

# 空間コード化法を用いた水槽中物体の形状計測

## Shape Measurement of Objects in a Water Tank Using a Space Encoding Method

河井良平, 山下 淳, 金子 透

Ryohei KAWAI Atsushi YAMASHITA Toru KANEKO

静岡大学工学部機械工学科

Department of Mechanical Engineering, Shizuoka University

tayamas@ipc.shizuoka.ac.jp

### Abstract

カメラ画像を用いた形状計測は非接触や広範囲の同時計測などの利点を持つ。しかし、対象物体が水中にある場合には光の屈折の影響で実際とは異なる位置に対象が見えるため、カメラ画像を用いて水中物体を計測する場合、光の屈折を考慮する必要がある。従来の水中計測手法のうち、ステレオカメラを用いた方法には対応点探索に手間がかかるという問題が、スポット光投影法やスリット光投影法には多くの画像が必要となるなどの問題がある。これらの問題を解決するために、本研究では光の屈折を考慮するとともに、空間コード化法を用いることで水中物体の3次元形状を計測する手法を提案する。実験結果から提案手法の有効性を示す。

## 1. 序論

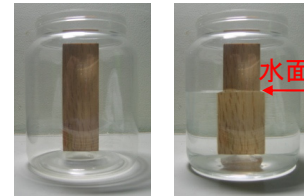
### 1.1 背景

水中物体の形状計測の用途として、海中環境での計測や液中に保存されたサンプルの計測などが挙げられる。水中物体を計測する場合、水中に固定されている対象物体はもちろん、固定されていない対象物体でも水中から取り出す際に損傷させる危険性があるため、水中に置かれた状態で形状計測を行うことが望ましい場合が多い。

3次元形状を計測する方法の1つにカメラ画像を用いる方法があり、対象物体に接触せずに計測できる、撮影範囲内に存在する複数の対象物体を同時に計測できるといった利点を持つ。しかし、カメラ画像による形状計測を水中に存在する対象物体に対して行う場合、光の屈折の問題が生じる。空気中から水中にある物体を撮影すると、空気と水の境界で光の屈折が生じ、実際とは異なった位置に対象物が写る。

容器に入った直方体の木片が水のある場合とない場合で見え方が異なる例を図1に示す。歪んだ画像を用いて形状計測を行うと正確な形状は得られない。この問

題は水中物体を水の外から撮影する場合だけでなく、カメラに防水のための保護容器を取り付けて水中に沈めて水中物体を撮影する場合にも発生する。それは保護容器の中が空気で満たされており、空気と保護容器の境界および保護容器と水の境界で光の屈折が生じるからである。



(a)水なし (b)水あり

図1 光の屈折の影響

### 1.2 従来研究

光の屈折の問題を解決する方法の1つに光線追跡がある。即ち、カメラからの光線の屈折前の方向、屈折点の位置、屈折後の方向を求めることで、光の屈折の影響がない正確な形状を得ることができる。

光線追跡を用いたカメラ画像による水中物体の形状計測の従来手法として、ステレオカメラを用いた方法が提案されている[1][2]。ステレオカメラを用いた水中物体計測は、複数の視点から水中物体を撮影し、三角測量の原理を用いて、水中物体の形状を計測する。この手法はそれぞれの視点で1枚ずつカメラ画像を取得するだけで計測が可能であるが、対応点探索に手間がかかるという問題もある。

また、従来手法としてスポット光投影法[3][4]やスリット光投影法[5][6]を用いたものも提案されている。スポット光投影法はスポット光を、スリット光投影法はスリット光を対象物体に投影し、それをカメラで撮影することで形状計測を行う。スポット光投影法は1枚の画像から1点の座標、スリット光投影法は1枚の画像から線1本分の座標しか求まらないため、対象物体全体を計測するには時間がかかるという問題がある。

### 1.3 目的

本研究では、前項で述べた手法の問題を解決するために、パターン光を投影する種々の方式[7]のうち、対応点決定が単純な論理で実現できる空間コード化法を用いて水中物体の形状計測を行う。

空間コード化法とは、対象物体に2値パターン光を投影し、それをカメラで撮影することで形状を求める手法である。この手法はスポット光投影法やスリット光投影法に比べて撮影画像数を削減できるため空気中での形状計測には広く利用されている。

そこで本研究では、光の屈折の影響を考慮した水中物体の形状計測が可能な空間コード化法について検討する(図2)。

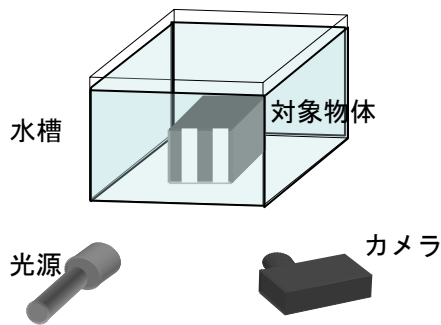


図2 空間コード化法を用いた水中物体計測の略図

## 2. 計測原理

### 2.1 パラメータの解説および前提条件

本研究では、空気中に設置したカメラおよび光源を用いて、水槽中の対象物体の形状計測を空間コード化法によって行う。計測モデルを図3に示す。

図3において、座標系は、カメラのレンズ中心を原点とし、カメラの正面方向をZ軸、Z軸に垂直でかつ水平面に平行な方向をX軸、Z軸および水平面に垂直な方向をY軸とする。

本研究での前提条件を以下に示す。

- カメラ、光源は水平面に対して平行に設置されている。
- 水槽ガラス面は水平面に対して垂直である。
- 各空間コードのなす平面が屈折前は水平面に対して垂直である。

また、図3において、

$O(0,0,0)$ :カメラのレンズ中心

$P(X_P, Y_P, Z_P)$ :光源の位置

$T(X_T, Y_T, Z_T)$ :対象物体表面の1点

$I(X_I, Y_I, Z_I)$ :撮影されたTの結像面上での位置

$A(X_A, Y_A, Z_A)$ :カメラ光線と水槽ガラス面の交点

$B(X_B, Y_B, Z_B)$ :投影光と水槽ガラス面の交点

$C(X_C, Y_C, Z_C)$ :Z軸と水槽ガラス面の交点

$i$ :カメラ光線の入射角

$r$ :カメラ光線の屈折角

$i'$ :投影光の入射角

$r'$ :投影光の屈折角

$f$ :カメラの像距離(カメラのレンズ中心から結像面までの距離)

$h$ :カメラのレンズ中心から水槽ガラス面までの距離

$\phi$ :X軸と水槽ガラス面のなす角

$\vec{pd}=(X_{pd}, Y_{pd}, Z_{pd})^T$ :光源の投影中心方向の単位ベクトル

とする。

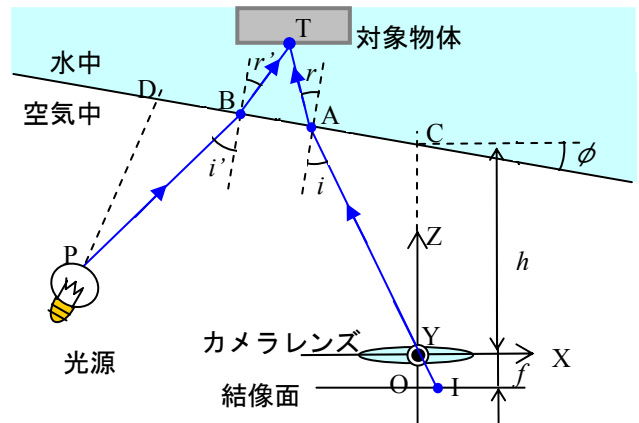


図3 計測モデル

対象物体表面Tの座標を求めるためにカメラの内部パラメータ、カメラと水槽ガラス面の位置関係、カメラと光源の位置関係、光源の投影中心方向を事前に校正しておく必要がある。具体的には、 $f, h, \phi, X_P, Y_P, Z_P, X_{pd}, Z_{pd}$ を事前に校正する。以下に校正方法を述べる。

カメラの内部パラメータについては、四角の内枠に7×7の円形マークを持つ校正用テーブルを用意し、その校正用テーブルをそれぞれ異なる位置、姿勢から複数回撮影し、その画像群の円形マークの位置関係を用いて校正を行う。また、校正用テーブルを水槽ガラス面に貼り付け、それをカメラで撮影することでカメラと水槽ガラス面の位置関係の校正を行う。

次にカメラと光源の位置関係の校正を行う。水槽ガラス面にスクリーンを貼り付け、光源からスクリーンに向けて、投影中心方向および投影中心方向からある程度ずらした方向にスポット光を照射する。それをカメラで撮影した後、スクリーンを光軸方向に既知量だけ移動して同様の撮影を行い、撮影画像を用いて校正を行う。

空間コード化法による水中物体計測の手順は、まず対象物体にいくつかのパターンの異なる2値パターン光を投影し、それをカメラで撮影、撮影画像群から空間コードを作成する。カメラからの光線と空間コードを追跡

すると、空気と水の境界で屈折を起こし、その後、対象物体表面で2つの光線が交わる。スネルの法則を用いて屈折後の光線の方向を求めることで、対象物体表面の座標が求まる。以下に T の座標を求める計算手順を示す。

## 2.2 カメラからの光線追跡

まず、カメラからの光線についての光線追跡を行う。

撮影画像と像距離から  $\vec{IO} = (X_{IO}, Y_{IO}, Z_{IO})^T$  が求まり、 $\vec{OA}$  と  $\vec{IO}$  は同一線上にあるため、 $\vec{OA}$  は変数  $a$  を用いて、

$$\vec{OA} = a\vec{IO} = (X_{OA}, Y_{OA}, Z_{OA})^T \quad (1)$$

と表される。また  $\vec{OA}$  は以下の式も満たす。

$$Z_{OA} = h + X_{OA} \tan(\pi + \phi) \quad (2)$$

式(1)、式(2)より、

$$a = \frac{h}{Z_{IO} - X_{IO} \tan(\pi + \phi)} \quad (3)$$

$$\vec{OA} = \frac{h}{Z_{IO} - X_{IO} \tan(\pi + \phi)} \vec{IO} \quad (4)$$

となり、 $\vec{OA}$  が求まる。ここで  $\vec{oa}$  と  $\vec{v}$  の内積を求める。ただし、 $\vec{oa}$  は  $\vec{OA}$  の単位ベクトルであり、 $\vec{v} = (\cos(\phi + \pi/2), 0, \sin(\phi + \pi/2))^T$  は水槽ガラス面の単位法線ベクトルである。

$$\vec{oa} \cdot \vec{v} = \cos i \quad (5)$$

次に  $\vec{at}$  と  $\vec{v}$  の内積を求める。ただし、 $\vec{at} = (X_{at}, Y_{at}, Z_{at})^T$  は  $\vec{AT}$  の単位ベクトルである。

$$\vec{at} \cdot \vec{v} = \cos r \quad (6)$$

また、 $\vec{oa}$ 、 $\vec{v}$ 、 $\vec{at}$  は同一平面状に存在するため、変数  $b$ 、 $c$  を含めて、以下の関係が成り立つ。

$$\vec{at} = b\vec{oa} + c\vec{v} \quad (7)$$

ここで、式(6)、式(7)より、

$$\vec{at} \cdot \vec{v} = b\vec{oa} \cdot \vec{v} + c = \cos r \quad (8)$$

となる。式(7)を用いて  $\vec{at}$  と  $\vec{v}$  の外積の大きさを求める。

$$|\vec{at} \times \vec{v}| = |b\vec{oa} \times \vec{v}| = \sin r \quad (9)$$

また、 $\vec{oa}$  と  $\vec{v}$  の外積の大きさも求める。

$$|\vec{oa} \times \vec{v}| = \sin i \quad (10)$$

式(9)、式(10)および下式に示すスネルの法則より  $b$  が求まる。

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

$$b = \frac{\sin r}{\sin i} = \frac{1}{n} \quad (12)$$

となる。式(8)、式(12)より、

$$c = \cos r - b\vec{oa} \cdot \vec{v} = \cos r - \frac{1}{n} \cos i \quad (13)$$

となる。よって、式(7)、式(12)、式(13)より、 $\vec{at}$  が求まる。

$$\vec{at} = \frac{1}{n} \vec{oa} + \left\{ \cos r - \frac{1}{n} \cos i \right\} \vec{v} \quad (14)$$

このとき、 $\cos i$  と  $\cos r$  は以下のようにになる。

$$\cos i = \vec{oa} \cdot \vec{v} \quad (15)$$

$$\cos r = \sqrt{1 - \frac{1}{n^2} (1 - \cos^2 i)} \quad (16)$$

## 2.3 投影光の光線追跡

本研究では縦縞のパターン光を用いており、1つ1つの空間コードは図4のような縦スリット状をしている。また、縦スリット状の空間コードがスポット光線の集合として考える。ただし、実際にはスリットに幅があるため、スリットの幅方向の中央を計測に用いることにする。

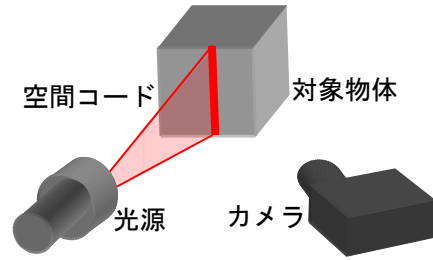


図4 縦スリット状の空間コード

$\vec{OB} = (X_{OB}, Y_{OB}, Z_{OB})^T$  は変数  $d$  を用いて以下のよう

$$\vec{OB} = \vec{OP} + \vec{PB} = \vec{OP} + d\vec{pb} \quad (17)$$

ただし、ここではまだ  $\vec{pb}$  の Y 成分については未知のままである。

また  $\vec{OB}$  は以下の式も満たす。

$$Z_{OB} = h + X_{OB} \tan(\pi + \phi) \quad (18)$$

ここで、式(17)、式(18)より、

$$d = \frac{Z_{OP} - h - X_{OP} \tan(\pi + \phi)}{X_{pb} \tan(\pi + \phi) - Z_{pb}} \quad (19)$$

$$\vec{OB} = \vec{OP} + \frac{Z_{OP} - h - X_{OP} \tan(\pi + \phi)}{X_{pb} \tan(\pi + \phi) - Z_{pb}} \vec{pb} \quad (20)$$

となり、 $\vec{OB}$  が求まる。ここで  $\vec{pb}$  と  $\vec{v}$  および  $\vec{bt}$  と  $\vec{v}$  の内積を求める。ただし、 $\vec{bt} = (X_{bt}, Y_{bt}, Z_{bt})^T$  は  $\vec{BT}$  の単位ベクトルである。

$$\vec{pb} \cdot \vec{v} = \cos i' \quad (21)$$

$$\vec{bt} \cdot \vec{v} = \cos r' \quad (22)$$

また、 $\vec{pb}$ ,  $\vec{v}$ ,  $\vec{bt}$  は同一平面状に存在するため、変数  $e, f$  を含めて、以下の関係が成り立つ。

$$\vec{bt} = e\vec{pb} + f\vec{v} \quad (23)$$

ここで、式(22), 式(23)より、

$$\vec{bt} \cdot \vec{v} = e\vec{pb} \cdot \vec{v} + f = \cos r' \quad (24)$$

となる。式(23)を用いて  $\vec{bt}$  と  $\vec{v}$  の外積の大きさを求める。

$$|\vec{bt} \times \vec{v}| = |e\vec{pb} \times \vec{v}| = \sin r' \quad (25)$$

また、 $\vec{pb}$  と  $\vec{v}$  の外積の大きさも求める。

$$|\vec{pb} \times \vec{v}| = \sin i' \quad (26)$$

ここで、式(25), 式(26)より、

$$|e\vec{pb} \times \vec{v}| = e \sin i' = \sin r' \quad (27)$$

$$e = \frac{\sin r'}{\sin i'} = \frac{1}{n} \quad (28)$$

となる。式(21), 式(24)より、

$$f = \cos r' - e\vec{pb} \cdot \vec{v} = \cos r' - \frac{1}{n} \cos i' \quad (29)$$

となる。よって、式(23), 式(28), 式(29)より、 $\vec{bt}$  が求まる。

$$\vec{bt} = \frac{1}{n} \vec{pb} + \left\{ \cos r' - \frac{1}{n} \cos i' \right\} \vec{v} \quad (30)$$

このとき、 $\cos i'$  と  $\cos r'$  は以下のようになる。

$$\cos i' = \vec{pb} \cdot \vec{v} \quad (31)$$

$$\cos r' = \sqrt{1 - \frac{1}{n^2} (1 - \cos^2 i')} \quad (32)$$

## 2.4 3次元座標の計算

カメラからの光線および投影光の光線追跡の結果を用いて、対象物体の座標を求める。

対象物体の座標  $\vec{OT} = (X_{OT}, Y_{OT}, Z_{OT})^T$  は変数  $g, k$  を用いて以下のように表せる。

$$\vec{OT} = \vec{OA} + g\vec{at} = \vec{OB} + k\vec{bt} \quad (33)$$

ここで、式(33)を成分毎に分解する。

$$X_{OT} = X_{OA} + gX_{at} = X_{OB} + kX_{bt} \quad (34)$$

$$Y_{OT} = Y_{OA} + gY_{at} = Y_{OB} + kY_{bt} \quad (35)$$

$$Z_{OT} = Z_{OA} + gZ_{at} = Z_{OB} + kZ_{bt} \quad (36)$$

3つの未知数  $Y_{pb}, g, k$  に対し、式(34), 式(35), 式(36)の3つの方程式があるため、式(34), 式(35), 式(36)を連立することで  $Y_{pb}, g, k$  を求める。これにより  $\vec{OT}$  が求まる。

以上の計算を全ての計測点について行うことで、対象物体の3次元形状が求まる。

## 3. 実験

### 3.1 実験系の構成

実験の様子を図5に示す。光源としてプロジェクタを用い、撮影画像の解像度は  $3072 \times 2304$  pixel とした。また、対象物体として単純な形状のもの(図6(a)に示す白色の五角柱)、複雑な形状のもの(図6(b)に示すほぼ単色のカエルの置物)、複雑な形状でかつ複雑な配色のもの(図6(c)に示す多色なカエルの置物)を用意した。

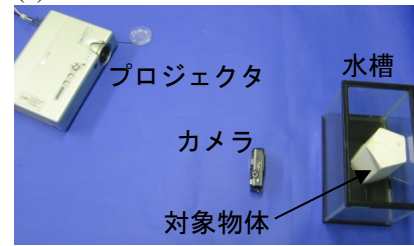


図5 実験系の構成



(a)五角柱 (b)色なしカエル (c)色つきカエル

図6 対象物体

五角柱は高さ170mm、断面が1辺67mmの正五角形であり、カエルの置物は高さ約130mmである。これらの対象物体をカメラから約300mmの距離に設置した。

### 3.2 実験手順

まず、水槽中の対象物体に7つの2値パターン光を投影し、それぞれ撮影する。それぞれの撮影画像を適切な閾値で2値化し、2値化した画像群から空間コード化を行う。空間コードを用いて対象物体の3次元座標を計算し、形状復元を行う。

五角柱に関しては精度評価を行う。計測結果から最小二乗平面を求め、その平面の角度および最小二乗平面からの標準偏差を用いて精度評価を行う。

### 3.3 実験結果および考察

五角柱の撮影画像を図 7, 計測結果を図 8, 精度評価を表 1 に示す.

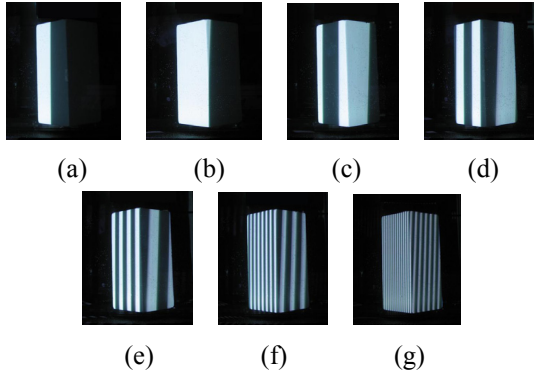


図 7 撮影画像 (五角柱)

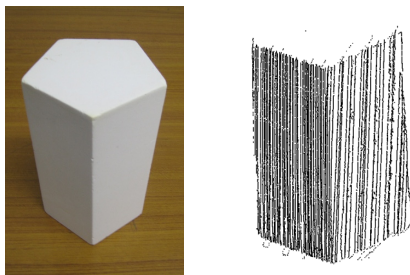


図 8 計測結果 (五角柱)

表 1 精度評価

	計測値	実際の値
角度[deg]	108.2	108
標準偏差[mm]	2.0	—

図 7 から対象物体に対して縦縞のパターンが投影されていることが確認できた. また, 図 8 からは対象物体の 2 つの平面およびその間の角度が見て取れる. そして, 表 1 により角度の誤差が  $0.2^\circ$ , 標準偏差が  $2.0\text{mm}$  の精度で計測できることが確認された.

光の屈折を考慮する場合と考慮しない場合, それぞれについて同様の精度評価を行い, 表 2 に示す.

表 2 光の屈折の考慮と無考慮の比較

	考慮	無考慮	実際の値
角度[deg]	108.2	127.8	108.0
標準偏差[mm]	2.0	1.6	—

表 2 を見ると, 光の屈折を考慮する場合に比べて, 考慮しない場合には計測角度に大きな誤差が出ていることがわかる. このことから, 光の屈折を考慮することの有効性が確認できる.

単色のカエルの置物, 多色なカエルの置物, それぞれの撮影画像を図 9, 図 10 に, 計測結果を図 11, 図 12 に示す.

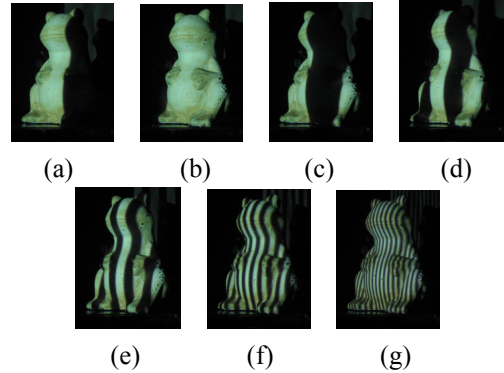


図 9 撮影画像 (色なしカエル)

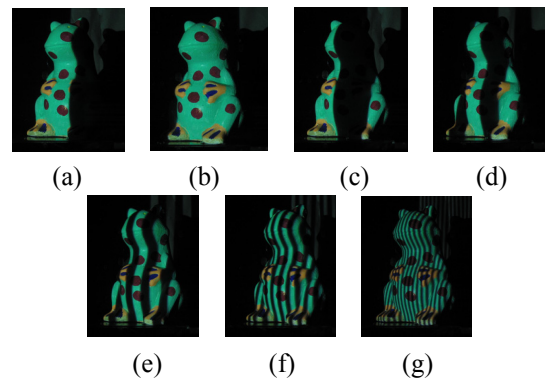


図 10 撮影画像 (色つきカエル)



図 11 計測結果 (色なしカエル)

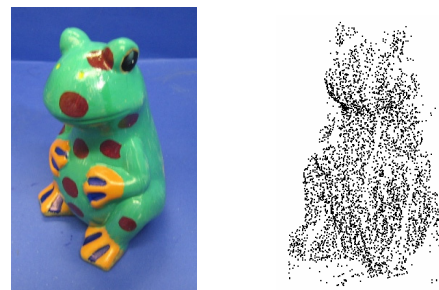


図 12 計測結果 (色つきカエル)

図 9 および図 10 から五角柱と同様に複雑な形状, 色を持つ対象物体に対しても縦縞のパターンが投影されていることが確認できた. また, 図 11 および図 12 から, 対象物体が複雑な形状, 色を持つ場合でも形状計測を

行えることが確認された。

なお、空間コード化法では1つの空間コードから線1本分の形状が得られ、今回は各空間コードの中央線を計測した。この手法では光の屈折の影響が出る可能性があるため、対象物体に空間コードの境界がより明確になるように光を投影し、各空間コードの境界を計測することでより精度の向上が望める。

#### 4. 結論

カメラ画像による形状計測法で水中物体を計測する場合、光の屈折により画像が歪むことで、正確な計測結果が得られない。この問題に対して光線追跡を行うことで光の屈折の影響のない計測が可能になる。光線追跡を用いた水中物体計測の従来研究にはスポット光投影法やスリット光投影法による手法がある。本研究では、ステレオカメラのような対応点探索の手間がなく、スポット光投影法やスリット光投影法よりも少ない撮影画像数で水中計測を行うために、光の屈折を考慮することで空間コード化法を用いて水中物体の形状を計測する手法を提案し、実験により提案手法の有効性を確認した。

今後の課題としては計測精度の向上や屈折境界面での乱反射の影響の考慮、環境光がある場合での計測、水以外の液中物体の計測などが挙げられる。

#### 謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金基盤研究(C)19560422の補助を受けた。

#### 参考文献

- [1] 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.
- [2] 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 (ICRA2006), pp.928-933, Orlando (U.S.A.), May 2006.
- [3] 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, Vol.72, No.717,

pp.1506-1513, 2006.

- [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] 山下 淳, 樋口裕和, 金子 透: “光切断法による水中物体の3次元計測,” 精密工学会誌, Vol.73, No.2, pp.265-269, 2007.
- [6] 近藤逸人, 巻 俊宏, 浦 環, 能勢義昭, 坂巻 隆, 稲石正明: “自律型ロボットによる構造物観測システム:光切断法を用いた測距システムによる相対航法,” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'04 講演論文集, pp.114-115, 2004.
- [7] 井口征士, 佐藤宏介: “三次元画像計測,” 昭晃堂, 1990.