

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

○ 坂本 一樹[†], Alessandro MORO^{††}, 佐藤 貴亮[†], 金子 透^{†††}, 山下 淳[†], 浅間 一[†]

○ Kazuki SAKAMOTO[†], Alessandro MORO^{††}, Takaaki SATO[†], Toru KANEKO^{†††},

Atsushi YAMASHITA[†] and Hajime ASAMA[†]

[†]: 東京大学, sakamoto@robot.t.u-tokyo.ac.jp

^{††}: 有限会社ライテックス

^{†††}: 静岡大学

本研究では魚眼ステレオカメラとプロジェクタを用いて水中物体の 3 次元座標・形状計測を行う手法を提案する。プロジェクタから光を投影することで水中に置いた物体の表面に作り出した格子点に関して、左右 2 台の魚眼カメラの画像上で対応付けを行い、三角測量の原理を用いて 3 次元座標を算出する。実験結果により、提案手法の有効性を確認した。

<キーワード> 魚眼カメラ, プロジェクタ, ステレオ計測, テクスチャ, 水中センシング

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。

水中センシングの手法として、超音波[1]やカメラを用いた手法が報告されている。超音波は、海底地形の計測や魚群の有無を探知することができるが、指向角が広いと分解能が低く、対象物の位置・形状を高精度に計測することが困難である。

一方、カメラを用いた手法は、近くの物体を高精度に計測することができる。しかしこの手法は撮影により得た画像を用いるため、水中で計測を行う際、光の屈折による画像の歪みが問題となる。水中計測ではカメラをハウジングに格納しなければならず、水-ハウジング-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。

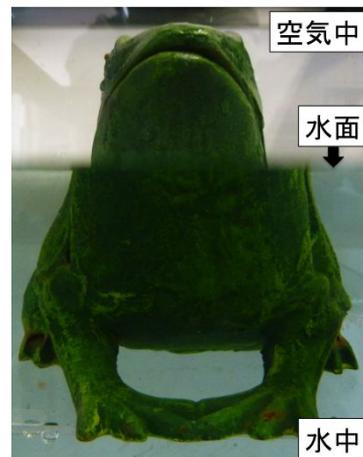


図 1 光の屈折

図 1 はカメラをハウジングに入れ、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、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。

カメラを用いて水中物体の 3 次元計測を行う様々な手法が報告されている。

カメラと光投影を用いる手法として、レーザ、プロジェクタを光投影に用いる手法がある。カメラ 1 台とレーザ 1 台を用いた手法[2][3]は、計測可能であ

る場所が、光が投影された部分のみであるため、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[4]は、多くのパターンを投影する必要がある。双方とも光の屈折の影響が少ない単純な投影光を用いているため、計測時間が長くなる。

カメラ1台を用いた手法として、モーションステレオ法を用いた手法[5]や、複光路単眼ステレオカメラを用いた手法[6]がある。これらの手法はカメラなどの装置を複数台使用する手法と比べ、装置間の位置関係等を考慮する必要がなく、かかる手間が少ないという特徴がある。しかし視野角が小さいため、一度に計測できる範囲が狭く、広い範囲を撮影するには多くの撮影を行う必要がある。

カメラ2台を用いた手法[7][8][9]は、計測時間が短いという特徴があるが、取得画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、撮影装置として魚眼カメラを用いた手法[9]は、視野角が非常に大きいため、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。

以上から、水中物体の3次元計測手法は、使用する装置の数が2台以下の手法しか無いことが分かる。一方、空気中物体の3次元計測手法では、カメラ2台とプロジェクタ1台を用いて、テクスチャに依存せず、かつ計測時間の短縮を実現した手法[10]や、カメラ3台を用いて、精度向上を実現した手法[11]、隠れの改善を実現した手法[12]など、多くの発展研究が行われている。このことから、水中物体の3次元計測の分野を発展させるために、使用する装置の数を増やした手法を構築する必要がある。

そこで本研究ではカメラ2台とプロジェクタ1台を用いた水中物体の3次元計測手法を提案する。この手法ではプロジェクタで光の図形を投影するため、テクスチャに依存しない計測が可能であり、また、3台の装置の位置関係を同時に考慮するため、光の屈折の影響が少ない単純な投影光を用いても、短い時間で計測を行うことができる。さらに、一度に広範囲の計測を行うことができるように、非常に大きい視野角をもつ魚眼カメラを計測装置として使用する。

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。最初に計測物体に格子点を投影し、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、その歪みを、補正面展開を行うことで取り除く。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。

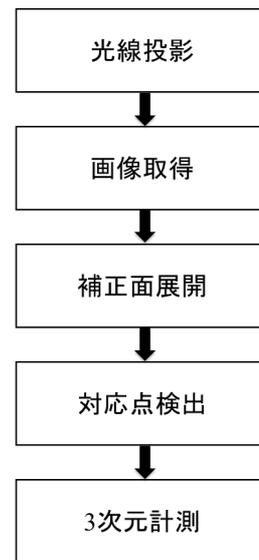


図2 計測手順

2.1 実験系の構成

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、前方の水槽内の物体を計測する。

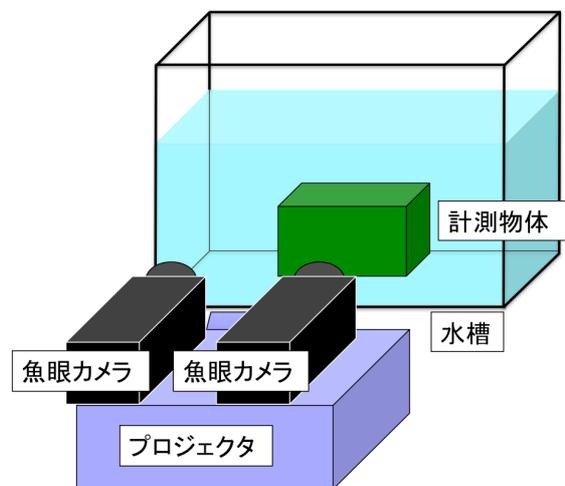


図3 計測環境

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複数の格子点を投影する。図4に、水中に置いた立方体に格子点を投影した様子を示す。ガラス面等における反射により、実際に投影している格子点の数より多く観察される。本手法ではこの格子点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点を投影し、計測物体の画像を左右2台の魚眼カメラで取得する。

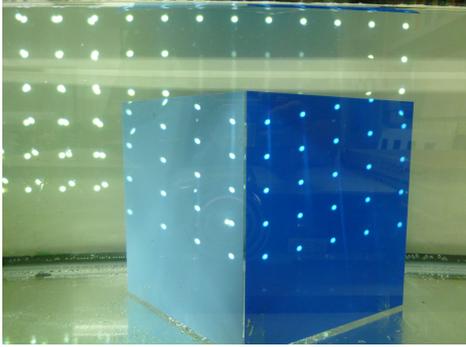


図4 格子点が投影された立方体

2.3 補正面展開

取得画像は魚眼カメラで撮影されているために歪みを有している。そのため、補正面展開を行い、歪みの無い画像を得る。補正面展開を行う前後の画像を図5に示す。



(a) 補正面展開前 (b) 補正面展開後

図5 補正面展開

2.4 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6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（ハウジングに相当する物体）、水の屈折率をそれぞれ n_1, n_2, n_3 とする。光線の空気からガラスへの入射角を θ とし、屈折角を ϕ とする。空気中における単位光線ベクトルを $(\alpha, \beta, \gamma)^T$ とし、屈折面での法線ベクトルを $(\lambda, \mu, \nu)^T$ とする。このとき空気中の光線が屈折してガラスに入った後の単位光線ベクトル $(\alpha', \beta', \gamma')^T$ は、

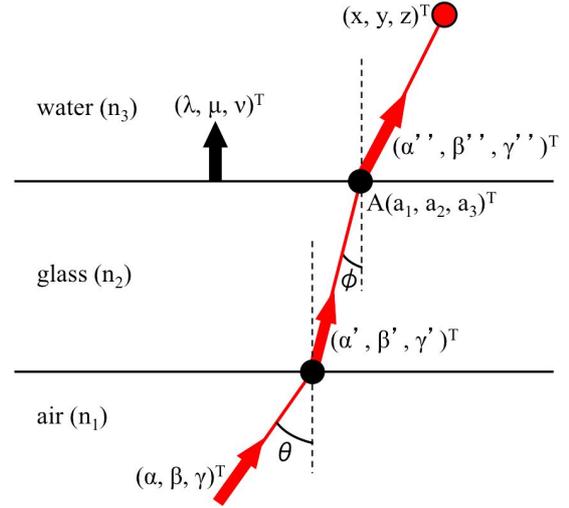


図6 光線追跡

$$\begin{pmatrix} \alpha' \\ \beta' \\ \gamma' \end{pmatrix} = \frac{n_1}{n_2} \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{pmatrix} + a \quad (1)$$

となる。ここで a は、

$$a = \left[\sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \sin^2 \theta} - \frac{n_1}{n_2} \cos \theta \right] \begin{pmatrix} \lambda \\ \mu \\ \nu \end{pmatrix} \quad (2)$$

である。次にガラスから水中に入った後の単位光線ベクトル $(\alpha'', \beta'', \gamma'')^T$ は、

$$\begin{pmatrix} \alpha'' \\ \beta'' \\ \gamma'' \end{pmatrix} = \frac{n_2}{n_3} \begin{pmatrix} \alpha' \\ \beta' \\ \gamma' \end{pmatrix} + b \quad (3)$$

となる。ここで b は、

$$b = \left[\sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_3}\right)^2 \sin^2 \phi} - \frac{n_2}{n_3} \cos \phi \right] \begin{pmatrix} \lambda \\ \mu \\ \nu \end{pmatrix} \quad (4)$$

である。また、 θ と ϕ には、スネルの法則[13]により、

$$\phi = \sin^{-1} \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta \right) \quad (5)$$

という関係が成り立つ。よって、光線と水側のガラス面の交点を $A(a_1, a_2, a_3)^T$ とすると、水中における光線ベクトルの任意の位置 $(x, y, z)^T$ は、任意定数 s を用いて、

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = s \begin{pmatrix} \alpha'' \\ \beta'' \\ \gamma'' \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix} \quad (6)$$

と表される。ここで $A(a_1, a_2, a_3)^T$ は、カメラ（プロジェクタ）からガラスまでの距離とガラスの厚さを用いて光線追跡を行うことで得られる。

本手法では空気、ガラス、水の屈折率、ガラスの厚さを既知とし、カメラからガラスまでの距離と、入射角 θ をキャリブレーションにより求めた。

2.5 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が、対応点というのはこの2画像間の対応関係にある点のことである。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のだが、格子点を計測物体に投影した場合には、図7の黄色の格子点が立方体に投影された図が示すように、同じ形の光が多数存在するため、一般に画像を見るだけでは対応点は求まらない。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、右カメラ中心 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、左画像上に映る線分である。点 A が計測物体上に投影している点 B は、必ず点 P と点 A を通る光線上に存在するので、左画像上で点 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。また、エピポーラ線をカメラとプロジェクタ間でも生成するために、プロジェクタを、1点の光源であるプロジェクタ中心と、投影する画像が描かれている投影平面という、カメラと等価な構造に置き換えて考える。

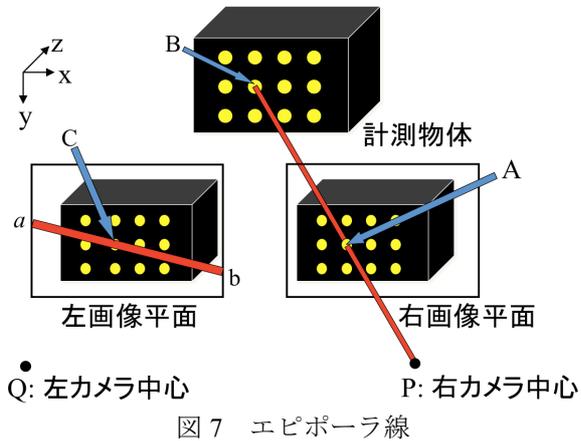
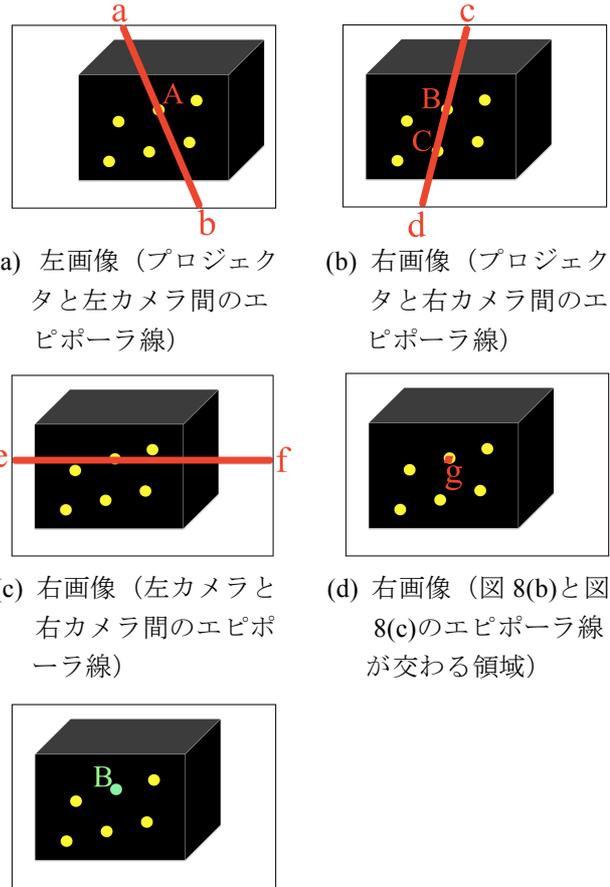


図7 エピポーラ線

提案手法において、物体には複数の格子点が投影されている。そのため、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つ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[10]を参考にして構築した。



- (a) 左画像（プロジェクタと左カメラ間のエピポーラ線）
- (b) 右画像（プロジェクタと右カメラ間のエピポーラ線）
- (c) 右画像（左カメラと右カメラ間のエピポーラ線）
- (d) 右画像（図8(b)と図8(c)のエピポーラ線が交わる領域）
- (e) 右画像（図8(d)の領域と重なる格子点）

図8 対応点検出手法

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8(a)(b)）。図8(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8(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 を生成し（図8(c)）、エピポーラ線 cd と交わる領域 g （図8(d)）と格子点が重なる点 B （図8(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8(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。

2.6 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

実験は、高さ300mm、幅870mm、奥行き270mmの水槽に水と計測物体を入れ、水槽の外に設置した魚眼ステレオカメラとプロジェクタを用いて行った。魚眼ステレオカメラの2つのレンズの間が、プロジェクタのレンズの真上になるようにした。図9に実験環境を示す。取得画像のサイズは、1600×1200pixelである。



図9 実験環境

水槽に、図10に示すような一辺の長さが180mmの立方体を入れ、プロジェクタで2つの面に格子点を投影後、映し出された格子点の座標を算出した。その後、正確に対応点が検出された点の数と割合を求めた。また、正確に検出された点により構成される平面を最小二乗法で求め、2つの平面がなす角度を算出した。真値は90degである。屈折を考慮した場合と考慮しなかった場合における、対応点検出に関する評価を表1に、2つの平面がなす角度を表2示し、すべての計測点の3次元座標を図11に示す。赤色とオレンジ色がそれぞれ別の平面上の点で、緑色が2つの平面が交わる点、黒は誤検出の点である。

計測の結果、表1に示すように複数の点で誤検出が生じた。しかし、屈折を考慮しなかった場合に比べ、考慮した場合はより多くの点を正確に検出できた。また、表2から、2つの平面がなす角度の誤差は、屈折率を考慮しなかった場合では25.6degであったことに對し、考慮した場合は0.8degとなり、誤差を約3/100に削減することができた。

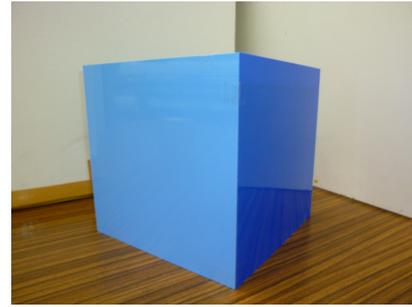


図10 計測対象

表1 対応点検出に関する評価

	A	B	C
屈折考慮	44 個	35 個	79.5%
屈折未考慮	44 個	30 個	68.2%

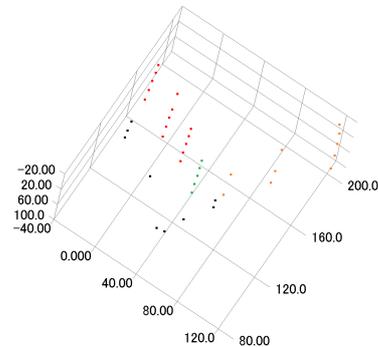
A: 物体に投影されている点の数 [個]

B: 検出に成功した点の数 [個]

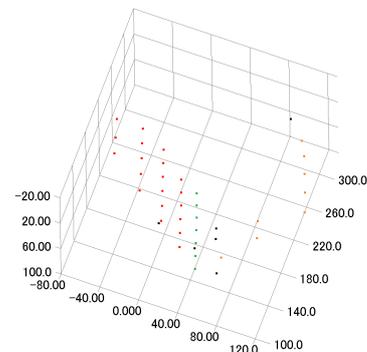
C: 成功した点の割合 [%]

表2 角度の計測結果

	角度	誤差
屈折考慮	90.8deg	0.8deg
屈折未考慮	115.6deg	25.6deg



(a) 斜めから見た図 (屈折考慮なし)



(b) 斜めから見た図 (屈折考慮あり)

図11 3次元計測点

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用いた水中物体の3次元計測を提案し、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、投影パターンを格子状にし、より多くの部分の3次元座標の測定を可能にすることが挙げられる。

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。

参考文献

- [1] Behzad Kamgar-Parsi, Lawrence J. Rosenblum and Edward O. Belcher: "Underwater Imaging with a Moving Acoustic Lens," IEEE Transactions on Image Processing, Vol.7, No.1, pp.91-99, 1998.
- [2] Atsushi Yamashita, Etsukazu Hayashimoto, Toru Kaneko and Yoshimasa 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 (IROS2003), pp.1578-1583, 2003.
- [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] 河村 拓史, 斎藤 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.
- [6] Atsushi Yamashita, Yudai Shirane and Toru Kaneko: "Monocular Underwater Stereo -3D Measurement Using Difference of Appearance Depending on Optical Paths-," Proceedings of the 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2010), pp.3652-3657, 2010.
- [7] 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.
- [8] Atsushi Yamashita, Akira Fujii and Toru Kaneko: "Three Dimensional Measurement of Objects in Liquid and Estimation of Refractive Index of Liquid by Using Images of Water Surface with a Stereo Vision System," Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2008), pp.974-979, 2008.
- [9] Tatsuya Naruse, Toru Kaneko, Atsushi Yamashita and Hajime Asama: "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.
- [10] 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.
- [11] 渡辺 正規, 大田 友一, 池田 克夫: "3眼ステレオ視による奥行き決定精度の改善," 情報処理学会論文誌, Vol.27, No.11, pp.1086-1094, 1986.
- [12] 山本 健彦, 大田 友一, 池田 克夫: "水平配置3眼ステレオ視による隠れの改善," 情報処理学会論文誌, Vol.29, No.9, pp.898-906, 1988.
- [13] クリスティアン・ホイヘンス: "光についての論考," 1690.