

令和 6 年 6 月 28 日現在

機関番号：13201

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01385

研究課題名（和文）スペクトル符号化による超細径撮像系の開発原理

研究課題名（英文）Principles for the development of an ultra-thin imaging system by the spectral encoding

研究代表者

片桐 崇史 (Katagiri, Takashi)

富山大学・学術研究部工学系・教授

研究者番号：90415125

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,400,000円

研究成果の概要（和文）：スペクトル符号化法を基礎とした単一ファイバイメージングの光学的性能を評価し、従来法を上回る解像度が達成される必要条件とその機構を明らかにした。符号器は7つのコアを有するマルチコアファイバにコア径105ミクロン長さ4 cmのマルチモードファイバを融着接続することにより製作した。製作した符号器を用いて解像度 223 LW/PH を達成した。作動距離7 mm以上ではパンフォーカスとなり、蛍光像の動画撮像が可能であった。一方、短い作動距離では光セクション特性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で得られた知見は、現在のイメージセンサで実現されている画素サイズ1ミクロンを下回る細径撮像デバイスの開発において有用な学術基盤を提供するだけでなく、回折限界以下の画素サイズの実現可能性を示唆しており、高い学術的意義を有している。応用先として、低侵襲な脳神経系の観察や、血管、細気管支内を観察する医用内視鏡をはじめ、ポラス構造を持つ材料の内部観察、モーター内部や高集積エレクトロニクス内部など狭小空間内の画像センサ等、広範な波及効果を有する。

研究成果の概要（英文）：We evaluated the optical performance of single-fiber imaging based on spectral coding and clarified the conditions and mechanisms necessary to achieve resolution superior to conventional methods. The encoder was fabricated by fusion-splicing a multimode fiber with a core diameter of 105 microns and a length of 4 cm to a multicore fiber with seven cores. Using the fabricated encoder, a resolution of 223 LW/PH was achieved. At an operating distance of 7 mm or more, it became pan-focus, enabling video imaging of fluorescent images. On the other hand, at short operating distances, it exhibited optical sectioning characteristics.

研究分野：光ファイバ応用技術

キーワード：光ファイバ 内視鏡 コンピューショナルイメージング スペクトル符号化

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、研究者個人に帰属します。

### 1. 研究開始当初の背景

細径撮像デバイスは、低侵襲な脳神経系の観察や、血管、細気管支内を観察する医用内視鏡として必要とされ、その細さは数百 $\mu\text{m}$ に達している。従来のイメージセンサや光ファイババンドルによるアプローチでは、画素サイズが回折限界に迫るが故に、更なる細径化は困難である。そこで、近年、超細径撮像デバイスを実現する手段として、「スペクトル符号化法」が注目されている。スペクトル符号化法とは、画像情報を符号器を介してスペクトル情報に変換して計測し、測定データから計算により画像を復元するイメージング法である。申請者のこれまでの研究によって、シングルモードファイバの先端に融着接続したマルチモードファイバが画像情報をスペクトル情報に変換する符号器として働き、観測スペクトルから画像を復元できることが明らかになっている。一方、スペクトル符号化法に関する研究は、符号器の提案と物理特性に関する報告に終止しており、解像度は何が決定しているのか、どの程度まで小型化が可能なのか、に関する基礎的知見が欠落していた。

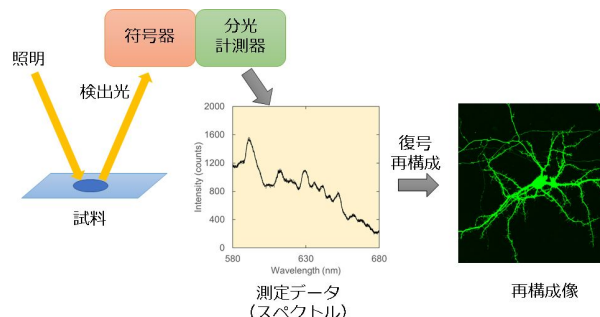


図1 スペクトル符号化法の概要。

### 2. 研究の目的

申請者が発明した多モード干渉型 (MMI) 符号器において以下のことを調査する。

- (1) 符号器の構造に依存するスペクトル符号波形と解像度の関係
- (2) マルチコアファイバを用いた符号化性能の向上
- (3) 画素数に応じた復号アルゴリズムの選択
- (4) 神経細胞サンプルの超細径高解像イメージングの実証

上記を統合して、符号器の構造に依存した符号波形と解像度の関係を明らかにし、それにより可能となる符号化性能の向上と復号アルゴリズムの最適化により、超細径高解像イメージングデバイスを実現するための必要条件とその機構を明らかにすることを研究の目的とした。

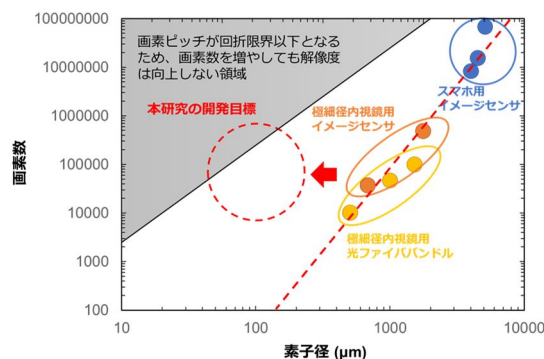


図2 本研究の開発目標。

### 3. 研究の方法

- (1) 符号波形と解像度の調査

ローダミン B 水溶液スクリーン上に蛍光スポットを形成し、シングルモードファイバの先端に短いマルチモードファイバを融着接続した符号器を用いて、連続する直線上からスペクトル符号波形を測定する。測定波形から任意波長の光強度変化を解析し、ナイキスト周期と解像度との依存関係を明らかにする。マルチモードファイバのコア径と長さを変えて同様の実験を行い、ビーム伝搬法による数値シミュレーションおよびモード結合理論と導波路理論による解析結果と統合して、MMI 符号器の構造パラメータとスペクトル符号波形との関連性を明らかにする。これらの結果から、MMI 符号器の構造パラメータと解像度の関係を理論式もしくは経験式として表現し、最高性能の符号器を設計する。

- (2) マルチコアファイバによる符号化性能の向上

マルチコアファイバにマルチモードファイバを融着接続した MMI 符号器を製作し、マルチコアファイバの各コアに異なるスペクトル符号を生成させる。これらを個別に分光器で計測する方法により、コア数に比例してスペクトル標本数を倍増させる。取得したスペクトル符号より  $32 \times 32$  画素の画像を再構成し、変更前の再構成像と比較することにより優位性を実証する。

- (3) 画素数と復号アルゴリズムの調査

さらなる高解像度化では (画素数) > (スペクトル標本数) となり、劣決定系問題に帰着する。この場合、撮像対象のスパース性を考慮し、圧縮センシングによる画像再構成を適用する。申請者は、光ファイバ出射光スペckルを用いた圧縮蛍光イメージングにおいて、10%以下の圧縮

率で画像再構成が可能であることを確認している．同様の再構成アルゴリズムをスペクトル符号データに適用することによって再構成ができる．実験と数値シミュレーションの両面から128×128画素の再構成を実施し、ピーク信号対雑音比（PSNR）により画質を評価する．

#### (4) 超細径高解像イメージングの実証

応用先として脳神経細胞の深部イメージングを想定し、超細径高解像イメージングデバイスの基本性能（被写界深度および解像度）を評価する．GFPが遺伝子発現しているマウスの脳スライス試料を対象として超細径撮像デバイスによる撮像を試みる．作動距離を変化させることにより被写界深度を評価し、光セクション効果の有無について調査する．

### 4. 研究成果

#### (1) 被写界深度と解像度

MMI符号器で用いるマルチモードファイバの長さ依存特性を、シミュレーションおよび実験により調査したところ、長さ4cmが最適であることが判明した．最適化されたMMI符号器を用いて、動画撮像を実施し、動く撮像対象において、良好な画質の動画を取得可能であることを確認した．

ビーム伝搬法による数値シミュレーションより、被写界深度の作動距離依存性を調査した．作動距離7mm以上ではおおそパンフォーカスとして振る舞うことが判明した（図2）．一方、短作動距離では、被写界深度は次第に浅くなり、プローブ近傍において深さ分解能10ミクロン程度の3次元像が得られることがわかった．5ミクロン径の蛍光スポットを201点直線上に配列した評価サンプルによって、実験的にも同様の結果が得られることを確認した．同評価サンプルを用いて構築したイメージングシステムの一次元解像度を評価した結果、システムの限界解像度は223LW/PHと見積もられ、CCDやファイババンドルを用いた従来法に比べて1桁程度の解像度向上が可能であることを実証した．

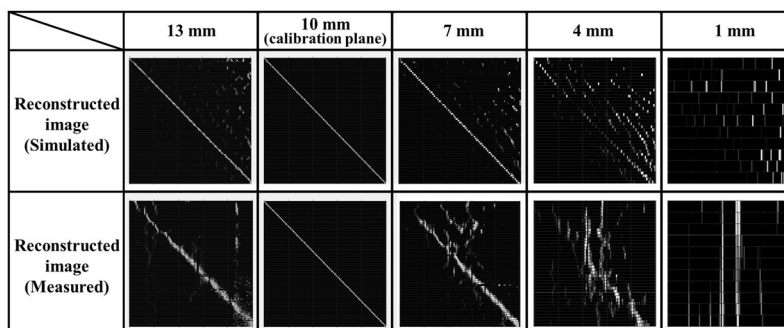


図2 被写界深度の評価．

#### (2) マルチコアファイバを用いた推定精度向上

単一モードファイバを7コアとしたイメージングプローブを製作し、空間多重化による画像再構成の推定精度向上についての実証実験を行った．使用したサンプルは、5ミクロン径の蛍光スポットを201点直線上に配列した評価サンプルである．評価の結果、単一コアに比べて3コアとすることにより推定精度が約1.4倍向上することがわかった．7コアのマルチコアファイバを用いて、空間多重化によるノイズ耐性向上についての実証実験を行った．評価の結果、コア数が多いほどノイズ耐性が向上すること、前処理として平滑化処理を行うことにより推定精度が著しく向上すること、さらには、ラグランジュ補間により少ない測定数で高解像な画像再構成が可能となり、圧縮率の限界が標本化定理に従うことが明らかとなった．

#### (3) 復号アルゴリズムの検討と数値的安定性の評価

2次元画像の再構成精度向上を目指し、再構成アルゴリズムの分析を行った．非負拘束最小二乗法および2段階反復収縮閾値化アルゴリズム（TwIST）を適用した際の、再構成精度の比較評価より、TwISTによる再構成像がより再構成精度が高く、深い被写界深度を活かした動画撮像が可能であることが明らかとなった（図3）．

画像再構成における数値的安定性について調査したところ、提案法による連立一次方程式が悪条件でありかつ較正法に誤差の生じやすい欠点があることが判明した．そこで、Hadamard行列を用いた新たな較正法を提案し、シミュレーションによりその有効性を確認した．

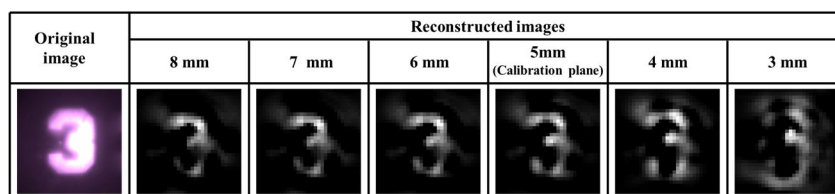


図3 TwISTを復号アルゴリズムとした動画撮像．

## 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<br>Nakagawa Hiromu, Tsukada Satoki, Katagiri Takashi, Kasaba Yasumasa, Murata Isao, Hirahara Yasuhiro, Matsuura Yuji, Yamazaki Atsushi | 4. 巻<br>62              |
| 2. 論文標題<br>Mid-infrared laser heterodyne spectrometer by hollow optical fiber and its newly designed coupler                                  | 5. 発行年<br>2023年         |
| 3. 雑誌名<br>Applied Optics  | 6. 最初と最後の頁<br>A31 ~ A36 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1364/AO.475426   | 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>-               |

|   |                      |
|---|----------------------|
| 1. 著者名<br>Asaoka Ryuji, Kiyomatsu Hiroshi, Miura Hiromasa, Jono Akihiro, Kinoshita Tomofumi, Takao Masaki, Katagiri Takashi, Oshima Yusuke  | 4. 巻<br>27           |
| 2. 論文標題<br>Prognostic potential and pathological validation of a diagnostic application using Raman spectroscopy in the characterization of degenerative changes in the cartilage of the humeral head | 5. 発行年<br>2022年      |
| 3. 雑誌名<br>Journal of Biomedical Optics  | 6. 最初と最後の頁<br>115002 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1117/1.JBO.27.11.115002  | 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>-            |

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件）

|                                       |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>小池亮, 大嶋佑介, 片桐崇史            |
| 2. 発表標題<br>スペクトル符号化単一ファイバイメージングの空間分解能 |
| 3. 学会等名<br>第82回応用物理学会秋季学術講演会          |
| 4. 発表年<br>2021年                       |

|                                   |
|-----------------------------------|
| 1. 発表者名<br>加藤仁教, 松浦祐司, 大嶋佑介, 片桐崇史 |
| 2. 発表標題<br>側面研磨型中空光ファイバカブラの特性評価   |
| 3. 学会等名<br>第82回応用物理学会秋季学術講演会      |
| 4. 発表年<br>2021年                   |

|                              |
|------------------------------|
| 1. 発表者名<br>舟橋諒, 大嶋佑介, 片桐崇史   |
| 2. 発表標題<br>圧縮ラマンイメージングの精度評価  |
| 3. 学会等名<br>第82回応用物理学会秋季学術講演会 |
| 4. 発表年<br>2021年              |

|                                       |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>西田翔吾, 大嶋佑介, 片桐崇史           |
| 2. 発表標題<br>大面積散乱光検出のためのエタンデュ低減システムの提案 |
| 3. 学会等名<br>第82回応用物理学会秋季学術講演会          |
| 4. 発表年<br>2021年                       |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>鈴木雄大, 大嶋佑介, 片桐崇史             |
| 2. 発表標題<br>レーザー誘起衝撃波により形成される擬似的導波路中の光伝搬 |
| 3. 学会等名<br>第82回応用物理学会秋季学術講演会            |
| 4. 発表年<br>2021年                         |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>松本悠希, 小川雄大, 衛藤剛, 猪股雅文, 片桐崇史, 大嶋佑介 |
| 2. 発表標題<br>術中に無神経節腸管を同定するためのラマン分光システムの開発     |
| 3. 学会等名<br>レーザー学会学術講演会第42回年次大会               |
| 4. 発表年<br>2021年                              |

|                                   |
|-----------------------------------|
| 1. 発表者名<br>加藤仁教, 松浦祐司, 大嶋佑介, 片桐崇史 |
| 2. 発表標題<br>中赤外光用光コンパイナの製作         |
| 3. 学会等名<br>レーザー学会学術講演会第42回年次大会    |
| 4. 発表年<br>2021年                   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>石川真太郎, 大嶋佑介, 片桐崇史              |
| 2. 発表標題<br>スペクトル符号化による極細径ファイバイメージングの被写界深度 |
| 3. 学会等名<br>レーザー学会学術講演会第42回年次大会            |
| 4. 発表年<br>2021年                           |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>川上友佑, 大嶋佑介, 片桐崇史                       |
| 2. 発表標題<br>波長可変スペckル照明を用いた単一ファイバイメージングシステムの測定精度改善 |
| 3. 学会等名<br>レーザー学会学術講演会第42回年次大会                    |
| 4. 発表年<br>2021年                                   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>文室温人, 山本武, 竹谷皓規, 小泉桂一, 片桐崇史, 大嶋佑介 |
| 2. 発表標題<br>ラマン分光法によるマウス免疫細胞のフェノタイプ解析         |
| 3. 学会等名<br>レーザー学会学術講演会第42回年次大会               |
| 4. 発表年<br>2021年                              |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Takashi Katagiri   |
| 2. 発表標題<br>Single fiber fluorescence imaging by multimode interference-based spectral encoder |
| 3. 学会等名<br>The 10th Advanced Lasers and Photon sources(ALPS2021) (招待講演) (国際学会)                |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Masanori Kato, Yuji Matsuura, Yusuke Oshima, Takashi Katagiri   |
| 2. 発表標題<br>Mid-infrared hollow fiber couplers  |
| 3. 学会等名<br>Proc. SPIE PC11953, Optical Fiber and Sensors for Medical Diagnostics, Treatment and Environmental Applications XXII (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2022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 |
|-------|--|--|----|
| 研究分担者 | 大嶋 佑介<br><br>(Oshima Yusuke)<br><br>(10586639) | 富山大学・学術研究部工学系・准教授<br><br><br><br>(13201) |    |

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