

令和 3 年 6 月 10 日現在

機関番号：14701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04978

研究課題名(和文) ランダム位相変調によるインライン型光学系を用いた瞬時複素振幅情報取得法

研究課題名(英文) Single-shot in-line digital holography without twin-image by a random phase modulation

研究代表者

野村 孝徳 (Nomura, Takanori)

和歌山大学・システム工学部・教授

研究者番号：80222206

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：簡単な光学系を用いて位相分布を計測する手法であるランダム位相変調を用いたインラインデジタルホログラフィを提案し、光学実験により有用性を実証した。これまでは、位相像を取得する際に不要な像が重畳し、それを取り除くために複雑な光学系や特殊な素子が必要であったが、提案手法では拡散板(すりガラスのようなもの)を光路中に挿入のみによって実現している。光学系の簡素さに対するトレードオフとしてコンピューターによる処理が必要であるが、その計算量が多くないことも特徴である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

医療分野において、無色透明な細胞を観察する技術が必要とされている。本研究では無色透明な細胞を染色することなく、細胞の空間的な分布を観察する手法を提案している。これまでの手法は平面内の分布の観察にとどまり、空間的な観察にはカメラの移動が必要であり、瞬時計測は困難であった。本手法はホログラフィの技術を採用することにより、単一露光による観察を実現している。また、提案手法は光源に低コヒーレンス光源を用いることが可能であり、LEDを光源として使用することができる。このことは系全体が小型化され可搬性の高い系が実現可能であること示唆している。

研究成果の概要(英文)：A twin-image reduction method using a diffuser (random phase modulation) for phase-imaging in-line digital holography was proposed. Numerical and preliminary optical experiments have been performed to confirm the proposed method. The numerical result confirmed the feasibility of the proposed method and the effect of the characteristics of the diffuser. In the optical experiment, the quality of the reconstructed image was compared with that of the phase-shifting method.

研究分野：情報フォトンクス

キーワード：位相計測 ランダム位相変調 ホログラフィ 低コヒーレンス光源

### 1. 研究開始当初の背景

生体分野の細胞の観察や同定、工業分野における製品検査などに応用されている位相計測・位相イメージング技術を実現する手法のひとつに干渉計測法がある。なかでもデジタルホログラフィは、試料を透過した光波（透過物体の場合）、もしくは反射した光波（反射物体の場合）の複素振幅分布をデジタルデータとして取得できるため、後処理により透過率、屈折率等の物理量の定量計測が可能であり、干渉計測法の有力な方法の一つである。しかしながら、干渉計測法を現場に応用する場合、以下のような課題がある。

1. 参照光と物体光を必要とする干渉計を構成するため装置が大掛かりである。
  2. 不要光を取り除く位相シフト法を実現するには、位相遅延を与える素子が必要である。
- これらの課題を解決することが望まれている。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、簡素な光学系（最終的には可搬型を目指す）を用いて、生体細胞のような位相が重要な情報をもつ試料の複素振幅分布を得ることである。デジタルホログラフィを含む干渉計測は試料の複素振幅情報をデジタルデータ（数値データ）として取得することができることから、生体分野の細胞の観察や同定、工業分野における製品検査などに応用されている技術である。しかしながら、干渉計測では不要な共役光が伴い、得られる像の信号対雑音比が低くなる。一般的には位相シフト法によりこれを取り除いているが、装置が大掛かりになってしまうという課題がある。これでは、現場（例えば、細菌による伝染病が問題となる途上国など）への応用は難しい。本研究は、位相シフト法を必要としない、簡素な光学系による単一露光による複素振幅情報取得法の提案である。

### 3. 研究の方法

ランダム位相変調を用いたインラインデジタルホログラフィの光学系を図1に示す。試料は振幅透過率分布が1で一様な純位相物体である。この試料はレンズ1の前側焦点面  $P_0$  に配置する。ランダム位相分布は光波を拡散させる作用をもつ拡散板を用い、レンズ1の後側焦点面  $P_1$  に配置する。また、 $f_1$  および  $f_2$  はそれぞれレンズ1およびレンズ2の焦点距離である。まず記録

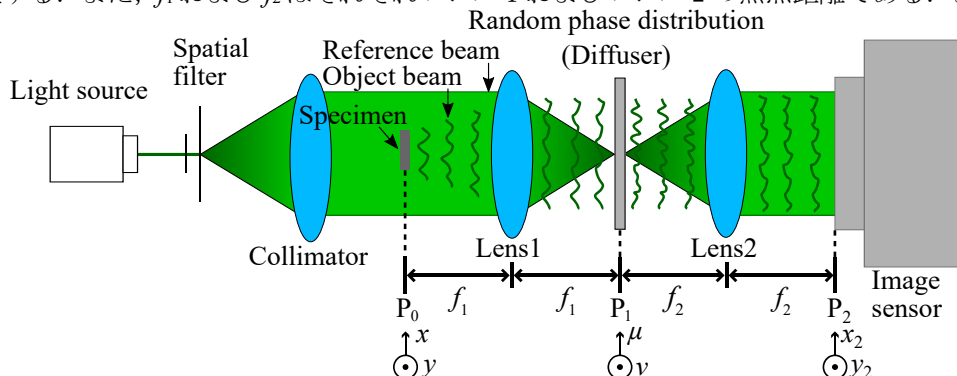


図1 ランダム位相変調を用いたインラインデジタルホログラフィ光学系概念図

過程を示す。試料面  $P_0$  における光波  $o(x, y)$  は、試料の位相値が十分小さい場合、弱回折近似を適用して

$$o(x, y) = \exp\{i\phi_o(x, y)\} \approx 1 + i\phi_o(x, y) \quad (1)$$

と近似できる。ここで、 $i$  は虚数単位をあらわし、 $\phi_o(x, y)$  は試料の位相分布をあらわす。この光波はレンズ1によりフーリエ変換され、レンズ1の後側焦点面  $P_1$  において

$$O(\mu, \nu) = \delta(\mu, \nu) + i\Phi_o(\mu, \nu) \quad (2)$$

とあらわされる。ここで、 $\delta(\mu, \nu)$  はディラクのデルタ関数をあらわす。また  $\Phi(\mu, \nu)$  は  $\phi_o(x, y)$  のフーリエ変換である。これらの光波はレンズ1の後側焦点面  $P_1$  に配置された拡散板により変調され、

$$H(\mu, \nu)O(\mu, \nu) = H(0, 0) + iH(\mu, \nu)\Phi_o(\mu, \nu) \quad (3)$$

とあらわされる。ここで、 $H(\mu, \nu)$  は拡散板の複素振幅分布をあらわす。拡散板の振幅透過率分布は1で一様であり、位相のみが空間的にランダムな分布をもつ。平面波である参照光は拡散板面において一点に集光するため、拡散板によるランダムな位相変調は受けず、一定の位相変調のみを受ける。また、物体光は拡散板面において分布に拡がりをもつため、拡散板のランダムな位相

変調を受ける。これらの光波はレンズ 2 により再びフーリエ変換され、撮像素子面  $P_2$  において

$$u(x_2, y_2) = r + ih(x_2, y_2) \otimes \phi_o(x_2, y_2) \quad (4)$$

とあらわされる。ここで、 $h(x_2, y_2)$  は  $H(\mu, \nu)$  のフーリエ逆変換をあらわし、 $\otimes$  は畳み込み積分演算子をあらわす。また、(3)式における  $H(0, 0)$  のフーリエ変換は定数であるため、定数  $r$  とあらわす。これより、撮像素子により記録されるホログラムは

$$\begin{aligned} I(x_2, y_2) &= |u(x_2, y_2)|^2 \\ &= |r|^2 + |h(x_2, y_2) \otimes \phi_o(x_2, y_2)|^2 \\ &\quad + ir^* \{h(x_2, y_2) \otimes \phi_o(x_2, y_2)\} - ir \{h(x_2, y_2) \otimes \phi_o(x_2, y_2)\}^* \end{aligned} \quad (5)$$

とあらわされる。(5)式の右辺第 1 項と第 2 項は 0 次回折光成分、第 3 項は物体像成分、第 4 項は二重像成分に対応する。

再生過程では、光波の逆伝搬計算とあらかじめ取得された拡散板の位相変調  $H(\mu, \nu)$  を用いて

$$o'(x, y) = iR^* \phi_o(x, y) - iRh^*(x, y) \otimes h^*(x, y) \otimes \phi_o^*(x, y) \quad (6)$$

を得ることができる。(6)式の右辺第 1 項は試料の位相分布  $\phi(x, y)$  に定数  $iR^*$  が乗算された物体像であり、第 2 項は物体像に重複する二重像である。しかし、二重像は拡散板のランダム位相分布の複素共役が 2 回畳み込み積分されているため、試料面  $P_0$  において拡散される。これにより、二重像が低減された物体像の位相分布を取得可能である。ここまでの説明は光源が単色光の高コヒーレンス光源の場合であるが、LED や SLD などの低コヒーレンス光源の場合も同様に考えることができる。

## 4. 研究成果

### 4.1 シミュレーション

高コヒーレンス光源および低コヒーレンス光源により取得される試料の位相分布は(6)式であらわされるように、物体像成分に  $iR^*$  が乗算されているため、絶対的な位相値ではなく、相対的な位相値が算出される。そこで、取得可能である物体像の位相差を算出するシミュレーションをおこなった。試料は図 2 に示す試料を用いた。

試料には二つの領域を与え、左側の領域である Area 1 の位相値を  $8\pi/16$  [rad] で固定し、右側の領域である Area 2 の位相値  $\phi$  を  $8\pi/16$  [rad] から  $\pi/16$  [rad] ステップで変化させ、計測をおこなった。試料に与えた位相差および両光源により取得した位相差をプロットしたグラフを図 3 に示す。図 3 より、光源のコヒーレンスによらず、Area 2 の位相値が  $14\pi/16$  [rad]、すなわち  $2.75$  [rad] 程度の試料であれば、与えた位相差を取得可能であることが明らかになった。

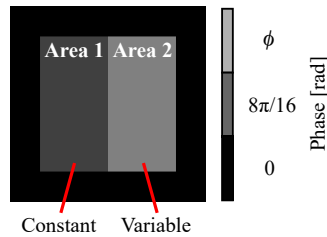


図 2 シミュレーションに用いた資料 (Area 1:固定, Area 2:可変)

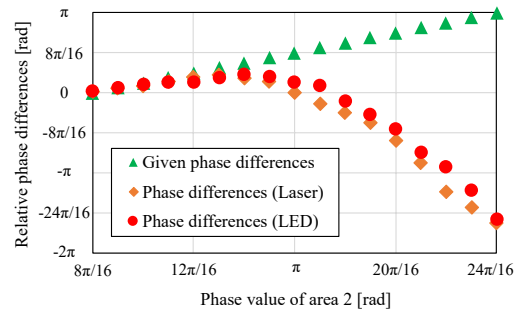


図 3 光源のコヒーレンスの違いによる位相再構成特性 (シミュレーション)

### 4.2 光学実験

提案手法の有用性を検証するための物体像取得実験をおこなった。実験に用いた光学系を図 4 に示す。波長が  $532.1\text{nm}$  の緑色ファイバレーザと中心波長が  $523\text{nm}$ 、半値全幅が  $39\text{nm}$  の緑色 LED を用いた。試料および拡散板は、位相型の空間光変調器 (P-SLM) を用いて実現した。P-SLM1 には画素数が  $3840 \times 2160$ 、画素サイズが  $3.74\mu\text{m} \times 3.74\mu\text{m}$  の反射型 P-SLM を用いた。また、P-SLM2 には画素数が  $1272 \times 1024$ 、画素サイズが  $12.5\mu\text{m} \times 12.5\mu\text{m}$  の反射型 P-SLM を用いた。撮像素子には画素数が  $1280 \times 960$ 、画素サイズが  $4.65\mu\text{m} \times 4.65\mu\text{m}$  の CCD カメラを用いた。レンズ 1 およびレンズ 2 の焦点距離はそれぞれ  $300\text{mm}$  および  $150\text{mm}$  であり、口径は  $50\text{mm}$  のものを用いた。試料は、シミュレーションと同様に、試料内部に Area A および Area B を定めた。Area 1 の位相値を  $8\pi/16$  [rad] で固定し、右側の領域である Area 2 の位相値を  $8\pi/16$  [rad] から  $\pi/16$  [rad] ステップで変化させ、計測をおこなった。試料の Area 1 と Area 2 に与えた位相差と、試料に与えた位相差および両光源により取得した位相差をプロットしたグラフを図 5 に示す。シミュレ

ーションと同様に図 5 より，光源のコヒーレンスによらず，Area 2 の位相値が  $14\pi/16$  [rad]，すなわち  $2.75$  [rad] 程度の試料であれば，与えた位相差を取得可能であることが明らかになった。

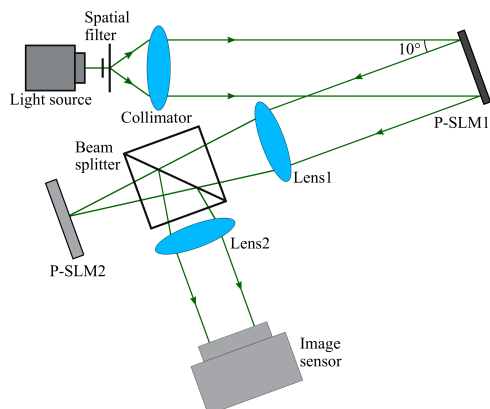


図 4 実験光学系

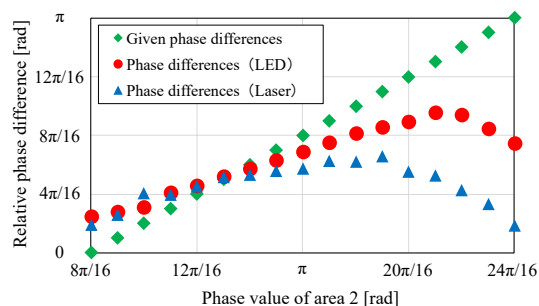


図 5 光源のコヒーレンスの違いによる位相再構成特性 (実験結果)

最後に微生物を模した図 6 に示す試料を P-SLM に表示して位相の計測をおこなった. Area A と Area B の位相値はそれぞれ， $\pi/2$  [rad] と  $\pi$  [rad] である. 取得した再生像の位相分布を図 7 に示す. 光源の違いにより画質が異なっていることがわかり，低コヒーレンス光源を用いた方が高画質である. このことは LED のような小型の光源の使用が可能であり，装置の小型化，可搬化を示唆するものである。

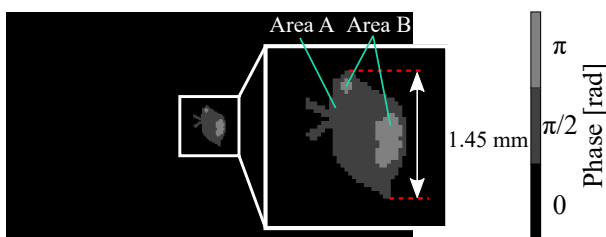


図 6 微生物を模した位相試料

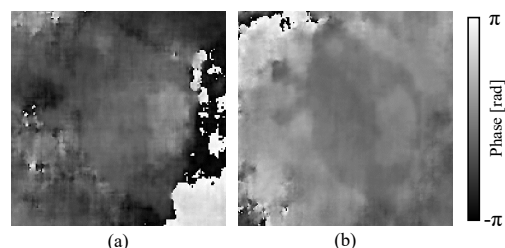


図 7 微生物を模した位相試料の計測結果 (a)レーザー光源，(b) LED

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 0件）

|                                                                                                                                                      |                           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|
| 1. 著者名<br>Kishiwaki Daichi、Nisaka Kenichi、Nomura Takanori                                                                                            | 4. 巻<br>59                |
| 2. 論文標題<br>High temporal and spatial resolution single-shot digital holography with Fresnel domain filtering using witch's hat illumination          | 5. 発行年<br>2020年           |
| 3. 雑誌名<br>Applied Optics                                                                                                                             | 6. 最初と最後の頁<br>694 ~ 694   |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1364/AO.59.000694                                                                                                      | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>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<br>-                 |
| 1. 著者名<br>Gupta Alok K.、Fatima Areeba、Nishchal Naveen K.、Nomura Takanori                                                                             | 4. 巻<br>27                |
| 2. 論文標題<br>Phase imaging based on modified transport of intensity equation using liquid crystal variable retarder with partial coherent illumination | 5. 発行年<br>2020年           |
| 3. 雑誌名<br>Optical Review                                                                                                                             | 6. 最初と最後の頁<br>142 ~ 148   |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1007/s10043-020-00576-x                                                                                                | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する              |
| 1. 著者名<br>Kakei Shunsuke、Komuro Koshi、Nomura Takanori                                                                                                | 4. 巻<br>59                |
| 2. 論文標題<br>Transport-of-intensity phase imaging with polarization directed flat lenses                                                               | 5. 発行年<br>2020年           |
| 3. 雑誌名<br>Applied Optics                                                                                                                             | 6. 最初と最後の頁<br>2011 ~ 2011 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1364/AO.386020                                                                                                         | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>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<br>-                 |
| 1. 著者名<br>Komuro Koshi、Nomura Takanori、Barbastathis George                                                                                           | 4. 巻<br>59                |
| 2. 論文標題<br>Deep ghost phase imaging                                                                                                                  | 5. 発行年<br>2020年           |
| 3. 雑誌名<br>Applied Optics                                                                                                                             | 6. 最初と最後の頁<br>3376 ~ 3376 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1364/AO.390256                                                                                                         | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する              |

|                                                                                                                     |                           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|
| 1. 著者名<br>Yoneda Naru, Saita Yusuke, Nomura Takanori                                                                | 4. 巻<br>45                |
| 2. 論文標題<br>Computer-generated-hologram-based holographic data storage using common-path off-axis digital holography | 5. 発行年<br>2020年           |
| 3. 雑誌名<br>Optics Letters                                                                                            | 6. 最初と最後の頁<br>2796 ~ 2796 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1364/OL.392801                                                                       | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>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<br>-                 |

|                                                                                                      |                           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|
| 1. 著者名<br>Oe Kazusa, Nomura Takanori                                                                 | 4. 巻<br>57                |
| 2. 論文標題<br>Twin-image reduction method using a diffuser for phase imaging in-line digital holography | 5. 発行年<br>2018年           |
| 3. 雑誌名<br>Applied Optics                                                                             | 6. 最初と最後の頁<br>5652 ~ 5652 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1364/AO.57.005652                                                     | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>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<br>-                 |

|                                                                                  |                           |
|----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|
| 1. 著者名<br>Yamazaki Yuya, Nomura Takanori                                         | 4. 巻<br>57                |
| 2. 論文標題<br>Computational ghost imaging with designed low spatial frequency masks | 5. 発行年<br>2018年           |
| 3. 雑誌名<br>Applied Optics                                                         | 6. 最初と最後の頁<br>9375 ~ 9375 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1364/AO.57.009375                                 | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>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<br>-                 |

〔学会発表〕 計6件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 5件)

|                                                                                          |
|------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>Takanori Nomura                                                               |
| 2. 発表標題<br>Phase imaging in-line digital holography with random phase modulation         |
| 3. 学会等名<br>SPIE Three-Dimensional Imaging, Visualization, and Display 2019 (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2019年                                                                          |

|                                                                                                               |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>Daichi Kishiwaki and Takanori Nomura                                                               |
| 2. 発表標題<br>Parallel Phase-Shifting Digital Holography by Use of the Talbot Effect with a Binary Phase Grating |
| 3. 学会等名<br>ISOM (International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory) '19 (国際学会)                  |
| 4. 発表年<br>2019年                                                                                               |

|                                                                                              |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>Shunsuke Kakei, Koshi Komuro, and Takanori Nomura                                 |
| 2. 発表標題<br>Transport-of-Intensity Phase Imaging Using Deep Learning                          |
| 3. 学会等名<br>ISOM (International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory) '19 (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2019年                                                                              |

|                                                                                          |
|------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>Takanori Nomura                                                               |
| 2. 発表標題<br>Phase imaging in-line digital holography with random phase modulation         |
| 3. 学会等名<br>SPIE Three-Dimensional Imaging, Visualization, and Display 2019 (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2019年                                                                          |

|                                                                                                        |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>Takanori Nomura                                                                             |
| 2. 発表標題<br>Phase Imaging by In-Line Digital Holography with a Diffuser                                 |
| 3. 学会等名<br>The 8th Japan-Korea Workshop on Digital Holography and Information Photonics, (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2018年                                                                                        |

|                                                   |
|---------------------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>岸脇大地、野村孝徳                              |
| 2. 発表標題<br>位相格子によるTalbot 効果を用いた波面割位相シフトデジタルホログラフィ |
| 3. 学会等名<br>日本光学会年次学術講演会Optics & Photonics 2018    |
| 4. 発表年<br>2018年                                   |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

|       | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)                     | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号)                   | 備考 |
|-------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------|----|
| 研究分担者 | 最田 裕介<br><br>(Saita Yusuke)<br><br>(30708756) | 和歌山大学・システム工学部・助教<br><br><br><br>(14701) |    |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

|         |         |
|---------|---------|
| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|