

魚眼ステレオカメラとプロジェクタを用いた 3 次元水中計測

Underwater 3D Measurement Using Fisheye Stereo Camera and Projector

坂本一樹 (東京大) Alessandro MORO (ライテックス)
佐藤 貴亮 (東京大) 金子 透 (静岡大)
山下 淳 (東京大) 浅間 一 (東京大)

Kazuki SAKAMOTO, The University of Tokyo, sakamoto@robot.t.u-tokyo.ac.jp
Alessandro MORO, Ritecs Corporation
Takaaki SATO, The University of Tokyo
Toru KANEKO, Shizuoka University
Atsushi YAMASHITA, The University of Tokyo
Hajime ASAMA, The University of Tokyo

Sensing in aquatic environment is important to maintain underwater structures and research aquatic lives and resources. This paper proposes a method for measuring the 3D coordinates and the shape of objects in water using stereo fisheye camera and a projector. By projecting light on an object from a projector, lattice pattern is created on the surface of the object in water. Corresponding grid points are detected on the image of two fisheye cameras, and 3D coordinates are calculated using the principle of triangulation. Experiment results show the effectiveness of the proposed method.

Key Words: Fisheye Camera, Stereo Camera, Projector, 3D, Sensing

1. 序論

近年、水中構造物の建造、保守、点検作業や生物、資源の調査が多く行われている。しかし水中環境下でこれらの作業を人間が直接行うことには多くの危険が伴う。そのため、人間の代わりに水中ロボットにそれらの作業を行わせることができれば、調査等における危険を回避することが可能となる。そこで重要となるのが対象物体の正確な 3 次元計測である。

水中で計測を行う際に問題となるのが、光の屈折による画像の歪みである。水中計測ではカメラをガラス製の防水ケースに格納しなければならず、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、水中の物体は歪んで見え、実際の位置と異なる場所に見える。そのため、光の屈折を考慮することが正確な測定には求められる。図 1 はカメラを防水ケースに入れ、下半分が水に入っている物体を水平方向から撮影した画像である。光の屈折により水中に入っている部分が拡大され、左右の輪郭がずれて見える。

過去には水中物体の計測手法が多く報告されている。その中にカメラと、レーザ、プロジェクタなどの光投影機器を用いた手法がある。カメラ 1 台とレーザ 1 台を用いた手法[1]は、光が投影された領域のみ計測可能であるため、計測対象物全体に光が当たるようにレーザを走査する必要がある。また、カメラ 1 台とプロジェクタ 1 台を用いた手法[2]は、プロジェクタからの投影光と取得画像間で対応付けを行うために、多くのパターンを投影する必要がある。これら 2 つの手法は物体のテクスチャ（模様）に依存しない計測を行うことができるという利点があるが、光の屈折による影響が少ない単純なパターンの投影光を用いているため、撮影枚数が多くなり、計測時間が長くなる。

一方、カメラ 2 台を用いた手法[3][4]は、取得画像上の情報を用いて 2 枚の取得画像間で対応付けを行う。この手法は撮影枚数が少なく計測時間が短いという特徴があるが、取得画



Fig. 1 Refraction of light

像のみを用いて計測を行うため、物体のテクスチャ（模様）に依存した計測しか行えないという欠点がある。つまり、テクスチャが乏しい物体の計測を行うことが困難である。また、撮影装置として通常のカメラより視野角が非常に大きい魚眼カメラを用いた手法[4]も報告されており、魚眼カメラを用いることで計測範囲が広い場合でも少ない撮影枚数で計測を行うことができることが確認されている。

以上の計測手法は使用する装置が 2 台以下であった。これらの手法に置いては、撮影枚数が少ない手法を選択するとテクスチャに依存してしまい、テクスチャに依存しない手法を選択すると撮影枚数が多くなってしまふ。そこで魚眼カメラ 2 台とプロジェクタ 1 台を用いた手法[5]を提案した。この手法では投影光に格子点という単純な投影パターンを用いて、格子点の 3 次元位置計測を実現した。装置 3 台の位置情報を用いることで、格子点という多くの点が投影されていても各点の対応付けを行うことが可能であるため、テクスチャに依存しないで撮影枚数が少ない計測を可能にした。しかしこの手

法では格子点が投影されている点のみ計測可能であるため、計測可能な領域が狭い。

そこで本研究では魚眼カメラ 2 台とプロジェクタ 1 台を使用し、投影光として格子模様を用いた水中物体の 3 次元計測手法を提案する。本手法では投影光に格子模様を用いることで、投影光に格子点を用いた手法[5]より広い領域に光を投影し、計測可能な領域を拡大させた。

提案手法の有効性は、空気中に置いたプロジェクタ、魚眼カメラを用いて水槽内の物体を計測することで示す。

2. 計測手法

本研究の計測手順の流れを図 2 に示す。最初に計測対象物に格子点を投影し、左右 2 台の魚眼カメラで画像を取得する。取得した画像は魚眼カメラの性質による歪みを有するため、補正面展開を行うことでその歪みを取り除く。その後プロジェクタの光線と、左右 2 台の魚眼カメラの取得画像上の格子点の対応付けを行い、光の屈折を考慮しながら光線追跡を行うことで、計測点の 3 次元座標を算出する。



Fig. 2 Measurement procedure

2.1 実験系の構成

想定している計測装置の構成を図 3 に示す。プロジェクタの上方に魚眼カメラ 2 台を設置し、防水ケースの中に入れ、前方の水中の物体を計測する。



Fig. 3 Measurement environment

2.2 光線投影・画像取得

プロジェクタを用いて、水中に置いた物体に格子模様を投影する。本手法ではこの格子模様の座標を求めることで物体の 3 次元計測を行う。プロジェクタで格子模様を投影し、計測対象物の画像を左右 2 台の魚眼カメラで取得する。ただし、格子模様の交点、つまり格子点のみが描かれた画像が必要なので、上記の格子模様の交点のみが投影された計測対象物の画像も取得する。取得画像は魚眼カメラで撮影されているため歪みを有する。そのため補正面展開を行うことで歪みを除去した画像を得る。

2.3 光線追跡

水中計測を行う際、光は屈折率の異なる物質間を通過するため屈折する。そのため、対応点検出や 3 次元座標算出の際、図 4 のような光の屈折を考慮した光線追跡を行う必要がある。

空気、ガラス、水の屈折率 n_1, n_2, n_3 、光線の空気からガラスへの入射角 θ 、空気中における単位光線ベクトル $(\alpha, \beta, \gamma)^T$ を既知とすると、スネルの法則[6]

$$\phi = \sin^{-1} \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta \right) \quad (1)$$

を用いることで、ガラスに入った後の単位光線ベクトル $(\alpha', \beta', \gamma')^T$ を求めることができる。

同様の処理を行うことで水中における単位光線ベクトル $(\alpha'', \beta'', \gamma'')^T$ を求めることができ、さらに光源からガラスまでの距離、ガラスの厚さが既知であれば、光線と水側のガラス面の交点 $A(a_1, a_2, a_3)^T$ を求めることができるため、水中における光線ベクトルの任意の位置の座標 $(x, y, z)^T$ を求めることができる。

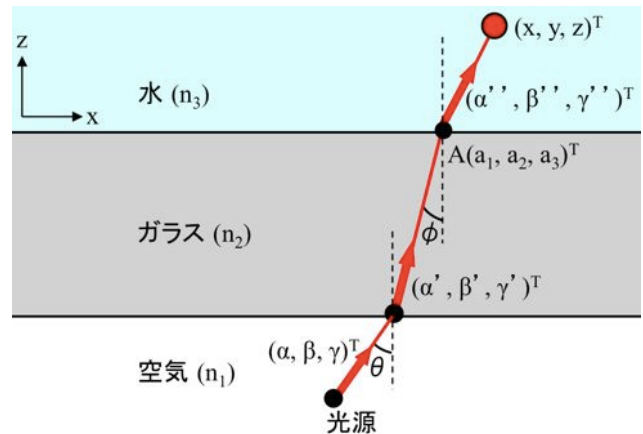
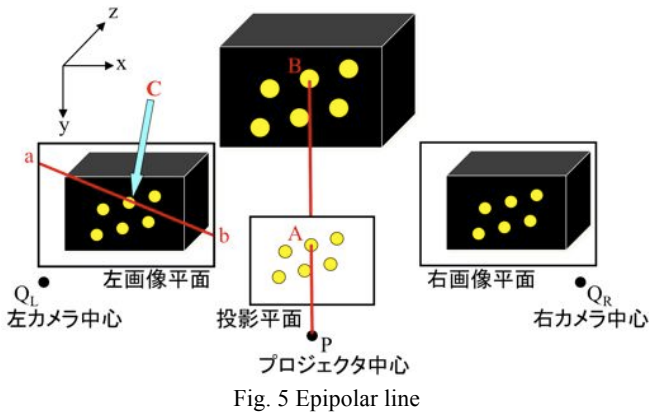


Fig. 4 Ray tracing

2.4 対応点検出

2 台のカメラで同一の物体を撮影したとする。このとき、左画像と右画像を取得する。この左右画像間で対応関係にある点のことを対応点と呼ぶ。3 次元座標の算出は対応点を用いて三角測量の原理で行う。しかし本手法では格子模様を物体に投影するため、左右画像間で対応点を求めることが困難である。そのため、まず格子模様から格子点を抽出し、左右画像



上で格子模様 of 交点, つまり格子点 of 対応関係を求める. その後, 求められた格子点 of 対応関係を用いて残りの格子模様 of 対応関係を求める.

図 5 は, 手前にカメラ 2 台とプロジェクタ 1 台を置いて, 奥の立方体に格子点を投影している様子を示す. この図が示すように, 同じ形の点が多数立方体に投影されているため, 一般に画像から得られる情報のみで対応点を求めることはできない. そこでエピポーラ線を用いて, 対応点検出を行う. エピポーラ線とは, 左画像平面上を横断している線分 ab のことで, プロジェクタ中心 P と, 対応点を求めたい点 A を通る光線が可視化されたとしたときに, 左画像平面上に映る線分である. 点 A が計測対象物上に投影している点 B は, 点 P と点 A を通る光線上に存在するため, 左画像平面上で点 B に相当する点はエピポーラ線 ab 上に存在し, この図では点 C であると分かる. 従って, 点 A の左画像平面上での対応点は, 点 C であると分かる. 以上のように, エピポーラ線を用いることで対応点を求める.

提案手法において, 物体表面の複数の格子点の対応関係を求めなければならないが, プロジェクタの投影平面と左右 2 台のカメラで取得した画像から得られる情報のみで, 格子点同士の対応関係を特定することは難しい. そこで 3 台の装置間でエピポーラ線を生成することで対応点を特定する. なお, 光は屈折率の異なる物質間を通過する際に屈折するため, 光の屈折を考慮してエピポーラ線を生成する. エピポーラ線の生成方法は[7]を参考にして構築した.

プロジェクタからの 1 つの投影光に注目すると, この投影光によって左右画像上にエピポーラ線を生成することができる (図 6(a)(b)). 図 6(a)の左画像上で, そのエピポーラ線 ab と格子点が重なる点 A が対応点の候補点となる. 同様に, 図 6(b)の右画像上では点 B と点 C が候補点となる. この段階では点 B と点 C どちらが対応点なのか分からない.

次に, 左画像上の候補点 A を用いて右画像上にエピポーラ線 ef を生成する (図 6(c)). エピポーラ線 cd と交わる領域 g (図 6(d)) と格子点が重なる点 B (図 6(e)) が対応点の候補となる. その際, エピポーラ線に一定の幅を持たせることで, 実験装置の位置関係の誤差等による, 対応点の未検出を防ぐ.

図 6(e)における, 右画像上の候補点が 1 つなので, その点 B を対応点として決定し, その点に対応する左カメラからのエ

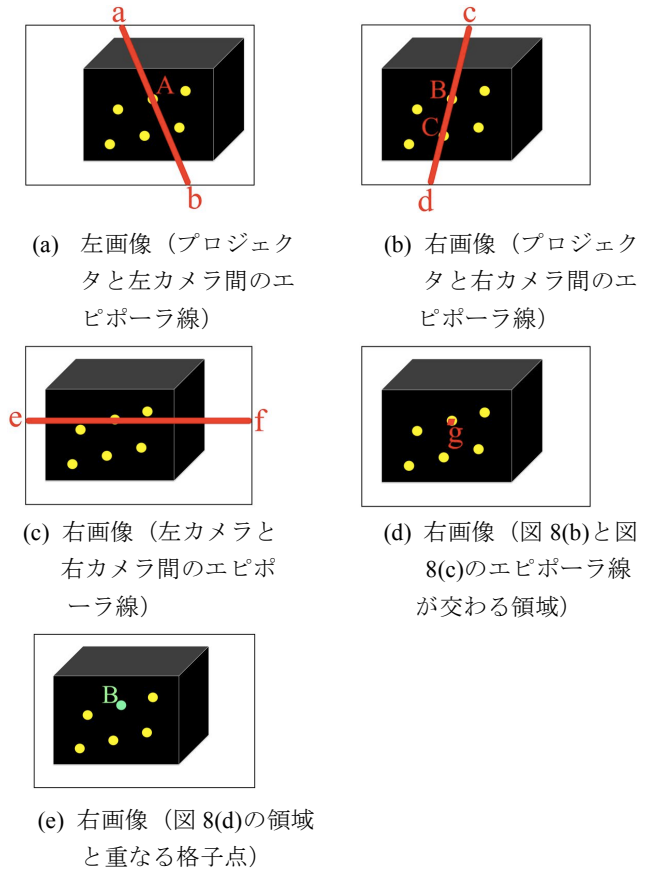


Fig. 6 Detection of corresponding points

ピポーラ線を生成した, 左画像上の点 A を対応点とする. 右画像上の候補点が複数の場合は, 既に対応点として決定している点を候補点から除去することで, 対応点を決定する.

次に, 求められた格子点の対応関係を用いて, 格子点間の線についての対応関係を求める. まず画像平面上で 2 つの格子点を結ぶ線の座標を, 細線化を行った画像を用いて抽出する. その後, 投影平面上と画像平面上における 2 つの格子点を結ぶ線を均一に分割することで, 左画像平面と右画像平面と投影平面における投影光の対応関係を求める.

2.5 3 次元計測

プロジェクタの投影平面と左右 2 台のカメラの画像で対応点を求めた後は, その対応点を用いて 3 次元座標の算出を行う. その際, 光の屈折を考慮した光線追跡を左右 2 台のカメラで行い, 2 本の光線が交わった点を計測点の 3 次元座標として算出する.

3. 実験

3.1 精度評価

水槽に水と立方体を入れ, 水槽の外に設置したプロジェクタで立方体に格子模様を投影し, 2 台の魚眼カメラで撮影して計測を行った. 図 7 に左カメラでの取得画像を示す. 計測結果の 3D 図を図 8 に示す.

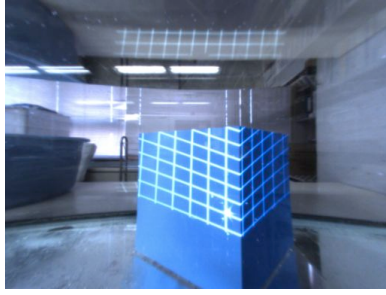


Fig. 7 Acquired image

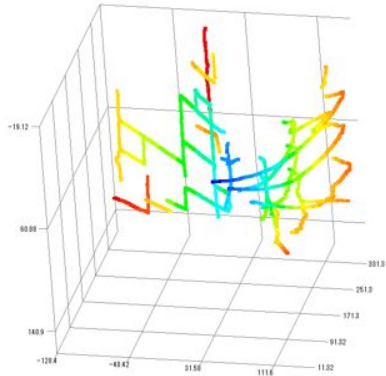


Fig. 8 3D image

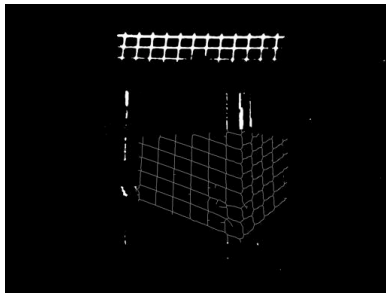


Fig. 9 Thinning image

計測の結果、図 8 に示すように正しく 3 次元座標を算出できなかった部分が生じた。この原因として、細線化処理を行い得られた図 9 の画像において、立方体の右側の平面で、線と線の交点が正しく得られなかったことが挙げられる。

3.2 水中ロボットを用いた位置計測実験

水中ロボットにカメラ 2 台とレーザ投影器 3 台を搭載させて水槽の中に入れて計測実験を行った。図 10 に計測環境を示す。壁に光を投影しながら水中ロボットを壁に向かって動かし、2 台のカメラで画像を 1 秒ごとに取得した。左右カメラでの取得画像を用いてカメラから壁までの距離、壁に対する角度（地面に垂直な軸中心）を算出し、真値と比較した。計測結果を表 1 に示す。

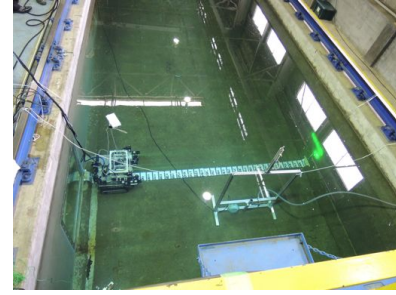


Fig. 10 Experiment environment

Table 1 Measurement result

真値	計測値	誤差	角度
3000mm	2432mm	-568mm	0.38deg
2000mm	2020mm	+20mm	0.47deg
1000mm	1387mm	+387mm	0.47deg

4. 結論

本研究では魚眼ステレオカメラとプロジェクタを使用し、投影光として格子模様を用いた水中物体の 3 次元計測手法を提案した。実験結果より、精度向上の余地は残されているものの、3 次元計測を行うことが可能であることが示された。

今後の課題として、本手法の精度向上や、投影パターンを変えた手法、物体のテクスチャと投影光を用いる手法の構築が挙げられる。

謝 辞

本研究の一部は、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）「災害対応無人化システム研究開発プロジェクト」、科研費若手研究(A)22680017、および財団法人旭硝子財団の援助を受けた。

文 献

- [1] Yamashita, A., Hayashimoto, E., Kaneko, T. and Kawata, Y., “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 (IROS2003), pp.1578-1583, 2003.
- [2] Kawai, R., Yamashita, A. and Kaneko, T., “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.
- [3] Li, R., Li, H., Zou, W., Smith, G R. and Curran, A T., “Quantitative Photogrammetric Analysis of Digital Underwater Video Imagery,” IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol.22, No.2, pp.364-375, 1997.
- [4] Naruse, T., Kaneko, T., Yamashita, A. and Asama, H., “3-D Measurement of Objects in Water Using Fish-eye Stereo Camera,” Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP2012), pp.2773-2776, 2012.
- [5] 坂本 一樹, Moro, A., 佐藤 貴亮, 金子 透, 山下 淳, 浅間 一, “魚眼ステレオカメラと格子点投影プロジェクタを用いた水中物体 3 次元計測”, 動的画像処理実用化ワークショップ 2013 講演論文集, 2013.
- [6] クリスティアン・ホイヘンス, 光についての論考, 1690.
- [7] 青木 則夫, 谷内田 正彦, 辻 三郎, “パターン投影法と 2 台のカメラを用いた 3 次元物体の計測”, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol.J68-D, No.3, pp.384-391, 1985.