

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 4 月 11 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K21128

研究課題名(和文)超小型シングルショット位相イメージング法の開発

研究課題名(英文)Development of a compact and single-shot phase imager

研究代表者

堀崎 遼一 (Ryoichi, Horisaki)

大阪大学・情報科学研究科・助教

研究者番号：20598958

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：光波の強度だけでなく、位相を含めた複素振幅情報を計測することは、あらゆる分野で重要である。特に、生体細胞は光吸収をとまなわない無色透明な試料が多く、位相イメージングの需要は高い。本研究では、従来の位相イメージング法では困難だった筐体の簡素化と小型化に取り組んだ。特に、参照光を必要としないシングルショットイメージング、単一受光素子を用いた位相イメージングのデモンストレーションを行い良好な結果を得た。これらの成果は米国光学会誌において7篇の論文として発表している。本研究は電子線、X線、可視光、赤外線、テラヘルツ波等の様々な光波センシングへの展開が期待できる。

研究成果の概要(英文)：It is important in various fields to observe not only the amplitude but also the phase of a light wave. In particular, such phase imaging is attractive for biomedicine because most of bio-cells are transparent and they are difficult to detect with amplitude imaging. In this study, we developed a phase imager with a compact and simple optical hardware. We experimentally demonstrated reference-light-free and single-shot phase imaging and also single-pixel phase imaging. These achievements were published as seven papers in journals of the optical society. Our study is extendable for various wave sensing techniques in wide spectral regions, such as electron beam, X-ray, visible light, infrared light, and terahertz radiation.

研究分野：情報光学

キーワード：光計測 位相イメージング

1. 研究開始当初の背景

光波のセンシングやイメージングは、光学の分野で長く取り組まれている。医療、天文、セキュリティ分野で利用されているが、特に医療分野では無色透明な試料が多いため、位相を観測できる光波イメージングの需要は高い [K. Lee, *et al.*, “Quantitative phase imaging techniques for the study of cell pathophysiology: from principles to applications,” *Sensors* **13**, 4170–4191 (2013)]. しかし、一般的な光波イメージングでは、参照光を用いるため光学系が大型化・複雑化する。また、光波の再構成処理には複数の撮影や試料のサイズ制限が必要であり、利用範囲が限定されている。これらが、光波イメージングの医療応用を阻む要因となっていた。

2. 研究の目的

そこで本研究では光波イメージングにおける光学系の小型化や簡略化、シングルショット化（あるいは高速化）、広視野化を同時に解決する手法の開発及びデモンストレーションを行う。これらが実現できれば、無色透明な生体試料を染色処理なしで、高速、安価、大量に計測できるため、特に臨床検査現場においてそのインパクトは大きい [G. Zheng, *et al.*, “Wide-field, high-resolution Fourier ptychographic microscopy,” *Nature Photonics* **7**, 739–745 (2013)].

また、後述する提案手法は参照光及び結像光学系が不要である。そのため、参照光の導入が困難な低可干渉性光源や光学系の利用が困難な状況でも適用できる。例えば、電子線、X線、赤外線、テラヘルツ波等の先端科学で利用される波長帯域での計測ではこのような課題が残されており、本手法の適用範囲は医療分野にとどまらない [A. Sakdinawat, *et al.*, “Nanoscale X-ray imaging,” *Nature Photonics* **4**, 840–848 (2010)].

3. 研究の方法

本研究では、光波イメージングにおける再構成処理の良条件化のために、ランダムな光パターンを用いた。ランダム光パターンの実装には図1(a)に示すランダム符号化開口および図1(b)に示すランダム構造化照明が考えられる [雑誌論文①, ②, ③, ④]。どちらの手法でも、得られた一枚の光強度画像に対して、物体光のスパース性を仮定し、位相回復を行うことで、光波の複素振幅（振幅と位相）を完全に回復する [J. Bioucas-Dias, *et al.*, “A new TwIST: Two-step iterative shrinkage/thresholding algorithms for image restoration,” *IEEE Transactions on Image Processing* **16**, 2992–3004 (2007), J. Fienup, “Phase retrieval algorithms: a comparison” *Applied Optics* **21**, 2758–2769

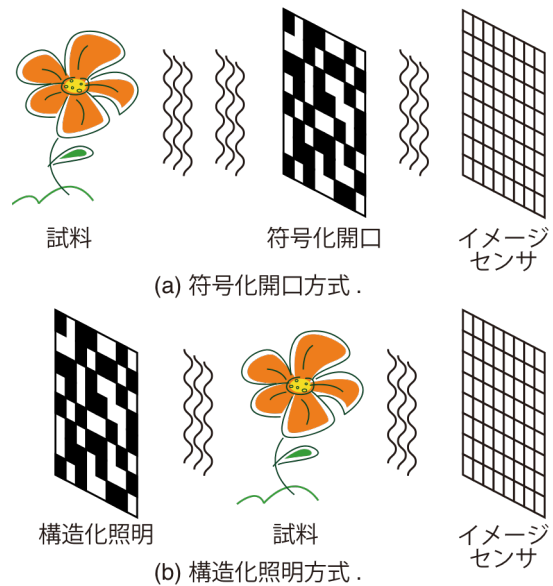


図1. シングルショット光波イメージング.

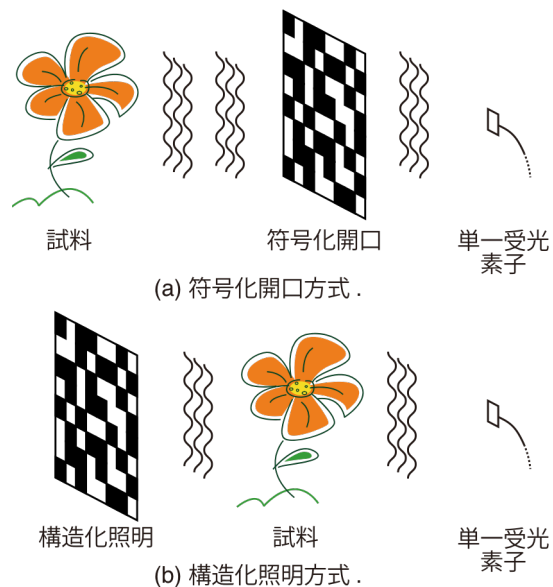
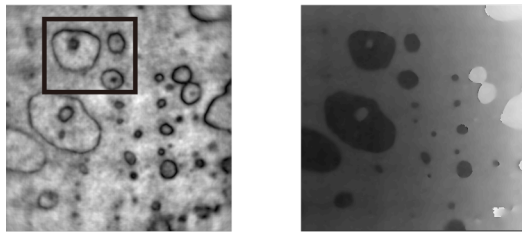


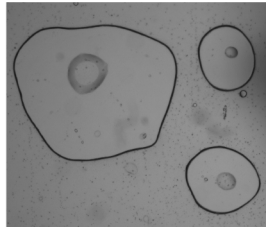
図2. 一画素光波イメージング.

(1982)]. また、これらのランダム光パターン生成において、安価な散乱板を用いても光波の位相情報を良好に得られる [雑誌論文⑤].

図1に示した二手法は、イメージセンサを使い光波イメージングのシングルショット化を実現した。しかし、テラヘルツ波等の波長領域では高画素数のイメージセンサを製造することは困難である。そこで、イメージセンサを単一受光素子に置き換え、複数のランダム光パターンを利用する光波イメージングについても開発を行った [雑誌論文⑥]。図2(a)に符号化開口方式、図2(b)に構造化照明方式の一画素光波イメージング法を示す。この場合、符号化開口や構造化照明の実現には空間光変調器を用いる。一画素光波イメージング



(a) 再構成振幅. (b) 再構成位相.



(c) 顕微鏡画像 ((a) の黒枠部).

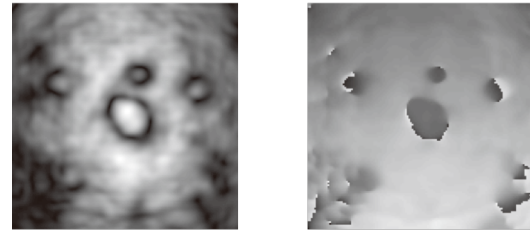
図 3. シングルショット光波イメージングの実験結果.

はシングルショット光波イメージングに対して、原理的に多数回の計測が必要になるが、スパース拘束型の再構成アルゴリズムを用いることで、計測回数を抑えることができる [O. Katz, *et al.*, “Compressive ghost imaging,” *Applied Physics Letters* **95**, 131110 (2009)]. また、単一受光素子はイメージセンサに比べて、読み出しノイズが少なく高い S/N で計測が可能のため、微弱光を用いて試料への光侵襲性を減らすことができる。そのため、生体イメージングへの利用が期待できる [V. Studer, *et al.*, “Compressive fluorescence microscopy for biological and hyperspectral imaging,” *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **109**, E1679-E1687 (2012)].

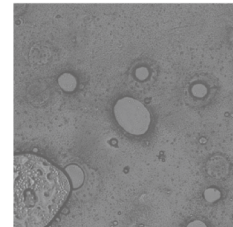
4. 研究成果

符号化開口方式のシングルショット光波イメージングの実験結果を図 3 に示す。試料は水と油の混合液である。図 3(a) に再構成した振幅画像、図 3(b) に再構成した位相画像を示す。これらの画像は撮影した光強度画像と同じ画素数である。また、図 3(c) に示す通常顕微鏡画像と空間分布が一致している。さらに、他の試料を用いて、理論から導かれる空間分解能と定量位相計測性を確認した。

符号化開口方式の一画素光波イメージングの結果を図 4 に示す。試料は同様に水と油の混合液である。図 4(a) に再構成した振幅画像、図 4(b) に再構成した位相画像を示す。この実験の際の計測数は図 4(a) と図 4(b) に示す画像の画素数の 1/10 である。また、図 4(c) に示す通常顕微鏡画像と空間分布が一致しており、他の試料を用いて、理論から導かれる空間分



(a) 再構成振幅. (b) 再構成位相.



(c) 顕微鏡画像.

図 4. 一画素光波イメージングの実験結果.

解能と定量位相計測性を達成していることを確認した。

以上の結果から、ランダム光パターンを用いることで、参照光が不要な光波イメージングが実現できることを示した。これにより、光波イメージングの筐体の大幅な小型化・簡略化が実現できた。また、イメージセンサを使つてのシングルショット光波イメージング、単一受光素子を用いての一画素光波イメージングをデモンストレーションした。これらの原理確認実験では可視光を用いたが、本手法は様々な波長帯域でも利用できる。

今後は、再構成処理の高速化、イメージング性能の高度化を行い、本成果の社会実装を目指す。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 6 件)

- ① Ryoichi Horisaki and Jun Tanida, Multidimensional object acquisition by single-shot phase imaging with a coded aperture, *Optics Express*, 査読有, 23, 2015, pp. 9696-9704. 10.1364/OE.23.009696
- ② Ryoichi Horisaki, Riki Egami, and Jun Tanida, Experimental demonstration of single-shot phase imaging with a coded aperture, *Optics Express*, 査読有, 23, 2015, pp. 28691-28697. 10.1364/OE.23.028691
- ③ Ryoichi Horisaki, Riki Egami, and Jun Tanida, Single-shot phase

imaging with randomized light (SPIRAL), Optics Express, 査読有, 24, 2016, pp. 3765-3773.
10.1364/OE.24.003765

- ④ Riki Egami, Ryoichi Horisaki, Lei Tian, and Jun Tanida, Relaxation of mask design for single-shot phase imaging with a coded aperture, Applied Optics, 査読有, 55, 2016, pp. 1830-1837.
10.1364/AO.55.001830
- ⑤ Ryoichi Horisaki, Ryosuke Takagi, and Jun Tanida, Learning-based imaging through scattering media, Optics Express, 査読有, 24, 2016, pp. 13738-13743.
10.1364/OE.24.013738
- ⑥ Ryoichi Horisaki, Hiroaki Matsui, Riki Egami, and Jun Tanida, Single-pixel compressive diffractive imaging, Applied Optics, 査読有, 56, 2017, pp. 1353-1357.
10.1364/AO.56.001353

[学会発表] (計 9 件)

- ① Ryoichi Horisaki, Single-shot phase imaging with a coded aperture and its applications, 14th Workshop on Information Optics, 2015年6月2日, 京都, 日本.
- ② Ryoichi Horisaki and Jun Tanida, A single-shot phase imager based on coded aperture support, Imaging and Applied Optics 2015, 2015年6月7日, アーリントン, アメリカ.
- ③ Ryoichi Horisaki and Jun Tanida, Single-shot multidimensional phase imaging with a coded aperture, JSAP-OSA Joint Symposia 2015, 2015年9月13日, 名古屋, 日本.
- ④ 堀崎 遼一, コンピュータショナルホログラフィックセンシング, レーザー学会学術講演会第36回年次大会, 2016年1月9日, 名古屋, 日本.
- ⑤ Ryoichi Horisaki, Single-shot quantitative phase imaging with coded diffraction, Imaging and Applied Optics 2016, 2016年7月25日, ハイデルベルク, ドイツ.
- ⑥ 松井 裕亮, 江上 力貴, 堀崎 遼一, 谷田 純, 一画素回折イメージング, Optics & Photonics Japan 2016, 2016年10月30日, 東京都文京区, 日本.
- ⑦ Ryoichi Horisaki, Holographic sensing through randomized diffraction, OSJ-OSA Joint Symposia, 東京都文京区, 日本.
- ⑧ Ryoichi Horisaki, Holographic sensing based on random diffraction, International Symposium on

Optomechatronic Technology 2016, 2016年10月16日, 京都, 日本.

- ⑨ Riki Egami, Ryoichi Horisaki, and Jun Tanida, Single-shot, wide-field diffractive imaging with random illumination, The Sixth Japan-Korea Workshop on Digital Holography and Information Photonics, 2016年12月19日, 札幌, 日本.

[図書] (計 1 件)

Ryoichi Horisaki, CRC Press, Taylor & Francis Group, 7th chapter of Optical Compressive imaging, 2016.

[産業財産権]

○出願状況 (計 2 件)

名称: 電磁波位相振幅生成装置、電磁波位相振幅生成方法及び電磁波位相振幅生成プログラム

発明者: 堀崎遼一, 谷田純, 江上力貴

権利者: 同上

種類: 特許

番号: 2016-159312

出願年月日: 2016年8月15日

国内外の別: 国内

名称: 電磁波検出装置、フローサイトメーター、電磁波検出方法及び電磁波検出プログラム

発明者: 堀崎遼一, 谷田純, 太田禎生

権利者: 同上

種類: 特許

番号: 2017-28245

出願年月日: 2017年2月17日

国内外の別: 国内

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

無し.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

堀崎 遼一 (HORISAKI, Ryoichi)

大阪大学・大学院情報科学研究科・助教

研究者番号: 20598958

(2) 研究分担者

無し.

(3) 連携研究者

無し.

(4) 研究協力者

無し.