

光路差による見え方の違いを利用した 単眼ステレオによる水中画像センシング

鈴木 陸実 山下 淳 金子 透

静岡大学工学部 〒432-8561 静岡県浜松市城北 3-5-1

E-mail: {f0320017, tayamas, tmtkane}@ipc.shizuoka.ac.jp

あらまし 水中では、撮像光学系において空気と水の屈折率の違いによる光の屈折が起きるため、計測対象が実際の位置・形状とは異なって計測されるという問題点が存在する。本論文では、光路差を用いた単眼ステレオにより画像を取得し、この画像に対し光の屈折を考慮した3次元計測を行うことで、単体カメラによる水中での物体の形状を計測する水中センシング手法を提案する。

キーワード 光路差, 単眼ステレオ, 水中センシング

Aquatic Image Sensing by Monocular Stereo Vision Using a Difference of Appearances Depending on Optical Paths

Mutsumi Suzuki Atsushi Yamashita and Toru Kaneko

Department of Mechanical Engineering, Shizuoka University

3-5-1 Johoku, Hamamatsu-shi, Shizuoka 432-8561, Japan

E-mail: {f0320017, tayamas, tmtkane}@ipc.shizuoka.ac.jp

Abstract Sensing in aquatic environments meets the difficulty that, when a camera is set in air behind a watertight glass plate, image distortion occurs by refraction of light at the boundary surface between air and water. This paper proposes an aquatic sensing method to measure three-dimensional shapes of objects in water by taking refraction of light into account. The proposed method is based on a monocular stereo technique using a difference of appearance depending on optical paths.

Keyword Optical path difference, Monocular stereo, Aquatic sensing

1. 序論

1.1 研究背景

近年、水中センシングの研究が盛んに行われている。海底での環境調査や深海などでは人間の代わりに水中ロボットによる作業が行われることがある。この際、水中ロボットを操作する上で水中ロボットの周辺環境の確認など、水中での正確な計測が重要となる。

水中センシングの方法としては超音波やカメラを用いた手法がある。超音波では海底地形の計測や魚群の有無を感知するといったことはできるが対象物の位置・形状を高精度に求めることは困難である。これに対してカメラを用いると比較的高精度に計測を行うことが可能である。しかし、水中においてカメラを用いて計測を行う場合、光の屈折が問題となり、水、ガラス、空気といった屈折率の異なる物質間を光が通過するために、屈折の影響により撮影画像に歪みが生じる。

例えば、水面の物体を撮影した場合、空気と水の屈折率の違いにより歪みが生じる(図1)。このように水中におけるカメラを用いた計測では光の屈折が問題となり、水中で正確な計測を行うには、光の屈折の影響

を考慮する必要がある。

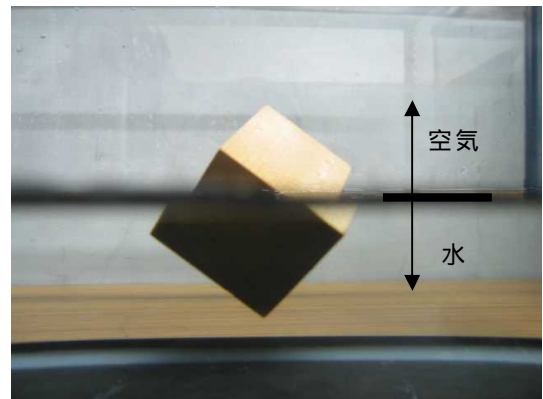


図1 屈折の影響

光の屈折を考慮し、水中物体を対象とした3次元計測に関する研究はこれまでも行われている。例えば、ステレオカメラを用いた手法[1]~[3]やカメラとレーザーから成る計測システムを用いた手法[4]~[5]などが

提案されており、水中での3次元計測を実現している。これらの手法を用いれば液中での計測は原理的には可能であると考えられる。

これらの手法ではカメラ2台、またはカメラとレーザーを用いることによって三角測量の原理により3次元計測を可能としているため、カメラ2台分のキャリブレーションが必要であるなどの手間がかかる。これに比べカメラ単体による計測が可能であればカメラ2台を扱うより手間が減少する。カメラ単体を扱った研究として時空間画像解析による手法[6]があるが、この手法では静止物体のみを対象としている。そこで、動物体の形状計測にも対応した手法の必要性が出てくる。

1.2 研究目的

光路差が発生するような環境(図2)、例えば水槽の角の前方から撮影をすると光路差が発生し図3に示すように同一の水中物体に対して見え方の異なったものが1つの画像上で得られる。このような光路差の生じた画像を利用することで視差が生じ、三角測量の原理を用いることで対象の位置を知ることができる。したがって、1つの画像でステレオ計測が可能となる。そこで、本研究では光路差を発生させるための装置をアクリル板で作成し、カメラに取り付けることにより水中で光路差のある画像を取得する。

本研究では光路差による見え方の違いを利用することで、光の屈折の影響を考慮した単体カメラによる水中センシングを行う手法の提案を目的とする。

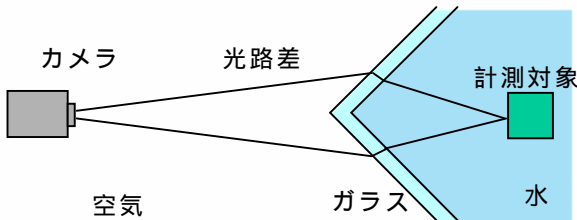


図2 光路差の発生



図3 光路差のある画像例

2. 計測手法

本研究では作成した装置により画像を取得し、計測を行う。計測を行うためには光路差を生じさせる面、つまり光の屈折面の位置が分からなければいけない。そこで、始めに屈折面の位置推定を行う。位置推定は始めに行うだけで、以後カメラと装置の位置関係を変更しない限り毎回行う必要はない。次に、ステレオ計測を行い3次元形状を得る。光の屈折の問題については光線追跡を行うことで対処する。

2.1 画像取得

光路差を生じさせることで見え方の異なる2つの領域から成る画像を取得する。この2つの領域をそれぞれステレオ計測における左画像、右画像として対応させることができる。

2.2 屈折面位置推定

実験で用いた装置の光の屈折する面の位置を取得画像より推定する。前提条件として屈折面は平面とする。また、2つの屈折面のなす角度 ϕ を既知とする。

求めるパラメータは屈折面の角上の任意の1点の3次元座標及び一方の面のX軸に対する傾き ϕ である。この点のカメラ座標系での座標を (x, y, z) とする(図4)。また、Y軸に対しする面の傾きはごく微小なものと考え傾きは 0° と近似する。

白黒で等間隔のマスキで区切られた立方体を水中に置き画像を取得する。画像上で直線に連続に並んだマスキの頂点4点についてパラメータ x, z, ϕ を少しずつ変えていき光線追跡により3次元座標を計算する。そして、計算により点間の距離の誤差が小さく、4点が直線的に並ぶ結果が得られる x, z, ϕ を選ぶことで屈折面の位置を推定する。

また、推定結果より取得画像上で右画像、左画像に分ける境界を自動的に決定する。

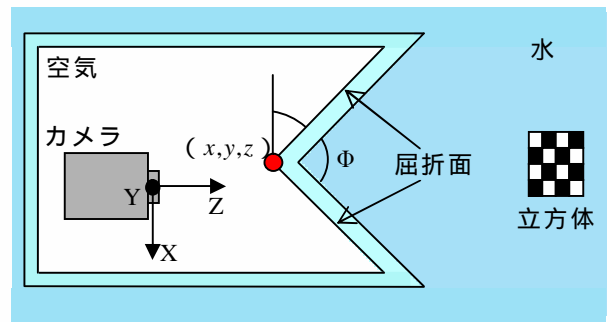


図4 屈折面の位置推定

2.3 3次元計測

2.3.1 光線追跡

水, ガラス, 空気と屈折率が変化する部分を光線が通過する際には光の屈折が起きる. その際の入射角と屈折角, 屈折率の関係をスネルの法則を用いて求め, それを光線追跡に反映させることで光の屈折の影響を考慮する[1]. これにより, 対応点探索の際に用いるエピポーラ線の算出及び形状計測を行う.

ガラス面における光の屈折の様子を図5に示す. 空気とガラスの屈折率をそれぞれ n_1, n_2 とし, 空気からガラスへの入射角を θ_1 とする. また, 空気におけるカメラの単位光線ベクトルを $(\alpha_1, \beta_1, \gamma_1)^T$, ガラス面の単位法線ベクトルを $(\lambda, \mu, \nu)^T$ とすると, ガラス中を進む単位光線ベクトル $(\alpha_2, \beta_2, \gamma_2)^T$ は,

$$\begin{pmatrix} \alpha_2 \\ \beta_2 \\ \gamma_2 \end{pmatrix} = \frac{n_1}{n_2} \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \beta_1 \\ \gamma_1 \end{pmatrix} + \left(\sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 \sin^2 \theta_1} - \frac{n_1}{n_2} \cos \theta_1 \right) \begin{pmatrix} \lambda \\ \mu \\ \nu \end{pmatrix} \quad (1)$$

となる. また, 水の屈折率を n_3 とし, ガラスから水への入射角を θ_3 とすると, 水中を進む単位光線ベクトル $(\alpha_3, \beta_3, \gamma_3)^T$ は,

$$\begin{pmatrix} \alpha_3 \\ \beta_3 \\ \gamma_3 \end{pmatrix} = \frac{n_2}{n_3} \begin{pmatrix} \alpha_2 \\ \beta_2 \\ \gamma_2 \end{pmatrix} + \left(\sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_3} \right)^2 \sin^2 \theta_2} - \frac{n_2}{n_3} \cos \theta_2 \right) \begin{pmatrix} \lambda \\ \mu \\ \nu \end{pmatrix} \quad (2)$$

となる. 水中側の水槽面の通過点を $(x_2, y_2, z_2)^T$ とすると, 光線ベクトル上の任意点 $(x_p, y_p, z_p)^T$ は,

$$\begin{pmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{pmatrix} = s \begin{pmatrix} \alpha_3 \\ \beta_3 \\ \gamma_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix} \quad (3)$$

と表すことができる. ただし s は定数である.

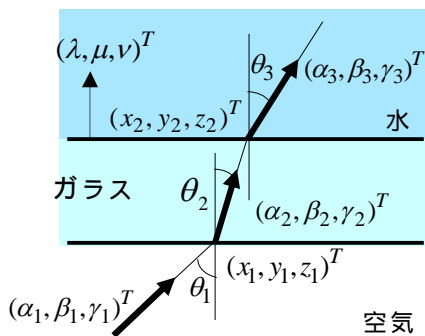


図5 ガラス面での光の屈折

2.3.2 対応点探索

ステレオ計測では左画像と右画像の対応点が必要となる. そこで, 取得画像上で左画像, 右画像とした範囲について対応点探索を行う. 対応点探索には正規化相互相関によるテンプレートマッチングを用いる.

正規化相互相関では相関値が閾値以上で, かつ1に最も近い点を対応点とする. また, テンプレートマッチングを行う際にエピポーラ拘束を用いる. エピポーラ拘束を用いることで, 対応点探索範囲を画像全体からエピポーラ線上に絞ることができる. これにより, 誤対応を低減し, 同時に処理時間の短縮を行う.

エピポーラ線算出は次のようにして行う. まず, 左画像上のある1点に注目し, この点に対して左カメラ光線求める. 次に, この光線を水中で徐々に延ばしていき, 光線の先端に当たる点との距離が最も小さくなる右カメラ光線が得られる右画像上の点を求めていく(図6). 求めた右画像上の点から最小自乗法により2次の多項式に近似する. この式で表される線がエピポーラ線となる.

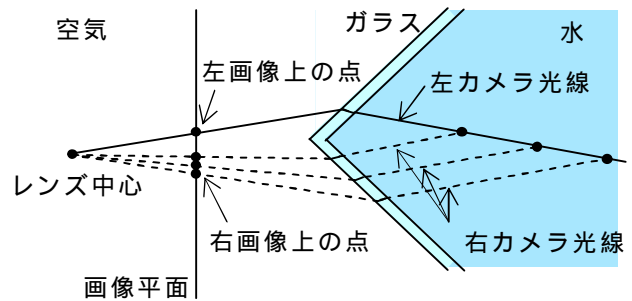


図6 エピポーラ線の算出

2.3.3 3次元座標の決定

1組の対応点に対して光線追跡を行うと, 経路の違うカメラ光線が2本求まる. この2本の光線を辿っていき光線が交わる点が計測点となる. しかし, 実際にはキャリブレーションによる誤差や画像中のノイズなどの影響によって交わらないことが多い. そこで, この2本の光線間の距離が最短になる点をそれぞれの光線上において求め, その2点の中点を計測点とする.

3. 実験

光路差が生じるようにアクリル板をカメラ前方に取り付け, カメラ全体が防水されるような装置を作成し, これを利用し水中で撮影を行った(図7). 撮影により得られた画像を図8に示す. 取得画像のサイズは 2048×1536 pixels である.

次に, 左右画像から光の屈折を考慮したステレオ計測を行い, 3次元座標値を算出した. 計測を行う前提条件として屈折率(水, アクリル, 空気)を既知とした. また, テンプレートマッチングの際のテンプレートサイズは 21×21 pixels, 正規化相互相関による相関値の閾値は0.8とした.

精度を測るために屈折面位置推定に用いた画像とは別に用意した立方体を写した画像から立方体の各頂点の対応点を手動で与え画像から計測が可能であ

る各辺の長さ及び各面の角の角度の計測を行った。立方体はカメラの前方 500mm 付近に設置した。

計測の結果辺の長さ 100mm に対する誤差の平均は 4mm であった、また、各面の角の角度は 90° に対する誤差の平均は 1.5° という結果となった。

誤差の原因としては屈折面推定の推定結果が実際とわずかにずれてしまっていた為だと考えられる。

次に、計測対象とした魚の模型を水中におき、計測を行った結果を図 9 に示す。全体的に計測対象の形状が得られているのが分かる。孤立した点是对応点探索の際に誤対応を起こしてしまったためだと考えられる。計測結果が得られていない部分は、テクスチャの無い部分で特徴が得られず対応点が検出されなかったためだと考えられる。

以上より、本手法を用いた水中における形状計測が可能であるという結果が得られた。

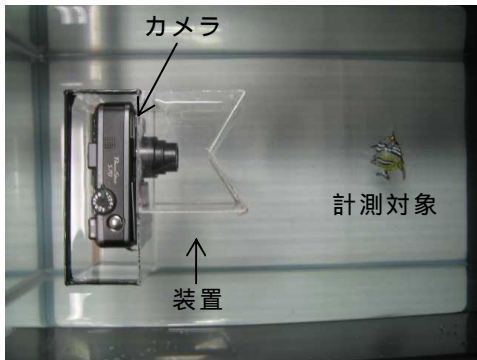


図 7 撮影環境

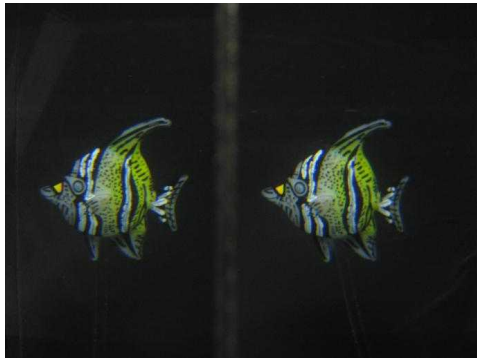


図 8 取得画像

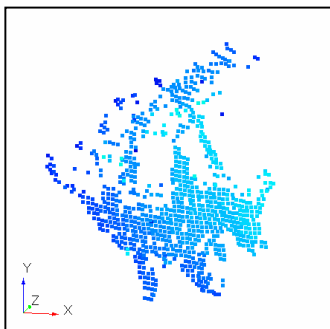


図 9 計測対象

4. 結論

光路差を利用した単体カメラによる計測手法を提案した。実験において、カメラから約 500mm の距離の計測において 4% 以内の誤差の形状計測結果が得られた。これにより、本手法による水中センシングの有効性が確認できた。

今後の課題として、屈折面推定の手法の改良等を行うことで、より計測の精度を向上させることが挙げられる。また、現在は液体（水）の屈折率が既知という条件で計測を行っているが今後画像より屈折率を推定し、推定した屈折率を用いての計測といったことも挙げられる。

文献

- [1] R.Li, H.Li, W.Zou, R.G.Smith and T.A.Curran: "Quantitative Photogrammetric Analysis of Digital Underwater Video Imagery", IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol.22, No.2, pp.364-375, 1997.
- [2] 加藤 進, 山下 淳, 金子 透: "ステレオカメラを用いた気泡ノイズにロバストな水中環境観測", 情報処理学会研究報告(2004-CVIM-144), Vol.2004, No.40, pp.117-124, 2004.
- [3] 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形状計測", 情報処理学会研究報告(2005-CVIM-149), Vol.2005, No.38, pp.69-76, 2005.
- [4] 近藤 逸人, 巻 俊宏, 浦 環, 能勢 義昭, 坂巻 隆, 稲石 正明: "自律型水中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, 2A1-L2-28, pp.1-4, 2004.
- [5] A.Yamashita, E.Hayashimoto, T.Kaneko and Y.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, pp.1578-1583, 2003.
- [6] 河村 拓史, 齋藤 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, Vol.32, No.4, pp.607-609, 1996.