

ホログラムカレンダー

2022年4月18日（月）～22日（金） Optics & Photonics International Congress 2022

パシフィコ横浜およびオンライン

<https://opicon.jp/>

2022年7月15日（金），16日（土）3次元画像コンファレンス

長崎大学 文教キャンパス 文教スカイホール + オンライン併設

<http://www.3d-conf.org/>

2022年7月16日（土）～9月4日（日） 北九州市立美術館 本館 企画展示室

ホログラフィ・アートの先駆者（パイオニア）石井勢津子

<https://www.kmma.jp/honkan/exhibition/schedule.html>

2022年8月1日（月）～4日（木）Digital Holography and Three-Dimensional Imaging meeting
Cambridge, UK and online

https://www.optica.org/en-us/meetings/topical_meetings/digital_holography_and_3-d_imaging/

2022年10月14日（金）～16日（日）SPIE/COS Photonics Asia 2022, Beijing, China

<https://spie.org/conferences-and-exhibitions/photonics-asia?SSO=1>

2023年1月28日（土）～2月2日（木）SPIE Photonics West, San Francisco, California, United States <https://spie.org/conferences-and-exhibitions/photonics-west/>

2023年6月26日（月）～7月1日（土）12th International Symposium on Display Holography, Seoul, Korea <http://isdh2023.kr/>

目 次

| | |
|---|----|
| 1. ホログラムカレンダー | 表紙 |
| 2. デジタルホログラフィを用いた位相物体の散乱イメージング 渡邊 歴, 他 | 1 |
| 3. デジタルホログラフィック・フローサイトメトリーによる赤血球の 形態パラメータの取得 船水 英希 | 8 |
| 4. ガボールホログラムと深層学習を用いた全方位三次元計測 吉川 宣一, 他 | 13 |
| 5. 時間多重記録を利用したデジタルホログラフィによる高速度動画イメージング 安齋 亘, 他 | 17 |
| 6. 次回研究会のお知らせ | 巻末 |

デジタルホログラフィを用いた位相物体の散乱イメージング**Imaging phase objects through scattering media by digital holography****渡邊 歴, 浅田将太, 清須美 将晃****Wataru WATANABE, Shota ASADA, Masaaki KIYOSUMI****立命館大学 理工学部****College of Science and Engineering, Ritsumeikan University**

Optical imaging through scattering media has attracted much attention. Digital holography can reconstruct the complex amplitude of an object behind a diffuser by compensating the complex amplitude of the diffuser. We report on reconstruction of phase distribution of phase objects through the diffuser by lensless phase-shifting digital holography.

1. はじめに

生体組織, 霧, 不透明なガラスのような散乱媒体や拡散媒体は, 透過画像の品質を著しく低下させる。そこで, 散乱または拡散媒体を通して可視化する技術が注目集めている[1–4]。拡散体や散乱体を通して物体に関する情報を得ることは, 非常に広い範囲で応用されている。例えば, 顕微鏡で生物の標本を観察する場合, ある深さでは, 散乱や屈折率の揺らぎによって観察すべき像が劣化する。この乱れた波面を補正することができれば, ある深さでより鮮明な画像を得ることができる。この意味で, 散乱体を介した撮像技術は, 天体観測に用いられるリアルタイム補償光学技術と本質的に類似している。補償光学の技術では, 位相補正のために変形ミラーや空間位相変調器が必要である。これに対し, ホログラフィック技術は, 汎用の光学素子だけで散乱体イメージングシステムを構築できる利点がある。ホログラフィーを用いた散乱媒体のイメージング方法は, 1960 年代に報告されている[5–9]。デジタルホログラフィの登場により, 拡散体や散乱体の背後に置かれた物体の複素振幅をデジタルホログラフィで再構成する手法の研究が報告されている[10–16]。拡散板を通過した物体の再構成の例として, レンズレスデジタルホログラフィ[13]が用いられている。レンズレスホログラフィーは, 結像レンズを使用せずに画像を再構成できるため, 光学系のコンパクトだけでなく, 広視野, 高解像度, 3 次元イメージングなどの利点がある。文献 13 に記載された方法では, 物体光と拡散板からの光は近似的に独立した波として扱われる。我々は以前, 拡散ガラス[18,19]やホログラフィックディフューザー[20]の背後にある物体の位相と強度情報をデジタルホログラフィで取得する厳密な再構成法を報告している。この方法では, あらかじめ拡散器の透過率と位相を測定し

ておく。拡散板の複素振幅を事前に測定し、拡散板による透過率と位相の変化をデジタル補正することで、拡散ガラスを透過した物体の複素振幅を復元することができる。また、光逆伝播により、任意の距離における物体強度と位相を再構成することができる。これまでも、物体として振幅型のテストターゲットを用いて物体の再構成が可能であることを示している[21]。拡散板や散乱媒質背後の位相物体の再構成技術は、大気の流れの可視化、生体組織や細胞イメージングなどの可能性がある。本発表では、レンズレス位相シフトディジタルホログラフィを用いて拡散板背後に配置された位相物体を可視化について報告する。

2. 拡散板奥にある物体の複素振幅再構成

拡散板の背後にある物体の複素振幅を推定するために、本手法はレンズレスディジタルホログラフィックイメージング技術 [18, 19] に基づいている。図 1 にその概念図を示す。物体に入射する光強度は一様であると仮定する。物体の振幅と位相をそれぞれ A_{obj} , ϕ_{obj} とすると、物体平面での光の複素振幅は、このように $A_{obj} \exp(i\phi_{obj})$ となる。そして、光は物体から拡散板に伝播する。物体光の複素振幅は $\mathcal{P}_{obj \rightarrow d}[A_{obj} \exp(i\phi_{obj})]$ であり、ここで、 $\mathcal{P}_{obj \rightarrow d}$ は物体面から拡散板面へのビーム伝搬を表す。拡散板を通過する際、振幅は拡散板の透過率により減少し、位相は拡散板により変調される。拡散板を透過することによる振幅の透過率を t_d 、位相の変化を ϕ_d とすると、拡散板で拡散板を透過した物体光の複素振幅は $\mathcal{P}_{obj \rightarrow d}[A_{obj} \exp(i\phi_{obj})] \times t_d \exp(i\phi_d)$ となる。最後に、光は拡散板からセンサ面まで伝搬し、撮像素子面における複素振幅は $\mathcal{P}_{d \rightarrow sensor}[\mathcal{P}_{obj \rightarrow d}[A_{obj} \exp(i\phi_{obj})] \times t_d \exp(i\phi_d)]$ が得られる。ここで、 $\mathcal{P}_{d \rightarrow sensor}$ は拡散板からセンサ面へのビーム伝搬を表している。拡散板からセンサまで、光は物体の有無に関わらず同じ光路を伝搬する（図 2）。拡散板面における拡散板の複素振幅があらかじめ分かっていれば、拡散板の影響（透過率 t_d 、位相変調 ϕ_d ）を補償することができる。ディジタルホログラフィにより、撮像素子面上の拡散板の複素振幅のみを得る（図 2 左）。その後、光逆伝播により、拡散板面の複素振幅を得ることができます。拡散板での 2 種類の複素振幅を分割することで、拡散板による拡散面の振幅・位相変調の影響を除去することができます。この補正により、物体からの光波は拡散板の影響を受けていないかのように伝搬し、センサ面まで伝搬する。

拡散板を通過した物体の複素振幅の再構成を示す模式図である図 2 を参照しながら、物体の強度と位相を再構成する手順を説明すると、以下のようになる。（1）まず、物体を挿入しない状態でセンサ面上の拡散体の複素振幅を求める（図 2 の左図）。センサ面における複素振幅を得るためにには、強度画像と位相画像が必要である。強度画像は、参照ビームを遮断して撮影する。位相画像はデジタルホログラムから取得する。（2）光逆伝播計算により、拡散板面における複素振幅を再構成する。そして、拡散板の複素振幅の事前に情報

を取得する。(3) 次に、物体を挿入し、センサ面における拡散板を介した物体の複素振幅をデジタルホログラフィにより取得する。(4) 光逆伝播により、拡散板面における物体および拡散板両者の複素振幅を取得する。(5) その後、(4)で得られた複素振幅を(2)で得られた複素振幅で割ることにより、拡散板面における拡散板の複素振幅を補正する。(6) さらに、物体のみの複素振幅を物体面に伝搬させ、物体面における複素振幅を再構成する。光逆伝播により、任意距離の物体強度、位相が再構成される。

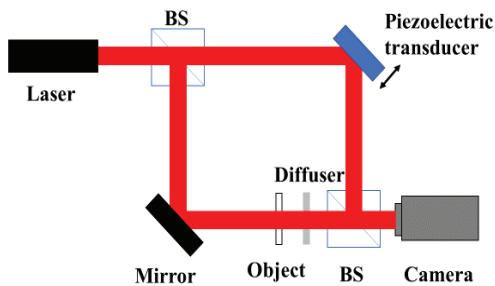


Fig. 1 Schematic for lensless phase shift digital holography of an object through diffusers. BS: Beam splitter.

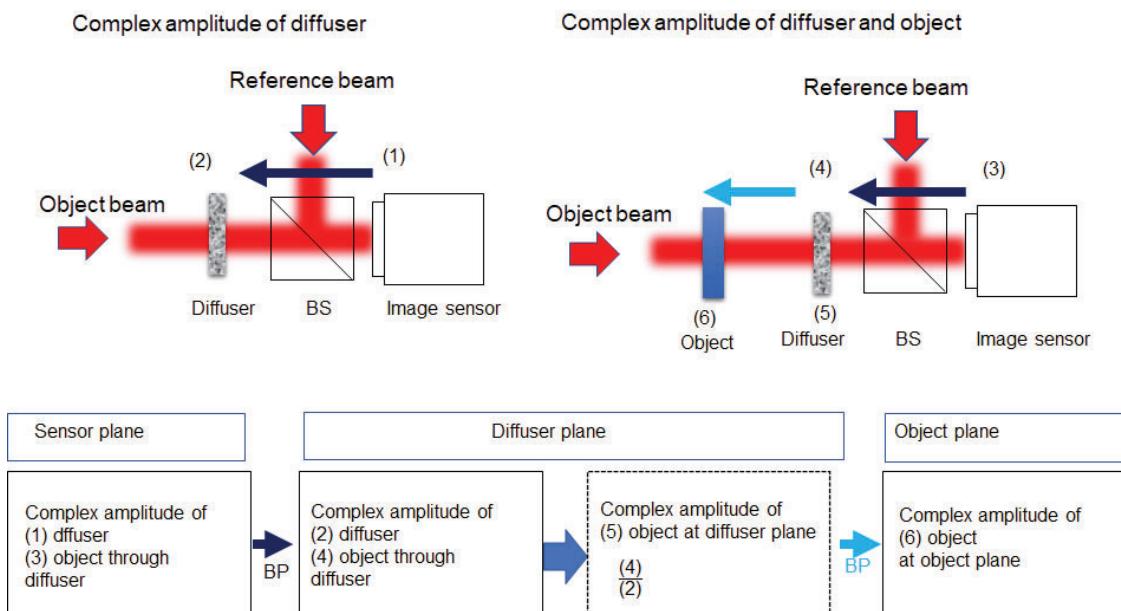


Fig. 2 Concept and diagram for reconstruction of object image behind a diffuser. BP denotes back beam propagation.

3. 実験方法

実験で用いた光学系は、位相シフトレンズレスデジタルホログラフィックイメージングに基づいている[21,22]。光源には、He-Ne レーザー（波長：632.8 nm）を用いた。拡散板としてホログラフィックディフューザーを挿入した。ピエゾ素子を用いた4段階位相シフトデジタルホログラフィ[23,24]により、カメラ面での拡散板のみの複素振幅と拡散板を透過した物体の複素振幅を取得した。その二つの複素振幅に対して光逆伝搬計算を行い、拡散板面での複素振幅を算出する。拡散板面において、拡散板を透過した物体の複素振幅から拡散板のみの複素振幅を除算することで物体のみの複素振幅を得る。最後に、物体のみの複素振幅に光逆伝搬計算を行い、物体の位置における物体の複素振幅を算出した。撮像素子には CMOS カメラ（有効画素数：1920 pixel×1440 pixel, 画素サイズ：3.63 μm × 3.63 μm）を使用した。撮影画像のうち中央部 1024 pixel×1024 pixel を用いた。位相物体としてウェッジ基板あるいは、平凸レンズを片側の光路に設置して実験を行った。

4. 実験結果

位相物体としてウェッジ基板（ウェッジ角度： $1^\circ \pm 5'$ ）を用いた実験結果を図 3 に示す。図 3 (a) は再構成したウェッジ基板の位相分布を表す。図 3 (b) は図 3 (a) の赤色の直線部分での位相断面図を縦軸に位相差、横軸にピクセル数で表したグラフである。拡散板背後に配置されたウェッジ基板の形状を可視化することができている。縦軸の位相差から物体の厚さを、横軸のピクセル数から距離 (mm) をそれぞれ求めることができる。その値からウェッジ角度を求めると、 0.967° となりカタログ値の範囲内であった[25]。

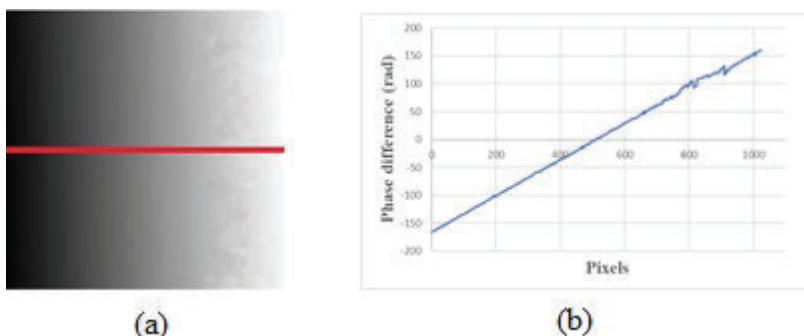


Fig. 3 (a) Reconstructed phase distribution of the wedge substrate behind the diffuser plate. (b) Phase cross section of the phase distribution shown in (a) with red line.

位相物体として、焦点距離 1000 mm の平凸レンズを用いた実験結果を図 4 に示す。図 4 (a) は再構成したレンズの位相分布を表す。図 4 (b) は図 4 (a) の黄色の直線部分での位相断面図を示す。図から、拡散板背後に配置されたレンズの形状を可視化することができ

ている[25].

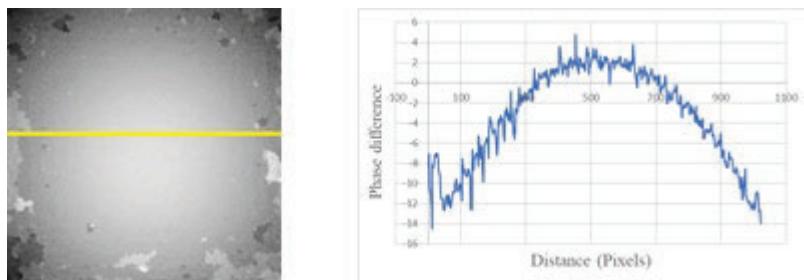


Fig. 4. Reconstructed phase image of plano-convex lenses behind a diffuser. (a) Estimated phase distribution and (b) The horizontal profile of phase distribution shown in (a) by the yellow line.

5. まとめ

本研究では、レンズレス位相シフトディジタルホログラフィを用いて拡散板背後に配置された位相物体を可視化し、算出した定量位相分布を評価した。位相物体としてウェッジ基板を用い、ウェッジ角度を算出することで、事前に取得した拡散板の位相を補正する手法の有用性を示した。

参考文献

1. A. K. Singh, D. N. Naik, G. Pedrini, M. Takeda, and W. Osten, “Exploiting scattering media for exploring 3D objects,” *Light: Sci. Appl.* **6**, e16219 (2017).
2. S. Li, M. Deng, J. Lee, A. Sinha, G. Barbastathis, “Imaging through glass diffusers using densely connected convolutional networks,” *Optica* **5**(7), 803-813 (2018).
3. O. Katz, E. Small, and Y. Silberberg, “Looking around corners and through thin turbid layers in real time with scattered incoherent light,” *Nat. Photonics* **6**, 549-553 (2012) 549-553.
4. J. Bertolotti, E. G. van Putten, C. Blum, A. Lagendijk, W. L. Vos, and A. P. Mosk, “Non-invasive imaging through opaque scattering layers,” *Nature* **491**(7423), 232–234 (2012).
5. J. W. Goodman, W. H. Huntley, D. W. Jackson, and M. Lehmann, “Wavefront-reconstruction imaging through random media,” *Appl. Phys. Lett.* **8** (12), 311–313 (1966).
6. H. Kogelnik and K. S. Pennington, “Holographic imaging through a random medium,” *J. Opt. Soc. Am.* **58** (2), 273–274 (1968).
7. H. Caulfield, “Holographic imaging through scatterers,” *J. Opt. Soc. Am.* **58** (2), 276-277 (1968).

8. J. Gaskill, "Imaging through a randomly inhomogeneous medium by wavefront reconstruction," *J. Opt. Soc. Am.* **58** (5), 600-608 (1968).
9. E. Leith, C. Chen, H. Chen, Y. Chen, D. Dilworth, J. Lopez, J. Rudd, P. Sun, J. Valdmanis, and G. Vossler, "Imaging through scattering media with holography," *J. Opt. Soc. Am. A* **9** (7), 1148-1153 (1992).
10. Y. Zhang, G. Situ, G. Pedrini, D. Wang, B. Javidi, and W. Osten, "Application of short-coherence lensless Fourier transform digital holography in imaging through diffusive medium," *Opt. Commun.* **286**, 56–59 (2013).
11. A. K. Singh, D. N. Naik, G. Pedrini, M. Takeda, and W. Osten, "Looking through a diffuser and around an opaque surface: A holographic approach," *Opt. Express* **22**(7), 7694-7701 (2014).
12. S. Li and J. Zhong, "Dynamic imaging through turbid media based on digital holography," *J. Opt. Soc. Am. A* **31** (3), 480-486 (2014).
13. W. Harm, C. Roider, A. Jesacher, S. Bernet, and M. Ritsch-Marte, "Lensless imaging through thin diffusive media," *Opt. Express* **22** (18) 22146-24156 (2014).
14. R. Li, T. Peng, M. Zhou, X. Yu, P. Gao, J. Min, Y. Yang, M. Lei, B. Yao, C. Zhang, and T. Ye, "Rapid wide-field imaging through scattering media by digital holographic wavefront correction," *Appl. Opt.* **58** (11), 2845-2853 (2019)
15. S. Kodama, M. Ohta, K. Ikeda, Y. Kano, Y. Miyamoto, W. Osten, M. Takeda, and E. Watanabe, "Three-dimensional microscopic imaging through scattering media based on in-line phase-shift digital holography," *Appl. Opt.* **58** (34), G345 (2019).
16. R. V. Vinu, K. Kim, A. S. Somkuwar, Y.-K. Park, and R. K. Singh, "Imaging through scattering media using digital holography," *Opt. Commun.* **439**, 218-223 (2019).
17. C. L. Hsieh, Y. Pu, R. Grange, G. Laporte, and D. Psaltis, "Imaging through turbid layers by scanning the phase conjugated second harmonic radiation from a nanoparticle," *Opt. Express* **18**, 20723–20731 (2010).
18. A. Igarashi, H. Arimoto, and W. Watanabe, "Reconstruction of complex amplitude by lensless phase-shift digital holography through an opaque glass plate," *Proc. SPIE* **10711**, 1071118 (2018).
19. W. Watanabe, S. Tabata, F. Araki, and H. Arimoto, "Looking through diffusive glass by digital amplitude/phase correction," JSAP-OSA Joint Symposia 2019 Abstracts OSA Technical Digest (Optical Society of America, 2019), paper 18a_E215_1.
20. S. Tabata, F. Araki, H. Arimoto, and W. Watanabe, "Reconstruction quality of digital holographic images using a holographic diffuser with different distances," BISC2020, BISCP-03 (Yokohama, Japan, 2020).

21. S. Tabata, H. Arimoto, and W. Watanabe, "Looking through diffusers by phase correction with lensless digital holography," *OSA Continuum* **3**, 3536-3543 (2020).
22. M. K. Kim, "Principles and techniques of digital holographic microscopy," *SPIE Rev.* **1**, 018005 (2010).
23. T.-C. Poon and J.-P. Liu, *Introduction to Modern Digital Holography: With Matlab* (Cambridge University Press, 2014).
24. I. Yamaguchi and T. Zhang, "Phase-shifting digital holography," *Opt. Lett.* **22**, 1268–1270 (1997).
25. 浅田将太, 田畠 蒼一朗, 有本英伸, 渡邊 歴, 「位相シフトディジタルホログラフィを用いた拡散板背後にある位相物体の可視化」, 日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2021 講演予稿集, 28aC9 (2021).

デジタルホログラフィック・フローサイトメトリー による赤血球の形態パラメータの取得

**Acquisition of morphological parameters of red blood cells
in flow cytometry using digital holographic microscopy**

船水 英希

Hideki Funamizu

室蘭工業大学大学院工学研究科もの創造系領域

College of Design and Manufacturing Technology, Muroran Institute of Technology

E-mail: funamizu@mmm.muroran-it.ac.jp

Digital holographic microscopy is actively applied to the blood testing on the basis of the quantitative phase information and therefore is an important role in the area of bio-imaging such as the measurement of thickness or refractive index of biological cells and cell morphology. In this study, we report an acquisition of morphological parameters of red blood cells in flow cytometry using digital holographic microscopy.

1. はじめに

デジタルホログラフィック顕微鏡（DHM）⁽¹⁾⁻⁽²⁾は無染色細胞を動的かつ3次元的に観察可能な定量位相顕微鏡としてバイオイメージング分野において重要な技術として研究されている。近年、DHMで取得される位相情報に基づく、細胞の特徴量の検出法が提案されている⁽³⁾。当研究室では短時間かつ多量の粒子や細胞を測定するフローサイトメトリー法をDHMに適用したデジタルホログラフィック・フローサイトメトリー(FCDHM)を用いて、酸素の運搬および人体の健康状態を示す重要な細胞である赤血球や止血機能に密接に関連する血液凝固構造の観察を行ってきた。これまでに、フローセルの流路内に血液を流して観察される赤血球の3次元的な位置や形状の計測およびカウンティングを実現してきた⁽⁴⁾。また、血液凝固構造においては、流路内で回転しつつ流れることに着目し、光トモグラフィを適用して複雑の3次元形状の完全な復元を実現してきた⁽⁵⁾。

本研究では、FCDHMにおいて赤血球に適用した3次元的な位置や形状の計測およびカウンティングの技術を血液凝固構造に適用し、流路内を流れる赤血球と血液凝固構造をDHMの位相情報に基づき自動検出・分類を行いつつ、各細胞の形態パラメータの取得を行った。

2. 実験

Fig. 1 に本研究で用いたマッハツエンダー型の DHM による FCDHM の光学系を示す。He-Ne レーザ (632.8nm, 21mW) を光源として、ビームスプリッタ BS₁ により光波を 2 分割する。一方の光波はスペイシャルフィルタ SF とレンズ L₁ によって平面波を生成し、参照光として使用する。もう一方の光波は計測するサンプルである赤血球および血液凝固構造を流すフローセルの流路部に照射し、その透過光を対物レンズ OB₂ (40 倍, $NA=0.85$) により拡大した後に、チューブレンズ L₂ によってコリメートして物体光とする。これら 2 つの光波は BS₂ により合波された後に、CCD カメラ (1024×1024 pixels, 画素ピッチ $3.45 \times 3.45 \mu\text{m}^2$, 75fps) で受光され、ホログラムが記録される。この光学系ではオフアクシス型を採用しており、BS₂ を傾けることで空間フィルタ法⁽⁶⁾により物体像の情報のみを取得した後に、角スペクトル法を用いてホログラムの再生処理を行う。

計測するサンプルは、フローセルの流路内に流した血液中の赤血球および血液凝固構造である。流路内に流す血液は、馬保存血液（ジャパン・バイオシーラム）を血漿と生理食塩水により希釈液して作成し、ヘマトクリット値を 0.02% に調整した後に 37°C で 30 分間加温する。その後、シリンジにチューブを取り付け、チューブ先端に希釈した血液を採取する。チューブをフローセル (Translume Inc., SF-300250-170-L) に接続し、オートマイクロメータによりシリンジのピストン部を押して血液を注入した。ホログラムは流路（幅 300μm, 深さ 250μm）の底面付近に焦点を合わせ、CCD カメラにより $120 \times 120 \mu\text{m}^2$ の範囲を 75fps で 70 秒間の動画撮影により取得する。

3. 解析

3・1 赤血球および血液凝固構造の形態パラメータと合焦距離の推定

本研究では、赤血球および血液凝固構造の位相情報に基づく形態情報として体積、平均位相値、直径、周長、投影面積の 5 種類のパラメータを取得する。まず、DHM により取得したホログラムを再生した際の、血球部の位相値 $\varphi(m, n)$ は次式で表される。

$$\varphi(m, n) = 2\pi(n_{RBC} - n_s) \frac{h(m, n)}{\lambda} \quad (1)$$

ここで, λ は光源の波長, $h(m, n)$ は血球部の厚み, (m, n) は画像のピクセルインデックス, n_{RBC} と n_s は赤血球および生理食塩水の屈折率を表しており, それぞれ文献値を用いる。体積は, 各画素の厚み $h(m, n)$ の総和と 1 画素の面積の積で与えられる。平均位相値は血球部の位相の平均値であり, 直径は血球部の中心から半径を求め, 角度平均処理後に 2 倍して取得した。周長およ

び投影面積は血球部の 2 値化像の輪郭部の画素数および画素の面積の総和から得られる。

次に, 赤血球と血液凝固構造の各合焦点距離の推定方法を Fig. 2 に示す。まず, ホログラムに角スペクトル法を適用し, 底面付近を合焦点距離として再生する。再生像の位相分布に背景ノイズの除去およびアンラップ処理を実行した後に, 任意に单一の赤血球と血液凝固構造を 1 つずつ選出し, 画像コントラストを用いたオートフォーカス法により各合焦点距離を推定する。

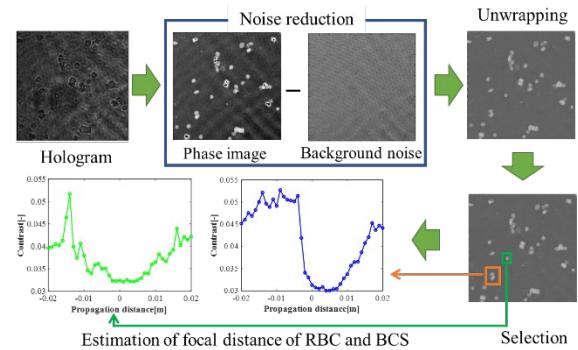


Fig. 2 Process of the estimation of focal distance.

3・2 赤血球および血液凝固構造の自動識別・分類

Fig. 3 に赤血球および血液凝固構造の自動識別の手順を示す。推定した 2 つの合焦点距離における再生像の位相分布を取得し, 背景ノイズを除去した後にアンラップ処理を行う。次に, 2 値化, 膨張, 穴埋め, 収縮のセグメンテーション処理により血球部の 2 値化像を得る。これらにラベリング処理を実行し, 画像内の連結成分を検出する。検出した連結成分に対して, 体積値による閾値処理を実行し, 単一の赤血球と血液凝固構造の判定を行った後, 各連結成分の重心を計算する。これらの処理を各フレームに対して行い, 動画内の全ての赤血

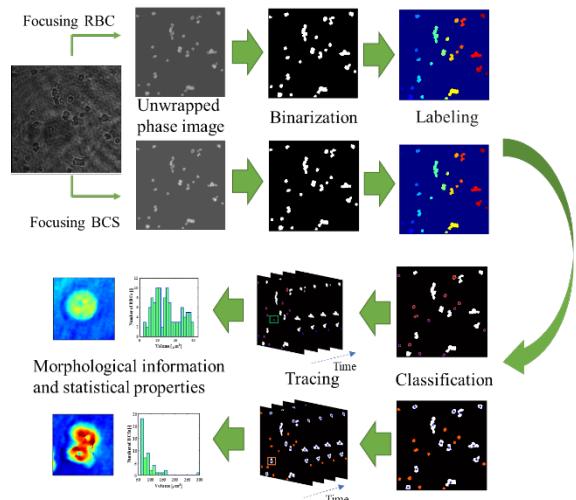


Fig. 3 Procedure for analyzing the detection and classification of red blood cells (RBCs) and blood coagulation structures (BCSs).

球と血液凝固構造を識別・分類し, 位相情報と重心を記録する。続いて, 取得した位相情報と重心から, 位置計測, 追跡処理, カウンティングおよび形態パラメータの取得を行う。

4. 結果

Fig. 4 に取得したホログラム動画における、1 フレーム目の解析結果を示す。Fig. 4(a)はアンラップ処理を適用後の位相分布、Fig. 4(b)は 2 値化処理により検出した各連結成分、Fig. 4(c)は Fig. 4(b)に体積値による閾値処理を適用して、単一の赤血球と血液凝固構造に分類した画像である。この図において、単一の赤血球および血液凝固構造の連結成分を赤色と白色とし、血液凝固構造に対しては重心にアスタリスクを示した。Fig. 4(c)の結果から、本方法で赤血球と血液凝固構造を分類可能であることが確認できる。次に、Fig. 5 に検出した単一の赤血球と血液凝固構造の位相分布を示す。Fig. 5 の 1 行目が単一の赤血球、2–3 行目が血液凝固構造の画像である。単一の赤血球においては流路内を流れる際に回転することがあるため、正対か回転した状態で検出されている。血液凝固構造は複数の赤血球により構成されているため、凝固時の赤血球の向きや個数によって形状が異なることが確認できる。

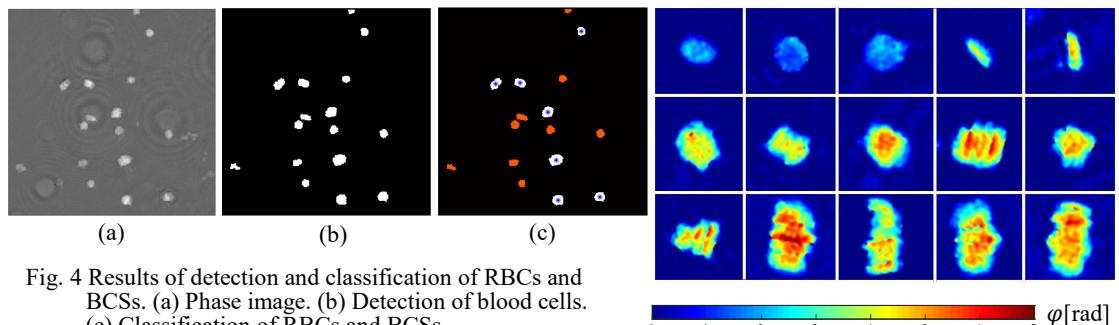


Fig. 4 Results of detection and classification of RBCs and BCSs. (a) Phase image. (b) Detection of blood cells. (c) Classification of RBCs and BCSs.

Fig. 5 Morphological images of RBCs and BCSs.

Fig. 6 に形態パラメータの統計データを計算した結果の一部を示す。Fig. 6(a)と Fig. 6(b)は単一の赤血球と血液凝固構造の体積、Fig. 6(c)と Fig. 6(d)は投影面積を示している。まず、体積を比較すると、単一の赤血球では $40 - 60 \mu\text{m}^3$ の分布が多く、馬保存血液の赤血球の体積が $36 - 50 \mu\text{m}^3$ であることから、おおよそ妥当な結果が得られたと考えられる。一方で、血液凝固構造では $80 - 150 \mu\text{m}^3$ 付近の分布が多く、2–3 個の赤血球の凝固構造が多く流れていたことが確認できる。また、投影面積も体積とおおよそ同様の傾向がみられるが、血液凝固構造を構成する赤血球の個数や向きによっては、単一の赤血球と同様の投影面積となることもあり、統計データの分布に重複部が生じる。

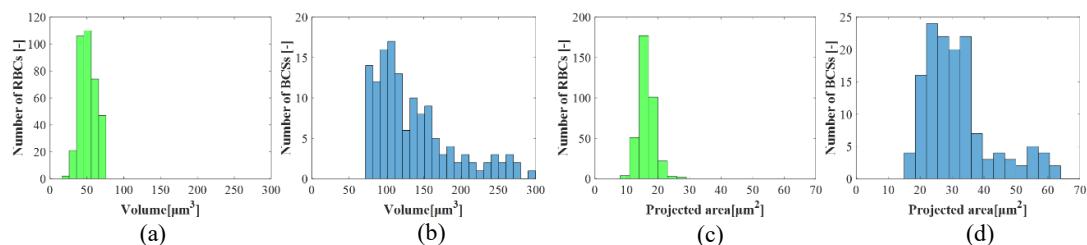


Fig.6 Statistical results of morphological information. (a) and (b) are the volume of RBCs and BCSs. (c) and (d) are the projected area of RBCs and BCSs.

5. まとめ

本研究では、FCDHM を用いて、フローセルの流路内を流れる血液中の赤血球と血液凝固構造の位相情報に基づく自動検出・分類を行い、おおむね良好な結果が得られた。また、検出した赤血球および血液凝固構造に対して形状計測による形態パラメータの取得と、それに基づくカウンティングを行い、統計データを取得した。今後の課題は、マルチフォーカス法の適用や検出・分類の精度向上があげられる。

参考文献

- (1) M. K. Kim, Digital holographic microscopy, (Springer, 2011).
- (2) T. Zhang, I. Yamaguchi, Optics Letters **23** (1998) 1221.
- (3) I. Moon et al., Optics Express **20** 9 (2012) 10295.
- (4) H. Funamizu, K. Sonoda, R. Goto and Y. Aizu, Proc. SPIE **10251** (2017) 1025113.
- (5) H. Funamizu and Y. Aizu, Journal of Biomedical Optics **24** 3 (2018) 031012.
- (6) E. Cuche, P. Marquet, C. Depeursinge, Applied Optics **39** (2000) 4070.

ガボールホログラムと深層学習を用いた全方位三次元計測
Omnidirectional 3D measurement using Gabor holograms with deep learning

吉川 宣一, 三宅 巧馬
Nobukazu Yoshikawa and Takuma Miyake

埼玉大学大学院理工学研究科
Graduate School of Science and Engineering, Saitama University,
255 Shimo-Okubo, Sakura-Ku, Saitama, 338-8570, Japan
E-mail: nyoshi@mail.saitama-u.ac.jp

Abstract: We propose an omnidirectional 3D shape measurement method using the outline information of an object obtained from Gabor holograms captured in omnidirectional measurement. In order to obtain correct outline information from Gabor holograms, an edge-enhanced image reconstruction method is developed. The 3D shape can be restored by the rigid body transformation of the outline information acquired from all directions. We also develop a fast outline reconstruction method using deep learning. The outline image obtained by deep learning provides clear outline information without noise and missing part. The proposed method can successfully restore the 3D shape of the objects with complex shapes.

1. はじめに

全方位三次元計測法は、人体計測、工業製品検査、3DプリンタやCGのための入力データ作成など幅広い分野で応用されている。実装が簡単なことから、物体形状に関する特徴を画像情報から抽出する方法が活発に研究されている。物体のシルエット画像から三次元形状を復元する技術は Shape from Silhouette (SFS) と呼ばれている。SFS では、シルエット画像を 360 度全ての方向から取り込み、シルエット画像の逆投影を使う視体積交差法を用いて三次元形状を復元する[1,2]。撮像システムの焦点位置から三次元形状を復元する技術は Shape from Focus (SFF) と呼ばれている。SFF では、ピントが合っている部分とその時の焦点位置から被写体の奥行きを推定する。全方位からの被写体の奥行き情報を統合することで三次元形状を復元することができる。これらの技術は画像ベースの測定法なので、原理的に撮像システムの性能、特にレンズ収差の影響を大きく受ける問題がある。

デジタルホログラフィ(DH)はレンズを使わないイメージング技術である。物体光の振幅と位相を干渉縞としてデジタル記録し、コンピュータを用いたデジタル再生により、再生像からレンズ収差の影響を受けない正確な物体光情報を得ることができる。一般に、DH を用いた形状計測では一方から観点で行われることが多い。また、二光束干渉光学系を用いる場合には除振機能を持つ光学定盤上で実験を行う必要がある。そのため画像ベース方式と異なり簡単に全方位三次元計測を行うことができない。

本研究では、ガボールホログラムで得られた物体の輪郭情報を用いる全方位三次元計測法を提案する。この方法では DH のデジタル焦点合わせにより得られる鮮明なエッジ再生像を物体の輪郭情報として用いる[3,4]。輪郭情報を全方位 360 度から求めて剛体変換により三次元形状を復元する。また明瞭な輪郭情報を得るために、ガボールホログラムのためのエッジ強調再生法を開発する。これによりガボールホログラムの再生において物体光に 0 次光と共役光が重畠される問題を解決し、簡単なオンライン光学系を用いて提案法を実装することができる。さらに全方位から撮影した多数のホログラムから輪郭再生像を高速に得るために深層学習を用いたガボールホログラムの輪郭再生法を開発する[5]。合焦位置を求めるための反復的な回折計算が不要になり、大量の輪郭再生像を高速に得ることができる。

2. ガボールホログラムのエッジ強調再生法による全方位三次元計測

全方位からガボールホログラムを記録するためのオンライン DH 光学系を図 1 に示す。物体に平行光を照射すると、物体のエッジで回折されたビームが物体波に、物体の周囲を通過したビームが参照波になり、物体背後の影領域の外側で干渉縞がつくられる。物体を回転台に載せて一定の角度で回転させて全方位からホログラムを記録する。再生計算では角スペクトル法を用いる。角スペクトル法ではホログラム面と再生面のサンプリング間隔が等しいため物体と同じ大きさで輪郭情報を得ることができる。ゆえに輪郭情報の分解能はイメージセンサの画素ピッチとなる。また別に撮影しておいた参照光強度をホログラムから引くことにより参照光成分の影響を抑制する。

ガボールホログラムをそのまま再生すると物体光と不要成分が重なって再生されてしまいエッジ情報を正確に得ることが難しくなる。そこでガボールホログラムの記録条件を考える(図 2)。影領域に近い干渉領域ではオンライン条件で干渉しており、外側の干渉領域ではオフアクシス条件で干渉していることがわかる。そこで影領域およびオンライン干渉領域を無効化して再生することを考えると、オフアクシス条件で記録された干渉縞のみが使われるため、エッジ情報のみが明瞭に再生されることになる。いくつかの条件を調べたところ干渉領域の第一極大までを無効化すると正確な輪郭位置で鋭いピークをつくるエッジ再生像が得られることがわかった。

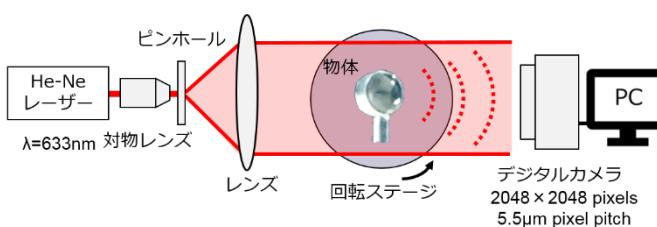


Fig. 1. 実験システム

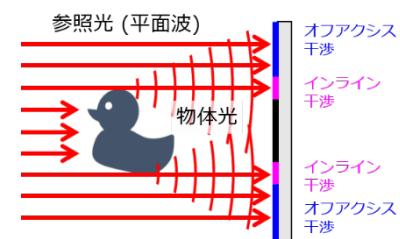


Fig. 2. ガボールホログラムの記録

輪郭情報を用いた全方位三次元形状の復元法について述べる。まずエッジ再生像を用いて物体の輪郭の三次元座標を求める。距離を少しづつ変化させながら再生像を計算する。正しい再生距離ではコントラストの高い輪郭再生像が得られ、それ以外の距離では不鮮明な再生像が得られる。点(X, Y)において輪郭再生像のピーク強度が最大になる再生距離 Z を求めると、点(X, Y, Z)は輪郭の三次元座標とみなすことができる。全ての輪郭の三次元座標を求めることで単一視点からの輪郭情報を得ることができる。この処理を 360 度全方向に対して行うことにより、点群で表された全方向からの輪郭情報を得ることができる。輪郭情報を剛体変換することにより全方位三次元形状が復元される。

提案法を検証するために光学実験を行った。物体は非球面レンズ (Edmund Optics, 0.43NA 4.50FL) と螺旋金属ワイヤを用いた。物体に平行光を照明して、回転ステージを 5 度ずつ回転させて 72 枚のガボールホログラムを記録した。回転ステージの回転軸はカメラの縦軸と同じになるように調整し、円柱物体を用いて全方向からの計測を行い回転中心を求めた。実験は一般的な作業台上に設置された実験システムを用いて行われた。図 3(a)-(c)に非球面レンズ側面のホログラム、エッジ再生像、非球面部分の三次元復元結果を示す。非球面形状の輪郭像が明瞭に再生されている。非球面レンズの側面で屈折した透過成分も再生されているが大きく屈折しているため非球面形状への影響はなかった。非球面部分の三次元形状を非球面レンズの仕様値から計算される理想形状と比較したところ平均誤差は 3.6 μm であった。図 3(d)-(f)に螺旋金属ワイヤに関する結果を示す。螺旋形状の復元に成功しており、提案法は複雑な形状を持つ物体でも適

用できることが実証された。

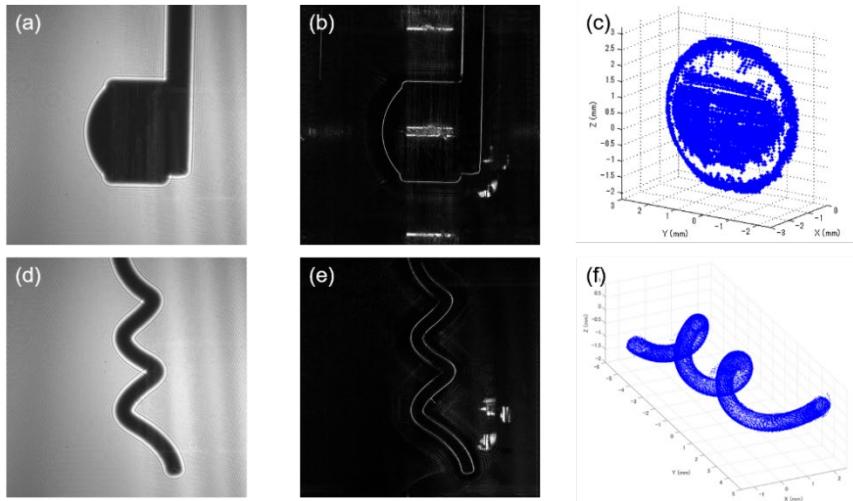


Fig. 3. 非球面レンズと螺旋金属ワイヤの(a),(d)ホログラム, (b),(e)エッジ再生像, (c),(f)三次元復元結果.

3. 深層学習を用いた全方位三次元計測

ガボールホログラムを用いた全方位三次元計測では、全方位から撮影された多数のホログラムの輪郭再生像を必要とするため、多数回の回折計算を必要とする焦点合わせ処理に莫大な時間がかかるという問題があった。そこで深層学習を用いた高速かつ高精度な輪郭再生法を開発した。

深層学習を用いた輪郭再生の概略を図 4 に示す。DNN のネットワークアーキテクチャに U-Net を使用した。まず深層学習を行うため輪郭像のデータセットを作成した。円柱と人形のガボールホログラムからエッジ強調再生法を用いて輪郭像を再生し、これを真値とする学習データを作成した。学習データセットはフルサイズのホログラムと輪郭像から無作為に切り出した 128×128 画素の画像 1000 組、評価データセットはフルサイズのホログラムと輪郭像 216 組とした。損失関数 MSE、学習率 0.0002、バッチサイズ 10、エポック数 200 の条件で深層学習を行った。評価データは非球面レンズのガボールホログラムとした。評価データのホログラムを学習済 DNN に逐次入力することで輪郭像を再生した。

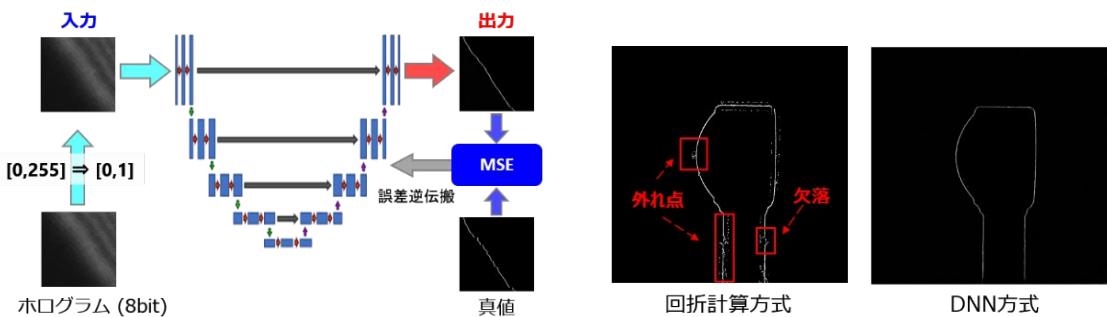


Fig. 4. U-Net による輪郭再生

Fig. 5. 回折計算方式と DNN 方式の輪郭再生像

DNN 方式と回折計算方式による輪郭再生像を図 5 に示す。回折計算方式による輪郭再生像には外れ点や欠落が含まれていたが、深層学習による輪郭再生像ではこれらが除去されており、より正確な輪郭形状を得ることができた。物体の全方位の輪郭像を得るための計算時間は 40 秒であり、従来法に対して 300 倍の高速化が達成された。

学習済 DNN で得られた全方位からの輪郭像を用いてシルエット情報をつくり、視体積交差法に基づいて物体の三次元形状を復元した。図 6 に各物体のガボールホログラムと 1 セル $5.5\mu\text{m}$ のボクセルを用いて形状復元を行ったときの結果を示す。人形のような複雑な形状を持つ物体でも復元できていることがわかる。非球面レンズの非球面部の断面形状を図 7 に示す。非球面形状と設計値に基づいた理論形状を比較したところ RMSE は $3.8\mu\text{m}$ であった。深層学習による輪郭像を用いた全方位三次元計測で正確な形状復元ができることがわかった。

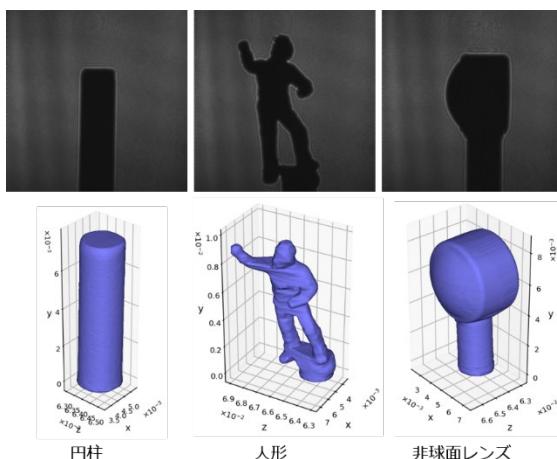


Fig. 6. 復元された三次元形状

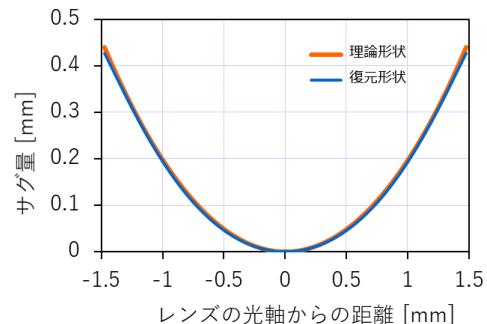


Fig. 7. 非球面レンズの断面形状

4. まとめ

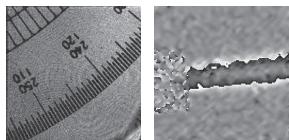
ガボールホログラムのエッジ強調再生法および深層学習に基づいた輪郭像再生法を用いた全方位三次元計測を提案した。全方位から撮影したガボールホログラムから抽出した輪郭情報を用いて三次元形状が復元できることを示した。さらに DNN により高速かつ高精度に輪郭像が得られ、輪郭像から得たシルエットを用いて三次元形状が復元できることを実証した。提案法の大きな特徴は、物体の表面情報ではなく、DH によって全方向から得られた物体の輪郭情報を利用して三次元計測を行うことである。

参考文献

- [1] D. P. Hamblen and M. R. Jones, "Lens curvature measurements by shadow projection profilometry", *Appl. Opt.*, 34, pp.8053-8054 (1995).
- [2] E. Simioni, F. Ratti, I. Calliari, and L. Poletto, "Three-dimensional modeling using x-ray shape-from-silhouette", *Appl. Opt.*, 50, pp.3282-3288 (2011).
- [3] Y. Someya, T. Mizumura and N. Yoshikawa, "Three dimensional shape retrieval using object contour estimated by Gabor-type digital holography", *The 24th Congress of the International Commission for Optics*, P4-30 (2017).
- [4] 三宅巧馬, 吉川宣一, 深層学習を用いたデジタルホログラフィによる輪郭像再生, *Optics & Photonics Japan 2021*, 28aC10 (2021).

時間多重記録を利用した
デジタルホログラフィによる
高速度動画イメージング

○安齋 亘, 角江 崇, 下馬場 朋禄, 伊藤 智義
千葉大学大学院工学研究院



目次

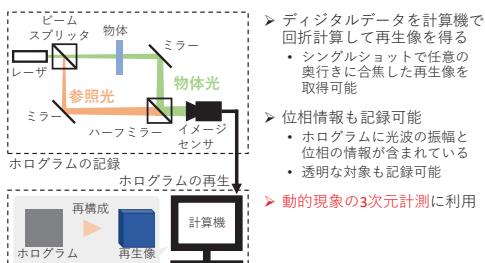
- 研究背景と目的
- 偏光多重方式
- 角度多重方式
- まとめと今後の展望

2021/10/28

2

デジタルホログラフィ

• ホログラムをイメージセンサで記録



2021/10/28

3

高速度イメージングと課題

• 高速度イメージングの例^[1,2]

- [1]ガスの流れ [2]超音波の伝搬
(180,000枚/秒) (100,000枚/秒)



【目的】
・より精細な現象解析
・高速に変化する現象の解析

【課題】
取得できる動画のフレームレートがイメージセンサの性能に律速される

イメージセンサの性能を超えて高速に記録を行う
時間多重記録を利用したデジタルホログラフィを提案^[3]

- [1] T. Kubue, et al., Opt. Lett. **36** 4131 (2011).
[2] Y. Tabuse, et al., Appl. Opt. **60** A179 (2021).
[3] W. Anzai, et al., The 2021 OSA Imaging and Applied Optics Congress, JTh6A.12 (2021).

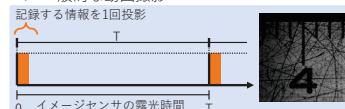
2021/10/28

4

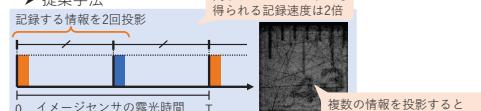
提案手法の概要

• イメージセンサ1回の記録で複数の時間情報を記録

▷ 一般的な動画撮影



▷ 提案手法

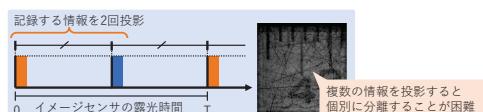


2021/10/28

5

提案手法の概要

▷ 提案手法



• 再生像を分離して記録・再生するための手法

- ▷ 1. 偏光多重記録を利用した時間多重記録^[4]
- ▷ 2. 角度多重記録を利用した時間多重記録^[5]

- [4] W. Anzai, et al., Opt. Express **29** 26AP3 (2021).
[5] W. Anzai, et al., Opt. Express **29** 28aC6 (2021).

2021/10/28

6

本研究の目的

- イメージセンサの同一露光時間内で複数のホログラムを記録
 - 異なる時間に形成されるホログラムを多重記録
- 時間多重記録が効果的なのは、高速度3次元動画イメージング
 - 対象：超音波場、衝撃波、プラズマ現象、放電現象など

超音波場による水滴の浮遊^[6]

空気中の火花放電

本研究では時間多重記録を利用した
デジタルホログラフィを
高速度イメージングで実証することを目的とする

[6] <https://www.kickstarter.com/projects/1348567444/levizen-levitate-water-and-feel-zero-gravity>
2022/1/14

ITOT lab.
Graduate School of Engineering
Chiba University

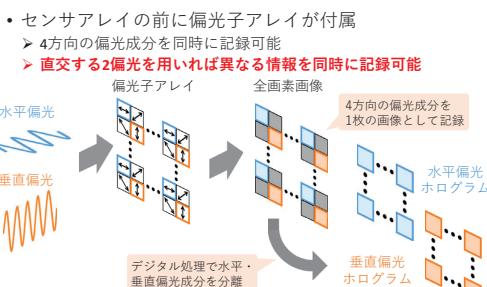
目次

- 研究背景と目的
- 偏光多重方式
- 角度多重方式
- まとめと今後の展望

ITOT lab.
Graduate School of Engineering
Chiba University

偏光イメージセンサ

ITOT lab.
Graduate School of Engineering
Chiba University



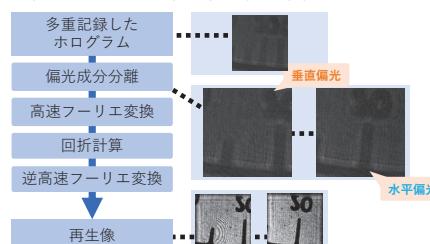
2021/10/26

9

多重化したホログラムの再生^[7,8]

ITOT lab.
Graduate School of Engineering
Chiba University

- 1枚のデータから2枚の再生像を取得



[7] M. Takeda, et al., *J. Opt. Soc. Am.* **72** (1982) 156.
[8] I. Tahara and Y. Arai, *Appl. Opt.* **60** (2017) F200.

2021/10/26

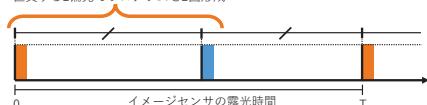
10

提案システム

ITOT lab.
Graduate School of Engineering
Chiba University

- 偏光イメージセンサを用いることで異なる情報を重ねて記録・分離することを実現
 - 直交する2偏光を用いることで互いの情報に非干渉
- 各偏光で形成するホログラムの形成タイミングをずらすことで目的を実現
 - イメージセンサの露光時間内に等間隔に2枚形成
 - 記録したフレームレートはイメージセンサの2倍

直交する2偏光でホログラムを2回形成



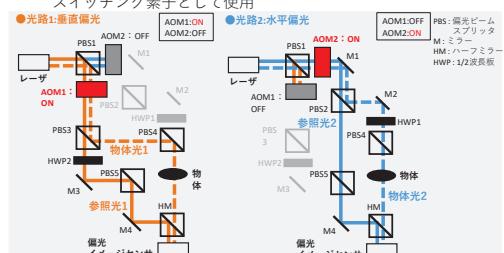
2021/10/26

11

考案した光学系

ITOT lab.
Graduate School of Engineering
Chiba University

- 偏光がそれぞれ直交する2光路を切り替える構成
 - 光路の切り替えには2つの音響光学変調器（AOM）をスイッチング素子として使用

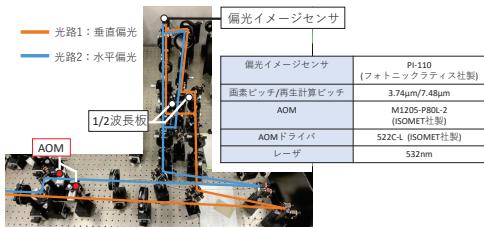


2021/10/26

12

構成した記録光学系

- 考案した光学系に基づいて構成
 - 1枚の画像から再生像を取得するためにはオフアクシスホログラフィを採用

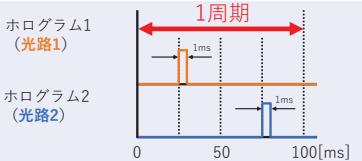


2021/10/26

ITOT lab.
Graduate School of Engineering
Chiba University

ホログラムの形成タイミング

- AOMへのトリガ信号で光の出力タイミングを制御
 - 周波数: 10Hz (1周期: 100ms)
 - 位相: 光路1=90°, 光路2=270°
 - Duty比: 1% (on時間: 1ms)



ホログラムの形成速度: 20フレーム毎秒

2021/10/26

ITOT lab.
Graduate School of Engineering
Chiba University

回転体の記録

- 約7.8 rpmで回転する分度器
- 偏光イマージセンサの撮影速度: 10フレーム毎秒
 - ホログラムの形成速度は2倍 (20フレーム毎秒)
- ホログラムの解像度: 868 × 868 px
 - 各偏光分離後は434 × 434 px

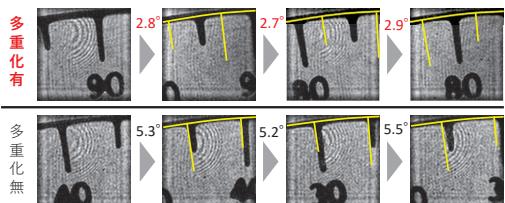


2021/10/26

ITOT lab.
Graduate School of Engineering
Chiba University

像再生結果 (振幅情報)

- 再生像間の分度器の目盛りの回転量で定量比較



提案手法を適用することで、適用しない場合より高速に記録が可能なことを示した

2021/10/26

ITOT lab.
Graduate School of Engineering
Chiba University

目次

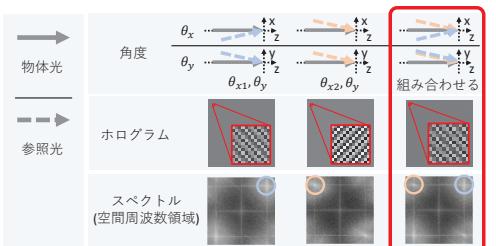
- 研究背景と目的
- 偏光多重方式
- 角度多重方式
- まとめと今後の展望

2021/10/28

ITOT lab.
Graduate School of Engineering
Chiba University

角度多重記録

- 複数の物体光にそれぞれ異なる参照光の角度を設定
 - ホログラムとして重ねて記録しても空間周波数領域で分離可能

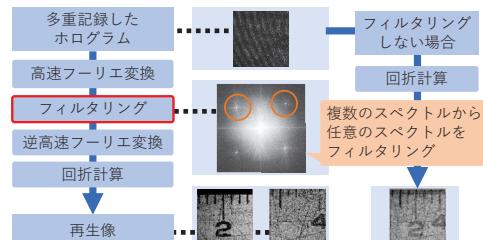


2021/10/28

ITOT lab.
Graduate School of Engineering
Chiba University

多重化したホログラムの再生^[7,8]

- 1枚のデータから2枚の再生像を取得



[7] M. Takeuchi, et al., *J. Opt. Soc. Am.* **72** 156 (1982).

[8] T. Tahara and Y. Arai, *Appl. Opt.* **60** F200 (2017).

2021/10/28

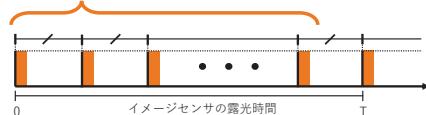
ITOT lab.
Graduate School of Engineering
Chiba University

提案システム

ITOT lab.
Graduate School of Engineering
Chiba University

- ホログラムの多重記録性を利用
 - 一度に複数のホログラムを記録・再生
- 複数のホログラムを形成するタイミングをずらすことで時間多重記録を実現
 - イメージセンサの露光時間内に等間隔にN回形成
 - 記録速度はイメージセンサの撮影速度のN倍
- 本研究では等間隔に2回形成し、記録速度は2倍

ホログラムをN回形成

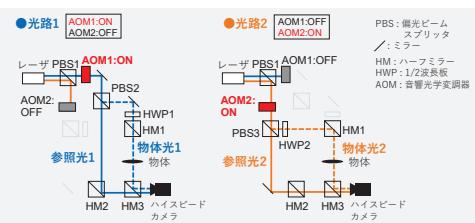


2021/10/28

20

考案した光学系

- 参照光角度が異なる2光路を切り替える構成
 - 光路の切り替えには2つの音響光学変調器（AOM）をスイッチング素子として使用



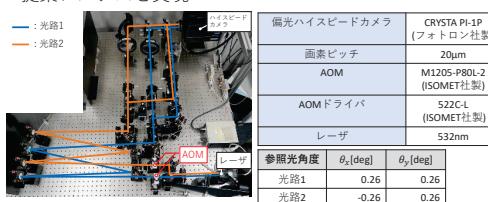
2021/10/28

ITOT lab.
Graduate School of Engineering
Chiba University

構成した記録光学系

ITOT lab.
Graduate School of Engineering
Chiba University

- 参照光角度が異なる2種類の光路を切り替えることで提案システムを実現



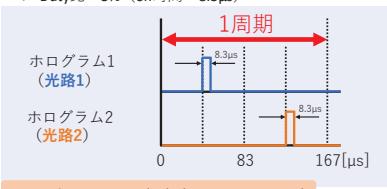
▶ 偏光ハイスピードカメラなので画素を1/4に間引いている

2021/10/28

22

ホログラムの形成タイミング

- AOMへのトリガ信号で光の出力タイミングを制御
 - 周波数：6,000Hz (1周期：1/6000 ≈ 167μs)
 - 位相：光路1=-90°, 光路2=-270°
 - Duty比：5% (on時間：8.3μs)



2021/10/28

ITOT lab.
Graduate School of Engineering
Chiba University

回転体の記録

ITOT lab.
Graduate School of Engineering
Chiba University

- 約2,000 rpmで回転する分度器
- カメラの撮影速度：6,000フレーム毎秒
 - ホログラムの形成速度は2倍 (12,000フレーム毎秒)
- ホログラムの解像度：512 × 512 px



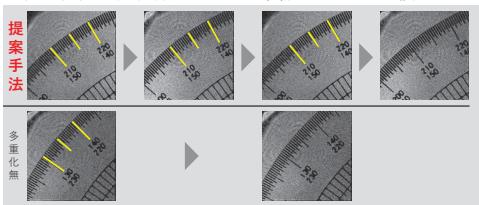
2021/10/28

24

像再生結果（振幅情報）

ITOT lab.
Graduate School of Engineering
Chiba University

- 再生像間の分度器の目盛りの回転量で定量比較



- 提案手法 : 1°**, 多重化無 : 2°
- 再生像から求めた回転量 : 2000rpm

2021/10/28

25

記録速度の高速化

ITOT lab.
Graduate School of Engineering
Chiba University

- 撮影速度と画素数はトレードオフ

➢ カメラの撮影条件 : 128 × 128 px, 87,500フレーム毎秒に設定
➢ 実際の記録速度 : 175,000フレーム毎秒

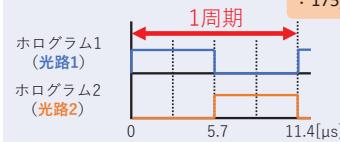
- AOMへのトリガ信号

➢ 周波数 : 87,500Hz (1周期 : 1/87500 ≈ 11.4μs)

➢ 位相 : 光路1=0°, 光路2=-180°

➢ Duty比 : 50% (on時間 : 5.7μs)

ホログラムの形成速度
: 175,000回/秒



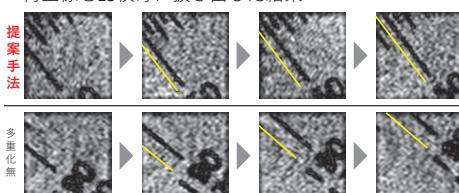
2021/10/28

26

像再生結果（振幅情報）

ITOT lab.
Graduate School of Engineering
Chiba University

- 再生像を15枚毎に抜き出した結果



- 提案手法 : 1° /15枚**, 多重化無 : 2° /15枚
- 再生像から求めた回転量 : 1944rpm

2021/10/28

27

- 研究背景と目的

- 提案手法

- 光学実験

- まとめと今後の展望

ITOT lab.
Graduate School of Engineering
Chiba University

まとめと今後の展望

ITOT lab.
Graduate School of Engineering
Chiba University

- まとめ

➢ 時間多重記録を利用して高速度動画イメージングの実証に成功
• 角度多重記録を利用して175,000フレーム毎秒の記録速度を達成

- 今後の展望

➢ 多重化数の増加および偏光多重記録^[9]の併用による
実記録速度の向上
• 今回の光学系でも35万フレーム毎秒が達成できる見込み
• 多重化数を6に増加させた場合^[8]105万フレーム毎秒を実現可能

[4] W. Anzai, et al., *OPJ* 2021 26AP3 (2021).
[9] M. Rubin, et al., *Opt. Lett.* **42** 4611 (2017).

2021/10/28

29

令和4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： 2022年3月28日(月)13:30～16:40

■場所： Zoomによるオンライン開催

■テーマ： デジタルホログラフィイメージング

■プログラム：

13:30-13:40 開会挨拶

13:40-14:20 渡邊歴，浅田将太，清須美将晃（立命館大）

「デジタルホログラフィを用いた位相物体の散乱イメージング」

14:20-15:00 船水英希（室蘭工大）

「デジタルホログラフィック・フローサイトメトリーによる赤血球の形態
パラメータの取得」

15:00-15:15 休憩

15:15-15:55 吉川宣一，三宅巧馬（埼玉大）

「ガボールホログラムと深層学習を用いた全方位三次元計測」

15:55-16:35 安齋亘，角江崇，下馬場朋祿，伊藤智義（千葉大）

「時間多重記録を利用したデジタルホログラフィによる
高速度動画イメージング」

16:35-16:40 情報コーナー，閉会挨拶

■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 4 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： 2022 年 5 月下旬から 6 月上旬ころを予定

■場 所： Zoom によるオンライン開催の予定

■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（徳島大学） | 前 会 長 | 橋本 信幸 |
| 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 |
| 鎌田 康昌（凸版印刷） | 坂本 雄児（北海道大学） | 下馬場朋禄（千葉大学） |
| 白木 厚司（千葉大学） | 白倉 明（アーティエヌ・ラボ） | 高橋 進（凸版印刷） |
| 松島 恭治（関西大学） | 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（コニカミルタブ・ラネタリウム） | 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（久保田和ヶ谷工房） | 酒井 朋子（千葉大学） |
| 佐藤 甲癸 | 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. 42, No. 1 (Mar. 2022)
 2022年3月28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