補助事業番号　2024M-515
補 助 事 業 名　2024年度　超高速現象を観察できる単一画素イメージング技術の開発　補助事業
補助事業者名　金沢大学・砂田哲

1　研究の概要

高速ランダムパターン投影技術と光波長多重化技術を組み合わせて、イメージセンサを用いることなく毎秒100 Mフレームでの高速イメージングに成功した。

2　研究の目的と背景

高速イメージングは凡ゆる科学技術の基盤となり得るものであり、例えば、工業分野での高速現象の解析（例えば，プラズマ現象，衝撃に対する材料の変形反応等）から生命・化学反応の分析、高速な細胞のソーティングなど様々な分野への応用が期待されている。最先端光学技術を駆使することで、従来の電子型カメラでは捉えることの困難なナノ秒以下の現象を捉えることができるようになってきたが、これまでの殆どの高速イメージング技術は、フェムト秒パルスレーザーやストリークカメラ等の機器に頼っており、大型でありポータブルではない、または取得フレーム数が限定的（連続的な撮影が困難）となる、安価なシステム構成が困難等の多くの課題を有している。

本研究の目的は、フェムト秒レーザーやストリークカメラ等の従来技術に頼らない高速光制御技術により、上述の課題から解放されたナノ秒スケールの高速イメージング技術を開発することにある。このイメージング技術の注目すべき特徴は、カメラを用いずにたった1つの光検出器だけで高速現象のイメージングが可能となる点である。1つの検出器からの信号であってもゴーストイメージング（GS)と呼ばれる最新の計算イメージング手法を用いることでイメージングは可能となる。GSはランダムな照明光（マスクパターン）を観測したい物体に照射して、その反射光の強度値の系列から物体のイメージを再構成する手法（すなわち，光の符号化と復号化を利用した技術）であるが、高速なランダムパターンの切り替えに課題を有してきた。一方、申請者はこれまで光コンピューティグを用いた高速イメージ認識システムの研究で開発した光の高速時空間制御技術を有しており、これを利用することで数十GHzレートでのマスクパターンの切り替えが可能となるため、ナノ秒スケール現象もイメージング可能な単一画素イメージングに発展できると考えた。そこで本研究では、高速現象を観察できる単一画素イメージング技術の開拓を目指し、（1）高速な符号化が可能となる光ランダムパターン投影器の開発、（2）そのシステムに適したイメージ復号のための再構成アルゴリズムの開発、（3）そして，ナノ秒スケールの現象のイメージングに関する原理実証などの課題に取り組む。

3　研究内容

（１）　イメージの高速符号化のための光パターン投影器の開発

（https://sn-lab.w3.kanazawa-u.ac.jp/news/365/）

高速光変調器およびマルチモードファイバ(MMF)からなるイメージの符号化用の光パターン投影器の開発に取り組んだ[図1(a)]。この投影システムは、光位相の高速変調によりMMF内の多数の伝播モードを誘起し、動的なスペックルパターンを生成するものである。このスペックルパターンは時空間的に線形独立であることが望ましいため、相関の低いスペックルパターンを生成できる変調方式を検討した。また、同時に主成分分析を用いたスペックルパターン間の相関評価指標について検討した。その結果、25GSamples/secでの位相変調においてランダム波形で変調した時がもっとも再構成性能が高い、すなわち互いの相関が低いスペックルパターン生成ができることを明らかにした。また，複数の波長の光を同時に位相変調させることで、同時に複数の動的スペックルパターンを生成するシステムを構築した。これにより、波長多重化されたスペックルパターン投影によるイメージ再構成が可能となった。

（２）　イメージ復号のための再構成アルゴリズムの開発

(https://sn-lab.w3.kanazawa-u.ac.jp/news/365/)

上述のスペックルパターン投影によりイメージの高速な時系列データ変換が可能となった。イメージの再構成には、投影するスペックルパターンの時空間情報およびイメージの情報を含む時系列データの両方が必要とされる。まず投影するスペックルパターンの時空間ダイナミクスを測定する実験を行った。この実験結果では、16x16ピクセルでスペックルパターン変化を測定したが、光量の不足により、SNRの低いスペックルパターンしか得ることができなかった。また、８ビットの高速オシロスコープで時系列データを取得するため、時系列データもノイズを多く含む信号となっている。よって、イメージ再構成には、劣化したスペックルパターン情報および時系列データから正しくイメージを再構成可能なアルゴリズムの開発が求められることがわかった。以上の知見に基づき、本研究ではスペックルパターンの時空間ダイナミクス及びその投影過程の物理的プロセスをモデル化した事前知識を用いて教師なし学習でイメージを再構成するニューラルネットワークモデルを構築した。このモデルはPINNのアイデアを取り入れたU-Netベースのモデルである。また、ノイズの効果の低減については、DIPを利用した。また、TVによる正則化を行うことで劇的に再構成精度が向上することを明らかにした。なお、本アルゴリズム開発においては、すべて高速スペックル投影を模擬した数値計算を用いた。図1(b)に本再構成アルゴリズムの再構成能力を検証したときの結果の一例を示す。SSIM = 0.77での再構成が可能であった。

（３）　イメージングシステムの構築及び原理実証

（https://sn-lab.w3.kanazawa-u.ac.jp/news/365/）

以上のような投影システム及び再構成アルゴリズムの開発・検討結果に基づき、DMDに投影した手書き数字のイメージ再構成に取り組んだ[図1(c)]。本システムでは、28x28ピクセルのイメージは100 nsの露光時間（時間分解能）にて再構成可能という結果を得た。さらに、波長多重化の導入により異なるスペックルパターンを４つ発生させ、それを４つの光検出器で捉えるシステムを考案した。検出器の数は増加するが、その分だけ並列的なデータ取得が可能である。図1(d)に露光時間（時間分解能）を変えたときの再構成結果を示す。10 nsの時間分解能があるときに、元画像に近いイメージの再構成が可能であることがわかった。これは28x28ピクセルのイメージに対しては100 Mframes/secのレートでの高速イメージングが可能であることを示唆する結果である。

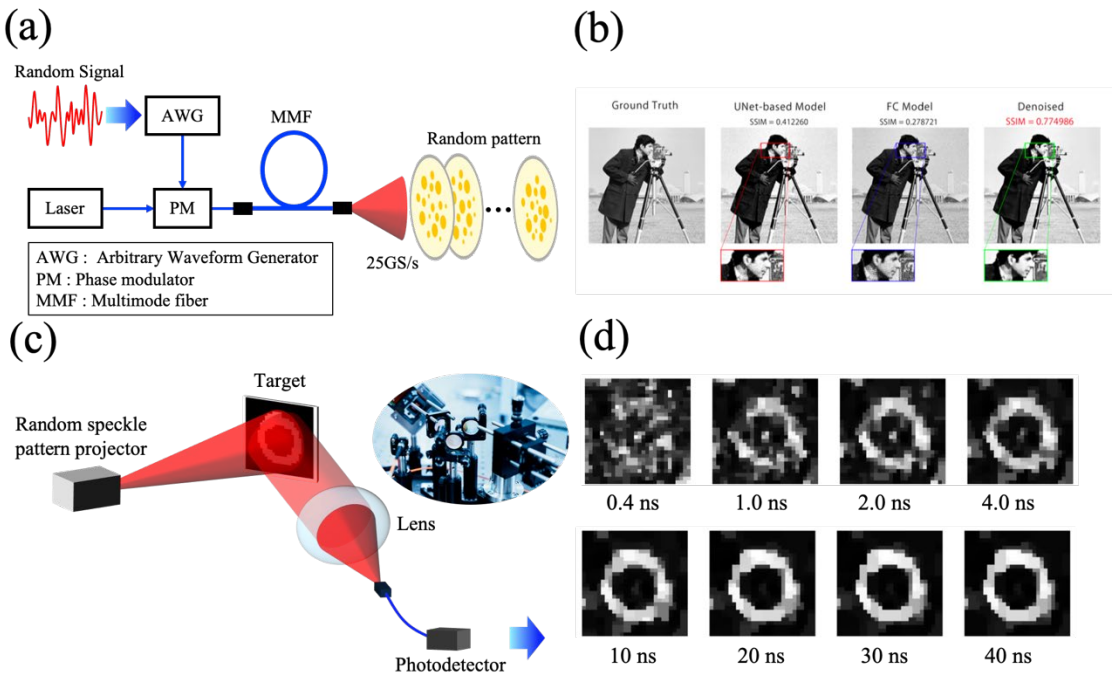

図: (a) 高速ランダムパターン投影システム。(b)開発した再構成アルゴリズムの適用結果（数値計算）。(c) 高速イメージエンコードシステム 。(d) 28x28ピクセル画像の再構成結果。露光時間(時間分解能)10 ns以上で元画像に近いイメージを復元。

4　本研究が実社会にどう活かされるか―展望

本提案の超高速イメージング技術が更に発展すれば、工業分野での高速現象の分析（例えば、プラズマ現象、衝撃に対する材料の変形等）から生命・化学反応の分析、高速な細胞

のソーティングなど様々な分野への応用が期待される。本提案のイメージング技術は、たった１つの光検出器だけでイメージングできるため、イメージング技術が十分に発達していない波長領域にも展開できる。また、光通信技術をベースとしているため、将来的にはオンデバイス化が可能な形態であるため、実験室だけでなくあらゆる場面で利用できるポータブルな高速現象分析器と発展できると期待できる。

５ 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

光AIコンピューティングに関する研究を理論・実験の両面から実施してきた。本研究における高速イメージング技術は、これまでの研究で培ってきた技術をもとに発展させたものである。

６ 本研究にかかわる知財・発表論文等

＜論文＞　0本（現在、執筆中）

＜国際会議＞　招待講演：３件

1. S. Sunada, K. Kitagawa, and T. Niiyama, “Multimodel soft sensor processing based on optical hyper-dimensionality,” SPIE Optics& Photonics 2024, San Diego USA, August (2024).[Invited talk]
2. S. Sunada, K. Kitagawa, and T. Yamaguchi, “Photonic neuro-inspired sensor processing,” International Symposium on Physics and Applications of Laser Dynamics (IS-PALD2024), Saitama, Japan, November (2024). [Invited talk]
3. S. Sunada, T. Yamaguchi, A. Skalli, and D. Brunner, “Spatiotemporal image encoder for capturing sub-nanosecond dynamic events,” SPIE Photonics West 2025, San Francisco, USA, January (2025).[Invited talk]

＜国内学会・研究会＞　招待講演：3件、一般講演：4件

1. 砂田哲、“ナノ秒現象を認識または可視化する光ニューロモルフィック処理システム,”情報フォトニクス討論会（2024年7月）
2. 本岡 眞、山口 智也、新山 友暁、砂田 哲,“ナノ秒現象を可視化する高速イメージングに向けた光ハードウェア及び再構成アルゴリズムの開発,” 2024年第85回応用物理学会秋季学術講演会（2024年9月）
3. 本岡 眞, 小森紀輝, 山口 智也, 新山 友暁, 砂田 哲, “10ギガフレームレートでのランダムパターン生成に基づく高速単一画素イメージング,” Optics& Photonics Japan 2024（2024年11月）

4. 砂田哲, “光ニューロモルフィックコンピューティングの展開,”通研共同プロジェクト研究会 (2025年2月)[招待講演]

5. 砂田哲, ”光技術と計算科学との融合によるセンシング技術の進化,” 北陸未来共創フォーラム　セキュア電磁エネルギー応用WG 技術セミナー, (2025年2月)[招待講演]

6. 砂田哲, “光ニューラルコンピューティング技術への挑戦,”2024年度第4回光材料・応用技術研究会 (2025年3月) [招待講演]

7. 本岡 眞、小森 紀輝、山口 智也、新山 友暁、砂田 哲,” 高速スペックルパターン投影に基づく単一画素イメージング,” 2025年第72回応用物理学会春季学術講演会　(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

なし

(2)(1)以外で当事業において作成したもの

なし

８ 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名: 金沢大学(カナザワダイガク)
住　　所: 〒920-1192
石川県金沢市角間町　金沢大学理工研究域機械工学系
担 当 者: 教授・砂田哲(スナダサトシ)
担 当 部 署: 理工研究域機械工学系(リコウケンキュウイキキカイコウガクケイ)
Ｅ－ｍａｉｌ: sunada@se.kanazawa-u.ac.jp
Ｕ　Ｒ　Ｌ: https://sn-lab.w3.kanazawa-u.ac.jp/