

光切断法による水中物体の3次元計測

山下 淳[†] 樋口 裕和^{†,‡} 金子 透[†] 川田 善正[†]
[†] 静岡大学工学部機械工学科 [‡] 浜松ホトニクス

3-D Measurement of Objects in Water Using the Light Stripe Projection Method

*Atsushi YAMASHITA[†], Hirokazu HIGUCHI^{†,‡}, Toru KANEKO[†], Yoshimasa KAWATA[†]
[†] Department of Mechanical Engineering, Shizuoka University [‡] Hamamatsu Photonics

Abstract— In this paper, we propose a 3-D measurement method of objects' shapes in liquid using the light stripe projection method. 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 method is shown through experiments.

Key Words: Three-dimensional measurement, Light stripe projection method, Refraction, Objects in liquid

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。今後多種多様な場所においてロボットが作業を行うことを考えると、空気中だけではなく様々な環境において物体計測を行う必要がある。そこで本研究では、カメラとレーザスリット光を用いた光切断法を利用することにより、水中物体の3次元計測を行うことを目的とする。

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や大きさで対象物が観測されるためである (Fig.1)。



Fig.1 Example of image distortion.

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^{1, 2)}。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、カメラを用いた画像センサを用いることが有効である^{3, 4)}。また、例えば、ホルマリンにつけられた貴重な生体サンプルの形状計測は非接触

で行う必要があり、水中・空気中を問わず屈折率が変化する環境における物体計測は重要である。

そこで我々は、ステレオカメラを用いて水中物体の計測を行う手法を提案した⁵⁾。しかし、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不可能であるといった問題がある。そこで、対応点検出の問題を解決するために、空気中から水中物体にレーザスポット光を投影し、水中物体の形状を計測する手法を提案した^{6, 7)}。しかし、スポット光は対象物表面上の1点のみに照射されるため、同時に広範囲の3次元計測をすることができず、対象物全体の計測を行うためには時間がかかるといった問題点がある。

そこで本研究では、対象物表面に広範囲にレーザ光を照射することが可能なレーザスリット光を用いることにより、水中物体の計測を行うことを目的とする。具体的には、液体で満たされた水槽中に存在する対象物の形状計測を行うこととする (Fig.2)。

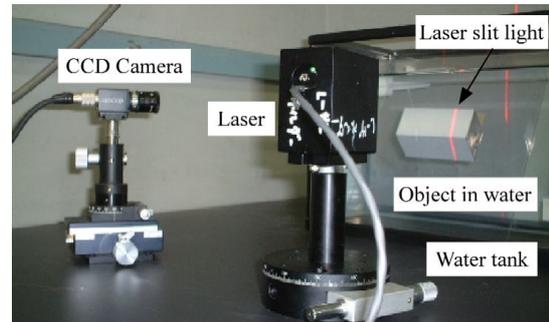


Fig.2 Overview of 3-D measurement.

2. 計測原理

2-1 計測環境のモデル化

カメラとレーザの光線をそれぞれ追跡すると、対象物の表面においてこれら2つの光線が交わる。光線追

跡の原理を用いて、対象物の3次元座標の計測を行う。

ここでは、レーザスポット光を線状に広げることで、レーザスリット光を照射することとする (Fig.3)。しかし、光が屈折する場合には、どの角度で照射されたレーザ光が物体の表面に照射されているのかを対応付けることが困難である。そこで、スリット光をスポット光が束になって並んだものとして考え、それぞれのスポット光の光線追跡を行う。すべての角度のスポット光の光線を追跡することで、スリット光全体の計測を行うことが可能である。

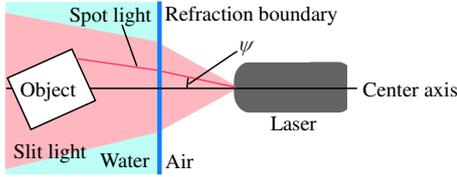


Fig.3 Laser slit light.

カメラのレンズ中心 O を原点とし、カメラの光軸方向を Z 軸、鉛直下向き方向を Y 軸、それらと右手系を成す方向に X 軸をとり、カメラ座標系とする (Fig.4)。

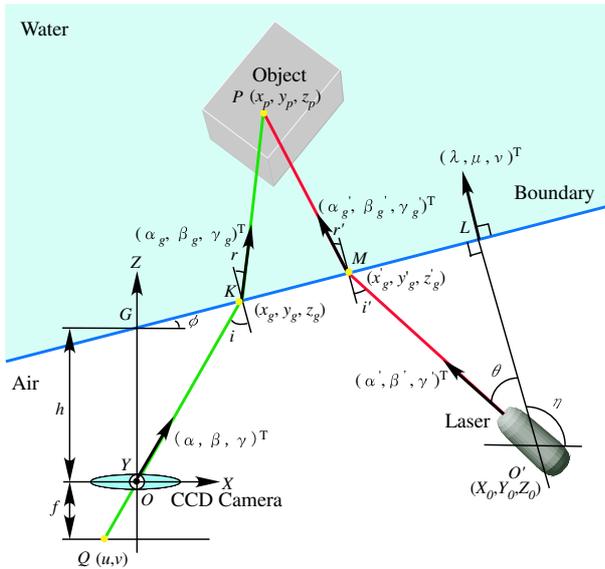


Fig.4 Principle of 3-D measurement.

屈折界面 (水槽ガラス面) とレーザスリット光はそれぞれ Y 軸方向と平行であるとする。また、レーザスリット光を構成する各レーザスポット光と水平面の成す角を照射角 ψ と呼ぶこととする。

カメラ座標系において、 $K : (x_g, y_g, z_g)^T$ をカメラからの光線と屈折界面の交点、 $O' : (x_0, y_0, z_0)^T$ をレーザの原点、 $M : (x'_g, y'_g, z'_g)^T$ をレーザ光線と屈折界面の交点、 $P : (x_p, y_p, z_p)^T$ をレーザ光が水中物体に照射される点とする。また、 $Q : (u, v)$ を画像面でのレーザ光線の位置、 G を Z 軸と屈折界面の交点とする。

更に、 f を像距離 (カメラのレンズ中心から結像面までの距離)、 h をカメラのレンズ中心から屈折界面までの距離、 ϕ を X 軸と屈折界面とのなす角度、 θ を屈折界面とレーザ光のなす角度、 η を X 軸とレー

ザ光とのなす角度、 i, r をそれぞれ屈折界面に入射したカメラからの光線の入射角、屈折角、 i', r' をそれぞれ屈折界面に入射したレーザ光線の入射角、屈折角とする。

また、 $(\lambda, \mu, \nu)^T$ を屈折界面の単位法線ベクトル、 $(\alpha, \beta, \gamma)^T, (\alpha_g, \beta_g, \gamma_g)^T$ をそれぞれカメラからの光線の入射前、屈折後の単位方向ベクトル、 $(\alpha', \beta', \gamma')^T, (\alpha'_g, \beta'_g, \gamma'_g)^T$ をそれぞれレーザ光線の入射前、屈折後の単位方向ベクトルとする。

2.2 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、カメラからの光線の単位方向ベクトル $(\alpha, \beta, \gamma)^T$ は、

$$\begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{u^2 + v^2 + f^2}} \begin{pmatrix} u \\ v \\ f \end{pmatrix} \quad (1)$$

となる。ただし、 f は像距離である。

また、屈折界面の単位法線ベクトル $(\lambda, \mu, \nu)^T$ は、以下のように表される。

$$\begin{pmatrix} \lambda \\ \mu \\ \nu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin \phi \\ 0 \\ \cos \phi \end{pmatrix} \quad (2)$$

$\alpha, \beta, \gamma, \phi$ 及び h を用いると、屈折界面とカメラからの光線の交点 $K : (x_g, y_g, z_g)^T$ は、

$$\begin{pmatrix} x_g \\ y_g \\ z_g \end{pmatrix} = \frac{h}{\gamma - \alpha \tan \phi} \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{pmatrix} \quad (3)$$

と求められる。

次に、屈折後のカメラからの光線について考える。光の屈折の性質により、屈折前後の光線のベクトル $(\alpha, \beta, \gamma)^T, (\alpha_g, \beta_g, \gamma_g)^T$ と、屈折界面の単位法線ベクトル $(\lambda, \mu, \nu)^T$ は同一平面上にある。従って、 $(\alpha_g, \beta_g, \gamma_g)^T$ は、 $(\alpha, \beta, \gamma)^T$ と $(\lambda, \mu, \nu)^T$ の線形和で表現可能である。

$$\begin{pmatrix} \alpha_g \\ \beta_g \\ \gamma_g \end{pmatrix} = p \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{pmatrix} + q \begin{pmatrix} \lambda \\ \mu \\ \nu \end{pmatrix} \quad (4)$$

ただし、 p と q は定数である。

ここで、カメラからの光線の単位方向ベクトル $(\alpha, \beta, \gamma)^T$ と、屈折界面の単位法線ベクトル $(\lambda, \mu, \nu)^T$ に関して、

$$\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2 = 1 \quad (5)$$

$$\lambda^2 + \mu^2 + \nu^2 = 1 \quad (6)$$

が成立することを利用すると、これらのベクトルの内積と外積の計算より、それぞれ以下の関係が成立する。

$$\cos i = \alpha \lambda + \beta \mu + \gamma \nu \quad (7)$$

$$\sin^2 i = (\beta \nu - \gamma \mu)^2 + (\gamma \lambda - \alpha \nu)^2 + (\alpha \mu - \beta \lambda)^2 \quad (8)$$

同様に，屈折後のカメラからの光線の単位方向ベクトル $(\alpha_g, \beta_g, \gamma_g)^T$ と，屈折境界面の単位法線ベクトル $(\lambda, \mu, \nu)^T$ に関しても以下の関係が成立する．

$$\cos r = \alpha_g \lambda + \beta_g \mu + \gamma_g \nu \quad (9)$$

$$\sin^2 r = (\beta_g \nu - \gamma_g \mu)^2 + (\gamma_g \lambda - \alpha_g \nu)^2 + (\alpha_g \mu - \beta_g \lambda)^2 \quad (10)$$

更に，光の屈折前後の領域における屈折率をそれぞれ n_1, n_2 とすると (n_1 は空気の屈折率， n_2 は液体の屈折率)，Snell の法則より以下の関係が成立する．

$$\frac{\sin r}{\sin i} = \frac{n_1}{n_2} \quad (11)$$

式 (4) 及び式 (7)–(11) より， p と q を求めることができ，その結果屈折後の光線の単位方向ベクトル $(\alpha_g, \beta_g, \gamma_g)^T$ は以下の通りとなる．

$$\begin{pmatrix} \alpha_g \\ \beta_g \\ \gamma_g \end{pmatrix} = \frac{n_1}{n_2} \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{pmatrix} + \left(\cos r - \frac{n_1}{n_2} \cos i \right) \begin{pmatrix} \lambda \\ \mu \\ \nu \end{pmatrix} \quad (12)$$

よって，変数 s を用いることで，対象物表面の点 $P : (x_p, y_p, z_p)^T$ は以下のように表現できる．

$$\begin{pmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{pmatrix} = s \begin{pmatrix} \alpha_g \\ \beta_g \\ \gamma_g \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_g \\ y_g \\ z_g \end{pmatrix} \quad (13)$$

2.3 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．レーザ光線と屈折境界面との交点 $M : (x'_g, y'_g, z'_g)^T$ は，

$$\begin{pmatrix} x'_g \\ y'_g \\ z'_g \end{pmatrix} = \frac{h + x_0 - z_0}{\gamma' - \alpha' \tan \phi} \begin{pmatrix} \alpha' \\ \beta' \\ \gamma' \end{pmatrix} \quad (14)$$

となる．ただし，

$$\begin{pmatrix} \alpha' \\ \beta' \\ \gamma' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \psi \cos \eta \\ \sin \psi \\ \cos \psi \sin \eta \end{pmatrix} \quad (15)$$

ここで， η はレーザの方向であるためキャリブレーションで求めることが可能であるが， ψ はレーザスリット光の照射角であるためキャリブレーションで求めることはできない．そこで， ψ も未知数であるとし，最終的に数値計算により値を求めることとする．

また，レーザ光線の屈折後の単位方向ベクトル $(\alpha'_g, \beta'_g, \gamma'_g)^T$ は以下になる．

$$\begin{pmatrix} \alpha'_g \\ \beta'_g \\ \gamma'_g \end{pmatrix} = \frac{n_1}{n_2} \begin{pmatrix} \alpha' \\ \beta' \\ \gamma' \end{pmatrix}$$

$$+ \left(\cos r' - \frac{n_1}{n_2} \cos i' \right) \begin{pmatrix} \lambda \\ \mu \\ \nu \end{pmatrix} \quad (16)$$

カメラからの光線追跡と同様に，レーザ光線が最終的に対象物表面に到達する点 $P : (x_p, y_p, z_p)^T$ は変数 t を用いることで以下のように算出される．

$$\begin{pmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{pmatrix} = t \begin{pmatrix} \alpha'_g \\ \beta'_g \\ \gamma'_g \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x'_g \\ y'_g \\ z'_g \end{pmatrix} \quad (17)$$

2.4 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とレーザの光線追跡結果から得られる座標値は一致する．

式 (13) と式 (17) のうち，未知数は s, t ，及び照射角 ψ であるため，これらを連立させて3個の未知数を求める．

$$s\alpha_g + x_g = t\alpha'_g + x'_g \quad (18)$$

$$s\beta_g + x_g = t\beta'_g + x'_g \quad (19)$$

$$s\gamma_g + x_g = t\gamma'_g + x'_g \quad (20)$$

ここで， ψ については三角関数の多項式となり解析的に解くことが困難であるため，数値計算で求めることとする．具体的には，式 (18) と式 (20) から s と t を求め，その値を式 (19) に代入することで，未知数が ψ のみの式を求める．この式が成立するように ψ を数値計算で求め，その値を用いて対象物の表面上の点 $P : (x_p, y_p, z_p)^T$ の座標値を求める．

3. 計測手順

3.1 計測装置のキャリブレーション

対象物の3次元計測を行う前に，カメラの像距離 f ，レーザ光線の原点 $O' : (x_0, y_0, z_0)^T$ とその方向のうち角度 η ，カメラのレンズ中心から屈折境界面までの距離 h ，屈折境界面の傾き ϕ をそれぞれ求める．

3.2 3次元形状計測

キャリブレーションを行った後，対象物表面の3次元形状計測を行う．レーザスリット光を1回照射して計測を行うと，対象物のある断面の形状を同時に求めることが可能である．従って，レーザスリット光の方向 η を連続的に変化させながら計測を行うことで，対象物の表側表面（レーザを照射することが可能な表面）の3次元位置すべてを求めることが可能である．

3.3 画像中のレーザ光線の抽出

画像中において明るさが一定以上の点にレーザ光が当たっていると判断する．画像中水平方向に複数のレーザ光が当たっていると判定された点がある場合には，それらの画素位置の重心（各点の明るさの重み付き平均）を求めることで，サブピクセル計測を行う．

4. 実験

スリット光は，波長 633nm の半導体レーザにより照射した．また，カメラの解像度は 640×480 pixel，キャリブレーションの結果像距離は 1079 pixel となった．

提案手法の有効性を検証するために、水槽の中に Fig.5 に示す一辺の長さが 40.3mm の直方体を置いて 3 次元形状計測を行い、計測精度の評価を行った。

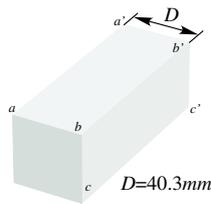


Fig.5 Rectangular object.

まず構成した計測システムの計測精度を求めるため、最初に水槽に水を張らない状態で計測を行い、その後水を張り同様に計測を行った。なお、空気中の屈折率は 1.00、水の屈折率は 1.33 とした。

精度評価は以下の方法で行った。まず、レーザスリット光を照射して撮影した画像中においてレーザ光が照射されている場所を求めた後、走査線毎にそれらの重心を計算する (Fig.6(a))。次に、それらの重心を通る最小二乗直線を計算し、端点を検出して 3 次元座標値を求める (Fig.6(b))。レーザ光を照射する角度 η を変化させて同様に端点座標値を検出し、それらの端点座標値を用いて、直方体の各辺は平行であるという制約条件を付けて最小二乗直線を求め、最終的に二辺の間の距離を求めた。



(a) Laser image. (b) Extracted lines.

Fig.6 Experimental result I.

カメラと水槽の間の距離は約 300mm であり、レーザと水槽の間の距離を 100mm から 400mm まで変化させて実験を行った。水を張らない場合と張った場合の計測誤差をそれぞれ Table 1 に示す。一辺の長さが 40.3mm の直方体の計測誤差は、水がない場合で平均誤差 0.7mm、誤差標準偏差 0.36mm、最大誤差 1.0mm であった。それに対して水がある場合にも平均 0.7mm、標準偏差 0.46mm、最大誤差 1.1mm となり、水の有無に関わらず高精度に計測可能であることが確認された。

Table 1 Accuracy of 3-D measurement.

Situation	Ave.	SD.	Max.
Without water	0.7mm	0.36mm	1.0mm
With water	0.7mm	0.46mm	1.1mm

また、レーザスリット光の方向 η を変化させて対象物表面の 3 次元座標値の計測を連続的に行った結果の例を Fig.7 に示す。

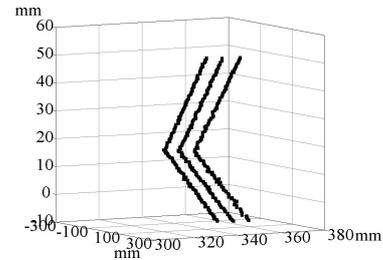


Fig.7 Experimental result II.

以上により、光線の追跡を行い計測を行うことにより、屈折率が変化する場合にも変化しない場合と同様、高精度に対象物の 3 次元形状が計測可能であることが確認された。

5. 結論

本研究では、レーザスリット光を用いて水中物体の 3 次元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により、屈折率の変化の影響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、実験結果より高精度に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、任意形状の屈折境界面への対応や、屈折率や屈折境界面形状が未知への対応などが挙げられる。

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

- 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).
- 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).
- 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).
- 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).
- 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).
- 山下 淳, 林本 悦一, 金子 透, 川田 善正: "円筒状透明容器中における水中物体のレーザ光による 3 次元形状計測," 第 9 回画像センシングシンポジウム講演論文集, pp.63-68, (2003).
- 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*, (2003), to appear.