

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 10 月 3 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2016～2017

課題番号：16H05865

研究課題名(和文) 三次元符号化光学素子を用いた超小型・高画質カラーレンズレスカメラの創出

研究課題名(英文) Compact color lensless camera using three-dimensional optical encoder

研究代表者

中村 友哉 (Nakamura, Tomoya)

東京工業大学・工学院・助教

研究者番号：70756709

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,300,000円

研究成果の概要(和文)：レンズの光学結像に基づく従来型の光イメージングでは、光学系のサイズが計測情報量に比例して大型化する。この問題を解決する技術として、符号化光学素子による像情報の符号化と信号処理による像情報の復号を組み合わせたコンピューショナルイメージングが研究されている。本研究では、三次元構造を有する符号化開口を用いたコンピューショナルイメージングの設計と実証に取り組んだ。三次元構造を有する光学素子を符号化開口に用いることで、角度・波長選択的な符号化撮像を実装できることを明らかにした。圧縮センシングと組み合わせることで、広い視野、高解像度な撮像を小型光学系で実現できることを実証した。

研究成果の概要(英文)：In conventional optical imaging based on optical imaging by a lens, the size of the optical system increases in proportion to the amount of measurement information. As a technique to solve this problem, computational imaging combining optical encoding of image information and digital decoding of the coded image has been studied. In this research, we designed and demonstrated the computational imaging using coded aperture with three dimensional structure. We clarified that angle and wavelength selective coded imaging can be implemented by using an optical element having a three-dimensional structure as a coding aperture. By combining with compressive sensing, we demonstrated that wide field of view, high resolution imaging can be realized with small optical system.

研究分野：情報光学

キーワード：コンピューショナルイメージング 圧縮センシング ホログラム

### 1. 研究開始当初の背景

光学系による像情報の符号化と信号処理による復号の組み合わせに基づく撮像法はコンピュータショナルイメージングと呼ばれ、光学結像に基づく従来型のイメージング技術の種々の物理制約を解決する技術として研究されている。特に、レンズの代わりに符号化開口を用いる符号化撮像法は、カメラの小型化のための一手法として近年注目されている。一方で、符号化撮像は、従来レンズ設計に閉じられていたカメラの設計自由度を拡大する技術としても捉えることができる。カメラの設計自由度を信号処理を含めた形に拡張することができ、カメラの小型化のみならず高性能・高機能化を実現する可能性を秘めている。

一方で、従来の符号化撮像の設計自由度は二次元的な構造を持つ符号化開口の利用がほとんどであり、より高い設計自由度を有する三次元符号化開口の利用はあまり検討されていない。しかしながら、三次元構造を持つ光学素子は、像情報の角度・波長選択的な符号化や、より自由なカメラアーキテクチャの設計を可能とする。これにより、既存の符号化光イメージングにおける画質・カメラサイズ・視野などの問題を解決できる可能性がある。

### 2. 研究の目的

三次元構造を有する符号器の積極利用に着目した符号化撮像法の新しい原理を開拓する。符号器を三次元化することにより実現される新規な像情報符号化機能と、それと協調する復号処理を具現化し、高画質化・高解像度化・広視野化など、既存技術の限界を超えるカメラの性能向上を実現する。原理の設計・数値実験に基づく検証・実験に基づく原理実証を目標とする。

### 3. 研究の方法

三次元符号器として、三次元屈折率分布媒体であり弱散乱体の一種である体積ホログラム光学素子の利用に基づく実装方式を検討する。

体積ホログラム光学素子は、二光波干渉光学系により感光材料を露光することで実装できる。また、走査型露光系（ホログラムプリンタ）の応用により、空間的な均質性の高い素子を実装できる。このようにして実装した素子とイメージセンサを組み合わせることで、符号化撮像光学系を構成する。体積ホログラムに基づく三次元符号化光学素子により、様々な画角の像情報が独立符号化され、それらがセンサ上で多重化取得される。この多重像の分離のために、圧縮センシングに基づく画像再構成処理[D. L. Donoho, *IEEE Transactions on Information Theory* 52, 1289 (2006).]を適用する。これにより、広い物体空間の、従来型のカメラを超えるサンプリング解像度の像を取得できる。

### 4. 研究成果

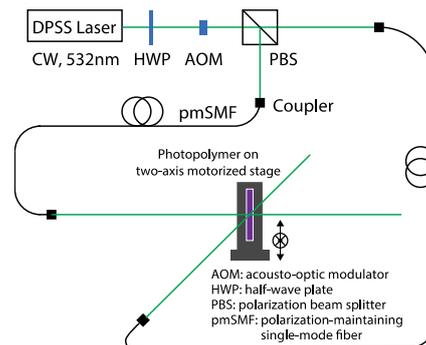


図1. 光学素子露光システム。

まず、ホログラム光学素子の露光に必要なとる、干渉光学系と感光材料を用いた走査型露光システムの構築を行った。構築した光学系を図1に示す。DPSS レーザーの前に超音波光学素子 (AOM) を配置し、電子シャッターとした。半波長板 (HWP) と偏光ビームスプリッタ (PBS) の組み合わせにより、照度比を可変な二光波を実装した。調芯器によりビームと偏波面維持型単一モード光ファイバを結合した。ファイバ出射端 (コリメート出射) の配置の調整により材料上でビーム同士が干渉するようにした。材料を二軸自動ステージに乗せ、露光干渉パターンを機械走査できるようにした。制御システムによりシャッターとステージを同期制御することで、空間的に均質なホログラム光学素子を露光できるようにした。感光材料にはフォトポリマーを選定した。

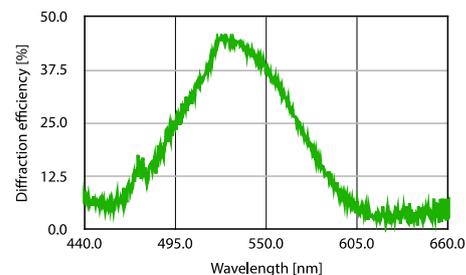


図2. 露光した素子の光利用効率。

露光した素子の分光特性を分光器で評価し、光利用効率を定量評価した。透過型素子を露光した場合の結果を図2に示す。図2において、非透過成分は目的とする回折成分に相当する。透過型でピーク波長において 50%程度の光利用効率を達成した。反射型の場合、90%程度の光利用効率を実装した。

ホログラム光学素子 (vHOE) を利用した広視野高解像度符号化撮像法の概念図を図3に示す。物体空間の視野を複数の小さな視野に分割し、vHOE による角度独立符号化を利用して視野ごとに独立なインパルス応答 (PSF) を実装する。その PSF が畳み込まれた複数視

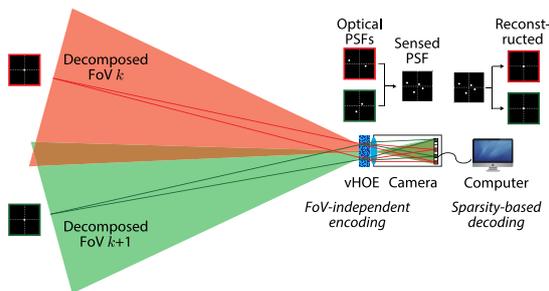


図 3. ホログラム素子を用いた符号化撮像法.

野の高解像度像がセンサにより多重化撮影される。これを像のスパース性を利用した画像再構成処理により分離再構成し、元の複数視野像を取得する。これにより、それぞれの高倍率視野像をセンサのサンプリング解像度で復元できる。つまり、一枚のセンサの単一露光でありながら、仮想的に複数台の高倍率カメラアレイで撮影した画像が得られる。これらをつなぎ合わせることで、高倍率・高解像度な複数視野（広視野）画像を得る。

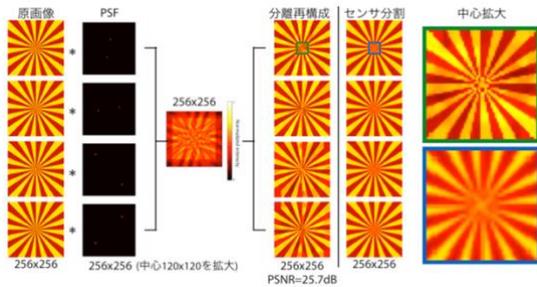


図 4. 多重化撮影のシミュレーション実証.

提案した手法のモデルの妥当性を検証するため、シミュレーションに基づく原理実証を行った。結果を図 4 に示す。原画像は 4 枚の Siemens star chart を設定した。単純にセンサを空間分割して 4 枚の画像を撮影する場合に比べ、提案する多重化撮影法では 4 倍の空間解像度が実現されることを確認した。

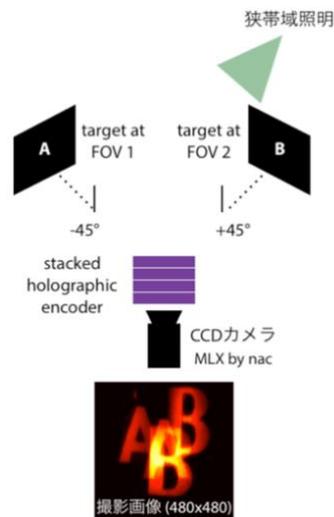


図 5. 原理実証実験光学系.

提案手法の原理実証実験を行った。実験系を図 5 に示す。体積型ホログラフィックグレーティングを層方向に重ねることで、視野独立なビームスプリッタ（二重像符号器）を実装した。撮像視野の違いにより二重像の性質が変化することで、撮像後の画像再構成が可能となる。文字が印刷された拡散紙を二視野に配置して撮像対象とした。物理実装したホログラム光学素子を用いた実験により、図 5 の多重像が撮影された。

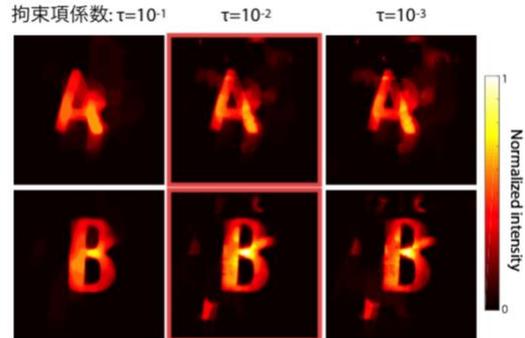


図 6. 画像再構成結果.

多重像を分離再構成した結果を図 6 に示す。上段が視野 1、下段が視野 2 に相当する。PSF は実験により計測した。また、画像再構成アルゴリズムとして、TwIST [J. M. Bioucas-dias and M. A. T. Figueiredo, "A New TwIST : Two-Step Iterative Shrinkage / Thresholding Algorithms for Image Restoration," IEEE Trans. Imag. Proc. 16, 2992-3004 (2007)] を用いた。拘束項には全変動を使用した。図 6 のように、拘束項が適切である場合、対象の情報が良好に再構成されることが確認された。その他、撮像の分光依存性や広視野化、符号パターン、画像再構成の基底選択等について検討を行った。符号・復号法のさらなる高度化による多重数の拡大、実験対象やパラメータの一般環境化が今後の課題である。

さらに、体積ホログラムの代わりにランダムに穴空けた複数のイメージセンサを積層させることによるレンズレス撮像法についても提案した。概念図を図 7 に示す。提案手法では、穴開けされた複数のセンサの受光面をお互い向かい合わせて配置する。センサから見て、前方のセンサは符号化開口として機能し、自身は符号化像のスパースサンプラ

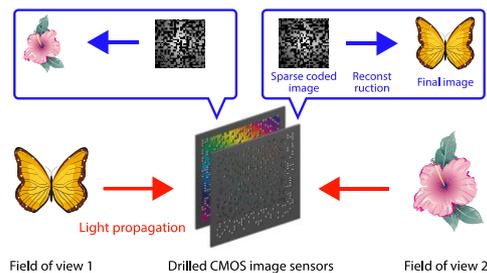


図 7. イメージセンサ積層による符号化撮像法.

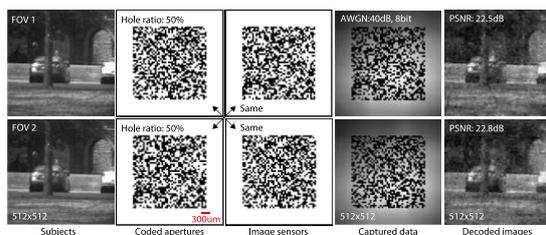


図 8. シミュレーション結果.

として機能する. スパースにサンプリングされた符号化像は, 圧縮センシングの復元アルゴリズムによる画像再構成に用いられる. 再構成を経て, 元の物体情報が復元される. 外部の符号化光学素子が不要であるため, 光学系が小型である. また, 表裏両面を同時に撮像するため, 撮像の広視野化が実現される.

シミュレーション結果を図 8 に示す. 詳細な設定は学会発表①に記載した. 結果, 自然画像に対して良好な再構成の実現を確認した. PSNR は 22.7dB となった. 実機構築に基づく原理実証が今後の課題である.

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

① Tomoya Nakamura, Shinji Kimura, Kazuhiko Takahashi, Yuji Aburakawa, Shunsuke Takahashi, Shunsuke Igarashi, Shiho Torashima, and Masahiro Yamaguchi, “Off-axis virtual-image display and camera by holographic mirror and blur compensation,” *Optics Express*, Vol. 26, No. 19, pp. 24864-24880 (2018).

[学会発表] (計 6 件)

① 中村友哉, 香川景一郎, 虎島史歩, 山口雅浩, “イメージセンサを符号化開口として機能させるレンズレスイメージング,” 第 79 回応用物理学会秋季学術講演会, 20p-431B-1 (名古屋, 2018.9).

② Tomoya Nakamura and Masahiro Yamaguchi, “Computational imaging utilizing volume hologram,” *The 4th Biomedical Imaging and Sensing Conference 2018 (BISC2018)*,

10711-13 (Yokohama, 2018.4).

③ 中村友哉, 山岸壮太, 虎島史歩, 山口雅浩, “vHOE 符号器を用いた複数視野像の圧縮センシング,” 第 65 回応用物理学会春季学術講演会, 19a-P2-2 (東京, 2018.3).

④ 高橋俊介, 中村友哉, 五十嵐俊亮, 虎島史歩, 木村真治, 油川雄司, 山口雅浩, “映像投影・撮像用大型ホログラム光学素子の空間分割記録,” 第 65 回応用物理学会春季学術講演会, 19p-B201-14 (東京, 2018.3).

⑤ Tomoya Nakamura, Shinji Kimura, Kazuhiko Takahashi, Yuji Aburakawa, Shunsuke Takahashi, Shunsuke Igarashi, and Masahiro Yamaguchi, “HOE-Based Screen for Virtual-Image Projection and Scene Capture,” *The International Display Workshops (IDW'17)*, 3D4-4 (Sendai, 2017.12).

⑥ Tomoya Nakamura, “Incoherent lensless super-field-of-view imaging by artificially designed scattering medium,” *OSJ-OSA Joint Symposia on Nanophotonics and Digital Photonics*, 30aOD4 (Tokyo, 2017.10).

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 3 件)

名称: 撮像システム, 及び撮像方法  
 発明者: 中村友哉, 山口雅浩  
 権利者: 同上  
 種類: 特許  
 番号: 特願 2017-093613 号  
 出願年月日: 2017 年 5 月 10 日  
 国内外の別: 国内

名称: 撮像システム, 及び撮像方法  
 発明者: 中村友哉, 山口雅浩  
 権利者: 同上  
 種類: 特許  
 番号: PCT/JP2017/046741 号  
 出願年月日: 2018 年 4 月 24 日  
 国内外の別: 外国

名称: レンズレス撮像装置  
 発明者: 中村友哉, 山口雅浩  
 権利者: 同上  
 種類: 特許  
 番号: 特願 2018-155651 号  
 出願年月日: 2018 年 8 月 22 日  
 国内外の別: 国内

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

中村 友哉 (NAKAMURA, Tomoya)

東京工業大学・工学院・助教

研究者番号： 70756709