

令和 4 年 6 月 10 日現在

機関番号：14701

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K20401

研究課題名（和文）波面補償と符号化撮像系を導入したマルチスペクトル高解像眼底イメージング法の開発

研究課題名（英文）Development of high resolution multispectral fundus imaging with wavefront compensation and coded imaging system

研究代表者

最田 裕介（Saita, Yusuke）

和歌山大学・システム工学部・助教

研究者番号：30708756

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：眼底診断では眼球内の角膜や水晶体等に起因する波面収差で像が歪むという問題があるが、補償光学装置の導入によりある程度解消できる。しかし、装置中の波面センサーの許容を上回る収差が生じる場合、高精度なイメージングが困難である。また複数の波長帯で眼底画像を得られればさまざまな診断に有用な情報を取得できるが、分光画像を得るためには複数回の撮像が必要であった。本研究では、波面センサーに波面分割レンズや種々の画像処理技術を導入することで測定精度改善、外乱や測定環境による影響への堅牢化、解析時間の高速化を達成した。また、回折格子を用いることで空間分解能を犠牲にすることなく単一撮像で分光画像の取得を可能にした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は大きく分けて二つの課題の改善を目指したものである。まず、眼底検査の際に眼球内の屈折異常など結像系で観察が困難な場合に用いられる波面センサーの改善をおこなった。一般的に用いられる Shack-Hartmann 波面センサーに波面分割レンズアレイを導入し、解析アルゴリズムを改良することで、計測精度の改善、外乱や測定環境による影響への堅牢化、解析時間の高速化を達成した。また、複数の波長帯のイメージングを単一撮像でおこないながら空間分解能の改善を実証し、これは生体のように動的な物体に対しても適用可能である。これらを組み合わせたイメージング法は従来よりも高精度かつ広範な医療診断の可能性を期待できるものである。

研究成果の概要（英文）：In fundus diagnosis, there is a problem that the image is distorted due to wavefront aberration caused by the cornea and crystalline lens in the eyeball, but it can be solved by introducing adaptive optics. However, high-precision imaging is difficult when aberrations that exceed the potential of the wavefront sensor. In addition, if fundus images can be obtained in multiple wavelength bands, useful information for various diagnoses can be obtained, but multiple measurements were required to obtain hyperspectral images.

In this research, we have achieved improvement of measurement accuracy, robustness to the influence of disturbance and measurement environment, and speeding up of analysis time by introducing a wavefront dividing lens and various image processing techniques to the wavefront sensor. In addition, by using a diffraction grating, it is possible to acquire hyperspectral images with a single measurement without sacrificing spatial resolution.

研究分野：情報フォトンクス

キーワード：シャックハルトマン波面センサー 広ダイナミックレンジ 高空間分解能 回折光学素子 深層学習  
ハイパースペクトルイメージング 分光画像 圧縮センシング

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

医療診断や生体観察の際に顕微鏡などの結像光学に基づいたイメージング技術はよく利用されるが、眼底イメージングなど観察対象物までの空間に波面を歪ませる外乱(主に角膜や水晶体の異常屈折)が存在する場合、取得される像の品質は著しく損なわれてしまう。これを解決するために、補償光学システムが利用されている。これは波面の歪みを計測する波面センサーと、ここからの情報をフィードバックして補正する補償器からなる。この波面センサーは Shack-Hartmann (SH) 型のものが用いられることが多いが、これには計測できる波面の傾きの許容値があり、これを超えるような大きな歪みをもった波面を計測できない。このような、より大きな波面歪みをもった波面を計測できる広ダイナミックレンジな SH 波面センサー技術が求められている。

一方、観察対象物からの光強度信号をモノクロ画像として捉えるだけでなく、その波長成分に分解して取得・分析できれば、さらなる診断に有用な情報を得ることができる。波長成分の空間分布を取得できるハイパースペクトルカメラが市販されているが、基本的に空間方向もしくは波長次元に走査しての撮影が必要であり、1 フレームを取得するのに時間を要する。これは生体組織など生きており動作する対象物には適用が困難であることを意味する。このため、一度の撮影で空間と波長の 3 次元データを取得できるマルチスペクトルイメージング法が求められている。

### 2. 研究の目的

本研究課題では、大きくこれら二つの課題に対し、SH 波面センサーの性能向上と単一撮像が可能な小型マルチスペクトルイメージング法を実現し、これらを組み合わせることにより広ダイナミックレンジ波面補償マルチスペクトルイメージング技術を確立することを目的とする。

### 3. 研究の方法

SH 波面センサーのダイナミックレンジを拡大するために、それまでに保有していた技術であるホログラムによるパターン投影技術を応用した回折光学素子を SH 波面センサーの構成要素であるマイクロレンズアレイに導入し、取得される画像データの解析方法も改善することで SH 波面センサー全体の性能向上を図った。また、深層学習を導入することにより空間分解能の向上が可能であるかどうかについても検証した。

マルチスペクトルイメージング法としては、Duke University の Brady らによって考案された符号化開口スナップショット分光映像法 (CASSI) を基礎技術とした。これは分散素子であるプリズムによって分散された各波長成分をそれぞれの強度積分信号として撮像素子で取得し、圧縮センシングに基づいた推定をおこなうことで、単一撮像でマルチスペクトルイメージングを実現する技術である。この技術は分散素子としてプリズムを採用しており、波長分解能や装置の大きさに課題があり、回折格子を利用してこれらの課題改善を試みた。

### 4. 研究成果

まず、SH 波面センサーのダイナミックレンジ拡大のために、それまでに提案してきたホログラフィック SH 法と適応的スポット探索法の特長を併せもつハイブリッド波面計測法について、回折光学素子により投影される最適なパターン像の検討と解析処理の改善に焦点を当てた。パターン像の変形に対する耐性を得るために解析時に用いる相関フィルタとして合成識別関数フィルタを応用することも検討したが、多くの変形パターンに対応させることが難しい上、元々検出できていたパターンを検出にも悪影響が出たため採用には至らなかった。パターン配置については、これまでは球面レンズの領域を一部ホログラム用の領域として割り当てていたため、集光スポットの形状が歪み、方位角方向に対称でなかったため、これが計測精度に大きく悪影響を与えていた。これを解消するために図 1 のような回折光学素子をマイクロレンズアレイに波面分割的に導入することでスポット形状の歪みを低減し計測精度を向上させた。次に、入射波面の強度むらに対応すること、解析時の計算コストを低減することを実現するために、解析処理を大きく見直した。取得されたスポットパターン画像の解析において移動平均しきい値処理や画像縮小処理を取り入れることで強度むらの影響を抑え、解析演算コストを従来の 1/20 程度まで改善できた(図 2)。これらの試みにより、提案手法による波面計測の全体的な性能向上を果たした。

その他、SH 波面センサーにおいて取得されるスポットパターン画像の解析に図 3 に示す

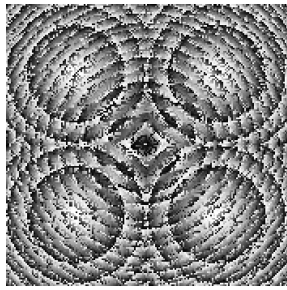


図 1 回折光学素子を導入した波面分割レンズアレイの位相分布

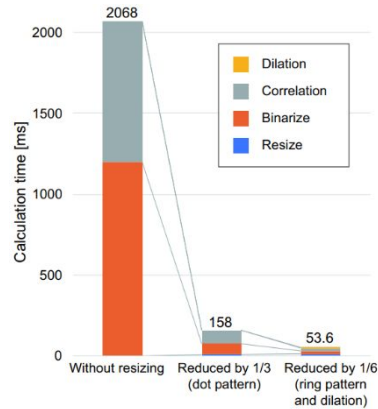


図 2 解析計算時間の比較

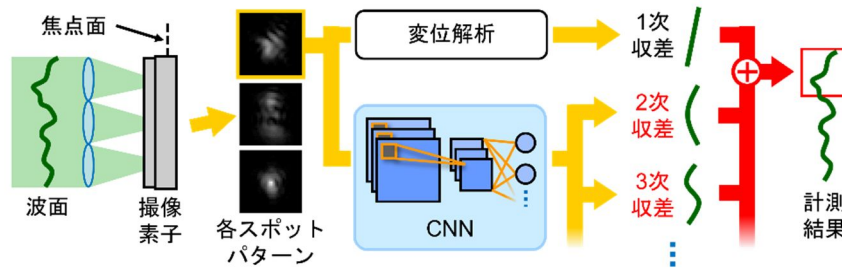


図 3 深層学習を SH 波面センサーの概念図

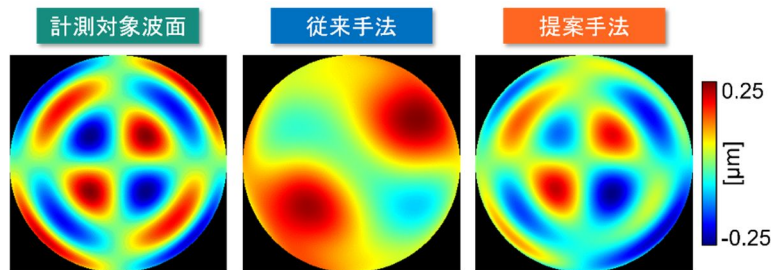


図 4 深層学習を導入した SH 波面センサーによる空間分解能検証実験結果

ように深層学習を適用することで広ダイナミックレンジもしくは空間分解能の向上を図った。SH 波面センサーのマイクロレンズアレイの各開口に入射した微小波面の曲率に加え、より高次の収差情報を深層学習により取得することで、図 4 に示すように従来よりも空間分解能を向上させることに成功した。

次に、圧縮マルチスペクトルイメージング法に関する研究に取り組んだ。本研究のベースとなっている CASSI に対し、分散素子として回折格子を導入し、1 次回折光に加えて 0 次回折光も利用することで画質の改善を図った(図 5)。また、一般的なロンキー型の格子に加えて、1 次回折光の回折効率を向上させることができるブレード回折格子についても検討をおこない、これらを導入した際の特性や性能の違いを比較した。この結果、得られた分光画像群より合成した RGB カラー像は図 6 のように提案手法において空間分解能が改善されることが示された。また、圧縮センシングに基づいた再構成アルゴリズムの改良をおこない、信号対雑音比が低い状況下でも高品質な分光イメージングが実現可能であることを示した。また、本手法は単一露光で分光画像が得られることが特徴であり、本来動的な対象物の計測に適用できるはずであった。この実証のために既知のスペクトル分布をもつ対象物を回転ステージに取り付けて動いている様子を計測した。この結果、数 rpm 程度の速さの回転であれば問題なく計測できることが示された。

光波の分散のための素子としての体積ホログラフィック素子についても基礎検討をおこなったが、体積ホログラムを適切に媒体に記録できる条件を追究することに留まり、分散素子としての使用、またこれら要素技術を組み入れたシステム化には至らなかったが、目標達成

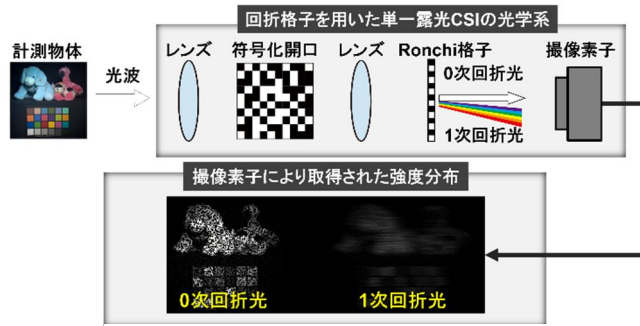


図 5 回折格子を用いた圧縮マルチスペクトルイメージング法の概念図

のための十分な要素研究が実施できたと考えている。

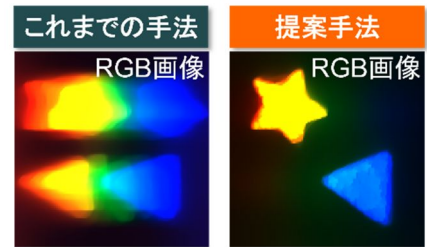


図 6 取得された分光画像から合成された RGB 画像の比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

|   |                         |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名<br>Yusuke Saita, Daiki Shimoyama, Ryohei Takahashi, and Takanori Nomura  | 4. 巻<br>61              |
| 2. 論文標題<br>Single-shot compressive hyperspectral imaging with dispersed and undispersed light using a generally available grating | 5. 発行年<br>2022年         |
| 3. 雑誌名<br>Applied Optics  | 6. 最初と最後の頁<br>1106-1106 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1364/AO.441568  | 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>-               |

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Daiki Shimoyama, Yusuke Saita, and Takanori Nomura                                      |
| 2. 発表標題<br>Compressive spectral imaging with a blazed grating to improve the signal-to-noise ratio |
| 3. 学会等名<br>OSJ-OSA-OSK Joint Symposia on Optics（国際学会）  |
| 4. 発表年<br>2020年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>梅木智明, 最田裕介, 野村孝徳                           |
| 2. 発表標題<br>深層学習による波面曲率推定を導入したシャックハルトマン波面センサー          |
| 3. 学会等名<br>日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2020 |
| 4. 発表年<br>2020年                                       |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>廣橋百輔, 最田裕介, 野村孝徳  |
| 2. 発表標題<br>位相ホログラムを導入した高ダイナミックレンジシャックハルトマン波面センサーにおける波面分割レンズアレイの導入による計測精度向上 |
| 3. 学会等名<br>日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2019                      |
| 4. 発表年<br>2019年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>松川彰吾, 最田裕介, 野村孝徳                              |
| 2. 発表標題<br>ペリストロフィック多重記録に基づく体積型ホログラフィックディスプレイを用いた動画再生の検討 |
| 3. 学会等名<br>日本光学会情報フォトンクス研究グループ第20回関西学生研究論文講演会            |
| 4. 発表年<br>2022年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>梅木智明, 最田裕介, 野村孝徳                                   |
| 2. 発表標題<br>畳み込みニューラルネットワークを用いた高次収差推定に基づく高空間分解能シャックハルトマン波面センサー |
| 3. 学会等名<br>日本光学会年次学術講演会Optics & Photonics Japan 2021          |
| 4. 発表年<br>2021年   |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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 |
|---------|---------|
|         |         |