

単眼ステレオカメラ搭載水中ロボットによる 3 次元計測 *

山田孝司^{*1}, 山下淳^{*1}, 金子透^{*1}

3D Measurement of Objects in Water by Underwater Robot Equipped with a Monocular Stereo Vision System

Koji Yamada^{*2}, Atsushi Yamashita, Toru Kaneko

^{*2} Department of Mechanical Engineering, Shizuoka University
3-5-1 Johoku, Naka-ku, Hamamatsu-shi, Shizuoka 432-8561, Japan

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. In this paper, we propose a 3D measurement method of objects in water by an underwater robot equipped with a monocular stereo vision system. Our measurement method is based on a monocular stereo technique using a difference of appearance depending on optical paths. Experimental results show the effectiveness of the proposed method.

Key Words : Image Procession, 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。

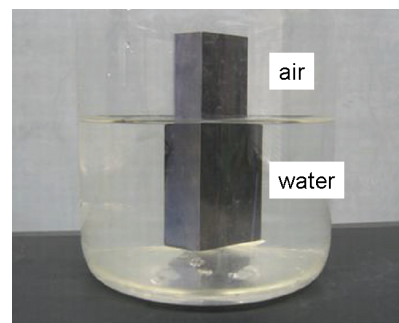


Fig. 1 光の屈折の影響

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る手法⁽³⁾またはスポット光投影法⁽⁴⁾やスリット光投影法⁽⁵⁾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 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り、また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ため動物体の計測は困難である。それはスポット光やスリット光を用いた計測でも同様となる。これらに比べ、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。さら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。

* 原稿受付 2009 年 10 月 23 日

^{*2} 静岡大学工学部機械工学科
静岡県浜松市中区城北 3-5-1
Email: f0930066@ipc.shizuoka.ac.jp

単眼カメラを用いた3次元測定の研究として、地上では文献⁽⁶⁾⁽⁷⁾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⁽⁸⁾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。

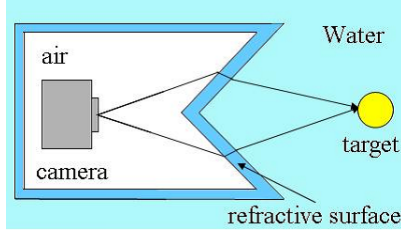


Fig. 2 計測装置

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。屈折がない場合で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。

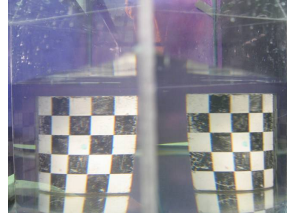
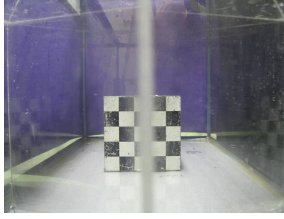


Fig. 3 空気中から空気中 Fig. 4 空気中から水中

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を調整が重要である。文献⁽⁹⁾では図2において屈折面と屈折面がなす角の余角(以下、この角度の屈折面角度と呼ぶ)の最適化を行っている。

ただし、これらの研究の目的は原理の確認でありセンサのみを作製し室内の水槽で実験を行うのみであった。そこで本研究では実際に水中環境において3次元計測を行うため、新たに複光路単眼ステレオシステムを搭載したロボットを作製し、水中で自由に移動しながらセンシング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。水中物体の計測は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。

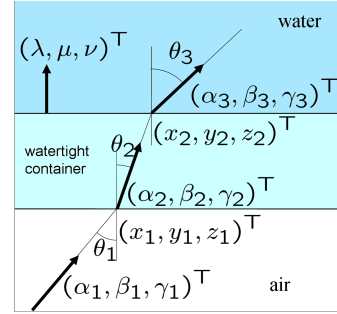


Fig. 5 防水容器面での光の屈折

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 θ_1 、屈折角を θ_2 とする。また、空気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、

$$\begin{pmatrix} \alpha_2 \\ \beta_2 \\ \gamma_2 \end{pmatrix} = \frac{n_1}{n_2} \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \beta_1 \\ \gamma_1 \end{pmatrix} + a \quad (1)$$

となる。ここで a は

$$a = \left\{ \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 \sin^2 \theta_1} - \frac{n_1}{n_2} \cos \theta_1 \right\} \begin{pmatrix} \lambda \\ \mu \\ \nu \end{pmatrix} \quad (2)$$

である。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 θ_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、

$$\begin{pmatrix} \alpha_3 \\ \beta_3 \\ \gamma_3 \end{pmatrix} = \frac{n_2}{n_3} \begin{pmatrix} \alpha_2 \\ \beta_2 \\ \gamma_2 \end{pmatrix} + b \quad (3)$$

となる。ここで b は

$$b = \left\{ \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_3} \right)^2 \sin^2 \theta_2} - \frac{n_2}{n_3} \cos \theta_2 \right\} \begin{pmatrix} \lambda \\ \mu \\ \nu \end{pmatrix} \quad (4)$$

となる。ここで、スネルの法則より θ_1, θ_2 には以下の関係が成り立つ。

$$\theta_2 = \sin^{-1} \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_1 \right) \quad (5)$$

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、

$$\begin{pmatrix} x_P \\ y_P \\ z_P \end{pmatrix} = s \begin{pmatrix} \alpha_3 \\ \beta_3 \\ \gamma_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix} \quad (6)$$

と表すことができる．ただし s は定数である．

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を2.1節に示した手法を用い光線1と光線2を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点の中点を計測点とする．

3. 屈折面の処理

本研究の手法では屈折面が計測に大きな影響を及ぼす．ここでは屈折面の最適化と位置姿勢推定について述べる．

3.1 屈折面角度の最適化 屈折面角度の最適化は文献⁽⁹⁾に基づいて行う．文献⁽⁹⁾ではステレオ計測において、奥行き微小変化に対し、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 θ 、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．原理図を図6に示す．

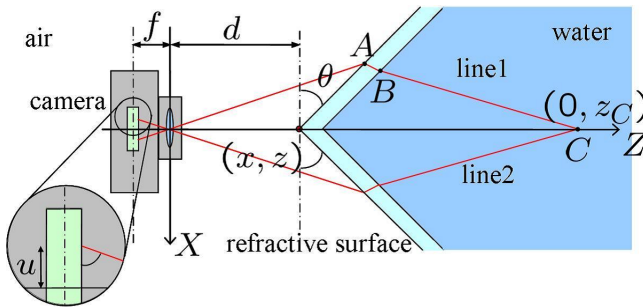


Fig. 6 最適化の原理

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 α 、屈折角 β 、防水容器から水中へ進む際の屈折角 γ 、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であるので光線1についてのみ考えれば良い．

カメラ光線（光線1、光線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．

$$z_C = -\frac{1}{\tan(\theta - \gamma)} x_B + z_B \quad (7)$$

ここで、変数 x_B は

$$x_B = \frac{x_A \cos \theta + (z_A \cos \theta - d \cos \theta - t) \tan(\theta - \beta)}{\sin \theta \tan(\theta - \beta) + \cos \theta} \quad (8)$$

であり、 x_B 内の変数 x_A は、

$$(x_A, z_A) = \left(\frac{du}{2f - u \tan \theta}, \frac{2fd}{2f - u \tan \theta} \right) \quad (9)$$

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(7)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、文献⁽⁹⁾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．

$$\theta = \arg_{\theta} [\max_{\theta} \{ \min_{z_C} \left(\frac{\Delta u}{\Delta z} \right) \}] \quad (10)$$

3.2 屈折面位置姿勢推定 計測の前処理として、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必要がある．計測精度の向上のため本研究では文献⁽⁹⁾の手法に改良を加えた．

求めるパラメータは屈折面の角上の任意の1点 P の3次元座標及び2つの屈折面の X 軸に対する傾きである．この点のカメラ座標系での座標を $P(x_p, y_p, z_p)$ とする（図7）．ここで、 Y 軸に対する屈折面の傾きはごく微小なものと考え傾きは 0° と近似する．

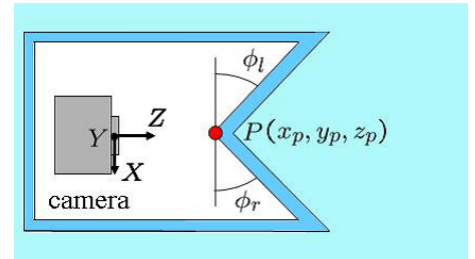


Fig. 7 屈折面の位置姿勢推定パラメータ

推定には実際の寸法が既知の物体を利用する．本研究では，立方体に描かれた白黒で等間隔 D の格子で区切られた模様を利用する．この模様の描かれた立方体を水中に置き，撮影装置により画像を取得する．

取得画像上で格子の頂点の組み合わせを選び出し，この頂点について画像の左右で対応点を手動で与える．この対応点についてパラメータ x, z, ϕ_l, ϕ_r を少しずつ変えていき光線追跡により 3 次元座標を計算し，点間の距離 $D_1, D_2, D_3, \dots, D_n$ を求める（図 8）．

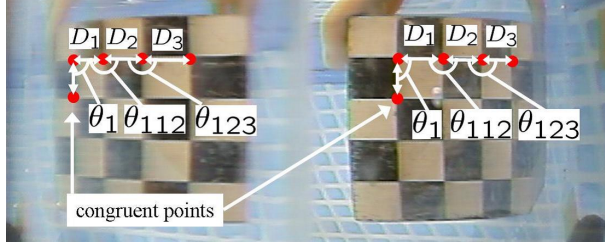


Fig. 8 屈折面位置姿勢推定用画像

屈折面の Y 軸に対する傾きを 0deg としており， y_p の値は計算上どのような値を与えても計算結果には影響を及ぼさないため， y_p については考慮しないものとする．また，探索範囲は屈折面の角の存在する範囲とし，あらかじめ指定しておくものとする．探索の結果，式 (11) が最小になる x, z, ϕ_l, ϕ_r を選ぶことで屈折面の位置を推定する．

$$E = \alpha \times E_1 + \beta \times E_2 \rightarrow \min \quad (11)$$

ここで α, β は要素 E_1, E_2 に対する重み係数である． E_1 は四隅の点間のなす直線の角度 ($\theta_1, \dots, \theta_4$) の真値 (90deg) からの 2 乗誤差と水平方向に並んだ 4 点の点間の直線のなす角度 ($\theta_{n12}, \theta_{n23}$) の真値 (180deg) からの 2 乗誤差の和 (式 (12)) である． E_2 は各点の点間の距離の真値からの 2 乗誤差の和 (式 (13)) である．

$$E_1 = \sum_{k=1}^4 (90 - \theta_k)^2 + \sum_{k=1}^n \{ (180 - \theta_{n12})^2 + (180 - \theta_{n23})^2 \} \quad (12)$$

$$E_2 = \sum_{k=1}^n (D - D_k)^2 \quad (13)$$

屈折面の位置姿勢推定より，点 P の 3 次元座標値 (x_p, y_p, z_p) が求まる (ただし， $y_p = 0$)．この座標値を用いて画像上での屈折面の位置を求め，画像を左右に分ける．その後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．

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．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 自由度はサージ (前後動)，ロール (横揺れ)，ピッチ (縦揺れ)，ヨー (偏揺れ) 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．

ここでサージはロボットの前進後退運動，ロールはロボットの前後軸まわりの回転運動，ピッチはロボットの左右軸まわりの回転運動，ヨーはロボットの上下軸まわりの回転運動を表す．

それらの運動は図 9 のように重心をはさむように搭載された 4 つの推進器により制御される．図 9 において右下方向がロボットの前方向である．

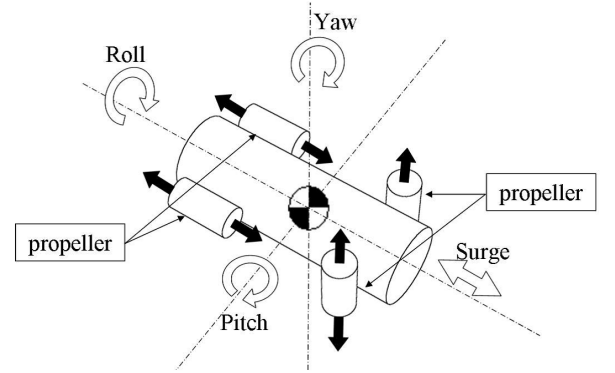


Fig. 9 重心と推進器の位置関係

搭載用の計測装置は今回のロボット用に新たに設計，製作した．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を図 10 に示す．

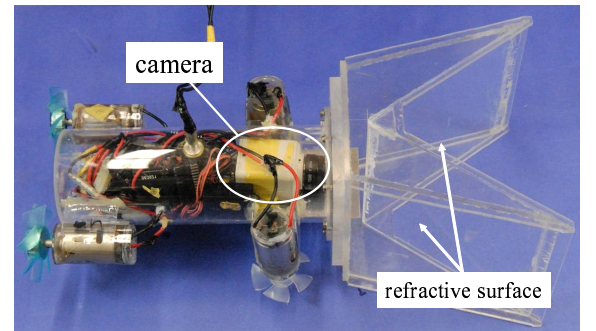


Fig. 10 複光路単眼ステレオを搭載したロボット

5. 実 験

本実験ではカメラの焦点距離を $f=4.6\text{mm}$, カメラから対象物体までの距離は $200\text{mm} \leq z_C \leq 500\text{mm}$ とした。

最初にカメラに対する屈折面の位置姿勢推定を行った。手順は 3.2 節に従い、探索パラメータは $x[\text{mm}]$, $z[\text{mm}]$, $\phi_l[\text{deg}]$, $\phi_r[\text{deg}]$ で、 x は 0.5mm ずつ、 z は 0.2mm ずつ、 ϕ_l , ϕ_r は 0.1deg ずつ変化させながら繰り返し行い、求めた点間の距離が式 (11) を満たす結果が得られる x , z , ϕ_l , ϕ_r を選ぶことにより屈折面の位置姿勢推定をした。本実験では式 (11) の重み係数の値は $\alpha = 1$, $\beta = 1$ としている。結果を表 1 に示す。

Table 1 屈折面位置姿勢推定結果

$x [\text{mm}]$	-1.0
$z [\text{mm}]$	28.4
$\phi_l [\text{deg}]$	52.8
$\phi_r [\text{deg}]$	53.2

次に文献⁽⁹⁾による屈折面角度の最適化の式 (7)(10) 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 (図 11)。

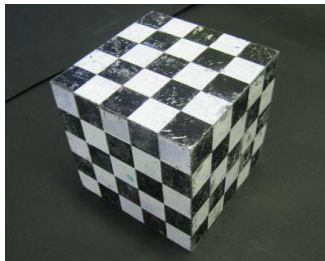


Fig. 11 計測対象

図 12 にロボットが計測対象へ移動する様子 (図 12 左) とそのときの単眼ステレオの取得画像 (図 12 右) を示す。図からわかるようにロボットは移動しながらの画像取得が可能であった。計測には上記動作中に取得した画像 (図 13) を使用する。

一部の屈折面の厚さが設計値よりも小さく製作され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 13)。

その結果が図 14 である。図 13 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 14 では面 1 を上面、面 2 を正面としている。

また精度評価として 2 面の標準偏差を測定した。結

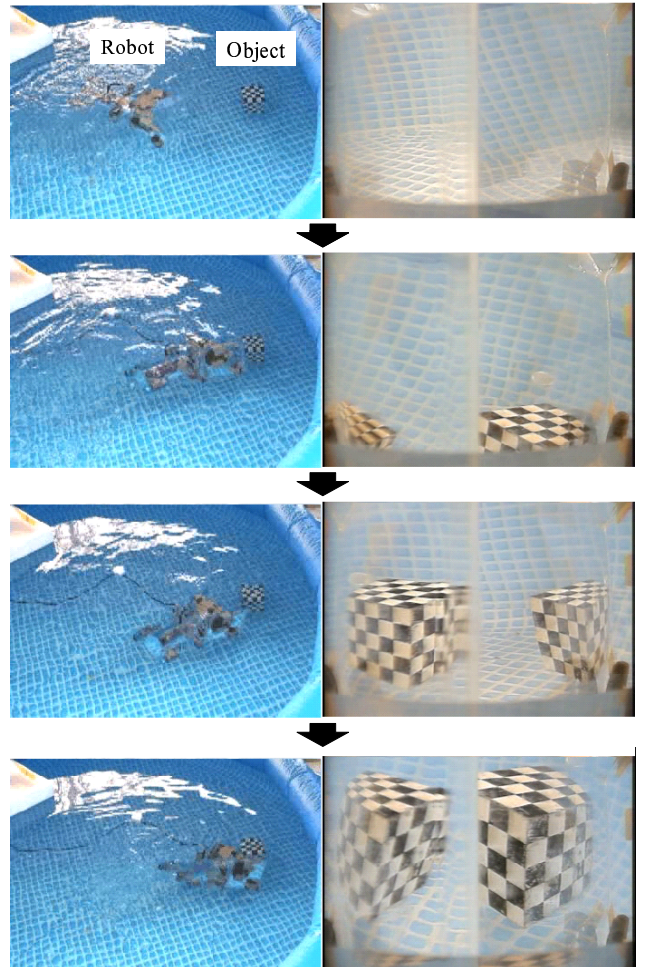


Fig. 12 計測対象への移動

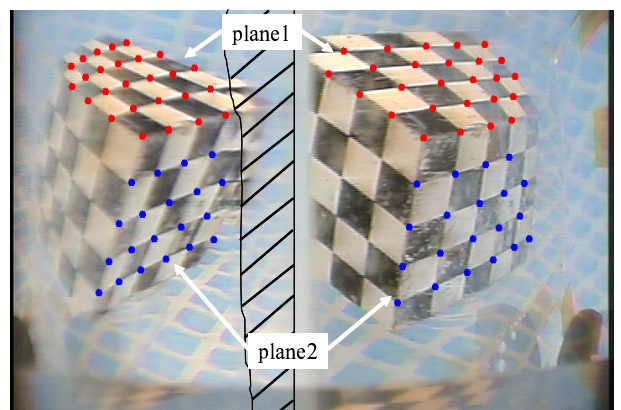


Fig. 13 取得画像

果が表 2 である。また各標準偏差面のなす角度を測定した結果 90.8deg であった。このとき角度の真値は 90deg である。

次に図 15 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。

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。文献⁽⁹⁾によると複光路単眼ステレオは計測対象との距離が本実験と同様に約 200mm のとき、長さに対する計測精度は平均誤差 0.70mm となっている。本研究でも同様の精度が出るはずである。この誤差の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。

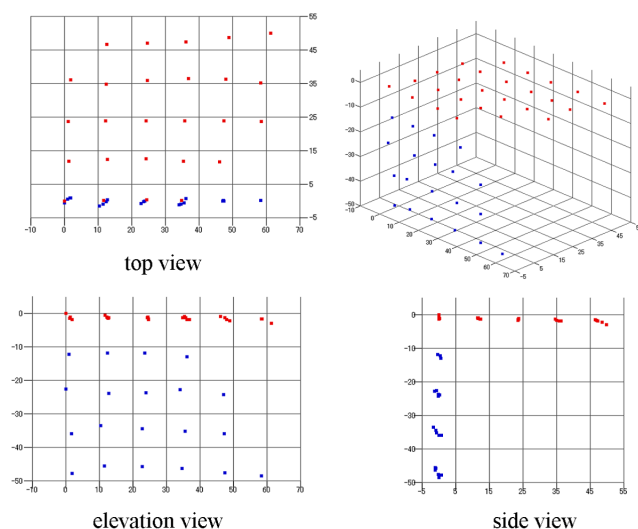


Fig. 14 3次元形状復元

Table 2 計測結果（標準偏差）

	standard variation
plane1	0.578mm
plane2	1.183mm

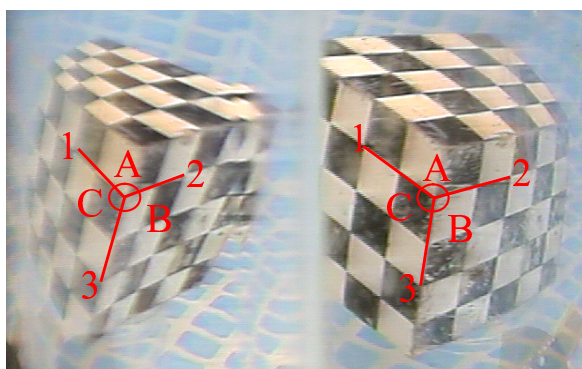


Fig. 15 計測直線と角度

Table 3 計測結果

辺 1	23.04mm	角 A	91.5deg
辺 2	22.52mm	角 B	89.5deg
辺 3	23.63mm	角 C	87.9deg

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。

7. 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, 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)
- (4) Atsushi Yamashita, Shinsuke Ikeda and Toru Kaneko: "3-D Measurement of Objects in Unknown Aquatic Environments with a Laser Range Finder", Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2005), pp.3923-3928, 2005.
- (5) 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 (ICRA2004), pp.2736-2741, 2004.
- (6) Doo Hyun Lee, In So Kweon and Roberto Cipolla: "Single Lens Stereo with a Biprism", Proceedings of IAPR Workshop on Machine Vision Applications(MVA1998), pp.136-139, (1998)
- (7) 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)
- (8) 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)
- (9) 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)