

光の屈折を考慮したパターン光投影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 本論文では、パターン投影による水中物体の形状計測手法を提案する。カメラ画像を用いて水中物体の計測を行う場合、光の屈折の問題が生ずるが、この問題に対して光線追跡を利用する。また、水中と空気中では光の減衰の影響で色合いが異なって見えるため、水中画像から得られた色合いに対して光の減衰を考慮して補正を行った色合いを形状計測結果に付加する。光線が水中を進む距離を用いることで光の減衰量の推定を行うことができ、本論文ではこの水中距離をパターン光投影により求めた対象物体表面の3次元座標から計算する。以上の処理により、対象物体の形状及び空気中での色合いを取得する。

キーワード 形状計測, 水中物体, パターン光投影

Shape Measurement of Objects in Water by Pattern Light Projection with Consideration of Light Refraction

Ryohei KAWAI Atsushi YAMASHITA and Toru KANEKO

Faculty of Engineering, Shizuoka University 3-5-1 Johoku, Hamamatsu-shi, Shizuoka 432-8561, Japan

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

Abstract In this paper, we propose a method for shape measurement of objects in water by pattern light projection with consideration of light refraction. Measurement of objects in water by photographic measurement methods has a problem of light refraction that causes image distortion. A ray tracing technique is used to solve the problem of light refraction. Object colors are estimated by considering light attenuation. Experimental results show the effectiveness of the proposed method.

Keyword Shape Measurement, Object in Water, Pattern Light Projection

1. 序論

水中物体の形状計測の用途として、海中の動植物の調査、海中構造物の構築・点検、液中保存されたサンプルの電子データ化などが挙げられる。水中に固定されている対象物体は言うに及ばず、固定されていない対象物体に関しても水中から取り出す際に損傷させる危険性があるため、水中で計測を行うこと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た手法があり、その利点として、対象物体に対して非接触であること、撮影範囲内に存在する複数の対象物体の同時計測が可能であること、また対象物体の色も取得可能であることなどが挙げられる。しかし、カメラ画像を用いた手法によって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、実際とは異なった大きさや位置に対象物体が写る。図1は透明な容器の中の物体を半分だけ水に入れて、その物体を容器の側面方向から見た様子を示している。

光の屈折の問題を解決する手法の1つに光線追跡がある[1]。屈折前・屈折後の光線の方向を計算することで、光の屈折の影響を考慮した計測結果を得ることができる。光線追跡を用いた水中物体の形状計測手法として、ステレオカメラを用いた手法[1]、スポット光投

影やスリット光投影を用いた手法[2][3]が提案されているが、ステレオカメラを用いた手法には対象物体によっては対応点探索が困難な場合があること、スポット光投影やスリット光投影を用いた手法には広範囲を計測する際に大量の撮影画像が必要になることなどの問題点が挙げられる。これらの問題を解決するために著者らはパターン光投影を用いた手法を提案した[4]。



図1 光の屈折の影響

カメラ画像を用いた手法では、カメラ画像から対象物体の色合いも得ることができる。形状計測結果に対象物体の色合いを付加することで、海中の動植物や液中保存されたサンプルを対象物体とした場合には対象物体の形状が、海中構造物を対象物体とした場合には構造や欠損が把握しやすくなる。

水中と空気中では光の減衰の影響により色合いが異なって見える。光の減衰率は波長によって異なり、

比較的波長の短い緑色光や青色光に比べて、波長の長い赤色光は減衰が大きい。このため、水中での色合いは空気中での色合いに比べて、緑色や青色の強い色合いに見える（図2）。



(a) 空気中での色合い (b) 水中での色合い

図2 光の減衰の影響

この問題に対して、文献[5]では光の減衰量を推定することで、水中画像の色合いを補正する手法が提案されている。光源と対象物体及び対象物体とカメラの間において光線が水中を進む距離を用いることで光の減衰量の推定を行うことができるため、本論文ではパターン光投影によって求めた対象物体表面の3次元座標から光線が水中を進む距離を計算し、これを用いて補正した色合いを形状計測結果に付加する。

以上により、対象物体の形状と空気中での色合いを取得する。

2. 計測手法

2.1. 画像取得

まず対象物体の形状計測のために、対象物体に複数のそれぞれ異なる2値パターン光を投影して、撮影を行う。また、パターンの明暗の判別をより正確に行うために、各パターンの明暗を反転したパターンの投影も行う。さらに、パターン投影画像取得後、対象物体の色合いを取得するための画像を1枚撮影する。

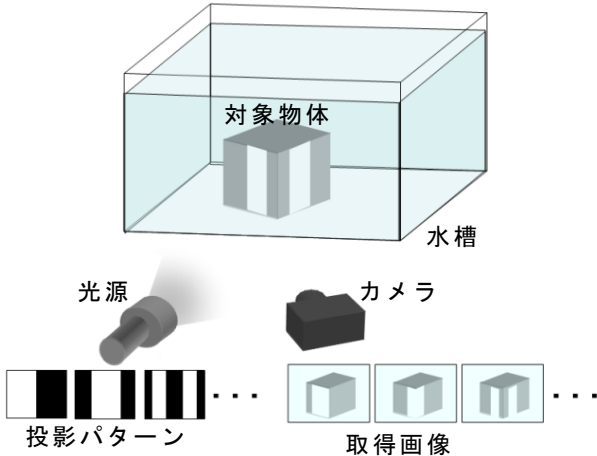


図3 パターン光投影による水中物体計測

2.2. 3次元座標計算

本論文では光源から照射される光を光線の集合として考え、投影パターンを解析することでそれぞれの光線の判別を行う。そして、それぞれの光線に関して光線追跡を行うことで、対象物体表面の位置を求める。

計測モデルを図4に示す。座標系の原点をカメラのレンズ中心（点O）とし、カメラの光軸方向をZ軸、Z軸に垂直かつ水平面に平行な方向をX軸、Z軸に垂

直かつ水平面に垂直な方向をY軸とする。

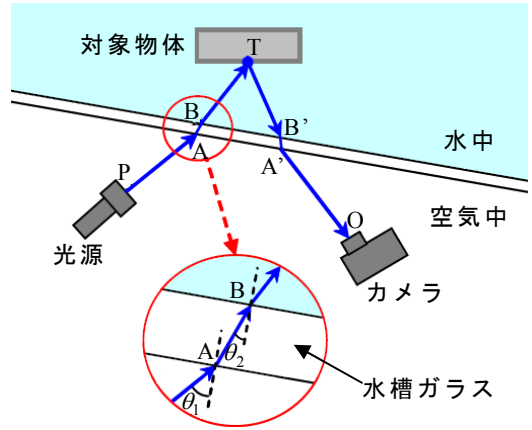


図4 計測モデル

光源から出た光線は、屈折境界面で屈折した後、対象物体表面で反射する。そして再び屈折を起こした後、カメラの結像面に投影される。この現象の光線追跡による解析結果が文献[1]より得られる。

投影光の原点Pの座標を $(x_0, y_0, z_0)^T$ とし、投影される光線方向ベクトルを $(\alpha_1, \beta_1, \gamma_1)^T$ とすると、空気と水槽ガラス面の境界での屈折点Aの座標 $(x_1, y_1, z_1)^T$ は式(1)(2)のように表される。ここで、水槽ガラス面に対する単位法線ベクトルを $(\lambda, \mu, \nu)^T$ とし、水槽ガラス面のZ軸上の位置を d とする。

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} = \rho_1 \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \beta_1 \\ \gamma_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\rho_1 = -\frac{\lambda x_0 + \mu y_0 + \nu(z_0 - d)}{\alpha_1 \lambda + \beta_1 \mu + \gamma_1 \nu} \quad (2)$$

点Aで屈折した後の光線方向ベクトルを $(\alpha_2, \beta_2, \gamma_2)^T$ とすると、式(3)(4)(5)のように屈折前の方向ベクトルと屈折境界面の単位法線ベクトルで表すことができる。ここで n_1 、 n_2 はそれぞれ空気、水槽ガラスの屈折率である。

$$\begin{pmatrix} \alpha_2 \\ \beta_2 \\ \gamma_2 \end{pmatrix} = \frac{n_1}{n_2} \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \beta_1 \\ \gamma_1 \end{pmatrix} - k_{12} \begin{pmatrix} \lambda \\ \mu \\ \nu \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$k_{12} = \frac{n_1}{n_2} \cos \theta_1 - \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \sin^2 \theta_1} \quad (4)$$

$$\cos \theta_1 = \alpha_1 \lambda + \beta_1 \mu + \gamma_1 \nu \quad (5)$$

同様に、水槽ガラス面と水の境界での屈折点Bの座標 $(x_2, y_2, z_2)^T$ 、点Bで屈折した後の光線方向ベクトル $(\alpha_3, \beta_3, \gamma_3)^T$ を求めることができる。

水中の光線上にある点 $(X, Y, Z)^T$ は式(6)(7)を満たす。

$$\gamma_3 X - \alpha_3 Z - \gamma_3 x_2 + \alpha_3 z_2 = 0 \quad (6)$$

$$\gamma_3 Y - \beta_3 Z - \gamma_3 y_2 + \beta_3 z_2 = 0 \quad (7)$$

また、対象物体とカメラの間の光線についても光線追跡を行うことで式(8)(9)が得られる。

$$\gamma_3' X - \alpha_3' Z - \gamma_3' x_2' + \alpha_3' z_2' = 0 \quad (8)$$

$$\gamma_3'Y - \beta_3'Z - \gamma_3'y_2' + \beta_3'z_2' = 0 \quad (9)$$

式(6)～(9)を満たす $(X, Y, Z)^T$ を求める。

以上の計算を全ての計測点に関して行うことで、対象物体表面の形状が得られる。

2.3. 色合い補正

水中物体の撮影画像から空気中での対象物体の色合いを推定する。水中を距離 l だけ進んだ光の強度は式(10)で表される。ここで、 L 、 L' はそれぞれ減衰前、減衰後の光の強度、 c は消散係数である。消散係数は光の波長と計測環境の媒質によって定まり、本論文では、光の強度はカメラの RGB 成分から得られるため、それぞれの成分に対する消散係数を用いる。

$$L' = L \exp(-cl) \quad (10)$$

対象物体表面の 3 次元座標が既に得られているため、カメラ・光源と対象物体表面の間の水中の距離を計算して ($l = \overline{BT} + \overline{TB'}$)、光の減衰による色合いの変化を補正することができる。

3. 実験

3.1. 実験概要

実験系の構成を図 5 に示す。光源としてプロジェクタを使用し、対象物体を水槽中に設置した。



図 5 実験系の構成

形状計測のためにパターン投影画像を 20 枚取得した。また、色合い補正には結像面での光の強度を線形に 4096 段階 (0～4095) で表す RAW 形式で取得した画像を用いた。

本論文では 2 つの対象物体に関して計測を行った。まず図 6 に示す白色五角柱を計測し、その計測結果から形状計測の精度に関する評価を行った。次に図 7 に示すサンゴの模型を計測し、色合い補正の評価を行った。

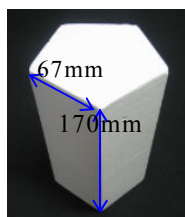


図 6 白色五角柱



図 7 サンゴの模型

3.2. 形状計測に関する評価実験

白色五角柱を水槽ガラス面から約 300mm の距離 (カメラから約 700mm の距離) に設置し、形状計測を行った。なお、本実験では形状計測に関する評価を目的とするため、色合い補正及び色合いの付加は行わなかった。計測に関して、取得画像を図 8 に、形状計測の結果を図 9 に示す。図 9 に関して、カメラに近い座標を赤点、カメラから遠い座標を青点で表す。

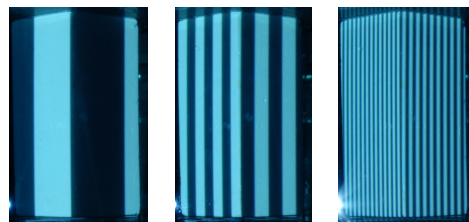


図 8 五角柱の取得画像

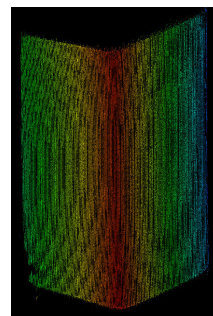


図 9 五角柱の形状計測結果

形状計測結果に関する精度評価を表 1 に示す。計測結果の座標群から最小二乗平面を計算し、2 つの平面のなす角度及び最小二乗平面からの標準偏差を用いて精度評価を行った。また光の屈折の影響を考慮しない場合の計測結果との比較も行った。光の屈折の影響を考慮しない結果に比べて、考慮した結果は誤差が小さくなっていることが表に見られる。

表 1 五角柱の形状計測結果に関する評価

	A	B	C
2 平面の角度 [deg]	108.0	107.3	123.0
標準偏差 [mm]	-	0.51	0.48

A: 実際の値

B: 光の屈折を考慮した計測結果

C: 光の屈折を考慮しない計測結果

3.3. 色合い補正に関する評価実験

サンゴの模型を水槽ガラス面から約 600mm の距離 (カメラから約 1000mm の距離) に設置し、形状計測及び色合い補正を行った。取得画像を図 10 に、形状計測結果を図 11 に示す。図 11 に関して、図 9 と同様にカメラに近い座標を赤点、カメラから遠い座標を青点で表す。



図 10 サンゴの取得画像

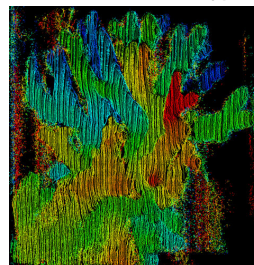
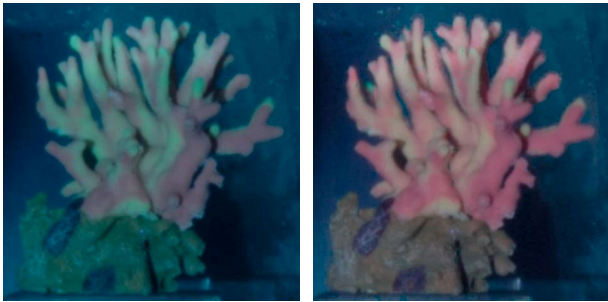


図 11 サンゴの形状計測結果

さらに取得した対象物体表面の3次元座標から光の減衰量を推定し、色合いの補正を行った。図12(a)(b)は水中画像に対する色合い補正の処理前、処理後の画像を現す。図12の水中画像の色合い補正に関して、計測点が写っているピクセルは取得した計測点の3次元座標を用いて減衰量を推定した。また計測点が写っていないピクセルに対しては、そのピクセルから一定範囲内に計測点が写ったピクセルが存在する場合はその計測点の3次元座標を用いて減衰量を推定し、それ以外の場合は補正を行わなかった。光の減衰により赤色の成分が弱くなっていた色合いが、補正を行うことでより空気中での色合いに近づいたことがわかる。

サンゴの形状計測結果に色合いを付加したものを図13に示す。図13より、水中画像から、空気中での対象物体の形状や色を取得できたことがわかる。



(a) 色合い補正前 (b) 色合い補正後
図12 水中画像に対する色合い補正

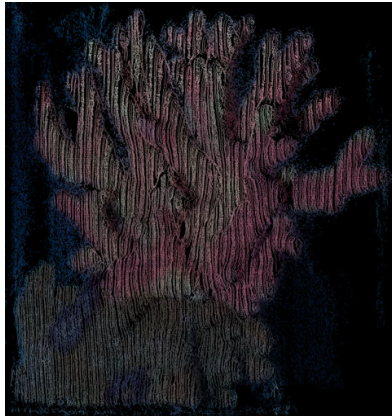


図13 色合いを付加したサンゴの形状計測結果

また、図14中の赤枠の範囲のRAWデータに関して、R, G, Bのそれぞれの画素が有する4096段階で表された光の強度の平均値を計算し、色合い補正ありの結果と色合い補正なしの結果の比較を行った。比較結果を表2に示す。表2より光の減衰の影響が大きいR成分に関して、大きく補正が行われていることがわかり、より空気中での色合いに近い図12(b)や図13の結果が得られたのは、これが大きく影響している。

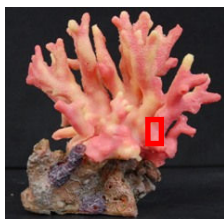


図14 色合い補正に関する評価の対象領域

表2 サンゴの色合い補正に関する評価

	A	B
R成分	362.0	205.9
G成分	341.9	323.1
B成分	203.1	192.9

A: 色合い補正あり

B: 色合い補正なし

4. 結論

本論文では、光の屈折を考慮したパターン投影による水中物体の形状計測に関して述べた。パターン光投影による形状計測手法は、ステレオカメラを用いた手法やスポット光投影・スリット光投影による手法が有する対応点探索の問題や大量の画像取得の問題を解決できる。水中物体の形状計測の際に生じる光の屈折の問題に対しては光線追跡を利用した。また、パターン光投影による形状計測結果に、光の減衰を考慮した補正を行った色合いを付加した。パターン光投影により取得した対象物体の位置から、カメラ・光源と対象物体の間の水中の距離を計算し、カメラのRGB成分のそれぞれの減衰量を計算して空気中での色合いを推定した。

今後の課題としては、水以外の液中物体の計測や実際の海中環境での計測が挙げられる。

謝 辞

本研究の一部は、財団法人旭硝子財団及び日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(C)1956042の援助を受けた。

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] 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 (ICRA2002), pp.412-419, 2002.
- [3] 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 (ICRA2004), pp.2736-2741, 2004.
- [4] Ryohei Kawai, Atsushi Yamashita and Toru Kaneko: "Three-dimensional Measurement of Objects in Water by Using Space Encoding Method", Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2009), pp.2830-2835, 2009.
- [5] Atsushi Yamashita, Megumi Fujii and Toru Kaneko: "Color Registration of Underwater Images for Underwater Sensing with Consideration of Light Attenuation", Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2007), pp.4570-4575, 2007.