

# 研究終了報告書

## 「データ駆動光計測・光制御」

研究期間：2017年10月～2021年3月

研究者：堀崎 遼一

### 1. 研究のねらい

光を用いた計測や光の制御は、その高速性、並列性、非侵襲性などの利点から、様々な分野で利用されている。例えば、光計測としてカメラ、顕微鏡、天体望遠鏡、光制御として材料加工、ディスプレイ、プロジェクタなどはその典型例である。これらの技術は、医療、ライフサイエンス、天文学、工業、エンターテインメントを含む多様な分野における基盤となっている。一方で、近年の計算機の演算能力の向上や深層学習を含む機械学習の発展は目覚ましく、様々な分野においてその利活用が進んでいる。そこで本研究では、このような状況を背景に、情報科学技術を積極的に利用した光計測および光制御に関する諸技術の開発に取り組み、光学分野における革新を狙う。

研究期間中には、特に散乱体を通した光計測、光制御およびその関連技術にフォーカスする。散乱体として、皮膚、脳、骨などの生体試料、霧や大気揺らぎなどが挙げられる。これらの散乱体は光計測および光制御において深刻な性能低下をもたらす。医療やライフサイエンス、自動運転、天体観測、光通信などで大きな課題となっていた。そのため、散乱体を通した光計測や光制御は、光学分野において長く取り組まれている。しかしながら、散乱に伴う光学現象は複雑であるため、人力での取り扱いが困難であった。そこで本研究は、上述の情報科学技術の利活用により、この研究課題の解決に取り組み、幅広い分野に貢献する基盤技術の創出を行う。

### 2. 研究成果

#### (1) 概要

従来のイメージングシステムは光学系と処理系が独立に設計され、両者が不必要に肥大化してしまう傾向にあった。近年の計算機の演算能力の向上や情報科学分野の進展に伴い、光学系と処理系の統合設計が重要性を増している。このような研究分野はコンピュータショナルイメージングと呼ばれ、光学と情報科学が融合した学際領域として知られている。コンピュータショナルイメージングのフレームワークを利用することで、従来は困難であったイメージングシステムの高機能化や簡略化が実現している。また、これらの成果は、医療、工業、セキュリティなどの様々な分野に波及しつつあり、次世代のセンシング技術、IoT 技術の基盤となることが期待されている。研究者は、本さがけ研究において、コンピュータショナルイメージングのさらなる深化とその拡張を進めた。

本研究の成果は、散乱光の計測および制御における高機能化および光学系の簡略化を中心としている。しかしそれだけにはとどまらず、開発手法の生体試料への適用による実用性のデモンストレーションやイメージング分野あるいは光学分野全般に対する基礎的な貢献も含まれている。また、機械学習や深層学習を含む情報科学技術の光学分野への新たな応用を示したとも捉えられる。いずれの技術も国際的な学術誌で発表済みあるいは近い将来

に発表予定である。また、研究期間中には、本成果を受け、国内外の学術会議において招待講演を行う機会も得た。

## (2) 詳細

散乱はランダムな光学プロセスを伴うため、取り扱いが困難である。そのため従来の光学イメージングでは、散乱をいかに除去するかを主眼に置いたアプローチが多かった。本さきがけ研究では、散乱の積極利用により、従来手法における限界の打破を進めた。

### 研究テーマ A「散乱光計測および関連技術」

#### ・機械学習光計測

機械学習を用い、取り扱いが困難な散乱光学プロセスをブラックボックス化する散乱光計測手法の開発に取り組んだ。散乱イメージングの一手法として補償光学が知られている。補償光学は散乱体や大気揺らぎに起因する光波の歪みを波面センサにより計測し、可変鏡にフィードバックする。本研究では、図 1 に示すように、波面センサに深層学習を導入し、波面センサの簡略化と高機能化を実現した[5(1)2]。本手法では、散乱やぼけなどの本来忌避される光学プロセスを光学変調として敢えて利用することで、波面計測の高精度化が可能であることを見出した。

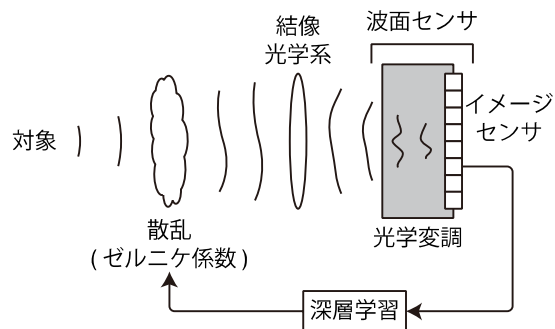


図 1. 深層学習型波面センサ。

ランダムな光学プロセスの積極利用の派生として、ゴーストサイトメトリーと呼ばれる高速イメージングフローサイトメトリーを東京大学太田禎生博士らと開発した。ゴーストイメージングと呼ばれる一画素イメージング手法と機械学習を組み合わせ、マイクロ流路中を流れる微粒子生体試料の高速分類および高速分取に成功した。

機械学習光計測の派生として、符号化開口イメージングにおけるマスク最適化に取り組んだ。符号化開口イメージングはレンズを用いずにイメージングを行えるため、小型・低コストな筐体による可視光イメージングやレンズの利用が困難な非可視光イメージングに用いられている。深層学習のフレームワークを利用して、マスクと再構成アルゴリズムの協調最適化を行い、イメージング性能の向上を確認した。

#### ・スペckル相関イメージング

スペckル相関イメージングは、メモリー効果と呼ばれる散乱のシフト不変性を利用し、散乱画像に対する相関演算および位相回復により、散乱体内部の非侵襲イメージングが可能である。従来のスペckル相関イメージングは二次元に限定されていた。本研究では、奥行き次元のメモリー効果を利用し、図 2 に示すように、スペckル相関イメージングの三次元化に成功した[5(1)3]。また、三次元スペckル相関イメージングのシングルショット化も実現した。

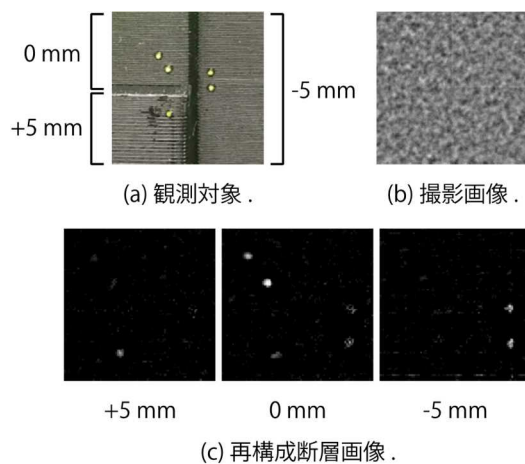


図 2. 三次元スペックル相関イメージング.

・回折トモグラフィ

ランダムな光学プロセスの積極利用した生体試料三次元イメージングに取り組んだ。本研究では散乱板によるランダム構造化照明を用いた三次元ホログラフィック顕微鏡を考案した。三次元ホログラフィック顕微鏡は生体試料を染色無しに三次元可視化できる。しかし、従来の三次元ホログラフィック顕微鏡は参照光の導入による光学系の複雑化や大型化、多数回の撮影によるイメージング速度の低下、単散乱モデルによる画質劣化が課題であった。本研究では三次元ランダム構造化照明と多重散乱モデル再構成アルゴリズムを利用し、参照光を用いないシングルショット三次元ホログラフィック顕微鏡を実現した。本手法を用い、ボルボックスの三次元動画撮影にも成功した。

**研究テーマ B「散乱光制御および関連技術」**

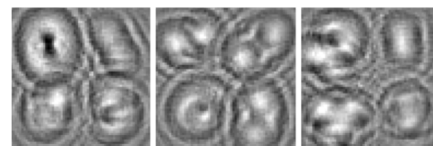
・機械学習光制御

散乱光計測と同様の困難さを散乱光制御も有する。散乱光計測と同様に、本研究では機械学習を用いることで、散乱光学プロセスをブラックボックス化した光制御に取り組み、その応用として多視点光制御への可能性を示した。

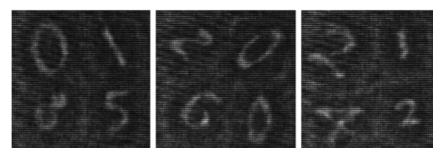
機械学習を用いた光制御の派生として、計算機合成ホログラフィにも取り組んだ。計算機合成ホログラフィは光刺激や光トラップ、三次元ディスプレイへの利用が進んでいるが、多数回の反復処理によるホログラム合成が課題であった。本研究では、深層学習を用い



(a) ターゲット光パターン.



(b) ホログラム.



(c) 再生光パターン.

図 3. 深層学習型計算機合成ホログラフィ.

ることで、反復型アルゴリズムと同程度のホログラムを反復処理無しに合成できることを実証した[5(1)1].

#### まとめ

本さがけ研究は情報科学技術を積極利用することで光計測、光制御における課題解決に取り組んだ。本成果は、散乱イメージングを含む光計測、光制御が関わる医療、天文学、セキュリティなどの多様な光応用分野において重要かつ基礎的な貢献である。

### 3. 今後の展開

創出した技術の社会実装を目指して研究開発を進める。本さがけ研究で取り組んだ散乱光の計測および制御は、散乱の強度やシフト不変性、学習プロセスに関して仮定を置いており、応用範囲が制限されている。これらの仮定を緩和していくことで、散乱光計測および散乱光制御の応用範囲拡大を図る。イメージングフローサイトメトリーに関しては、実用化、高性能化を進め、医療、ライフサイエンス分野へ展開する。符号化開口イメージングに関しては、製造過程を加味した最適化を行い、IoT 向け小型画像センサの実現を目指す。計算機合成ホログラフィに関しては、ネットワークや学習法の最適化により高機能化、多機能化を進め、光遺伝学、レーザープロセッシング、ディスプレイ応用に取り組む。

### 4. 自己評価

本さがけ研究を通し、研究開始時の狙いとした情報科学技術の利活用による光計測や光制御への基礎的な貢献を行うことができた。またその応用先として想定した散乱光の計測および制御に関して、波面センサ、スペックル相関イメージング、回折トモグラフィなどの具体的かつ重要な成果を得た。しかし、実用化に向けて課題となる散乱体への制限を残している。この課題解決を今後着実に進めていく。一方で、散乱光の計測および制御に関する研究から派生したイメージングフローサイトメトリー、符号化開口イメージング、計算機合成ホログラフィに関して、特筆すべき成果も上げた。

これらの研究は、単独あるいは共同研究を柔軟に切り替え、スピード感を持って進めることで、学術論文を通して発表するに至っている。また企業との共同研究を通して創出技術の社会実装を進めており、幅広い分野における波及効果が期待できる。

### 5. 主な研究成果リスト

#### (1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数: 18件

1. R. Horisaki, R. Takagi, and J. Tanida, "Deep-learning-generated holography," *Appl. Opt.* **57**, 3859–3863 (2018).

深層学習を用いた非反復型計算機合成ホログラフィを提案し、デモンストレーションした。従来の計算機合成ホログラフィはほとんどが反復型アルゴリズムを利用しており、ホログラム合成に時間を要し応用が制限されていた。提案手法は畳み込みニューラルネットワークと光波伝播の関連を見出し、ホログラム合成プロセスを畳み込みニューラルネットワークで回

帰することで、非反復型ホログラム合成を実現した。

2. Y. Nishizaki, M. Valdivia, R. Horisaki, K. Kitaguchi, M. Saito, J. Tanida, and E. Vera, "Deep learning wavefront sensing," *Opt. Express* **27**, 240–251 (2019).

散乱により歪んだ光波面を可変鏡などにより補償する補償光学において、波面センサは重要な役割を担う。本研究では波面センシングに深層学習を利用することで、波面推定の高精度化と光学系の簡略化を図った。提案手法では、散乱やデフォーカスなどを用いて波面歪みを強調した画像撮影を行い、深層学習を用いて散乱のゼルニケ係数推定を行った。提案手法を点光源および二次元パターンを用いてデモンストレーションし、その有効性を確認した。

3. Y. Okamoto, R. Horisaki, and J. Tanida, "Noninvasive three-dimensional imaging through scattering media by three-dimensional speckle correlation," *Opt. Lett.* **44**, 2526–2529 (2019).

スペックル相関イメージングは、メモリー効果と呼ばれる散乱のシフト不変性を利用し、非侵襲に散乱体内部のイメージングを行う。従来のスペックル相関イメージングは、二次元イメージングに限定されていた。本研究では、奥行き次元のメモリー効果を利用することで、スペックル相関イメージングを三次元に拡張した。散乱板に挟まれた三次元対象からの散乱光を結像光学系を用いず撮影し、三次元相関、三次元位相回復を行うことで、対象の三次元再構成に成功した。

## (2) 特許出願

無し

## (3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

### ・主要な学会発表

[1] 基調講演 R. Horisaki, "A personal tour of computational imaging," Seminario Ciencia de Imágenes e Inteligencia Computacional, Nuevos Sistemas, Aplicaciones y Desafíos en la era Big Data (2017).

[2] 基調講演 R. Horisaki, "Computational imaging with randomness," International Workshop on Adaptive, Compressive and Computational Imaging (WACCI), (2019).

### ・受賞

[1] 令和元年 ドイツ・イノベーション・アワード「ゴットフリート・ワグネル賞 2019」ライフサイエンス, "ゴーストサイトメトリーの開発" (共著者, 在日ドイツ商工会議所).

[2] 令和2年 文部科学大臣表彰若手科学者賞, "情報科学を積極利用した光イメージングの開拓に関する研究" (代表者, 文部科学省).

### ・プレスリリース

[1] 平成30年 "ゴーストサイトメトリー 世界初、AI が駆動する高速な細胞形態ソーターを実現" (東京大学, 大阪大学, シンクサイト株式会社, 理化学研究所, 科学技術振興機構(JST)).