

# 魚眼ステレオカメラを用いた水中物体の3次元計測\*

成瀬達哉\*\* 山下 淳\*\*\* 金子 透† 小林祐一\*\*

3D Measurement of Objects in Water Using Fish-eye Stereo Camera

Tatsuya NARUSE, Atsushi YAMASHITA, Toru KANEKO and Yuichi KOBAYASHI

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 fish-eye stereo camera. Aquatic sensing meets the difficulty of 3D measurement because of light refraction due to the difference of refractive indices of air and water. This problem is enhanced by distortion of fish-eye images. The proposed method removes distortion of fish-eye images by converting them to perspective projection images. The corrected images are searched for corresponding points and measurement points are located by triangulation. The effect of light refraction is considered by ray tracing to measure accurately in aquatic environments. Experimental results show the effectiveness of the proposed method.

**Key words:** fish-eye camera, stereo measurement, underwater sensing, image processing, shape measurement

## 1. 序 論

近年、水中構造物の建造、保守、点検作業、水中の生物や地形の調査、水中資源の発掘など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多くの危険が伴う。そのため、人間に代わり水中ロボットが現場に導入されるようになってきている。

水中センシングの手法としては超音波<sup>1)</sup>を用いた計測方法がある。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。一方で、カメラを用いて取得した画像を用いてセンシングを行う方法は近くの対象を計測するのに有効である。

画像センシングを行う場合に問題となるのは光の屈折である。水中環境では、一般にカメラはハウジングに格納されており、空気、ハウジング、水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、水面を境に空気中と水中では対象の大きさが異なって見える。水中計測を正確に行う場合、光の屈折を考慮することが必要となり、そのため光線追跡の手法が提案されている<sup>2)</sup>。

画像センシングにより水中3次元計測を行う様々な手法が報告されている。まず、スポット光投影法<sup>3)</sup>、スリット光投影法<sup>4)5)</sup>、パターン光投影法<sup>6)</sup>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能動ステレオ法がある。しかし、これらの手法では、レーザを走査する必要があるため撮影時間が長くなることや、撮影画像枚数が多くなるといった問題がある。一方、受動ステレオ法による計測では一度の撮影のみで計測することが可能である。

受動ステレオ法を行っている従来研究に、カメラを2台用いてステレオ計測を行う方法がある<sup>2)7)</sup>。また、カメラ1台で3次

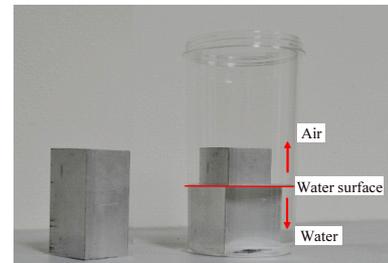


Fig. 1 Refraction of light

元計測を行う方法としてモーションステレオ法を用いた方法<sup>8)</sup>や、複光路単眼ステレオカメラを用いた方法<sup>9)</sup>も報告されている。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る。

そこで、本研究では観察領域の広いカメラとして魚眼カメラを使用することを検討する。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>10)</sup>。この研究では、有効視野を確保するために2つのカメラを縦に並べてステレオ計測を行っている。しかし、得られる2つの画像は対象の写り方が大きく異なり、対応をとることが難しい。

また、全方位カメラにより得られる画像は周囲360degを写したものであり、そのために、水中ロボットの進行方向に対する上下の視野が狭く、走行が困難になるといえる。そこで、本研究では前方を広く観測することができる魚眼カメラを使用し、計測を行うことを検討する。

従来研究に魚眼カメラを用いて3次元計測を行う手法があり<sup>11)~13)</sup>、魚眼カメラの有効性が示されている。しかし、これらは全て地上における計測であり、魚眼カメラを用いた水中計測に関しては報告されていない。そこで、本研究では水中でも魚眼カメラによる計測は有効であると考え、魚眼カメラを2台用

\* 原稿受付 平成24年8月7日

\*\* 静岡大学大学院(静岡県浜松市中区城北3-5-1)

\*\*\* 正会員 東京大学大学院(東京都文京区本郷7-3-1)

† 正会員 静岡大学大学院

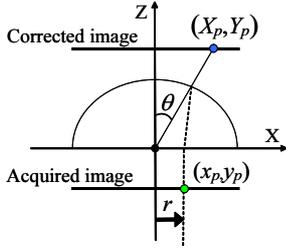


Fig. 2 Correction model

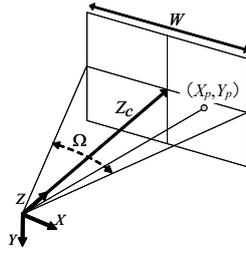


Fig. 3 Correction plane



(a) Before correction



(b) After correction

Fig. 4 Correction of distortion

いて水中環境における光の屈折を考慮したステレオ計測を行うことを目的とする。

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

本研究では等距離射影方式の魚眼レンズを使用する<sup>14)</sup>。左右の魚眼カメラから画像を取得し、透視投影画像へ変換し画像の歪みを補正する。歪みを補正した画像を用いてエピソードマッチングを用いたテンプレートマッチングを行いステレオ画像対の対応点を求める。最後に求めた対応点を用いて3次元計測を行う。

水中計測では屈折面の存在により光が屈折する、対応点探索及び3次元計測では光線追跡を行うことで光の屈折を考慮する。

### 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大き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、補正面展開により歪みを補正した画像を作成する。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歪みを補正する。補正式は魚眼レンズの射影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について補正方法を説明する。

展開モデルを図2に示す。光軸と光線がなす角を $\theta$ 、画像中心から像点までの距離(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。

$$r \propto \theta \quad (1)$$

像点の座標を $(x_p, y_p)$ としたとき、像高 $r$ は式(2)で表される。

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

ここで $\theta = 90\text{deg}$ の位置の像高を $R$ とすると、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)~(6)で表される。

$$l = \frac{X_p}{\sqrt{X_p^2 + Y_p^2 + Z_c^2}} \quad (4)$$

$$m = \frac{Y_p}{\sqrt{X_p^2 + Y_p^2 + Z_c^2}} \quad (5)$$

$$n = \frac{Z_c}{\sqrt{X_p^2 + Y_p^2 + Z_c^2}} \quad (6)$$

ただし、 $Z_c$ はカメラから補正面までの距離であり式(7)で表される(図3)。

$$Z_c = \frac{W}{2 \tan \frac{\Omega}{2}} \quad (7)$$

ここで、 $W$ は補正画像の横幅、 $\Omega$ は半角である。

補正画像上の点 $(X_p, Y_p)$ から求まる光線ベクトル $(l, m, n)^T$ から、点 $(X_p, Y_p)$ に対応する魚眼画像上の点 $(x_p, y_p)$ は式(8)、(9)で求めることができる。

$$x_p = F(n, R) \cdot l \quad (8)$$

$$y_p = F(n, R) \cdot m \quad (9)$$

ただし、

$$F(n, R) = \frac{2R \cos^{-1} n}{\pi \sqrt{1 - n^2}} \quad (10)$$

である。

補正前(取得画像)と補正後の画像例を図4に示す。図4(a)では歪んでいる机や壁が、図4(b)では直線状に補正されている。

### 2.2 光線追跡

水中計測では、光の屈折を考慮した光線追跡を行うことが正確な計測を行うために重要となる<sup>2)</sup>。光線追跡の概念図を図5に示す。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、空気からハウジングへの入射角を $\theta_1$ 、屈折角を $\theta_2$ とする。スネルの法則より、 $\theta_1$ と $\theta_2$ には、

$$\theta_2 = \sin^{-1} \left( \frac{n_1}{n_2} \sin \theta_1 \right) \quad (11)$$

の関係が成り立つ。

屈折面の法線ベクトルを $(\lambda, \mu, \nu)^T$ とし、ハウジング表面に向かう単位光線ベクトルを $(\alpha_1, \beta_1, \gamma_1)^T$ とすると、この光線とハウジング表面との交点 $(x_1, y_1, z_1)^T$ は、

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} = \rho_1 \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \beta_1 \\ \gamma_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix} \quad (12)$$

で与えられる。ただし、 $(x_0, y_0, z_0)^T$ はカメラのレンズ中心である。また、 $\rho_1$ は次のように表せる。

$$\rho_1 = -\frac{\lambda x_0 + \mu y_0 + \nu(z_0 - d)}{\alpha_1 \lambda + \beta_1 \mu + \gamma_1 \nu} \quad (13)$$

ここで、 $d$ は世界座標系の $z$ 軸とハウジング表面が交わる位置の $z$ 座標値である。

ハウジングの表面の点 $(x_1, y_1, z_1)^T$ から裏面へ向かう光線の単位ベクトル $(\alpha_2, \beta_2, \gamma_2)^T$ は、

$$\begin{pmatrix} \alpha_2 \\ \beta_2 \\ \gamma_2 \end{pmatrix} = \frac{n_1}{n_2} \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \beta_1 \\ \gamma_1 \end{pmatrix} + a \quad (14)$$

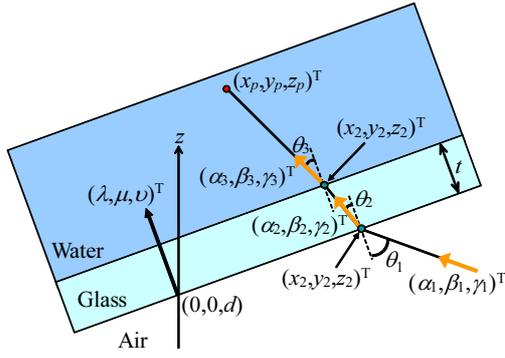


Fig. 5 Ray tracing

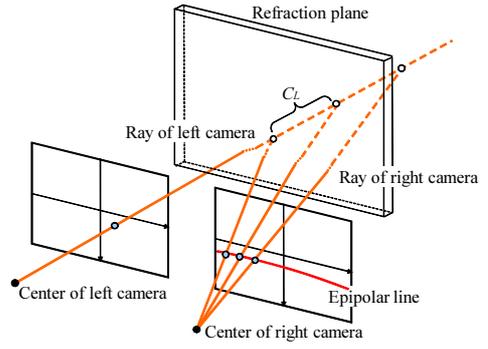


Fig. 6 Epipolar line

となる．ここで  $a$  は，

$$a = \left[ \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \sin^2 \theta_1} - \frac{n_1}{n_2} \cos \theta_1 \right] \begin{pmatrix} \lambda \\ \mu \\ \nu \end{pmatrix} \quad (15)$$

である．ハウジング中を進む光線とハウジングの裏面との交点  $(x_2, y_2, z_2)^T$  は

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix} = \rho_2 \begin{pmatrix} \alpha_2 \\ \beta_2 \\ \gamma_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} \quad (16)$$

で与えられる．また， $\rho_2$  は次のようになる．

$$\rho_2 = -\frac{\lambda x_1 + \mu y_1 + \nu(z_1 - d) - t}{\alpha_2 \lambda + \beta_2 \mu + \gamma_2 \nu} \quad (17)$$

ただし， $t$  はハウジングの厚みである．

次に，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，

$$\begin{pmatrix} \alpha_3 \\ \beta_3 \\ \gamma_3 \end{pmatrix} = \frac{n_2}{n_3} \begin{pmatrix} \alpha_2 \\ \beta_2 \\ \gamma_2 \end{pmatrix} + b \quad (18)$$

となる．ここで  $b$  は，

$$b = \left[ \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_3}\right)^2 \sin^2 \theta_2} - \frac{n_2}{n_3} \cos \theta_2 \right] \begin{pmatrix} \lambda \\ \mu \\ \nu \end{pmatrix} \quad (19)$$

である．また，水中における光線ベクトルの任意の位置  $(x_p, y_p, z_p)^T$  は次のように表せる．

$$\begin{pmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{pmatrix} = s \begin{pmatrix} \alpha_3 \\ \beta_3 \\ \gamma_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix} \quad (20)$$

ただし， $s$  は任意の定数である．

### 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 (Sum of Absolute Difference) を用いる．また，誤対応を減らし，かつ探索時間を短縮するためにテンプレートマッチングを行う際にはエピポラ拘束を用いる．

空気中では左画像のある注目点に対して，右画像上のエピポラ線は直線状となる．しかし，水中を撮影する場合，光の屈折の影響により右画像上のエピポラ線は直線状にならない(図 6)．そこで，次のようにしてエピポラ線の算出を行う．まず，

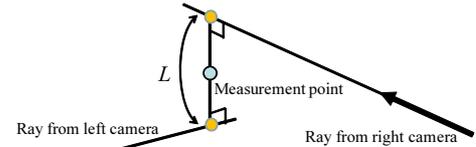


Fig. 7 Measurement point

左画像のある 1 点に注目し，この点を通る左カメラ光線を光線追跡により算出する．次に，この光線の長さを  $C_L$  ずつ変化させ，その都度その左カメラ光線の先端との距離が最も小さくなる右カメラ光線を光線追跡により算出する．算出された右カメラ光線が通る右画像上の点をエピポラ線を構成する点とすることで，最終的に右画像上に点群で構成されたエピポラ線を得ることができる．

エピポラ線上でテンプレートマッチングを行い相違度が最小となる位置を対応点とする．

### 2.4 3次元計測

左右の対応点を通るそれぞれのカメラ光線が交わる点を 3 次元計測点として算出する．しかし，ステレオカメラの校正誤差や光線追跡時の丸め誤差によりこれらの光線が実際に交わることはほとんど無い．そのため，左右の 2 本の光線間の距離  $L$  を計算し，その距離が最短となる位置の光線間の midpoint を 3 次元計測点とする(図 7)．

## 3. 実験

実験では図 8 に示すように 2 台の魚眼カメラを水槽の外に配置し，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<sup>‡</sup>．使用した魚眼カメラは IEEE-1394b デジタルカメラ Grasshopper GRAS-20S4C-C (Point Grey Research

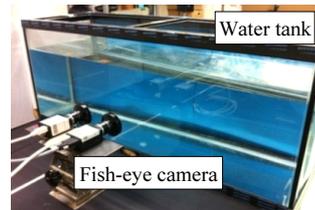
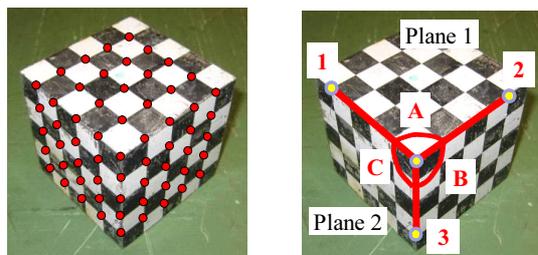


Fig. 8 Experiment environment



Fig. 9 Fish-eye stereo camera

<sup>‡</sup>水槽中の水中物体を計測する場合，空気 - ガラス - 水の屈折系となる．一方，平面型の屈折面をもつ水中ロボットにカメラを搭載した場合も，空気 - ガラス - 水の屈折系で計測を行うことになり，本実験の条件と屈折系自体は同様である



(a) Measured point (b) Measurement points

Fig. 10 Measurement object 1

Table 1 Length and angle

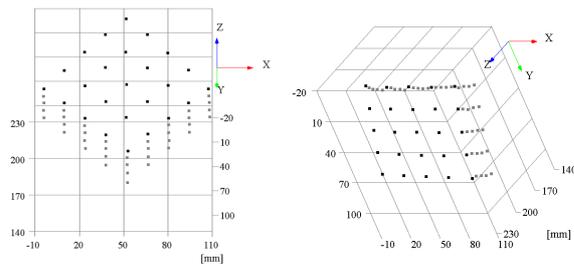
consideration of refraction effect	length [mm]			consideration of refraction effect	angle [deg]		
	no	yes	in air		no	yes	in air
1	71.1	80.6	79.5	A	108.2	89.5	89.6
2	69.5	79.6	79.5	B	102.2	91.7	90.2
3	77.5	78.4	78.7	C	102.6	91.9	89.4
average	72.7	79.5	79.3	average	104.3	91.0	89.7

社製)に魚眼レンズ FE185C057HA-1 (富士フィルム製)を取付けたものである(図9)。魚眼画像の画像中心および像高はOcamCalib Toolbox<sup>15)</sup>と呼ばれる Toolbox を利用して求め、魚眼画像の歪みの補正に用いている。歪曲収差のパラメータも、格子パターンを用いたキャリブレーションにより求めている。また、キャリブレーションにより求めた基線長は 100.6mm であった。基線長のキャリブレーションは 5 回行い、平均値を使用した。取得画像サイズは 1600 × 1200 pixel であり、 $C_L$  は 0.5 mm とした。水槽面の厚さは 3.7 mm であり、カメラと水槽面との距離は水槽面に貼られた格子パターン画像を用いて水槽面の姿勢推定を行うことで求めている。空気、ガラス、水の屈折率は既知とし、カメラ光軸と水槽面が垂直になるように設置して計測を行った。

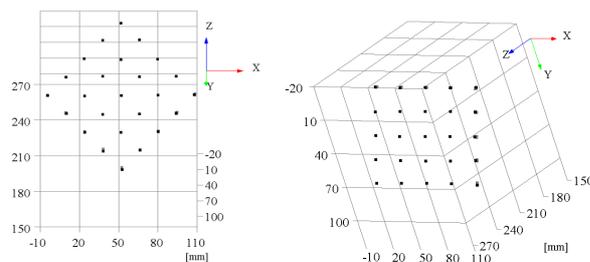
### 3.1 精度評価

図 10 に示すチェスパターンの描かれた立方体をカメラから 3 つの面が見えるように配置し、対象が画像の中心付近に写るように撮影し計測を行った。対象までの距離は水中と空気中とで同程度としている。計測位置は図 10(a) に示すチェスパターンのコーナー位置とし、3 次元計測結果から図 10(b) に示す位置の辺の長さおよび角度を計算し、計測精度の評価を行った。測定器を用いたとき、辺の長さの測定値は 80.0mm、角度の測定値は 90.0deg であった。図 11(a), (c), (e) および、図 11(b), (d), (f) は計測結果を 3 次元座標にプロットし、図 10(b) に示す面 1, 面 2 をそれぞれ正面から見たものである。注目する面上で計測された点は黒色で、それ以外の計測点は灰色で示している。また、辺の長さおよび角度の計算結果を表 1 に示す。計測結果は光の屈折の影響を考慮した場合としない場合、および空気中で計測した場合とで比較している。

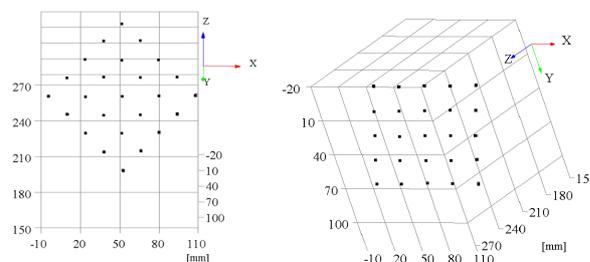
図 11 をみると、(a), (b) は灰色の点が多く見られることから各面が直交していないと判断できる。一方、(c), (d) および (e), (f) では、黒色の点と灰色の点が重なっており、各面が直交していると判断できる。したがって、屈折の影響を考慮しなかった場合に対して、考慮した場合には空気中で計測した場合と同等の形状が得られていると考えられる。また、表 1 をみると、3 辺の長さの誤差の平均は、屈折を考慮しなかった場合が 7.3 mm であるのに対して屈折を考慮した場合は 0.5 mm となっており、3 箇所の角度の誤差の平均は屈折を考慮しなかった場合は 14.3 deg



(a) Plane 1 (refraction not considered) (b) Plane 2 (refraction not considered)



(c) Plane 1 (refraction considered) (d) Plane 2 (refraction considered)



(e) Plane 1 (in air) (f) Plane 2 (in air)

Fig. 11 Reconstructed plane

であるのに対して屈折を考慮した場合は 1.4 deg となっている。空気中での計測結果の辺の長さおよび角度の誤差の平均はそれぞれ 0.8 mm, 0.4 deg である。この結果から、空気中よりも対象が大きく撮影される水中環境においても、光の屈折を考慮することで空気中と同等の精度で計測することができるといえる。

### 3.2 計測範囲評価

水槽内で図 12 に示す計測対象を水槽面に対して平行に移動させ、対象の中心位置を 3 次元計測した。また、3 次元計測結果から魚眼ステレオカメラの計測有効範囲を求めた。図 13 に 3 次元計測結果を示す。赤い点が真値、青い点が計測点を表している。また、緑の点はカメラの位置である。

魚眼画像を補正する際に切り取った範囲は 145 deg である。計測結果から視野角約 115deg までの範囲を計測することができたことがわかる。また、視野角約 115deg 以上の範囲では対応点はとれているものの誤差が大きくなってしまっている。誤差の原因として、魚眼画像の歪みや光の屈折による影響が視野角が大きくなるにつれて強く現れてくることなどが考えられる。

### 3.3 形状計測

図 14 に示す模型を対象として 3 次元計測を行った。計測は図 15 に示すような対象のエッジを注目点として行った。計測は 2 回行い、それぞれ別の方向から対象を見るように撮影を行った。また、2 つの計測結果を ICP アルゴリズムにより位置合わせを行い統合した。計測結果を図 16 に、統合結果を図 17 に示す。

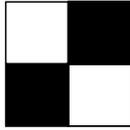


Fig. 12 measurement object 2

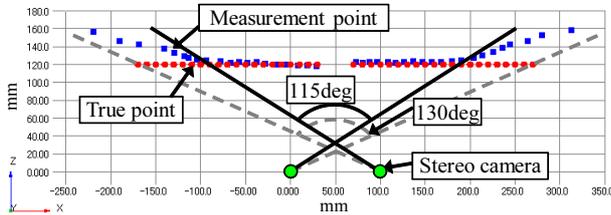


Fig. 13 Result of range evaluation



Fig. 14 Measurement object 3



Fig. 15 Object in water

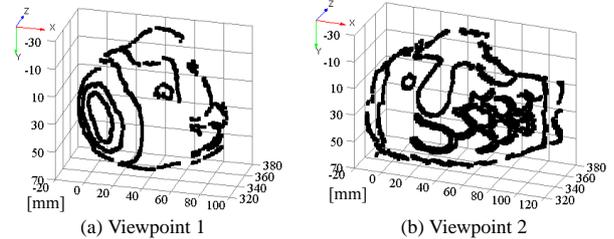


Fig. 16 Result of shape measurement

図 16 を見ると、対象の形状を復元することができている。また、図 17 のように 2 つの計測結果を統合することにより、対象の 3 次元形状を具体的に把握することができた。

#### 4. 結 論

本論文では魚眼カメラを用いて水中環境における 3 次元計測を行う手法を提案した。水中計測で問題となる光の屈折の影響は光線追跡により解決した。また、魚眼カメラの大きな歪みは補正面展開により歪みを低減することで解決した。実験結果から、光の屈折を考慮することで水中においても空気中と同等の精度で計測することができている。また、一度に広範囲を計測することが可能であり、魚眼カメラを使用することの有効性が示された。計測対象の形状を復元することもできている。本手法を用いて水中センシングを行うことが可能であることを示すことができた。

今後の展望としては、実際に魚眼ステレオカメラを水中ロボットに搭載して計測を行うことが挙げられる。また、今後はドーム型の屈折面を用いることを検討する。今回は直方体の水槽を用いることで平面型の屈折面を想定した実験を行ったが、曲面を持つハウジングによりドーム型の屈折面となる場合でも本手法により計測を行うことが可能である。ドーム型の屈折面を用いることで、屈折面への光線の入射角が画角の大きい範囲でも小さくなり、屈折による影響を小さくすることができる。

#### 謝 辞

本研究の一部は、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)「災害対応無人化システム研究開発プロジェクト」、科研費若手研究(A)22680017、および財団法人旭硝子財団の援助を受けた。

#### 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*, **7**, 1, (1998) 91.
- 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*, **22**, 2, (1997) 364.
- 3) 山下淳, 林本悦一, 金子透: レーザレンジファインダを用いた水中物体の 3 次元形状計測, *日本機械学会論文集 (C 編)*, **72**, 717, (2006) 1506.
- 4) 山下淳, 樋口裕和, 金子透: 光切断法による水中物体の 3 次元計測, *精密工学会誌*, **73**, 2, (2007) 265.
- 5) Hayato Kondo, Toshihiro Maki, Tamaki Ura, Yoshiaki Nose, Takashi Sakamaki and Masaaki Inaishi: Relative Navigation of an Au-

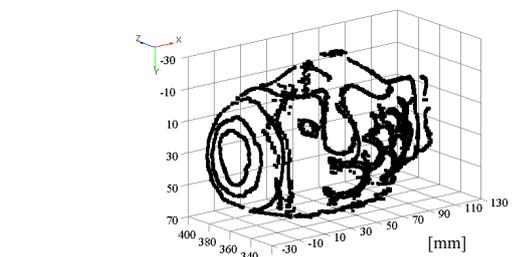


Fig. 17 Integration of measurement result

- tonomous Underwater Vehicle Using a Light-Section Profiling System, *Proceedings of the 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2004)*, (2004) 1103.
- 6) 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)*, (2009) 2830.
- 7) Atsushi Yamashita, Susumu Kato and Toru Kaneko: Robust Sensing against Bubble Noises in Aquatic Environments with a Stereo Vision System, *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2006)*, (2006) 928.
- 8) 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*, **32**, 4, (1996) 607.
- 9) Atsushi Yamashita, Yudai Shirane and Toru Kaneko: Monocular Underwater Stereo -3D Measurement Using Difference of Appearance Depending on Optical Paths, *Proceedings of the 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2010)*, (2010) 3652.
- 10) Atsushi Yamashita, Ryosuke Kawanishi, Tadashi Koketsu, Toru Kaneko and Hajime Asama: "Underwater Sensing with Omnidirectional Stereo Camera", *Proceedings of the 11th Workshop on Omnidirectional Vision, Camera Networks and Non-classical Cameras (OMNIVIS2011)*, (2011) 304.
- 11) Kenji Terabayashi, Hisanori Mitsumoto, Toru Morita, Yohei Aragaki, Noriko Shimomura, and Kazunori Umeda: Measurement of Three Dimensional Environment with a Fish-eye Camera Based on Structure From Motion - Error Analysis, *Journal of Robotics and Mechatronics*, **21**, 6, (2009) 680.
- 12) 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, (2011)1.
- 13) 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, (2007)1.
- 14) Kenro Miyamoto: Fish Eye Lens, *Journal of the Optical Society of America*, **54**, 8, (1964) 1060.
- 15) Davide Scaramuzza, Agostino Martinelli and Roland Siegwart: A Toolbox for Easy Calibrating Omnidirectional Cameras, *Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2006)*, (2006) 5695.