

多モードファイバと光フェーズドアレイを用いた単一ピクセルイメージングの分解能限界 Resolution limit of single-pixel imaging using optical phased array and multimode fiber

東大院工 [○]福井 太郎, 中野義昭, 種村拓夫

Univ. of Tokyo¹, [○]Taichiro Fukui, Yoshiaki Nakano, and Takuo Tanemura

E-mail: fukui@hotaka.t.u-tokyo.ac.jp

多モードファイバ(MMF: multimode fiber) は、1本の直径の小さなファイバで多くの空間情報を伝送し得るため、生体内観察や極細内視鏡などへの応用が期待されている[1]。一方、MMFを介した画像取得では、対象に照射する波面を多数回切り替える必要があり、従来は波面変調に用いる空間光変調器により、系が複雑・巨大・低速になっていた。著者らは上記課題を解決すべく、半導体光フェーズドアレイ(OPA: optical phased array)を波面変調に用いる手法を提案し、実証実験に成功している[2]。今回、同手法の分解能限界について理論的考察と数値解析による検討を行ったので報告する。

図1に画像取得手法の概要を示す。OPAに入射した光は、 $1 \times N$ 分配器でN本の導波路に分配され、各導波路に付属した位相シフタにより位相変調される。 K 通りのランダム変調信号により位相シフタをそれぞれ駆動することで、OPA出力部において K 通りの異なる波面が生成される[3]。OPAの射出光は三次元導波路(3D-WG)を介してMMF入力部に結合する。MMF出射部では、変調信号に応じた照射光強度分布 $\mathbf{I}_k$ ($k=1, 2, \dots, K$) が得られ、これを対象 $\mathbf{O}$ に照射し、透過した光の強度 S_k を単一画素受光器により取得する。照射光行列 $\mathbf{I} = [\mathbf{I}_1, \mathbf{I}_2, \dots, \mathbf{I}_K]^T$ と透過光強度ベクトル $\mathbf{S} = [S_1, S_2, \dots, S_K]^T$ の情報から、逆行列法による再構成計算 $\hat{\mathbf{O}} = \mathbf{I}^+ \mathbf{S}$ により画像を取得する[4]。ここで、 $\mathbf{I}^+$ は $\mathbf{I}$ の擬似逆行列である。

まず、分解能の理論限界について考察した。画像再構成時の計算法より明らかなように、理想的には分解点数は $\text{rank}(\mathbf{I})$ で与えられる。一方、 $\mathbf{I}$ の条件数 $\kappa(\mathbf{I})$ が大きすぎると雑音の影響が顕著になるため、実際の画像取得においては打ち切り特異値分解による正則化を行う[6]。 i 番目の特異値 σ_i としたとき、 $i+1$ 番目以降の特異値を打ち切ることで、条件数を $\kappa(\mathbf{I}) = \sigma_1/\sigma_i$ に低減しつつ i 個の情報を取得できる。このため、極力大きな i まで σ_i/σ_1 が打ち切り閾値以上に保たれることが肝要である。偏波あたり M 個のモードを持つ MMF について全モードを独立に駆動した際には、十分大きな特異値の数は $4M$ 程度となることが知られている[4]。一方、位相シフタの個数 N により決まる特異値の数の限界は、 N 個のうち2つの位相シフタを通過した光電界成分が対象面において作る干渉縞の組の個数で決まるため、 $N^2 - N + 1$ となる[5]。よって M モードの MMF と N 本の位相シフタを有する OPA を用いる場合、分解能の理論限界は $4M$ と $N^2 - N + 1$ のうち小さい方で決まり、 $N = \sqrt{4M}$ を境に律速要因が切り替わると考えられる。

次に、数値解析により、幾つかの M, N の場合について $\mathbf{I}$ を求め、 $\mathbf{I}$ を特異値分解することで分解能の M, N に対する依存性を調べた。MMF 中ではランダムなモード間結合が生じると仮定した。また、比較のため、MMF の全モードを独立に駆動した理想的な場合についても計算を行った。図2に $M = 502$ の場合の $\mathbf{I}$ の特異値分解の結果を示す。十分大きな N については、特異値の分布は一定の形状に収束していくことがわかる。特筆すべきは、その分布が MMF の理想的な場合(点線)とほぼ一致する点である。この時、理論通り、特異値は $i = 4M$ の付近で急落する。また、分解点数を網羅的に評価するために、十分大きな値を持つ特異値の数を M, N に関して調べた[図3(a)]。ここでは MMF の理想的な場合の $\mathbf{I}$ の σ_{4M} を有効な特異値を定義する上での閾値とした。有効な特異値の数は、理論通り、小さな N では N^2 に比例して増えるが、十分大きな N では各 M に応じた定数となる。これを更に統一的に理解するため、縦軸を $4M$ 、横軸を $\sqrt{4M}$ で規格化した[図3(b)]。規格化することで、 M, N の絶対値によらず、 $N \leq \sqrt{4M}$ では $N^2 - N + 1$ 、 $N \geq \sqrt{4M}$ では $4M$ の分解点数を実現できることが分かる。これより、 M に比べて遥かに小さな N でも理想的な状況と同等の性能が得られる可能性が示された。

謝辞 本研究は、文部科学省科学研究費補助金 (18H03769) の助成を受けて実施された。

参考文献 [1] S. Turtaev et al., *Light Sci. Appl.* **7**, 92 (2018). [2] T. Fukui et al., *J. Light. Tech.* (2021). doi: 10.1109/JLT.2020.3008968 [3] Y. Kohno et al., *Opt. Express*, **27**, 3817 (2019). [4] R. N. Mahalati et al., *Opt. Express*, **21**, 1656 (2013). [5] T. Fukui et al., *J. Opt. Soc. Am. B* **38**, 379 (2021). [6] P. C. Hansen, *BIT Numer. Math.* **27**, 534 (1987).

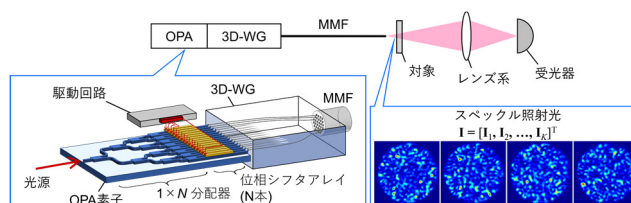


図1. MMF と OPA を用いた画像取得手法の概要。

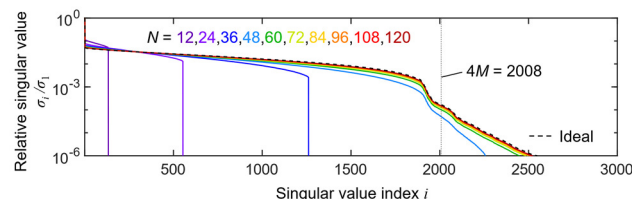


図2. $M = 502$ と様々な M における $\mathbf{I}$ の特異値。点線(ideal)は MMF の全モードを独立に駆動した場合に対応する。

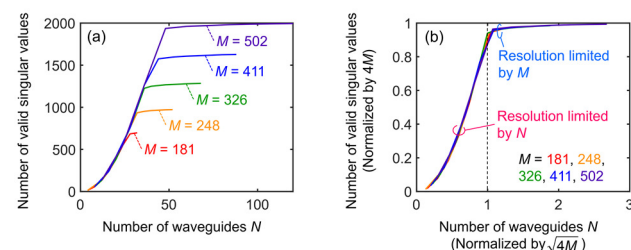


図3. (a) 各 M における MMF の理想的な場合の σ_{4M} を閾値とした時の有効な特異値の数。 (b) (a)の縦軸を $4M$ で、横軸を $\sqrt{4M}$ で規格化したもの。