

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 1 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H02799

研究課題名(和文) データセントリック手法による散乱イメージング技術の開発

研究課題名(英文) Development of an imaging technique through scattering media based on a data-centric method

研究代表者

谷田 純 (Tanida, Jun)

大阪大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：00183070

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,800,000円

研究成果の概要(和文)：散乱媒質の入出力応答を機械学習により推定するデータセントリック手法に基づく新たな散乱イメージング技術として、超解像回折イメージング、インコヒーレント符号化開口イメージング、深層学習に基づく計算機ホログラム生成法、機械学習に基づく波面センシング技術、複眼光学系によるマルチモーダルセンシング、3次元スペックル相関イメージングを開発した。ホログラフィック顕微鏡と超解像照明イメージングにより実体試料の観測における有効性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

散乱媒質中の物体情報を復元する散乱イメージングは幅広い分野で利用されるが、強散乱媒質については、理論に基づいたモデルだけでは有効な方法は見つかっていない。本研究は、悪条件下においても、散乱媒質の入出力応答だけから高性能なイメージングを可能にする一連の技術を提示し、それらの有効性を示している。また、イメージング分野における人工知能技術の効果的な活用法を提示し、今後の技術展開に対する多くの示唆を与えている。

研究成果の概要(英文)：As a series of new scattering imaging techniques based on a data-centric method, estimating the input / output response of a scattering medium by machine learning, we have developed super-resolution diffraction imaging, incoherent coded aperture imaging, computer generated hologram based on deep learning, machine-learning-based wavefront sensing, multimodal sensing by a compound eye optical system, and 3D speckle correlation imaging. The effectiveness in observing a real sample was confirmed by a holographic microscope and super-resolution illumination imaging.

研究分野：情報光学、計算イメージング

キーワード：機械学習 深層学習 イメージング 位相回復 超解像 波面補正 複眼光学系 顕微鏡

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 散乱媒質中の物体情報を復元する散乱イメージングは、医用画像や悪天候下のイメージングなど幅広い分野で利用され、高性能化への要求は止まる所がない。しかし、観測対象が散乱媒質の深部にある場合には、光信号は多重散乱により大きく擾乱され、従来の手法では物体情報の復元は難しい。一方、濃霧中での物体認識などではミリ波レーダーが利用されているが、光単独でも実現可能な手法はまだ存在する。光技術の応用範囲を拡大する上でも、散乱イメージングは重要な研究課題として位置付けられる。光散乱は、入射光によって励起された電気双極子の振動から 2 次波が放出される素過程が連鎖的に生じ、さまざまな方向に光が広がる現象である。微粒子による散乱を想定すると、光の波長と粒子径との大小関係によりレイリー散乱とミー散乱に分類される。いずれの散乱も理論的に確立されたものであるが、粒子密度が高く、多重散乱が多く発生する強散乱媒質については、理論に基づいたモデルだけでは有効な方法は見つからない。

(2) 従来のイメージング技術を大きく進化させる手法として、コンピューショナルイメージングが急速に発展している。散乱イメージングについても、構造照明光を物体に照射し、得られた応答信号光から、直接物体光と散乱光を分離する手法を開発してきた。しかし、照明光パターンが判別できないような強散乱媒質を通した物体観察への適用は困難である。この課題を打ち破る方策として、申請者らは、物体信号と観測信号の関係から散乱媒質の入出力特性を機械学習により推定し、散乱過程をモデル化することなく、未学習の物体に対しても観測信号から物体信号を復元する手法を提案した。サポートベクトル回帰 (SVR) を用いて、観測信号から物体信号を復元する関係を推定した。その上で、未学習画像の散乱媒質を通した観測信号に SVR を適用したところ、入力画像と高い一致度を示し、新たな散乱イメージング技術としての可能性を確認した。

2. 研究の目的

(1) 本研究は、散乱媒質の入出力応答を機械学習により推定するデータセントリック手法に基づく散乱イメージング技術の開発を目標とする。従来手法では困難な、強散乱媒質を通した信号復元をめざす。

(2) 信号の難易度により局在 2 次元物体と非局在 3 次元物体に分けて研究を進める。また、本手法を構成する光符号化系と信号復元系のブロックごとに性能強化を図る。光符号化系では、観測対象に適したセンシング様式を調べるため、マルチアパーチャカメラや符号化手法の特性を評価する。信号復元系では、各種の機械学習モデルを適用し、観測対象の拡大、空間・時間口バスト性の強化を進める。これらの成果を統合して、実体試料への適用を試みる。

3. 研究の方法

(1) 機械学習による散乱イメージングは次の手順に従う。物体信号 $x \in \mathbb{R}^{N_x}$ 、観測信号 $y \in \mathbb{R}^{N_y}$ (N_x, N_y は物体信号と観測信号の要素数) とすると、散乱過程は $y = F(x)$ と記述できる。散乱イメージングは、散乱の逆過程 $x = F^{-1}(y)$ 、すなわち、観測信号から物体信号を求める逆問題として定式化される。この問題に対して、散乱過程 F を求めることなく、回帰分析に基づいて逆過程 F^{-1} を直接推定する。物体信号すべてを一括して求めることは難しいため、物体信号の画素ごとに逆過程 $x_k = F_k^{-1}(y)$ ($k = 1, \dots, N_x$) を考え、それらの組み合わせとして、散乱された観測信号から原物体信号の推定を行う。

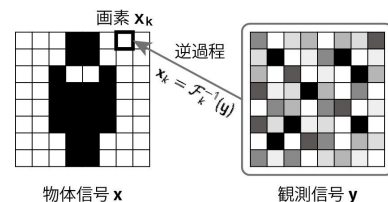


図 1 機械学習散乱イメージング

(2) 機械学習による散乱イメージングの手続きに従って、特定の奥行き位置に局在する 2 次元物体の観測を行い、各種機械学習モデルの特性について評価した。次に、奥行き方法に広がりをもつ 3 次元物体の観測を実施した。また、複眼撮像系を利用したマルチモーダルセンシングの有効性について検討を行った。

(3) 機械学習の問題点を補完する新たな機械学習イメージングについても評価した。また、実体試料に対するイメージングとマルチモーダル複眼撮像系による機械学習モデルの評価を行った。

4. 研究成果

(1) 2 次元物体に対するイメージング手法として、回折限界回折イメージング技術に機械学習を適用し、シングルショット撮像による強度画像から超解像物体信号を再現する方法を開発した。本方法では、物体と観測画像の多数の組を学習データとしてサポートベクター回帰を行い、物体から再構成像に至る回折イメージングの逆過程を回帰した。実験光学系において、散乱媒質

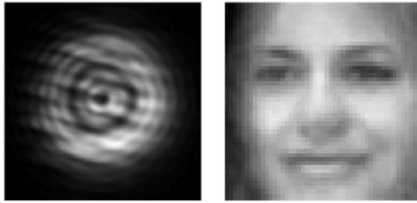


図2 超解像回折イメージングにおける撮影画像と再構成結果



図3 インコヒーレント符号化開口イメージングにおける撮影画像と再構成振幅 / 位相結果

の有無にかかわらず、レンズレス光学系により回折限界の30倍以上の解像度で超解像物体信号が再現できることを実証した。

(2) 深層学習モデルの利用により、結像光学素子を用いずに符号化開口だけで、振幅と位相を同時に観察するためのシングルショットインコヒーレント光イメージング法を開発した。学習モデルには、マルチスケール ResNet を用いて、最適化アルゴリズムには Adam を適用した。実証実験として、物体に手書き文字データベースを用い、プロジェクターシートに印刷した符号化開口により、その効果を調べた。本手法は、簡単な光学系で構成することができ、観察速度においても、他のインコヒーレント光による手法に対して優位である。

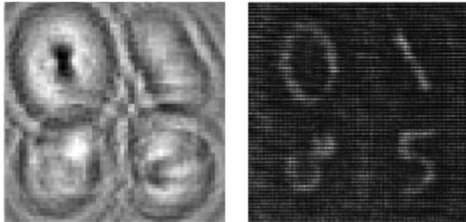


図4 計算機合成ホログラムにおけるホログラムと再生結果

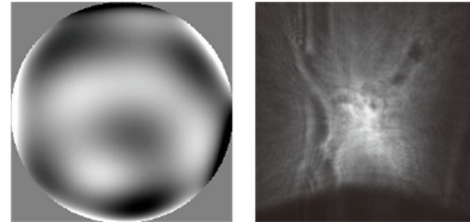


図5 波面センシングにおける波面歪みと撮影画像

(3) 機械学習モデルに基づくイメージングモデルの展開として、深層学習に基づく計算機ホログラム生成法を開発した。多数のスペックルデータセットを計算により生成し、ホログラム再生光学系の逆過程を回帰する。回帰関数が求めれば、非反復的にホログラムパターンを生成することができる。実験により、位相限定計算機ホログラムの検証を行った。

(4) 3次元物体の観測において、散乱媒質による波面乱れを補正することが重要となる。この問題に対して、単純な光学系と機械学習に基づいた手法による波面センシング技術を開発した。本手法では、畳み込みニューラルネットワークを用いて1枚の強度画像から波面のゼルニケ係数を直接推定することができる。有効な光信号観測法として、過剰露光、デフォーカス、散乱を導入し、実験的にそれらの有効性を確認した。

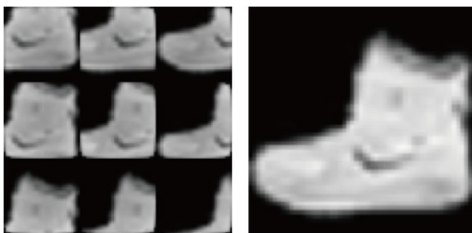


図6 深層学習モデルによる複眼画像からの再構成結果

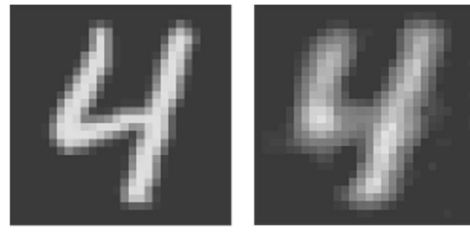


図7 位相回復における対象画像と再構成結果

(5) 複眼光学系によるマルチモーダルセンシングの特性解析を進めて評価した。深層学習モデルにより、複数視点による複眼画像から高精度に単一画像が生成できることを確認した。光学シミュレータにより、複眼撮像系に特化した学習用データ作成ツールを開発した。また、マルチスペクトル画像の一括評価モデルを構成し、葉面積指数と果実の糖度推定における有効性を評価した。

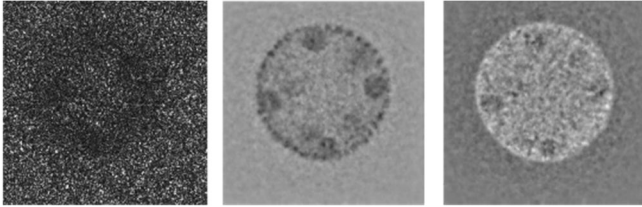


図8 ホログラフィック顕微鏡における
撮影画像と再構成振幅/位相結果

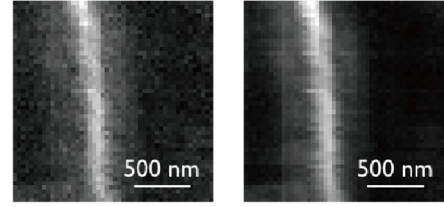


図9 デジタルアパーチャによる
ノイズ低減効果

(6) 非侵襲散乱イメージングとして知られているスペックル相関イメージングを三次元に拡張した。スペックル相関イメージングにおいて重要な基盤技術である位相回復処理に深層学習を適用し、その高速性やノイズ頑強性を解析した。

(7) 実体試料に対するイメージングとして、位相回復を用いたホログラフィック顕微鏡により、微生物のリアルタイム三次元イメージングをデモンストレーションした。また、植物細胞のチューブリンに対し、回折限界よりも細かい照明光を用いた超解像イメージング技術を適用した。走査により得られる多数の画像データに対するデジタルアパーチャ処理の有効性を確認した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Jun Tanida	4. 巻 57
2. 論文標題 Computational imaging demands a redefinition of optical computing	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 09SA01 ~ 09SA01
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/JJAP.57.09SA01	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Ryoichi Horisaki, Ryosuke Takagi, Jun Tanida	4. 巻 57
2. 論文標題 Deep-learning-generated holography	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Applied Optics	6. 最初と最後の頁 3859 ~ 3859
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/AO.57.003859	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Ryoichi Horisaki, Kazuki Fujii, Jun Tanida	4. 巻 25
2. 論文標題 Single-shot and lensless complex-amplitude imaging with incoherent light based on machine learning	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Optical Review	6. 最初と最後の頁 593 ~ 597
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10043-018-0452-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Nishizaki Yohei, Valdivia Matias, Horisaki Ryoichi, Kitaguchi Katsuhisa, Saito Mamoru, Tanida Jun, Vera Esteban	4. 巻 27
2. 論文標題 Deep learning wavefront sensing	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 240 ~ 240
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/oe.27.000240	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 該当する

1. 著者名 谷田 純	4. 巻 46
2. 論文標題 コンピュータショナル撮像技術とその応用展開	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 光学	6. 最初と最後の頁 388 ~ 392
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tanida Jun, Horisaki Ryoichi	4. 巻 10714
2. 論文標題 Data-centric method for object observation through scattering media	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The third International Conference on Photonics Solutions (ICPS2017)	6. 最初と最後の頁 1071400
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2299986	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Horisaki Ryoichi, Takagi Ryosuke, Tanida Jun	4. 巻 56
2. 論文標題 Learning-based single-shot superresolution in diffractive imaging	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Applied Optics	6. 最初と最後の頁 8896 ~ 8896
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/AO.56.008896	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Horisaki Ryoichi, Fujii Kazuki, Tanida Jun	4. 巻 25
2. 論文標題 Single-shot and lensless complex-amplitude imaging with incoherent light based on machine learning	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Optical Review	6. 最初と最後の頁 593 ~ 597
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10043-018-0452-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計21件（うち招待講演 7件 / うち国際学会 9件）

1. 発表者名 Jun Tanida
2. 発表標題 Application of Machine Learning for Optical Sensing and Imaging through Scattering Media
3. 学会等名 2018 Taiwan-Japan Bilateral Symposium in Optics for Intelligent Information Science & Technology: Biophotonics & Agricultural Photonics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Jun Tanida
2. 発表標題 Novel imaging based on mathematical tools: from compressive imaging to machine-learning sensing/imaging
3. 学会等名 Optics and Photonics Congress 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Jun Tanida and Ryoichi Horisaki
2. 発表標題 Learning-based signal retrieval from scattering media
3. 学会等名 7th International Conference on Speckle Metrology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 谷田 純
2. 発表標題 AI Opticsのめざすもの
3. 学会等名 第1回先進電子システム工学セミナー (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小倉 裕介
2. 発表標題 サブ回折限界パターン照明による超解像イメージング
3. 学会等名 第9回デジタルオプティクス研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小倉裕介, 新川大生, 西村隆宏, 玉田洋介, 谷田純
2. 発表標題 サブ回折限界光パターン生成とイメージング応用
3. 学会等名 第12回新画像システム・情報フォトンクス研究討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 新川大生, 西村隆宏, 小倉裕介, 玉田洋介, 谷田 純
2. 発表標題 サブ回折限界スポットを利用した超解像手法: 高倍率対物レンズ系による検証
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yusuke Ogura, Daiki Shinkawa, Takahiro Nishimura, Yosuke Tamada, Jun Tanida
2. 発表標題 Laser scanning microscopy with subdiffraction-limit pattern
3. 学会等名 The 8th Japan-Korea Workshop on Digital Holography and Information Photonics (DHIP2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小倉裕介
2. 発表標題 サブ回折限界光パターン生成と超解像イメージング
3. 学会等名 第1回先進電子システム工学セミナー（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 新川大生, 西村隆宏, 小倉裕介, 玉田洋介, 谷田 純
2. 発表標題 サブ回折限界スポット照明によるバイオイメージング
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤井 和希, 堀崎 遼一, 谷田 純
2. 発表標題 深層学習を用いたインコヒーレントホログラフィックイメージング
3. 学会等名 Optics & Photonics Japan 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ryoichi Horisaki and Jun Tanida
2. 発表標題 Computer-generated holography based on deep learning
3. 学会等名 Joint Symposia on Optics - Optics & Photonics Japan 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 堀崎 遼一, 谷田 純
2. 発表標題 機械学習に基づくマルチモードファイバーを用いた対象判別
3. 学会等名 第8回バイオメトリクスと認識・認証シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takahiro Nishimura, Daiki Shinkawa, Yusuke Ogura, Yosuke Tamada, and Jun Tanida
2. 発表標題 Lateral spatial resolution improvement in laser scanning fluorescence microscopy using a subdiffraction limit optical spot
3. 学会等名 Proc. SPIE 10711, Biomedical Imaging and Sensing Conference 1071109
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Jun Tanida and Ryoichi Horisaki
2. 発表標題 Data-centric method for object observation through scattering media
3. 学会等名 The third International Conference on Photonics Solutions (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Jun Tanida
2. 発表標題 Computational imaging toward redefinition of optical computing
3. 学会等名 International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory 2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小倉裕介, 新川 大生, 西村隆宏, 玉田洋介, 谷田純
2. 発表標題 サブ回折限界光スポットの走査に基づく超解像イメージング
3. 学会等名 第65回応用物理学会 春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 西村隆宏, 小倉裕介, 谷田純
2. 発表標題 波長符号とベイズ解析に基づく超解像蛍光イメージング
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第38回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ryoichi Horisaki, Ryosuke Takagi, and Jun Tanida
2. 発表標題 Focusing through scattering media based on machine learning
3. 学会等名 JSAP-OSA Joint Symposia 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 高木 良輔, 堀崎遼一, 谷田 純
2. 発表標題 散乱媒質中への機械学習を用いたフォーカシング
3. 学会等名 Optics & Photonics Japan 2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Ryosuke Takagi, Ryoichi Horisaki, and Jun Tanida
2. 発表標題 Object recognition through a multi-mode fiber based on machine learning
3. 学会等名 The 7th Korea-Japan Workshop on Digital Holography and Information Photonics (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔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
研究分担者	西村 隆宏 (Nishimura Takahiro) (10722829)	大阪大学・工学研究科・助教 (14401)	
研究分担者	小倉 裕介 (Ogura Yusuke) (20346191)	大阪大学・情報科学研究科・准教授 (14401)	
研究分担者	堀崎 遼一 (Horisaki Ryoichi) (20598958)	大阪大学・情報科学研究科・助教 (14401)	