

魚眼ステレオカメラを搭載した水中ロボットによる 3 次元計測

山田 孝司[†] 平野 太一朗[†] 山下 淳[†] 金子 透[†]

[†] 静岡大学工学部 〒432-8561 静岡県浜松市中区城北 3-5-1

E-mail: [†] {f0930066, f0710109, tayamas, tmtkane}@ipc.shizuoka.ac.jp

あらまし 水中でロボットが活動するには周囲環境の把握のために 3 次元計測が有効である。しかし水中では光が屈折率の異なる物体間を通過するため取得画像に歪みが生じ正確な計測が困難である。またロボットをより安全に行動させるために広範囲を計測できる必要がある。そこで本論文では一度に広い視野を取得することができる魚眼カメラを 2 台ロボットに搭載し、水中環境において光の屈折を考慮して 3 次元計測を行う手法を提案する。実験により提案する手法の有効性を示す。

キーワード 魚眼カメラ, 水中ロボット, 水中計測

3D Measurement of Objects in Water by Underwater Robot Equipped with Fisheye Stereo Camera

Koji YAMADA[†] Taichiro HIRANO[†] Atsushi YAMASHITA[†] and Toru KANEKO[†]

[†] 3-5-1 Johoku, Naka-ku, Hamamatsu-shi, Shizuoka 432-8561, Japan

E-mail: [†] {f0930066, f0710109, tayamas, tmtkane}@ipc.shizuoka.ac.jp

Abstract Sensing in aquatic environments meets the difficulty that image distortion occurs by refraction of light due to the difference of refractive indices of air and water. This paper proposes a 3D measurement method of objects in water by an underwater robot equipped with fisheye stereo cameras which enables the robot to do its task safely with a wide field of view. The method removes the effect of refraction to realize accurate three-dimensional measurement. Experimental results show the effectiveness of the proposed method.

Keyword Fisheye Camera, Underwater Robot, Measurement in Underwater

1. 序論

近年、水中構造物の建造、保守、点検作業や水中の生物や資源の調査が盛んに行われている。しかし水中で人間が直接作業する場合には大きな危険を伴うことがある。それに対して人の代わりに水中ロボットを導入し作業を行うことでそれらの問題を回避することができる。水中ロボットを実際に使用する際には、作業や調査のために 3 次元計測を行うことができる必要がある。

水中センシングの手法としては超音波[1]やカメラを用いたものがある。超音波では海底地形の計測や魚群の有無を感知することができるが、指向角が広いいため分解能が低く、対象物の位置・形状を高精度に求めることは困難である。また、伝播速度が遅いため 1 回の計測時間が長く、瞬時に広範囲に渡る計測は不向きである。これに対して、カメラを用いると比較的高精度に計測を行うことが可能である。

しかし、水中において防水容器に格納したカメラを用いて計測を行う場合、光の屈折が問題となり、水、

防水容器、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に、屈折の影響により撮影画像に歪みが生じる。図 1 はその一例で、空気中の物体は変化なく見えるが、水中の物体は実際より大きく（近く）見える。この歪みのために画像による正確な計測が困難となる。

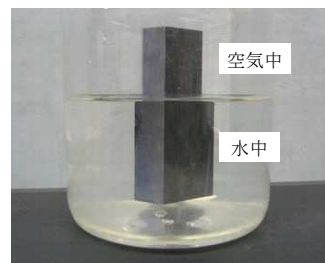


図 1 光の屈折の影響

カメラを使用する水中 3 次元計測には、カメラとレーザを組み合わせる手法[2]やスリット光投影法[3]がある。しかしこれらの手法を用いた計測では、レーザを走査する必要があるため動物体の計測は困難である。

そこで本研究ではカメラを2台使用しステレオ計測を行うことによってこの問題を解決する。

一般的な視野のカメラは一度の撮影で計測できる範囲が狭く、広範囲を計測するには撮影回数が多くなる。そのため本研究では広い視野を有する魚眼カメラを使用する。

魚眼ステレオカメラを使用し地上での計測を行っているものに[4][5]がある。[5]では魚眼レンズ特有の歪みを補正面展開を用いることによって低減し、計測精度の向上や処理速度の短縮を図っている。

そこで、本研究では広い視野角を持つ魚眼カメラを用いた水中でのステレオ計測法を提案する。

2. 計測手法

本研究で2台の魚眼カメラからそれぞれ画像を取得し、計測を行う。

まず取得した左右2枚の画像を補正面展開し、テンプレートマッチングにより画像間の対応点を求める。そして、光の屈折を考慮し3次元計測を行う。

2.1. 補正面展開

魚眼画像の歪みを補正するために、取得した魚眼画像（図2）を補正面展開する（図3）。この補正面展開は、使用する魚眼レンズの種類により補正式が異なる。本研究では等距離射影方式のレンズを使用する[5]。

等距離射影方式のレンズの場合、図4に示すように補正面上の注目点を P 、原画像上への投影点を $p(x, y)$ をとすると、点 p は魚眼画像の円半径 R と点 P 方向の単位ベクトル (l, m, n) を用いて式(1)(2)で求められる。

$$x = f(n, R)l \quad (1)$$

$$y = f(n, R)m \quad (2)$$

ただし、

$$f(n, R) = \frac{2R \cos^{-1} n}{\pi \sqrt{1-n^2}} \quad (3)$$

2.2. 光の屈折の考慮

屈折前の媒質の屈折率 n_1 、屈折後の媒質の屈折率を n_2 とし、入射角を θ_1 、屈折角を θ_2 とする。また、屈折の単位光線ベクトルを $(\alpha_1, \beta_1, \gamma_1)^T$ 、屈折面の法線ベクトルを $(\lambda, \mu, \nu)^T$ とすると、屈折後の単位光線ベクトル $(\alpha_2, \beta_2, \gamma_2)^T$ は、式(4)で表わされる（図5）。

$$\begin{pmatrix} \alpha_2 \\ \beta_2 \\ \gamma_2 \end{pmatrix} = \frac{n_1}{n_2} \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \beta_1 \\ \gamma_1 \end{pmatrix} + \left(\sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 \sin^2 \theta_1} - \frac{n_1}{n_2} \cos \theta_1 \right) \begin{pmatrix} \lambda \\ \mu \\ \nu \end{pmatrix} \quad (4)$$

この式を用いて、空気、防水容器、水中での光の屈折を考慮したカメラ光線を求めることができる。

2.3. 対応点探索

補正面展開処理後2枚の画像の間で対応点を求める。本研究では正規化相互相関によるテンプレートマッチングを用いて対応点探索を行う。テンプレートマッチングを行う際にはエピポーラ拘束を用い、探索範囲を

エピポーラ線上に限定する。これにより誤対応を低減し、同時に処理時間の短縮を行う。水中での計測においてエピポーラ拘束を用いる場合、エピポーラ線を算出するためには屈折面における光の屈折を考慮しなくてはならない。したがって、一方のカメラから計測対象までの光線追跡を行い、その光線の構成点をもう一方のカメラ画像上に投影することでエピポーラ線を算出する（図6）。

2.4. 3次元計測

ステレオ法を用いて3次元計測を行う場合、左画像と右画像の対応点に対してそれぞれ2.2節に示した手法を用い左カメラ光線と右カメラ光線を求める。この2本の光線ベクトルの交点を計測点の3次元座標として算出する。



図2 展開前

図3 展開後

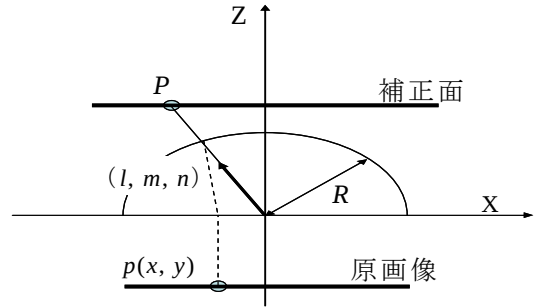


図4 補正面展開モデル

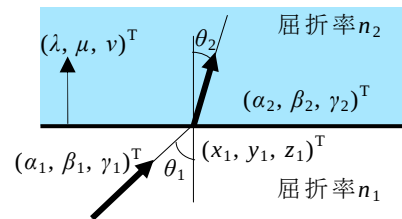


図5 境界面での光の屈折

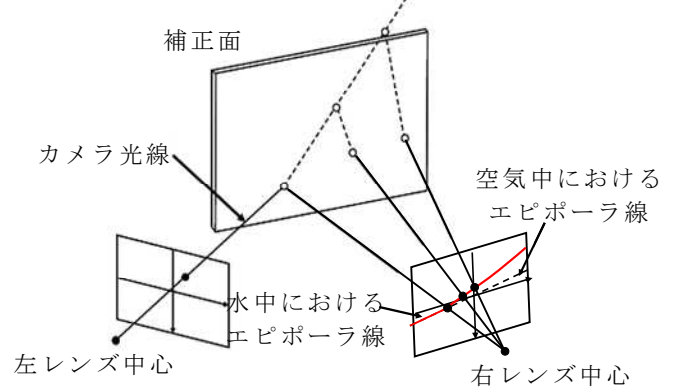


図6 エピポーラ線

3. 魚眼ステレオカメラを搭載する水中ロボット

本研究において魚眼ステレオカメラ装置を搭載するロボットについて説明する．3次元空間である水中において最大自由度は6自由度である．任意の位置に移動するには3自由度が必要となる．ただし，それでは任意の位置への移動は可能であるが計測対象の方向へ計測機器を向けることができない．

そこで任意の位置に移動するのに3自由度，さらにその場で自由な姿勢を取るために1自由度の合計4自由度の制御が可能なロボットを開発した．

本研究で制御する4自由度は前後動，左右旋回，上下動，左右動である．これらの自由度を制御することで任意の位置で任意の方向に計測機器を向けることができる．

これらの運動は図7のように搭載された6つの推進器が矢印の方向に推力を発生し制御される．

図6において右下方向がロボットの前方向である．

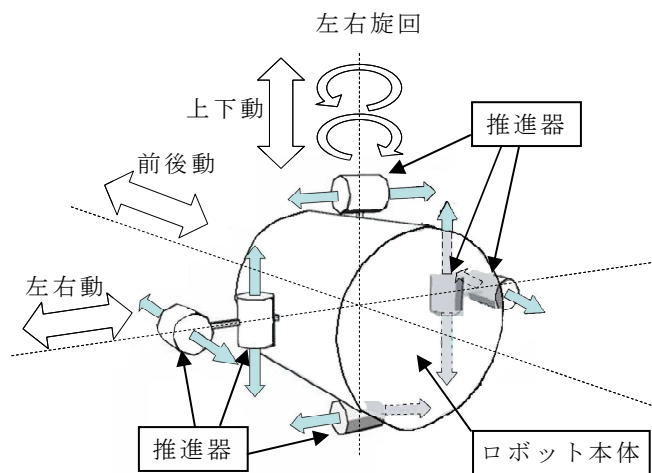


図7 4自由度と推進器の位置

4. 実験

屋外プールにおいて魚眼ステレオカメラを搭載したロボットによる動物体追跡と3次元計測の実験を行った．実際に魚眼ステレオカメラを搭載したロボットを図8示す．ロボットの大きさは全長550mm，全幅450mm，全高450mmである．

またカメラ間の距離は100mm，取得画像のサイズは640×480pixelである．水と防水容器の屈折率は既知とし屈折面はカメラの光軸に対し垂直に設置した．

4.1. 3次元計測

精度評価のために1辺20mmの市松模様が描かれた1辺50mmの立方体を使用し，対応点を手動で4箇所与え各辺の長さとなす角を計測した（図9）．計測対象までの距離は約300mmであった．結果を表1に示す．辺の真値は40mm 角度の真値は90degである．取得画像が図10，補正面展開画像が図11である．さらに格子点を対応点として与え3次元復元を行なった結果が

図12である．向かって左側の面を立方体の正面とする．

また図13を計測対象とし3次元計測を行った．画像取得後に補正面展開し，テンプレートマッチングを行い対応点を算出した後，3次元計測を行った．その結果が図14である．計測結果より計測対象の形状が概ね再現されていることが分かる．

表1 計測結果

辺1	40.87mm	角A	91.5deg
辺2	39.55mm	角B	95.8deg
辺3	38.24mm	角C	95.6deg

4.2. 動物体追跡

赤い円を追跡対象として実験を行った．実験は追跡対象を人の手で任意の方向に動かし，ロボットが追跡対象をカメラの視界に納めつつ対象から一定範囲内の距離に移動することができるか確認した．図15は一定時間おきの左カメラ画像とロボットを外から見たものである．図15よりロボットが対象を追跡できていることが確認できる．

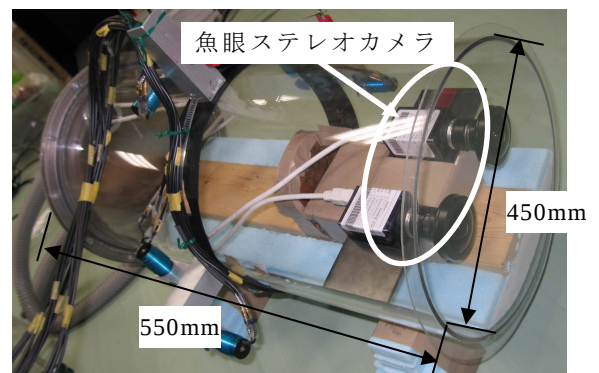


図8 魚眼ステレオカメラを搭載したロボット

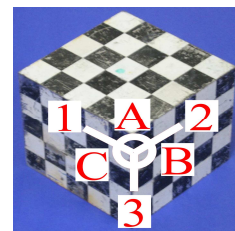


図9 計測用立方体

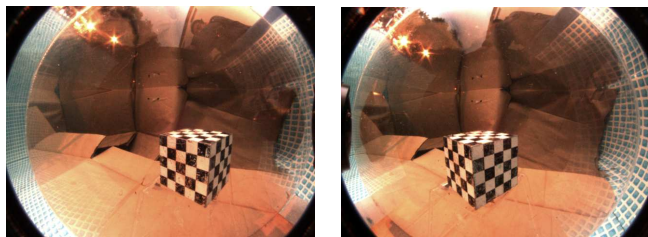
5. 結論

魚眼ステレオカメラを水中ロボットに搭載し動物体追跡と3次元計測を行うことができた．これにより魚眼ステレオカメラを水中ロボットに搭載することの有効性が確認できた．

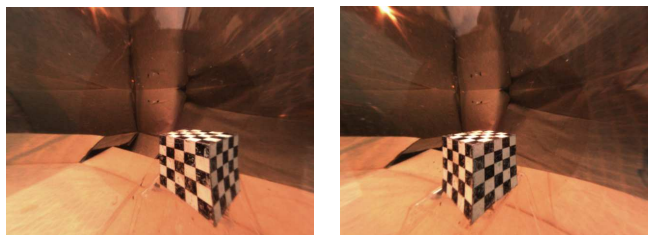
今後の課題として，計測精度を向上のため屈折面の位置姿勢の考慮やロボットの移動時の障害物の回避などが挙げられる．

謝辞

本研究の一部は文部科学省科学研究費補助金基盤研究若手研究(A)2680017，および財団法人旭硝子財団の援助を受けた．



(a)左カメラ画像 (b)右カメラ画像
図 10 取得画像



(a)左カメラ画像 (b)右カメラ画像
図 11 補正面展開画像

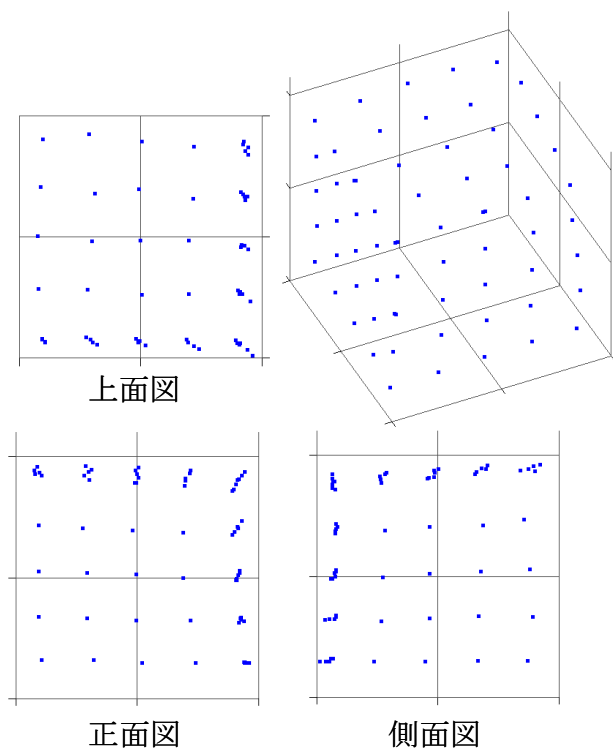


図 12 立方体の3次元復元



図 13 計測対象



図 14 復元結果

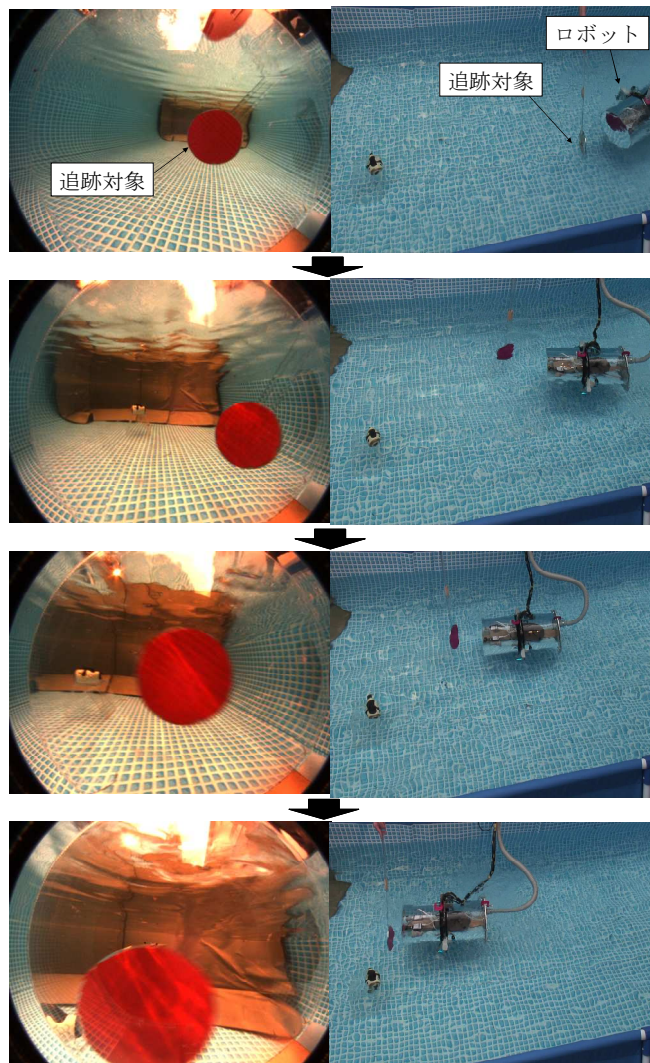


図 15 動物体追跡

文 献

- [1] Behzad Kamgar-Parsi, Lawrence J. Rosenblum and Edward O. Belcher : “Underwater Imaging with a Moving Acoustic Lens”, IEEE Transactions on Image Processing, Vol.7, No.1, pp.91-99(1998)
- [2] 近藤逸人, 巻俊宏, 浦環, 能勢義昭, 坂巻 隆, 稲石 正明 : “自律型水中ロボットによる構造物観測システム～ 光切断法を用いた測距システムによる相対航法～”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 ‘05 講演論文集, 2A1-L2-28, pp.1-4(2004)
- [3] Atsushi Yamashita, Hirokazu Higuchi, Toru Kaneko and Yoshimasa Kawata : “ Three Dimensional Measurement of Object's Surface in Water Using the Light Stripe Projection Method”, Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.2736-2741(2004)
- [4] 金珍向, 久保守, 村本健一郎 : “円周魚眼カメラのマルチベースラインステレオ法による全天3次元計測”, 情報処理学会研究報告 Vol.2008, No.27, pp.249-254(2008)
- [5] 西本武志, 安藤武実, 山口順一 : “魚眼ステレオ視覚を用いた三次元計測”, 第 13 回画像センシングシンポジウム予稿集, IN2-13, pp.1-6(2007)