

光の屈折を考慮した空間コード化法による水中物体の形状計測

河井 良平 山下 淳 金子 透

静岡大学工学部 〒432-8561 静岡県浜松市中区城北 3-5-1

E-mail: {f0830022,tayamas,tmtkane}@ipc.shizuoka.ac.jp

あらまし 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撮影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、光の屈折を考慮した空間コード化法による水中計測手法を筆者らは提案した。しかし、これには光の波長による屈折率の違いや投影パターン数に対する考慮がされておらず、また、各コードの中央を計測しているという問題がある。そこで本研究では緑色光投影、光源に適切な投影パターン数の設定、パターンの端の計測を行うことで、より分解能の高い空間コード化法による水中計測手法を提案する。実験結果から提案手法の有効性を示す。

キーワード 3次元計測, 光の屈折, 水中物体, 空間コード化法

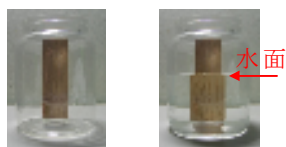
1. 序論

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の計測が望ましい場合が多い。

形状計測手法の1つにカメラ画像を用いるものがあり、対象物体に非接触なことや広範囲の同時計測といった利点を持つ。しかし、水中物体を計測する場合、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。光の屈折の影響を考慮せずに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。これは保護容器の中が空気であり、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経路を求めることで、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手法[1][2]やスポット光投影法[3][4]、スリット光投影法[5][6]を用いた手法が提案されている。ステレオカメラを用いた手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対象物体全体を計測する場合に必要な撮影画像数が多く、時間がかかるという問題がある。

これらの問題を解決するために空間コード化法による水中計測(図2)を筆者らは提案した[7]。しかし、[7]では光の波長による屈折率の違いや投影パターン数に対する考慮がされていないという問題がある。また、各コードの中央を計測しており、これでは光の屈折により誤差が生じてしまう。

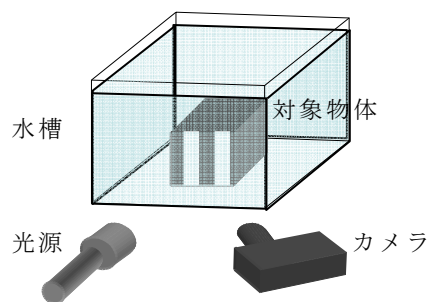


図2 空間コード化法を用いた水中物体計測の略図

1.3. 目的

本研究では、前項で述べた問題を解決するために、空間コード化法による水中計測を以下の条件で行う。

- 投影光を白色光ではなく緑色光とする
- 使用する光源に対して適切なパターン数を選択する
- 各コードの中央ではなく端を計測する

それぞれの詳細については後述する。この条件の下で計測を行うことで、より分解能の高い空間コード化法による水中計測について検討する。

2. 計測原理

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。以下ではその手法について述べる。

2.1. パターン投影

空間コード化法において、投影するパターンの枚数は分解能に大きく影響する。投影パターン数が n の場合、得られるコード数は 2^n となる。即ち、パターン数が 1 枚増えると得られるコード数は 2 倍となる。また、 n 枚の撮影画像から正確な 2^n のコードを得るには明暗の境界を明確にする必要がある。本研究では明確な明暗パターンを投影するために緑色光を用い、また光源に適切なパターン数を投影する。

投影光として[7]のような白色光ではなく緑色光を用いる。白色光は様々な波長の光によって構成される。光は波長によって屈折率が異なるため、白色光を構成する光は屈折の際に波長によって異なる方向へと屈折する。これはパターン投影の際に、各パターンの端の不明瞭さの原因となる。よって、白色光ではなく緑色光を用いることで、水中物体に対してパターンをより鮮明に投影することができる。

投影するパターン数は光源の解像度に適切なものを設定する必要がある。ここでは例として、解像度 1024×768 pixel の光源を用いて縦縞のパターンを投影する場合の説明をする。投影パターン数が n の場合、得られるコード数は 2^n となるため、1 つのコードに m pixel の幅をとると全コードで横方向に $m \times 2^n$ pixel が必要になる。1 つのコードに 1 pixel の幅をとる場合、コード数 $1024=2^{10}$ で最大となり、投影パターン数は 10 となる。縦縞の場合だけでなく、横縞や格子状のパターンの場合でも同様に考えることができる。

2.2. 明暗の判別

パターンが投影された撮影画像群をコード化する際に明暗の判別が必要になる。明暗の判別は、得られた画像をグレースケール化した後、適切な閾値で 2 値化することで行う。

2.3. 3次元座標計算

①パラメータの解説

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とする。
- 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と水槽ガラス面の距離

ϕ : X 軸と水槽ガラス面のなす角

$\vec{pd} = (X_{pd}, Y_{pd}, Z_{pd})^T$: 投影中心方向単位ベクトルとする。

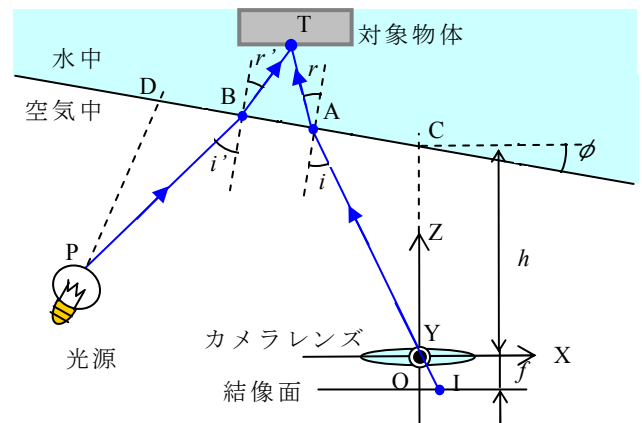


図 3 計測モデル

対象物体表面座標 T を求めるためにカメラ内部パラメータ、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、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 , ϕ , 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。水槽ガラス面および水槽ガラス面から既知量だけ移動した場所にスクリーンを用意し、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、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カメラからの光線追跡

撮影画像と像距離から $\vec{IO} = (X_{IO}, Y_{IO}, Z_{IO})$ 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、

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

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。

\vec{oa} は \vec{OA} の単位ベクトル、 $\vec{at} = (X_{at}, Y_{at}, Z_{at})$ は \vec{AT} の単位ベクトル、 $\vec{v} = (\cos(\phi + \pi/2), 0, \sin(\phi + \pi/2))$ は水槽ガラス面の単位法線ベクトルとすると、 \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。

$$\vec{at} = b\vec{oa} + c\vec{v} \quad (5)$$

ここで \vec{at} と \vec{v} の内積および外積を求める。

$$\vec{at} \cdot \vec{v} = b\vec{oa} \cdot \vec{v} + c = \cos r \quad (6)$$

$$\vec{at} \times \vec{v} = |b\vec{oa} \times \vec{v}| = \sin r \quad (7)$$

式(6), 式(7)および以下に示すスネルの法則より b および c が求まる。ただし、 n は水の屈折率である。

$$\frac{\sin r}{\sin i} = \frac{1}{n} \quad (8)$$

$$b = \frac{1}{n} \quad (9)$$

$$c = \cos r - b\vec{oa} \cdot \vec{v} = \cos r - \frac{1}{n} \cos i \quad (10)$$

よって、 \vec{at} が求まる。

$$\vec{at} = \frac{1}{n} \vec{oa} + \left\{ \cos r - \frac{1}{n} \cos i \right\} \vec{v} \quad (11)$$

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、カメラからの光線と交わる光線について光線追跡を行う。

実際にはスリットには幅があるため、各スリットの端を計測に用いることにする。[7]ではスリットの中央を計測に用いていたが、水中の対象物体表面でのスリットの中央に届く光線が、光源から出射されるスリットの中央の光線だという保証はなく、光の屈折の影響を受けることになる。これに対して水中の対象物体表面でのスリットの端に届く光線は光源から出射されるスリットの端であるため光の屈折の影響を受けない。よって、本研究では光の屈折の影響を受けないように各スリットの端を計測する。

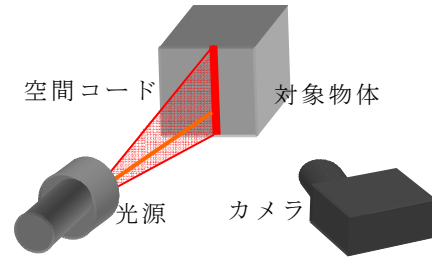


図4 縦スリット状の空間コード
投影光はカメラからの光線と同様に追跡できる。

$$\vec{bt} = \frac{1}{n} \vec{pb} + \left\{ \cos r' - \frac{1}{n} \cos i' \right\} \vec{v} \quad (12)$$

$$\cos i' = \vec{pb} \cdot \vec{v} \quad (13)$$

$$\cos r' = \sqrt{1 - \frac{1}{n^2} (1 - \cos^2 i')} \quad (14)$$

ただし、 $\vec{bt} = (X_{bt}, Y_{bt}, Z_{bt})$ は \vec{BT} の単位ベクトルとする。 \vec{pb} はカメラ光線と交わる光源からのスポット光線であるが、そのY成分(Y_{pb})はここでは未知のパラメータとなる。

2.4.3 次元座標の算出

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

$$\vec{OT} = \vec{OA} + d\vec{at} = \vec{OB} + e\vec{bt} \quad (15)$$

式(15)を成分ごとに分解する。

$$X_{OT} = X_{OA} + dX_{at} = X_{OB} + eX_{bt} \quad (16)$$

$$Y_{OT} = Y_{OA} + dY_{at} = Y_{OB} + eY_{bt} \quad (17)$$

$$Z_{OT} = Z_{OA} + dZ_{at} = Z_{OB} + eZ_{bt} \quad (18)$$

3つの未知数 Y_{pb} , d , e に対し、式(16), 式(17), 式(18)の3つの方程式があるため、式(16), 式(17), 式(18)を連立することで Y_{pb} , d , e 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、カメラの解像度は3072×2304pixel、プロジェクタの解像度は1024×768pixelとした。また、対象物体として高さ170mm、断面が1辺67mmの白色の正五角形を用意し、カメラから約300mmの距離に設置した。

投影光には緑色光、投影パターンは縦縞のものを用い、投影パターン数は10とした。使用したプロジェクタの横方向の解像度が1024=2¹⁰pixelのため、投影できる最大パターン数が10となる。

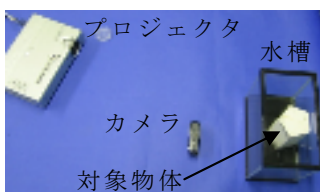


図5 実験系の構成

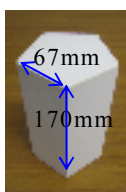


図6 対象物体

3.2. 実験手順

まず、水槽中の対象物体にパターン光を投影し、撮影する。これを実験系の配置を動かさずに投影パターン数だけ繰り返す。撮影画像から3次元座標を計算し、形状復元を行う。精度評価として計測結果から最小二乗平面を求め、最小二乗平面からの標準偏差を求める。

3.3. 実験結果および考察

撮影画像を図7に、計測結果を図8に示し、さらに五角柱に対する精度評価を表1に示す。

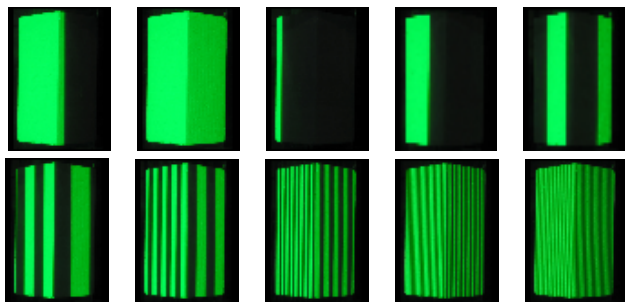


図7 撮影画像

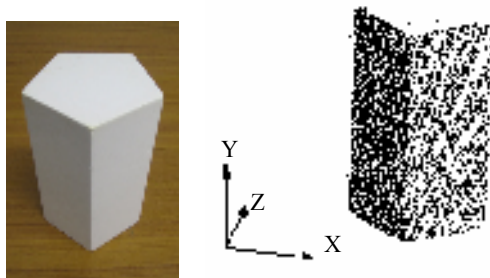


図8 計測結果

表1 精度評価

	従来研究	本研究
最小二乗平面からの標準偏差[mm]	2.0	1.2

図7から水中の対象物体に対してパターンが投影されていることが確認できた。また、図8からは五角柱の2つの平面が復元されているのがわかる。表1により従来手法に比べ、標準偏差が小さいことがわかる。これは緑色光を適切なパターン数投影することで水中の対象物体に対してより鮮明で細かいパターンが投影でき、また光の屈折の影響を受けないように各コードの中央ではなく端を計測したためである。

4. 結論

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の水中計測を行うために、空間コード化法を用いた水中計測の手法がある。しかし、この従来手法には光の波長による屈折率の違いや投影パターン数に対する考慮がされていないことや各コードの中央を計測しているという問題があり、これを解決することで計測の分解能が向上した。

今後の課題としては緑色光投影を用いた場合の対象物体の色への考慮や水以外の液中物体の計測などが挙げられる。

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, pp.928-933, 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, pp265-269, 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] 河井良平, 山下 淳, 金子 透: "空間コード化法を用いた水槽中物体の形状計測," 第14回画像センシングシンポジウム講演論文集, pp.IN3-18-1-IN3-18-6, 2008.