

令和 3 年 6 月 5 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K19815

研究課題名（和文）複合鏡による多重鏡映像を用いたカメラキャリブレーション

研究課題名（英文）Camera Calibration with Kaleidoscopic Imaging

研究代表者

延原 章平（Nobuhara, Shohei）

京都大学・情報学研究科・准教授

研究者番号：00423020

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では鏡による反射像を用いたカメラキャリブレーションを実現するとともに、それを足掛かりとして屈折、フレネル反射、吸収、偏光など様々な光学現象のモデルを取り入れた計測系を考案し、それぞれについてキャリブレーション方法とそれを用いた3次元形状計測手法の開発を行うことができた。これらはいずれも水中などこれまでコンピュータビジョンでは広く扱われてこなかった領域における新たな高精度3次元形状計測手法をもたらすとともに、屋外など実世界における3次元形状計測にも新たな手法を提案するものである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究によって実現された複合鏡を用いたカメラキャリブレーションは、コンピュータビジョン技術に基づいた実世界の3次元計測を行う上で不可欠であるカメラキャリブレーションを簡便かつ頑健に実現させる新たな手法として幅広く利用することができる。またこの研究を足掛かりとして取り組んだ光の吸収や偏光を利用した水中および屋外環境における3次元形状計測は、これまでコンピュータビジョン技術の適用が困難であった領域に対してよりシンプルな計測手段を提供することができる。

研究成果の概要（英文）：This research realized a novel camera calibration from mirror reflections. It parses the structure of kaleidoscopic images automatically, and exploits the estimated structure to realize a robust and accurate calibration. Extensive evaluations demonstrate that the proposed algorithm outperforms the state-of-the-art methods quantitatively. In addition to this calibration, this research also studied extensions to refraction, Fresnel reflection, absorption by Beer-Lambert law, and polarization. Each of them realized a novel 3D surface normal and shape recovery algorithm and a calibration method for the novel capture setup. These achievements open new avenues for applications in underwater and outdoor 3D sensing.

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次元形状復元 鏡映変換 偏光

### 1. 研究開始当初の背景

この研究の目的は、コンピュータビジョン分野において従来では実現が困難である状況下におけるカメラキャリブレーションを実現するアルゴリズムの原理を探求し、それを具体的に実施可能なものへと発展させることにある。ここでカメラキャリブレーションとは、画像センサとしてのカメラの校正、すなわち対象となる実世界3次元情報がどのようなモデルで2次元の画像として投影されるか、というモデル自身の同定とそのモデルパラメータの推定を意味しており、車両やドローン、ロボットなどの自動運転・自律制御におけるカメラ画像を用いた3次元自己位置推定、周辺環境理解技術の基礎として非常に重要な役割を果たしている。

### 2. 研究の目的

これまでカメラキャリブレーションでは、格子パターンを印刷した平面など、形状が既知である何らかの参照物体を撮影することで実現されてきたが、その際には「実際に撮影対象とする空間全体をカバーするように参照物体を置き、その姿勢を変えながら複数回撮影する」必要があった。そのため広い範囲を写す広角カメラでは数メートル四方の参照物体を用意する物理的な困難さが、また逆に望遠カメラではその被写界深度の浅さからフォーカスが合う範囲で参照物体を複数姿勢撮影することが困難であった。すなわちこれまでの手法には画角と被写界深度という2つの点で、広角あるいは望遠カメラのキャリブレーションに問題がある。これらの問題点を下記解決することが本研究の目的である。

### 3. 研究の方法

上記の問題に対して本研究では、画角に対しては複合鏡による反射像を、被写界深度に対してはボケ画像からの復元を利用した新たなアプローチによって解決を図る。すなわち図1に示すようにカメラ前面に設置した複合鏡を介して撮影を行うことで、カメラの視野全体に鏡映像を生成し、それらの鏡映変換関係を推定することによってカメラキャリブレーションをも実現する。また同時に、複合鏡の開口を既知の形状としておけば、たとえ被写界深度外となってボケが生じたとしても元の像を復元することが可能であり、これを参照物体として活用することができる。

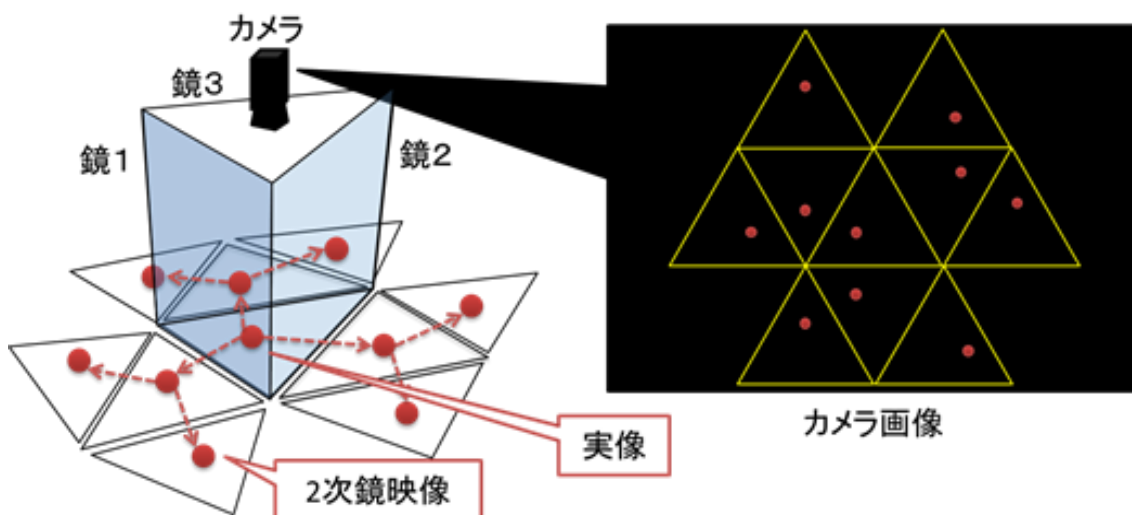


図1：複合鏡による鏡映像の撮影によるキャリブレーション (図は3次像以降を省略)。実像とその鏡映像それぞれの投影像間で満たされるべき関係を制約条件として用いることで画角の問題を解決し、実像を既知の開口形状とすることで被写界深度外によるボケの問題も同時に解決する。

### 4. 研究成果

本研究の成果は主に①複合鏡による反射像を用いたカメラキャリブレーション、②実環境における鏡映像を用いたカメラキャリブレーションと3次元形状復元、③屈折および吸収をモデル化した水中3次元形状計測、④反射および偏光をモデル化した3次元形状計測の4つに大別される。これらは当初の複合鏡による反射像を用いたカメラキャリブレーションから開始した研

究 (①) が、反射によって生じる geometric な変化のみならず photometric な変化も活用することで実世界におけるカメラキャリブレーションが可能であることを示し (②), また反射と同様にモデル化可能な屈折に加えて光の吸収をモデル化するように計測モデルを拡張し (③), さらに偏光も取り入れることで新たな 3 次元形状計測の実現 (④) へと至ったものである。以下ではそれぞれについて順に報告する。

### ①複合鏡による反射像を用いたカメラキャリブレーション

当初より計画していた複合鏡を用いたカメラキャリブレーションを実現するにあたり、この研究ではまず撮影された点群 (図 1 右) から実像とその 1 次反射像, 2 次反射像といった高次反射像を自動的に判別するアルゴリズムを開発した。続いてこの自動判別アルゴリズムに基づいて自動的にカメラキャリブレーションを行うことが可能であることを、そしてその精度が従来法よりも高いことを実証した。この成果は引用文献[1]および[2]にまとめられている。

またこの知見を活かして、複合鏡に球面レンズを組み合わせた反射屈折光学系を考案し (図 2), これによって微小物体を拡大撮影することと、それを物理的には 1 視点からの撮影でありながら鏡映像によって仮想的に多視点撮影を行うことが同時に実現可能であることを示すとともに、そのキャリブレーション方法を考案した。この成果は引用文献[3]として発表されている。

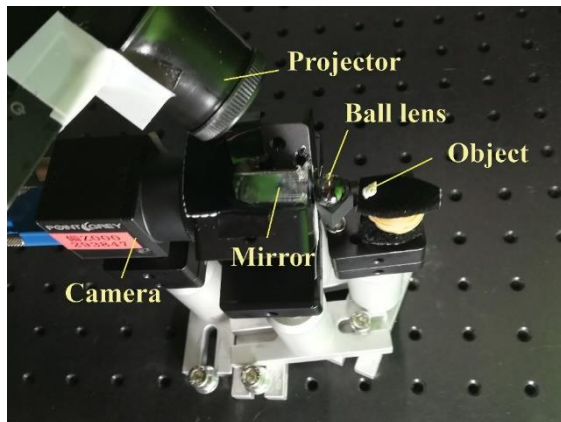


図 2 : 複合鏡と球面レンズを組み合わせた微小物体の仮想多視点撮影システム

### ②実環境における鏡映像を用いたカメラキャリブレーションと 3 次元形状復元

上記のカメラキャリブレーションでは、反射と屈折によって生じる geometric な制約のみを用いてきた。本来、反射・屈折には geometric な変化に加えてフレネルの式として知られる photometric な制約も存在する。そこで特に鏡映反射でのフレネル反射率が反射面 (鏡面) に対する光の入射角度に依存することを利用した、実像と鏡像を同時観測するカメラの内部パラメータと外部パラメータの同時推定を実現した。またこの過程において、実像と鏡像を相異なる視点から撮影していることを利用した 3 次元形状計測が可能であること、さらに鏡像が常に実像よりも暗く写り、かつその度合いもモデル化できることから、仮想的に多重露光撮影がなされていると見なすことができることに着目し、被写体の 3 次元形状を推定しつつ、そのテクスチャを HDR 復元することを実現した。この成果は引用文献[4]として発表されている。

### ③屈折および吸収をモデル化した水中 3 次元形状計測

前述②では屈折・反射という geometric な要素とフレネル反射という photometric な要素を組み合わせた研究を行った。③では媒質による光の吸収という要素をモデル化することで水中環境における 3 次元形状計測に取り組んだ。この研究では外部からの光が屈折・吸収されながら水中物体を照射し、さらにそれが屈折・吸収されながらカメラに到達する過程をモデル化し、特に吸収による光の減衰量が光路長すなわちカメラから被写体までの距離に依存することに着目した 3 次元形状計測を実現した (図 3)。またこれと同時に、形状が既知である物体を撮影することによって、逆に光の入射方向や媒質による光の吸収係数をキャリブレーションする新たな手法を考案した。文献[5]および[6]では、本研究で開発した手法によって魚など水中を自由に運動する物体の表面形状とその法線方向を高精度に計測することができること、また非剛体変形を行いながら運動する被写体を時系列的に沿って計測することで、その全周囲 3 次元形状計測を実現することができることを実証した。

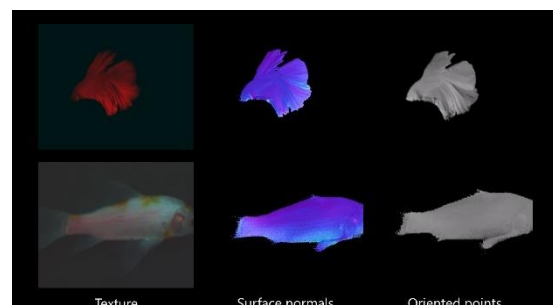
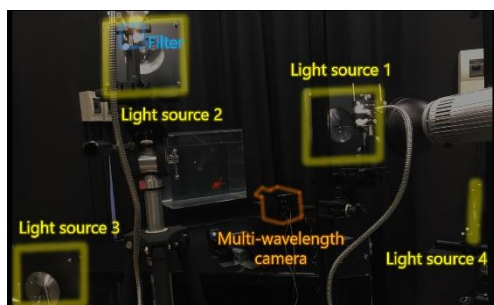


図 3 : 光の屈折及び吸収を考慮した水中物体の 3 次元形状復元。左 : 撮影に用いる光学系。右 : 入力画像 (可視光) と得られた法線情報及び深度情報。

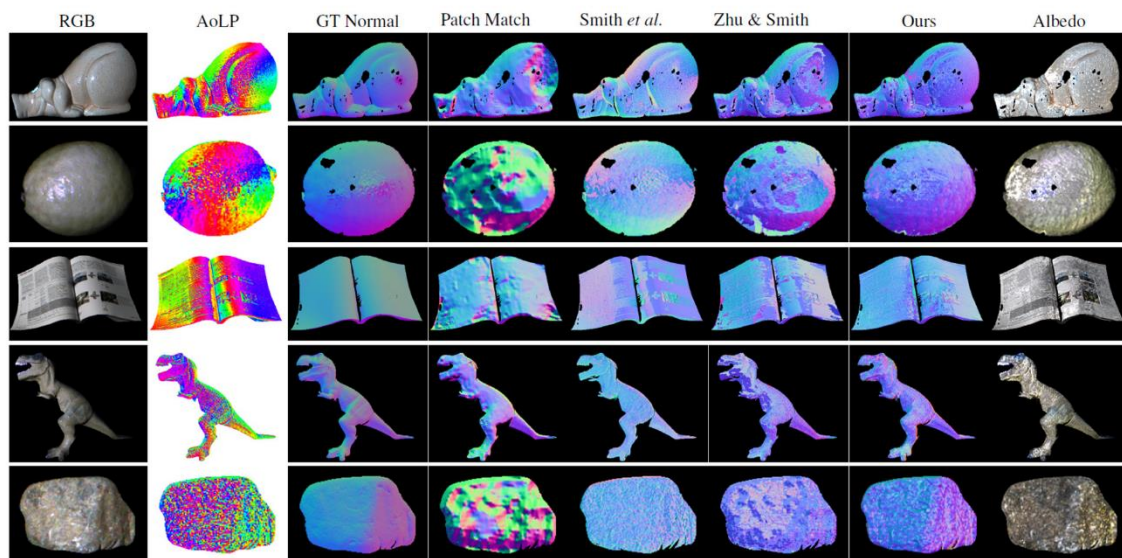


図4：偏光情報を用いたステレオ3次元計測．従来手法と比較してより正確な表面形状が得られていることがわかる．

#### ④反射および偏光をモデル化した3次元形状計測

この研究では②のフレネル反射に偏光計測を組み合わせることで、被写体の3次元表面形状を高精度に計測できることを示した．特に文献[7]では屋外環境では空そのものがレイリー散乱としてモデル化される特徴的な偏光光源として振る舞うことに着目して、被写体による反射光の偏光成分を空由来の要素と被写体の表面による反射に由来する要素に分けることを通じて、被写体表面形状を推定することができることを示した．また文献[8]ではそのような偏光情報をステレオ撮影することによって、表面形状の粗さなど物体素材に関連するパラメータの推定をも同時に可能であることを示した(図4)．これらの研究は屋外環境であっても偏光カメラで撮影するだけで周囲の物体の3次元形状や、物体素材を認識する上での手掛かりを得ることが可能であることを示しており、自動車量運転やロボットナビゲーションなど多くのアプリケーションが存在する．

以上のように、本研究では反射像を用いたカメラキャリブレーションを足掛かりに、そこから屈折、フレネル反射、吸収、偏光など様々な光学現象のモデルを取り入れた計測系を考案し、それぞれについてキャリブレーション方法とそれを用いた3次元形状計測手法の開発を行うことができた．これらはいずれも水中などこれまでコンピュータビジョンでは広く扱われてこなかった領域における新たな高精度3次元形状計測手法をもたらすとともに、屋外など実世界における3次元形状計測にも新たな手法を提案するものである．今後は水中環境と屋外環境それぞれについて、形状計測のさらなる高精度化と、計測系の簡素化に取り組むことを予定している．

#### 引用文献

- [1] Kosuke Takahashi and Shohei Nobuhara, “Camera Calibration Based on Mirror Reflections,” 情報処理学会コンピュータビジョンとイメージメディア研究会(CVIM), 2018-CVIM-212(39), May 2018. **情報処理学会 CVIM 研究会奨励賞受賞**
- [2] Kosuke Takahashi and Shohei Nobuhara, “Structure of Multiple Mirror System from Kaleidoscopic Projections of Single 3D Point,” IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence (TPAMI), 2021.
- [3] Ryo Kawahara and Shohei Nobuhara, “A Novel Catadioptric Ray-Pixel Camera Model and its Application to 3D Reconstruction,” 情報処理学会コンピュータビジョンとイメージメディア研究会(CVIM), 2019-CVIM-217(7), May 2019. **情報処理学会 CVIM 研究会奨励賞受賞**
- [4] Ryo Kawahara, Meng-Yu Kuo, Shohei Nobuhara, and Ko Nishino, “Appearance and Shape from Water Reflection,” in Proc. of IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV), 2020,
- [5] Satoshi Murai, Meng-Yu Jennifer Kuo, Ryo Kawahara, Shohei Nobuhara, and Ko Nishino, “Surface Normals and Shape From Water,” in Proc. of International Conference on Computer Vision (ICCV), 2019.
- [6] Mengyu Jennifer Kuo, Ryo Kawahara, Shohei Nobuhara, and Ko Nishino, “Non-Rigid

Shape from Water,” IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence (TPAMI), 2021.

- [7] Tomoki Ichikawa, Matthew Purri, Ryo Kawahara, Shohei Nobuhara, Kristin Dana, and Ko Nishino, “Shape from Sky: Polarimetric Normal Recovery Under The Sky,” in Proc. of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2021.
- [8] Yoshiki Fukao, Ryo Kawahara, Shohei Nobuhara, and Ko Nishino, “Polarimetric Normal Stereo,” in Proc. of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2021.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kosuke Takahashi and Shohei Nobuhara	4. 巻 Early Access
2. 論文標題 Structure of Multiple Mirror System from Kaleidoscopic Projections of Single 3D Point	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence	6. 最初と最後の頁 1-1
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TPAMI.2021.3070347	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 [6]Mengyu Jennifer Kuo, Ryo Kawahara, Shohei Nobuhara, and Ko Nishino	4. 巻 Early Access
2. 論文標題 Non-Rigid Shape from Water	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence	6. 最初と最後の頁 1-1
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TPAMI.2021.3075450	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件／うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Ryo Kawahara and Shohei Nobuhara
2. 発表標題 A Novel Catadioptric Ray-Pixel Camera Model and its Application to 3D Reconstruction
3. 学会等名 情報処理学会コンピュータビジョンとイメージメディア研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryo Kawahara, Meng-Yu Kuo, Shohei Nobuhara, and Ko Nishino
2. 発表標題 Appearance and Shape from Water Reflection
3. 学会等名 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Satoshi Murai, Meng-Yu Jennifer Kuo, Ryo Kawahara, Shohei Nobuhara, and Ko Nishino
2. 発表標題 Surface Normals and Shape From Water
3. 学会等名 International Conference on Computer Vision (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kosuke Takahashi and Shohei Nobuhara
2. 発表標題 Camera Calibration Based on Mirror Reflections
3. 学会等名 情報処理学会コンピュータビジョンとイメージメディア研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tomoki Ichikawa, Matthew Purri, Ryo Kawahara, Shohei Nobuhara, Kristin Dana, and Ko Nishino
2. 発表標題 Shape from Sky: Polarimetric Normal Recovery Under The Sky
3. 学会等名 Computer Vision and Pattern Recognition (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yoshiki Fukao, Ryo Kawahara, Shohei Nobuhara, and Ko Nishino
2. 発表標題 Polarimetric Normal Stereo
3. 学会等名 Computer Vision and Pattern Recognition (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計2件

産業財産権の名称 形状測定装置、形状測定方法、形状測定プログラム及び内視鏡システム	発明者 西野恒，延原章平， 川原僚，グウオモン ユージェニファー，	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-188208	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 情報処理装置、情報処理方法および情報処理プログラム	発明者 西野恒，延原章平， 川原僚，深尾圭貴	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2021-91519	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
米国	Rutgers University			