

令和 5 年 6 月 17 日現在

機関番号：12201  
研究種目：基盤研究(C) (一般)  
研究期間：2020～2022  
課題番号：20K04516  
研究課題名(和文) Passive system for sensing object motion in 3D

研究課題名(英文) Passive system for sensing object motion in 3D

## 研究代表者

ヘーガン ネイザン (Hagen, Nathan)

宇都宮大学・工学部・教授

研究者番号：50781506

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本プロジェクトでは、従来の3D計測を波長符号化された縞模様データを用いることに成功し、多数の縞模様を同時に検出することが可能となりました。これにより、動的な物体の3D計測を行う道が開かれ、3D計測のダイナミックレンジが広がり、物体の反射率スペクトルを3D形状と同時に計測することが可能となりました。また、このプロジェクトの予想外の成果として、幾何学的な位相の理解にもブレイクスルーがありました。このプロジェクトの成果として、査読付き学術論文10本、会議論文3本、会議発表12本、すべてこの研究助成で支援されています。

## 研究成果の学術的意義や社会的意義

一般的な3D計測は静止した物体を対象としますが、本アプローチは動く物体の3D計測を可能にし、自律走行などのアプリケーションで重要な利点となります。既存の方法では、ダイナミックレンジが狭く、色の強い物体の測定に問題があるなどの弱点がありました。幾何学的位相は、約70年前から知られている光学特性です。研究者たちは、幾何学的位相の計算方法を研究し、その利用方法について議論してきましたが、私たちがこのプロジェクトに取り組むまで、幾何学的位相の物理的モデルはこれまで存在しませんでした。現在、そのようなモデルが存在し、それを使用して機器と測定を改善する方法を理解するのに役立ちます。

研究成果の概要(英文)：In this project, we have succeeded in adapting conventional fringe profilometry measurements to use wavelength-encoded fringe data, allowing for simultaneous detection of many fringe profiles simultaneously. This opens the way for capturing 3D measurements of dynamic objects, increasing the dynamic range of 3D measurement, and simultaneously measuring the object reflectance spectrum together with its 3D profile. An unexpected outcome of this project has also been a breakthrough in understanding geometric phase. As a result of this project, we have published 10 peer-reviewed journal articles, 3 conference papers, and 12 conference presentations --- all supported in part or fully by this research project.

研究分野：spectral imaging

キーワード：3d profilometry geometric phase

## 1. 研究開始当初の背景

With the recent advances in 3D printing, autonomous vehicles, and hand-gesture 3D computer interfacing, measuring the motion of objects in 3D has become increasingly important. Existing techniques use scanning, active illumination, or computational imaging, and so they are slow, require cumbersome equipment, or have poor resolution.

## 2. 研究の目的

This project aims to overcome limitations in existing 3D measurement techniques by developing hardware that encodes the depth information of a scene into its spectrum, such that the entire 3D  $(x,y,z)$  dataset can be captured in a single frame using a snapshot  $(x,y,\lambda)$  spectral camera. This allows the measurement of such things as the 3D environment surrounding an autonomous car, the 3D shape of a bird's wing as it takes flight, or following the motion of hand gestures using only ambient light. By eliminating the need for active illumination, the system can be used much as a standard video camera, in outdoors instead of in a lab, and requires no preparation of a scene other than to have enough light.

## 3. 研究の方法

We adapt conventional structured illumination techniques to encode multiple fringe patterns into the spectrum of the projected light. Next, we image the illumination pattern reflected from the scene objects and use the shifts in the fringe patterns to detect the depth of the objects at each pixel in the scene. This usually involves projecting multiple fringe patterns and collecting an image at each illumination step. However, since we encode multiple fringe patterns into the illumination spectrum, we can use a spectral imaging camera to collect the complete set of patterns, all without changing the illumination. In our lab, we have a snapshot imaging spectrometer, so that the entire collection of fringe patterns can be collected in a single frame, allowing for the simultaneous video-rate measurement of both high-dynamic-range 3D and reflectance spectrum at each pixel in the scene.

One of the challenges encountered by this approach is that, unlike conventional 3D measurements, the various shifts between the fringe patterns is not uniform. Thus, whereas a conventional approach may use four images with phase shifts of 0, 90, 180, and 270 degrees, the wavelength-encoded approach might have phase shifts of 0, 52, 163, and 202 degrees. As a result, we developed a new algorithm for estimating the shifts, and for applying these arbitrary shifts to estimate the object depth.

While working with various phase shift approaches, we started using geometric phase as a well-known technique for applying phase shifts. However, we soon learned that the lack of a physical model for geometric phase is a serious hindrance to understanding the best way to make use of it. The geometric phase literature is filled with hidden assumptions that are poorly understood, even by those considered experts in the field, because of this lack of a physical model. Thus, along the way in our research, we paused to investigate the physical basis for geometric phase.

## 4. 研究成果

The first research publications supported by this research project used polarization fringe projection, allowing for 3D information in a scene to be collected in a snapshot by a polarization camera. This polarization-encoded profilometry approach is a natural step towards the wavelength-encoded approach that we were working towards.

While I am currently busy writing the first research paper explaining my approach to wavelength-encoded profilometry and our measurement results, our papers describing the physical model for geometric phase have already been published, and have been received enthusiastically. Our first geometric phase paper was named an “Editor’s Pick” – a paper that the journal’s editor thought especially noteworthy. This paper was then “spotlighted” by the

journal, upgrading its status to one of the select few articles considered as the journal's best publications, and given open access for downloads. The second geometric phase article was similarly selected as an "Editor's Pick" and has already produced more email inquiries and comments than I have received on any of my other 55 peer-reviewed papers.

One task that remains in our project, and which I am still working towards, is the adaptation of the wavelength-encoded technique to passive measurement.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計17件（うち査読付論文 9件 / うち国際共著 12件 / うちオープンアクセス 3件）

|   |                      |
|---|----------------------|
| 1. 著者名<br>Yuuki Maeda, Shuhei Shibata, Nathan Hagen, Yukitoshi Otani  | 4. 巻<br>28           |
| 2. 論文標題<br>Birefringence compensation for single shot 3D profilometry using a full Stokes imaging polarimeter | 5. 発行年<br>2021年      |
| 3. 雑誌名<br>Optical Review  | 6. 最初と最後の頁<br>425    |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1007/s10043-021-00675-3  | 査読の有無<br>有           |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する         |
| 1. 著者名<br>Yuuki Maeda, Shuhei Shibata, Nathan Hagen, Yukitoshi Otani  | 4. 巻<br>60           |
| 2. 論文標題<br>Single-shot 3D profilometry using a color imaging polarimeter                                      | 5. 発行年<br>2021年      |
| 3. 雑誌名<br>Optical Engineering   | 6. 最初と最後の頁<br>124115 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1117/1.OE.60.12.124115   | 査読の有無<br>有           |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する         |
| 1. 著者名<br>Nathan Hagen  | 4. 巻<br>61           |
| 2. 論文標題<br>Design of channeled spectropolarimeters  | 5. 発行年<br>2022年      |
| 3. 雑誌名<br>Applied Optics  | 6. 最初と最後の頁<br>3381   |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1364/AO.61.003381  | 査読の有無<br>有           |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する         |
| 1. 著者名<br>Nathan Hagen  | 4. 巻<br>22           |
| 2. 論文標題<br>Survey of autonomous gas leak detection and quantification with snapshot infrared spectral imaging | 5. 発行年<br>2020年      |
| 3. 雑誌名<br>Journal of Optics   | 6. 最初と最後の頁<br>-      |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1088/2040-8986/abb1cf  | 査読の有無<br>有           |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する         |

|  |                 |
|--|-----------------|
| 1. 著者名<br>Nathan Hagen   | 4. 巻<br>8       |
| 2. 論文標題<br>Manufacturing image slicing and image mapping mirrors," in Transactions of the 13rd MIRAI Conference on Microfabrication and Green Technology | 5. 発行年<br>2020年 |
| 3. 雑誌名<br>Transactions of the 13rd MIRAI Conference on Microfabrication and Green Technology   | 6. 最初と最後の頁<br>- |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>なし   | 査読の有無<br>無      |
| オープンアクセス<br>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<br>-       |

|  |                 |
|--|-----------------|
| 1. 著者名<br>Nathan Hagen, Toshihiko Koga and Ryoichi Kuwano and Yukitoshi Otani    | 4. 巻<br>2       |
| 2. 論文標題<br>Manufacturing plastic lenses on a Fanuc Robonano ultraprecision lathe | 5. 発行年<br>2021年 |
| 3. 雑誌名<br>2nd Advanced Optical Fabrication for Analyzer Technologies (ADOPTTECH) | 6. 最初と最後の頁<br>- |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>なし   | 査読の有無<br>無      |
| オープンアクセス<br>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<br>-       |

|  |                 |
|--|-----------------|
| 1. 著者名<br>Hagen Nathan   | 4. 巻<br>-       |
| 2. 論文標題<br>Spectra, Images, Simple Functions, and Density Functions  | 5. 発行年<br>2021年 |
| 3. 雑誌名<br>WHISPERS 2021: 11th IEEE GRSS Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing | 6. 最初と最後の頁<br>- |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1109/WHISPERS52202.2021.9484016   | 査読の有無<br>無      |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する    |

|   |                    |
|---|--------------------|
| 1. 著者名<br>Hagen Nathan, Yoshida Kentaro, Shan Yuejin, Otani Yukitoshi | 4. 巻<br>61         |
| 2. 論文標題<br>Apophyllite waveplates                                     | 5. 発行年<br>2022年    |
| 3. 雑誌名<br>Applied Optics  | 6. 最初と最後の頁<br>6518 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1364/AO.463809                         | 査読の有無<br>有         |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する       |

|  |                     |
|--|---------------------|
| 1. 著者名<br>Hagen Nathan                                       | 4. 巻<br>61          |
| 2. 論文標題<br>Review of thermal infrared polarimetry, 1: theory | 5. 発行年<br>2022年     |
| 3. 雑誌名<br>Optical Engineering                                | 6. 最初と最後の頁<br>70902 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1117/1.0E.61.7.070902         | 査読の有無<br>有          |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている (また、その予定である)                       | 国際共著<br>該当する        |

|   |                     |
|---|---------------------|
| 1. 著者名<br>Hagen Nathan  | 4. 巻<br>61          |
| 2. 論文標題<br>Review of thermal infrared polarimetry, part 2: experiment | 5. 発行年<br>2022年     |
| 3. 雑誌名<br>Optical Engineering   | 6. 最初と最後の頁<br>80901 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1117/1.0E.61.8.080901                  | 査読の有無<br>有          |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている (また、その予定である)                                | 国際共著<br>該当する        |

|   |                   |
|---|-------------------|
| 1. 著者名<br>Garza-Soto Luis, Hagen Nathan, Lopez-Mago Dorilian, Otani Yukitoshi | 4. 巻<br>40        |
| 2. 論文標題<br>Wave description of geometric phase                                | 5. 発行年<br>2023年   |
| 3. 雑誌名<br>Journal of the Optical Society of America A                         | 6. 最初と最後の頁<br>388 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1364/josaa.480814                              | 査読の有無<br>有        |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている (また、その予定である)  | 国際共著<br>該当する      |

|   |                   |
|---|-------------------|
| 1. 著者名<br>Garza-Soto Luis, Hagen Nathan, Lopez-Mago Dorilian                      | 4. 巻<br>40        |
| 2. 論文標題<br>Deciphering Pancharatnam's discovery of geometric phase: retrospective | 5. 発行年<br>2023年   |
| 3. 雑誌名<br>Journal of the Optical Society of America A                             | 6. 最初と最後の頁<br>925 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1364/josaa.485485                                  | 査読の有無<br>有        |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する      |

|  |                 |
|--|-----------------|
| 1. 著者名<br>Hagen Nathan   | 4. 巻<br>12480   |
| 2. 論文標題<br>Design of channeled spectropolarimeters                       | 5. 発行年<br>2022年 |
| 3. 雑誌名<br>Optical Technology and Measurement for Industrial Applications | 6. 最初と最後の頁<br>- |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1117/12.2660159                           | 査読の有無<br>無      |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する    |

|  |                 |
|--|-----------------|
| 1. 著者名<br>Hagen Nathan A.  | 4. 巻<br>11833   |
| 2. 論文標題<br>Calibration and demonstration of a snapshot Mueller matrix spectropolarimeter | 5. 発行年<br>2021年 |
| 3. 雑誌名<br>Polarization Science and Remote Sensing X                                      | 6. 最初と最後の頁<br>- |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1117/12.2594126   | 査読の有無<br>無      |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する    |

|  |                 |
|--|-----------------|
| 1. 著者名<br>前田 勇樹, 柴田 秀平, ネーザン ヘーガン, 大谷 幸利 | 4. 巻<br>-       |
| 2. 論文標題<br>カラー偏光カメラによる瞬間三次元計測            | 5. 発行年<br>2021年 |
| 3. 雑誌名<br>第68回応用物理学会春季学術講演会              | 6. 最初と最後の頁<br>- |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>なし           | 査読の有無<br>無      |
| オープンアクセス<br>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<br>-       |

|  |                 |
|--|-----------------|
| 1. 著者名<br>柴田秀平, N. Hagen, 大谷幸利         | 4. 巻<br>-       |
| 2. 論文標題<br>カラー偏光カメラのフーリエ解析による画素補間法     | 5. 発行年<br>2021年 |
| 3. 雑誌名<br>第68回応用物理学会春季学術講演会            | 6. 最初と最後の頁<br>- |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>なし         | 査読の有無<br>無      |
| オープンアクセス<br>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<br>-       |

|  |                 |
|--|-----------------|
| 1. 著者名<br>前田勇樹, 柴田秀平, ネーザン ヘーガン, 大谷幸利  | 4. 巻<br>-       |
| 2. 論文標題<br>カラー偏光カメラによるRGBフルストークスイメージング | 5. 発行年<br>2021年 |
| 3. 雑誌名<br>第68回応用物理学会春季学術講演会            | 6. 最初と最後の頁<br>- |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>なし         | 査読の有無<br>無      |
| オープンアクセス<br>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<br>-       |

〔学会発表〕 計8件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 3件)

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>前田勇樹                          |
| 2. 発表標題<br>フルストークスカメラによる瞬間三次元形状計測        |
| 3. 学会等名<br>Optics & Photonics Japan 2022 |
| 4. 発表年<br>2022年                          |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Nathan Hagen   |
| 2. 発表標題<br>Survey of autonomous gas leak detection and quantification with snapshot infrared spectral imaging |
| 3. 学会等名<br>WHISPERS 2021 (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Nathan Hagen   |
| 2. 発表標題<br>Spectra, images, simple functions, and density functions |
| 3. 学会等名<br>WHISPERS 2021 (国際学会)                                     |
| 4. 発表年<br>2021年   |



|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Nathan Hagen  |
| 2. 発表標題<br>Manufacturing plastic lenses on a Fanuc Robonano ultraprecision lathe         |
| 3. 学会等名<br>2nd Advanced Optical Fabrication for Analyzer Technologies (ADOPTTECH) (招待講演) |
| 4. 発表年<br>2021年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Nathan Hagen   |
| 2. 発表標題<br>Manufacturing image slicing and image mapping mirrors          |
| 3. 学会等名<br>13rd MIRAI Conference on Microfabrication and Green Technology |
| 4. 発表年<br>2020年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Nathan Hagen   |
| 2. 発表標題<br>Reducing photodamage to biological tissue in fluorescence microscopy through snapshot imaging spectroscopy |
| 3. 学会等名<br>IWOB2022-2023, 2nd Int'l Workshop on Optics, Biology, and Related Technologies (招待講演)                      |
| 4. 発表年<br>2022年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Nathan Hagen                                    |
| 2. 発表標題<br>Tunable snapshot multispectral imager           |
| 3. 学会等名<br>Optics & Photonics Int'l Congress (OPIC) (招待講演) |
| 4. 発表年<br>2023年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Nathan Hagen  |
| 2. 発表標題<br>Fourier domain filtering method for demosaicking color polarization camera images |
| 3. 学会等名<br>Future Sensing Technologies 2023 (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2023年  |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

In research connected with this project, I have created two open-source software projects, where interested researchers can download my code and use it for themselves to help with replicating our work. Both projects are available on GitHub at

[https://github.com/nzhagen/flir\\_camera\\_interface](https://github.com/nzhagen/flir_camera_interface)

and

[https://github.com/nzhagen/fpp\\_tools](https://github.com/nzhagen/fpp_tools)

The former is a Python-based GUI interface for FLIR cameras, while the second is a collection of algorithms useful for doing fringe projection profilometry measurements.

|                           |                       |    |
|---------------------------|-----------------------|----|
| 6. 研究組織                   |                       |    |
| 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号) | 所属研究機関・部局・職<br>(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 |
|---------|---------|