

# 複光路単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 山下 淳 金子 透

静岡大学工学部機械工学科 〒432-8561 静岡県浜松市中区城北 3-5-1

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

**あらまし** 水中でロボットが活動するためには周囲環境の把握のための3次元計測が重要である。しかし、水中では空気と水の屈折率の違いによって計測画像に歪みが生じるため正確な計測が困難である。また、ロボットへの搭載という面から見て整備性や搭載スペースの確保は非常に重要となるため、手間の少ない小型の3次元計測装置が必要となる。そこで本研究では光路による見え方の違いを利用した単眼ステレオカメラを使用することにより水中物体の3次元計測を行う手法を提案する。

**キーワード** 3次元計測, 光路差, 水中計測, 水中ロボット

## 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探知することができるが、指向角が広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が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。

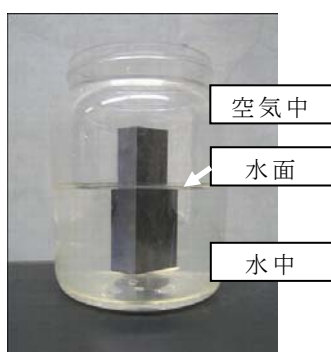


図1 光の屈折の影響

カメラを使用する水中3次元計測には、ステレオカメラを用いた手法[2]やカメラとレーザを組み合わせて用いた手法[3]がある。しかし、ステレオカメラによる手法ではカメラ2台を用いて、三角測量の原理によって3次元計測を行っているため、カメラ2台分のキャリブレーションが必要である。また、対象が特に高速に動く物体の場合、カメラ間の同期を正しくとる必要がある。一方、カメラとレーザを用いた計測では、対象を走査する必要があるので動物体の計測は困難である。これに比べ、カメラ単体による計測が可能であればカメラ2台やカメラとレーザを扱うより手間が減少する。更にそれらの搭載スペースや電源の確保が不要となるため、ロボットに搭載するという点で有利となる。

単眼カメラを用いた3次元測定の研究として、地上では[4][5]があるが、我々は水中での複光路による見え方の違いを利用した単眼ステレオ手法[6]を提案している。この研究ではカメラの前に図2のような屈折面を設置し、複光路が発生するような環境を意図的に作り出すことで視差が生じた画像を取得し、三角測量の原理を用いることで水中対象物の3次元計測を行う。

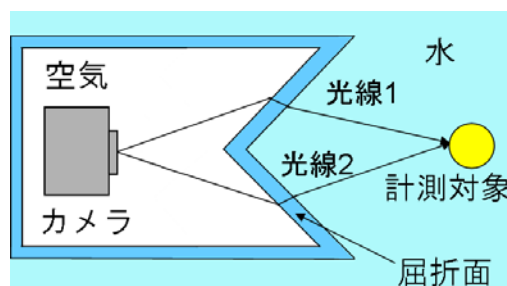


図2 計測装置

図2の装置を使用し、空気中から空気中を撮影した例を図3、空気中から水中を撮影した例を図4に示す。屈折がない場合には画像に特に変化はない(図3)が、屈折がある場合には物体を2方面から見た画像(図4)を取得できる。

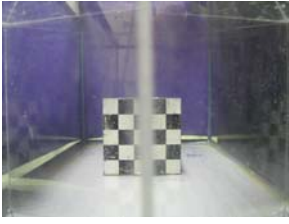


図3 空気中から空気中

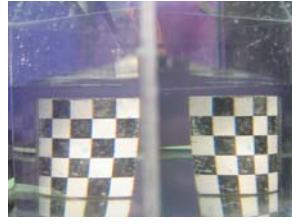


図4 空気中から水中

また3次元計測において、高精度な計測を行うためには装置の較正が重要である。[7]では図2において屈折面と屈折面がなす角の余角（以下、屈折面角度と呼ぶ）の最適化を行っている。最適な屈折面角度を有する計測装置を用いることで高精度な3次元計測ができる。

本研究ではこの装置をロボットに搭載し水中計測を行うことを目的とする。

## 2. 計測原理

本研究では、図2に示すような光路に違いが生じるような装置を作成しロボットに搭載する。これにより見え方の異なる画像を取得することで単眼カメラによるステレオ計測を実現する。前処理として、装置において屈折面のカメラに対する位置姿勢を推定する。次に取得画像の中心から左側を左画像、右側を右画像とし、両画像から手動で対応点を求め、光の屈折を考慮して水中物体の計測を行う。

### 2.1. 光線追跡

水、防水容器、空気と屈折率が変化する部分を光線が通過する際には光の屈折が起こる。その際の入射角と屈折角、屈折率の関係をスネルの法則を用いて求め、それを光線追跡に反映させることで光の屈折の影響を考慮する[2]。カメラ光線1と光線2をそれぞれ追跡すると、物体の表面においてこれら2つの光線が交わる。

防水容器面における光の屈折の様子（光線1）を図5に示す。空気と防水容器の屈折率をそれぞれ $n_1$ 、 $n_2$ とし、空気から防水容器への入射角を $\theta_1$ 、屈折角を $\theta_2$ とする。また、空気中におけるカメラの単位光線ベクトルを $(\alpha_1, \beta_1, \gamma_1)^T$ 、防水容器面の単位法線ベクトルを $(\lambda_1, \mu_1, \nu_1)^T$ とすると、防水容器中を進む単位光線ベクトル $(\alpha_2, \beta_2, \gamma_2)^T$ は、

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

となる。また、水の屈折率を $n_3$ とし防水容器から水への入射角を $\theta_3$ とすると水中を進む単位光線ベクトル $(\alpha_3, \beta_3, \gamma_3)^T$ は、

$$\begin{pmatrix} \alpha_3 \\ \beta_3 \\ \gamma_3 \end{pmatrix} = \frac{n_2}{n_3} \begin{pmatrix} \alpha_2 \\ \beta_2 \\ \gamma_2 \end{pmatrix} + \left( \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_3}\right)^2} \sin\theta_2 - \frac{n_2}{n_3} \cos\theta_2 \right) \begin{pmatrix} \lambda \\ \mu \\ \nu \end{pmatrix} \quad (2)$$

となる。ただし、スネルの法則より $\theta_1$ 、 $\theta_2$ には以下の関係が成り立つ。

$$\theta_2 = \sin^{-1} \left( \frac{n_1}{n_2} \sin\theta_1 \right) \quad (3)$$

入射角水中側の水槽面の通過点を $(x_2, y_2, z_2)^T$ とすると、光線ベクトル上の任意点 $(x_p, y_p, z_p)^T$ は、

$$\begin{pmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{pmatrix} = s \begin{pmatrix} \alpha_3 \\ \beta_3 \\ \gamma_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix} \quad (4)$$

と表すことができる。ただし $s$ は定数である。

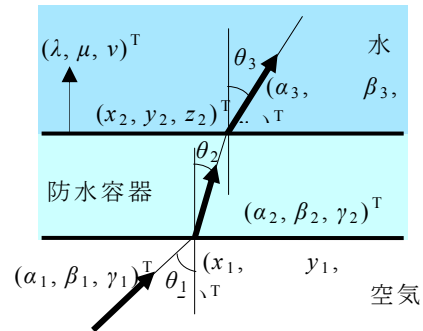


図5 防水容器面での光の屈折

### 2.2. ステレオ計測

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が必要となる。本研究では計測点は手動で与えることとする。計測点は2.1節に示した手法を用い光線1と光線2をそれぞれ追跡することで求める。光線1と同様に光線2についても追跡をすると、原理的には光線1と光線2は物体の表面において交わる。しかし、ノイズによる計算誤差のために左右2つのカメラそれぞれの水中を進む光線ベクトルが同一平面状に計測されることは稀である。そこで、左右カメラそれぞれの計測点の距離が最短になる点を求め、その2点の midpoint を計測点とする。

## 3. 屈折面角度の最適化

屈折面角度の最適化は[7]に基づいて行う。[7]ではステレオ計測において、奥行きの微小変化に対し、左右画像で視差変化率が大きい方が精度が良くなるという原理に基づいている。そのため、屈折面角度 $\theta$ 、奥行き $z_c$ 、視差 $u$ の関係を導いて最適化を行っている。

カメラ正面に対する奥行き方向をZ軸、横方向をX軸として定義し、Z軸上での精度を考えることで最適な屈折面角度を求める。空気、防水容器、水と屈折率が変化する部分を光線が通過する際には光の屈折が起こる。空気中から防水容器へ進む際の入射角 $\alpha$ 、屈折角 $\beta$ 、防水容器から水中へ進む際の

屈折角  $\gamma$ , 屈折率の関係をスネルの法則を用いて求め, 光の屈折の影響を考慮する. ここで,  $f$  は焦点距離,  $d$  はカメラから屈折面までの距離,  $u$  は視差である. また屈折面厚さを  $t$  とする. 図 6 において,  $Z$  軸上の計測点に対してカメラ光線は左右対称なので光線 1 についてのみ考えれば良い.

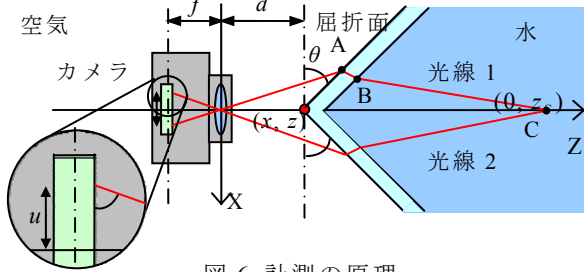


図 6 計測の原理

カメラ光線 (光路 1, 光路 2) が最終的に  $Z$  軸上で交わる点  $C$  の奥行きは以下ようになる.

$$z_C = -\frac{1}{\tan(\theta - \gamma)} x_B + z_B \quad (5)$$

式(5)について, 変数  $x_B$  は,

$$x_B = \frac{x_A \cos \vartheta + (z_A \cos \theta - d \cos \theta - t) \tan(\theta - \beta)}{\sin \theta \tan(\theta - \beta) + \cos \theta} \quad (6)$$

であり,  $x_B$  内の変数  $x_A$  は,

$$(x_A, z_A) = \left( \frac{du}{2f - u \tan \theta}, \frac{2fd}{2f - u \tan \theta} \right) \quad (7)$$

である.  $x_A$  は  $u$  からなる変数であるため,  $z_C$  も  $u$  からなる変数となる.

以上から, 式(5)を用いて最適な屈折面角度を求めるが, 奥行き  $z_C$  の微小変化に対する視差  $u$  の変化率  $\Delta u / \Delta z$  が最大となる屈折面角度は, 奥行きの位置によって変化する.

そこで, [7] では視差変化率が最大 (精度が最も良い) となる屈折面角度を最適として選択するのではなく, 想定する奥行き範囲内  $z_1 \leq z_C \leq z_2$  において, それぞれの屈折面角度での視差変化率の最小 (精度が最も悪い) を求め, その中から最大の変化率をもつ屈折面角度を最適とする.

$$\theta = \arg_{\theta} \left( \max_{\theta} \left[ \min_{z_C} (\Delta u / \Delta z) \right] \right) \quad (8)$$

#### 4. 装置を搭載するロボット

本研究において複光路単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.

ロボットは人が操縦することで動作する. そして図 7 のように重心をはさむように搭載された 4 つの推進器によりサージ (前後動), ロール (横揺れ), ピッチ (縦揺れ), ヨー (偏揺れ) の 4 自由度を制御できるようになっており, 水中において自由な方向にカメラを向けることができる. 図 7 において右下方がロボットの前方である.

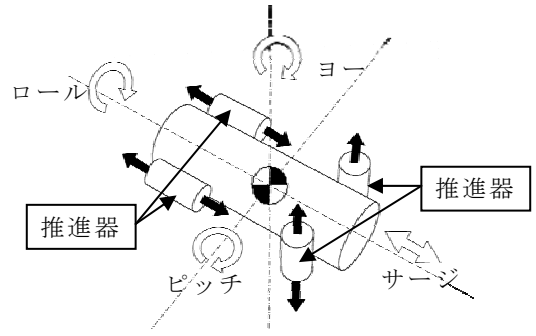


図 7 重心と推進器の位置関係

搭載用の計測装置は今回のロボット用に新たに設計した. ロボットの動作への影響が少なくなるように取付部を絞った形状にし, 樹脂性 O リングを使用することで防水性を確保した.

複光路単眼ステレオカメラ装置を搭載したロボットが図 8 に示す.

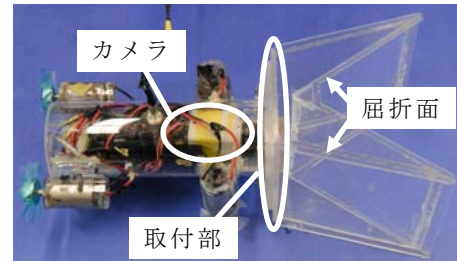


図 8 ロボットに搭載した複光路単眼ステレオ

#### 5. 実験

本実験ではカメラの焦点距離を  $f=4.6\text{mm}$ , カメラから屈折面までの  $d=30\text{mm}$  と定め, カメラから対象物までの距離は  $200\text{mm} \leq z_C \leq 500\text{mm}$  とした. [7] による屈折面角度の最適化の式(5)(8)により屈折面角度は  $\theta=53\text{deg}$  となった. それらに従い複光路単眼ステレオカメラ装置を作製し, 計測実験を行った.

計測対象には 1 辺 20mm の市松模様が描かれた 1 辺 50mm の立方体を使用した.

実際に取得した画像が図 9 である.

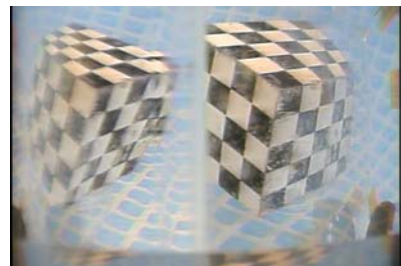


図 9 取得画像

作製時に屈折面の厚さを誤って薄くしてしまったため画像中央左が歪んでいる. そのためこの領域は計測から除外する.

取得した画像に対応点を 46 箇所, 手動で与え形状を計測した (図 10). その結果が図 11 である. 図 10 の計測対象の上面を面 1, 向かって右側面を面 2 と

している。斜線部は計測除外領域である。図 11 では面 1 を上面，面 2 を正面としている。

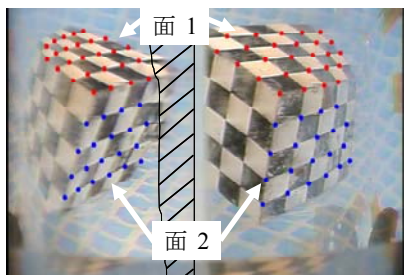


図 10 手動で与えた対応点

また精度評価として 2 面の標準偏差と各標準偏差面のなす角度を測定した。結果が表 1, 表 2 である。また角度の真値は 90deg である。

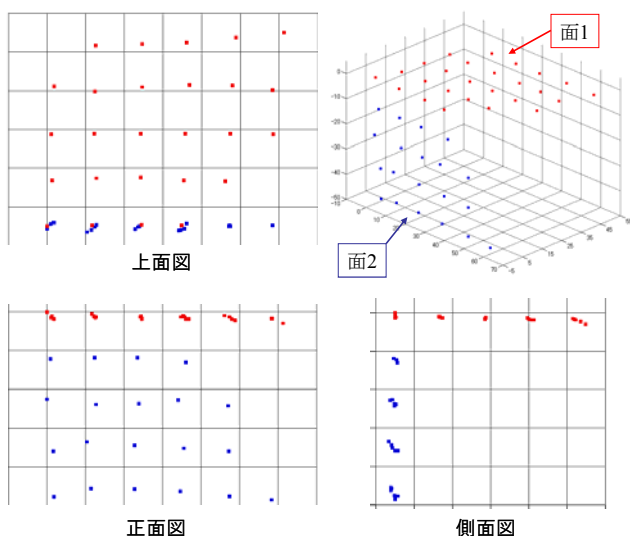


図 11 3 次元形状復元

表 1 計測結果 (標準偏差)

	標準偏差
面 1	0.558mm
面 2	1.183mm

表 2 計測結果 (面のなす角度)

	角度
面 1 と面 2 のなす角度	90.81deg

次に図 12 のように対応点を手動で 4 箇所与え各辺の長さとなす角を計測した。結果が表 3 である。辺の真値は 40mm 角度の真値は 90deg である。

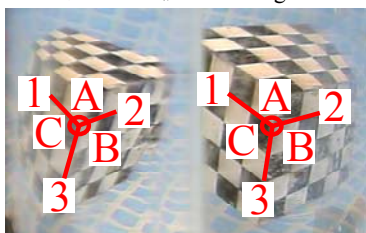


図 12 計測対象

表 3 計測結果

辺 1	23.04mm	角 A	91.47deg
辺 2	22.52mm	角 B	89.54deg
辺 3	23.63mm	角 C	87.89deg

実験結果から角度は正確に計測できていることがわかる。また各辺の長さの比はほぼ正確に計測できているものの、スケールに対しては実際の約半分になっている。

原因として計測時にカメラと装置の較正が正しく行われていないためにスケール値が変化していると思われる。

## 6. 結論

複光路単眼ステレオを水中ロボットに搭載し計測を行った。実験により実際に水中ロボットに搭載して水中計測が可能であることを確認した。これにより従来研究されていた方法をロボットに搭載することへの有効性が確認できた。

今後の課題として、計測精度を向上させることが挙げられる。

## 謝辞

本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(C) 19560422, および財団法人旭硝子財団の援助を受けた。

## 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] 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, pp.364-375, (1997)
- [3] 近藤逸人, 卷俊宏, 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)
- [4] Doo Hyun Lee, In So Kweon and Roberto Cipolla: "Single Lens Stereo with a Biprism", Proceedings of IAPR Workshop on Machine Vision Applications, pp.136-139, (1998)
- [5] Edward H. Adelson and John Y. A. Wang: "Single Lens Stereo with a Plenoptic Camera", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.14, No.2, pp.99-106, (1992)
- [6] 鈴木 陸実, 山下 淳, 金子 透: "光路差による見え方の違いを利用した単眼ステレオによる水中画像センシング", 映像情報メディア学会技術報告, Vol.31, No.14, pp.41-44, (2007)
- [7] 白根裕大, 山下淳, 金子透: "複光路単眼ステレオによる水中物体の 3 次元計測", 電気学会研究会資料 (情報処理/産業システム情報化合同研究会 IP-08-1~12/IIS-08-1~12), pp.21-26, (2008)