円筒状透明容器中における水中物体のレーザー光による 3 次元形状計測

3-D Measurement of Objects in a Cylindrical Glass Water Tank with a Laser Range Finder

山下　淳 † 　林本　悦一 †,‡ 　金子　透 † 　川田　善正 †
Atsushi Yamashita†, Etsukazu Hayashimoto†,‡, Toru Kaneko† and Yoshimasa Kawata†
† 静岡大学工学部機械工学科　‡ パルステック工業株式会社
† Department of Mechanical Engineering, Shizuoka University
‡ Pulstec Industrical Co., Ltd
E-mail: yamashita@ieee.org

Abstract

本研究では，レーザー光を用いて，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．従来の 3 次元計測では，撮影機器と測定対象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，例えば水槽中にある物体を計測する場合には，光の屈折の影響で像が歪むため正確な計測ができない．そこで，屈折率を考慮してカメラとレーザーの光線をそれぞれ追跡し，これら 2 つの光線の関係を求めることでレーザー光が当たっている場所の 3 次元位置を求める方法を構築した．

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．従って，例えば液体で満たされた容器中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 に，円筒状容器に立方体形状の物体を置き，物体の高さの半分まで水を満たした例を示す．この例で液面の上下で物体の大きさが大きく異なっているように見えるように，屈折率が変化する場合には像が歪む．

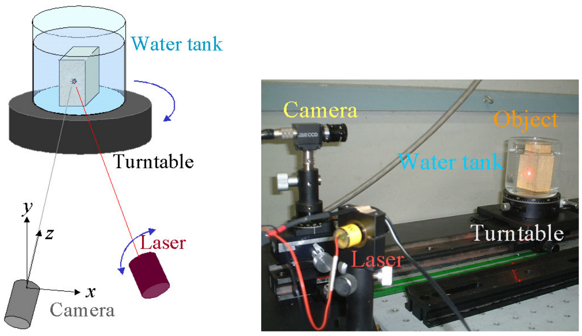
そこで本研究では，屈折率の異なる環境に対応した 3 次元計測手法を構築する．具体的には，液体で満たされた円筒状透明容器中物体の 3 次元形状計測を行うことを目的とする．例えば，ホルマリンにつけられた貴重なサンプルは非接触で計測する必要があるなど，液体で満たされた容器内物体の計測は重要である．

図 **1**　光の屈折による画像の歪み

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．

従って，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 [1]–[6]，あるいは海中ロボット用センサ [7]–[9] など，海中での計測手法が数多く提案されている．海中での計測では多くの場合超音波を用いているが，高精度に計測を行うことは困難である [1, 2]．従って，精度向上のためには，画像を用いて計測を行うことが有効である [6]．特に，容器内の物体計測は，海中と比較して非常に高い精度が要求されることが多い．

そこで，屈折率の異なる環境を考慮した計測手法が提案されているが [10]，屈折率の境界面が平面の場合のみ取り扱っている．しかし，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，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．また，



(a) 概略　　　(b) 実験装置

図 **2**　**3** 次元計測の様子

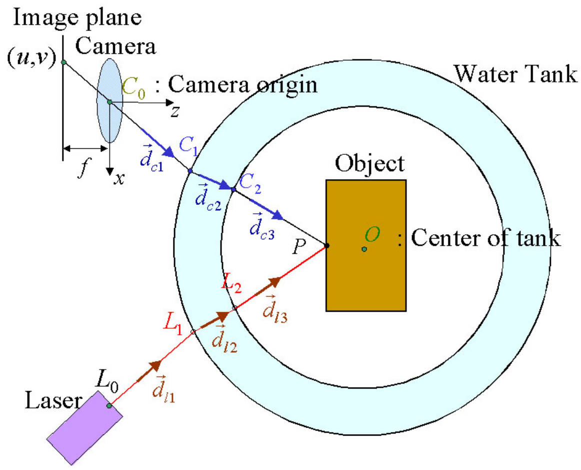


図 **3**　計測原理

この方法ではステレオカメラを用いているため，物体表面にテクスチャがない場合には，対応点検出が困難となり，物体表面のすべての場所での計測ができない．

そこで本研究では，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し，屈折率の異なる境界の形状を考慮することで，正確な 3 次元計測を行う手法を提案する．

物体表面の形状は，方向を上下に変化させることが可能なレーザースポット光とカメラから構成されるシステムによって計測される（図 2）．液体を満たした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で，3 次元形状が取得可能である．

2　計測原理

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，ビーカーの中心軸を 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 3 において，$C_0 : (x_{c0}, y_{c0}, z_{c0})^T$ をカメラのレンズ中心，$O : (x_O, y_O, z_O)^T$ 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で予め求めておくものとする．

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．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．

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

ここで，f は像距離（レンズ中心と画像面との距離）[1]，a_{ij} はカメラパラメータである．

カメラからの光線のベクトルは，以下のように表される．

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

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．

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

容器の底辺の半径を R_0，容器のテーパー角度を 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．

$$\begin{pmatrix} \lambda_{c1} \\ \mu_{c1} \\ \nu_{c1} \end{pmatrix} = m_1 \begin{pmatrix} x_O - x_{c1} \\ y_O - y_{c1} \\ z_O - z_{c1} \end{pmatrix} \tag{4}$$

ただし，

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

$$\mu_{c1} = -\sin\lambda_{c1} \tag{6}$$

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．

$$\lambda_{c1}^2 + \mu_{c1}^2 + \nu_{c1}^2 = 1 \tag{7}$$

[1] 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のものが焦点を結ぶ場合の距離を表す光学用語である．

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．

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

ただし，

$$\begin{aligned}
\rho_{c1a} &= \alpha_{c1}^2 - \beta_{c1}^2 \tan^2\phi_1 + \gamma_{c1}^2 && (9)\\
\rho_{c1b} &= \alpha_{c1}(x_O - x_{c0}) \\
&\quad -\beta_{c1}\tan\phi_1(R_0 - y_{c0}\tan\phi_1) \\
&\quad +\gamma_{c1}(z_O - z_{c0}) && (10)\\
\rho_{c1c} &= (x_O - x_{c0})^2 + (R_0 - y_{c0}\tan\phi_1)^2 \\
&\quad +(z_O - z_{c0})^2 && (11)
\end{aligned}$$

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．

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

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．

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

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．

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

$\vec{d}_{c2}$ 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．

$$\begin{aligned}
\cos\theta_{c2} &= \alpha_{c2}\lambda_{c1} + \beta_{c2}\mu_{c1} + \gamma_{c2}\nu_{c1} && (15)\\
\sin^2\theta_{c2} &= (\beta_{c2}\nu_{c1} - \gamma_{c2}\mu_{c1})^2 \\
&\quad +(\gamma_{c2}\lambda_{c1} - \alpha_{c2}\nu_{c1})^2 \\
&\quad +(\alpha_{c2}\mu_{c1} - \beta_{c2}\lambda_{c1})^2 && (16)
\end{aligned}$$

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．

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin\theta_{c2}}{\sin\theta_{c1}} \tag{17}$$

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．

$$\begin{aligned}
p_{c1} &= \frac{n_1}{n_2} && (18)\\
q_{c1} &= \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \sin^2\theta_{c1}} - \frac{n_1}{n_2}\cos\theta_{c1} && (19)
\end{aligned}$$

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．

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

ただし，

$$\begin{aligned}
p_{c2} &= \frac{n_2}{n_3} && (21)\\
q_{c2} &= \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_3}\right)^2 \sin^2\theta_{c2}} - \frac{n_2}{n_3}\cos\theta_{c2} && (22)
\end{aligned}$$

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．

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

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．

2.2 レーザーからの光線追跡

レーザー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．最終的にレーザー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．

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

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 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 とレーザー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 つの方程式は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ーからの光線が交わらないことが多い．

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．

3 計測手順

3.1 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，レーザー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，容器の形状は既知であるとする．

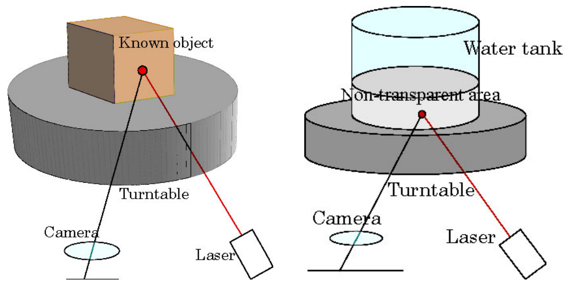
まず最初に，格子状のパターンを描画した平面を移動させてカメラで撮影することにより，カメラパラメータを求める．

次に，レーザー光線の原点 L_0 と，レーザー光線の方向ベクトル $\vec{d_{l1}}$ を求める．ここでは，レーザー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ー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，カメラ及びレーザー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．

次に，形状が既知である物体を回転台の上に配置し，レーザー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 4(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，その場所にレーザー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 4(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．



(a) 回転台の回転中心　(b) 容器の中心

図 **4**　キャリブレーション方法

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．

3.2 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，レーザー光の方向を一定にして，容器を上に載せた回転台を回転させながら画像を取得する．次に，レーザー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．

3.3 画像中のレーザー光線の抽出

取得した画像中においてレーザー光線が物体に当たる場所は，エピポーラ拘束を用いて特定し，かつ精度に関してはサブピクセル計測を行う．

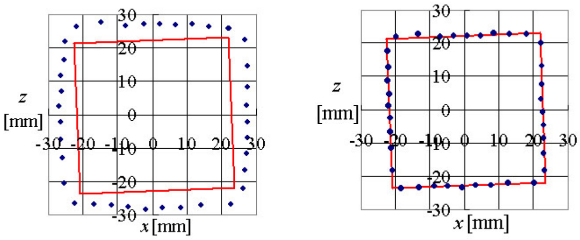
エピポーラ拘束により，画像中のレーザー光の位置は限定される．また，エピポーラ拘束を満たす複数箇所のレーザー光が検出された場合には，レーザーの原点から最も距離が大きい場所が対象物体の表面位置であることを利用し，画像中のレーザー光位置を特定する．

サブピクセル計測に関しては，レーザー光と判定された複数画素位置の重心（重み付き平均）を求めることで実現する．

4 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 $n_1 = 1.000$，$n_2 = 1.5000$，$n_3 = 1.335$ であるとした．画像の解像度は 640×480pixel であり，キャリブレーションの結果，像距離 f は 1085.0pixel 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 44.5mm×45.1mm の直方体を用いて行われた．図 5 にキャリブレーション前後の回転中心の位置を示す．図 5 において，（青色の）点は計測された物体表面の 3 次元位置であり，（赤色の）線は実際の形状である．



(a) 初期推定位置　　(b) 最終推定位置

図 **5**　回転中心位置のキャリブレーション結果

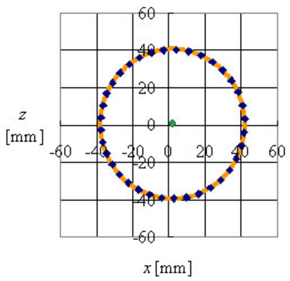


図 **6**　容器の中心位置のキャリブレーション結果

キャリブレーション後の計測点と実際の形状の差は平均約 0.10mm であった．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．

また，図 6 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．

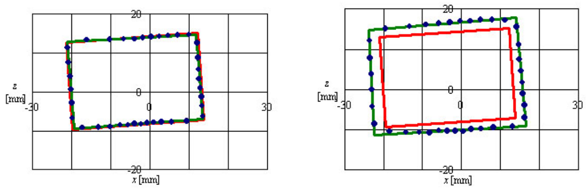
次に，提案手法の有効性を検証するため，断面形状が 33.5mm×22.5mm の直方体を回転台の上に載せた円筒状容器に入れて計測を行った．ここでは，回転台は 10deg 毎に方向を変化させ，以下に示す様々な条件で計測を行った．

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 7(a)

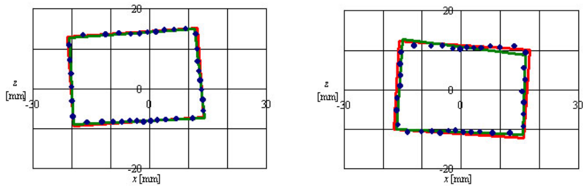
2. 容器内：水あり
   屈折率の変化：考慮しない
   計測距離：239.24mm
   計測結果：図 7(b)

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 7(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 7(d)



(a) 条件 1　　(b) 条件 2



(c) 条件 3　　(d) 条件 4

図 **7**　実験結果 **1**

表 **1**　最小二乗当てはめ結果

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

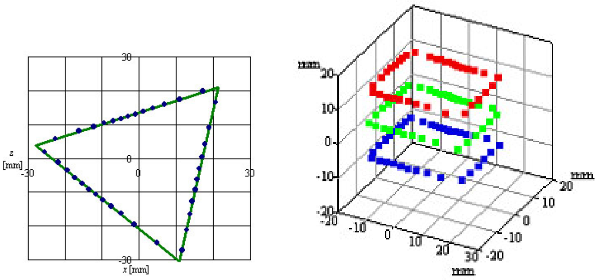
図 7 において,（青色の）点は計測点の位置,（緑色の）薄い線は計測点に最小二乗当てはめを行った結果,（赤色の）濃い線は実際の物体の断面形状である．

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）とレーザー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

表 **2**　形状計測結果

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



(a) 別形状物体　　(b) 3 次元形状

図 **8**　実験結果 **2**

ザーによる計測点と実際の形状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，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．

以上，これらの実験結果により，提案した手法はサブピクセルオーダー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，及びレーザー光の角度を上下に変動させながら複数の断面形状を 3 次元的に計測した結果を図 8 に示す．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，レーザー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．

5　結論

本研究では，レーザー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．光の屈折と屈折面形状を考慮することにより，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，実験結果より 1 ピクセル以下の精度で水中物体形状を計測可能であることが示された．

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，文部科学省科学研究費基盤研究 (C)14550416 の補助を受けた．

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*, Vol.7, No.1, pp.91–99, 1998.

[2] Vittorio Murino, Andrea Trucco and Carlo S. Regazzoni: “A Probalilistic Approach to the Coupled Reconstruction and Restortion of Underwater Acoustic Images,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.20, No.1, pp.9–22, 1998.

[3] 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.

[4] 重松 文治, 守屋 典昭: “水中レーザー・GPS を用いた大水深測深システムの研究開発,” 写真測量とリモートセンシング, Vol.36, No.5, pp.24–34, 1997.

[5] 小川 洋司: “水中物体の形状計測,” 第 36 回計測自動制御学会学術講演会講演論文集, pp.629–630, 1997.

[6] Rongxing Li, Haihao Li, Weihong Zou, Robert G. Smith and Terry A. Curran: “Quantitive Photogrammetric Analysis of Digital Underwater Video Imagery,” *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol.22, No.2, pp.364–375, 1997.

[7] Jules S. Jaffe: “Computer Modeling and the Design of Optimal Underwater Imaging Systems,” *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol.15, No.2, pp.101–111, 1990.

[8] J. Yuh and M. West: “Underwater Robotics,” *Advanced Robotics*, Vol.15, No.5, pp.609–639, 2001.

[9] 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.

[10] 中山 大介, 中野 敦史, 金子 透, 三浦 憲二郎, 久保高啓: “ステレオ視によるガラス水槽中物体の 3 次元計測のための観測パラメータ取得,” 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J84-D-II, No.12, pp.2684–2689, 2001.