

# 液面画像を用いた液体の屈折率推定及び液中物体の形状計測

藤井 彰      山下 淳      金子 透

静岡大学工学部機械工学科

〒432-8561 静岡県浜松市城北 3-5-1

**あらまし** 本論文では、ステレオカメラを用いて未知液体中の物体の形状計測を行うことを目的とする。ビジョンセンサを用いて液体中の物体の計測を行う場合、光の屈折が重要な問題になる。よって液面画像を用いることで液体の屈折率を推定し、光の屈折を考慮した 3 次元計測を行う。この手法の有効性を実験により示す。

## Estimation of Refractive Index of Liquid and 3-D Measurement of Objects in Liquid by Using Images of Water Surface

Akira FUJII, Atsushi YAMASHITA, and Toru KANEKO

Department of Mechanical Engineering, Shizuoka University

3-5-1 Johoku, Hamamatsu-shi, Shizuoka 432-8561, Japan

**Abstract** In this paper, we propose a new 3-D measurement method of objects in unknown liquid with a stereo vision system. When applying vision sensors to measuring objects in liquid, light refraction is an important problem. Therefore, we estimate refractive indices of unknown liquids by using images of water surface, and measure 3-D shapes of objects in liquids in consideration of refractive effects of the light. The effectiveness of the proposed method is shown through experiments.

### 1. 序論

近年、水中でのセンシング技術が盛んに行われている<sup>(1)~(2)</sup>。人間では危険な深海での環境調査に水中ロボットなどの無人潜水艇を使用する場合、これを実現するには、移動を行う際周辺環境を正確に計測し、水中の状況を認識しながら作業を遂行しなければならない。従来、水中ロボットは外界からの情報を超音波を用いて獲得していた<sup>(3)~(4)</sup>。しかし、海底や海中の環境計測を行う場合、超音波を用いた方法は高精度な計測には適しておらず、現在ではより精度の高いビジョンセンサを用いた方法が水中ロボットの

センサとしては主流となっている。ここで、水中においてカメラなどのビジョンセンサを用いる場合、カメラと計測対象を隔てている空気、ガラス、水といった屈折率の異なる物質間を光が透過するので屈折を起し画像は歪んでしまう。Fig.1 は水面の 1 つの物体を撮影した場合、空気と水の屈折率の違いにより歪みが生じる現象を示した画像である。ビジョンセンサを用いて水中で正確な計測を行うには、この光の屈折を考慮する必要がある。

従来研究では、水中での屈折率の影響を考慮したステレオ計測手法やレーザーを用いた計測手法が提案されているが水の屈折率既知という前

提があった<sup>(5)~(9)</sup>．しかし、実際の計測環境では屈折率は必ずしも既知ではない．

そこで、本研究では2台のカメラを用いたステレオ法を用い、対象物体の液面画像の液面付近での歪みを利用することにより液体の屈折率を推定することを目的とする．また、推定した屈折率を用いて液面物体の形状計測を行うことを目的とする．さらに、形状計測により算出した3次元位置を用い液面画像を補正する手法についても提案する．

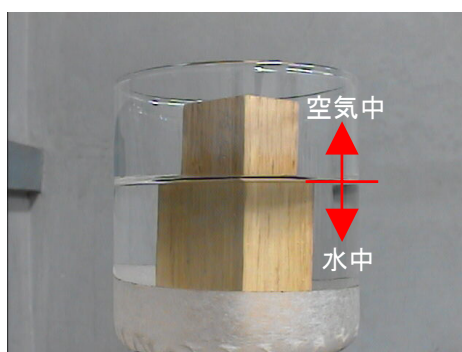


Fig.1 屈折率の違いによる影響

## 2. 計測手法の概要

本研究は、液面画像を用いて屈折率の推定を行い、その屈折率を用いてステレオ法による3次元計測<sup>(10)</sup>を行う (Fig.2)．計測手法のフローチャートを Fig.3 に示す．3次元計測を行うために必要な対応点検出手法としてテンプレートマッチングを用い、2台のカメラで取得できる2つの画像より対応点を求める．そして、この対応点より液体の屈折率を考慮して求めた3次元データを用いて画像の補正を行っていく．

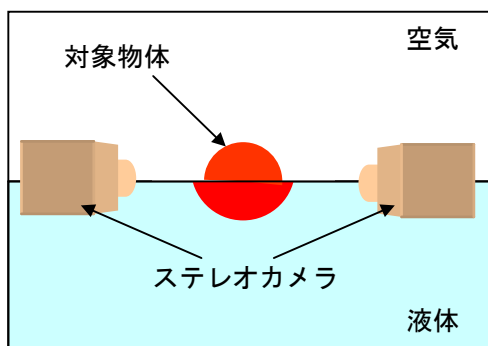


Fig.2 ステレオ法モデル

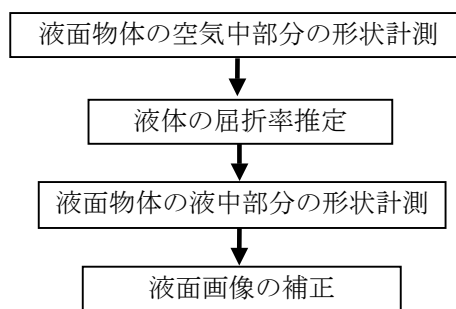


Fig.3 提案手法の概要

## 3. 液面画像を用いた屈折率算出方法

本研究では液面画像の液面より上の空気中部分では歪まず、液面より下の液中部分では歪み、かつ液面境界付近で物体の3次元位置が同じという情報を利用し屈折率を算出する．液面画像の例を Fig.4, Fig.5 に示す．尚、前提条件として液面とカメラの光軸が同一平面上にあるとする．また、カメラとガラスの距離  $d$ 、カメラと対象物体の距離  $l$  はステレオ計測により求め、ガラスの厚さ  $t$  は既知とする．Fig.6 は真上から見た図であり、右カメラで原理説明を行う．

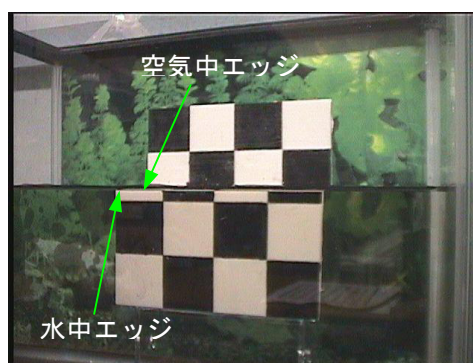


Fig.4 液面画像 1

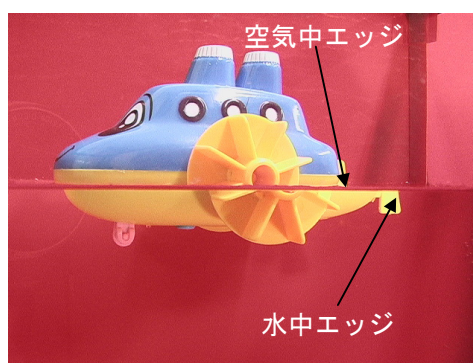


Fig.5 液面画像 2

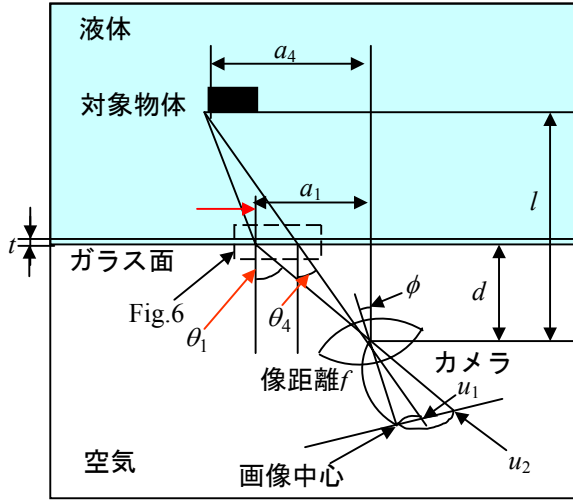


Fig. 6 液体の屈折率算出原理

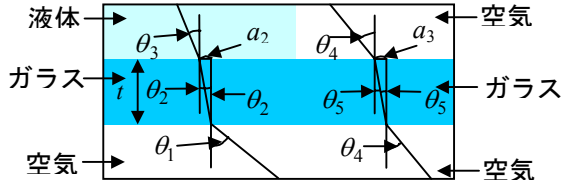


Fig. 7 水槽ガラス面部分の拡大図

Fig. 4, Fig. 5 に示す液面付近の空气中、液中それぞれのエッジ部分は Fig. 6 で空气中エッジ  $u_1$ 、液中エッジ  $u_2$  と表すことができる。像距離（レンズ中心と結像面との間の距離） $f$ 、画像中心と空气中エッジの距離  $u_1$ 、画像中心と液中エッジの距離  $u_2$ 、水槽ガラス面に対するカメラの角度  $\phi$  を用いると、入射角  $\theta_1$ 、 $\theta_4$  は以下の式で表される。

$$\theta_1 = \phi - \tan^{-1} \frac{u_2}{f} \quad (1)$$

$$\theta_4 = \phi - \tan^{-1} \frac{u_1}{f} \quad (2)$$

また、Fig. 6 のガラス部分の拡大図を示す Fig. 7 より、ガラス内での屈折角  $\theta_2$ 、 $\theta_5$  は、空気、ガラスの屈折率  $n_1$ 、 $n_2$  とすると、Snell の法則を用いて、

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1} \quad (3)$$

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin \theta_5}{\sin \theta_4} \quad (4)$$

となる。これより Fig. 6, Fig. 7 の  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 、 $a_4$  をそれぞれ求めると、

$$a_1 = d \tan \theta_1 \quad (5)$$

$$a_2 = t \tan \theta_2 \quad (6)$$

$$a_3 = t \tan \theta_5 \quad (7)$$

$$a_4 = (l - t) \tan \theta_4 + a_3 \quad (8)$$

となる。これより光の液体進入時の屈折角  $\theta_3$  は、

$$\theta_3 = \tan^{-1} \frac{a_3 - a_2 - a_1}{l - t - d} \quad (9)$$

で求まる。これにより、液体の屈折率  $n_3$  は、

$$n_3 = n_1 \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_3} \quad (10)$$

という Snell の法則より求まる。

#### 4. テンプレートマッチング

ステレオカメラを用いて3次元計測を行う場合、それぞれのカメラで得られた2つの画像より対応点を見つけ出す必要がある。その対応点を見つけ出す手法としてテンプレートマッチングがある。これは対象画像の中にあらかじめ用意したテンプレートと同じものがあるか対象画像上でテンプレートを移動しながら重ね合わせて相関を調べる検索方法である (Fig. 8)。本研究では画像間の明るさの差にロバストな正規化相互相関を用いることで対応点を求める。そこで、Fig. 8 のような左右のカメラで撮影された画像があり、Fig. 8(a)で示されているような対応点を求めたい点があるとする。そして、その周りのテンプレート画像を  $T_p$ 、Fig. 8(b)の画像より検索する対象画像を  $I_p$  とすると、正規化相互相関係数  $C$  は、

$$C = \frac{\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M \{I_p(i, j) - \mu_I\} \{T_p(i, j) - \mu_T\}}{\sqrt{\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M \{I_p(i, j) - \mu_I\}^2 \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M \{T_p(i, j) - \mu_T\}^2}} \quad (11)$$

である。ただし、

$$\mu_I = \frac{1}{MN} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M I_p(i, j), \quad \mu_T = \frac{1}{MN} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M T_p(i, j)$$

ここで  $M$ 、 $N$  はテンプレートサイズ（高さ  $M$  画素×幅  $N$  画素）、 $i$ 、 $j$  はテンプレート内部の位置をそれぞれ示す。

$C$  の値が 1 に最も近く、ある一定値以上の点を

対応点とする。



## 5. 光の屈折を考慮した形状計測原理

3次元計測を行う際に Snell の法則を反映させたカメラの光線追跡を行うことで、対象物体の正確な計測を可能にする。Fig.9 に示すように、空気とガラスの屈折率を  $n_1, n_2$  とし、空気からガラスへの入射角を  $\theta_1$  とする。また、空気中のカメラの単位光線ベクトルを  $(\alpha_1, \beta_1, \gamma_1)$ 、ガラス面の法線ベクトルを  $(\lambda, \mu, \nu)$  とすると、ガラス中を進む単位光線ベクトル  $(\alpha_2, \beta_2, \gamma_2)$  は、

$$\begin{pmatrix} \alpha_2 \\ \beta_2 \\ \gamma_2 \end{pmatrix} = \frac{n_1}{n_2} \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \beta_1 \\ \gamma_1 \end{pmatrix} + \left( \sqrt{1 - \left( \frac{n_1}{n_2} \right)^2 \sin^2 \theta_1} - \frac{n_1}{n_2} \cos \theta_1 \right) \begin{pmatrix} \lambda \\ \mu \\ \nu \end{pmatrix} \quad (12)$$

となる。また、液体の屈折率を  $n_3$ 、ガラスから液体への入射角を  $\theta_3$  とすると、液中を進む単位光線ベクトル  $(\alpha_3, \beta_3, \gamma_3)$  は、上記の(12)式の添え字を 1 から 2、2 から 3 に換えたものとなる。

最終的に計測点の座標  $(x_p, y_p, z_p)$  は、液中側の水槽面の通過点を  $(x_2, y_2, z_2)$  とすると、

$$\begin{pmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{pmatrix} = k \begin{pmatrix} \alpha_3 \\ \beta_3 \\ \gamma_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix} \quad (13)$$

となる。  $k$  は定数とする。しかし、左右 2 つのカメラそれぞれの液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ため、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。

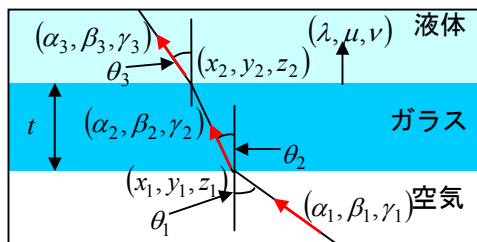


Fig.9 ガラス面での屈折

## 6. 3次元データの修正原理

液面画像を補正するために用いるパラメータの 1 つとして、テンプレートマッチングにより対応点を決定し、ステレオ法により得られた 3 次元計測データがある。しかし、3 次元計測データはテンプレートマッチングの式(11)で示されている  $C$  がある一定値以上でないと精度が低い。そこで、補正を行う画素の中で 3 次元計測データの精度が低い画素については近傍の 3 点を検出し、その 3 点により仮想平面を作成することによって 3 次元データを決定する。

Fig.10 のように 3 次元計測データのある画素 3 点  $L(p_1, q_1, r_1)$ ,  $M(p_2, q_2, r_2)$ ,  $N(p_3, q_3, r_3)$  があり、3 次元計測データを求めたい画素  $O(p_4, q_4, r_4)$  があるとする。

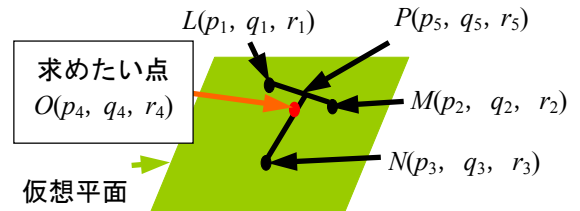


Fig.10 3次元仮想平面

画像上で  $O$  に最も近い点を  $L$ 、2 番目に近い点を  $M$  とし、 $L$  と  $M$ 、 $N$  と  $O$  の 2 直線式の交点を求めることにより 2 直線の交点  $P(p_5, q_5, r_5)$  が求まる。よってこれにより点  $O$  の 3 次元データを決定できる。

## 7. 液面画像補正原理

液面画像の液中部分の 3 次元計測データを用いて液面より下の各画素の色情報を光の屈折を考慮した正しい位置に移動させる。

真上から見た図 Fig.11 を用いて説明すると、Fig.11 で示されている中で既知パラメータは、像距離  $f$ 、水槽ガラス面とカメラの角度  $\phi$ 、カメラとガラスの距離  $d$ 、補正する画素  $e_2$  と画像中心の  $x$  軸方向の距離  $g_{2x}$  である。また、カメラと対象物体の距離  $z_i$  も 3 次元計測データにより求まるため既知とする。これらの既知パラメータを用いて補正後の位置  $e_1$  と画像中心の  $x$  軸方向の距離  $g_{1x}$  を求める原理を示す。尚、画像上で  $e$  は  $e(g_x, g_y)$  である。

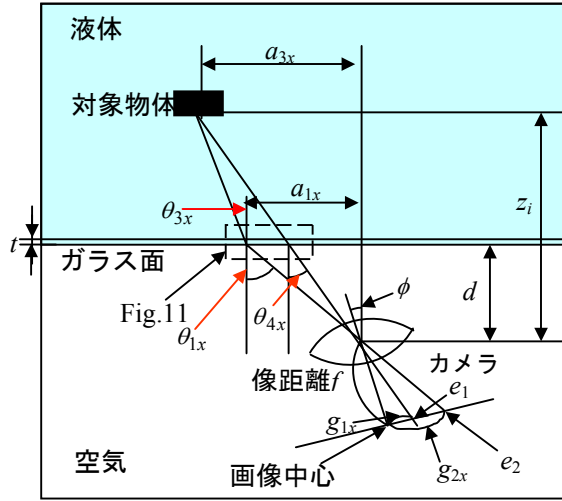


Fig.11 補正原理

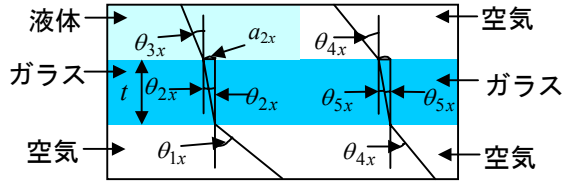


Fig.12 水槽ガラス面部分拡大図

まず、入射角  $\theta_{1x}$  は、

$$\theta_{1x} = \phi - \tan^{-1} \frac{g_{2x}}{f} \quad (14)$$

となり、ガラス内での屈折角  $\theta_{2x}$ 、液体内での屈折角  $\theta_{3x}$  は式(3)の Snell の法則を用いると (Fig.12),

$$\theta_{2x} = \sin^{-1} \left( \frac{n_1 \sin \theta_{1x}}{n_2} \right) \quad (15)$$

$$\theta_{3x} = \sin^{-1} \left( \frac{n_1 \sin \theta_{1x}}{n_3} \right) \quad (16)$$

となる。次に Fig.11, Fig.12 の  $a_{1x}$ ,  $a_{2x}$ ,  $a_{3x}$  を求めると、

$$a_{1x} = d \tan \theta_{1x} \quad (17)$$

$$a_{2x} = t \tan \theta_{2x} \quad (18)$$

$$a_{3x} = (z_i - t - d) \tan \theta_{3x} + a_{1x} + a_{2x} \quad (19)$$

となる。これより  $g_{1x}$  を求めるには

$$a_{3x} = (z_i - t) \tan \theta_{4x} + t \tan \theta_{5x} \quad (20)$$

と、式(15)を用いて、

$$a_{3x} = (z_i - t) \tan \theta_{4x} + t \tan \left\{ \sin^{-1} \left( \frac{n_1 \sin \theta_{4x}}{n_2} \right) \right\} \quad (21)$$

という式が得られ、この式により  $\theta_{4x}$  が求まる。これにより、

$$g_{1x} = f \tan \theta_{4x} \quad (22)$$

を用いることで  $g_{1x}$  が求まる。この  $g_{1x}$  を用い、補正後の  $x$  座標位置を求める。

また、 $y$  座標位置についてもこの原理を適用し、補正を行う。真横から見た図 Fig.13 を用いて説明すると、Fig.13 で示されているで示されている中で既知パラメータは、 $z_i$ 、像距離  $f$ 、カメラとガラスの距離  $d$ 、補正する画素  $e_2$  と画像中心の  $y$  軸方向の距離  $g_{2y}$  である。これらの既知パラメータを用いて補正後の位置  $e_1$  と画像中心の  $y$  軸方向の距離  $g_{1y}$  を求める。

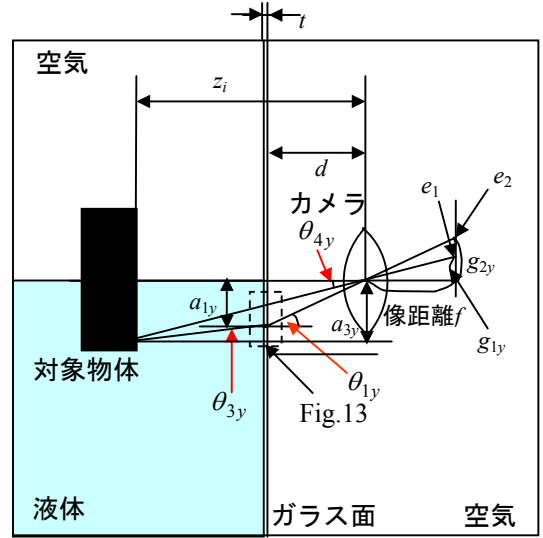


Fig.13 補正原理

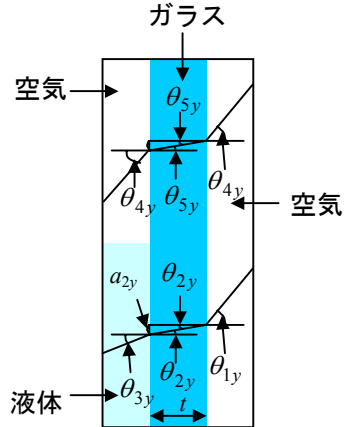


Fig.14 水槽ガラス面部分拡大図

まず，入射角  $\theta_{1y}$  は，

$$\theta_{1y} = \tan^{-1} \frac{g_{2y}}{f} \quad (23)$$

となり，ガラス内での屈折角  $\theta_{2y}$ ，液体内での屈折角  $\theta_{3y}$  は式(3)の Snell の法則を用いると (Fig.14)，

$$\theta_{2y} = \sin^{-1} \left( \frac{n_1 \sin \theta_{1y}}{n_2} \right) \quad (24)$$

$$\theta_{3y} = \sin^{-1} \left( \frac{n_1 \sin \theta_{1y}}{n_3} \right) \quad (25)$$

となる．次に Fig.13, Fig.14 の  $a_{1y}$ ,  $a_{2y}$ ,  $a_{3y}$  を求めると，

$$a_{1y} = d \tan \theta_{1y} \quad (26)$$

$$a_{2y} = t \tan \theta_{2y} \quad (27)$$

$$a_{3y} = (z_i - t - d) \tan \theta_{3y} + a_{1y} + a_{2y} \quad (28)$$

となる．これより  $g_{1y}$  を求めるには

$$a_{3y} = (z_i - t) \tan \theta_{4y} + t \tan \theta_{5y} \quad (29)$$

と，式(24)を用いて，

$$a_{3y} = (z_i - t) \tan \theta_{4y} + t \tan \left\{ \sin^{-1} \left( \frac{n_1 \sin \theta_{4y}}{n_2} \right) \right\} \quad (30)$$

という式が得られ，この式により  $\theta_{4y}$  が求まる．これにより，

$$g_{1y} = f \tan \theta_{4y} \quad (31)$$

を用いることで  $g_{1y}$  が求まる．この  $g_{1y}$  を用い，補正後の  $y$  座標位置を求める．

求まった  $x$ ,  $y$  座標により補正を行うことができる．

また，液面画像においては液面付近の画素情報が存在しない．そこで補間を行うために，Image Inpainting<sup>(11)</sup>を用いる．Image Inpainting とは補間したい画素の周囲の画素値，輝度勾配を基に画像の欠損部分を修正する技術であり，輪郭の再現性が良くという特徴がある．Fig.15(a)の黒い部分が画像の欠損部でありこの画像に Image Inpainting 処理を行うと Fig.15(b)のような見やすい画像が得られることがわかる．

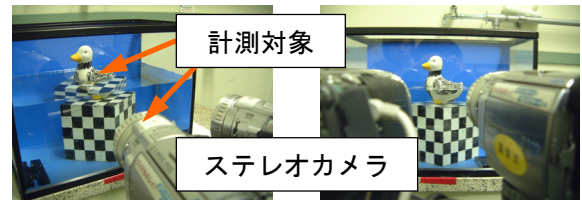


(a) 修正前 (b) 修正後

Fig.15 Image Inpainting 例

## 8. 実験

未知の液体として水を入れた水槽を使用して実験を行った (Fig.16)．水槽の背景は青色にし，Fig.16(b)のように液面とカメラの光軸は同一平面状になるように設置した．Fig.17 に計測対象を示す．



(a)斜め上方から撮影 (b)後方から撮影

Fig.16 実験装置

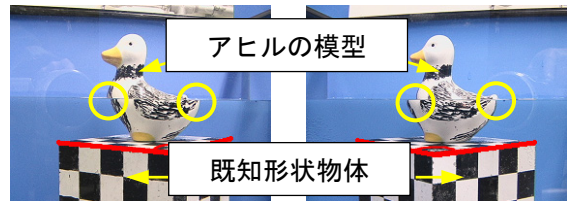


(a)アヒルの模型

(b)立方体

Fig.17 計測対象

計測対象の計測に用いるために取得した液面画像を Fig.18 に示す．Fig.18 中で円によって示されている 4 つの部分で液体の屈折率を算出し，その平均を求めた結果 1.33 となった (Table 1)．よって一般的に用いられている水の屈折率が得られ，この手法により屈折率を算出できることが確認できた．



(a) 左カメラ画像

(b) 右カメラ画像

Fig.18 取得画像

Table 1 屈折率算出結果

|     | 左カメラ     |          | 右カメラ     |          |
|-----|----------|----------|----------|----------|
|     | 左<br>エッジ | 右<br>エッジ | 左<br>エッジ | 右<br>エッジ |
| 屈折率 | 1.363    | 1.335    | 1.334    | 1.300    |

次に、この屈折率を用いて Fig.18 のような水中の既知形状物体を計測した。今回既知形状物体に Fig.18 の下部分に示されている立方体を用い、その直角部分の角度を求めた (Table 2)。

Table 2 角度計測結果

|       | 水の屈折率考慮無し | 水の屈折率考慮有り |
|-------|-----------|-----------|
| 角度[°] | 111.1     | 90.9      |

Table 2 より、水の屈折率を考慮しない場合に角度が実際より大きく計測されていることが分かる。これは奥行き方向の3次元位置結果に大きな誤差が生じ、計測結果が実際の対象物体の位置よりカメラ側に計測されたからである。今回の実験では、対象物体の角度を水の屈折率を考慮することにより、誤差1°以内で計測することができた。

また、Fig.18(a)で示すような任意形状物体の計測も行った。

Fig.19 は液体の屈折率を考慮無しの場合の計測結果を示し、Fig.20 は液体の屈折率を考慮有りの場合の計測結果を示す。また、Fig.21 にはレーザー式3次元スキャナ (パルステック社製 TDS 1500) を用いてアヒルの模型を空気中で計測した結果を示す。Fig.20 と Fig.21 の形状が一致していることから液体の屈折率を考慮した任意の形状物体の計測も可能であることが確認できた。

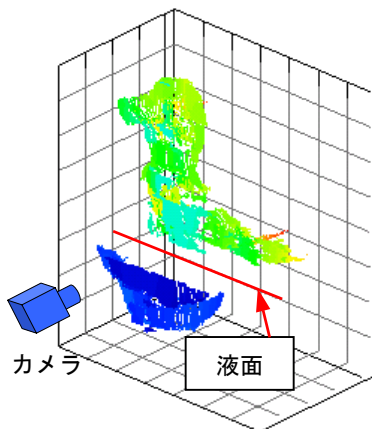


Fig.19 液体の屈折率考慮無しの計測結果

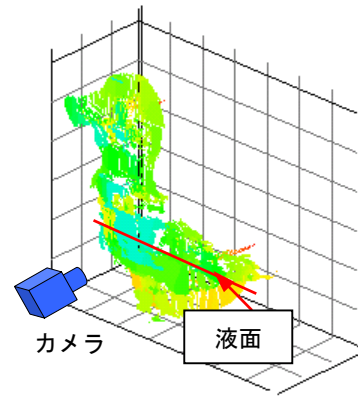


Fig.20 液体の屈折率考慮有りの計測結果

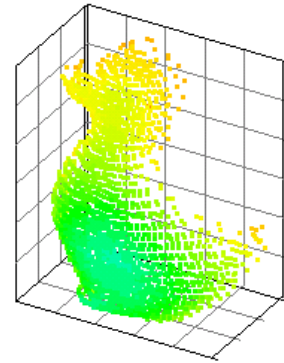


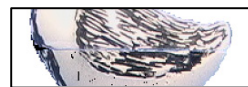
Fig.21 TDS 測定結果

最後に、液面画像の補正結果を Fig.22 に示す。Fig.22(b)は補正結果、Fig.22(c)は Image Inpainting 後である。

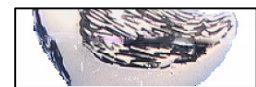
Fig.22(a)のように歪んだ画像を屈折率を考慮することにより補正できることが確認できた。さらに Image Inpainting を用いることにより液面付近の補間をすることができた。



(a) 補正前画像



(b) 補正後画像



(c) Image Inpainting 後画像

Fig.22 液中物体補正画像

## 9. 結論

本研究では、ビジョンセンシングにより液中物体の計測を行うために、必要な液体の屈折率を液面画像を用いることにより求め、その屈折率を用いて3次元計測を行う手法を提案した。実験結果より、液面画像を利用して屈折率を算出でき、その屈折率を用いて3次元計測が行えることが確認できた。また、計測した3次元データを用いることにより、液面画像の補正も行えることが確認できた。

今後の展望として、今回は原理確認のため液体に水を使用した。水とは屈折率が異なる液体を用いて実験を行うことにより本手法の有効性をさらに検証することなどや、取得する画像の解像度を上げることにより、より正確な屈折率の算出及び3次元計測を行うことなどが挙げられる。

## 謝辞

本研究の一部は、財団法人中部電力基礎技術研究所の補助を受けた。

## 参考文献

- (1) 柳 善鉄, 浦 環, 藤井 輝夫, 近藤 逸人: “人工水中ランドマークと推測航法を利用した自律型水中ロボットの航法”, 日本ロボット学会誌, Vol.20, No.3, pp.290-298, 2002.
- (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'04 講演論文集, 2A1-L2-28, pp.1-4, 2004.
- (3) 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.
- (4) Vittorio Murino, Andrea Trucco and Carlo S. Regazzoni: “A Probabilistic Approach to the Coupled Reconstruction and Restoration of Underwater Acoustic Images”, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.20, No.1, pp.9-22, 1998.
- (5) Robert F. Tusting and Daniel L. Davis: “Laser Quantitative Undersea Imaging”, *Marine Technology Society Journal*, Vol.26, No.4, pp.5-12, 1992.
- (6) Atsushi Yamashita, Etsukazu Hayashimoto, Toru Kaneko and Yoshimasa Kawata: “3-D Measurement of Objects in a Cylindrical Glass Water Tank with a Laser Range Finder”, *Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.1578-1583, 2003.
- (7) 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.
- (8) 加藤 進, 山下 淳, 金子 透: “ステレオカメラを用いた気泡ノイズにロバストな水中環境センシング”, 第10回ロボティクスシンポジウム講演予稿集, pp.301-306, 2005.
- (9) 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*, 2005.
- (10) 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.
- (11) Marcelo Bertalmio, Guillermo Sapiro, Vicent Caselles and Coloma Ballester: “Image Inpainting”, *Proceedings of SIGGRAPH2000*, pp.417-424, 2000.