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[†]

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

Atsushi YAMASHITA, Hirokazu HIGUCHI and Toru KANEKO

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 light refraction 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: 3-D 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自律ロボットあるいは人間が作業を行う 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¹⁾.

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,容器の半分まで水 を注ぎ,容器内に角柱を置いた例を図2に示す.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.

海中ロボット用の3次元計測センサとしては,現在は主に 超音波が用いられている²⁾³⁾.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,比較的近距離に存在 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,超音波センサに 加えて画像センサを用いることが有効である⁴⁾⁵⁾.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

- ** 正 会 員 静岡大学(静岡県浜松市城北 3-5-1)
- *** 静岡大学(静岡県浜松市城北 3-5-1)



(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)

変化する環境における物体計測は重要である.

そこで,CCD カメラを用いて水中物体の計測を行う手法が 提案されている^{5)~8)}.河村らは,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⁶⁾.ただし,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.ステレオカメラを用いて水中物体の計測を行う手法 も提案されているが⁵⁾⁷⁾⁸⁾,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い.従っ て,対象物全体の形状を詳細に計測することは非常に困難で あるという問題がある.

そこで対応点検出の問題を解決するために,水中物体にレー ザスポット光を投影し,その様子をカメラを用いて観測するこ とで水中物体の形状を計測する手法も提案されている^{4)9)~15)}. 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

^{*} 原稿受付 平成 18 年 6 月 7 日

[†] 正 会 員 静岡大学(静岡県浜松市城北 3-5-1)

ただし,必ずしも所望の物理量の空間的な分布が定量的に求まる とは限らない.



Fig. 3 3-D measurement with laser range finders



Fig. 4 Overview of 3-D measurement

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(図3(a)).

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(図3(b)).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(図4).

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(図5).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¹³⁾¹⁵⁾.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.

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(図 6).



Fig. 5 Laser slit light



Fig. 6 Principle of 3-D measurement

屈折境界面(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光照射角 ψ と呼ぶこととする(図 5).

カメラ座標系において,K: $(x_g, y_g, z_g)^T$ をカメラから の光線と屈折境界面の交点,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境界面の交点, 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軸と屈折境界面の交点とする.

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境界面までの距離,φをX軸と屈折境界面とのなす角度,θを屈折境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 をそれぞれ屈折境界面に入射したカメラからの光線の入射角, 屈折角,i',r'をそれぞれ屈折境界面に入射したレーザ光線の入射角,屈折角, 面折角とする.

また, $(\lambda, \mu, \nu)^T$ を屈折境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.

なお,光線は空気,水槽(ガラス),水を通過するため,厳 密には空気-ガラス間,及びガラス-水間の2箇所で屈折す る.本論文では平面で厚さが薄い水槽を使用したためガラス

記号 ^T は転置を表す

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.レン ズ中心と画像面との距離は Image distance と呼ばれる¹⁶⁾(日本語で は像距離とも呼ばれることがある).

での屈折の影響がほとんど無視できることから,空気中から 水中へ光線が直接進入するものとした.ただし,水槽形状が 円筒など平面でない場合には,水槽面での光の屈折の影響が 大きく無視できないものになることから,これらを厳密に考 慮する必要がある^{13)~15)19)20)}.

2.2 カメラからの光線追跡 5)

本研究では, ピンホールカメラモデル¹⁷⁾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 $(u, v)^T$ は,以下の式で世界座標系 $(x, y, z)^T$ に変換できる.

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

ここで,f は像距離, a_{ij} はカメラパラメータである.

カメラからの光線の単位ベクトル $(\alpha,\beta,\gamma)^T$ は , 以下のように表される .

$$\begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + f^2}} \begin{pmatrix} x \\ y \\ f \end{pmatrix}.$$
 (2)

また,屈折境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.

$$\begin{pmatrix} \lambda \\ \mu \\ \nu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin\phi \\ 0 \\ \cos\phi \end{pmatrix}, \tag{3}$$

 α , β , γ , ϕ 及び h を用いると,屈折境界面とカメラからの光線の交点 $K:(x_g, y_g, z_g)^T$ は,

$$\begin{pmatrix} x_g \\ y_g \\ z_g \end{pmatrix} = \frac{h}{\gamma - \alpha \tan \phi} \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{pmatrix}.$$
 (4)

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,屈折境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.

$$\begin{pmatrix} \alpha_g \\ \beta_g \\ \gamma_g \end{pmatrix} = p \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{pmatrix} + q \begin{pmatrix} \lambda \\ \mu \\ \nu \end{pmatrix}, \tag{5}$$

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,屈折境界面の単位法線ベクトル $(\lambda, \mu, \nu)^T$ に関して,

$$\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2 = 1, \tag{6}$$

$$\lambda^2 + \mu^2 + \nu^2 = 1, \tag{7}$$

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.

$$\cos i = \alpha \lambda + \beta \mu + \gamma \nu, \tag{8}$$

$$\sin^2 i = (\beta \nu - \gamma \mu)^2 + (\gamma \lambda - \alpha \nu)^2 + (\alpha \mu - \beta \lambda)^2.$$
(9)

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.

$$\cos r = \alpha_g \lambda + \beta_g \mu + \gamma_g \nu, \tag{10}$$

$$\sin^2 r = (\beta_g \nu - \gamma_g \mu)^2 + (\gamma_g \lambda - \alpha_g \nu)^2 + (\alpha_g \mu - \beta_g \lambda)^2.$$
(11)

更に,光の屈折前後の領域における屈折率をそれぞれ n₁, n₂ とすると(n₁ は空気の屈折率, n₂ は液体の屈折率), Snell の法則より以下の関係が成立する.

$$\frac{\sin r}{\sin i} = \frac{n_1}{n_2}.$$
 (12)

式 (5) 及び式 (8)–(12) より, $p \ge q$ 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.

$$\begin{pmatrix} \alpha_g \\ \beta_g \\ \gamma_g \end{pmatrix} = \frac{n_1}{n_2} \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{pmatrix} + \left(\cos r - \frac{n_1}{n_2}\cos i\right) \begin{pmatrix} \lambda \\ \mu \\ \nu \end{pmatrix}.$$
 (13)

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.

$$\begin{pmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{pmatrix} = s \begin{pmatrix} \alpha_g \\ \beta_g \\ \gamma_g \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_g \\ y_g \\ z_g \end{pmatrix}.$$
 (14)

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,

$$\begin{pmatrix} x'_{g} \\ y'_{g} \\ z'_{g} \end{pmatrix} = \frac{h + x_{0} - z_{0}}{\gamma' - \alpha' \tan \phi} \begin{pmatrix} \alpha' \\ \beta' \\ \gamma' \end{pmatrix}, \quad (15)$$

となる.ただし,

$$\begin{pmatrix} \alpha' \\ \beta' \\ \gamma' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\psi\cos\eta \\ \sin\psi \\ \cos\psi\sin\eta \end{pmatrix}.$$
 (16)

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光照射 角(図5)であるためキャリプ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 $(\alpha'_g,\beta'_g,\gamma'_g)^T$ は以下のようになる .

$$\begin{pmatrix} \alpha'_{g} \\ \beta'_{g} \\ \gamma'_{g} \end{pmatrix} = \frac{n_{1}}{n_{2}} \begin{pmatrix} \alpha' \\ \beta' \\ \gamma' \end{pmatrix} + \left(\cos r' - \frac{n_{1}}{n_{2}}\cos i'\right) \begin{pmatrix} \lambda \\ \mu \\ \nu \end{pmatrix}.$$
(17)

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.

$$\begin{pmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{pmatrix} = t \begin{pmatrix} \alpha'_g \\ \beta'_g \\ \gamma'_g \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x'_g \\ y'_g \\ z'_g \end{pmatrix}.$$
 (18)

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 (14) と式 (18) のうち, 未知数は s, t, 及び光照射角 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.

$$s\alpha_g + x_g = t\alpha'_g + x'_g, \tag{19}$$

$$s\beta_g + x_g = t\beta'_g + x'_g, \tag{20}$$

$$s\gamma_g + x_g = t\gamma'_g + x'_g. \tag{21}$$

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(19)と式(21)を連立させて解くことにより,sとtを他の変数で表現し,その値を式(20)に代入することで, 未知数が ψ のみの式(22)を求める.

$$n_{1}\sin\psi(\alpha_{g}(a_{3}a_{4} + a_{5}a_{6}) - a_{5}(\alpha_{g}a_{6}\gamma_{g}a_{4})) - n_{2}a_{4}(\beta_{g}(a_{3}a_{4} + a_{5}a_{6}) + y_{g}(\alpha_{g}a_{6} + \gamma_{g}a_{4})) - (\alpha_{g}a_{6} - \gamma_{g}a_{4})(a_{2}\sin\psi + y_{0})) = 0, \quad (22)$$

ただし,

$$a_{1} = \frac{n_{1}}{n_{2}} \cos \psi \sin(\eta - \phi) \\ -\sqrt{1 - \frac{n_{1}^{2}}{n_{2}^{2}} (1 - \cos^{2} \psi \sin^{2}(\eta - \phi))}, \quad (23)$$

$$a_2 = \frac{z_0 - h - x_0 \tan \phi}{\alpha' \tan \phi - \gamma'}, \qquad (24)$$

$$a_3 = z_g - a_2 \cos \psi \sin \eta - z_0, \qquad (25)$$

$$a_4 = \frac{n_1}{2} \cos \psi \cos \eta + a_4 \sin \phi \qquad (26)$$

$$a_4 = \frac{n_1}{n_2} \cos \psi \cos \eta + a_1 \sin \phi, \qquad (26)$$

$$a_5 = a_2 \cos \psi \cos \eta + x_0 - x_g, \tag{27}$$

$$a_6 = \frac{1}{n_2} \cos \psi \sin \eta - a_1 \cos \phi. \tag{28}$$

式 (22) が成立するように ψ を数値計算で求め,その値を 用いて s を t を計算し,最終的に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.

具体的には,まず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し複数枚の画像を取得する.これらの画 像中の既知パターンの位置関係から,像距離などカメラの内 部パラメータを求めることができる¹⁸⁾.また,水槽面に同様 の平面を貼り付けて撮影した画像から,カメラのレンズ中心 と屈折境界面の位置関係を求めることができる.

次に,レーザ光線の原点と方向を求める.レーザのキャリ プレーション時にはスポット光を照射することとし,水槽面 に紙で覆ってレーザが透過しないようにしておく.レーザ光



Fig. 8 Rectangular object

線の方向を既知量だけ変化させて水槽面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,レーザ光線の原点と方向を求める¹⁵⁾.

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が計測可能となる. 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

エピポーラ拘束¹⁷⁾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,レーザの原点から最も距離が遠 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.

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 640×480pixel,キャリプレーション の結果像距離は 1079pixel となった.

CCD カメラを用いて得られる画像は画像入力ボードを用いて計算機に取り込む.1 枚の画像を処理するための計算時間は,一般的な計算機(CPU: Pentium III, Memory: 256MB, OS: Windows2000)を使用して1秒以内であった.

提案手法の有効性を検証するために,水槽の中に図8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.

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,空気の屈折率は1.00,水の屈折率 は1.33とした*.

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図 9 に示す.こ の例はレーザの方向を 3 回変化させた際の計測結果を示した

^{*}屈折率の小数点以下第3位が最終的な計測精度に与える影響は, キャリブレーションや画像処理の誤差等が計測精度に与える影響と比 較すると1桁以上小さい.



Fig. 9 Experimental result



(a) Laser image (b) Extracted lines Fig. 10 Shape reconstruction

ものであるが,1回のレーザ照射毎にそれぞれ線状の範囲が計 測可能であることが確認できる.

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(図 10(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(図10(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.

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150mm間隔で3段階 に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表1に示す.計測回数は9回(各地点で の計測回数は3回ずつ)である.表中の平均誤差(Ave.error) は各計測結果と真値40.3mmの差の絶対値に関して全データ の平均を計算したものであり、誤差標準偏差(SD.error)は測 定値のばらつき、最大誤差(Max.error)は全計測結果のうち 最も大きい誤差の絶対値を示している.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.

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,屈折率や屈折境界面形状が未知の場合¹⁴⁾¹⁹⁾や視野中に気泡などのノイズが存在する場合²⁰⁾への対応が挙げられる.

Table 1 Accuracy of 3-D measurement

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

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.

参考文献

- 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*, (2004) 2736.
- Behzad Kamgar-Parsi, Lawrence J. Rosenblum and Edward O. Belcher: "Underwater Imaging with a Moving Acoustic Lens," *IEEE Transactions on Image Processing*, 7, 1, (1998) 91.
- 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*, 20, 1, (1998) 9.
- Robert F. Tusting and Daniel L. Davis: "Laser Systems and Structured Illumination for Quantitative Undersea Imaging," *Marine Technology Society Journal*, 26, 4, (1992) 5.
- 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*, 22, 2, (1997) 364.
- 河村 拓史,斎藤 英雄,中島 真人: "時空間画像解析による水中物体の3次元形状計測,"計測自動制御学会論文集, 32, 4, (1996) 607.
- 7) 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, J84-D-II, 12, (2001) 2684.
- 相良 慎一, 池内 裕明, 大和 大, 坂上 憲光, 武村 史朗: "UVMS 用捕 獲物位置・姿勢計測システムの水中基礎実験,"日本機械学会ロボ ティクス・メカトロニクス講演会'06 講演論文集, 1P1-E22, (2006).
- Bryan W. Coles: "Recent Developments in Underwater Laser Scanning Systems," SPIE 980 Underwater Imaging, (1988) 42.
- 10) 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, (1997) 629.
- 11) 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, 36, 5, (1997) 24.
- 12) Hayato Kondo and Tamaki 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) 412.
- 13) 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) 1578.
- 14) 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*, (2005) 3923.
- 15) 山下淳,林本悦一,金子透: "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,"日本機械学会論文集(C編),72,717, (2006) 1506.
- 16) S. G. Lipson, H. Lipson and D. S. Tannhauser: *Optical Physics Third Edition*, Cambridge University Press, (1995).
- 17) 出口 光一郎: ロボットビジョンの基礎, コロナ社, (2000).
- 18) Roger Y. Tsai: "A Versatile Camera Calibration Technique for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-Shelf TV Cameras and Lenses," *IEEE Journal of Robotics and Automation*, RA-3, 4, (1987) 323.
- 19) 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3次元計測,"日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'05 講演論文集,1A1-N-079,(2005).
- 20) Atsushi Yamashita, Susumu Kato and Toru 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) 928.