

# レーザレンジファインダによる円筒状透明容器内の水中物体計測

山下 淳<sup>†</sup> 金子 透<sup>†</sup> 林本 悦一<sup>†,‡</sup> 池田 真輔<sup>†</sup> 三浦 憲二郎<sup>†</sup> 川田 善正<sup>†</sup>

<sup>†</sup>静岡大学工学部 〒432-8561 静岡県浜松市城北 3-5-1

<sup>‡</sup>パルステック工業株式会社 〒433-8510 静岡県浜松市東三方町 90-3

E-mail: <sup>†</sup>yamashita@ieee.org

**あらまし** 本研究では、場所によって屈折率が変化する環境において、レーザレンジファインダを用いて3次元計測を行うことを目的とする。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。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の光線をそれぞれ追跡し、これら2つの光線の間隔を求め、レーザ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、提案手法の有効性を実験により確認した。

**キーワード** 3次元計測, 光の屈折, 水中物体, レーザレンジファインダ

## Three-Dimensional Measurement of Objects in Cylindrical Transparent Water Tanks Using a Laser Range Finder

Atsushi Yamashita<sup>†</sup> Toru Kaneko<sup>†</sup> Etsukazu Hayashimoto<sup>†,‡</sup>  
Shinsuke Ikeda<sup>†</sup> Kenjiro T. Miura<sup>†</sup> and Yoshimasa Kawata<sup>†</sup>

<sup>†</sup>Faculty of Engineering, Shizuoka University, 3-5-1 Johoku, Hamamatsu-shi, Shizuoka 432-8561, Japan

<sup>‡</sup>Pulstec Industrial Co., Ltd., 90-3 Higashi-mikata-cho, Hamamatsu-shi, Shizuoka 433-8510, Japan

E-mail: <sup>†</sup>yamashita@ieee.org

**Abstract** 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. The effectiveness of the proposed technique is shown through experiments.

**Keyword** three-dimensional measurement, refraction, objects in liquid, laser range finder

### 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。

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。

屈折率の異なる環境でセンシングを行う際には、以下に挙げる未知パラメータを求める必要がある。

1. 屈折境界面の形状・位置
2. それぞれの領域での屈折率

### 3. 計測対象の形状・位置

屈折境界面の形状・位置の計測に関しては、ハイライトの偏光解析により透明物体の計測を行う手法等[1]が提案されている。しかし、この手法では特殊な光源環境を準備する必要がある。屈折率の異なる環境での3次元計測に関しては、海底形状計測や海中環境計測など、海中での計測手法[2][3]が数多く提案されている。また、水槽中の物体を計測する手法[4]も提案されているが、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、屈折率の境界面が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、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計測し考慮することで、正確な3次元計測を行う手法を提案する。

## 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1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。

透明容器の表面形状については、三角測量の原理より、画像面においてレーザ光線が透明容器に照射されている場所を表す座標値\$(u\_l, v\_l)^T\$から求める。

また、容器内の物体の表面形状については、光線追跡により、画像面においてレーザ光線が物体に照射されている場所を表す座標値\$(u, v)^T\$より求める。

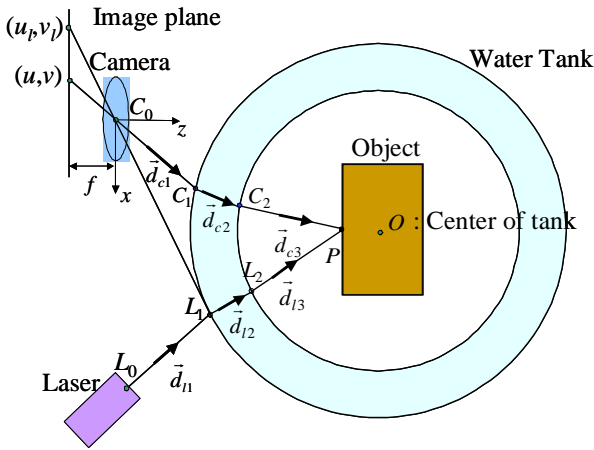


図1 計測原理

### 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\$\rho\_{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\$\phi\$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、\$\rho\_{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、\$\theta\_{c1}\$を光線の入射角(\$\vec{d}\_{c1}\$と\$\vec{N}\_{c1}\$のなす角)、\$\theta\_{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。

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

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

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. 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 $(x_{pc}, y_{pc}, z_{pc})^T = (x_{pl}, y_{pl}, z_{pl})^T$ 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 midpoint を物体表面であると見なす.

## 3. 計測手順

### 3.1. 画像中のレーザ光線の抽出

エピポーラ拘束により, 画像中のレーザ光の位置は限定される. エピポーラ拘束を満たす複数箇所のレーザ光が検出された場合には, レーザの原点から距離が最も小さい場所が透明容器の表面位置, 距離が最も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.

また, 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)を求めることでサブピクセル計測を行う.

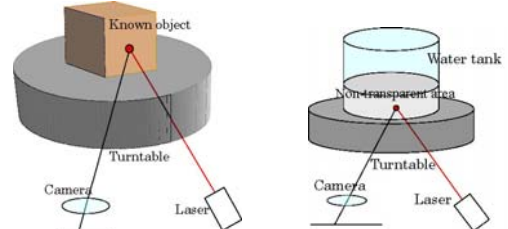
### 3.2. 容器形状の計測

最初に, 格子が描かれた平面パターン等を利用してカメラパラメータやレーザ光線の原点や方向を求める.

次に, 三角測量の原理より, レーザ光線が透明容器に照射されている場所を表す座標値 $(u_l, v_l)^T$ から容器形状を求める.

### 3.3. 容器位置の計測

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 2(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. 次に, 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 2(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 2 キャリブレーション方法

### 3.4. 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.

## 4. 実験

### 4.1. キャリブレーション結果

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3)。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光を照射することで、3次元形状が取得可能である。

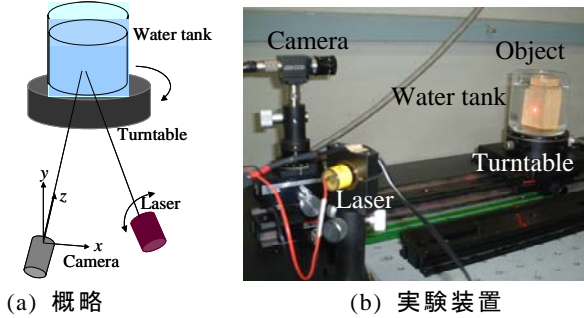


図3 3次元計測システム

円筒状容器の形状計測結果の一部を図4に示す。ここで、点は計測した結果、線は実際の形状を示しており、ほぼ正確に形状を計測可能であることが示された。

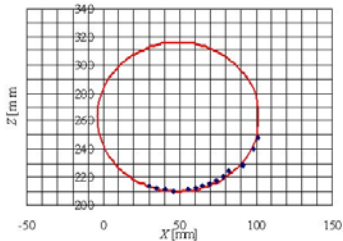


図4 円筒容器の形状計測結果

次に、回転台の回転中心位置のキャリブレーションを行った。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、点は計測された物体表面の3次元位置、線は実際の形状を表す。キャリブレーション前に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の計測点と実際の形状の差は平均約0.10mmとなり、回転中心の位置が正しく推定されたことが確認できる。

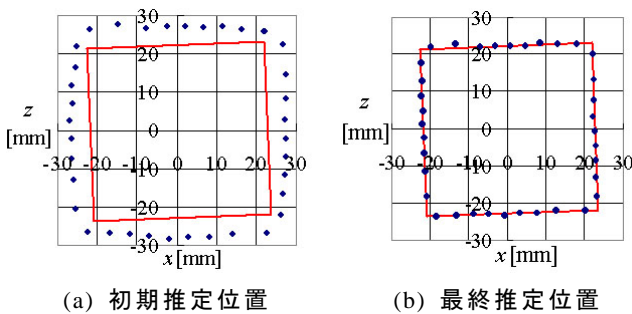


図5 回転中心位置のキャリブレーション結果

その後、同様に容器の中心位置のキャリブレーションを行い、容器の中心位置を求めた。

#### 4.2. 容器内物体の形状計測結果

提案手法の有効性を検証するため、既知形状の円筒状容器(内径38.2mm, 外径39.9mm)を用い、断面形状が33.5mm×22.5mmの直方体を水で満たされた容器に入れて計測を行った。ここで、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

1.000, 1.5000, 1.335 であるとした。また、回転台は10deg毎に方向を変化させた。

計測距離が約240mmの際の計測結果を図6に示す。図6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。屈折率の変化を考慮して計測を行った場合(図6(a))には計測点と実際の形状との差が大きいことに対して、考慮した場合(図6(b))にはほぼ形状が一致していることが分かる。

また、屈折率の変化を考慮しない場合には、計測点と実際の形状との差の標準偏差が2.26mm, 最大誤差が2.93mmであることに対し、考慮した場合には標準偏差が0.31mm, 最大誤差が0.72mmとなった。

以上、屈折率の変化を考慮したには、1ピクセル以下の分解能で計測可能であることが確認された。

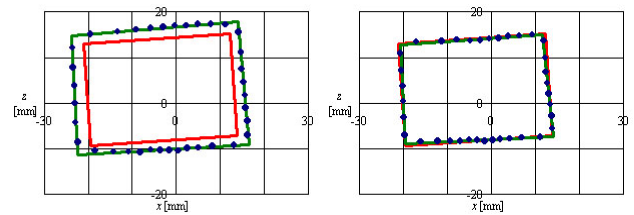


図6 形状計測結果

#### 5. 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、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手法を構築することが考えられる。

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。

#### 文献

- [1] 齊藤 めぐみ, 佐藤 洋一, 池内 克史, 栢木 寛: “ハイライトの偏光解析に基づく透明物体の表面形状測定,” 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J82-D-II, No.9, pp.1383-1390, 1999.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.