

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*

山下 淳^{*1}, 林本 悦一^{*1,2}, 金子 透^{*1}

3-D Shape Measurement of Objects in Liquid with a Laser Range Finder

Atsushi YAMASHITA^{*1}, Etsukazu HAYASHIMOTO^{*1,2} and Toru KANEKO^{*1}

^{*1} Department of Mechanical Engineering, Shizuoka University.

^{*2} Pulstec Industrial Co., Ltd.

In this paper, we propose a three-dimensional (3-D) measurement method of objects in liquid with a laser range finder. 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. Our proposed method can measure the accurate 3-D coordinates of object surfaces in liquid taken for calculating the refraction effect by using a ray tracing technique. We also construct calibration method of relationship between the laser range finder and the object. The effectiveness of the proposed technique is shown through experiments. The accuracy of the 3-D measurement is 0.7mm for objects located about 250mm from the laser range finder when considering the refraction of the light, although that is 2.9mm without the consideration of it.

Key Words : three-dimensional measurement, objects in liquid, refraction, laser range finder

1. 序 論

カメラを用いて物体の3次元形状を計測する画像センシング技術は、非接触かつ広範囲を同時に計測可能であるため、様々な用途において必要不可欠な技術となっている。従って、空気中のみならず様々な環境において画像センシングにより物体計測を行う手法を構築することは重要である。

従来の3次元形状計測手法のほとんどは、カメラと計測する対象物が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、水中ロボットにカメラを搭載して海中環境の計測を行う場合や、空気中に置かれたカメラを用いて液体で満たされた容器中に存在する対象物の計測をする場合などでは、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。これは、光の屈折により実際とは異なる位置(図1)や大きさ・形状(図2)で対象物が観測されるためである。

図1は円筒状の容器の底にコインを置き、水がない場合(図1(a))と水を注いだ場合(図1(b))を比較し



(a) Image without water. (b) Image with water.

Fig. 1 Example of image distortion (position change of a coin).

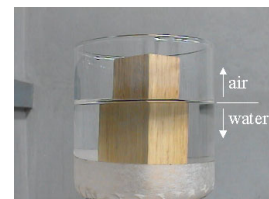


Fig. 2 Example of image distortion (size and shape change of an object).

た例である。この例では、コインの場所を移動させていないにも関わらず、コインの位置が異なって観測される。また、図2は容器の半分まで水を注ぎ、容器内に角柱を置いた例である。この例でも、実際には連続的な形状を有する角柱の大きさや形状が水面の上下で変化しているように観測される。

* 2003 年 10 月 29 日 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2003)にて講演, 原稿受付 2005 年 8 月 19 日

^{*1} 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)

^{*2} パルステック工業株式会社
Email: yamashita@ieee.org

そこで本研究では、カメラとレーザー光を用いることにより、屈折率の変化に対応した3次元計測手法を提案することを目的とする^{(1)~(3)}。

2. 従来研究と研究目的

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おらず、空気-ガラス-水と光が屈折するためである。

従って、場所によって屈折率が変化する環境でのセンシングに関して、海底形状計測や海中環境計測^{(4)~(9)}、あるいは海中ロボット用センサ^{(10)~(15)}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^{(4)~(5)}。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。

それに対して、海中においても高精度に計測を行う際には、レーザレンジファインダ^{(6)~(11)}、単眼カメラ^{(16)~(17)}、ステレオカメラ^{(12)~(18)}などの画像センサを用いることが有効である。

しかし、レーザレンジファインダを用いた従来研究^{(6)~(9)}では、計測装置の構成方法に関する議論が中心となっており、屈折率の変化による光の屈折に関する言及はない。文献^{(10)~(11)}では、水中計測を行う環境において事前にカメラのキャリブレーションを行うことで光の屈折に対応している。しかし、保護ガラス面とカメラ間の距離や水の屈折率などすべての条件が一定であるという前提で計測を行っているため、これらの条件や環境が変化する毎に再キャリブレーションを行う必要がある。従って、環境が時々刻々変化する場合などには、この手法を用いることはできない。また、ステレオカメラを用いた従来研究⁽¹²⁾は原理的には環境の変化に対応できるものの、実験では計測物体に貼り付けたマークの位置を計測しているのみであり、表面にテクスチャが乏しい物体を計測することは困難である。

一方、ホルマリンにつけられた貴重な生体サンプルの形状を計測する場合や、水族館などで水槽の外側から魚の動きを観測する場合など、空気中のカメラを用いて容器中の水中物体を計測することも重要である。従って、液体で満たされた容器中の物体を計測する手

法も提案されている^{(16)~(19)}。

文献⁽¹⁶⁾では、オプティカルフローを用いて光の屈折による画像の歪みを補正する手法を提案している。しかし、計測精度がオプティカルフローの検出精度に依存するため、正確な物体形状計測には適さない。また、文献⁽¹⁷⁾では、1台のカメラを水面と平行に移動させることで視点の異なる複数画像を取得し、水面上から水中物体をモーションステレオ法を用いて計測する手法を提案している。ただし、光の屈折は1回のみであるという前提を置いているため、容器中の物体を横から観測する場合には対応できない。また、カメラと水面の位置関係の推定誤差の影響により、水中物体の計測精度が低下するという問題がある。

そこで、容器中の物体を横から観測可能とするために、複数回の光の屈折に対応したステレオ計測手法が提案されている^{(18)~(19)}。この方法では屈折率の境界面が平面の場合のみ取り扱っているが、実際の環境では屈折率の境界面である防水ガラスや水槽は平面であるとは限らず、また像の歪みは屈折率が変化する境界の形状にも大きく依存する。更に、対象物表面にテクスチャや特徴点がないとステレオ画像間の対応点を取ることが難しく、対象物全体の形状を詳細に計測することが困難であるといった問題がある。

そこで本研究では、光の屈折境界の形状が単純な平面でない場合にも水中物体の3次元計測を行うための計測原理を提案する。具体的には、光線追跡を行うことで屈折率の変化に対応する。また、レーザー光を物体に照射して計測することで対応点検出の問題を解決する。具体的には、提案した計測原理の有効性を検証するため、液体で満たされた円筒状透明容器中物体の3次元形状計測を行うことを目的とする。

3. 計 測 原 理

3.1 水中物体計測の概要 方向を上下に変化させることが可能なレーザスポット光照射装置とカメラから構成されるレーザレンジファインダによって、液体を満たした容器内の物体の形状を計測する(図3)。容器を回転台の上に置いて回転させながらレーザー光を照射することにより、計測対象の3次元形状が取得可能となる。

3.2 定式化 物体の3次元座標計測は、光線追跡の原理を用いて行う。カメラからの光線¹とレーザーから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4に示す。

¹実際には光線はカメラに入射しているが、カメラから逆向きに光線追跡を行うという意味で、カメラからの光線と記述している。

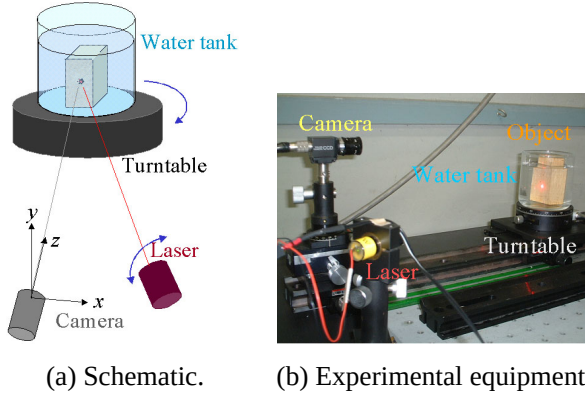


Fig. 3 Overview of 3-D measurement.

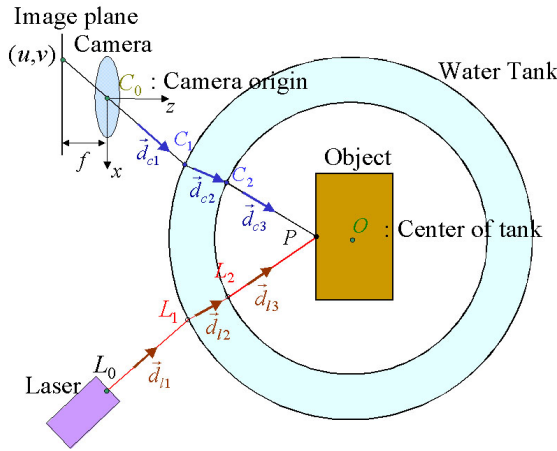


Fig. 4 Principle of 3-D measurement.

ここでは、円筒状容器の中心軸を y 軸方向と定め、右手系をなすように x 軸と z 軸をとる。図 4 において、 $C_0 : (x_{c0}, y_{c0}, z_{c0})^T$ をカメラのレンズ中心、 $O : (x_0, y_0, z_0)^T$ を円筒状容器の中心 (y_0 は中心軸の高さ方向の変化)、 $L_0 : (x_{l0}, y_{l0}, z_{l0})^T$ をレーザー光の原点、 $\vec{d}_{l1} = (\alpha_{l1}, \beta_{l1}, \gamma_{l1})^T$ をレーザー光の単位方向ベクトルとする。これらのパラメータは 3 次元計測を行う前にキャリブレーションにより予め求めておくものとする。

3.3 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。画像面においてレーザー光線が物体に照射されている場所を表す座標値 $(u, v)^T$ は、以下の式で世界座標系 $(x, y, z)^T$ に変換できる。

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

ここで、 f は像距離 (カメラのレンズ中心と画像面との距離)²、 a_{ij} はカメラパラメータである。

²一般的に焦点距離と呼ばれることが多いが、厳密には焦点距離とは無限遠にあるものが焦点を結ぶ場合の距離を表す光学用語である⁽²⁰⁾。

カメラからの光線のベクトルは、以下のように表される。

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

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_1 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。

$$\begin{pmatrix} \lambda_{c1} \\ \mu_{c1} \\ \nu_{c1} \end{pmatrix} = m_1 \begin{pmatrix} x_0 - x_{c1} \\ y_0 - y_{c1} \\ z_0 - z_{c1} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

ただし、

$$m_1 = \frac{\cos \phi_1}{R_0 - (\rho_{c1} \beta_{c1} + y_{c0}) \tan \phi_1}, \quad (5)$$

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

ここで、 $\vec{N}_{c1}$ は単位ベクトルであるため、以下の式が成立する。

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

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、

$$\rho_{c1a} = \alpha_{c1}^2 - \beta_{c1}^2 \tan^2 \phi_1 + \gamma_{c1}^2 \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \rho_{c1b} &= \alpha_{c1}(x_0 - x_{c0}), \\ &\quad -\beta_{c1} \tan \phi_1 (R_0 - y_{c0} \tan \phi_1) \\ &\quad + \gamma_{c1}(z_0 - z_{c0}), \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \rho_{c1c} &= (x_0 - x_{c0})^2 + (R_0 - y_{c0} \tan \phi_1)^2 \\ &\quad + (z_0 - z_{c0})^2. \end{aligned} \quad (11)$$

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、以下のようになる。

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

$\vec{d}_{c2}$ 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。

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

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

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 (n_1 は空気の屈折率、 n_2 は容器の屈折率)。

式 (12)~(17) から、 p_{c1} と q_{c1} は以下のように求められる。

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

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

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 からの光線の方法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。

P_c の座標値は、 c を求めることにより決定することができる。

3.4 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。

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

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。

3.5 3次元座標値の算出 カメラの光線追跡結果から得られる物体表面座標値 P_c とレーザの光線追跡結果から得られる座標値 P_l は一致するはずである。従って、式 (23) と式 (24) を $(x_{pc}, y_{pc}, z_{pc})^T = (x_{pl}, y_{pl}, z_{pl})^T$ 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、これらの3つの方程式が同時に成立することは少ない。これは、連立方程式の数が3 (x 座標、 y 座標、 z 座標についての方程式) であることに対して、求めるべき未知数の数が2 (c と l) であることによる。キャリブレーションや画像処理に誤差が存在する場合には、カメラからの光線とレーザからの光線が交わらないことが多い。

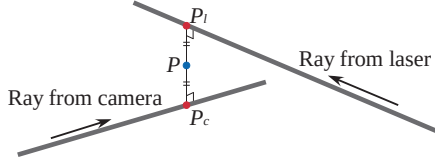


Fig. 5 Determination of 3-D position of P .

そこで本研究では、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2つの光線の交わる点、すなわち物体表面であると見なすこととする。2つの光線が最も近づく場所における l は、

$$l = \frac{L_a}{\cos^2 \theta_p - 1}, \quad (25)$$

となる。ただし、

$$\cos \theta_p = \alpha_{c3}\alpha_{l3} + \beta_{c3}\beta_{l3} + \gamma_{c3}\gamma_{l3}, \quad (26)$$

$$\begin{aligned} L_a = & (\alpha_{l3} - \alpha_{c3} \cos \theta_p)(x_{l2} - x_{c2}) \\ & + (\beta_{l3} - \beta_{c3} \cos \theta_p)(y_{l2} - y_{c2}) \\ & + (\gamma_{l3} - \gamma_{c3} \cos \theta_p)(z_{l2} - z_{c2}). \end{aligned} \quad (27)$$

以上により、物体表面の3次元座標は以下の式で求めることができる。

$$\begin{pmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} x_{pc} + x_{pl} \\ y_{pc} + y_{pl} \\ z_{pc} + z_{pl} \end{pmatrix}. \quad (28)$$

4. 計測手順

4.1 計測装置のキャリブレーション 物体の3次元計測を行う前に、カメラパラメータ、レーザ光線の原点とその方向ベクトル、回転台の中心位置、回転台上の液体を満たした容器の中心位置をそれぞれ求める必要がある。ただし、容器の底辺の半径 R_0 やテーパ角度 ϕ_1 など容器の形状のパラメータは既知であるとする。

まず最初に、格子状のパターンを描画した平面を移動させてカメラで撮影することにより、カメラパラメータを求める。

次に、レーザ光線の原点 L_0 と、レーザ光線の方向ベクトル $\vec{d}_{l1}$ を求める。ここでは、レーザ光線の方向を既知量だけ変化させて格子パターンに照射した画像を複数枚取得し、それぞれの画像中のレーザ光の位置関係を考慮することにより、このキャリブレーションを行う。

以上により、カメラ及びレーザのキャリブレーションが完了し、カメラと任意物体との相対位置関係を計測可能となる。

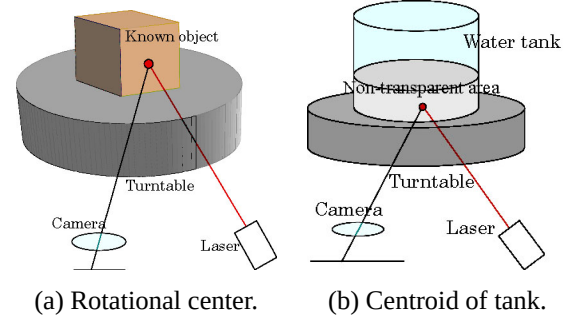


Fig. 6 Calibration method.

次に、形状が既知である物体を回転台の上に配置し、レーザ光を照射し回転させながら画像を取得することにより、回転台の回転中心座標を求める(図6(a))。既知形状と計測形状の差が最小となるように、回転中心の座標を探索的に推定する。

最後に、回転中心と容器の中心との位置関係を求める。ここでは、キャリブレーションを行う容器の一部に非透明な紙を貼り付けておき、その場所にレーザ光線を照射しながら回転させることにより画像を取得する(図6(b))。回転中心のキャリブレーションと同様、容器形状を3次元計測により復元した結果と、実際の形状との差が最小となるように、探索的に容器の中心座標を推定する。

以上により、3次元計測に必要な装置のすべてのパラメータを求めることができる。

4.2 3次元形状計測 キャリブレーションを行った後、対象物体の3次元形状計測を行う。まず、レーザ光の方向を一定にして、容器を上に乗せた回転台を回転させながら画像を取得する。次に、レーザ光の方向を上下方向に既知量だけ変化させた後、同様の計測を繰り返すことにより、水中物体の3次元形状を取得する。なお、容器のテーパ角度 ϕ_1 を考慮して計測を行っているため、レーザ光の方向を変化させた後には再度キャリブレーションを行う必要はない。

4.3 画像中のレーザ光線の抽出 取得した画像中においてレーザ光線が物体に当たる場所は、エッジ検出を用いて特定し、かつ精度に関してはサブピクセル計測を行う。

エッジ検出により、画像中のレーザ光の位置は限定される(図7)。また、エッジ検出を満たす複数箇所のレーザ光が検出された場合には、レーザの原点から最も距離が大きい場所が対象物体の表面位置であることを利用し、画像中のレーザ光位置を特定する。

サブピクセル計測に関しては、レーザ光と判定された複数画素位置の重心(重み付き平均)を求めること

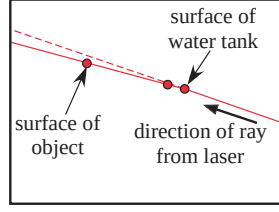


Fig. 7 Extraction of laser point.

で実現する.

$$\begin{pmatrix} u_g \\ v_g \end{pmatrix} = \frac{1}{\sum t(u_i, v_i)} \begin{pmatrix} \sum t(u_i, v_i) u_i \\ \sum t(u_i, v_i) v_i \end{pmatrix}, \quad (29)$$

ただし, (u_g, v_g) はサブピクセル計測に用いるレーザ光の画像上での座標値, (u_i, v_i) はレーザ光と判定された i 番目の画素の座標値, $t(u_i, v_i) (> T)$ は (u_i, v_i) における画素値, T はレーザ光と判定するための画素値の閾値である.

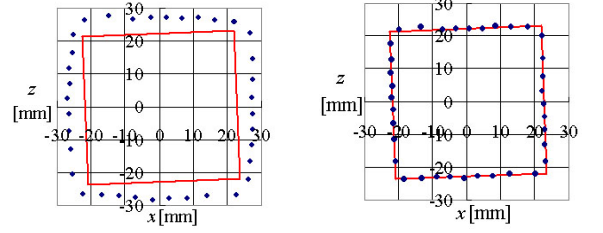
5. 実験

実験では, 水で満たされたガラス製円筒状容器中の物体計測を行った. 容器形状は, 内径 38.2mm, 外径 39.9mm である. また, 空気の屈折率 (n_1), ガラスの屈折率 (n_2), 水の屈折率 (n_3) はそれぞれ $n_1 = 1.000$, $n_2 = 1.500$, $n_3 = 1.335$ であるとした. 画像の解像度は 640×480 pixels であり, キャリブレーションの結果, 像距離 f は 1085.0 pixel と推定された.

回転台の回転中心位置のキャリブレーションは, 断面形状が $44.5\text{mm} \times 45.1\text{mm}$ の直方体を用いて行った. 図 8 にキャリブレーション前後の回転中心の位置を示す. 図 8 において, 点は計測された物体表面の 3 次元位置であり, 線は実際の形状である. キャリブレーション前 (図 8(a)) は計測点と実際の形状のずれが大きいことに対して, キャリブレーション後 (図 8(b)) の計測点と実際の形状の差は平均約 0.10mm となった. 以上の結果, 回転中心の初期推定値が $(0.00, 0.00, 250.00)^T$ であることに対して, キャリブレーションにより最終推定値 $(1.23, 0.00, 239.24)^T$ が求められた (いずれも単位は mm).

また, 図 9 に容器の中心位置の推定結果を示す. キャリブレーションを行うことで, 回転中心位置の場合と同様に, 計測点と実際の形状の差は小さくなり, 容器の中心位置は $(3.42, 0.00, 239.74)^T$ と求められた.

次に, 提案手法の有効性を検証するため, 断面形状が $33.5\text{mm} \times 22.5\text{mm}$ の直方体を回転台の上に載せた円筒状容器に入れて計測を行った. ここでは, 回転台は 10deg 毎に方向を変化させ, 以下に示す様々な条件で計測を行った.



(a) Before calibration. (b) After calibration.

Fig. 8 Calibration results of rotational center.

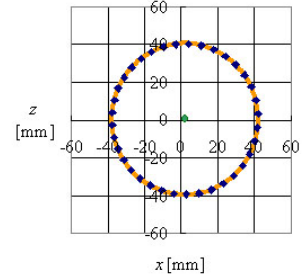


Fig. 9 Calibration results of water tank centroid.

1. 容器内：水なし
屈折率の変化：考慮する
計測距離：239.24mm
計測結果：図 10(a)
2. 容器内：水あり
屈折率の変化：考慮しない
計測距離：239.24mm
計測結果：図 10(b)
3. 容器内：水あり
屈折率の変化：考慮する
計測距離：239.24mm
計測結果：図 10(c)
4. 容器内：水あり
屈折率の変化：考慮する
計測距離：500.37mm
計測結果：図 10(d)

図 10 において, 点は計測点の位置, 薄い線は計測点に最小二乗当てはめを行った結果, 濃い線は実際の物体の断面形状である.

また, それぞれの条件における定量的結果を表 1, 表 2 に示す.

表 1 は, 最小二乗当てはめを行った結果 (各辺の線) とレーザによる計測点との差の標準偏差及び最大誤差を示している. この結果より, いずれの場合においても計測のばらつきが小さいことが分かる. 表 2 は, レーザによる計測点と実際の形状との差の標準偏差及

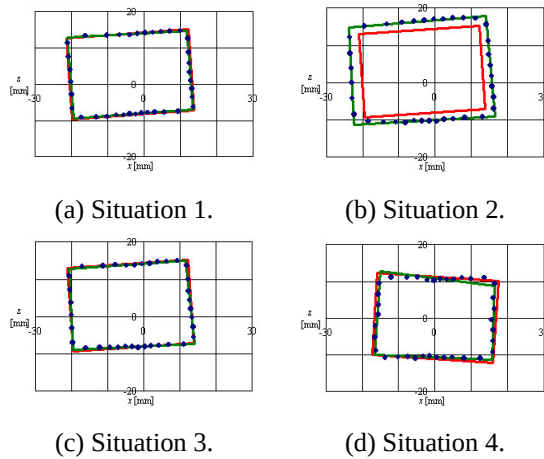


Fig. 10 Experimental results I.

Table 1 Result of least square fitting.

Situation	Standard deviation	Max. error
1	0.10mm	0.26mm
2	0.18mm	0.58mm
3	0.14mm	0.31mm
4	0.55mm	1.80mm

Table 2 Result of shape measurement.

Situation	Standard deviation	Max. error
1	0.23mm	0.42mm
2	2.26mm	2.93mm
3	0.31mm	0.72mm
4	0.73mm	1.21mm

び最大誤差を示している．この結果より，3次元形状計測が非常に正確に行われていることが分かる．

また，それぞれの条件別に見ると，条件1では光の屈折が関係ないため，キャリブレーションの有効性が検証できる．実際に実験結果より，キャリブレーションが正確に行われていることが分かる．また，条件2と条件3の実験結果を表2において比較すると，光の屈折を考慮しない場合と比較して考慮した場合は非常に高精度な計測が可能となっていることが分かる．更に条件4の結果より，計測距離が変化した場合にも，計測距離に応じた精度が保証されることが示された．また，光の屈折を考慮した場合には，いずれの条件においても画像1ピクセル以下の精度での計測が可能であった．なお，誤差が発生した原因としては，容器の断面形状は真円であると仮定して計測を行っているが，実際には微小な凹凸や歪みがあることなどが挙げられる．

以上，これらの実験結果により，光が屈折する場合においても，提案手法を用いることで容器と溶液のな

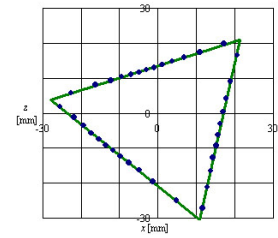


Fig. 11 Experimental results II.

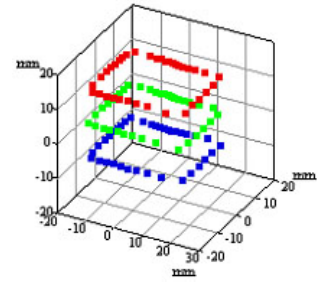


Fig. 12 Experimental results III.

い通常の状態で計測した場合と同程度の誤差で計測できることが分かり，高精度の計測が可能であることが定量的に示された．

また，長方形以外の断面形状を有する物体の計測結果を図11に，レーザ光の角度を上下に変動させながら立方体形状物体の複数の断面形状を3次的に計測した結果を図12にそれぞれ示す．これらの結果より，物体の形状によらず様々な形状を計測可能であり，レーザ光の方向を変化させた場合においても高精度に計測可能であることが示された．

6. 結 論

本研究では，レーザレンジファインダを用いて透明容器中の水中物体の形状計測を行う手法を提案した．

光の屈折を考慮することで，取得画像に歪みがある場合にも対応可能な計測方法を構築した．また，平面以外の屈折面形状に対応可能な計測原理の定式化を行った．更に，水中物体を計測するための各種キャリブレーション手順や計測手順を提案し，実験結果より空気中と同程度の精度で水中物体形状を計測可能であることを示した．

今後の展望としては，屈折率や容器形状が未知の場合にも，水中物体形状，屈折率，容器形状を同時に計測可能な手法を構築することが考えられる．また，スリット光やパターン光を用いることにより，同時に広範囲を計測することも考えられる．

謝 辞 本研究の一部は，日本学術振興会科学研究費基盤研究(C)14550416及び財団法人中部電力基礎技術

研究所の補助を受けた。

文 献

- (1) A. Yamashita, E. Hayashimoto, T. Kaneko and Y. 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*, (2003), pp.1578–1583.
- (2) A. Yamashita, H. Higuchi, T. Kaneko and Y. 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*, (2004), pp.2736–2741.
- (3) A. Yamashita, S. Ikeda and T. 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), pp.3923–3928.
- (4) B. Kamgar-Parsi, L. J. Rosenblum and E. O. Belcher: "Underwater Imaging with a Moving Acoustic Lens," *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol.7, No.1, (1998), pp.91–99.
- (5) V. Murino, A. Trucco and C. 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, (1998), pp.9–22.
- (6) B. W. Coles: "Recent Developments in Underwater Laser Scanning Systems," *SPIE Vol.980 Underwater Imaging*, (1988), pp.42–52.
- (7) R. F. Tusting and D. L. Davis: "Laser Systems and Structured Illumination for Quantitative Undersea Imaging," *Marine Technology Society Journal*, Vol.26, No.4, (1992), pp.5–12.
- (8) Y. Ogawa: "Shape Evaluation for Underwater Object," *Proceedings of SICE Annual Conference 1997*, (1997), pp.629–630 (in Japanese).
- (9) B. Shigematsu and N. Moriya: "Development of a Deep-Water Topological Survey System Using a Laser Scanner with a GPS," *Journal of the Japan Society of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol.36, No.5, (1997), pp.24–34 (in Japanese).
- (10) H. Kondo and T. Ura: "Detailed Object Observation by Autonomous Underwater Vehicle with Localization Involving Uncertainty of Magnetic Bearings," *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (2002), pp.412–419.
- (11) H. Kondo, T. Maki, T. Ura, Y. Nose, T. Sakamaki and M. 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*, (2004), pp.1103–1108.
- (12) R. Li, H. Li, W. Zou, R. G. Smith and T. A. Curran: "Quantitative Photogrammetric Analysis of Digital Underwater Video Imagery," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol.22, No.2, (1997), pp.364–375.
- (13) J. S. Jaffe: "Computer Modeling and the Design of Optimal Underwater Imaging Systems," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol.15, No.2, (1990), pp.101–111.
- (14) J. Yuh and M. West: "Underwater Robotics," *Advanced Robotics*, Vol.15, No.5, (2001), pp.609–639.
- (15) Special issue "Underwater Robotics," *Journal of Robotics Society of Japan*, Vol.22, No.6, (2004), pp.691–738 (in Japanese).
- (16) H. Murase: "Surface Shape Reconstruction of a Nonrigid Transparent Object Using Refraction and Motion," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.14, No.10, (1992), pp.1045–1052.
- (17) H. Kawamura, H. Saito and M. Nakajima: "3-D Shape Measurement of Underwater Object by Temporal-Spatial Image Analysis," *Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers*, Vol.32, No.4, (1996), pp.607–609 (in Japanese).
- (18) D. Nakayama, A. Nakano, T. Kaneko, K. T. Miura and T. Kubo: "Determination of Observation Parameters for Stereoscopic 3-Dimensional Measurement of Objects in a Glass Water Tank," *The Transactions of the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers D-II*, Vol.J84-D-II, No.12, (2001), pp.2684–2689 (in Japanese).
- (19) A. Yamashita, S. Kato and T. 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*, (2006).
- (20) S. G. Lipson, H. Lipson and D. S. Tannhauser: *Optical Physics Third Edition*, Cambridge University Press, (1995).