

ビジョン技術を用いた水中環境センシング

山下淳*, 池田真輔, 加藤進, 藤井彰, 金子透 (静岡大学)

Aquatic Sensing by Using Vision Techniques

Atsushi Yamashita, Shinsuke Ikeda, Susumu Kato, Akira Fujii and Toru Kaneko (Shizuoka University)

Abstract

In this paper, we propose aquatic sensing methods by using computer vision techniques. When applying vision sensors to measuring objects in liquid, we meet the problem of an image distortion. It is caused by the refraction of the light on the boundary between the air and the liquid, and the distorted image brings errors in a triangulation for the range measurement. Therefore, we propose accurate measurement method of objects in liquid by using a stereo camera system or a laser range finder in consideration of refraction effects. Experimental results show the effectiveness of our proposed methods.

キーワード：水中センシング，光の屈折，ステレオカメラ，レーザレンジファインダ，3次元計測
(Aquatic sensing, refraction of light, stereo camera system, laser range finder, 3D-measurement)

1. 序論

非接触で物体の3次元形状を計測することができる画像センシングは、様々な用途において必要不可欠な技術となっている。しかし、従来の3次元形状計測手法のほとんどは、撮影機器と被写体とともに同一の屈折率の環境にあることを前提としている。

しかし、例えば液体で満たされた容器にある物体の計測をする場合、光の屈折により像が歪んでしまい正確な3次元計測ができない(図1)。

屈折率の変化による光の屈折は、カメラが空気中にあり物体が水中にある場合だけでなく、カメラと物体がともに水中にある場合にも考慮する必要がある。これは、防水対策として保護ガラスを付けた水中用カメラでも、保護ガラス面とカメラの間は液体で満たされていないためである。

これらの場合では、光の屈折により実際とは異なる位置や大きさで対象物が観測されることとなる。

そこで本論文では、屈折率の異なる環境に対応した3次元計測手法を構築することを目的とする。具体的には、ステレオカメラやレーザレンジファインダを用い、光の屈折の影響を考慮して正確に3次元計測を行う手法を提案する。

屈折率の異なる環境でのセンシングに関しては、海底形状計測や海中環境計測、あるいは海中ロボット用センサなど、海中での計測手法が数多く提案されている。海中ロボット用の3次元計測センサとしては、主に現在は超音波が用いられている。しかし、海底地形の計測や魚群の有無を検知することは可能であるが、比較的近距离に存在する対象物を高精度に計測を行うことは困難である。そこで、海中においても高精度に計測を行う際には、カメラを用いた

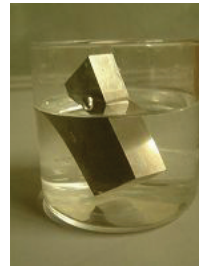


図1 光の屈折の影響



図2 気泡ノイズの影響

Fig. 1 Refraction effects. Fig. 2 Bubble noise effects.

画像センサを用いることが有効である[1][2]。

カメラを用いた水中センシング技術としては、レーザレンジファインダを利用して周囲の形状を計測する方法[3]や、水中環境においてモザイク画像を生成する手法[4]などが提案されている。これらの手法では、屈折率が変化する境界とカメラとの位置関係や液体の屈折率が一定であるという前提のもと、光の屈折による画像の歪みを補正するための変換テーブルを事前に作成しておくことにより正確な水中センシングを実現している。しかし、例えばホルマリンにつけられた容器内の貴重なサンプルを計測する場合などでは、計測途中においてカメラと屈折率が変化する境界との位置関係が変化することが考えられる。位置関係が変化する毎にキャリブレーションを行うことは現実的ではないため、これらの手法を様々な用途に汎用的に用いることは難しい。

一方、水中では気泡などが視野を妨害することもあり、

状況によっては小魚やその他の浮遊生物なども存在することがある (図 2). そのため, 水中環境をセンシングするためには, 気泡などのノイズが存在する画像の中から, 計測対象を精度良く抽出することも重要となる.

そこで本論文では, 水中環境をセンシングするために必要不可欠である光の屈折を考慮した計測手法について第 2 章で説明を行う.

第 3 章では, 屈折率が異なる境界, すなわち光が屈折する場所を推定する手法について説明を行う. 具体的には, レーザレンジファインダによる計測システムを用いることとし, 光が屈折する場所を推定した結果を利用して水中の物体を正確に計測する手法について説明する.

第 4 章では, ステレオカメラを用いた気泡ノイズにロバストな水中センシング手法について説明を行う.

第 5 章では, 液面の画像を用いて未知の液体の屈折率を推定し, その結果を用いて 3 次元計測及び取得画像の歪み補正を行う手法を提案する.

最後に第 6 章において, 結論と今後の展望を述べる.

2. 水中環境における計測原理[5][6]

水中物体の 3 次元計測原理について説明する. ここでは, カメラとスポットレーザからなるレーザファインダの例を用いて説明を行うが, レーザをカメラに置き換えることによりステレオの場合も同様の原理で計測可能である. また, 円筒状容器内の物体の計測を例に説明を行うが, 任意形状の容器の場合においても同様の原理を用いることができる.

水中物体の 3 次元座標計測は, 光線追跡の原理を用いて行う. カメラとレーザの光線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. 光線追跡のモデルを図 3 に示す.

ここでは, 透明容器の中心軸を y 軸方向と定め, 右手系をなすように x 軸と z 軸をとる. $C_0: (x_{c0}, y_{c0}, z_{c0})^T$ をカメラのレンズ中心, $O: (x_o, y_o, z_o)^T$ を円筒状容器の中心 (y_o は中心軸の高さ方向の変化), $L_0: (x_{l0}, y_{l0}, z_{l0})^T$ をレーザ光の原点, $\vec{d}_{l1} = (\alpha_{l1}, \beta_{l1}, \gamma_{l1})^T$ をレーザ光の単位方向ベクトルとする.

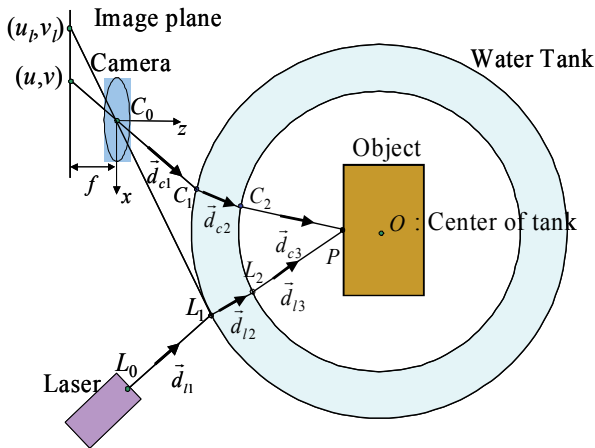


図 3 計測原理

Fig. 3 Principle of measurement.

2.1. カメラからの光線追跡

本研究では, ピンホールカメラモデルを採用する. f を像距離 (レンズ中心と画像面との距離), a_{ij} をカメラパラメータとすると, 式(1)により画像面における座標値 $(u, v)^T$ は世界座標系 $(x, y, z)^T$ に変換できる.

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ 0 & 0 & f \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

次に, カメラからの光線のベクトルは式(2)となる.

$$\begin{pmatrix} \alpha_{c1} \\ \beta_{c1} \\ \gamma_{c1} \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + f^2}} \begin{pmatrix} x \\ y \\ f \end{pmatrix} \quad (2)$$

カメラからの光線ベクトル $\vec{d}_{c1}$ と円筒状容器の外壁の交点を $C_1: (x_{c1}, y_{c1}, z_{c1})^T$ とすると, C_1 はレンズ中心と容器の外壁間の距離 ρ_{c1} を用いて表される.

$$\begin{pmatrix} x_{c1} \\ y_{c1} \\ z_{c1} \end{pmatrix} = \rho_{c1} \begin{pmatrix} \alpha_{c1} \\ \beta_{c1} \\ \gamma_{c1} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_{c0} \\ y_{c0} \\ z_{c0} \end{pmatrix} \quad (3)$$

容器の底辺の半径を R_0 , 容器のテーパ角度を ϕ とすると, 点 C_1 における容器の外壁の単位法線ベクトル $\vec{N}_{c1} = (\lambda_{c1}, \mu_{c1}, \nu_{c1})^T$ は以下の通りとなる.

$$\begin{pmatrix} \lambda_{c1} \\ \mu_{c1} \\ \nu_{c1} \end{pmatrix} = m_1 \begin{pmatrix} x_o - x_{c1} \\ y_o - y_{c1} \\ z_o - z_{c1} \end{pmatrix} \quad (4)$$

ただし,

$$m_1 = \frac{\cos \phi}{R_0 - (\rho_{c1} \beta_{c1} + y_{c0}) \tan \phi} \quad (5)$$

$$\mu_{c1} = -\sin \lambda_{c1} \quad (6)$$

ここで, $\vec{N}_{c1}$ は単位ベクトルであるため, 式(7)が成立する.

$$\lambda_{c1}^2 + \mu_{c1}^2 + \nu_{c1}^2 = 1 \quad (7)$$

式(2)-(7)より, ρ_{c1} は式(8)となり, カメラからの光線が容器の外壁と交わる点 C_1 の座標が得られる.

$$\rho_{c1} = \frac{\rho_{c1b} - \sqrt{\rho_{c1b}^2 - \rho_{c1a} \rho_{c1c}}}{\rho_{c1a}} \quad (8)$$

ただし,

$$\rho_{c1a} = \alpha_{c1}^2 - \beta_{c1}^2 \tan^2 \phi + \gamma_{c1}^2 \quad (9)$$

$$\rho_{c1b} = \alpha_{c1}(x_o - x_{c0}) - \beta_{c1} \tan \phi (R_0 - y_{c0} \tan \phi) + \gamma_{c1}(z_o - z_{c0}) \quad (10)$$

$$\rho_{c1c} = (x_o - x_{c0})^2 + (R_0 - y_{c0} \tan \phi)^2 + (z_o - z_{c0})^2 \quad (11)$$

次に, 容器の外壁から内壁に至る光線を追跡する. 点 C_1 で屈折した光線の単位方向ベクトルを $\vec{d}_{c2} = (\alpha_{c2}, \beta_{c2}, \gamma_{c2})^T$ とする. 光の屈折の性質により $\vec{d}_{c2}$, $\vec{d}_{c1}$, $\vec{N}_{c1}$ は同一平面上

にあるため、 $\vec{d}_{c2}$ は $\vec{d}_{c1}$ と $\vec{N}_{c1}$ の線形和で表現可能である。

$$\begin{pmatrix} \alpha_{c2} \\ \beta_{c2} \\ \gamma_{c2} \end{pmatrix} = p_{c1} \begin{pmatrix} \alpha_{c1} \\ \beta_{c1} \\ \gamma_{c1} \end{pmatrix} + q_{c1} \begin{pmatrix} \lambda_{c1} \\ \mu_{c1} \\ \nu_{c1} \end{pmatrix} \quad (12)$$

ただし、 p_{c1} と q_{c1} は定数である。

さて、 θ_{c1} を光線の入射角 ($\vec{d}_{c1}$ と $\vec{N}_{c1}$ のなす角)、 θ_{c2} を屈折角 ($\vec{d}_{c2}$ と $-\vec{N}_{c1}$ のなす角) とすると、 $\vec{d}_{c1}$ と $\vec{N}_{c1}$ の内積は以下のように計算できる。

$$\begin{aligned} \vec{d}_{c1} \cdot \vec{N}_{c1} &= \alpha_{c1}\lambda_{c1} + \beta_{c1}\mu_{c1} + \gamma_{c1}\nu_{c1} \\ &= \cos\theta_{c1} \end{aligned} \quad (13)$$

また、 $\vec{d}_{c1}$ と $\vec{N}_{c1}$ の外積を計算すると、式(14)となる。

$$\begin{aligned} |\vec{d}_{c1} \times \vec{N}_{c1}|^2 &= (\beta_{c1}\nu_{c1} - \gamma_{c1}\mu_{c1})^2 + (\gamma_{c1}\lambda_{c1} - \alpha_{c1}\nu_{c1})^2 \\ &\quad + (\alpha_{c1}\mu_{c1} - \beta_{c1}\lambda_{c1})^2 \\ &= \sin^2\theta_{c1} \end{aligned} \quad (14)$$

$\vec{d}_{c2}$ と $-\vec{N}_{c1}$ についても、同様に内積と外積を計算することができる。

$$\cos\theta_{c2} = \alpha_{c2}\lambda_{c1} + \beta_{c2}\mu_{c1} + \gamma_{c2}\nu_{c1} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \sin^2\theta_{c2} &= (\beta_{c2}\nu_{c1} - \gamma_{c2}\mu_{c1})^2 + (\gamma_{c2}\lambda_{c1} - \alpha_{c2}\nu_{c1})^2 \\ &\quad + (\alpha_{c2}\mu_{c1} - \beta_{c2}\lambda_{c1})^2 \end{aligned} \quad (16)$$

更に、点 C_1 において Snell の法則を適用すると、以下の関係が成立する。

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin\theta_{c2}}{\sin\theta_{c1}} \quad (17)$$

ただし、 n_1 と n_2 は点 C_1 における屈折前、屈折後のそれぞれの屈折率である。

式(12)-(17)より、 p_{c1} と q_{c1} は以下に求められる。

$$p_{c1} = \frac{n_1}{n_2} \quad (18)$$

$$q_{c1} = \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \sin^2\theta_{c1}} - \frac{n_1}{n_2} \cos\theta_{c1} \quad (19)$$

ここで、点 C_1 の座標値を求める手順と同様に、点 C_1 からの光線と容器の内壁との交点 C_2 の座標値も求めることができる。次に、点 C_2 での光の屈折も同様に考える。点 C_2 での屈折率 (容器内に満たされた液体の屈折率) を n_3 とすると、点 C_2 からの光線の方向ベクトルは以下のように計算できる。

$$\begin{pmatrix} \alpha_{c3} \\ \beta_{c3} \\ \gamma_{c3} \end{pmatrix} = p_{c2} \begin{pmatrix} \alpha_{c2} \\ \beta_{c2} \\ \gamma_{c2} \end{pmatrix} + q_{c2} \begin{pmatrix} \lambda_{c2} \\ \mu_{c2} \\ \nu_{c2} \end{pmatrix} \quad (20)$$

ただし、

$$p_{c2} = \frac{n_2}{n_3} \quad (21)$$

$$q_{c2} = \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_3}\right)^2 \sin^2\theta_{c2}} - \frac{n_2}{n_3} \cos\theta_{c2} \quad (22)$$

カメラから出た光線は最終的に点 P_c : $(x_{pc}, y_{pc}, z_{pc})^T$ において物体の表面に到達する。

$$\begin{pmatrix} x_{pc} \\ y_{pc} \\ z_{pc} \end{pmatrix} = c \begin{pmatrix} \alpha_{c3} \\ \beta_{c3} \\ \gamma_{c3} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_{c2} \\ y_{c2} \\ z_{c2} \end{pmatrix} \quad (23)$$

ただし、 $(x_{c2}, y_{c2}, z_{c2})^T$ は点 C_2 の座標値、 $\vec{d}_{c3} = (\alpha_{c3}, \beta_{c3}, \gamma_{c3})^T$ は点 C_2 からの光線の単位方向ベクトル、 c は定数である。

以上により、点 P_c の座標値は c の値を求めることにより決定することができる。

2.2. レーザからの光線追跡

レーザから照射される光線も、カメラの場合と同様に追跡することができる。最終的にレーザ光線が物体の表面に到達する点を P_l : $(x_{pl}, y_{pl}, z_{pl})^T$ とすると、以下のように表現できる。

$$\begin{pmatrix} x_{lc} \\ y_{lc} \\ z_{lc} \end{pmatrix} = c \begin{pmatrix} \alpha_{l3} \\ \beta_{l3} \\ \gamma_{l3} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_{l2} \\ y_{l2} \\ z_{l2} \end{pmatrix} \quad (24)$$

ただし、 $(x_{l2}, y_{l2}, z_{l2})^T$ は点 L_2 の座標値、 $\vec{d}_{l3} = (\alpha_{l3}, \beta_{l3}, \gamma_{l3})^T$ は点 L_2 からの光線ベクトル、 l は定数である。

2.3. 水中物体の3次元座標値の算出

座標値 P_c と座標値 P_l は同一の座標値を表している。従って、式(23)と式(24)を

$$(x_{pc}, y_{pc}, z_{pc})^T = (x_{pl}, y_{pl}, z_{pl})^T \quad (25)$$

と連立させて解くことによって、 c と l の値を求めることができる。しかし実際には、誤差の影響によりこれらの3つの方程式は同時に成立することは少ないため、2つの光線が最も近づく場所におけるそれぞれの光線上の点の中点を物体表面であると見なす。

2.4. 計測の手順

スポット光のレーザを使用する場合には、一度のレーザ照射で計測できる箇所は1点となる。従って、レーザを2次元走査させるなどの手順によって、対象物の全形状を計測することができる[5]。

一方、スリット光のレーザを使用する場合には、走査は1次元で良い。しかし、光が屈折するため、レーザの広がる角度と実際に対象物上に照射された光との対応を取ることが空気中の場合と比較して困難となる。そこで、式(25)の3つの拘束式のうち、レーザの広がる角度と実際に対象物上に照射された光との対応を取るために拘束を1つ使用し、残りの2つの拘束を用いて3次元座標を求める[6]。

また、ステレオカメラの場合には、正規化相互相関を用いたテンプレートマッチングにより対応点を検出する。

3. 屈折率の変化する境界の推定[7]

第 2 章において説明した計測の原理では、屈折の境界の位置や形状は既知としていた。しかし、屈折の境界は必ずしも既知であるとは限らない。

そこで、光の屈折面は完全に透明ではなく、光は透過し屈折すると同時に反射することを利用し、屈折境界面の位置を求める。

具体的には、三角測量の原理より、画像面においてレーザ光線が屈折境界面（容器表面）に照射されている場所を表す座標値(u_i, v_i)^Tから求める（図 3）。

レーザ光線が水中の対象物に照射されている場所と、屈折境界面に照射されている場所の区別は、エピポーラ拘束を用いて行う（図 4）。レーザ光線は屈折境界面（容器表面）まで空気中を進むため、屈折境界面上のレーザ反射光の位置はカメラで撮影した画像中のエピポーラ線上に拘束される。よって、エピポーラ線上に存在する領域を屈折境界面上のレーザ反射光の候補とみなす。ここで、エピポーラ線上に存在する候補は複数存在することがある。その場合は、エピポーラ線上で最もレーザの位置から近いレーザ反射光の位置が、屈折境界面（容器表面）に照射されている場所であると識別できる。

また、屈折境界面のレーザ反射光以外で、一番面積の大きな反射光は対象物からのレーザ反射光であると認識することができる。

以上、レーザ光を走査することにより、屈折境界面全体の 3 次元座標を求めることができる。最小 2 乗法によって計測点群の座標値から 2 次曲面を求め、屈折境界面の形状を復元する。復元結果より、任意位置での屈折境界面の座標と法線ベクトルを求めることができ、その結果を用いて水中での光線追跡を行うことが可能となる。

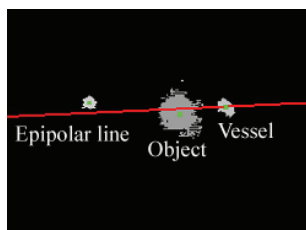


図 4 レーザ抽出後の拡大取得画像とエピポーラ線

Fig. 4 Extracted laser regions in the enlarged acquired image and the epipolar line.

以上の原理を用いて、未知形状のガラス製角型水槽中の角柱物体を計測した結果を図 5 に示す。レーザ光をほぼ水槽前面に沿って水平方向に 50mm 平行移動させる走査を 5 回行い、異なる高さでの計測を行った。5 回のうち 3 回は水中の物体上にレーザ反射光が来るようにレーザ光の高さを設定し、また 2 回は物体が水面の上に出ている部分を走査するように設定した（図 5(a)）。

図 5(b)に計測結果を示す。手前にある 5 本の直線が水槽表面の上にある点であり、水槽の奥に位置する 5 本の L 字型の線分対が計測物体上の点である。この結果から水槽容器

と水中物体の同時計測が出来ていることが分かる。

また、図 5(c)(d)に屈折率の影響を考慮しない場合と考慮した場合での計測結果を示す。図 5(c)(d)は水槽の底面に沿った平面図であり、図 5(c)は光の屈折の影響を考慮せず計測を行った結果、図 5(d)は屈折の影響を考慮して計測を行った結果を示している。図 5(c)では、空気中での計測結果（1,2）と水中での計測結果（3,4,5）に大きなズレが生じていることが分かる。それに対して図 5(d)では、水中と空気中での計測結果が良く一致している。これらの結果から、屈折の影響を考慮することにより水中物体を正しく計測できることが確認された。

また、図 6(a)に示す複雑な形状の容器に半分水を入れた状態で物体の形状を計測した結果を図 6(b)に示す。容器形状、空気中の物体、水中の物体がそれぞれ正確に計測できていることが分かる。

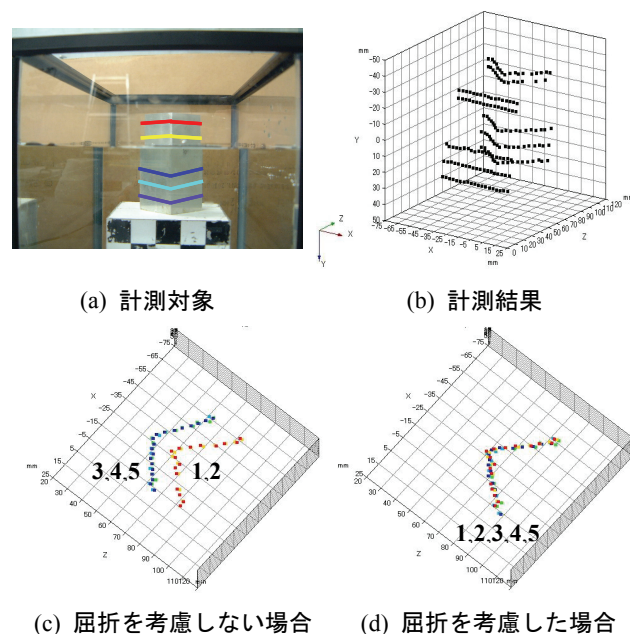


図 5 実験結果 1

Fig. 5 Experimental result 1.

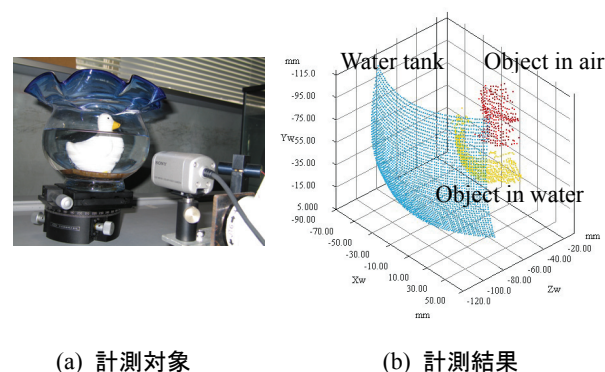


図 6 実験結果 2

Fig. 6 Experimental result 2.

4. 気泡ノイズにロバストな水中センシング[8]

画像中に気泡などの視野妨害物が存在する場合には、背景差分法により画像から動物体を抽出し、その動物体をクラスタリングにより分類する。次に、その分類した中から観測対象だけを識別し、3次元位置を計測する。

背景生成時には、時系列輝度ヒストグラムを用いる。まず一定時間、画像データを蓄積する。次に、画素毎に横軸が輝度値、縦軸が各輝度値の発生頻度を表す時系列輝度ヒストグラムを作成する。そして、このヒストグラムにおいて最も出現頻度の高い輝度値を背景画素の輝度値であるとする。

ただし、画像を蓄積した一定時間内にほとんど動かないような遅い移動速度の動物体は、その動物体の一部が背景画像として残ってしまうことがある。そこで、1つ前に生成した背景画像との時間方向差分をとることで一定閾値以上の部分を抽出し、この部分を1つ前の生成背景画像の対応部分から抽出して補間する。この処理により、動きの遅い動物体の影響を除外することが可能である。

観測対象の分類については、クラスタリング手法の1種であるISODATA法[9] (Iterative Self Organizing Data Analysis techniques A)を用いる。本論文では、全処理を自動的に行うために改良を加えたISODATA法を構築し、大きさ、色などの特徴量を分類に用いることで気泡ノイズを除去し、観測対象を抽出した[8]。

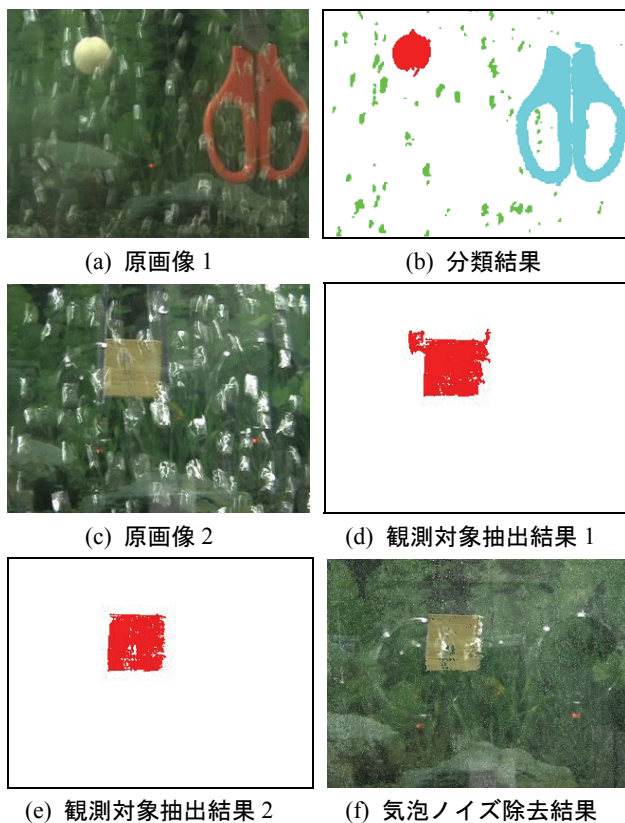


図 7 実験結果 3

Fig. 7 Experimental result 3.

図 7 に気泡ノイズを除去した結果を示す。画像中に気泡ノイズ、球状物体、はさみが存在する画像において(図 7(a)), それぞれを分類できていることが分かる(図 7(b))。また、気泡ノイズが観測対象と重なっている場合(図 7(c)(d))には、前後のフレームでの観測対象の抽出結果と論理積をとることにより、気泡ノイズの除去が可能である(図 7(e)(f))。

以上の処理を左右のカメラから得られた画像にそれぞれ施すことにより、気泡ノイズにロバストな水中環境ステレオ計測を行うことが可能となる[8]。

5. 液面画像を用いた屈折率の推定[10]

液体の屈折率は必ずしも分かっているとは限らない。そこで、液面画像を用いて屈折率を推定する手法を構築した。

具体的には、ステレオカメラを用いて液面を含む画像を取得する。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。

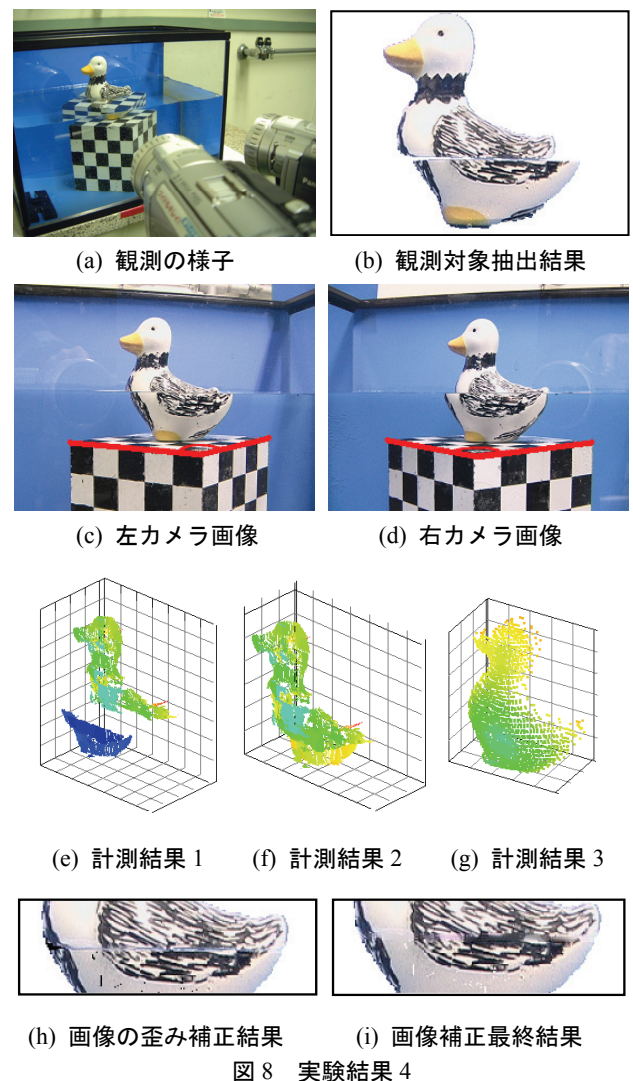


図 8 実験結果 4

Fig. 8 Experimental result 4.

図 8(a)に計測の様子、図 8(b)に観測対象を抽出した画像、

図 8(c)(d)に左右カメラの画像例を示す。

三角測量の原理により空気中の物体の形状は計測可能である。一方、正しい屈折率を用いて光線追跡を行い液中の物体の形状を計測すると、液面部分において空気中の計測結果と液中の計測結果が一致する。このことから屈折率を推定することができる。この例では屈折率が 1.33 と推定され、実際の液体（水）の屈折率と一致した。

図 8(e)に光の屈折を考慮せずに計測を行った結果、図 8(f)に推定した屈折率を用いて屈折を考慮して計測を行った結果、図 8(g)にレーザ式 3 次元スキャナ（パルステック社製 TDS 1500）を用いて空気中で計測した結果（真値）を示す。図 8(e)では液面で計測結果が不連続になっていることに対して、図 8(f)と図 8(g)の形状が一致していることから、液体の屈折率を推定して形状物体を行えることが確認できた。

更に、光の屈折を考慮して液面部分の画像の歪み補正を行った結果を図 8(h)、液面部分で Image Inpainting [11]により画像の欠損部分を補間した結果を図 8(i)に示す。

以上の結果より、液面画像を用いて屈折率を推定し、推定した屈折率を用いて液中物体を正確に計測可能であることが確認された。

6. 結論

本論文では、水中環境をセンシングするために必要不可欠である光の屈折を考慮した計測手法を提案した。具体的には、屈折率が異なる境界面が未知の場合や、液体の屈折率が未知な場合においても液中の物体を正確に計測可能な手法を構築した。また、気泡ノイズが画像中に存在する場合にも対応可能な手法を構築した。

今後の展望としては、より汎用的かつロバストな水中環境計測手法を構築することなどが挙げられる。

参考文献

- [1] Robert F. Tusting and Daniel L. Davis: “Laser Systems and Structured Illumination for Quantitative Undersea Imaging”, *Marine Technology Society Journal*, Vol.26, No.4, pp.5-12 (1992)
- [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 (1997-04)
- [3] Hayato Kondo, Toshihiro Maki, Tamaki Ura, Yoshiaki Nose, Takashi Sakamaki and Masaaki Inaishi: “Relative Navigation of an Autonomous Underwater Vehicle Using a Light-Section Profiling System”, *Proceedings of the 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2004)*, pp.1103-1108, Sendai, Japan (2004-09)
- [4] Hiroshi Sakai, Toshinari Tanaka, Satomi Ohata, Kazuo Ishii and Tamaki Ura: “Underwater Image Mosaicing Using Underwater Robot”, *Proceedings of 2004 JSME Conference on Robotics and Mechatronics (ROBOMECH'04)*, 2A1-L2-27, pp.1-4, Aichi, Japan (2004-06) (in Japanese)
- 酒井浩・田中敏成・大畑智海・石井和男・浦環:「水中におけるモザイク画像取得に関する研究」, 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-L2-27, pp.1-4, 愛知 (2004-06)
- [5] 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 (IROS2003)*, pp.1578-1583, Las Vegas, U.S.A. (2003-10)
- [6] 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, New Orleans, U.S.A. (2004-04)
- [7] 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, Barcelona, Spain (2005-04)
- [8] Susumu Kato, Atsushi Yamashita and Toru Kaneko: “Robust Sensing in Underwater Environments against Bubble Noises with a Stereo Camera System”, *Proceedings of the 10th Robotics Symposia*, pp.301-306, Hakone, Japan (2005-03) (in Japanese)
- 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, 箱根 (2005-03)
- [9] G. H. Ball and D.J.Hall: *ISODATA-Novel Method of Data Analysis and Pattern Classification*, Stanford Research Institute (1965)
- [10] Akira Fujii, Atsushi Yamashita and Toru Kaneko: “Estimation of Refractive Index of Liquid and 3-D Measurement of Objects in Liquid by Using Images of Water Surface”, *IPSSJ SIG Technical Reports (2005-CVIM-149-10)*, Tokyo, Japan (2005-05) (in Japanese)
- 藤井彰・山下淳・金子透:「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」, 情報処理学会研究報告(2005-CVIM-149-10), 東京 (2005-05)
- [11] Marcelo Bertalmio, Guillermo Sapiro, Vicent Caselles and Coloma Ballester: “Image Inpainting”, *Computer Graphics (SIGGRAPH2000)*, pp.417-424, New Orleans, U.S.A. (2000-07)