

はまぎん こども宇宙科学館での ホログラム作成実習教室実施報告

森田 正紀(報告作成者)

*実施趣旨：昨今、ホログラムの定義や意味が正しくない方向で使われ、次世代への情報継承や撮影技術並びに現像処理技術などにも触れる機会が激減している事を懸念し、しかし、学術的で難解な解説や技術の伝承ではなく、小中学生にも楽しく、興味深くホログラムの事を知って貰いたい、という趣旨で、親子参加型実習教室として2018年10月よりスタートした。

*実施月日： 第一回教室 2018年10月28日

*主催：はまぎん こども宇宙科学館 (1ページにつづく)

目 次

1. 巻頭言：はまぎん こども宇宙科学館でのホログラム作成実習教室実施報告	森田正紀 表紙
2. シングルピクセルイメージングに基づく画像取得法	仁田功一 4
3. シングルピクセルホログラフィによる複数波長センシング	遠藤 優, 他 12
4. 機械学習を用いたシングルピクセルイメージング	水谷康弘, 他 17
5. 深層学習を利用した光相関計算機イメージングの耐ノイズ性向上	本多康伸, 他 22
6. モーションレスオプティカルスキャニングホログラフィ	米田 成, 他 27
7. 流れ場中の蛍光ナノ粒子群を3次元測定する103fpsインコヒーレント デジタル動画ホログラフィと複数波長同時記録	田原 樹, 他 33
8. 次回研究会のお知らせ	巻末

*指導スタッフ：元湘南工科大学 教授 佐藤 甲癸
元多摩美大 准教授 桧山 茂雄
(有)石川光学造形研究所 代表 石川 淳

上記3名の指導スタッフを中心とし、その趣旨に賛同するボランティア3名。

(運営スタッフとして 森田 正紀 協力)

*参加者数：午前午後の組合計19組（親子2名/組）（キャンセル1組）

*使用器材・感材等

(有)石川光学造形研究所製 ホログラフィカメラ ES-69-改

フランス製感光材料・処理薬品類 Ultimate U08M-R70-2.4x2.4-G.

(専用現像＆漂白剤含む)

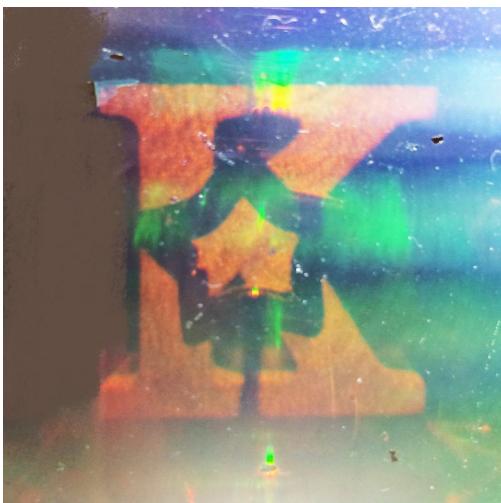
記録波長 632,8nm のホログラムをより明るい緑色画像で再生する為 TEA 処理乾板を使用。

*作業内容概要：佐藤・桧山両先生による定義と理論の簡易説明。

石川氏のホログラムカメラ基本原理とセッティング・撮影の実際。アナログ写真現像処理の実際も暗室内で見学頂き、撮影後のデニッシュモノカラーホログラム（約6cm 角/1枚）をお持ち帰り頂いた。

*反響：多くのこども達から「楽しかった」「説明がちょっと難しかった」などの感想が得られたが、一部の子供達からは意外な程レベルの高い質問なども出され、次年度に向けて指導法・配付資料の再考を迫られた。

ホログラムの完成率は、剛性の高く使用方法が至って簡易なES-69-改カメラに助けられ、再現性・安全性に長けたU08M感材の採用で100%を達成できた。



*実施月日： 第二回教室 2019年10月27日

*主催：はまぎん こども宇宙科学館

*指導スタッフ：元湘南工科大学 教授 佐藤 甲癸

元多摩美大 准教授 桧山 茂雄

(有)石川光学造形研究所 代表 石川 淳

上記3名の指導スタッフを中心とし、その趣旨に賛同するボランティア3名。

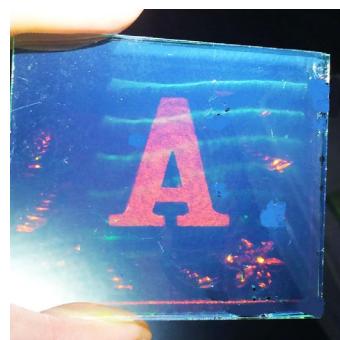
(運営スタッフとして 森田 正紀 協力)

*参加者数：午前午後の組合計15組（親子2名/組）（キャンセル5組）

*作業内容概要：佐藤・桧山両先生による定義と理論の簡易説明。

昨年の反省から波の干渉を目で見て理解させる為、スタッフによる手製干渉実験装置で実験を実施、良好な反応を得られた。石川氏のホログラムカメラ基本原理とセッティング・撮影の実際。アナログ写真現像処理の実際も暗室内で見学頂き、撮影後のデニッシュクモノカラー ホログラム（約6cm角/1枚）をお持ち帰り頂いた。

*反響：感想文集計から10%の子供達は「楽しかった」と得られた反面「説明がちょっと難しかった」とした子供達が約30%程いた事で難解で複雑な概念の伝え方にさらなる工夫が必要と判った。佐藤先生考案のフレームにセットして持ち帰らせる事でより安全に鑑賞できる工夫を施した。ホログラムの完成率は、本年度も100%を達成できた。



*実施月日： 第三回教室 2020年11月23日

*主催：はまぎん こども宇宙科学館

*指導スタッフ：元湘南工科大学 教授 佐藤 甲癸

元多摩美大 准教授 桧山 茂雄

(有)石川光学造形研究所 代表 石川 淳

特別講師 塩崎 由美子

上記4名の指導スタッフを中心とし、その趣旨に賛同するボランティア4名。

(運営スタッフとして 森田 正紀 協力)

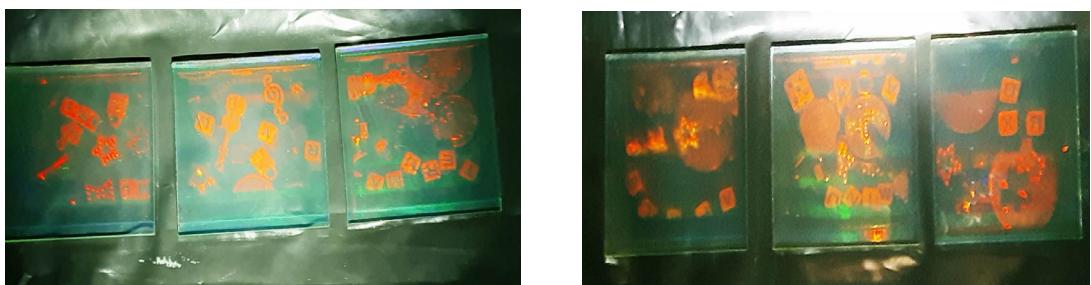
*参加者数：午前午後の組合計 9 組（親子 2 名/組 コロナ渦対策上密にならぬよう減員）

*作業内容概要：佐藤・桧山両先生による定義と理論の簡易説明。

昨年に引き続きスタッフによる手製干渉実験装置で実験を実施、良好な理解を得られた。

石川氏のホログラムカメラ基本原理とセッティング・撮影の実際。本年は特別講師としてアーティストの塩崎 由美子氏がホログラムと芸術との関わりなどを、小作品持参で講演された。密状態回避の為暗室内見学は中止、替わりに DVD 動画説明とし、撮影後のデニシュクモノカラーホログラム（約 6cm 角/1 枚）をフレームセット後、お持ち帰り頂く。また、一スタッフの協力で昔の 8x10 カメラを展示でき、多くの親子の方々から初めて見た驚きを伝えられた。

*反響：本年もホログラムの完成率は 100% を達成でき、多くの子供達から楽しかった、綺麗なホログラムが撮れた、塩崎先生の作品が綺麗だった、と良好な反響があった反面、相変わらず干渉や位相といった高次な概念を理解するのが難しく、子供達の集中力の限界もそこかしこに見られたのが残念。子供達の集中力が続く時間内に、如何に難しい事を平易に説明、理解させられるか？が、大きなポイントになると、改めて認識された。



謝辞

講座を開設いただいた、はまぎん こども宇宙科学館様、
遮光等完璧な会場準備をいただいた担当の吉武様、
撮影・現像・説明、等にがんばっていただいたボランティアスタッフの皆様に感謝いたします。

シングルピクセルイメージングに基づく画像取得法

神戸大学 大学院システム情報学研究科 仁田功一

1. はじめに

光学計測と画像を生成するためのデジタル処理信号の融合技術のひとつとして、シングルピクセルイメージングのアーキテクチャが最初に提案されたのが 2008 年のことである。[1] この当時、このアーキテクチャは、注目があつまりつつあった圧縮センシングを利用した新規の画像入力手段としての位置付けであった。

その後 2012 年ごろより、安価なイメージセンサーが開発されていないテラヘルツ波長帯の電磁波を用いたイメージング[2]が注目されたことを皮切りに、短波長赤外線波長領域の光源を用いたイメージング[3]、分光イメージング[4]、散乱イメージング[5]等への有効性が報告されている。また、時間分解センサーを利用し、画像計測に拡張する高速応答イメージング[6]も興味深い手法といえる。

シングルピクセルイメージングは、固体撮像素子も機械走査を用いることなく測定対象の 2 次元構造情報を取得できることが特徴である。機械走査との比較では、測定対象のスパース性や、空間光変調によるスパースコーディングを利用することで等価な画素数を有する 1 枚の画像を生成するための測定回数が劇的に少ない。圧縮センシングを利用する際には 20% 程度 [1]、深層学習を利用する場合は 5% 未満 [7] に測定回数を抑えることが可能である。

ホログラフィーとシングルピクセルイメージングの関連においては、デジタルホログラフィーを单一画素干渉計測で実装する方法が提案されている [8,9]。この方法では、光計測のデータセットを入力とするシングルピクセルイメージングの信号再構成を用いて物体光の 2 次元複素振幅分布を導出することができる。導出された分布と、スカラー回折等、一般的なデジタルホログラフィーの計算機再生アルゴリズムにより 3 次元計測が可能になる。以上より、シングルピクセルイメージングとデジタルホログラフィーの融合により単一画素計測により 3 次元情報取得が実現されることが示された。

本稿では、シングルピクセルイメージングの概要を説明する。次に、筆者が所属する神戸大学のシステム計測研究室におけるこれまでの成果である高精細シングルピクセルイメージング、等速運動する物体に対する画像計測、シングルピクセルイメージングを干渉計測に適用する独自の計測系についてそれぞれ紹介する。

2. シングルピクセルイメージング

シングルピクセルイメージングの光学計測系の典型例を図 1 に示す。図 1 (a) では、物体の 2 次元像を空間光変調デバイス (SLM; Spatial Light Modulator) 上に結像させる。結像された光は SLM 上で変調され、その空間強度和が受光素子により測定される。一方、図 1 (b) に示す系では、構造を有する光強度分布を照射し、物体に作用した光分布の空間強度和を測定する。これらの計測においては、異なる変調分布（照射分布）を用いた複数回の測定データを取得する必要がある。

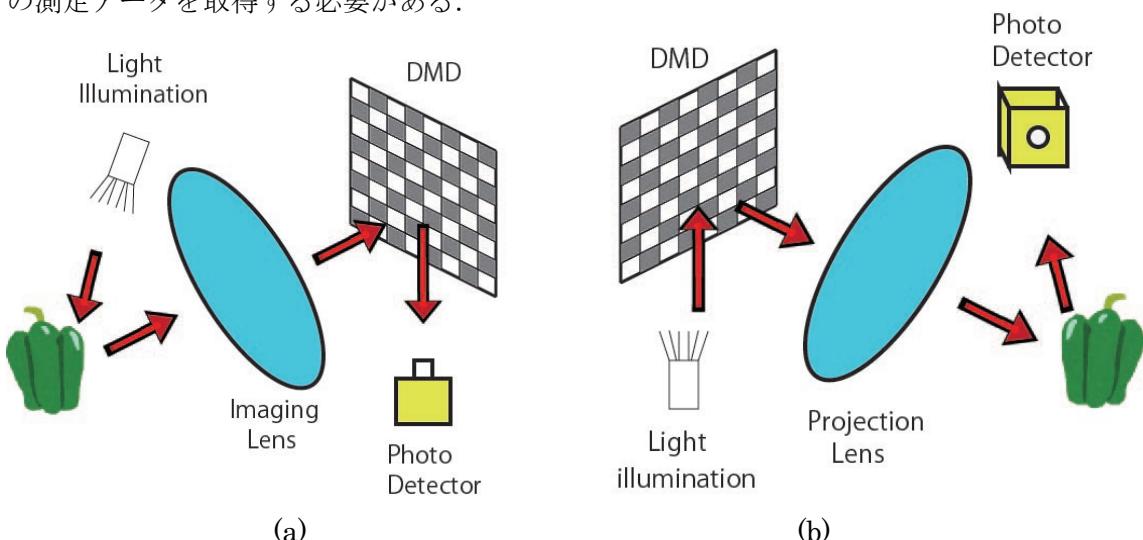


図 1 シングルピクセルイメージングの計測光学系の基本構成。(a) 像変調型 (b) 変調分布照射型。

これまでに報告されている多くの計測系では、SLM にディジタルマイクロミラーデバイス (DMD; Digital Micromirror Device) が用いられている。DMD の大きな特徴として、高速なリフレッシュレートが挙げられる。既に市販されている製品で 32kHz で動作するものがある。この仕様は、液晶性の SLM と比較すると高速である。

ただし、DMD を高速に駆動する場合、変調分布はバイナリー (on/off) に限定される。文献 [1] では、空間光変調にアダマール変換の基底分布 [10] が採用されている。アダマール変換は、直交変換でありその逆行列が簡単に導出されることが特徴である。また、その基底の要素が 1 と -1 のみで構成されるために、DMD との整合性が高い。以上がシングルピクセルイメージングにおける変調分布の設定にアダマール変換が適している理由である。

図 1 に示す計測過程は、式 (1) に示す数式で扱われることが多い。

$$\mathbf{y} = \mathbf{Hx} \quad (1)$$

式(1)において、 \mathbf{y} と \mathbf{x} は、それぞれ測定データセットと測定対象の情報をもつ列ベクトル

である。 K 回の計測で、 $N \times N$ 画素を有する画像を提示することを仮定すると、 \mathbf{y} と \mathbf{x} の要素数はそれぞれ、 K 、 N^2 である。 \mathbf{H} は行列であり、その行成分が変調分布を表す。

画像再構成においては、測定値である \mathbf{y} と既知の \mathbf{H} より \mathbf{x} を求める。 $K \ll N^2$ である場合、画像再構成は ill-posed 問題になる。シングルピクセルイメージングの黎明期では、圧縮センシングの代表的な手法である l1-norm 最小化法が広く用いられた。近年は、畳み込みニューラルネットワークや、敵対的生成ネットワークを用いた方法が効果を発揮しつつある。

3. 高精細シングルピクセルイメージング

シングルピクセルイメージングの課題の一つとして、高精細化が挙げられる。特に、深層学習が画像再構成に適用されるまでは、 32×32 や 64×64 画素のイメージングのデモンストレーションがほとんどであった。この状況に対する制約として、まず DMD のリフレッシュレートによるものが挙げられる。リフレッシュレートが 32kHz である DMD を用いて 30fps でイメージングを動作させることを考えると、1枚の画像を生成するために利用できる測定回数は最大で 1000 回程度である。圧縮センシングの見積もりによると、この測定数から数万画素以上の画像をえることは難しい。また、信号処理の計算負荷の制約もある。式(1)に示す \mathbf{H} の要素数は $N^2 \times K$ である。イメージングに必要な K の値は画素数に比例すると考えると、行列の要素数は、画素数の 2乗に比例して増大してしまう。

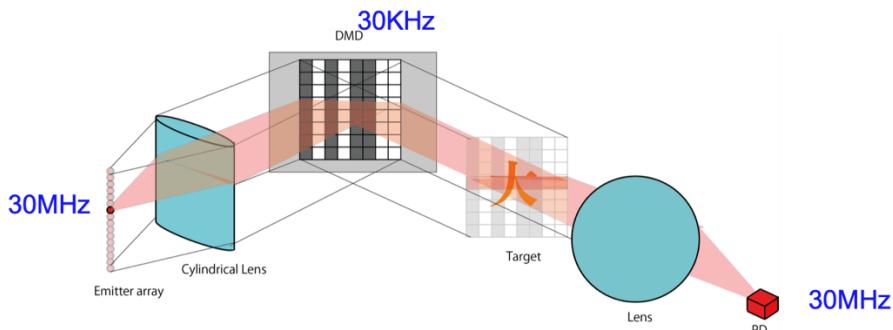


図 2 時分割多重とシングルピクセルイメージングの融合による高精細イメージングの計測光学系の概念図。

そこで、シングルピクセルイメージングの長所をいかしつつ、高精細化を実現する方法を提案している。この方法は、画像を行毎に分割し、計測と再構成を行うことで、計測時間の短縮と計算負荷の軽減を試みるものである[11]。様々な実現形態を試行した結果、図 2 に示すような系を考案し、実証を行った。[12] 実験では、光源にレーザー走査式のピコプロジェクターを用いた。その結果、図 3 に示すように、100 万画素を有する画像を提示

することに成功している。

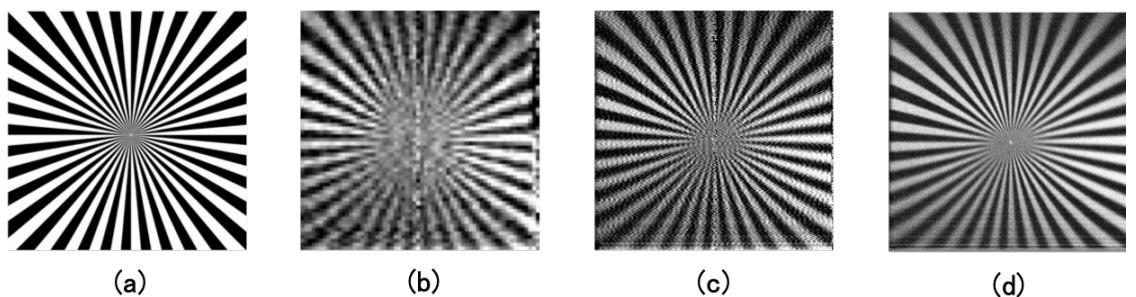


図 3 高精細シングルピクセルイメージングの実験検証結果. (a)測定に用いたテストチャートと再構成画像 (b) 64×64 画素, (c) 256×256 画素, (d) 1024×1024 画素.

4. 等速運動する物体の検査技術への応用

シングルピクセルイメージングで動画撮影を行うことを考えると、物体の速度よりも高速に変調分布を更新する必要があり制約が多い。そこで、物体が一定方向に等速運動する場合のイメージングに適した実装形態を提案している。[13] 図 4 にその概念図を示す。

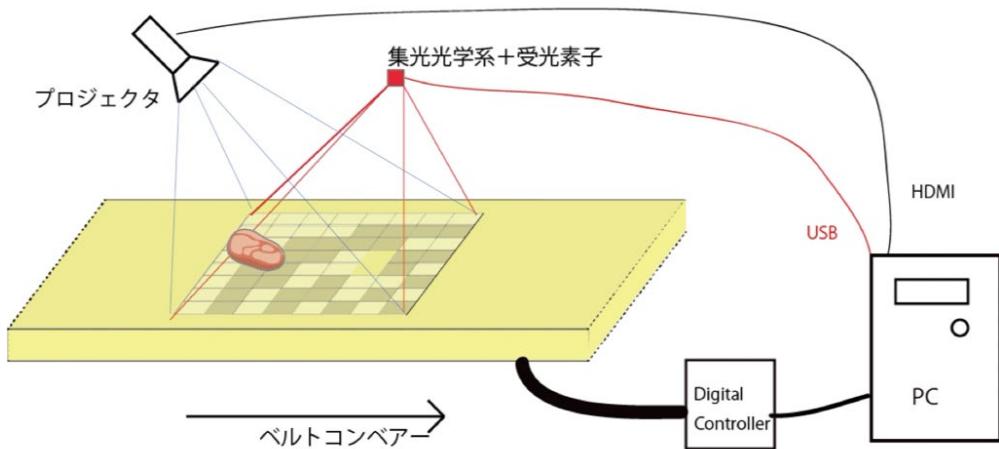


図 4 等速移動物体に対するシングルピクセルイメージングの実装例.

図に示す装置では、測定対象はベルトコンベアに乗せられ、等速に移動することを想定している。ここで、プロジェクターは、測定対象を固定の光パターンで照射する。物体がパターンの一行分を移動する毎に計測を行う。この方法の特徴は、装置の特性を利用して、パターンの更新を物体の移動で置換することである。

ここで、従来の計測と異なる点は、変調分布の更新を2次元的に一新するのではなく、物体の移動に合わせて一行の空間シフトで実行することである。文献[13]において、空間シフトによるパターン更新から逆過程を有する変調分布データセットを用意できることおよび、そのデータセットを用いた検証結果について報告している。また、画素ずらし計測も可能であることや、深層学習を用いた超解像処理に拡張できることを報告している。
[14]

ベルトコンベアー上の物体のイメージングは、工業製品や食品等の検査技術としての応用が考えられる。この方法は、シングルピクセルイメージングを特定の用途に適合させた実装方法としての好例であると考えている。現在、実証システムの開発にむけての検討をすすめている。

5. デジタルホログラフィー応用

シングルピクセルイメージングをデジタルホログラフィーに応用する研究は、すでにつくつかの研究機関で行われている。文献[9]において報告されている計測系を図5に示す。この系では、干渉系の参照信号部において、位相型SLMを配置し、物体光と変調された参照光との干渉光強度和を受光素子で計測する。位相シフト計測とシングルピクセルイメージングの画像再構成のための信号処理より、物体光の複素振幅分布を求めることができる。この分布は、一般的なデジタルホログラフィーで算出されるものと等価である。したがって、この分布を計算機内で伝搬計算することで、物体の情報を再生することができる。

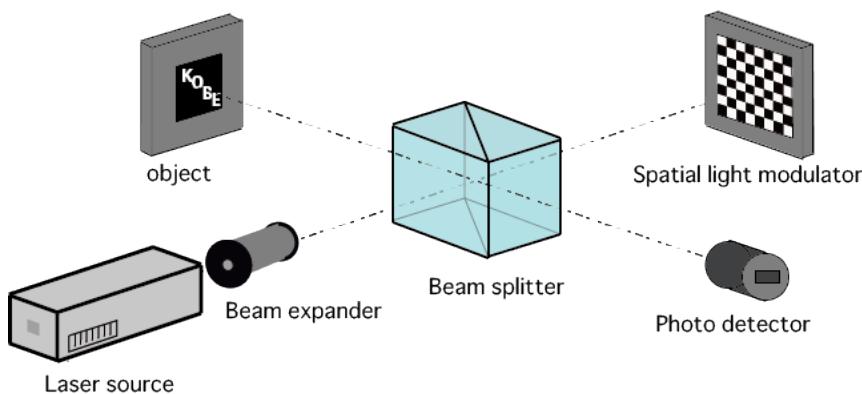


図5 シングルピクセルディジタルホログラフィーの計測系の概要。

この系において、得られる複素振幅分布の空間解像度と画素数は、位相型SLMの画素間隔と画素数によって制約される、また、SLMのリフレッシュレートが測定時間の制約になる。ホログラフィー計測においては、高い空間解像度が要求される。干渉計測の安定性

を考えると測定時間を短縮することも重要である。

そこで、SLM の制約を受けない計測方法を提案している。[15] 図 6 に提案手法の計測光学系の概念図を示す。この手法では、SLM の代わりに回転方向と傾斜方向の 2 軸の回転を精密に制御できる機械ステージが取り付けられた反射鏡を用いる。反射鏡の傾きにより干渉面に生じる参照信号の位相分布が、シングルピクセルイメージングにおける空間変調の役割をはたす。図 5 に示す計測系と異なり、各画素に任意の変調を光信号に与えることはできない。一方で、ステージの傾き角を適切に設定することで、受光素子で測定する光強度分布からフーリエ変換に相当する値がえられることを示している。

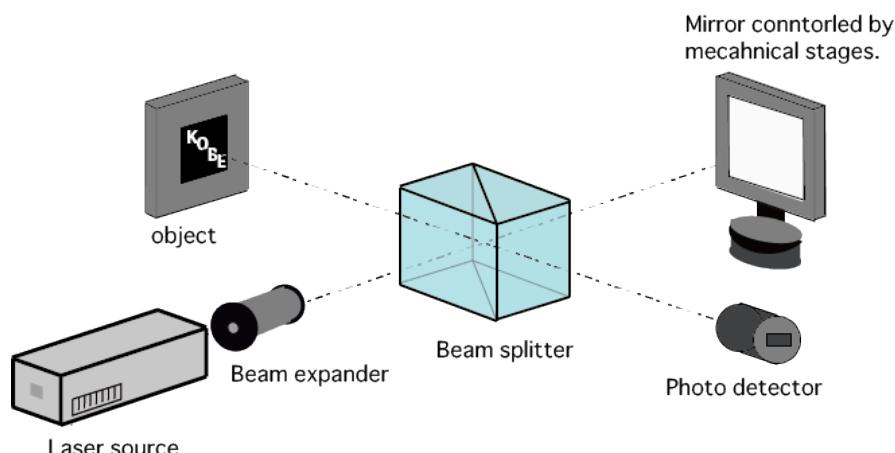


図 6 反射鏡の傾き制御を用いたシングルピクセル干渉光学系。



図 7 数値解析の結果 (a) 測定対象, (b) 再構成結果

提案手法を数値解析により検証している。位相物体の測定について検証した結果、図 7 に示すように、その概形を画像化できていることがわかる。今後、実験的な検証と、反射鏡を用いた計測システムの詳細な性能評価をすすめる予定である。

6. まとめ

シングルピクセルイメージングの原理と手順の概要を示した。文献 [16, 17] 等に近年

のレビュー論文が掲載されているので紹介する。また、日本語の解説としては、文献[18~20]があげられる。

シングルピクセルイメージングに関する筆者の研究として、時分割マルチフレクシングとの協調による高精細化法について紹介した。また、製品検査においての応用を前提とした等速運動する測定対象をイメージングする方法の構想について示した。シングルピクセルイメージングのデジタルホログラフィー応用について最新の研究について紹介した。

謝辞：本稿の内容において、日本光学会情報フォトニクス研究グループ内のシングルピクセルワーキンググループ（SPI-WG）内の議論や情報交換の寄与が大きい。特に、SPI-WGを筆者とともに立ち上げた発起人の水谷康弘氏（大阪大学）、鈴木裕之氏（群馬大学）、田上周路氏（高知工科大学）、遠藤優氏（金沢大学）に感謝申し上げます。

参考文献：

- [1]. M. F. Duarte, M. A. Davenport, D. Takhar, J. N. Laska, T. Sun, K. F. Kelly, R. G. Baraniuk, "Single-pixel imaging via compressive sampling," *IEEE Signal Process. Mag.*, **25**, pp. 83–91 (2008).
- [2]. D. Shrekenhamer, C. M. Watts, and W. J. Padilla, "Terahertz single pixel imaging with an optically controlled dynamic spatial light modulator," *Opt. Express*, **21**, pp. 12507-12518 (2013).
- [3]. G. M. Gibson, B. Sun, M. P. Edgar, D. B. Phillips, N. Hempler, G. T. Maker, G. P. A. Malcolm, and M. J. Padgett, "Real-time imaging of methane gas leaks using a single-pixel camera," *Opt. Express*, **25**, pp. 2998-3005 (2017).
- [4]. F. Soldevila, E. Irles, V. Durán, P. Clemente, M. Fernández-Alonso, E. Tajahuerce, and J. Lancis, "Single-pixel polarimetric imaging spectrometer by compressive sensing," *Appl. Phys. B*, **113**, pp. 551–558 (2013).
- [5]. E. Tajahuerce, V. Duran, P. Clemente, E. Irles, F. Soldevila, and P. Andres, "Image transmission through dynamic scattering media by single-pixel photodetection," *Opt. Express*, **22**, 16945–16955 (2014).
- [6]. F. Rousset, N. Ducros, F. Peyrin, G. Valentini, C. D'Andrea, and A. Farina, "Time-resolved multispectral imaging based on an adaptive single-pixel camera," *Opt. Express*, **26**, pp. 10550-10558 (2018).
- [7]. C. F. Higham, R. Murray-Smith, M. J. Padgett and M. P. Edgar, "Deep learning for real-time single-pixel video," *Scientific Reports*, **8**, 2369 (2018).

- [8]. P. Clemente, V. Durán, E. Tajahuerce, P. Andrés, V. Climent, J. Lancis, "Compressive holography with a single-pixel detector," Opt. Lett., 38, pp. 2524-2527 (2013).
- [9]. L. Martínez, P. Clemente, Y. Mori, V. Climent, J. Lancis, and E. Tajahuerce, "Single-pixel digital holography with phase-encoded illumination," Opt. Express, 25, pp. 4975-4984 (2017).
- [10]. M. Harwit, "Hadamard Transform Optics," (Academic Press, 1979).
- [11]. K. Nitta, "Acceleration of single pixel imaging," Proc. SPIE, **10616**, 1061605 (2018).
- [12]. K. Nitta, A. Takigawa, X. Quan, and O. Matoba, "Experimental verification of a method for single pixel imaging with one dimensional Hadamard transform and time division multiplexing," Conf. Papers in Computational Optical Sensing and Imaging 2020, JTh2A.39 (2020).
- [13]. 大田 和樹, 仁田 功一, 全 香玉, 的場 修, "シフトパターン変調によるシングルピクセルイメージング", 第 80 回応用物理学会秋季学術講演会, 19p-E319-2 (2019).
- [14]. 成松 智輝, 仁田 功一, 全 香玉, 的場 修, "等速運動する物体に対するシングルピクセルイメージングにおける画像再構成", 第 68 回応用物理学会春季学術講演会, 16a-P07-1 (2021).
- [15]. 吉井 駿一, 仁田 功一, 鈴木裕之, 全 香玉, 的場 修, "ガルバノ反射鏡を用いたシングルピクセル干渉イメージングの検討", 第 68 回応用物理学会春季学術講演会, 16a-P07-2 (2021).
- [16]. M. P. Edgar, G. M. Gibson, M. J. Padgett, "Principles and prospects for single-pixel imaging," Nat. Photonics, **13**, pp. 13–20 (2019).
- [17]. G. M. Gibson, S. D. Johnson, and M. J. Padgett, "Single-pixel imaging 12 years on: a review," Opt. Express, **28**, pp. 28190-28208 (2020).
- [18]. 仁田 功一, "計算機ゴーストイメージング – 散乱光照射と 1 画素検出による画像化法 –", レーザー研究, **41**, pp. 996-1000 (2013).
- [19]. 仁田 功一, "シングルピクセルイメージング - 単一画素計測による画像取得 -", オプトロニクス (OPTRONICS) 2017 年 4 月号 pp. 187-191.
- [20]. 水谷康弘, "シングルピクセルイメージングの現状と応用展開", レーザー研究, **47**, pp. 267-270 (2019).

シングルピクセルホログラフィによる複数波長センシング

遠藤 優¹, 田原 樹^{2,3}, 岡本 亮^{4,3}

¹金沢大学理工研究域

²国立研究開発法人情報通信研究機構 電磁波研究所

³国立研究開発法人科学技術振興機構 さきがけ

⁴京都大学大学院工学研究科

E-mail: endo@se.kanazawa-u.ac.jp

あらまし: 単一受光素子を用いたホログラフィ計測はシングルピクセルディジタルホログラフィ (SPDH: Single-Pixel Digital Holography) と呼ばれる。本稿では、SPDH の原理について述べ、私たちが取り組んでいる SPDH を用いて複数波長センシングを実現する手法について述べる。

Multi-wavelength sensing using single-pixel holography

Yutaka Endo¹, Tatsuki Tahara^{2,3}, Ryo Okamoto^{4,3}

¹Institute of Science and Engineering, Kanazawa University

²Applied Electromagnetic Research Institute, National Institute of Information and Communications Technology (NICT)

³PRESTO, Japan Science and Technology Agency

⁴Graduate School of Engineering, Kyoto University

E-mail: endo@se.kanazawa-u.ac.jp

Abstract: Single-pixel digital holography (SPDH) is a holographic sensing technique using a single-pixel detector. In this article, we describe the principle of SPDH and the multiwavelength sensing using SPDH.

1. はじめに

单一受光素子を用いたイメージングはシングルピクセルイメージング (SPI: Single-Pixel Imaging) と呼ばれる[1-3]。SPI は波長帯、感度、応答速度などの点で画素アレイを用いることが難しい場面での活用が期待されており、テラヘルツイメージング、赤外イメージング、TOF カメラなどへ応用されている。

单一受光素子はホログラフィ計測においても活用されている。特に、SPI の原理に基づきホログラフィ計測を行う手法はシングルピクセルディジタルホログラフィ (SPDH: Single-Pixel Digital Holography) と呼ばれる[4-6]。SPDH を用いることで、様々な波長帯の

光の振幅・位相分布を高感度・高速に計測することが期待されている。従来の SPDH に関する研究では、単一波長の振幅・定量位相計測のみが行われており、複数波長の振幅・定量位相計測はこれまで実現されていなかった。私たちは SPDH の複数波長計測への拡張に取り組み、SPDH を用いた複数波長の振幅・定量位相の同時取得を初めて実現した[7]。本稿では、SPDH を用いて複数波長計測を実現する 2 つの手法について述べる。

2. シングルピクセルデジタルホログラフィ

シングルピクセルデジタルホログラフィ (SPDH: Single-Pixel Digital Holography) は SPI の原理に基づき单一受光素子を用いてホログラフィ計測を行う手法である。ここでは、参照光を変調し、位相シフト法を用いるタイプの SPDH について述べる[6]。図 1 (a) に SPDH の光学系を示す。光源から出た光はビームスプリッタにより二つに分けられ、一方は物体に、もう一方は空間光変調器 (SLM: Spatial Light Modulator) へと入射する。物体からの光は、SLM で変調された光と干渉し、フォトディテクタを用いて記録される。記録された光強度は、

$$b_{m,\phi} = a \|\mathbf{o} + \mathbf{h}_m e^{j\phi}\|_2^2, \quad (1)$$

と表される。ここで、 $\mathbf{o} \in \mathbb{C}^N$ はフォトディテクタから z_0 だけ離れた位置における物体光成分、 $\mathbf{h}_m e^{j\phi} \in \mathbb{C}^N$ は SLM における変調パターン、 a は定数である。簡単のため、以降 $a = 1$ とする。変調パターンは空間パターン \mathbf{h}_m に一様な位相シフト $e^{j\phi}$ を重畠することで構成される。位相シフト量 ϕ を変化させて計測データを取得し、計算処理することで、物体光と空間パターンの相関

$$\mathbf{u}_m = \mathbf{h}_m^* \mathbf{o}, \quad (2)$$

が得られる。ここで、 \mathbf{h}_m^* は \mathbf{h}_m の共役転置を表す。異なる M 枚の空間パターン $\{\mathbf{h}_m | m = 1, \dots, M\}$ を用いて、この計測を繰り返すことで、計測データ

$$\mathbf{u} = [\mathbf{h}_1 \ \mathbf{h}_2 \ \dots \ \mathbf{h}_M]^* \mathbf{o} = \mathbf{H} \mathbf{o}, \quad (3)$$

が得られる。物体光成分 \mathbf{o} はこの線形システムを解くことで求めることができる。 \mathbf{H} には図 1 (b) のようなアダマール行列が用いられることが多い。物体光は、 $\hat{\mathbf{o}} = \mathbf{H}^* \mathbf{u}$ と再構成されることが多い。

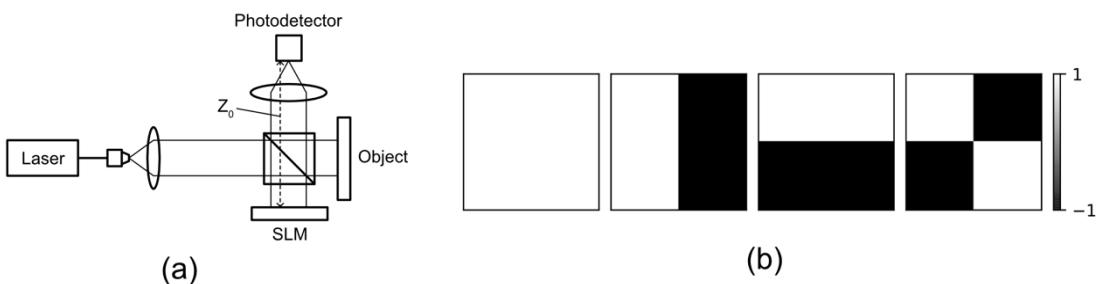


図 1 (a) SPDH で用いる光学系。 (b) 2×2 のアダマール行列パターン。

3. 時分割複数波長 SPDH

SPDH を用いて複数波長センシングを実現する方法の一つに、異なる波長を持つ複数の光源を時間的に切り替え、各波長で SPDH による計測を行う方法がある。図 2 (a) のようなシステムを用いて、複数の光源をスイッチで切り替えて、特定の波長の光のみで計測を行う。波長 $\lambda_c (c = 1, 2, \dots, C)$ の光源のみを用いて SPDH の計測を行ったとき、その計測データは、

$$b_{c,m,\phi} = \left\| \mathbf{o}_c + \mathbf{h}_{c,m} e^{j\phi} \right\|_2^2, \quad (4)$$

となる。ここで、 $\mathbf{o}_c \in \mathbb{C}^N$ は物体光の波長 λ_c 成分を表す。第 2 節で述べたような位相シフト法を用いることで、計測データ

$$\mathbf{u}_c = [\mathbf{h}_{c,1} \quad \mathbf{h}_{c,2} \quad \cdots \quad \mathbf{h}_{c,M}]^* = \mathbf{H}_c \mathbf{o}_c, \quad (5)$$

が得られる。この線形システムを解くことで、 \mathbf{o}_c を再構成できる。この計測を別の波長の光源に切り替えて行うこと、物体光の複数波長情報を取得できる。

時分割複数波長 SPDH の概念実証のための実験を行った。図 2 (b), (c) に実験結果を示す。SLM には LCOS-SLM (浜松ホトニクス, X10468-01) を用い、光源には R ($\lambda_1 = 633 nm$)、G ($\lambda_2 = 532 nm$)、B ($\lambda_3 = 446 nm$) の 3 種類のレーザーを用いた。モノクロイメージセンサを单一受光素子とみなし、撮影した画像の輝度値の総和を計測値として用いた。計測対象には RGB のカラーフィルムを用いた。空間パターン $\mathbf{h}_{c,m}$ として 16×16 のアダマール行列パターンを用い、4 ステップ位相シフト法を用いた。よって、合計 3,072 枚の変調パターンを使用して計測を行った。時分割複数波長 SPDH での再生像と、イメージセンサを用いた通常のホログラフィ計測による再生像を比較したところ、振幅分布・位相分布共に良い一致が見られた。よって、時分割複数波長 SPDH により複数波長情報を取得できることが確認できた。

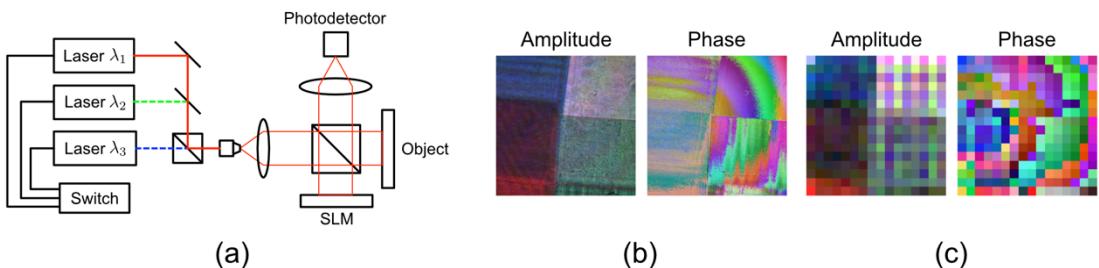


図 2 (a) 時分割複数波長 SPDH システム。 (b) イメージセンサを用いた場合の再生像。 (c) SPDH による再生像。

4. 波長選択抽出位相シフト法を用いた複数波長 SPDH

複数波長センシングを実現する手法に波長選択抽出位相シフト法がある[8,9]。私たちはこれを SPDH に応用することで、複数波長センシングを実現する手法について取り組んでいる。図 3 (a) にシステムの模式図を示す。時分割複数波長 SPDH とは異なり、異なる波

長を持つ複数の光源からの光を同時に対象へと照射する。参照光側には SLM を配置し、一様な位相シフト ϕ を重畳した変調パターン $\mathbf{h}_m e^{j\phi}$ を表示する。SLM は波長依存性をもち、異なる波長に対して異なる位相変調量を与えるため、変調パターンは波長 λ_c の関数 $\mathbf{h}_{c,m} e^{j\phi(\lambda_c)}$ となる。よって、計測データは

$$b_{m,\phi} = \sum_{c=1}^C \left\| \mathbf{o}_c + \mathbf{h}_{c,m} e^{j\phi(\lambda_c)} \right\|_2^2, \quad (6)$$

となる。波長依存の位相変調量がどれくらいか分かれば、逆問題を解くことで波長情報の分離が可能となる。必要となる位相シフト回数は $2C + 1$ 回となる。そのため、SPDH で使用する変調パターンの枚数は $M(2C + 1)$ 枚となる。

波長選択抽出位相シフト法を用いた複数波長 SPDH の概念実証のための実験を行った。図 3(b), (c) に実験結果を示す。光学系は第 3 節と同様のものを用いた。計測対象には RGB のカラーフィルムを用いた。空間パターン $\mathbf{h}_{\lambda,m}$ として 16×16 のアダマール行列パターンを用い、7 ステップの波長選択抽出位相シフト法を用いた。よって、合計 1,792 枚の変調パターンを使用して計測を行った。波長選択抽出位相シフト法を用いた SPDH での再生像と、イメージセンサを用いた通常のホログラフィ計測による再生像を比較したところ、振幅分布・位相分布に同一の傾向が見られた。ただし、再生像のノイズが大きく、これを抑制していくことが今後の課題として挙げられる。

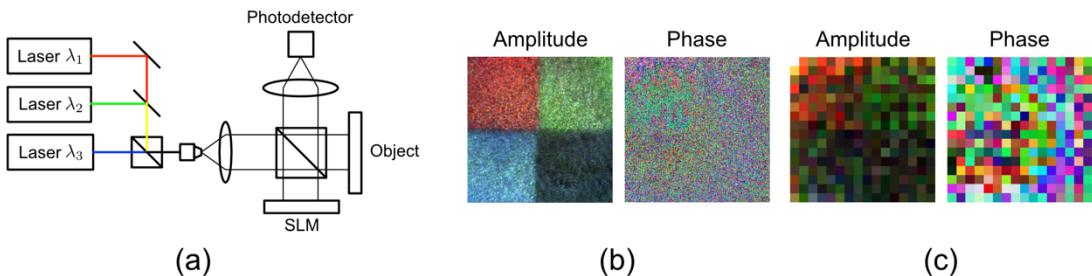


図 3 (a) 波長選択抽出位相シフト法を用いた複数波長 SPDH システム。 (b) イメージセンサを用いた場合の再生像。 (c) SPDH による再生像。

5. まとめ

本稿では、SPDH の原理について説明し、SPDH に基づく複数波長センシングを実現する 2 つの手法について述べた。時分割複数波長 SPDH では、異なる波長を持つ複数の光源を時間的に切り替えて計測を行う。波長選択抽出位相シフト法を用いた SPDH では、複数の光源を切り替えることなく、位相シフトのみで複数波長センシングを実現できる。これら 2 つの手法の概念実証を行い、おおむね計測対象の特徴を取得できることを確認した。しかし、現在のシステムでは再生像のノイズが大きいため、これを抑制し、高品質な像を再生することが今後の課題として挙げられる。

本研究の一部は JSPS KAKENHI Grant Number JP19K20293, 科学技術振興機構(JST)さきがけ (JPMJPR15P4, JPMJPR16P8) の助成を受けた。

参考文献

- [1] M. P. Edgar, G. M. Gibson, and M. J. Padgett, "Principles and prospects for single-pixel imaging," *Nature Photon* **13**, 13–20 (2019).
- [2] G. M. Gibson, S. D. Johnson, and M. J. Padgett, "Single-pixel imaging 12 years on: a review," *Opt. Express* **28**, 28190–28208 (2020).
- [3] M. F. Duarte, M. A. Davenport, D. Takhar, J. N. Laska, Ting Sun, K. F. Kelly, and R. G. Baraniuk, "Single-Pixel Imaging via Compressive Sampling," *IEEE Signal Process. Mag.* **25**, 83–91 (2008).
- [4] P. Clemente, V. Durán, E. Tajahuerce, V. Torres-Company, and J. Lancis, "Single-pixel digital ghost holography," *Phys. Rev. A* **86**, 041803 (2012).
- [5] P. Clemente, V. Durán, E. Tajahuerce, P. Andrés, V. Climent, and J. Lancis, "Compressive holography with a single-pixel detector," *Opt. Lett.* **38**, 2524 (2013).
- [6] L. Martínez-León, P. Clemente, Y. Mori, V. Climent, J. Lancis, and E. Tajahuerce, "Single-pixel digital holography with phase-encoded illumination," *Opt. Express* **25**, 4975 (2017).
- [7] Y. Endo, T. Tahara, and R. Okamoto, "Color single-pixel digital holography with a phase-encoded reference wave," *Appl. Opt.* **58**, G149 (2019).
- [8] T. Tahara, R. Otani, K. Omae, T. Gotohda, Y. Arai, and Y. Takaki, "Multiwavelength digital holography with wavelength-multiplexed holograms and arbitrary symmetric phase shifts," *Opt. Express* **25**, 11157 (2017).
- [9] T. Tahara, R. Mori, Y. Arai, and Y. Takaki, "Four-step phase-shifting digital holography simultaneously sensing dual-wavelength information using a monochromatic image sensor," *J. Opt. (IOP Publishing)* **17**, 125707 (2015).

機械学習を用いたシングルピクセルイメージング

水谷康弘, 片岡将磨, 上野原努, 高谷裕浩

大阪大学大学院工学研究科機械工学専攻

Yasuhiro Mizutani, Shoma Kataoka, Tsutomu Uenohara and Yasuhiro Takaya

Department of Mechanical Engineering, Osaka University

Abstract : This paper introduces the application of deep learning-based ghost imaging (GI) to precision measurements. GI is correlation-based imaging method and thus suitable for detecting weak light. However, its detection time is too long for practical inspection. To overcome this problem, we applied a convolutional neural network that was constructed based on a classification of the causes of ghost image degradation.

1. はじめに

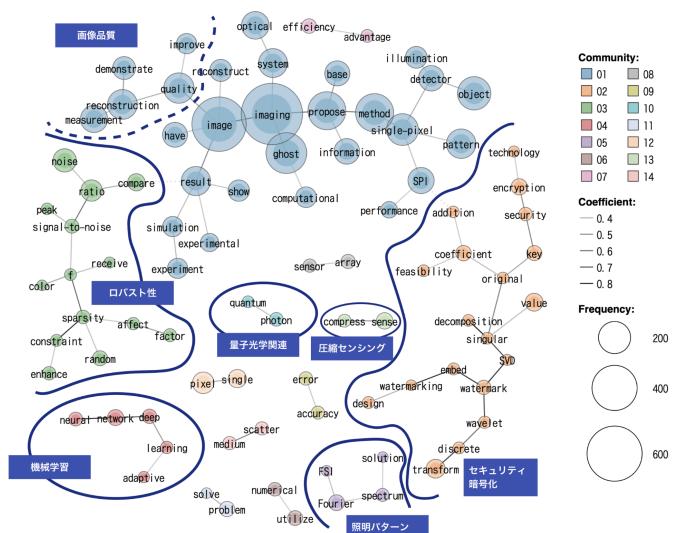


Fig. 1 2020年7月から2021年2月までに発表された論文のテキストマイニング結果

画像の品質を向上させる方法に関する報告も目立っている。また、機械学習と融合させた報告もあるが、これまでの内容と独立的に進められているとも言える。さらに興味深いのは、SPI の源流である量子光学^{1,2)}や圧縮センシング³⁾の分野と直接関連付けられた報告が少なく、SPI 自体が応用フェーズに移行しているとも言えるのである。このように、SPI は、様々な応用方法や原理が検討されているが、本報では、SPI の中でも GI に着目し、基本的な原理を再度振り返るとともに、位相物体イメージングも容易にできそうなことや、機械学習を取り入れるための考え方と実例を紹介する。

2. GI の原理と位相イメージングへの展開

図 1 に、SPI のひとつである GI の原理と特徴を示す。図 1(a)に示すとおり、GI では、ランダムもしくは規則的にコード化された複数の照明光を被撮影物体に照明し、その物体での応答光、例えば、反射、透過、蛍光や散乱などを单一画素の光検出器で照明パターンごとに記録する。記録された光強度と照明パターンの相関演算を行うことで、相関値分布として被撮影物体をイメージングする手法である。ここで重要なのは、相関演算では、光強度そのものの相関演算をするのではなく、揺らぎの 2 次相関を計算する点である。複数のパターンをアクティブな揺らぎとして考えると、ロックイン検出と同じような原理で耐ノイズ性に優れた高帯域な画像計測が可能となる。すなわち、図 1(b)に示すとおり、一般的な走査型イメージングと比べると、SN 比が 0.1 という劣悪環境下でも GI を用いるとサンプルのイメージングが可能であることが分かる。ただし、相関演算に用いる計算回数が画像品質を左右することから、撮影速度において課題を有する。

これまでに報告された GI では光強度に着目した報告が多く位相イメージングに関する例を見ない⁴⁾。そもそも、位相をイメージングするためには、最終的に検出する单一画素検出

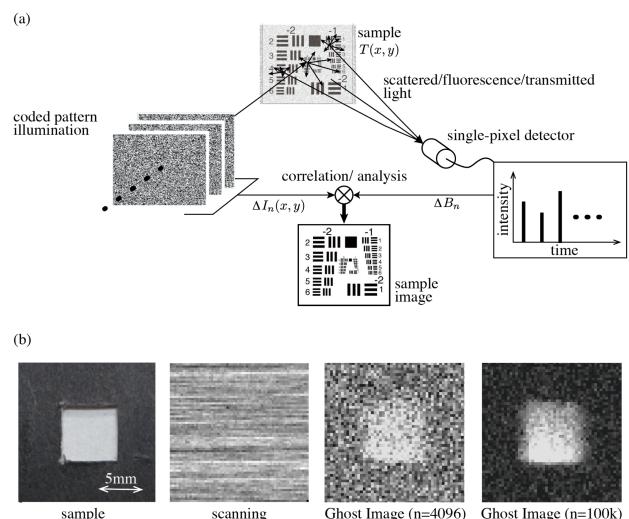


Fig. 2 ゴーストイメージングの原理と特徴。
(a) ゴーストイメージングの基本概念、(b) SN 比 0.1 環境下での撮影例。

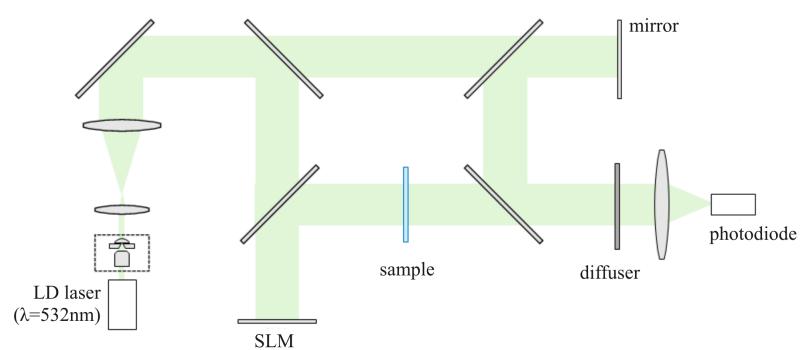


Fig. 3 空間位相変調器を用いた位相物体のためのゴーストイメージング光学系の例。

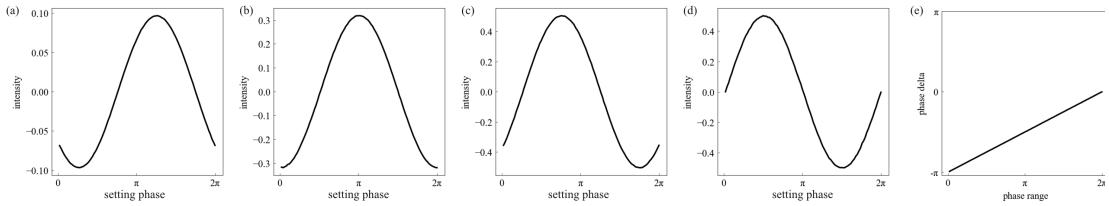


Fig. 4 数値計算による位相物体イメージングにおける位相変調量と相関値の関係. (a) 変調位相範囲 $[0, 1/2\pi]$, (b) 変調位相範囲 $[0, \pi]$, (c) 変調位相範囲 $[0, 3/2\pi]$, (d) 変調位相範囲 $[0, 2\pi]$, (e) 変調範囲と最大相関値が得られる位相の関係.

器上で検出光同士の干渉が生じるとイメージングが困難になる。したがって、検出器の前でコヒーレンスを低下させることができれば、SPI で従来の位相イメージングとほぼ同じことができるはずである。そこで、図 3 に示すとおり、マッハチェンダ型干渉計を例として原理を示す。空間的な位相分布を与えるために空間位相変調器(SLM: Spatial Light Modulator)を導入し、その SLM の光路中に位相サンプルを設置し、検出器直前で干渉光を拡散板で散乱させることで強度情報のみをフォトダイオードで検出する。図 4 に、3x3 画素の位相物体 GI によりイメージングした計算結果を示す。ここでは、相関演算を 1000 回行った。SLM で変調する位相の範囲に依存した相関値が得られることが分かる。すなわち、変調位相範囲を設定することで、従来の位相シフトのような解析法が適用できると考えられる。

3. 機械学習を取り入れた GI

前述のとおり、SPI は強度情報から位相情報まで様々な情報取得に利用することができる。一方で、複数回の照明が必要になることから計測速度に関して課題があった。そこで、近年注目されている機械学習を用いて高速化を実現することが試みられている⁵⁾。著者らのグループでは、SPI の

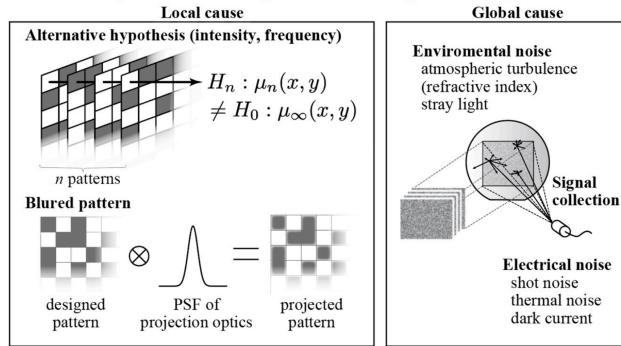


Fig. 5 低積算回数時におけるゴーストイメージのイメージ劣化要因.

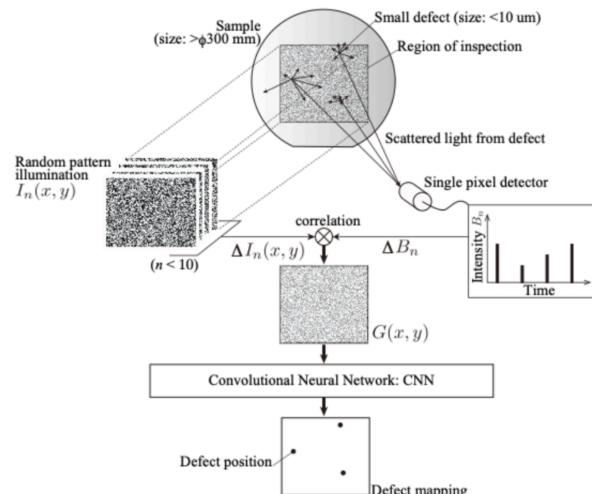


Fig. 6 疊み込みニューラルネットワークを用いたゴーストイメージング.

画像劣化要因を分析し、その要因を補うような機械学習スキームの構築に取り組んでいる⁶⁾。そもそも、少ない回数で SPI によるイメージングを行うと図 5 に示すような要因で画像が劣化する。大きく分けて、局所的名要因と全体的な要因と

に分けられる。局所的な要因では、無限の照明回数を前提とした各画素における照明間の不均一性に寄与する内容がある。また、照明パターンを投影するため、投影光学系の点像分布関数の広がりによりパターンのボケが発生してしまうことも局所的な要因である。一方で、迷光や検出時のショットノイズなど画像全体に影響するような要因も挙げられる。これらの、因子別の補正を行うためのネットワークの構築が必要になる。我々のグループでは、局所的な要因は畳み込み層で補正できること、また、全体的な要因は全結合層で補正できることを見いだした。

図 6 に、機械学習を取り入れた GI の測定原理を示す。少ない回数から導出した相関値分布は、図に示すとおりノイジーな画像となってしまう。そこで、この画像を学習させた畳み込みニューラルネットワーク(CNN: Convolutional Neural Network)を通すことで本来の画像が得られる。我々のグループでは、GI の特徴の一つである高ロバスト性に着目して視野に対して非常に小さな欠陥を検出する手法への適用を考えている。図 7 に、図 5 の画像劣化要因を分析した上で構築した並列 CNN を示す。入力画像は、相関計算により得られた GI 画像と照明パターンであり、ここでは照明回数を 4 回とした。一般的な CNN は、畳み込み層と全結合層が直列になっている例が多いが、GI では並列操作による情報の欠落を防ぐために並列化した。これは、図 8 に示すとおり、ネットワークのいずれの学習回数においても、並列型 CNN の方が推定精度が高いことが見いだされた。

4. おわりに

SPI の原理と位相計測への応用、さらには、機械学習との融合例を紹介した。SPI は、光学系の構築が簡単であるというようなシステム的な特徴や、画像再構成手法に起因するロバスト性に優れているなどの特徴から幅広い分野での応用が期待されている。また、一般的には強度の検出が主たる計測対象ではあるものの、位相イメージングへの応用

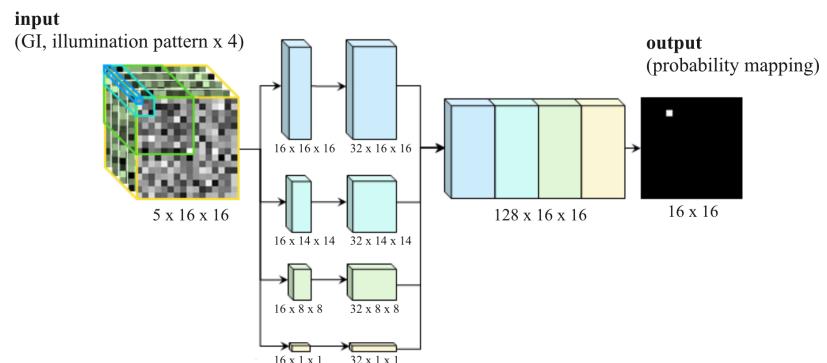


Fig. 7 並列型畳み込みニューラルネットワークの構成。

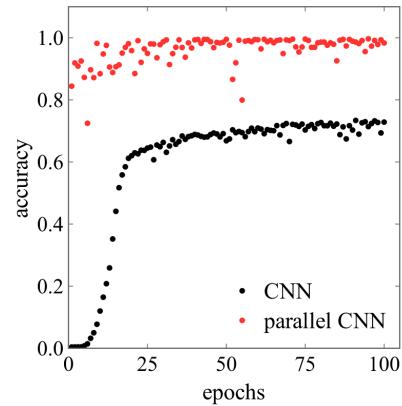


Fig. 8 並列型畳み込みニューラルネットワークの効果。

も容易である。さらには、機械学習と組み合わせることで、従来の SPI の課題であった計測精度の改善も見込めるところから、今後もさらなる発展が期待できる分野である。

[参考文献]

- 1) A.V. Belinski, D.N. Klyshko, Two-photon optics: diffraction, holography, and transformation of two-dimensional signals, JETP 78, 259 (1994).
- 2) D.V. Strekalov, A.V. Sergienko, D.N. Klyshko, Y.H. Shih, Observation of Two-Photon “Ghost” Interference and diffraction, Phys. Rev. Lett. 74, 3600 (1995).
- 3) R.G. Baraniuk, Compressive sensing, IEEE signal processing magazine, 24, 118 (2007).
- 4) T. Shirai, T. Setala, A.T. Friberg, Ghost imaging of phase objects with classical incoherent light, Phys. Rev. A 84, 041801 (2011).
- 5) C.F. Higham, R.Murray-Smith, M.J. Padgett, M. P. Edgar, Deep learning for real-time single-pixel video, Sci. Rep. 8, 2369 (2018).
- 6) Y. Mizutani, S. Kataoka, T. Uenohara, Y. Takaya, Ghost Imaging with Deep Learning for Position Mapping of Weakly Scattered Light Source, Nanomanufacturing and Metrology 4, 37 (2021).

深層学習を利用した 光相関計算機イメージングの耐ノイズ性向上

Noise suppression of optical correlator-based computational imaging using deep neural networks

本多康伸, 和田佑太, 渡邊恵理子

Yasunobu Honda, Yuta Wada and Eriko WATANABE

電気通信大学

〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1

The University of Electro-Communications

1-5-1, Chofugaoka, Chofu, Tokyo 182-8585, Japan

E-mail: phase@fourier.ghrdp.uec.ac.jp

あらまし: 本稿では、再構成プロセスに Deep Neural Network(DNN)を用いた複合的なノイズの抑制を可能とする光相関計算機イメージングについて説明する。従来の光相関イメージングでは再構成不可能なノイズレベルにおいても物体の再構成が可能であることを実験的に示す。

Abstract: This paper describes optical correlator-based computational imaging using deep neural networks (DNNs) in the reconstruction process, which enable complex noise suppression. We experimentally demonstrated that the images were reconstructed even at a high noise level.

1. はじめに

近年、コンピュータにより生成された符号化パターンと单一のディテクターにより取得した光強度を用いて画像の再構成を行う单一画素イメージングが注目されている[1-4]。このイメージング技術は、单一画素検出器を用いるため光学系の簡素化・低コスト化ができるほか、高感度であるため低いSN比でも再構成像を取得できる。また、X線やテラヘルツ帯などの2次元撮像素子では検出が困難な可視域外の波長域でのイメージング[5-7]や、3次元イメージングへの応用[8, 9]、リモートセンシングへの応用[10, 11]などが可能であるという利点がある。しかし、单一画素イメージングにおいて高解像度画像を取得するために

は大量の符号化パターンが必要となる。しかし、符号化パターンの表示速度は空間光変調器(SLM)の変調周波数に依存するため、高速イメージングへ課題が残る。また、空気揺らぎや散乱媒体などの外的要因が存在するノイズ環境下においては再構成像の精度が低下する。

我々は画像相関速度 2.4Mpattern/sec の性能をもつ光相関器の構築をしてきた[12]。データベースとして使用しているホログラムディスクには振幅と位相情報の記録が可能であるため、大量の複素振幅パターンとの相関演算ができる。現在、この光相関器を単一画素イメージングに適用した光相関イメージング[13]の高速化や位相情報を用いた 3 次元情報の取得に向けた研究開発を進めている。

本研究では、単一画素イメージングにおける高速性と耐ノイズ性の両立を目的に、再構成プロセスに Deep Neural Network(DNN)を用いた複合的なノイズの抑制を可能とする光相関計算機イメージングのコンセプトを紹介し、基礎的な実験結果例を示す。

2. 光相関計算機イメージング

2.1. 光相関イメージング

光相関器はコアキシャルホログラフィックメモリを応用したシステムであり、ホログラムディスク上に記録した大容量のデータとの高速照合が可能なシステムである。ここで、光相関器の画像相関速度 V は次式、

$$V = \frac{R}{60} \cdot \frac{2\pi r}{d} \quad (1)$$

と表される。ここで、 R はディスクの回転速度、 r はディスクへの記録半径、 d は記録間隔である。

図 1 に光相関イメージングの概要図を示す。光相関イメージングでは、大量の符号化パターンをホログラムディスクへ記録しておく。再生時には、符号化パターン $I_i(x, y)$ が記録されたホログラムに対し、物体光 $O_{obj}(x, y)$ を入力することで光強度 S_i を光電子増倍管により取得する。ここで、光強度 S_i は次式、

$$S_i = \sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^N O_{obj}(x, y) I_i(x, y) \quad (2)$$

で表される。再構成像 O_{recon} は次式、

$$O_{recon} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (S_i - \langle S_i \rangle) I_i(x, y) \quad (3)$$

で求めることができる。ここで、 $\langle \dots \rangle$ はアンサンブル平均を示す。

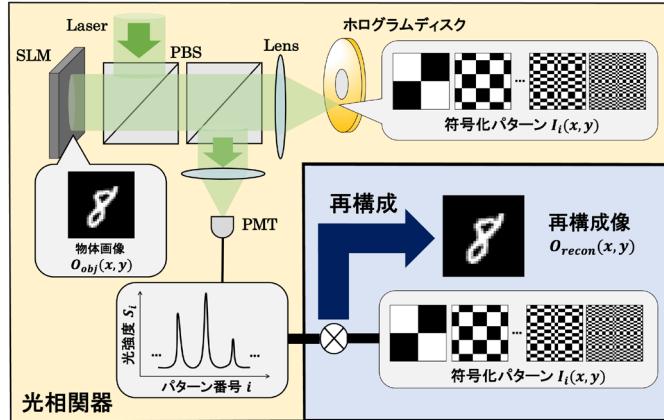


図 1. 光相関イメージング概要図

2.2. DNN を適用した光相関計算機イメージング

光相関イメージングの高精度化に向けて、再構成プロセスに DNN を適用した光相関計算機イメージングを概説する。図 2 に光相関計算機イメージング用ネットワークを示す [14,15]。このネットワークは 5 層の転置畳み込み層で構成された再構成ネットワークと 3 層の畳み込み層で構成された超解像ネットワークにより構成されている。 N 個の光強度を入力とし、5 層の転置畳み込み層によって、 32×32 pixel の再構成像を出力する。その後、3 層の畳み込み層により、画像の画質を向上させることで、最終的な再構成像を取得する。

本手法を適用することで、従来手法では再構成像が取得できないノイズレベルにおいても鮮明な再構成像が取得できることが期待できる。

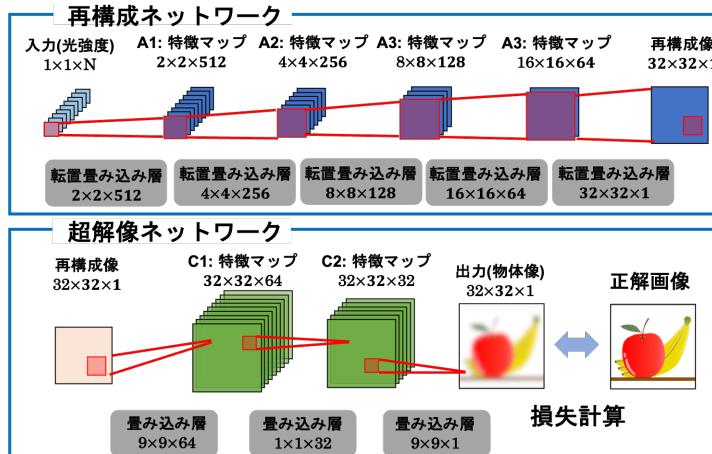


図 2. 光相関計算機イメージング概要図

3. 光相関計算機イメージングのシミュレーションによるノイズ抑制評価

構築したネットワークの性能を評価するため、ノイズが付加された状態でのシミュレーションを行う。評価方法として、物体像と符号化パターンに対し、①空間ノイズと②空間・時間変動ノイズを加え、従来手法での再構成像と提案手法での再構成像の精度比較を行った。ここで付与したノイズは平均 0 のガウスノイズである。本評価では、符号化パターンとして 32×32 [pixel]アダマールパターンを 1024 枚使用した。また、学習用データには MNIST 画像 1638 枚を使用した。ネットワークの学習時には、学習用データが相關プロセスにおいてノイズが付与された場合のシミュレーション光強度を入力とし、学習用データと同じ値が出力されるように学習させた。また、検証用データには学習に使用していない MNIST 画像 410 枚を使用した。また、評価指標としては RMSE と SSIM を使用した。空間ノイズを加えた時、従来手法では再構成が困難なノイズレベルにおいて、提案手法により物体の再構成が可能であることを確認した。また、空間・時間変動ノイズを加えた時も同様に、提案手法により物体の再構成が可能であることを確認した。

4. 高速光相関計算機イメージングの実験評価

次に、実験にて提案手法の有用性を確認する。データセットとして MNIST 画像 2048 枚を使用し、符号化パターンとして 32×32 [pixel]アダマールパターンを 1024 枚使用した。また、本実験では、ノイズ環境を再現するため、ホログラムディスクへの記録・相關プロセスにおいてトラッキングサーボを外し、ディスクの回転ぶれによるノイズを付加した。再構成プロセスでは、実験にて取得した 2048 個の光強度を学習データと検証データの比率を 8:2 に振り分けた。SPI と提案手法を比較した時、SPI では再構成不可能なノイズレベルにおいても、提案手法により再構成像を取得できていることが確認できた。この実験における画像相関速度 40478 [pattern/sec]、イメージングフレームレートが 39.5fps である。

5. まとめ

本研究では、单一画素イメージングにおける高速性と耐ノイズ性の両立を目的に、再構成プロセスに Deep Neural Network(DNN)を用いた複合的なノイズの抑制を可能とする光相関計算機イメージングのコンセプトと基礎的な実験結果を示した。従来手法では再構成不可能なノイズレベルにおいても物体の再構成が可能であることを確認した。

謝辞 本研究は科研費基盤研究(C) 18K04971、学術変革領域研究 A20H05888 の助成を受

けたものです。

文 献

- [1] M. F. Duarte, et al., IEEE Signal Proc. Mag. **25**, 83 (2008).
- [2] L. Wang, et al., Res. **4**, 240–244 (2016).
- [3] L. Bian, et al., J. Opt. Soc. Am. A **35**, 78-87 (2018).
- [4] M. P. Edgar, et al., Nat. Photonics **13**, 13-20 (2019).
- [5] W. L. Chan, et al., Appl. Phys. Lett. **93**, 121105 (2008).
- [6] N. Radwell, et al., Optica **1**, 285-294 (2014).
- [7] D. Pelliccia, et al., Phys. Rev. Lett. **117**, 113902 (2016).
- [8] B. Sun, et al., Science **340**, 6134 (2013).
- [9] R. Usami, et al., Opt. Lett. **45**, 25-28 (2020).
- [10] C. Zhao, et al., Appl. Phys. Lett. **101**, 141123 (2012).
- [11] W. Gong, et al., Sci. Rep. **6**, 26133 (2016).
- [12] K. Ikeda, et al., Jpn. J. Appl. Phys. **55**, 09SC03 (2016).
- [13] A. Inoue, et al., Jpn. J. Appl. Phys. **58**, SKKA02 (2019).
- [14] C. Dong, et al., IEEE **32**, 295 (2016).
- [15] A. Radford, et al., arXiv, 1511.06434 (2016).

モーションレスオプティカルスキャニングホログラフィ

Motionless Optical Scanning Holography

米田 成¹, 最田 裕介², 野村 孝徳²

Naru Yoneda¹, Yusuke Saita², Takanori Nomura²

和歌山大学大学院システム工学研究科¹, 和歌山大学システム工学部²

Graduate School of Systems Engineering, Wakayama University¹

Faculty of Systems Engineering, Wakayama University²

Motionless optical scanning holography (MOSH) is one of single-pixel imaging techniques. MOSH can obtain an incoherent hologram, which enables us to achieve three-dimensional fluorescent imaging. In this paper, the principle of MOSH and experimental results are shown. In addition, the principle of the spatially divided phase-shifting method which reduces the number of measurements for MOSH is also presented.

1. はじめに

シングルピクセルイメージング (SPI: Single-Pixel Imaging) はフォトダイオードのような単一画素検出器を用いてイメージングをおこなう方法である¹⁾. 単一画素検出器は CCD のような二次元センサと比較して量子効率が高く、また観察対象からの光波をレンズや凹面鏡を用いて集光して検出するため、微弱光下におけるイメージングが可能である^{2,3)}. また、単一画素検出器は可視光以外の波長帯において、二次元センサと比較して安価なものが入手可能であり、感度帯域が広いことから、さまざまな波長帯における応用が提案されている⁴⁻⁶⁾. SPI は観察対象に構造化パターンを照射し、対象からの反射あるいは透過光強度を単一画素検出器により測定する. この測定を、構造化パターンを変化させ複数回おこない、取得した強度値を対応する構造化パターンの重みとして再構成処理をおこなう. この再構成処理は用いる構造化パターンによって決まり、アダマール基底⁷⁾やフーリエ基底⁸⁾に基づいた方法や、ランダムな分布の強度揺らぎを用いるゴーストイメージング⁹⁾などが提案されている. またフレネルゾーンプレート (FZP: Fresnel Zone Plate) を構造化パターンとして用いるものとしてオプティカルスキャニングホログラフィ (OSH: Optical Scanning Holography) が提案されている^{10,11)}. FZP は光波の伝搬方向の関数であらわされる構造化パターンであり、これを用いる OSH は他の SPI とは異なり、再構成処理によりホログラムが取得される. OSH により取得されるホログラムは計測対象と FZP の畳み込み積分であらわされる分布を光波の伝搬方向に積分した分布であり、自己干渉インコヒーレントホログラフィにより取得される分布と同じである¹²⁻¹⁴⁾. このことから、蛍光の三次元分布を取得することができる¹⁵⁻¹⁷⁾.

OSH の計測過程では FZP を観察対象に照射するため、FZP を生成するための干渉計が必要

である。また、取得したホログラムから不要な成分を含まない物体像のみを取得するために位相シフトをする必要があり、このための位相シフタが必要である。また、中心座標の異なる FZP を物体面に照射するための機械的な面内走査機構が必要である。これらの理由から、OSH は光学系が複雑かつ大型であるという問題があった。この問題を解決するために、液晶型の空間光変調器 (SLM: Spatial Light Modulator) 一台を用いて OSH を実現するモーションレス OSH (MOSH) を提案してきた^{18, 19)}。本稿では MOSH の原理およびその応用について概説する。

2. モーションレスオプティカルスキーニングホログラフィの原理

MOSH の概念図を Fig. 1 に示す。MOSH では、単一の液晶型 SLM を用いて FZP を生成する。まず、水平方向に対して傾いた方向に偏光した平面波を SLM に照射する。液晶型 SLM は変調できる偏光方向が一軸のみであるため、SLM により水平偏光成分が変調される場合、垂直偏光成分は変調されずに SLM を透過する。SLM に球面位相分布を表示した場合、SLM により変調される光波は球面波となり、変調されない成分は平面波のまま透過する。これらの光波は互いに直交する偏光方向成分を有するため、偏光板によりこれらの光波の偏光方向が統一される。

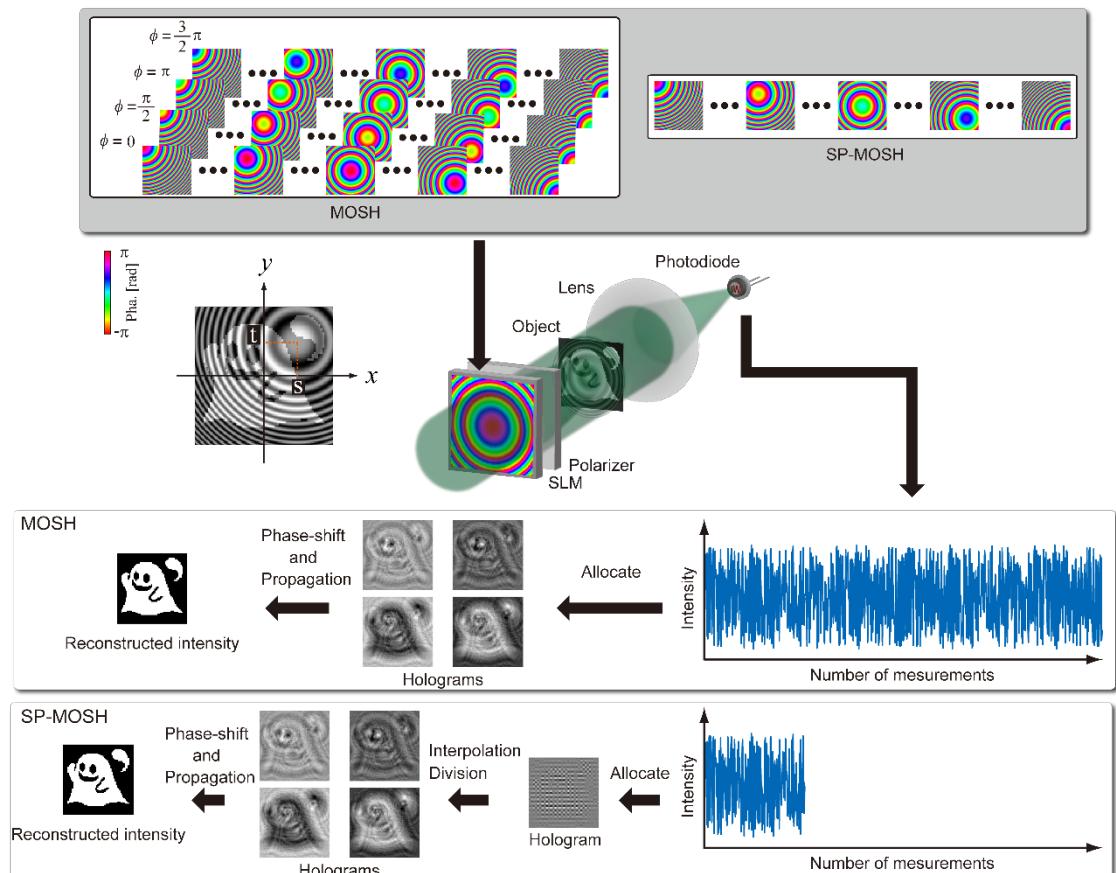


Fig. 1. Schematic of MOSH. SP-MOSH, spatially divided phase-shifting MOSH.

偏光方向が統一されたことにより物体面において平面波と球面波の干渉縞である FZP が照射される。単一画素検出器により検出される物体を透過した光波は

$$I = \int_h \int_w |O(x, y)|^2 \text{FZP}_\varphi(x - s, y - t) dx dy \quad (1)$$

とあらわされる。ここで、 h, w は物体面における高さおよび幅をあらわす。また、 s, t は球面位相の勾配が 0 となる x, y 方向に対応した FZP の中心座標をあらわし、 φ は FZP の初期位相をあらわす。この強度の測定を SLM に表示する球面位相分布の中心座標を変え順次おこなう。この過程により取得された強度値群を球面位相分布の中心座標に対応する座標にコンピュータ内で配列すると

$$\begin{aligned} I(x', y') &= \int_h \int_w |O(x', y')|^2 \text{FZP}_\varphi(x' - x, y' - y) dx dy \\ &= |O(x', y')|^2 * \text{FZP}_\varphi(x', y') \end{aligned} \quad (2)$$

としてあらわされる強度分布が得られる。ここで、* は畳み込み積分演算子をあらわす。(2)式は物体の強度分布と FZP との畳み込み積分であり、自己干渉インコヒーレントホログラフィにより取得されるホログラムと同じである。このホログラムを取得する過程を FZP の初期位相を変え、順次おこなう。この初期位相の変更は SLM に表示する球面波の初期位相を変更することで実現できる。4ステップ位相シフト法²⁰⁾を導入する場合、取得される複素振幅分布は

$$c(x', y') = |O(x', y')|^2 * \exp\left\{\frac{ik}{2z}(x'^2 + y'^2)\right\} \quad (3)$$

としてあらわされる。ここで、(3)式における球面波は説明を簡単にするために近軸近似下における分布であり、係数は無視している。この複素振幅分布に対して逆伝搬計算をおこなうと物体面における強度分布が取得される。

MOSH は、ホログラムから不要光を除去するために 4ステップ位相シフト法を用いるが、この場合ホログラムの画素数と位相シフトのステップ数の積の回数の測定が必要である。この問題を解決するために、SLM に表示する球面波の中心座標と初期位相を同時に変化させ、一般的なディジタルホログラフィにおいて提案されている並列位相シフト法を導入する手法を提案してきた¹⁹⁾。この方法では、ホログラムの画素数分の測定回数で実現できる。

3. モーションレスオプティカルスキヤニングホログラフィの原理検証実験

Fig. 2 に実験に用いた光学系を示す。光源には中心波長が 532.1 nm のファイバレーザを用いた。光源からの光波をスペイシャルフィルタとレンズ 1 を用いて平面波とし、SLM（浜松ホトニクス社、LCoS-SLM X13138-01）に照射した。この SLM の画素ピッチは 12.5 μm であり、中心の 128×128 画素を用いた。SLM に表示する球面波の焦点距離は 60 mm とした。SLM からの光波はレンズ 2 およびレンズ 3 により構成される 4-f 光学系により物体面に投影された。4-f 光

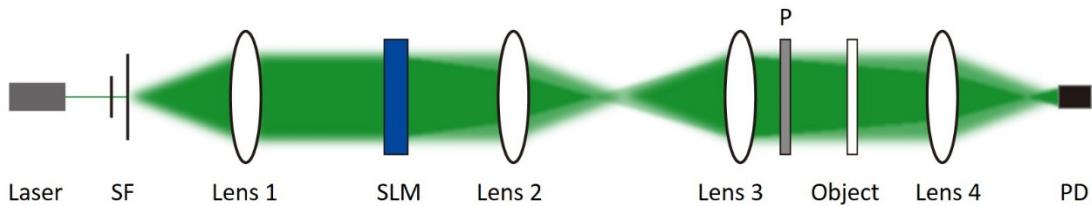


Fig. 2. Optical setup for a proof-of-principle experiment. SF, spatial filter; P, polarizer; PD, photodiode.

学系の倍率は 2 倍とした。また、計測対象には USAF テストチャートのグループ 0 ナンバー 3 を用いた。物体からの透過光はフォトダイオード(浜松ホトニクス社, C10439-01)により取得した。

通常の MOSH により取得した再生像を Fig. 3(a)に示す。実験結果より、物体の三次元分布の取得が可能であることが示された。また、並列位相シフト法を応用した手法により取得した結果を Fig. 3(b)に示す。Fig. 3(a), (b)を比較すると、並列位相シフト法を導入した場合においても物体像の取得が可能であることが示された。

4. まとめ

本稿では、オンラインの光学系でホログラムの取得が可能な MOSH の原理について述べた。また、通常の MOSH により取得された結果と並列位相シフト法を応用した MOSH の結果を示し、どちらの手法においても不要光が除去された物体の三次元像の取得が可能であることを示した。

MOSH は蛍光物体の三次元計測が可能である¹⁸⁾。また、散乱体奥の物体を可視化する方法²¹⁾や、三次元ストークスパラメータの取得も可能である²²⁾。また、圧縮センシングを応用し、計

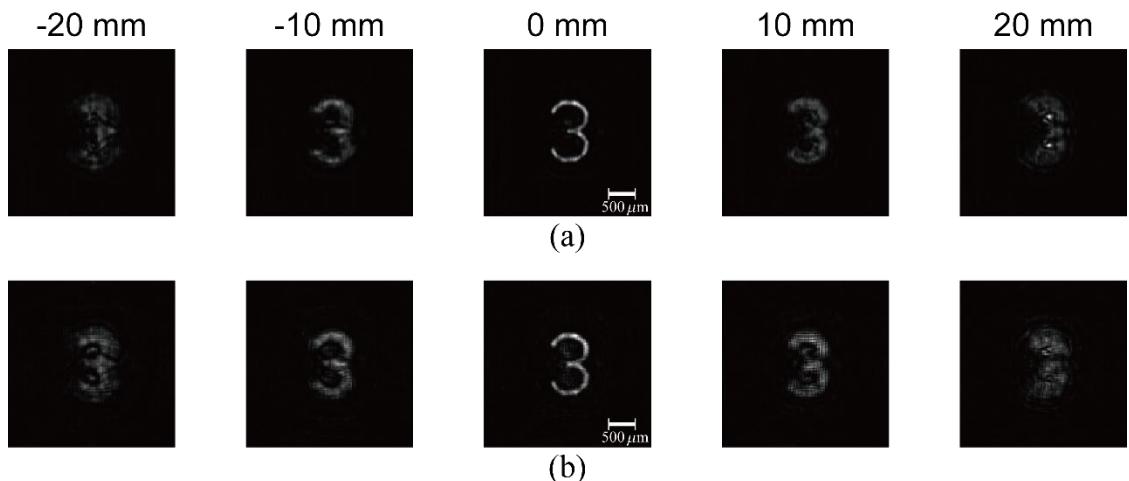


Fig. 3. Experimental results from (a) MOSH and (b) spatially divided phase-shifting MOSH.

測回数を低減することも可能である²³⁾。これらのことから、MOSHによる低侵襲なイメージング技術の確立が期待される。

参考文献

- 1) G. M. Gibson, S. D. Johnson, and M. J. Padgett, "Single-pixel imaging 12 years on: a review," *Opt. Express* 28, 28190–28208 (2020).
- 2) P. A. Morris, R. S. Aspden, J. E. C. Bell, R. W. Boyd, and M. J. Padgett, "Imaging with a small number of photons," *Nat. Commun.* 6, 5913 (2015).
- 3) X. Liu, J. Shi, L. Sun, Y. Li, J. Fan, and G. Zeng, "Photon-limited single-pixel imaging," *Opt. Express* 28 8132–8144 (2020).
- 4) N. Radwell, K. J. Mitchell, G. M. Gibson, M. P. Edgar, R. Bowman, and M. J. Padgett, "Single-pixel infrared and visible microscope," *Optica* 1, 285–289 (2014).
- 5) Y. Klein, A. Schori, I. P. Dolbnya, K. Sawhney, and S. Shwartz, "X-ray computational ghost imaging with single-pixel detector," *Opt. Express* 27, 3284–3293 (2019).
- 6) L. Olivieri, J. S. T. Gongora, L. Peters, V. Cecconi, A. Cutrona, J. Tunesi, R. Tucker, A. Pasquazi, and M. Peccianti, "Hyperspectral terahertz microscopy via nonlinear ghost imaging," *Optica* 7, 186–191 (2020).
- 7) M. F. Duarte, M. A. Davenport, D. Takhar, J. N. Laska, T. Sun, K. F. Kelly, and R. G. Baraniuk, "Single-pixel imaging via compressive sampling," *IEEE Signal Process. Mag.* 25, 83–91 (2008).
- 8) Z. Zhang, X. Ma, and J. Zhong, "Single-pixel imaging by means of Fourier spectrum acquisition," *Nat. Commun.* 6, 7225 (2015).
- 9) J. H. Shapiro, "Computational ghost imaging," *Phys. Rev. A* 78, 061802 (2008).
- 10) T. C. Poon and A. Korpel, "Optical transfer function of an acousto-optic heterodyning image processor," *Opt. Lett.* 4, 317 (1979).
- 11) T. C. Poon, *Optical scanning holography with MATLAB®* (Springer, 2007).
- 12) J. Rosen and G. Brooker, "Digital spatially incoherent Fresnel holography," *Opt. Lett.* 32, 912–914 (2007).
- 13) T. Nobukawa, Y. Katano, T. Muroi, N. Kinoshita, and N. Ishii, "Sampling requirements and adaptive spatial averaging for incoherent digital holography," *Opt. Express* 27, 33634–33651 (2019).
- 14) S. Sakamaki, N. Yoneda, and T. Nomura, "Single-shot in-line Fresnel incoherent holography using a dual-focus checkerboard lens," *Appl. Opt.* 59, 6612–6618 (2020).
- 15) . B. W. Schilling, T.-C. Poon, G. Indebetouw, B. Storrie, K. Shinoda, Y. Suzuki, and M. H. Wu, "Three-dimensional holographic fluorescence microscopy," *Opt. Lett.* 22, 1506 (1997).
- 16) G. Indebetouw and W. Zhong, "Scanning holographic microscopy of three-dimensional fluorescent

- specimens,” J. Opt. Soc. Am. A 23, 1699–1707 (2006).
- 17) J. Rosen, G. Indebetouw, and G. Brooker, “Homodyne scanning holography,” Opt. Express 14, 4280–4285 (2006).
- 18) N. Yoneda, Y. Saita, and T. Nomura, “Motionless optical scanning holography,” Opt. Lett. 45, 3184–3187 (2020).
- 19) N. Yoneda, Y. Saita, and T. Nomura, “Spatially divided phase-shifting motionless optical scanning holography,” OSA Continuum 3, 3523–3535 (2020).
- 20) I. Yamaguchi and T. Zhang, “Phase-shifting digital holography,” Opt. Lett. 22, 1268–1270 (1997).
- 21) N. Yoneda, Y. Saita, and T. Nomura, “Imaging through scattering media by motionless optical scanning holography” OSJ-OSA-OSK Joint Symposia on Optics Program, 15aAJ5 (2020).
- 22) 米田成, 最田裕介, 野村孝徳, "シングルピクセルホログラフィによる三次元ストークス パラメータの取得," 第 68 回応用物理学会春季学術講演会, 19p-Z28-1, (2021).
- 23) 杉本将光, 米田成, 最田裕介, 野村孝徳, "位相シフト法が不要な圧縮モーションレスオプティカルスキャニングホログラフィ," 第 19 回関西学生研究論文講演会, 39-40, (2021).

流れ場中の蛍光ナノ粒子群を3次元測定する 103fps インコヒーレントデジタル動画ホログラフィと複数波長同時記録

田原 樹^{†,‡}, 小澤 祐市^{*,‡}, 荒神 尚子^{**}, 松田 厚志^{**}, 岡本 亮^{***,‡}, 石井 あゆみ^{****,‡},

伊藤智義^{*****}, 涌波 光喜[†], 市橋 保之[†], 大井 隆太朗[†]

[†] 国立研究開発法人情報通信研究機構 電磁波研究所 〒184-8795 東京都小金井市貫井北町4-2-1

[‡] 国立研究開発法人科学技術振興機構 さきがけ 〒332-0012 埼玉県川口市本町4-1-8

^{*} 東北大大学 多元物質科学研究所 〒980-8577 仙台市青葉区片平二丁目1番1号

^{**} 国立研究開発法人情報通信研究機構 未来ICT研究所 〒651-2401 兵庫県神戸市西区岩岡町588-2

^{***} 京都大学 大学院工学研究科 〒615-8530 京都府京都市西京区京都大学桂

^{****} 桐蔭横浜大学 大学院工学研究科 〒225-8503 神奈川県横浜市青葉区鉄町1614

^{*****} 千葉大学大学院工学研究院 〒263-8522 千葉県千葉市稻毛区弥生町1-33

E-mail: tahara@nict.go.jp

あらまし インコヒーレントホログラフィを用いて、103 fps の記録速度で、流れ場の中にある直径 0.2 μm の蛍光粒子群を同時に3次元動画像として記録した。画素数 1,024 × 1,024、視野 148 μm × 148 μm の単一露光ホログラフィック蛍光顕微鏡システムを試作し、9.7 ミリ秒の時間分解能で粒子群のホログラムの動画を得た。構築したシステムで、複数波長の蛍光を、一回の露光で同時にイメージングできることも示した。

キーワード デジタルホログラフィ、インコヒーレントホログラフィ、多重センシング、ホログラフィックPIV

103 fps incoherent digital motion-picture holography for 3D sensing of fluorescent nanoparticles in a flow and simultaneous recording of wavelengths

Tatsuki TAHARA^{†,‡} Yuichi KOZAWA^{*,‡} Takako KOUJIN^{**} Atsushi MATSUDA^{**} Ryo OKAMOTO^{***,‡}
Ayumi ISHII^{****,‡} Tomoyoshi ITO^{*****} Koki WAKUNAMI[†] Yasuyuki ICHIHASHI[†] and Ryutaro OI[†]

[†] Applied Electromagnetic Research Institute, National Institute of Information and Communications Technology (NICT), 4-2-1 Nukuikitamachi, Koganei, Tokyo, 184-8795, Japan

[‡] PRESTO, Japan Science and Technology Agency, 4-1-8 Honcho, Kawaguchi, Saitama, 332-0012, Japan

^{*} Institute of Multidisciplinary Research for Advanced Materials, Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai 980-8577, Japan

^{**} Advanced ICT Research Institute Kobe, National Institute of Information and Communications Technology, 588-2 Iwaoka, Iwaoka-cho, Nishi-ku, Kobe 651-2492, Japan

^{***} Department of Electronic Science and Engineering, Kyoto University, Kyoto Daigaku-Katsura, Nishikyo-ku, Kyoto 615-8510, Japan

^{****} Graduate School of Engineering, Toin University of Yokohama, 1614 Kurogane-cho, Aoba, Yokohama, Kanagawa 225-8503, Japan

^{*****} Graduate School of Engineering, Chiba University 1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba, 263-8522 Japan

E-mail: tahara@nict.go.jp

Abstract We have succeeded in 3D motion-picture recording of multiple fluorescent nanoparticles simultaneously in a flow at a frame rate of 103 fps, using incoherent holography. A single-shot holographic fluorescence microscopy system with 1,024 × 1,024 pixels and a field of view of 148 μm × 148 μm was constructed. A motion picture of digital holograms for fluorescent nanoparticles whose diameter was 0.2 μm was obtained with the temporal resolution of 9.7 msec. A two-color-multiplexed incoherent digital hologram of fluorescence light was obtained, and single-shot two-color holographic fluorescence imaging was demonstrated with an exposure time of 4 msec.

Keywords Digital holography, incoherent holography, multiplexed imaging, phase-shifting interferometry, holographic PIV

1. はじめに

ホログラフィ[1-3]はレンズなく単板の記録材料で3次元画像を記録・可視化できる技術である。物体の3次元空間情報を、干渉光の強度に変換することで、2次元の記録材料で3次元情報を取得している。干渉光を生成できれば、自然な光であってもホログラムを得ることができる。そして、シャボン玉を介して太陽光が干渉模様を形成する様に、あらゆる光は自らの光に対して干渉する。そのため、例えランプを光源とした自己干渉計を構築し、物体光の自己干渉による縞画像を生成することで、ランプ光で照らされた物体のホログラムを得ることが示されている[4]。そして、電子機器の性能、信号処理技術の向上に伴い、空間的・時間的にインコヒーレントな、自然な光であってもデジタルホログラムとして記録でき、3次元イメージングできることが示されている[4,5]。

この、インコヒーレントホログラフィと呼ばれる技術に対し、著者らはこれまでに、レーザー光ホログラフィで生み出されてきた技術を導入することで、時間や波長の情報取得を目指してきた。そして、次に述べる(1)-(3)のアプローチを提案してきた。我々は、(1)単一露光位相シフトホログラフィ[6-8]と偏光子アレイ素子付カメラを用いた、自然な光の单一露光3次元イメージング[9,10]、(2)波長情報を選択抽出する位相シフト法[11-13]と液晶など複屈折性の位相変調素子を用いた、自然な光のカラー3次元イメージング[14,15]、(3)(1)、(2)の方法を融合し、单一露光位相シフト法のために波長板アレイ素子を用いた、自然な光の单一露光カラー3次元イメージング[16,17]を示してきた。本稿では、(3)に基づく光学システム[17,18]を用いて、103fpsの記録速度で流れ場中の蛍光ナノ粒子群を3次元動画像記録した結果を報告する。また、同じシステムに波長選択抽出位相シフト法を適用し、1回の露光で2色の蛍光を同時にホログラフィックセンシングした結果を紹介する。

2. 構築したインコヒーレントデジタル動画ホログラフィシステム[17,18]

図1に、構築した光学システムの概略を示す。本システムでは、单一光路のラジアルアーリング型の自己干渉計と、单一露光位相シフトホログラフィに基づく光学系からなる。まず、被写体に対して光学系を通して、被写体の中間像を得る。光学系が顕微鏡なら拡大像、縮小光学系なら縮小像を中間像に得る。中間像が、偏光子と複屈折レンズ系を通ると、偏光方向が直交し波面の曲率半径が異なる2種の物体光を得る。光路長差を調整するために複屈折位相板を挿入する。次に、2光波は、单一露光位相シフトホログラフィに基づく光

学系の入り口に到達する。单一露光位相シフトホログラフィでは、2000年代前半に数多くの形態が報告された[6-8]。偏光を利用してると、干渉光を形成する2光波を同一光路に通せるため、本システムでは波長板のアレイ素子と転送光学系を採用した。また、転送系中の偏光子は、2光波の偏光方向を揃え干渉光を生成するために挿入される。波長板アレイの各領域で、2光波間に異なる位相差が与えられる。そして、転送光学系と偏光子を通して、複数種類の位相シフトホログラムが1台の撮像素子の1回の露光で得られる。その後、参考文献[6-9]の手続きを用いて、計算機内で得られたホログラムから物体の3次元像を得る。計算機内の手続きとしては、複数種類の位相シフトホログラムと、位相シフト干渉法の信号処理を用いることで、干渉光の振幅と位相の情報を取得する。そして、振幅と位相の情報を用いて回折積分などの伝播計算を行うことで、任意の深さ位置における物体光の強度分布を再生する。任意の深さにおける物体の合焦像を得るために、物体の3次元情報の再生が可能である。

波長板のアレイ素子が、波長ごとに異なる位相差の分布を生成するとき、撮像素子面上では、波長ごとに異なる位相シフト量を持った、複数種類の位相シフトホログラムが形成される。そのホログラムに対して、波長選択抽出位相シフト法[11-13]を適用することで、各波長の物体光を分離抽出することもできる[16,18]。

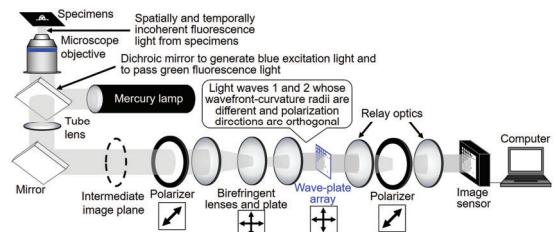


図1. 構築した光学系の概略。

3. 実験

直径 $0.2\text{ }\mu\text{m}$ の蛍光ナノ粒子群を水中に滴下し、スライドガラスとカバーガラスで挟んだものを試料とし、図1の光学システムを用いて実験した。試料の拡大像を中間像として得るために、オリンパス社の倒立型蛍光顕微鏡 IX-73 を用いた。また、倍率 60, NA1.42 の油浸対物レンズを用いた。オリンパス社の励起光源と波長フィルタユニット U-FBW を用いて、青色光で粒子群を励起し、緑色蛍光のみを得た。偏光子、複屈折レンズ、複屈折位相板、転送光学系には、シグマ光機社製のものを用いた。波長板アレイには、領域数 2,100 × 2,100、領域サイズが $6.5\text{ }\mu\text{m}$ 正方の、フォトニックラ

ティス社製のフォトニック結晶アレイを用いた。撮像素子には Andor 社製 Neo5.5 を用いた。系全体の倍率は 45 とし、画素数 $1,024 \times 1,024$ 、視野 $148 \mu\text{m} \times 148 \mu\text{m}$ のホログラムを、103 fps の記録速度で動画像記録した。動きのある物体のホログラム動画を得るために、スライドガラスとカバーガラス間に生ずる水の流れ場にある、粒子からくる蛍光をホログラムとして記録した。

図 2 に実験結果を示す。1枚の蛍光ホログラムから、異なる深さにおける合焦像が得られることが示されている。また、異なる時刻におけるホログラムから同様に像が再生され、時間変化と共に蛍光粒子が面内方向だけでなく深さ方向にも変位している様子が示されている。流れ場がわずかに深さ方向にも形成されたことから、時間と共に粒子の数値的合焦位置が変化している。以上より、流れ場中にある蛍光ナノ粒子群の、同時 3 次元動画イメージングが可能であることが示された。

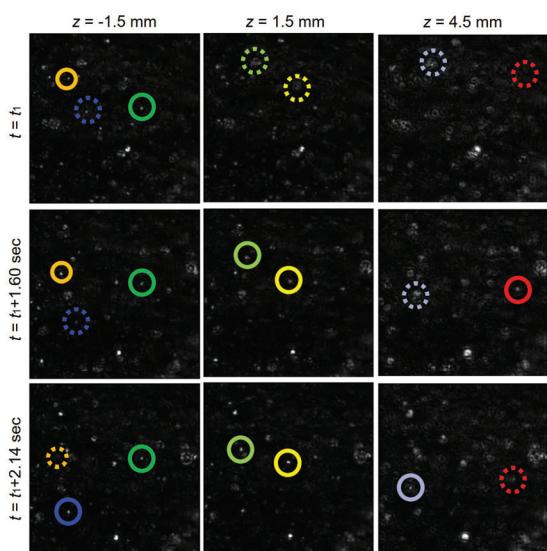


図 2. 流れ場中の蛍光粒子の測定実験結果。画像上部から下部にかけて流れ場が発生。実線円内に合焦した粒子が存在。破線円内には焦点外れの粒子。同じ線の色が、異なる時刻における同じ粒子の位置を示す。 z : 回折積分の数値伝播距離, t : 時刻。

次に、複数波長の同時記録を行なえるかどうかを実験的に調べた。図 1 の光学システムに、Andor 社製 Zyla 4.2plus のイメージセンサを導入し、参考文献[15]と同じ条件で染色されたヒト培養細胞を試料として配置した。視野は $502 \mu\text{m} \times 502 \mu\text{m}$ 、露光時間は 4 msec と変更した。そして、青色蛍光と橙色蛍光が多重化された

波長多重ホログラムを取得した。記録されたホログラムに対し、波長選択抽出位相シフト法を用いて波長分離し、各色の蛍光における像を再生した。実験結果を図 3 に示す。図より、青色染色された細胞核の部分と、橙色染色された細胞骨格の識別ができるおり、波長分離および単一露光での 2 波長多重細胞イメージングが可能であることが示された。

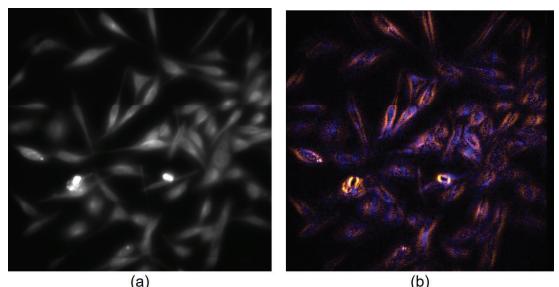


図 3. ヒト培養細胞の単一露光 2 波長イメージング実験の結果。(a)記録されたホログラム、(b)再生像。モノクロイメージセンサで蛍光の波長多重ホログラムを記録し、像再生。染色の条件は参考文献[15]に同じ。

4. まとめ

インコヒーレントデジタルホログラフィ、単一露光位相シフトホログラフィ、位相シフト干渉法を組み合わせることにより、流れ場中の蛍光ナノ粒子群を同時に、103fps の記録速度で 3 次元動画測定することに成功した。また、インコヒーレントデジタルホログラフィ、単一露光位相シフトホログラフィ、波長選択抽出位相シフト干渉法を組み合わせることにより、複数波長の蛍光の 3 次元情報を 1 回の露光で同時に記録することに成功した。今回 103 fps の記録速度としたのは記録面積を大きくとることを重視したためである。記録速度を向上させるためには、記録面積を犠牲にするだけでなく、光量の問題を解決する必要がある。そして、レーザー光ホログラフィとは異なり、系に入射する光量には限りがある。そのため、1 露光あたり光子数の限られた条件でのホログラフィを考えねばならない。一方で、ホログラフィにおいて位相シフト干渉法は、振幅、位相の情報取得において、光子数が限られた条件で物理限界に近い測定精度を原理的に得られることが明らかにされている[19,20]。また、少なくとも技術的には 3 次元的にサブミクロンの分解能を持つことが示されているため[21]、今後は、波長選択抽出位相シフト干渉法を含め、位相シフト干渉法で、光子数の限られた条件で如何に高速・精密動画計測を行なうかが一つの研究方針となるであろう。加えて、今回構

築した光学システムでは、単一光路で、位相変調量の波長依存性を利用して分光する方法[22,11-13]を、1回の露光で実施できるため、モノクロイメージセンサのフレームレートで動画イメージング可能である。色吸収フィルタや、マイケルソン干渉計等による機械的な波長スキャンが不要であるため、時間分解能を重視する測定に適している。今後は、測定対象から求められる倍率、光量、記録速度を勘案し、系を柔軟に設計しながら動画像測定することに努めたい。

5. 謝辞

本研究の一部は科学技術振興機構(JST)さきがけ(JPMJPR15P4, JPMJPR15P8, JPMJPR16P8, JPMJPR17P2), 物質・デバイス領域共同研究拠点 基盤共同研究(No. 20201164), JSPS KAKENHI Grant Number 18H01456, 19H03202, 19H01097 の助成を受けた。

文 献

- [1] D. Gabor, "A new microscopic principle," *Nature* **161**, 777-778 (1948).
- [2] E. N. Leith and J. Upatnieks, "Reconstructed wavefronts and communication theory," *J. Opt. Soc. Am.* **52**, 1123-1128 (1962).
- [3] 久保田敏弘：“新版ホログラフィ入門-原理と実際-”，朝倉書店，東京 (2010)
- [4] J. Rosen and G. Brooker, "Digital spatially incoherent Fresnel holography," *Opt. Lett.* **32**, 912-914 (2007).
- [5] M. K. Kim, "Full color natural light holographic camera," *Opt. Express* **21**, 9636-9642 (2013).
- [6] B. Zhu and K. Ueda, "Real-time wavefront measurement based on diffraction grating holography," *Opt. Commun.* **225**, 1-6 (2003).
- [7] J. Millerd, N. Brock, J. Hayes, M. N. Morris, M. Novak, and J. Wyant "Pixelated phase-mask dynamic interferometer," *Proc. SPIE* **5531**, 304 (2004).
- [8] Y. Awatsuji, M. Sasada, and T. Kubota, "Parallel quasi-phase-shifting digital holography," *Appl. Phys. Lett.* **85** 1069-1071 (2004).
- [9] T. Tahara, T. Kanno, Y. Arai, and T. Ozawa, "Single-shot phase-shifting incoherent digital holography," *J. Opt.* **19**(6), 065705 (2017).
- [10] T. Tahara, T. Ito, Y. Ichihashi, and R. Oi, *J. Opt.* (IOP Publishing) **22** (2020) 105702.
- [11] T. Tahara, R. Mori, S. Kikunaga, Y. Arai, and Y. Takaki, "Dual-wavelength phase-shifting digital holography selectively extracting wavelength information from wavelength-multiplexed holograms," *Opt. Lett.* **40**, 2810-2813 (2015).
- [12] T. Tahara, R. Mori, Y. Arai, and Y. Takaki, "Four-step phase-shifting digital holography simultaneously sensing dual-wavelength information using a monochromatic image sensor," *J. Opt.* (IOP Publishing) **17**, 125707 (2015).
- [13] T. Tahara, R. Otani, K. Omae, T. Gotohda, Y. Arai, and Y. Takaki, "Multiwavelength digital holography with wavelength-multiplexed holograms and arbitrary symmetric phase shifts," *Opt. Express* **25**, 11157-11172 (2017).
- [14] T. Tahara, T. Ito, Y. Ichihashi, and R. Oi, "Multiwavelength three-dimensional microscopy with spatially incoherent light, based on computational coherent superposition," *Opt. Lett.* **45**, 2482-2485 (2020).
- [15] T. Tahara, T. Koujin, A. Matsuda, A. Ishii, T. Ito, Y. Ichihashi, and R. Oi, "Incoherent color digital holography with computational coherent superposition (CCS) for fluorescence imaging," *Appl. Opt.* **60**, A260-A267 (2021).
- [16] T. Tahara, A. Ishii, T. Ito, Y. Ichihashi, and R. Oi, "Single-shot wavelength-multiplexed digital holography for 3D fluorescent microscopy and other imaging modalities," *Appl. Phys. Lett.* **117**, 031102 (2020).
- [17] T. Tahara, T. Koujin, A. Matsuda, Y. Kozawa, Y. Ichihashi, and R. Oi, "72 fps incoherent two-color digital motion-picture holography system for fluorescence cell imaging," *Digital holography and 3-D imaging (DH) 2021* (submitted).
- [18] T. Tahara, Y. Kozawa, Y. Ichihashi, and R. Oi, "102 fps incoherent digital motion-picture holography system for sensing of moving fluorescence nanoparticles," *Digital holography and 3-D imaging (DH) 2021* (submitted).
- [19] 岡本亮, 田原樹, "位相シフト干渉法への量子揺らぎの影響の理論的な考察," *Optics and Photonics Japan* 2019, 5pE7, 吹田, 2019年12月5日.
- [20] R. Okamoto and T. Tahara, "Precision limit for the simultaneous phase and transmittance estimation with phase shifting interferometry," (submitted).
- [21] T. Tahara, Y. Kozawa, A. Ishii, K. Wakunami, Y. Ichihashi, and R. Oi, "Two-step phase-shifting interferometry for self-interference digital holography," *Opt. Lett.* **46**, 669-672 (2021).
- [22] 植田憲一, 宅間宏, "ファラデー回転フーリエ分光法," *レーザー研究* **12**(11), 652-659 (1984).

令和3年第1回 ホログラフィック・ディスプレイ研究会のお知らせ

■開催日： 2021年3月29日(月)13:30～16:30

■場所： Zoomによるオンライン開催

■テーマ： 光変調を利用した新規イメージング技術とホログラフィ

■プログラム：

(1) シングルピクセルイメージングに基づく画像取得法

仁田 功一 (神戸大学)

(2) シングルピクセルホログラフィによる複数波長センシング

遠藤 優 (金沢大学), 田原 樹 (NICT), 岡本 亮 (京都大学)

(3) 機械学習を用いたシングルピクセルイメージング

水谷 康弘, 片岡将磨, 上野原努, 高谷裕浩 (大阪大学)

(4) 深層学習を利用した光相関計算機イメージングの耐ノイズ性向上

本多康伸, 和田佑太, 渡邊 恵理子 (電気通信大学)

(5) モーションレスオプティカルスキーリングホログラフィ

米田 成, 最田 裕介, 野村 孝徳 (和歌山大学)

(6) 流れ場中の蛍光ナノ粒子群を3次元測定する103fpsインコヒーレントデジタル動画

ホログラフィと複数波長同時記録

田原 樹 (NICT), 小澤 祐市 (東北大学), 荒神 尚子, 松田 厚志 (NICT),

岡本 亮 (京都大学), 石井 あゆみ (桐蔭横浜大学),

伊藤智義 (千葉大学), 涌波 光喜, 市橋 保之, 大井 隆太朗 (NICT)

■参加費： 会員, 非会員, ともに無料

■問合せ先

・研究会について: e-mail meeting@hodic.org

・その他全般: HODIC事務局

日本大学 理工学部 応用情報工学科 吉川 浩 宛

TEL/FAX 047-469-5391

e-mail office@hodic.org

令和3年第2回 ホログラフィック・ディスプレイ研究会のお知らせ

- 開催日： 2021年5月ころを予定
- 場 所： Zoomによるオンライン開催
- テーマ： 未定
- プログラム： 未定
- 研究会参加申込 事前申込
- 参加費： 会員、非会員、ともに無料
- 問合せ先
 - ・研究会について: e-mail meeting@hodic.org
 - ・その他全般: HODIC 事務局
日本大学 理工学部 応用情報工学科 吉川 浩 宛
TEL/FAX 047-469-5391
e-mail office@hodic.org

HODIC の WEB ページとメールリストのご案内

HODIC では、独自のドメインにて WEB ページとメーリングリストのサービスしております。WEB ページのアドレス（URL）は

<https://www.hodic.org/>

です、ぜひアクセスしてみてください。なお、WEB ページでは皆さんからの情報やメッセージも掲載できるようになっています。

メールリストサービスは、特定のアドレスにメールを送ると加入者にメールが転送されるものです。**HODIC** からのお知らせと会員間の自由な意見交換や情報交換のために利用しています。加入も脱退も自由で、費用もかかりません。自分から情報発信したり、分からぬことを質問したりすることも可能です。インターネットへの電子メールの送受信が可能ならどなたでも参加できます。加入の申し込みは、登録したいメールアドレスから maillist-req@hodic.org あてに、本文に SUBSCRIBE と書いて電子メールをお送りください。ご質問は、w3@hodic.org までお知らせください。

ホログラフィック・ディスプレイ研究会役員（敬称略）

名 誉 会 長	辻 内 順平	会 長	伊藤 智義（千葉大学）
副 会 長	山本 健詞（情報通信研究機構）	前 会 長	橋本 信幸（シチズン時計）
国際担当	西辻 崇（東京都立大学）	企画委員長	角江 崇（千葉大学）
会計幹事	山内 豪（大日本印刷）	事務局長	岸本 康（凸版印刷）
編 集 長	吉川 浩（日本大学）		

幹 事（50音順）

石井勢津子（美術家）	石川 淳（石川光学造形研究所）	岩田 藤郎
植田 健治（大日本印刷）	鎌田 康昌（凸版印刷）	坂本 雄児（北海道大学）
佐藤 甲癸	下馬場朋祿（千葉大学）	白木 厚司（千葉大学）
白倉 明（アーティエヌ・ラボ）	高木 康博（農工大）	高橋 進（凸版印刷）
谷口 幸夫（大日本印刷）	福田 隆史（産総研）	松島 恭治（関西大学）
三科 智之（日本放送協会）	山口 健（日本大学）	山口 雅浩（東京工業大学）
渡邊恵理子（電気通信大学）		

相 談 役（50音順）

上田 裕昭（コニカミルタフ・ラネリウム）	小野 雄三（立命館大学）	勝間ひでとし（湘南 LRT 研究 G）
桑山 哲郎	久保田敏弘（久保田和歌・ム工房）	酒井 朋子（千葉大学）
永田 忠昭（arts-unis）	三田村畯右	堀内 道夫（光と風の研究所）
本田 捷夫（本田ひかり技研）		

編集部よりのお知らせ

編集部では皆様からの情報を募集いたしております。ホログラフィ関連のお知らせや報告などがございましたら、下記編集部連絡先までお送り下さいますようお願い申し上げます。

なお、次号会報に掲載するためには研究会開催日の1ヶ月前が締切となります。

HODIC Circular, Vol. 41, No. 1 (Mar. 2021)

2021年3月29日発行

編 集 日本光学会 ホログラフィック・ディスプレイ研究グループ

編 集 長 吉川 浩(日本大学)

HODIC 事務局(入会・連絡先変更・各種問合せ等)

日本大学 理工学部 応用情報工学科 吉川・山口研究室 気付 (担当: 吉川 浩)
〒274-8501 船橋市習志野台 7-24-1

TEL/FAX 047-469-5391 E-mail: office@hodic.org

WEB: <http://www.hodic.org/>

ご連絡はなるべく電子メールまたはFAXにてお願ひいたします。

For foreign members, any corresponding to

Hiroshi Yoshikawa, Dept. Computer Engineering, Nihon University

7-24-1 Narashino-dai, Funabashi, Chiba 2748501 JAPAN

E-mail: yoshikawa.hiroshi@nihon-u.ac.jp

HODIC