

令和 6 年 6 月 4 日現在

機関番号：24405

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2023

課題番号：19K15465

研究課題名（和文）光通信技術を融合したレンズレスイメージング技術の開発

研究課題名（英文）Development of imaging with optical communication devices

研究代表者

池田 佳奈美（Ikeda, Kanami）

大阪公立大学・大学院工学研究科 ・准教授

研究者番号：70822568

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：光通信の技術を利用した新しいイメージング技術についての研究を行った。具体的には、まず、マルチコア光ファイバを用いて空間的な分布を持つ光（符号化照明）を生成した。次に、マルチコア光ファイバによって生成される符号化照明光を用いてどのような画像が取得できるか基礎実験により確認した。この研究を通じて、新しい画像化技術の可能性を探った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、細径なイメージングシステム実現に向けて、コア密度向上の可能性など利点を持つマルチコア光ファイバー（MCF）を導入したイメージングシステムの開発に取り組んだ。実験によって再構成画像を取得し、MCFによるパターンがシングルピクセルイメージングに基づくイメージングに有効であることを実証した。本結果は、MCFやMCF-SPIの応用の可能性をさらに広げるものである。

研究成果の概要（英文）：In this research, we developed an imaging system using a multi-core fiber. First, we used a multi-core fiber to generate spatially distributed light (coded illumination). Next, we conducted a basic experiment utilizing the coded illumination light generated by the multi-core fiber. Through this research, we explored the potential of this new imaging technology.

研究分野：イメージング

キーワード：イメージング 光ファイバー

1. 研究開始当初の背景

単一受光素子を用いるイメージングにおける符号化照明の実現には空間光変調器を用いる系が一般的であるが、システムサイズは大きく、また、その変調速度は計測時間短縮における制約となる[1]。一方で、大容量光通信用に開発されたマルチコア光ファイバー(MCF)は、例えば7コアのものでクラッド径は195 μm であり細径である[2]。また、光ファイバー内の光強度と位相をGHzの速度で制御する技術も確立されている[3]。

本研究では、細径なイメージングシステム実現に向けて、コア密度向上の可能性や光路長誤差の発生しにくさなど利点を持つMCFを導入したイメージングシステムの開発に取り組む。

2. 研究の目的

本研究の目的は、光通信デバイスによって構成する新規の小型な単一受光素子型光波イメージング技術を開発することである。具体的には、光通信デバイスの一つであるMCFによって構成する新しい光波出射機構による符号化照明生成を新たに構築し、新規単一受光素子型光波面センシング技術であるMCFを用いたシングルピクセルイメージング(MCF-SPI)の可能性を検討する。

3. 研究の方法

図1に提案MCF-SPIシステムの概要を示す。光はカプラで分岐されたのち、変調器を経てMCFの各コアに入射する。MCF端面における複数のコアから出射された光が空間を伝搬するとスペックルパターンが生成され、照明パターンとして用いることができる。この照明パターンの模様は各コア中の光の変調により時系列に変化させることができる。

SPIにおける再構成画像は、 M 枚の照明パターン $I_i(x, y)$ と光強度 B_i を用いて線形方程式 $\mathbf{B} = \mathbf{I}\mathbf{O}$ で記述される逆問題を解くことで得られる。ここで、投影パターンの画素数を N として、 \mathbf{B} は $\mathbf{B} = [B_1, B_2, \dots, B_M]^T$ で $M \times 1$ の光強度行列、 \mathbf{I} は $\mathbf{I} = [I_1, I_2, \dots, I_M]^T$ で $M \times N$ のパターン行列、 I_i は二次元の投影パターンを $1 \times N$ に並び替えた行列、 \mathbf{O} は $N \times 1$ 行列で再構成画像を表す。

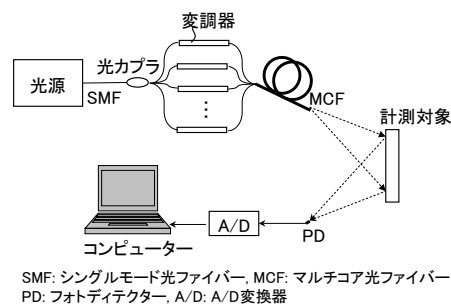


図1 MCF-SPIの概要。

本研究では、(1)MCFからの出射パターン光符号化照明生成法の検討及びMCFのコア配置検討と、(2)MCFと単一受光素子で構成した基礎実験によるイメージングの実証を行った。それぞれの研究の方法を以下に示す。

(1) MCFを用いた符号化照明生成法の検討およびMCFのコア配置検討

一般的に、SPIにおける再構成画像の画質は照明パターンの細かさや投影枚数に依存する。MCF-SPIはクラッド内に配置できるコアの数が限られており、パターンの複雑さや種類の豊富さが制限される。したがって、MCFにおけるコアの数や配置によって再構成画像の画質が大きく変化するため、異なるコアレイアウトから生成されるパターンの特徴や性能について評価を行う必要がある。さらに、SPIは逆問題を解く際の再構成アルゴリズムの改善が画質向上や計算負荷低減に大きく貢献する。システムに適した再構成アルゴリズムの導入が画質向上に必要である。本研究では、MCFから生成されるスペックルパターンの特徴や再構成性能と、システムの再構成精度を向上させるアルゴリズムについてシミュレーションにより評価を行った。具体的には、CS, TVCS, LRCS, 反復圧縮(IC)法の4つのアルゴリズムの比較を行った。式 $\mathbf{B} = \mathbf{I}\mathbf{O}$ において、 $M < N$ のとき方程式は劣決定系と呼ばれ、解析的に解を求める必要がある。圧縮センシングは信号のスパース性を利用した解法であり、未知数の数より圧倒的に少ない観測回数で対象を復元できる。具体的には L_1 ノルムと L_2 ノルムを用いた以下の最小化問題を解くことで近似解が求められる[4, 5]。

$$\min_{\mathbf{O}} \left\{ \frac{1}{2\lambda} \|\mathbf{B} - \mathbf{I}\mathbf{O}\|_2^2 + \|\mathbf{O}\|_1 \right\}$$

ここで、 λ はノイズ許容量のパラメータである。スパース表現には、離散コサイン変換、トータルバリエーション、低ランク制約があり、これらを用いたアルゴリズムをそれぞれCS, TVCS, LRCSと呼ぶ。また、IC法は正則化ステップとノイズ除去ステップを交互に反復して画像再構成するアルゴリズムである[7]。

被写体には複雑さの異なる 64×64 pixels の複数の画像を用意した. 図 2(a)に示す 7, 14, 21 コア MCF から生成される照明パターンで画像再構成のシミュレーションを行った. 照明パターンは MCF 端面の光の複素振幅分布をフラウンホーファー回折計算し取得した. ここで, クラッド径はすべて $125 \mu\text{m}$ とし, コア間のクロストークは発生しないと仮定した. 光の波長は 1550 nm , 各コアはシングルモード, モードフィールド径は $10 \mu\text{m}$ に設定した. 各コアの端面における光の位相は $-\pi \sim \pi$ の範囲でランダムに変調し, それぞれ 1000 枚の照明パターンを生成した. 図 2(b)は各 MCF のコア配置に基づいてシミュレーションで得られた照明パターンの例である. また, 一般的な SPI で用いられるランダムバイナリパターンでの再構成も行い, MCF-SPI と比較した.

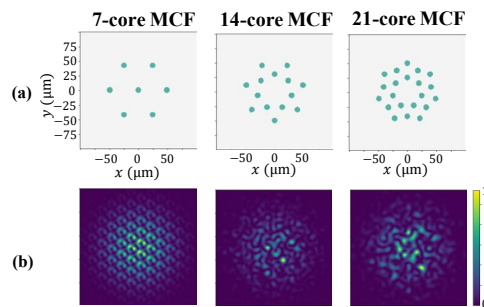


図 2 (a)検討に用いた MCF コア配置
(b)照明パターン例.

(2) 基礎実験によるイメージング実証

図 3 に示す可視光源を用いた実験を構築し, 原理確認実験を行い再構成画像を取得し, 提案手法の有用性を示した. 光源には波長 669 nm の半導体レーザーを使用し, 光ファイバケーブルを介して光を MCF に入射した. 7つのコアを有し, クラッド径が $195 \mu\text{m}$, コア間隔が $49 \mu\text{m}$ である MCF[2]を使用した. 照明パターンは各コアの光の偏光と位相をランダムに変化させることで生成した. 被写体に対してパターンを投影し, 被写体を透過した光強度をフォトダイオードで検出した. そして A/D 変換器によってデジタル値に変換し, 同時にカメラで参照している照明パターンの情報を用いて式 $B = IO$ を解くことで再構成画像を取得した.

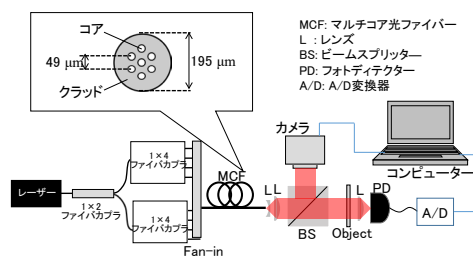


図 3 MCF-SPI 実験系.

4. 研究成果

(1) MCF を用いた符号化照明生成法の検討および MCF のコア配置設計[7]

① 理想的な環境における再構成

測定ノイズの存在しない理想的な環境を想定したシミュレーションで得られた再構成画像を図 4 に示す. 画像の下部に画質評価指標である Peak signal-to-noise ratio (PSNR) を示している. 7 コア MCF を用いるシミュレーションでは, 被写体の情報を十分に取得できなかった. 14, 21 コア MCF を用いるシミュレーションでは多くの被写体において TVCS での再構成精度が高くなった. エッジがあいまいな画像に対しては例外的に CS と LRCS での再構成の画質が TVCS を上回った. MCF を用いて生成される照明パターンを用いたイメージングにおいては, 被写体によって適切なアルゴリズムが異なる結果となった.

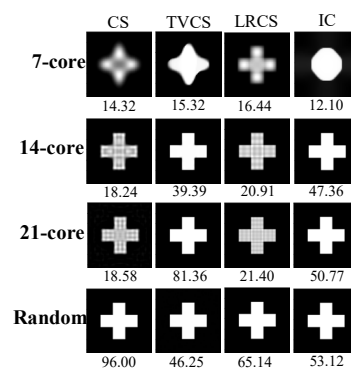


図 4 理想的な環境を想定した再構成結果.

② ノイズの多い環境下における再構成

通常, 実験システムにおいては測定ノイズを避けることができない. そこで, 測定ノイズを加えたときの再構成画像比較を行った. 本シミュレーションでは光強度 B にのみノイズ

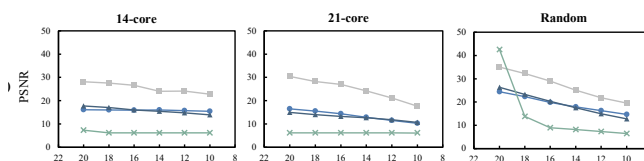


図 5 ノイズの多い環境を想定した再構成結果.

が加わると仮定した. 図 5 ノイズレベルを変化させたときの再構成画像の PSNR をプロットしたグラフである. 圧縮センシング系アルゴリズムの耐ノイズ性はほぼ同等な結果となり, IC 法はノイズに対して激しい画質劣化が生じる結果となった. また, 同一の被写体の再構成結果を比較すると, MCF のコア数の増加に伴ってノイズレベルに

対する PSNR の減少幅が大きくなった。ランダムバイナリパターンを用いた SPI は MCF で生成されたパターンを用いた SPI よりもノイズに対する再構成画像の画質劣化が大きかった。被写体の複雑に対して適切なコア数を設定すれば再構成精度が向上することが確かめられた。

(2) 基礎実験によるイメージング実証[8]

可視光源を用いた実験系で生成された照明パターンをカメラで観察した例を図 6 示す。図 7 実験で取得した再構成画像を示す。ここで、再構成画像の画像サイズは 64×64 pixel, 測定回数は 1024 回とし、被写体は USAF 1951 ネガテストターゲットを使用した。MCF によって生成されたパターンが SPI システムに適用できることが確認できた。

実験によって再構成画像を取得し、MCF によるパターンが SPI に基づくイメージングに有効であることを実証した。本結果は、MCF や MCF-SPI の応用の可能性をさらに広げるものである。

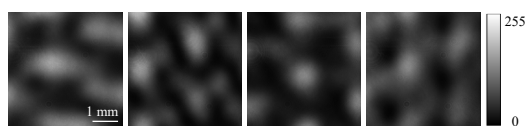


図 6 実験で観察した投影パターンの例.

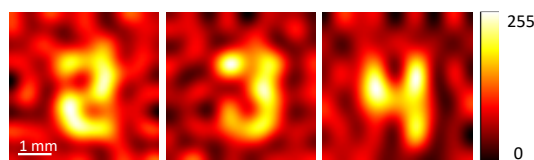


図 7 実験結果.

参考文献

- [1] D. B. Phillips, et al., "Adaptive foveated single-pixel imaging with dynamic supersampling," *Sci. Adv.* 3, e1601782 (2017).
- [2] H. Takara, et al., "1000-km 7-core fiber transmission of 10 x 96-Gb/s PDM-16QAM using Raman amplification with 6.5 W per fiber," *Opt. Express* 20, pp. 10100-10105 (2012).
- [3] H. Yamazaki, et al., "64QAM Modulator with a Hybrid Configuration of Silica PLCs and LiNbO3 Phase Modulators for 100-Gb/s Applications," *Proc. 2009 35th European Conference on Optical Communication (ECOC)* (2009).
- [4] O. Katz, et al., "Compressive ghost imaging," *Appl. Phys. Lett.* 28, 95 (13) 131110 (2009).
- [5] M. F. Duarte, et al., "Single-pixel imaging via compressive sampling," in *IEEE Signal Processing Magazine*, 25(2), pp. 83-91 (2008).
- [6] R. Zhu, et al., "Compressed-Sensing-based Gradient Reconstruction for Ghost Imaging," *Int. J. Theor. Phys.*, 58, pp. 1215-1226 (2019).
- [7] R. Yamaguchi, et al., "Features and Properties of Single-pixel Imaging Using Speckle Patterns Generated by Multi-core Fiber," *IEEE Access*, 11, 55326-55333 (2023).
- [8] K. Ikeda, et al., "Experimental demonstration of single-pixel imaging using a multi-core fibre," *Electron. Lett.*, 57 (15), 582-583 (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 2件）

1. 著者名 Yamaguchi Ryuta, Ikeda Kanami, Koyama Osanori, Yamada Makoto	4. 巻 11
2. 論文標題 Features and Properties of Single-Pixel Imaging Using Speckle Patterns Generated by Multi-Core Fiber	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 55326 ~ 55333
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ACCESS.2023.3281481	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -

1. 著者名 Ikeda Kanami, Kameyama Yohei, Koyama Osanori, Yamada Makoto	4. 巻 57
2. 論文標題 Experimental demonstration of single pixel imaging using a multi core fibre	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Electronics Letters	6. 最初と最後の頁 582 ~ 583
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1049/el12.12200	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 6件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Kanami Ikeda, Ryuta Yamaguchi, Osanori Koyama, and Makoto Yamada
2. 発表標題 Numerical study of image quality improvement for single-pixel imaging using multicore fiber (2)
3. 学会等名 7th International Symposium on Extremely Advanced Transmission Technologies(EXAT2023)（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kanami Ikeda
2. 発表標題 Single Pixel Imaging using seven core fiber
3. 学会等名 The 12th Korea-Japan Workshop on Digital Holography and Information Photonics（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 池田佳奈美
2. 発表標題 シングルピクセルイメージングの高速化・小型化に向けて
3. 学会等名 令和4年度電気関係学会関西連合大会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 西崎浩平, 池田佳奈美, 山口隆太, 小山長規, 山田誠
2. 発表標題 光ファイバアレイ型シングルピクセルイメージングにおけるパターン生成のための熱光学位相変調に関する基礎検討
3. 学会等名 令和4年度電気関係学会関西連合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ryuta Yamaguchi, Kanami Ikeda, Osanori Koyama and Makoto Yamada
2. 発表標題 Numerical study of image quality improvement for single-pixel imaging using multicore fiber
3. 学会等名 The 6th International Symposium on Extremely Advanced Transmission Technologies (EXAT) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山口 隆太, 池田 佳奈美, 小山 長規, 山田 誠
2. 発表標題 マルチコアファイバを用いたシングルピクセルイメージングシステムにおける光強度ノイズの影響評価
3. 学会等名 令和3年度電気関係学会関西連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 池田佳奈美
2. 発表標題 シングルピクセルイメージングの高速化に向けて
3. 学会等名 Optics & Photonics Japan 2020, 15aES2 (Online, 2020.11.15) (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kanami Ikeda, Yohei Kameyama, Osanori Koyama and Makoto Yamada
2. 発表標題 Imaging Using Single-pixel Detector and Multicore Fiber
3. 学会等名 3D Image Acquisition and Display: Technology, Perception and Applications 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yohei Kameyama, Kanami Ikeda, Osanori Koyama and Makoto Yamada
2. 発表標題 Single-pixel Imaging using a Multi-core Fiber
3. 学会等名 24th OptoElectronics and Communications Conference/ International conference on Photonics in Switching and Computing 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kanami Ikeda, Yohei Kameyama, Osanori Koyama and Makoto Yamada
2. 発表標題 Imaging using multi-core fiber and single-pixel detector
3. 学会等名 The 9th Korea-Japan Workshop on Digital Holography and Information Photonics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 亀山陽平, 池田佳奈美, 小山長規, 山田誠
2. 発表標題 シングルピクセルイメージングにおけるマルチコアファイバを用いた空間パターン生成の検討と基礎実験
3. 学会等名 令和元年電気関係学会関西連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 池田佳奈美, 亀山陽平, 小山長規, 山田誠
2. 発表標題 マルチコアファイバを用いたシングルピクセルイメージング
3. 学会等名 第40回レーザー学会年次大会(招待講演)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計0件

〔取得〕 計1件

産業財産権の名称 3次元測定装置及び受光装置	発明者 池田 佳奈美, 山田 誠, 亀山 陽平, 小山 長規	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、7478420	取得年 2024年	国内・外国の別 国内

〔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
---------	---------