

# 魚眼ステレオカメラによる水中3次元計測

成瀬 達哉<sup>\*1</sup>, 山下 淳<sup>\*2</sup>, 金子 透<sup>\*1</sup>, 浅間 一<sup>\*2</sup>

## 3D Measurement of Objects in Water Using Fisheye Stereo Camera

Tatsuya NARUSE<sup>\*1</sup>, Atsushi YAMASHITA<sup>\*2</sup>,  
Toru KANEKO<sup>\*1</sup>, Hajime ASAMA<sup>\*2</sup>

<sup>\*1</sup> Department of Mechanical Engineering, Shizuoka University  
3-5-1 Johoku, Naka-ku, Hamamatsu-shi, Shizuoka 432-8561, Japan

<sup>\*2</sup> Department of Precision Engineering, The University of Tokyo  
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan

Sensing in aquatic environments is important to maintain underwater structures and research aquatic life. This paper proposes a 3D measurement method of objects in water using a fisheye stereo camera which enables underwater robots to execute its task safely with a wide field of view. However, sensing in aquatic environments meets the difficulty because of effect of refraction of light due to the difference of refractive indices of air and water and distortion of fish-eye image. The proposed method removes distortion of fish-eye image and the effect of refraction to realize accurate 3D measurement. Experimental results show the effectiveness of the proposed method.

**Key Words** : Fish-eye Camera, Stereo Measurement, Underwater Sensing

### 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、これらの作業を水中で人間が直接行う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可能であり、水中ロボットを用いた環境調査を行うことが多くなっている。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り、正確な水中計測が行える手法が求められる。

水中センシングの手法としては超音波<sup>(1)</sup>やカメラを用いたものが挙げられる。超音波を用いる場合、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、近くの対象を高精度に計測することが難しい。そのため、水中センシングにおいて、カメラを用いた画像センシングが有効であるといえる。

しかし、水中においてカメラはハウジングに格納し



Fig. 1 光の屈折

なければならず、この場合、光の屈折が問題となり、水、ハウジング、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はその一例であり、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。このような歪みにより、画像による正確な計測が困難となる。このため、水中計測を行う場合、光の屈折を考慮することが正確な計測のために必要となる。

カメラを用いて水中3次元計測を行う様々な手法が報告されている。カメラを2台用いた方法として、光線追跡を用いたステレオ計測を行う方法がある<sup>(2)</sup>。また、カメラ1台で3次元計測を行う方法としてモー

<sup>\*1</sup> 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) {f0810114, tmtkane}@ipc.shizuoka.ac.jp

<sup>\*2</sup> 東京大学大学院工学系研究科精密工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1) {yamashita, asama}@robot.t.u-tokyo.ac.jp

ションステレオ法を用いた方法<sup>(3)</sup>や、複光路単眼ステレオカメラを用いた方法<sup>(4)</sup>がある。しかし、これらの手法で用いている一般的な視野のカメラでは、視野角が小さく一度の撮影で計測できる範囲が狭いため、広い領域を計測するには撮影回数が多くなり、計測の効率が良くない。スリット光投影法<sup>(5)</sup><sup>(6)</sup>やパターン光投影法<sup>(7)</sup>などといったカメラとレーザを組み合わせるステレオ計測を行う手法も報告されているが、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計測時間が長くなる。

計測時間を短縮し効率良く計測するためには、観察領域の広いカメラを使用することが考えられる。観察領域の広いカメラは周囲環境の把握に優れるため、ロボットをより安全に行動させるためにも有効である。従来研究に双曲面ミラーを利用して水中環境のステレオ計測を行ったものがある<sup>(8)</sup>。しかし、この手法ではカメラの側面方向は観測できるがカメラ前方の領域を観測することができない。水中ロボットに搭載することを想定した場合、カメラ前方を観測可能であることは重要である。そこで、本研究ではカメラ前方に広い視野を有する魚眼カメラを使用して計測を行う。

魚眼カメラを使用した3次元計測を行っている従来研究として、Structure from Motionを用いたもの<sup>(9)</sup>やEPI (Epipolar-Plane Image) 解析を用いたもの<sup>(10)</sup>が報告されており、これらの研究では魚眼カメラによる3次元環境モデリングを行っている。また、計測精度の向上を図り、魚眼レンズ特有の歪みを取り除いた画像を用いて3次元計測を行う手法も報告されている<sup>(11)</sup>。これらの研究ではいずれも地上における計測を行っている。しかし、魚眼ステレオカメラによる水中計測の研究については報告されていない。そこで、本研究では広い視野角を持つ魚眼カメラを2台使い、水中環境における光の屈折を考慮したステレオ計測を目的とする。

本研究では水中カメラと同様の空気 - ガラス - 水の屈折系における計測手法を構築する。具体的には、空気中にある魚眼ステレオカメラを用いて、水槽内の対象の計測を行い、手法の有効性を示す。

## 2. 計測手法

魚眼カメラとは一般に通常のカメラに魚眼レンズを取付けたものを指す(図2)。魚眼レンズが持つ特有の射影方式により、魚眼カメラで撮影して得られる画像は特有の歪みを有する。本研究では等距離射影方式の魚眼レンズを使用する<sup>(12)</sup>。

本研究による計測手順のフローチャートを図3に示



Fig. 2 魚眼ステレオカメラ

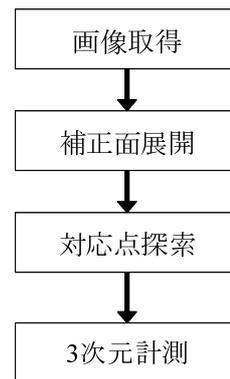


Fig. 3 計測手順

す。最初に、取得した左右の魚眼画像を補正面展開により透視投影画像へ変換し、次に、テンプレートマッチングにより左右の画像の対応点を求める。その後、光の屈折を考慮しながら光線追跡を行い、計測点の3次元位置を算出する。

**2.1 補正面展開** 取得した画像は魚眼レンズの射影方式に従い特徴的な歪みを有しているため、テンプレートマッチングでの対応点探索が困難となる。そこで補正面展開を行い補正画像を作成する。補正面展開では補正面上のある座標に対して対応関係にある取得画像上の座標を求め、対応する座標ごとに取得画像から補正画像へ画素情報を移すことで補正する。補正式は魚眼レンズの射影方式に従って得られるため、射影方式によって異なる。ここでは、本研究で用いる等距離射影方式を例に説明する。

等距離射影方式のレンズの場合の展開モデルを図4に示す。光軸と光線がなす角を $\theta$ 、像高を $r$ とすると、等距離射影方式の射影式は式(1)で表されるように、角度 $\theta$ と像高 $r$ が比例の関係にある。

$$r = f\theta \quad (1)$$

ただし、 $f$ はレンズの焦点距離である。

像点の座標を $(x_p, y_p)$ としたとき、像高 $r$ は式(2)で

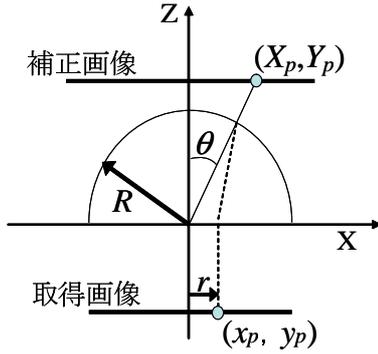


Fig. 4 展開モデル

表される .

$$r = \sqrt{x_p^2 + y_p^2} \quad (2)$$

ここで  $\theta = 90\text{deg}$  の位置の像高  $R$  を基準値として与えるとき, 角度  $\theta$  は式 (1) より式 (3) で表される .

$$\theta = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{r}{R} \quad (3)$$

補正画像の座標を  $(X_p, Y_p)$  とすると, 光線ベクトル  $(l, m, n)^T$  は式 (4) で表される .

$$\begin{aligned} l &= \frac{X_p}{\sqrt{X_p^2 + Y_p^2 + Z_v^2}} \\ m &= \frac{Y_p}{\sqrt{X_p^2 + Y_p^2 + Z_v^2}} \\ n &= \frac{Z_v}{\sqrt{X_p^2 + Y_p^2 + Z_v^2}} \end{aligned} \quad (4)$$

ただし,  $Z_v$  はカメラから補正面までの距離であり式 (5) で表される (図 5) .

$$Z_v = \frac{W}{2 \tan \frac{\Omega}{2}} \quad (5)$$

ここで,  $W$  は補正画像の横幅,  $\Omega$  は画角である .

以上により, 補正画像上の点  $(X_p, Y_p)$  に対応する魚眼画像上の点  $(x_p, y_p)$  は式 (6) で表される .

$$\begin{aligned} x_p &= F(n, R) \cdot l \\ y_p &= F(n, R) \cdot m \end{aligned} \quad (6)$$

ただし,

$$F(n, R) = \frac{2R \cos^{-1} n}{\pi \sqrt{1 - n^2}} \quad (7)$$

である .

補正前 (取得画像) と補正後の画像例を図 6 に示す . 図 6(a) では歪んでいる机や壁が, 図 6(b) では直線状に補正されている .

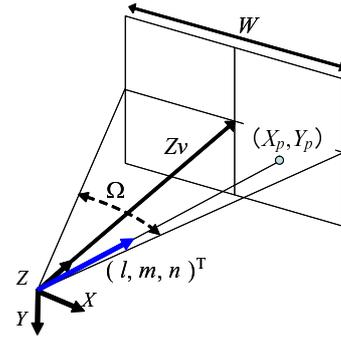


Fig. 5 補正面の位置



(a) 補正前

(b) 補正後

Fig. 6 取得画像

2.2 光線追跡<sup>(2)</sup> 序論でも述べたように, 水中で撮影するためにカメラをハウジングに入れた場合, ハウジングと水, 空気の境界での屈折が生じる . そのため, 水中計測では図 7 のように光の屈折を考慮した光線追跡を行うことが重要となる .

空気, ハウジング, 水の屈折率をそれぞれ  $n_1, n_2, n_3$  とする . また, 入射角を  $\theta_1$ , 屈折角を  $\theta_2$  とする . 単位光線ベクトルを  $(\alpha_1, \beta_1, \gamma_1)^T$  とし, 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,

$$\begin{pmatrix} \alpha_2 \\ \beta_2 \\ \gamma_2 \end{pmatrix} = \frac{n_1}{n_2} \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \beta_1 \\ \gamma_1 \end{pmatrix} + a \quad (8)$$

となる . ここで  $a$  は,

$$a = \left[ \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \sin^2 \theta_1} - \frac{n_1}{n_2} \cos \theta_1 \right] \begin{pmatrix} \lambda \\ \mu \\ \nu \end{pmatrix} \quad (9)$$

である . また, ハウジングから水へ出るときの単位光線ベクトル  $(\alpha_3, \beta_3, \gamma_3)^T$  は,

$$\begin{pmatrix} \alpha_3 \\ \beta_3 \\ \gamma_3 \end{pmatrix} = \frac{n_2}{n_3} \begin{pmatrix} \alpha_2 \\ \beta_2 \\ \gamma_2 \end{pmatrix} + b \quad (10)$$

となる．ここで  $b$  は，

$$b = \left[ \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_3}\right)^2 \sin^2 \theta_2} - \frac{n_2}{n_3} \cos \theta_2 \right] \begin{pmatrix} \lambda \\ \mu \\ \nu \end{pmatrix} \quad (11)$$

である．スネルの法則より， $\theta_1$  と  $\theta_2$  には，

$$\theta_2 = \sin^{-1} \left( \frac{n_1}{n_2} \sin \theta_1 \right) \quad (12)$$

という関係が成り立つ．ここで，光線が水側のハウジングの面を通過するときの位置を  $(x_w, y_w, z_w)^T$  とすると，水中における光線ベクトルの任意の位置  $(x_p, y_p, z_p)^T$  は，

$$\begin{pmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{pmatrix} = s \begin{pmatrix} \alpha_3 \\ \beta_3 \\ \gamma_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{pmatrix} \quad (13)$$

と表せる．ただし， $s$  は任意の定数である．

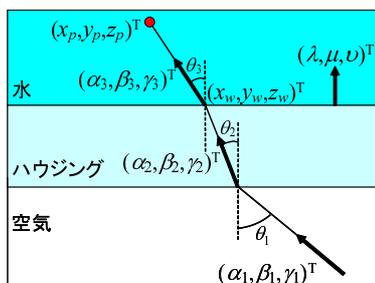


Fig. 7 光線追跡

**2.3 対応点探索** 補正面展開後の左右の画像に対してテンプレートマッチングを行い対応点を求める．テンプレートマッチングにはSADを用いる．また，誤対応を減らすために，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る．

空気中では左画像のある点に対して，右画像上のエピポーラ線は直線状となる．しかし，水中を撮影する場合，屈折の影響により右画像上のエピポーラ線は直線状にならない場合がある．そこで，左画像の注目点を通る左カメラ光線の長さを少しずつ変化させ，その都度，その光線に最も近づく右カメラ光線を探索し算出する．算出された右カメラ光線が通る右画像上の点をエピポーラ線を構成する点とし，最終的に右画像上に点群から成るエピポーラ線が算出される（図8）．

算出されたエピポーラ線上でテンプレートマッチングを行いSADが最小となる位置を対応点として算出する．

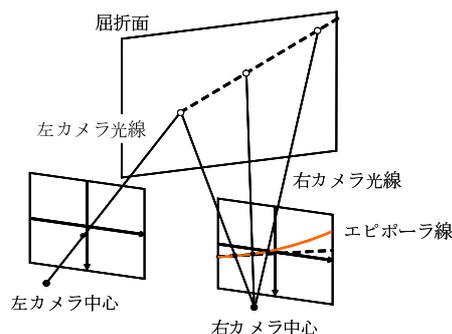


Fig. 8 エピポーラ線

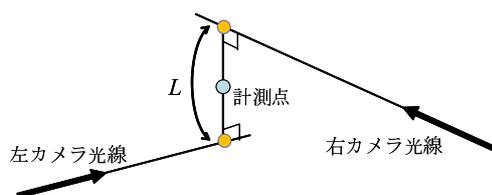


Fig. 9 計測点位置

**2.4 3次元計測** 2.3節にて求めた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て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．しかし，多くの場合，ステレオカメラの校正誤差や画像上のノイズにより2本の光線が交差せず，ねじれの位置にある．

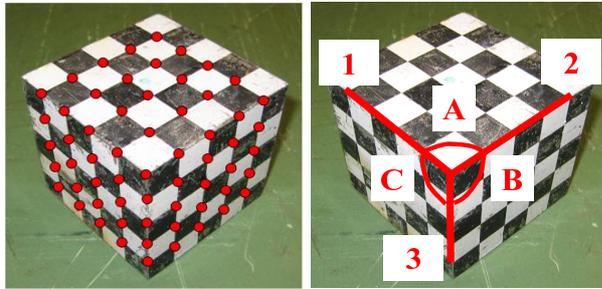
そこで，本研究では，2本の光線間の距離  $L$  が最短となるときの光線間の中心位置を計測点の3次元位置として算出する（図9）．ただし， $L$  の値が大きすぎる場合は，その計測点を除外する．

### 3. 実験

高さ 300mm，幅 870mm，奥行 270mm の直方体の水槽に水を満たし，計測対象を水槽の中へ入れ，3次元計測を行った．取得画像サイズは 1600 × 1200pixel である．空気，水，水槽の屈折率および水槽面の厚さは既知とし，左カメラ光軸と水槽面が垂直であるとして計測を行った．

**3.1 精度評価** 計測対象は 1 マス 20mm の市松模様の描かれた 1 辺 100mm の立方体とした．図 10(a) に示すコーナー位置を左右の画像から対応点として抽出した．光線追跡により 3 次元計測を行い，図 10(b) に示す位置の長さ 1, 2, 3 と角度 A, B, C を計測し精度を評価した．計測対象の長さの真値は 80mm，角度の真値は 90deg である．屈折の考慮をした場合と考慮しなかった場合の計測結果を表 1 に示す．また，計測点の 3 次元位置を図 11 に示す．

計測結果では図 11 に示すように立方体の形が得られた。平均値の誤差は、屈折を考慮しなかった場合には長さが 7.6mm、角度が 11.9deg であったことに対して、屈折を考慮した場合には長さが 0.8mm、角度が 1.8deg となり、誤差を約 1/10 程度に削減することができた。



(a) 抽出点 (b) 計測箇所

Fig. 10 計測対象 1

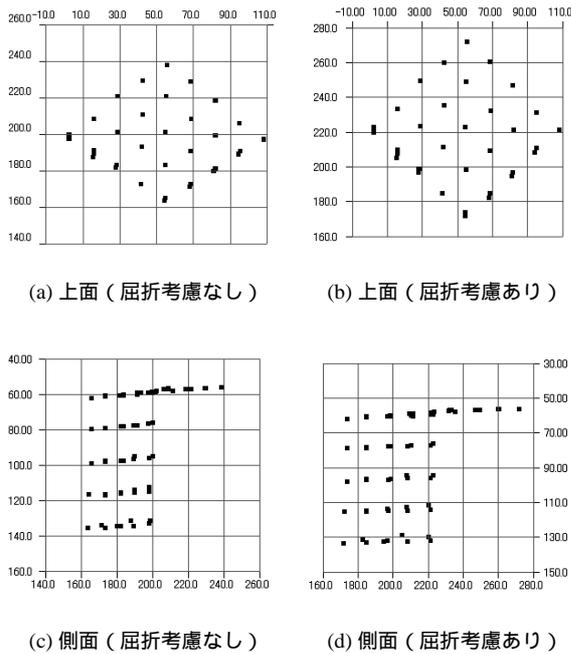


Fig. 11 3次元計測点

長さ [mm]			角度 [deg]		
屈折	未考慮	考慮	屈折	未考慮	考慮
1	68.2	80.1	A	109.9	89.3
2	70.2	81.1	B	98.0	93.2
3	78.8	76.5	C	97.9	92.8
平均	72.4	79.2	平均	101.9	91.8

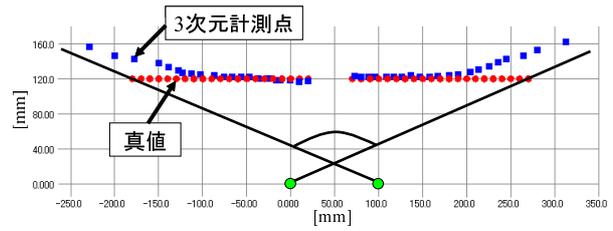


Fig. 12 広視野計測結果

3.2 広視野計測評価 計測対象を、水槽の端から端へ移動させ、左右の取得画像中の計測対象の中心の位置をテンプレートマッチングにより求めた。光線追跡により 3 次元位置を算出し、対象の追跡と精度評価を行った。また、計測された 3 次元位置から視野角を算出し、計測範囲の評価を行った。計測結果を図 12 に示す。さらに、一般的なカメラと比較するために魚眼レンズを取り外し、通常のレンズを取り付けたカメラの視野角を求めた。空気中における視野角は、魚眼レンズ(補正後)が約 140deg、通常カメラが約 30deg であった。

図 12 において四角い点が 3 次元計測点、丸い点が真値である。ここで、縦軸の値が 0.0mm の位置にある 2 つの点はカメラの位置を示している。計測結果では、カメラから離れた場所(画像の端)となるほど、計測点位置と真値とのずれが大きくなっている。これは、画像の端の領域で歪みの補正に誤差が発生しているためであると考えられる。ただし、奥行方向の最大誤差は 40mm 以下であり、カメラに近い場所(画像の中心)では、1 画素の分解能の精度で非常に精度良く対象の中心位置を算出することができており、対象の追跡が行えている。

また、視野角については、魚眼カメラの場合は約 130deg となり、通常カメラの場合の視野角は約 23deg であった。以上の結果より、視野角が約 5.6 倍に広がったにもかかわらず、誤差を抑えた計測が可能となり、魚眼カメラを用いることで、通常カメラよりも広い範囲を高精度に 3 次元計測をすることが可能となった。

3.3 形状復元 図 13 に示すような置物を計測対象とした。左カメラからの取得画像を補正面展開後、エッジ検出し、エッジのある画素を基準点として取得した。基準点に対する右画像上の対応点をテンプレートマッチングにより求め、光線追跡により 3 次元計測を行った。復元結果を図 14 に示す。1 点の 3 次元位置を算出するのに要した処理時間は平均 5 秒であった。

図 14 において、実際には存在しない凹みが出てしまっている箇所が僅かに存在するが、計測対象の形状を復元できることが示された。

## 参考文献

- (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 Imager", *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol.22, No.2, pp.364-375, 1997.
- (3) 河村 拓史, 斎藤 英雄, 中島 真人, " 時空間画像解析による水中物体の 3 次元形状計測 ", 計測自動制御学会論文集, Vol.32, No.4, pp.607-609, 1996.
- (4) 山田 孝司, 山下 淳, 金子 透, " 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 ", 第 15 回ロボティクスシンポジウム講演予稿集, pp.220-225, 2010.
- (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) 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'04 講演論文集 (ROBOMECH'04), 2A1-L2-28, pp1-4, 2004.
- (7) Ryohei Kawai, Atsushi Yamashita and Toru Kaneko, "Three-Dimensional Measurement of Objects in Water by Using Space Encoding Method", *Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2009)*, pp.2830-2835, 2009.
- (8) Atsushi Yamashita, Ryosuke Kawanishi, Tadashi Koketsu, Toru Kaneko and Hajime Asama, "Underwater Sensing with Omni-Directional Stereo Camera", *Proceedings of the 11th Workshop on Omnidirectional Vision, Camera Networks and Non-classical Cameras (OMNIVIS2011)*, pp.304-311, 2011.
- (9) 光本 尚訓, 寺林 賢司, 新垣 洋平, 下村 倫子, 梅田 和昇, " 魚眼カメラを用いた Structure From Motion による 3D 環境計測 ", 第 14 回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp71-76, 2009.
- (10) 森田 徹, 寺林 賢司, 梅田 和昇, " 魚眼ステレオを用いた EPI 解析による 3 次元環境復元 ", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'11 講演論文集 (ROBOMECH'11), 1P1-D08, pp1-4, 2011.
- (11) 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.
- (12) Kenro Miyamoto, "Fish Eye Lens", *Journal of the Optical Society of America*, Vol.54, No.8, pp.1060-1061, 1964.



Fig. 13 計測対象 2

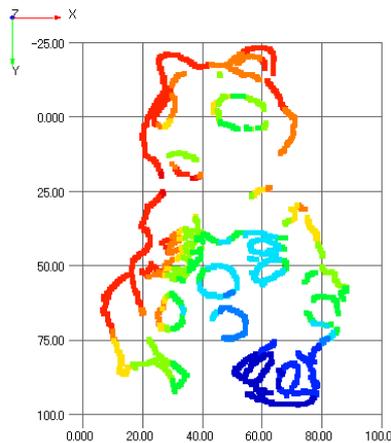


Fig. 14 復元結果

## 4. 結論

魚眼ステレオカメラから取得した 2 枚の魚眼画像から、水中における 3 次元計測を行うことができた。実験により、本手法を用いることで精度良く計測すること、画像の端から端へ動く対象を追跡し位置を計測すること、水中物体の形状を復元し把握することができ、本手法の有効性を確認できた。また、魚眼カメラを用いることで通常視野のカメラよりも広い範囲を 3 次元計測できることを確認でき、魚眼カメラを使用することの有効性が示された。

今後の課題として、ハウジングにカメラを収納し、実際の使用環境を想定した実験を行う必要がある。また、計測精度の向上のために、左右画像の色合いの違いや、屈折面の姿勢を考慮する必要がある。

## 謝 辞

本研究の一部は、科研費若手研究 (A)22680017 の助成を受けたものである。