

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年6月6日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2010～2012

課題番号：22680017

研究課題名（和文）光の屈折・減衰特性を考慮した水中センシング

研究課題名（英文）Underwater Sensing with Consideration of Light Refraction and Attenuation Effects

研究代表者

山下 淳 (YAMASHITA ATSUSHI)

東京大学・大学院工学系研究科・准教授

研究者番号：30334957

研究成果の概要（和文）：カメラ画像を用いたセンシング技術は、非接触で広範囲を同時に計測できることから幅広く用いられている。これまでの画像センシング技術は、主に空気中など光の伝播特性が一定の環境を取り扱うことが多かった。しかし、水中環境においては、光の屈折、光の減衰、光の遮断などの問題が生じるため、空気中のセンシング手法をそのまま使用することが難しい。そこで本研究では、これら光の伝播特性を考慮した水中センシング手法を構築した。

研究成果の概要（英文）：In this study, we propose an underwater sensing method via image information with consideration of propagation characteristics of light. 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 study proposes a sensing method to execute 3D measurement of objects in water by taking refraction, attenuation, and interruption of light into account.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	9,300,000	2,790,000	12,090,000
2011年度	7,200,000	2,160,000	9,360,000
2012年度	2,900,000	870,000	3,770,000
年度			
年度			
総計	19,400,000	5,820,000	25,220,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：水中・画像処理・コンピュータビジョン・光の伝搬特性・光の屈折・光の減衰・3次元計測・センシング

1. 研究開始当初の背景

カメラで撮影した画像・映像を用いたセンシング技術は、非接触で広範囲を同時に計測できることから幅広く用いられている。画像の形式で与えられたデータを対象に、コンピュータを用いてそこに映し出されている情景を解き明かす技術は、コンピュータビジョン・画像処理と呼ばれ、これまで数多くの研

究がなされてきている。

しかし従来コンピュータビジョンが対象としているのは、主として大気中や真空中など、光の伝播媒質としては光学的に扱いやすい空間における情景であった。一方、計測対象の存在する環境が大気中・真空中でなく水中の場合には、下記に示す光学的条件が問題となる。

(1) 光の屈折の問題 (図 1)

光が異なる媒質を通過する際には屈折率の不連続が生じるため、光が屈折する。大気中・真空中における撮影では被写体とカメラが同じ光学的媒質の中にあるため屈折の問題は無いが、例えばカメラを防水ハウジングに収納して水中を撮影する場合にはハウジングを境として屈折率の不連続が生ずることになり屈折の現象がおこる。そのため撮影画像が幾何学的歪みを受け、その結果、画像を用いた三角測量に重大な計測誤差をもたらす。

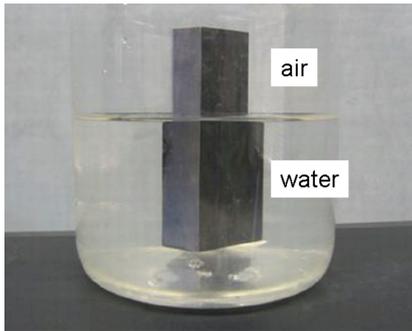


図 1 光の屈折. 画像が歪む. ビーカーに水を半分入れた様子. ビーカーに入っている直方体の形状が水面の上(空气中)と下(水中)で大きく歪んでいる(本来直方体は水面上下で同じ大きさ).

(2) 光の減衰の問題 (図 2)

水中、特に海水中は光の減衰が激しく、大気中・真空中に比べて画像における鮮明度が極めて低い。従ってカメラから離れている被写体を計測することが困難となる。また、水中においては、赤色は青色と比較して減衰が激しいなど、屈折率と同様に減衰率も光の波長によって異なる。従って水中物体を撮影した画像は被写体の真の色を反映しているとは言い難い。



図 2 光の減衰. 画像の色がかすむ. 左図は空中, 右図は水中で撮影した様子. 全体的に色がかすむと同時に、特定の色(赤色など)は他の色と比較して特に目立たなくなる。

(3) 光の遮蔽の問題 (図 3)

水中は大気中・真空中に比べて浮遊物が多く、特に海水中は小魚からプランクトンに至る小型生物や、海草、海底火山による気泡など、種々のものが観測の視界を遮る障害物となることがある。



図 3 光の遮蔽. 対象が見え難い. 水中の気泡によって視界が遮られている様子。

2. 研究の目的

そこで本研究では、(1) 光の屈折、(2) 光の減衰、(3) 光の遮蔽の 3 つの光の伝播特性を考慮し、異なる複数の媒質環境を光が通過する際の、画像センシング手法を構築することを目的とする。

具体的な研究の目的を以下に示す。これらの手法を確立することにより、水中環境においても空気中と同じようにセンシングを行う手法を構築する。

(1) 光の屈折

歪んだ画像を用いて、正確に観測対象の形状や 3 次元位置を計測する手法を確立することを目的とする。

(2) 光の減衰

かすんだ画像を用いて、空気中で観測したときと同等の色を有する画像を再構築する手法を確立することを目的とする。

(3) 光の遮蔽

画像中の視野妨害物を検出し、除去する手法を確立することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 光の屈折

水中環境における対象物までの計測原理の確立を行った。具体的には、光線追跡のテクニックを用いることで、屈折した光の方向を求める手法を構築した。求めた光の方向を用いて、対象物の 3 次元計測を行う手法を確立した。ここでは、広い視野を有するカメラを用いた水中計測手法、単眼カメラを用いて水中 3 次元計測を可能とする手法、水中対象物形状と同時に光の屈折面の形状を計測する手法を新規に構築した。

具体的には、2 台の魚眼カメラを用いた水中計測手法 (図 4)、2 台の全方位カメラを用いた水中計測手法 (図 5)、特殊な形状の防水ハウジングを取り付けた単眼カメラによる水中計測手法 (図 6)、レーザレンジファインダによる水中計測手法 (図 7) をそれぞれ構

築した。



図4 2台の魚眼カメラを用いた水中計測装置。カメラ前方に広い計測範囲を有する。



図5 2台の全方位カメラを用いた水中計測装置。カメラ周囲に広い計測範囲を有する。

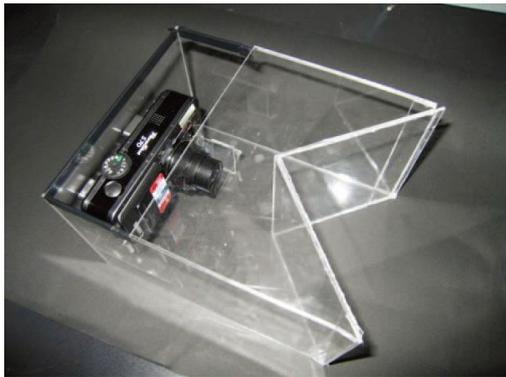


図6 特殊な形状の防水ハウジングを取り付けた単眼カメラによる水中計測装置。1台のカメラのみで3次元計測が可能。



図7 レーザとカメラをマニピュレータ（腕型ロボット）の手先に取り付けた水中計測装置。マニピュレータによってレーザとカメラの位置姿勢を変化させながら水中物体の計測を行う。

(2) 光の減衰

波長による減衰率の違いを考慮した水中物体の色復元手法を構築した。水中においては大気中・真空中よりも光の減衰が大きい。この減衰率は均一ではなく光の波長によってそれぞれ異なる。具体的には赤の方が青よりも減衰率が高いため、水中では物体は青みがかって見える。この現象は物体がカメラから遠いほど顕著に現れるが、もしカメラおよび光源から物体までの距離が分かれば、その物体の色情報が得られることになる。そこで(1)で提案した手法を用いて物体までの距離を計測し、その結果を利用して水中画像の色合いを補正する手法を構築した。

(3) 光の遮蔽

画像からのノイズ除去手法を構築した。水中環境では、気泡などの視野妨害ノイズが空気中よりも多く、環境の誤認識や計測精度の低下を引き起こす。そこで、高速カメラを用いて取得した動画を解析することにより、画像中におけるノイズ位置を自動的に検出し、その結果を用いてノイズを除去する手法を構築した。

4. 研究成果

提案した水中計測システムを用いて水中計測を行い、前述の(1)~(3)に関して提案手法の有効性を確認した。

例として、構築した魚眼ステレオカメラ計測システムを搭載した水中ロボットを図8に示す。

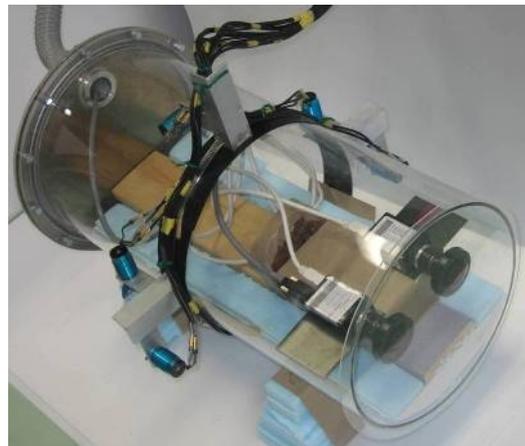


図8 魚眼ステレオカメラを水中ロボットに搭載した様子。

水中に設置した対象物（魚の模型）を魚眼ステレオカメラで計測した結果を図9に示す。対象物の形状が正確に計測できていることが確認できる。また、視野が広い魚眼カメラを用いているため、対象物を広範囲に移動させた場合にも、対象物を見失わずにトラッキ

ングしながら3次元計測を行えることが確認できた。

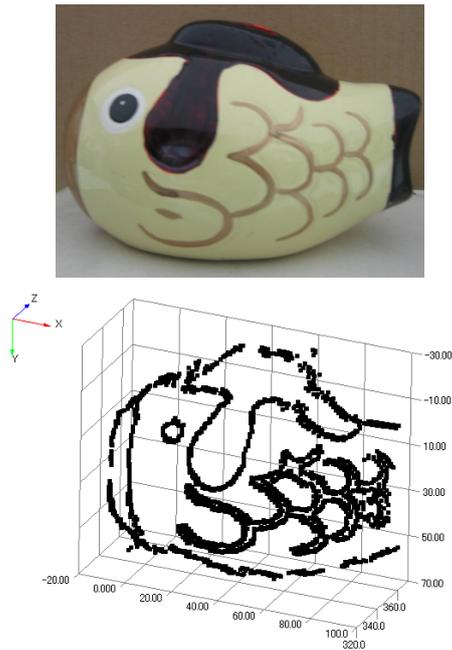


図9 水中物体計測結果1. 上図は計測対象として使用した魚の模型. 下図は水中に設置した魚の模型を魚眼ステレオカメラで3次元計測した結果.

レーザレンジファインダを用いて水中に設置した対象物と光の屈折面形状の同時計測を行った結果を図10, 図11に示す. 光の屈折面の形状(容器形状)を計測した結果が図10, 水を満たした容器内の水中対象物の3次元形状計測結果が図11である.

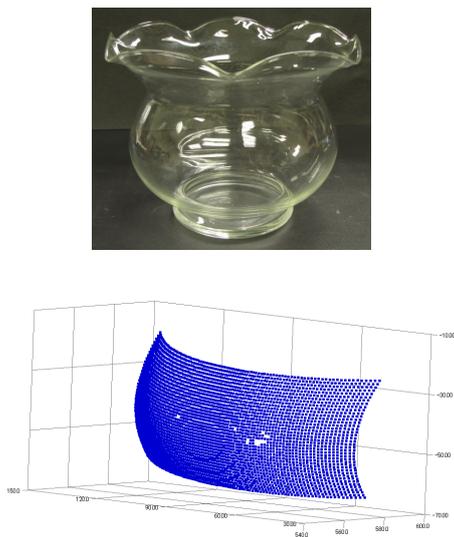


図10 光の屈折面の計測結果. 上図に示す容器に水を満たし, その中に対象物を設置して計測を行った. 下図は容器表面の形状を計測した結果.

屈折面の形状を正確に計測可能であることが図10より確認できる. また, 水中に設置した対象物の形状を正確に計測可能であることが図11より確認できる.

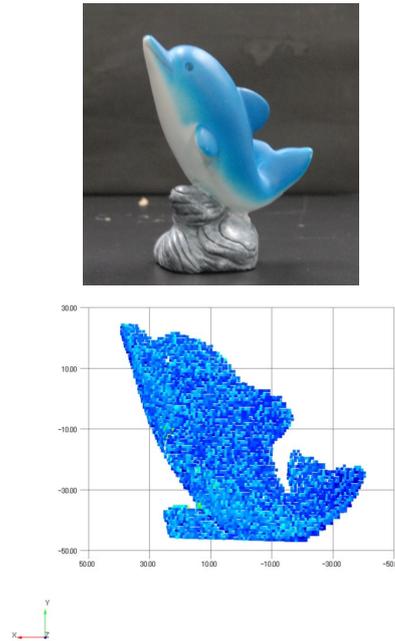


図11 水が満たされた未知形状の容器内の対象物の計測結果. 上図は計測対象として使用した魚の模型. 下図は計測結果.

次に, 水中の置いたサンゴの模型を計測した結果の例を図12に示す. 左図はサンゴの模型の形状を計測した結果, 右図は形状計測結果にテクスチャを付加した結果である. この結果より, 計測対象の形状と色が正確に計測されていることが分かる.

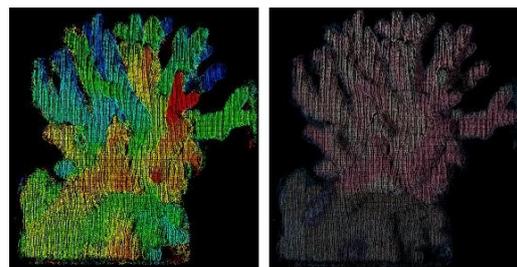


図12 水中物体計測結果. 左図はサンゴの模型の形状を計測した結果(カメラから近距離を赤, 遠距離を青で表示). 右図は形状計測結果にテクスチャを付加した結果.

また, 高速カメラを用いて取得した画像からノイズを自動的に除去した結果の例を図13に示す. 気泡のみが適切に除去されていることが分かる.

以上, (1) 光の屈折, (2) 光の減衰, (3) 光の遮蔽の3つの光の伝播特性を考慮した水中センシング手法を構築した.

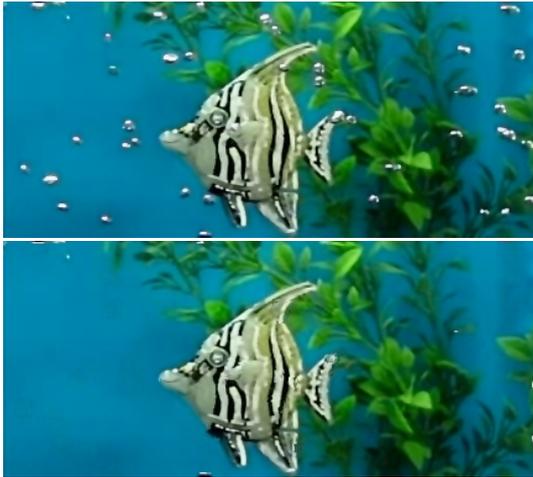


図 13 気泡除去結果. 上図は原画像（気泡除去前）、下図は結果画像（気泡除去後）.

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 5 件）

- 1) 成瀬 達哉, 山下 淳, 金子 透, 小林 祐一: “魚眼ステレオカメラを用いた水中物体の 3 次元計測”, 精密工学会誌, Vol.79, No.4, pp.344-348, 2013, 査読有.
- 2) Ryosuke Kawanishi, Atsushi Yamashita, Toru Kaneko and Hajime Asama: “Parallel Line-based Structure from Motion by Using Omnidirectional Camera in Texture-less Scene”, Advanced Robotics, Vol.27, No.1, pp.19-32, 2013, 査読有.
DOI; 10.1080/01691864.2013.751160
- 3) 川西 亮輔, 山下 淳, 金子 透: “全方位画像中の特徴点と直線エッジの同時拘束と基線長の自動決定に基づく Structure from Motion による三次元環境モデル生成”, 日本ロボット学会誌, Vol.30, No.4, pp.399-410, 2012, 査読有.
DOI; 10.7210/jrsj.30.399
- 4) Atsushi Yamashita, Akira Fujii and Toru Kaneko: “Stereo Measurement of Objects in Liquid and Estimation of Refractive Index of Liquid by Using Images of Water Surface”, Advances in Theory and Applications of Stereo Vision (Asim Bhatti (Ed.)), pp.189-202, 2011, 査読有.

〔学会発表〕（計 28 件）

- 1) 伊部 公紀, 山下 淳, 金子 透, 小林 祐一: “レーザーレンジファインダによる透明容器と液中物体の 3 次元形状計測”, 動的画像処理実利用化ワークショップ 2013, 2013 年 3 月 7 日, 静岡大学浜松キャンパス（静岡県）.
- 2) 坂本 一樹, Alessandro Moro, 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”, 動的画像処理実利用化ワークショップ 2013, 2013 年 03 月 8 日, 静岡大学浜松キャンパス（静岡県）.

- 3) 成瀬 達哉, 山下 淳, 金子 透, 浅間 一: “魚眼ステレオカメラによる水中 3 次元計測”, 第 17 回ロボティクスシンポジウム, 2012 年 03 月 14 日, 萩本陣（山口県）.
- 4) 伊部 公紀, 山下 淳, 金子 透: “マニピュレータ搭載の LRF による水槽面と水中物体の 3 次元形状計測”, 映像情報メディア学会メディア工学研究会, 2011 年 11 月 13 日, 宇都宮大学日光自然ふれあいハウス（栃木県）.
- 5) Atsushi Yamashita, Ryosuke Kawanishi, Tadashi Koketsu, Toru Kaneko and Hajime Asama: “Underwater Sensing with Omni-Directional Stereo Camera”, The 11th Workshop on Omnidirectional Vision, Camera Networks and Non-classical Cameras (OMNIVIS2011), 2011 年 11 月 7 日, バルセロナ（スペイン）.
- 6) 南川 豊浩, 山下 淳, 金子 透: “高速度カメラを用いた移動物体追跡による水中画像からの視野妨害ノイズ除去”, 映像情報メディア学会メディア工学研究会, 2011 年 2 月 19 日, 関東学院大学（神奈川県）.
- 7) Atsushi Yamashita, Yudai Shirane, and Toru Kaneko: “Monocular Underwater Stereo -3D Measurement Using Difference of Appearance Depending on Optical Paths”, 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2010), 2010 年 10 月 20 日, 台北国際会議場（台湾）.

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.robot.t.u-tokyo.ac.jp/~yamashita/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山下 淳 (YAMASHITA ATSUSHI)

東京大学・大学院工学系研究科・准教授
研究者番号：30334957

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし