

公益財団法人 川西記念新明和教育財団
2023 年度 研究助成金 研究成果報告書

研究題目：1 画素だけのセンサーを使用したホログラフィックビデオカメラの実現

神戸大学大学院システム情報学研究科
米田 成

1. 研究背景

イメージセンサーの技術の発達により、4K や 8K といった高解像度なデジタル撮像が可能となり、非常に鮮明で美しい画像や動画の記録が可能となった。しかし、これらの技術は人間が目に見える可視光の領域でのことであり、紫外線や赤外線イメージセンサーは解像度が低く、需要の関係から高価である。可視領域以外における高解像度なイメージセンサーの実現は、検査技術などで必要とされている。また、暗闇のような光子の数が非常に少ない環境下での撮像技術や、霧のような光の直進性を乱す散乱体背後のイメージング技術（散乱透視技術）というのは、最新のイメージング技術をもってしても達成できていない領域である。これらの非可視光・微弱光下・散乱透視技術が可能な技術として、1 画素だけのセンサーを使用したカメラ（1 画素カメラ）が提案されている。これまで研究代表者は、三次元情報が取得できる 1 画素ホログラフィックカメラを実現し[Optics Letters (2020)]、散乱体背後に潜む 3D 物体の可視化[Applied Physics Letters (2021)]や偏光情報の取得[Optical Review (2023)]を実現してきた。しかし、この提案手法では、イメージング速度が照明パターンを投影するために必要な空間光変調器のリフレッシュレートによって制限されてしまうため、単一のホログラムを取得するために、5 分ほど必要であるという問題があり、動的物体のイメージングには応用できないという課題があった。

2. 研究目的および当初の研究計画

本研究では、二階調変調に制限されるものの、20kHz を超えるリフレッシュレートで高速に動作可能な空間光変調器（DMD）を使用して、この課題を解決し、世界で初である 1 画素ホログラフィックビデオカメラの実現を行う。研究代表者は既に、スペインの Universitat Jaume I の Enrique Tajahuerce 教授と共同で、二階調変調時に生じる影響が小さいことを数値シミュレーションにより示している。そのため、以下の順番で研究を行う。

- (1) DMD を使用した光学系を作製し、原理検証実験を行う。
- (2) 顕微鏡システムに本技術を搭載する。
- (3) 蛍光標識された細胞の可視化を行う。
- (4) 散乱体背後において細胞分裂する蛍光三次元像を本技術を用いて動画像記録する。

3. 研究成果

当初予定していた研究計画 (1) について, DMD を使用した光学系を図 1 のように作製し, 原理検証を行った. 原理検証の結果より, DMD のリフレッシュレートである 22kHz でパターンの切り替えを行い, 動的物体の可視化が可能であることが示された. 図 2 に実験結果を示す. 大学のロゴマークが印刷された透過物体を一軸ステージの上に配置し, 連続的に移動させたものを可視化できている様子である. また, 計算機処理により, 三次元物体の焦点位置を変化させられることが図 3 のように示された. 本研究成果は国際会議にて発表済みである (研究成果 1, 2, 6).

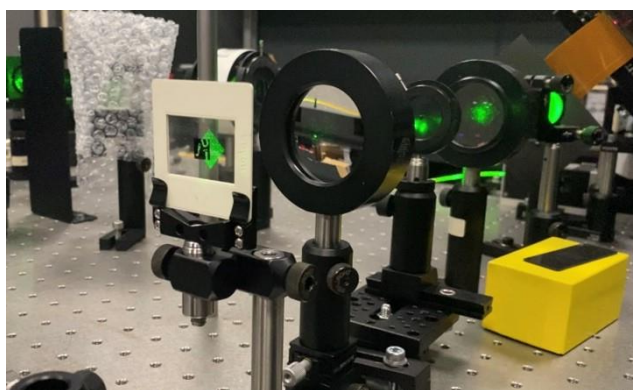


図 1 原理検証のために構築した光学系.

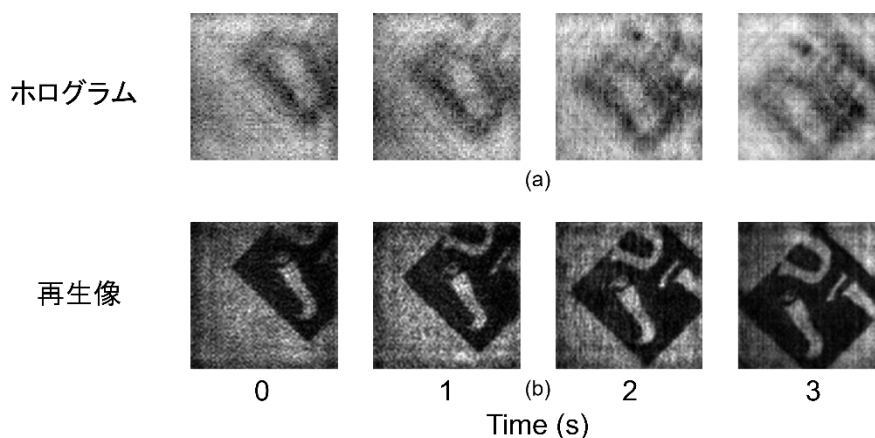


図 2 原理検証の実験結果. (a) 取得されたホログラム, (b)再生像.

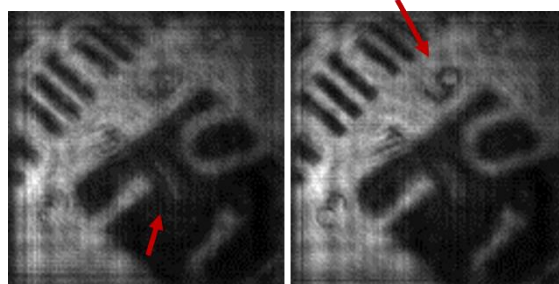


図 3 三次元再構成の結果, それぞれ矢印で示された位置にフォーカスしている.

また研究計画 (2) について、本方式に基づく顕微鏡システムの構築を、当初の予定通り実施した。本システムはスペインの Universitat Jaume I および神戸大学に構築済みである。図 4 に神戸大学に構築した顕微鏡システムを示す。神戸大学に構築した本方式に基づく顕微鏡により、動的物体の可視化を行った。さらに、マウスの頭蓋骨を散乱体として使用して、その背後に存在する物体が時間的に変化する様子を 1.27Hz で撮影することに成功した。図 5 に散乱透視して得られた結果を示す。通常のイメージセンサーを使用した場合、頭蓋骨による散乱により、その奥が可視化できないのに対して、提案手法では、1 画素カメラの利点により、その奥が可視化できることが示された。これらの内容は国際会議にて発表済みである (研究成果 5)。

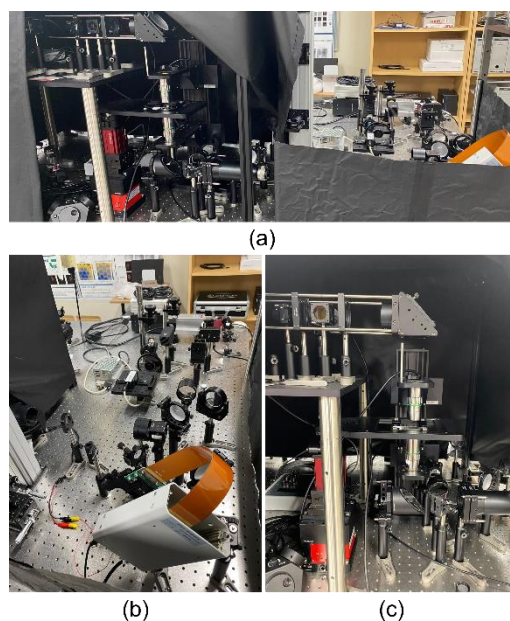


図 4 神戸大学に構築した顕微鏡システム. (a) 概形, (b) 照明光学系, (c) 顕微鏡中央

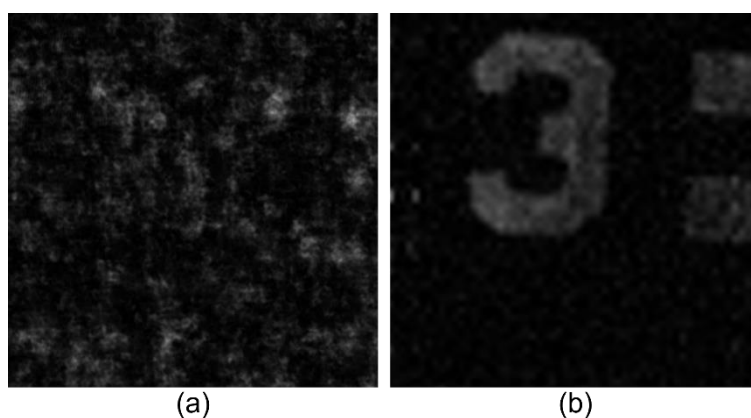


図 5 マウスの頭蓋骨越しに得られた再生像. (a) 通常のイメージセンサーを使用して得た結果, (b) 提案手法により得られた散乱透視結果.

また研究計画（3）について、スペインの Universitat Jaume I に構築した顕微鏡を用いて、奥行き分解能を向上させる方法を導入した。これらの内容は、当初の研究計画にはなかったものであるが、顕微鏡応用において、高分解能化は必須の要件であるため実施した。原理検証として当初は蛍光標識された細胞を想定していたが、蛍光物質の三次元像の可視化を行い、高分解能化についても実験的に示している。図 6 に実験結果を示す。

本成果は、国際会議および学術論文として発表済みである（研究成果 3, 4）。また、現在、米国光学会（OPTICA）において査読対応中である（研究成果 7）。

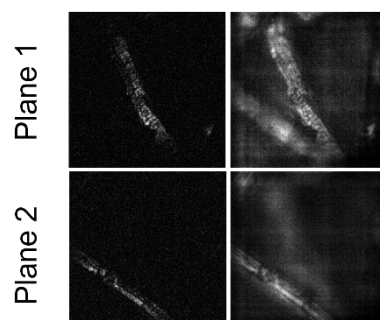


図 6 本方式により得られた再生像。高空間分解能化の結果（左）と適用前（前）。提案手法により、異なる奥行位置からのデフォーカスノイズを除去できている。

最後に、研究計画（4）について、当初は細胞分裂のイメージングを目的にしていたが、撮像する画素数を制限することで、より高速な生命現象の可視化ができることが見込まれるため、神戸大学の森田光洋教授と共同で実施しているマウス脳深部の可視化に適用可能性を評価中である。図 7 に示すように、イメージセンサーに基づいた落射型蛍光顕微鏡を用いて、神経活動のカルシウムイオン変化を蛍光を通して観察することに成功している。これにより、マウスの頭蓋骨背後で活動する神経活動の可視化に応用できると考えられる。現在、こちらの原理検証を行っている途中である。

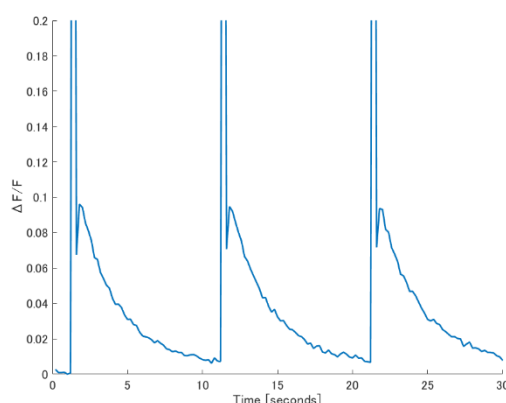


図 7 マウスの神経細胞内部のカルシウムイオン変化を蛍光を通して可視化した結果。

謝辞

本研究は、川西記念新明和教育財団の助成を受けたものである。本財団に心より感謝申し上げます。また、本研究を遂行するにあたりご助言下さりました、神戸大学の的場修教授、Universitat Jaume I の Enrique Tajahuerce 教授、Luis Ordóñez 様、Erick Ipus 様に心より感謝申し上げます。

研究成果（国際会議）

1. Naru Yoneda, Erick Ipus, Luis Ordóñez, Armin J. Lenz, Lluís León, Osamu Matoba, Enrique Tajahuerce, “Videography Based on Computational Optical Scanning Holography,” *Optica Imaging Congress 2023* (2023).
2. Naru Yoneda, Osamu Matoba, “Computational optical scanning holography and its applications,” *The 13th Japan-Korean Workshop on Digital holography & Information Photonics* (2023). [招待講演]
3. Naru Yoneda, Luis Ordóñez, Erick Ipus, Armin J. M. Lenz, Lluís Martínez-León, Osamu Matoba, Enrique Tajahuerce, “Sectional imaging in computational optical scanning holography based on structured detection,” *Information Photonics 2023* (2023).
4. Luis Ordóñez, Armin J. M. Lenz, Naru Yoneda, Manoj Kumar, Jesús Lancis, Osamu Matoba, Enrique Tajahuerce, “Resolution-enhanced single-pixel fluorescence microscopy,” *SPIE Photonics Europe* (2024).
5. Naru Yoneda, Yuuki Tatsumi, Luis Ordóñez, Erick Ipus, Mitsuhiro Morita, Manoj Kumar, Enrique Tajahuerce, Osamu Matoba, “Imaging through mouse skull by using single-pixel microscopy,” *Optica Digital Holography and Three-Dimensional Imaging Topical Meeting (DH) 2024* (2024).
6. Naru Yoneda, Osamu Matoba, “Recent progress of computational optical scanning holography,” *14th International Conference on Optics - Photonics Design and Fabrication (ODF ' 24)* (2024). [招待講演]

（学術論文）

7. Naru Yoneda, Luis Ordóñez, Erick Fabian Ipus Bados, Armin Lenz, Lluís Martinez, Osamu Matoba, Enrique Tajahuerce, “Sectional imaging using structured detection under computational optical scanning holographic microscopy,” *Optica Open* (2024). <https://doi.org/10.1364/opticaopen.27200604.v1>