22, No. 2, 364/375(1997)