

補助事業番号 2024M-535

補助事業名 2024年度 機能集積型光導波路照明素子による水中マルチスペクトル3次元動画イメージング補助事業

補助事業者名 電気通信大学 渡邊恵理子

1 研究の概要

本研究は、機能集積型光導波路照明素子(Functionally Integrated Waveguide Illuminator: FIWI)を基盤として、水中環境で利用可能なマルチスペクトル3次元動画イメージング技術確立するものである。水中で安定動作するFIWIデバイスの設計・試作、位相シフト制御とカメラ同期による高速撮像、赤・緑・青の複数波長を用いたマルチスペクトル化、さらにSynthetic Aperture Holography (SAH)による高視野・高分解能化および微生物の多物体3次元トラッキングを統合することで、コンパクトかつ高機能なデジタルホログラフィイメージングシステムの実現を目指した。

2 研究の目的と背景

近年、水中微生物や透明試料の挙動を、非接触・非侵襲で三次元的に観察する技術への要求が高まっている。一方、従来のデジタルホログラフィ顕微鏡は、光学系が大型化しやすく、アライメントが複雑であり、水中環境やフィールドでの運用には課題があった。また、撮影範囲、空間分解能、高速性、カラー化を同時に満たすことも容易ではなかった。そこで本研究では、FIWIを用いて光学系の小型化・堅牢化を図るとともに、水中3次元動画イメージング、マルチスペクトル化、高速撮像、広視野・高分解能化、さらには微生物運動解析へ展開可能な基盤技術を構築することを目的とした。

3 研究内容

(1)水中用機能集積型光導波路照明素子(FIWI)およびマルチスペクトルイメージングシステムの開発

URL: <https://www.fourier.lab.uec.ac.jp/project.html>

放熱効果を解析し、水中環境で機能するFIWIデバイスの設計・試作を行った。あわせて、理論分解能と実験で得られた空間分解能を比較し、その一致を確認することで、FIWIベースのデジタルホログラフィシステムの設計指針を確立した。さらに、動画像取得を想定したカメラ同期制御回路を試作し、FIWIデバイスの位相シフト応答時間を最適化することで、50 fpsでの動画像取得を実現した。加えて、従来の赤色光中心のイメージングに加え、青色光および緑色光を組み合わせたマルチスペクトルFIWIを設計・試作し、カラーイメージングの有効性を実証した。図1に、水中用FIWIデバイスを用いたマルチスペクトルデジタルホログラフィシステムの構成と撮像例を示す。

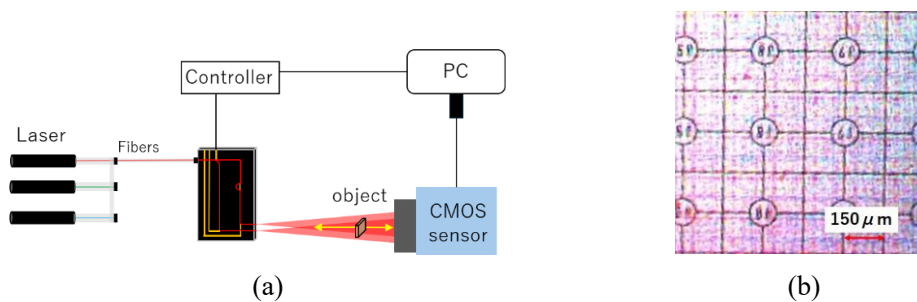


図1 (a)FIWIを用いたマルチスペクトルデジタルホログラフィシステムの構成, (b)赤・緑・青の各波長による撮像例

(2)実応用に向けた高機能水中デジタルホログラフィのシステム化

① Synthetic Aperture Holography(SAH)による高視野・高分解能化

URL: <https://www.fourier.lab.uec.ac.jp/project.html>

デジタルホログラフィにおける視野と分解能の制約を克服するため、CMOSセンサを移動させて複数の干渉縞を取得し、それらを合成して拡張ホログラムを構成するSAH手法を導入した。この手法により、追加レンズを用いずに撮影範囲の拡大と空間分解能の向上を実現した。5×5マス撮像による評価では、従来法より広い視野の再構成像が得られ、TOPPANテストチャートを用いた検証では2.8 μm の分解能が確認された。これにより、FIWIを用いた小型システムにおいても、高視野・高分解能の両立が可能であることを示した。図2に、5×5位置で取得したホログラムの合成方法と、SAHによる広視野・高分解能化の結果を示す。

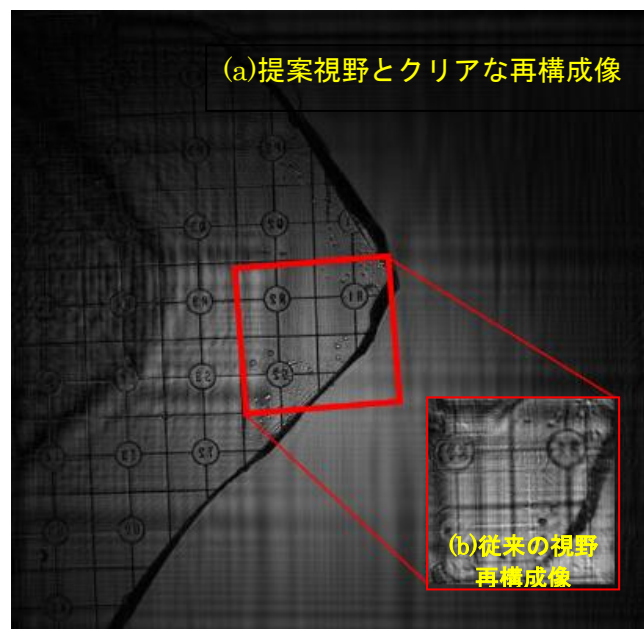
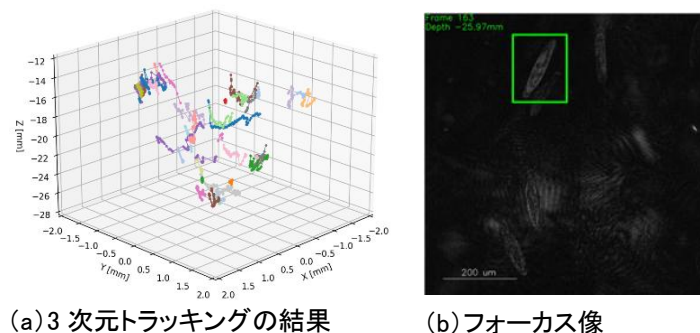


図2 (a)撮像範囲が高視野化, 高分解能化されたSAH を用いた 5×5 マス干渉縞撮影による再構成像、(b)従来の 1×1 マス干渉縞撮影による再構成像

② 微生物多物体三次元トラッキングの高機能化

URL: <https://www.fourier.lab.uec.ac.jp/project.html>

FIWIによるデジタルホログラフィシステムを用いて複数の微生物を撮影し、物体の再生像ではなく干渉縞の動きを追跡することで、二次元位置情報を抽出する手法を検討した。背景成分の除去とYOLOv8xによる物体検出を組み合わせるとともに、同一物体から生じる実像・虚像の双子像に着目し、それらの平均速度ベクトルの類似度および過去フレーム情報を用いてペアリング精度を向上させた。その結果、複数のゾウリムシについて三次元空間内での追跡を実証し、高密度な微生物集団の深度情報を含む運動解析の可能性を示した。図3に、複数のゾウリムシに対する物体検出結果および三次元トラッキング結果を示す。



(a) 3次元トラッキングの結果

(b) フォーカス像

図3 FIWIベースのデジタルホログラフィによる複数ゾウリムシの三次元トラッキング。干渉縞から各個体を検出し、ペアリングと過去フレーム情報を用いて三次元軌跡を取得した。

4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

本研究は、水中微生物やプランクトンの三次元行動解析、水質・生態系モニタリング、養殖環境の評価などに活用できる可能性を有している。また、透明試料を対象とする非接触・非侵襲観察技術として、生体試料の細胞生理学的解析やバイオイメーjingへの応用も期待される。FIWIにより装置の小型化と堅牢化が進むことで、研究室内での高精度計測にとどまらず、可搬型・現場設置型の水中イメージング装置としての社会実装が見込まれる。さらに、マルチスペクトル情報と三次元トラッキング情報を統合することで、対象の形態・運動・光学特性を同時に評価できる高度な診断・観測技術へ発展することが期待される。

5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

本研究は、これまで進めてきたデジタルホログラフィ、波導波路光学、光計測、画像解析に関する研究の流れを、水中・生体応用へと発展させる研究として位置づけられる。すなわち、基礎的な光学素子設計と干渉計測技術を基盤としつつ、装置の小型化、高速化、マルチスペクトル化、さらにAIを活用したトラッキング解析までを一体的に扱うことで、基礎研究と応用研究を接続する展開となっている。また、光学、画像工学、情報処理を横断する実践的テーマであり、学生指導や研究教育の発展にも資する研究として重要な位置を占める。

6 本研究にかかわる知財・発表論文等

知財: 渡邊恵理子、武田光夫、菊地雄亮、「イメージング装置、イメージング方法及びプログラム」

特願2025-033837

学術論文

1. Maryam Faheem, Kenta Hayashi, Ayaka Tabuchi, Rintaro Horimizu, Katsunari Okamoto, Mitsuo Takeda, and Eiko Watanabe, "Functionally integrated waveguide illuminator for video-rate underwater digital holographic microscopy with extended range of observations," Opt. Express 34, 22259-22274 (2026)

国際会議発表等

1. Rintaro Horimizu, Kousuke Hiwasaki, Maryam Faheem, Chihiro Sato, Kakeru Taguchi, Ayaka Tabuchi, Eiko Watanabe,
"FIWI-Based Synthetic Aperture Digital Holography for Wide-Field and High-Resolution Imaging,"
International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory 2025 (ISOM2025), Tu-PP-01, 2025.
2. Chihiro Sato, Kousuke Nakao, Maryam Faheem, Rintaro Horimizu, Ayaka Tabuchi, Eiko Watanabe,
"3D Tracking of Multiple Microorganisms Using Twin Images in FIWI-Based Digital Holography,"
ISOM2025, Mo-D-04, 2025.
3. Ayaka Tabuchi, Maryam Faheem, Rintaro Horimizu, Kousuke Nakao, Chihiro Sato, Eiko Watanabe,
"Development of waveguide-based digital holographic microscope towards application in biological imaging,"
Optics and Photonics Congress 2025 (OPC 2025), M1A-XI.01, 2025(招待講演).
4. Yusuke Kikuchi, Hajime Toyoda, Ayaka Tabuchi, Maryam Faheem, Mitsuo Takeda, Eiko Watanabe,
"Feasibility Study on Shearing Digital Holography Using Functionally Integrated Waveguide Illuminator,"
30th Opto Electronics and Communications Conference (OECC2025), WP-E-16, 2025.
5. Maryam Faheem, Ayaka Tabuchi, Kosuke Nakao, Chihiro Sato, Rintaro Horimizu, Yusuke Kikuchi, Eri Kajikawa, Eiko Watanabe,
"3D Autofocus and Tracking of Transparent Objects Using a Waveguide-Based Digital

Holographic Microscope,”

The 11th Biomedical Imaging and Sensing Conference (BISC 2025), OPIC 2025, BISCp-17, 2025.

6. Eriko Watanabe, Shinjiro Kodama, Katsunari Okamoto, Yutaka Hayano, Mitsuo Takeda,
“Advanced Optical Imaging Beyond Scattering and Fluctuations: Waveguide-based Digital
Holography and Single-Pixel Telescope,”
Sensing and Imaging through Scattering and Fluctuating Field in Biology,
Telecommunication, and Astronomy 2025 (SI-Thru 2025), SI-Thru3-01, 2025 (招待講演).

受賞: 菊地雄亮、豊田創、武田光夫、渡邊恵理子「機能集積型光導波路照明素子によるシアリングデジタルホログラフィ」学術変革領域「散乱透視学」第8回領域会議 優秀ポスター講演賞 2025年3月

7 補助事業に係る成果物

(1) 補助事業により作成したもの

<https://www.fourier.lab.uec.ac.jp/project.html>

(2) (1) 以外で当事業において作成したもの

<https://www.fourier.lab.uec.ac.jp/project.html>

8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名: 電気通信大学 情報理工学研究科 渡邊研究室(デンキツウシンダイガク ジョウホウリコウガクケンキュウカ ワタナベケンキュウシツ)

住 所: 〒182-8585

東京都調布市調布ヶ丘1-5-1

申 請 者: 教授 渡邊 恵理子(ワタナベ エリコ)

担 当 部 署: 同上

E-mail: eriko.watanabe@uec.ac.jp

URL: <https://www.fourier.lab.uec.ac.jp>