

令和元年5月27日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2018

課題番号：26240023

研究課題名(和文) アクアビジョン：カメラ・プロジェクタ群が形成する水中光線空間のモデル化とその応用

研究課題名(英文) Aqua Vision: Underwater light-field capture with projector-camera system and its applications

研究代表者

延原 章平 (Nobuhara, Shohei)

京都大学・情報学研究科・講師

研究者番号：00423020

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は水中環境における多視点カメラ・プロジェクタ群を用いた3次元形状・運動計測を目的として、屈折を伴う撮像課程のモデル化、効率的な投影計算アルゴリズムの考案、微小物体を対象とした新たな光学系の設計、およびこれらの周辺技術としての水中物体の検出、追跡技術に取り組んだものであり、特に球面レンズと複合鏡を組み合わせた反射屈折光学系によって微小物体の多視点撮影および3次元形状計測が可能であることを実証した点に新規性・独創性を有する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

コンピュータビジョン分野では画像を入力とした3次元形状・運動計測が広く研究されてきたが、それらの多くは屈折のない通常環境における撮像を想定しており、学術的・産業的応用が多く存在するにもかかわらず、水中環境にそのまま適用することはできなかった。本研究では特に屈折のモデル化について検討を行い、水中から撮像面への順投影計算を簡潔に記述することができる新たなカメラモデルを考案して3次元形状計測を実現するとともに、これを微小物体環境へと適用できるように新たな反射屈折光学系とその投影モデルを考案した点に学術的意義が存在する。

研究成果の概要(英文)：This project is aimed at developing a new image-based 3D shape and motion capture technique for underwater environment using multi-view projector-camera system, and its achievements include a new underwater camera model for modeling refractive process and its application for an efficient numerical forward projection, a new catadioptric system for micro-scale object capture, and underwater object detection and tracking algorithms. In particular the project developed a new teleidoscopic imaging system which integrates a spherical lens and a kaleidoscope in front of a perspective camera to realize a multi-view capture of micro-scale objects from a single viewpoint.

研究分野：コンピュータビジョン

キーワード：カメラキャリブレーション 3次元形状・運動計測 水中環境 反射屈折光学系

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

従来のコンピュータビジョンでは人間の生活空間を計測対象としており、空気中での光の直進性・不透明物体表面での反射を基礎としていた。そのため屈折・散乱・吸収といった性質を持つ空間および対象については体系的に扱われてこなかった。

一方より広く生物世界を計測対象空間として考えると、例えば受精卵の全周囲3次元形状計測による卵割過程の可視化と理解による医学・生命情報学への貢献、魚の3次元計測による漁業、特に養殖業の情報化など、スケールの違いはあれども水中環境を対象とした視覚メディアによる3次元計測が有用な領域が数多く存在し、そこでは光の屈折・散乱・吸収が一般的に存在する。

そこで本研究では、視覚情報に基づいた、反射・屈折・散乱・吸収を伴う水中3次元形状・運動計測の実現を目標とする。その学術的貢献は、スネルの法則・フレネルの式など物理法則に基づく解析によって不良設定逆光学問題を解くのではなく、「水中光線空間が物体によってどう変化するのか」をモデル化することによって物体の形状・運動推定を実現する手法の考案にあり、これは Shape-from-RaySpace と呼ぶべき新たな形状・運動理解の枠組みの構築を目指すものである。

### 2. 研究の目的

本研究の目指す多視点カメラ・プロジェクタ群が形成する水中光線空間のモデル化と解析による水中3次元形状・運動計測を実現するには、そもそも空気中に設置されたカメラ・プロジェクタ群から水中光線空間をどのように獲得するのか、そしてそれが得られたとして、どのようにしてそこから3次元形状・運動情報を推定するのか、という2つの問題を解決しなくてはならない。そのため本研究ではそれぞれを実現するために下記の2点を主な達成目標に掲げる。

- (1) 水中光線群の獲得：水中カメラ・プロジェクタ群の位置・姿勢推定アルゴリズムの構築
- (2) 水中光線群の解析：光の反射・屈折・散乱・吸収を伴う水中物体の3次元形状・運動計測

まず(1)では「カメラおよびプロジェクタの各画素に入射あるいは射出した光が、水中で通過した光路」に着目し、各画素に対応する水中光線が各カメラ・プロジェクタでどのような光束を形成するのか、またあるカメラ・プロジェクタの水中光線群が、別のカメラ・プロジェクタ視点ではどのように観測されるのかをモデル化する。

続いて(2)では、得られた時系列水中光線群を入力とし、それと矛盾無く合致する3次元形状・運動を求めるといったアイデアに基づいて、水中半透明物体の3次元形状・運動計測を実現する。

### 3. 研究の方法

本申請の研究目的を達成するためには、水中光線空間のモデル化と、その解析による形状・姿勢・運動計測を並行して実施する必要がある。そこで(1)光線空間のモデル化と3次元形状計測、(2)半透明物体の検出と姿勢推定、(3)複数半透明物体の広範囲運動計測、の3分野について並行して取り組み、互いに連携しながら研究を遂行する。すなわち(A)では単純な水槽形状での水中光線空間のモデル化および形状計測、(2)では半透明物体の検出、(3)では屈折のみを考慮した運動計測から研究を進めることでベースラインとなる要素技術を確立させ、その後互いの成果を有効に活用しながら各グループの目標達成に向けて研究を進める。また図1のように水中撮影環境と等価な光線空間を作り出す実験室環境を用意することで、円滑な研究の推進を図る。

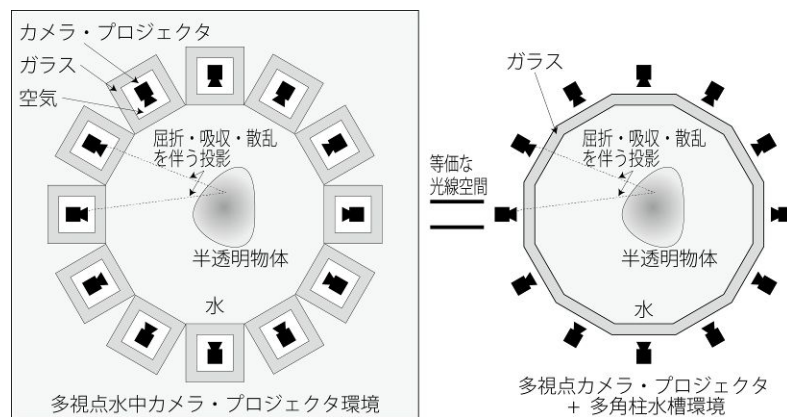


図1：水中多視点カメラ・プロジェクタ環境(左)，等価な光線空間を実現する実験環境(右)

### 4. 研究成果

(1) 平面屈折層を備えた水中プロジェクタ・カメラによる多視点3次元形状計測：平面屈折層を備えた透視投影カメラにおける水中光線と画素の関係は屈折によって単純なピンホールカメラモデルでは表現することができないが、これを撮像面を共有しつつも画素単位で焦点距離が変化する仮想カメラであるとみなすと、光学系全体を1つのカメラとしてモデル化することができることを示した(図2)。この仮想カメラモデルを用いたカメラ間の相対位置姿勢を求める線形キャリブレーションアルゴリズムを導出するとともに、同様に平面屈折層を備えたプロジェクタを逆カメラとみなして同じモデルで記述するアルゴリズムを考案した。さらにこれらの成果に基づいて、水中環境にパターン光を投射し、これをカメラで撮影することで三角測量

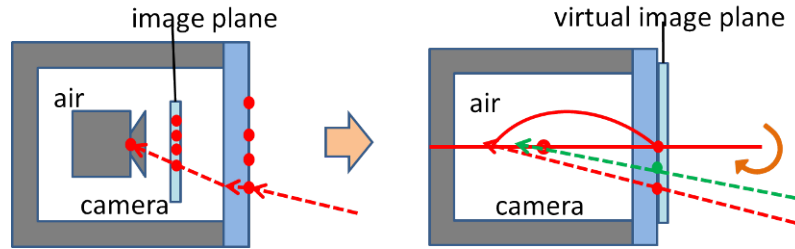


図2：平面屈折層を備えた透視投影カメラによる投影課程（左），光学系全体としての画素依存可変焦点仮想カメラとしてのモデル化（右）

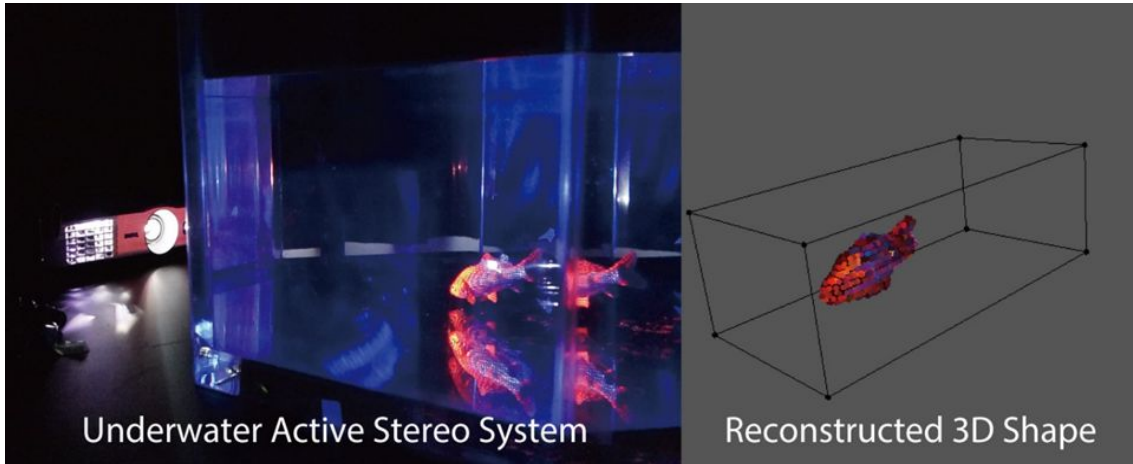


図3：水中多視点アクティブステレオシステム（左），計測された3次元形状の例（右）

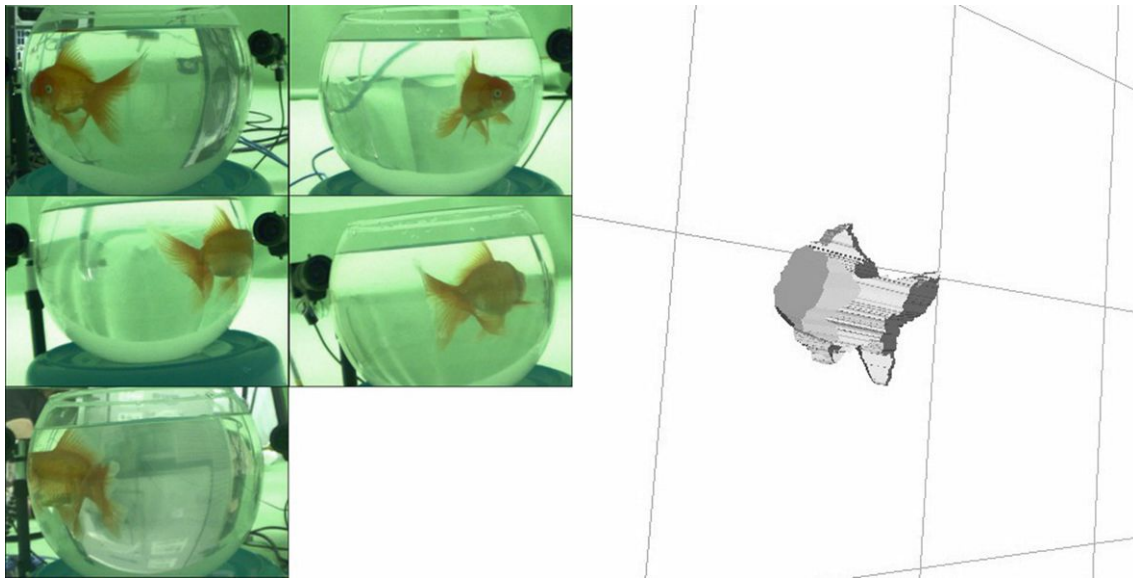


図4：形状未知の屈折層を介した水中3次元計測．左：撮影画像，右：形状復元結果．

によって3次元形状を計測する水中アクティブステレオシステムを構築し，自由に運動する魚の3次元ビデオ撮影を行うことができることを示した．

またこのような水中光線と画素の対応関係を記述することができれば水中3次元計測が可能となるという知見に基づいて，平面屈折層ではなく任意の曲面屈折層における屈折をモデル化する手法として，未知屈折層を介して撮影された3平面の交線を用いたキャリブレーション手法を考案するとともに，そのような形状未知の屈折層を介して撮影された多視点映像から3次元形状をリアルタイムに復元するシステムを構築することができた．

このような屈折を介した3次元形状計測をさらに発展させ，微小物体を球面レンズと複合鏡を介して撮影することによって，物理的には単一視点ながら，仮想的に複数の視点から微小物体を同時に被写界深度内に収めながら撮影することができる反射屈折光学系を考案するとともに，光線空間の軸対称性と，球面レンズ中心の特異性に着目した線形キャリブレーションアルゴリズムを導出した．またこの光学系にプロジェクタを組み合わせ，アクティブステレオによって実際に3次元形状計測が可能であることを実証した（図5）．

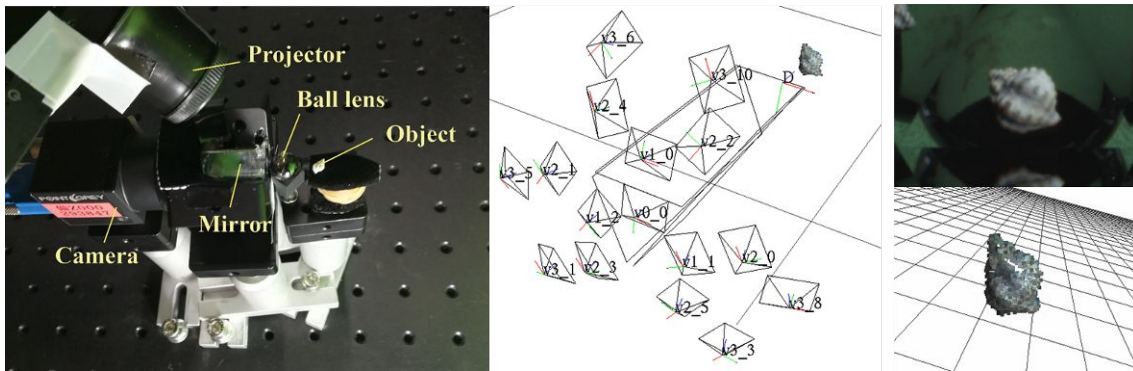


図 5 : 球面レンズと複合鏡からなる仮想多視点撮影システム(左)と仮想カメラ配置(中央), および被写体(右上)と3次元形状復元例(右下).

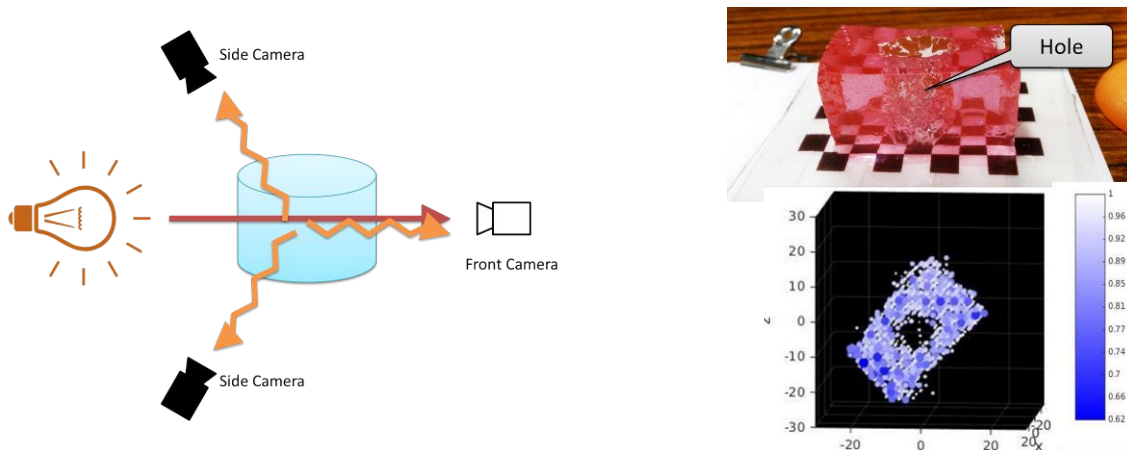


図 6 : 複数光源環境下における透過光と散乱光の計測(左)による半透明物体(右上)の検出および形状推定(右下). 画像からは直接観測されない空間の存在を推定することができている.

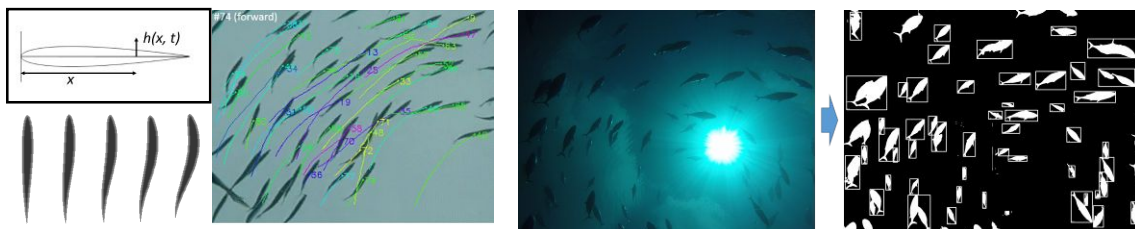


図 7 : NACA モデルと魚群の追跡結果(左). 海中映像での魚の追跡と尾数推定(右).

(2) 半透明物体の検出と姿勢推定: 図 6 に示すように, 光源から光を照射した様子を多視点カメラ群で撮影し, 透過光と散乱光の多視点像から物体内部の構造を推定する手法を開発した. 具体的に同図右上のように内部に空間を持つ物体に対して, 同図右下のように形状を透過率分布として推定することが可能であることを示した.

(3) 複数半透明物体の広範囲運動計測: 群になって泳いでいる魚の検出と姿勢推定を行う手法を開発した. 魚を単に検出するだけでなく, その詳細動作を表現するために NACA Airfoil モデルを採用した. このモデルは図 7 左に示すように, 遊泳する魚の動きをパラメトリックに表現するため, 遊泳する魚の姿勢変化を精度よく表現でき, さらに, 姿勢変化の急激な変化が群れの中を伝搬していく様子など, 群れの動きを定量的に把握するための有用な情報となると期待される. この追跡手法の有効性を検証するために, 水族館の大水槽で遊泳するマイワシの大群を撮影した映像を用いた評価実験を行った. 評価実験では, 魚同士の重なりが発生している場合でも精度良く追跡や姿勢推定が行えることを確認した. さらに, 海中で撮影した映像において魚の検出を行う手法も開発した. 海中生け簀では魚以外のゴミや日光の影響に対応する必要がある. 開発した手法では, 正確な領域分割とその後の尾数推定のために 2 段階の深層学習を用いる. 評価実験では養殖生け簀において撮影した映像を用い, 図 7 右のように魚の領域分割が正しく行っていることを確認した.

## 5 . 主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕(計4件)

- [1] Ryo Kawahara, Shohei Nobuhara, and Takashi Matsuyama, "Dynamic 3D capture of swimming fish by underwater active stereo," *Methods in Oceanography*, vol. 17, pp. 118 ~ 137, Dec. 2016. 査読有 . DOI:10.1016/j.mio.2016.08.002
- [2] Kei Terayama, Hitoshi Habe and Masa-aki Sakagami, "Multiple fish tracking with an NACA airfoil model for collective behavior analysis," *IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications*, vol. 8, 2016. 査読有 . DOI:10.1186/s41074-016-0004-1
- [3] Kosuke Takahashi, Shohei Nobuhara, and Takashi Matsuyama, "Mirror-based Camera Pose Estimation Using an Orthogonality Constraint," *IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications*, vol. 8, pp. 11 ~ 19, Feb. 2016. 査読有 . DOI:10.2197/ipsjtcva.8.11
- [4] Ryo Kawahara, Shohei Nobuhara, and Takashi Matsuyama, "Underwater 3D surface capture using multi-view projectors and cameras with flat housings," *IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications*, vol. 6, pp. 43 ~ 47, Jul. 2014. 査読有 . DOI:10.2197/ipsjtcva.6.43

### 〔学会発表〕(計5件)

- [1] Rodrigo Verschae, Hiroaki Kawashima, and Shohei Nobuhara, "A Multi-Camera System for Underwater Real-Time 3D Fish Detection and Tracking," in *IEEE OCEANS*, 2017.
- [2] Kosuke Takahashi, Akihiro Miyata, Shohei Nobuhara, and Takashi Matsuyama, "A Linear Extrinsic Calibration of Kaleidoscopic Imaging System From Single 3D Point," in *Proc. of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2017.
- [3] Shohei Nobuhara, Takashi Kashino, Takashi Matsuyama, Kouta Takeuchi, and Kensaku Fujii, "A Single-Shot Multi-Path Interference Resolution for Mirror-Based Full 3D Shape Measurement with a Correlation-Based ToF Camera," in *Proc. of International Conference on 3D Vision (3DV)*, 2016, pp. 342 ~ 350.
- [4] Mai Nishimura, Shohei Nobuhara, Takashi Matsuyama, Shinya Shimizu, and Kensaku Fujii, "A Linear Generalized Camera Calibration from Three Intersecting Reference Planes," in *Proc. of IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 2015, pp. 2354 ~ 2362.
- [5] Tomu Tahara, Ryo Kawahara, Shohei Nobuhara, and Takashi Matsuyama, "Interference-free epipole-centered structured light pattern for mirror-based multi-view active stereo," in *Proc. of International Conference on 3D Vision (3DV)*, 2015, pp. 153 ~ 161.

### 〔図書〕(計0件)

該当なし

### 〔産業財産権〕

該当なし

### 〔その他〕

<https://sites.google.com/a/vision.kuee.kyoto-u.ac.jp/aww2016/> (2016年9月に開催した国際ワークショップ「International Workshop on Aqua Vision 2016」のホームページ)

## 6 . 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名：松山隆司

ローマ字氏名：(Matsuyama Takashi)

所属研究機関名：京都大学

部局名：大学院情報学研究科

職名：教授

研究者番号(8桁)：10109035

研究分担者氏名：川嶋宏彰

ローマ字氏名：(Kawashima Hiroaki)

所属研究機関名：京都大学  
部局名：大学院情報学研究科  
職名：准教授  
研究者番号（8桁）：40346101

研究分担者氏名：波部 斉  
ローマ字氏名：(Habe Hitoshi)  
所属研究機関名：近畿大学  
部局名：理工学部  
職名：准教授  
研究者番号（8桁）：80346072

(2)研究協力者  
該当なし

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。