

もう一度咲かせたいホログラフィの花

石川光学造形研究所 石川 洵

古い話で恐縮だが、1978年「世界のホログラフィ展」で噂に聞いていたホログラムを初めて見て、私はホログラフィの魔法にかかってしまい、未だそれが解けない。

写真、特にカメラに興味のあった私は、「これだ」と直感して、それから5年ほどかけて14年勤めていた会社を辞め、単身ホログラフィの世界に飛び込んだ。

まず取り組んだのはホログラフィカメラの開発と商品化だった。

光学を修めたわけではなく、物理さえ高校で学んだだけだったので、ホログラフィの世界は、私にとって本当に学校のようなものだった。

分らない事が多く行き詰ると、厚かましく、出身でもない大学にサンプルを持参して教えを請いに行く。そうすると、親切に説明して下さり大方の問題が解決する。

そんな事が許された大らかな時代だった。

(1 ページにつづく)

目 次

- | | |
|--------------------------------------|------------|
| 1. 巻頭言：もう一度咲かせたいホログラフィの花 | 石川 洵表紙 |
| 2. 並列位相シフトデジタルホログラフィック顕微鏡とその応用 | 栗辻安浩, 他 3 |
| 3. ホログラフィック 3 次元蛍光イメージング | 的場 修, 他 10 |
| 4. デジタルホログラフィ粒子計測における反復像再生法 | 村田 滋, 他 15 |
| 5. 位相シフトデジタルホログラフィーによるすりガラスの奥の物体の可視化 | 渡邊 歴, 他 19 |
| 6. 強度輸送方程式を用いた定量位相計測 | 小室幸士, 他 23 |
| 7. 次回研究会のお知らせ | 巻末 |

実際、HODIC の先生方にはこうしてお世話になり感謝している。

おかげさまで、程なく忙しくなり、その後の15年は怒涛のような日々だった。

会社とは言え殆ど私一人、その気楽さで、しがらみ無くさまざまな事に関わることができた。主なものを列挙すると次のようなものだ。

小型から大型までのホログラフィカメラの開発、製作。

マルチプレックス・ホログラム作製装置の開発受託。

科学万博向け大型マルチプレックス・ホログラムの制作。

ホログラフィ映画の試作の受注。

ホログラフィスクールの開催や講師

科学館季節展示制作

美大非常勤講師（ホログラフィ）

一つ一つは数百から数千時間をかけた仕事なので、思い出すと第二の青春期のような懐かしさがよみがえる。

しかしながら、21世紀の声を聴く頃、ホログラフィは、まるで潮が引くように次第に寂しくなっていた。さて、あの頃のホログラフィの敗因は何だったのだろうか。

今にして思えば、当時のホログラフィはアナログだった、だから私にも何とか取り組めたとも言えるのだが、アナログ故に時代に取り残されて行ったのではないか。

対照的なのは写真の世界である。銀塩写真とデジタル写真は20年にも及ぶ長い並走期間を経て、だれの目にもデジタルが優位に立ったころ、その座をデジタルに明け渡した。

その陰には勿論、CCD、メモリー、プロセッサ、等の驚異的進歩がある。

そしてかつて銀塩写真があったことさえ忘れたようにデジタルの技術を享受している。

これに比べて、デジタル・ホログラフィは、HODIC 会員をはじめとする多くの研究者の努力で格段に進化していて大いに期待が持てるが、ホログラフィの要求する冗長性にまだ電子デバイスの能力が届かず、デジタルへの移行はいま少し時間がかかりそうだ。

それなのに、バトンタッチする前にアナログがドボンしたのだ。

考えてほしいのは、世の中のさまざまな三次元画像記録技術の中で、画像のクオリティに於いてホログラフィに勝る物は無いということ。

私は、やはりホログラフィが世の中で広く使われる物として復活してほしい。

今できる事は、完成していたアナログのホログラフィを、20世紀の幻の伝統工芸技術となってしまう前に、とりあえず蘇らせることしかないのではないか。

勿論、以降の技術革新を取り入れ、たとえば、画像入力手段で可能な所はデジタル化してハイブリッドにすることでコンピュータ画像とのリンクを確保することや、伝統工芸の

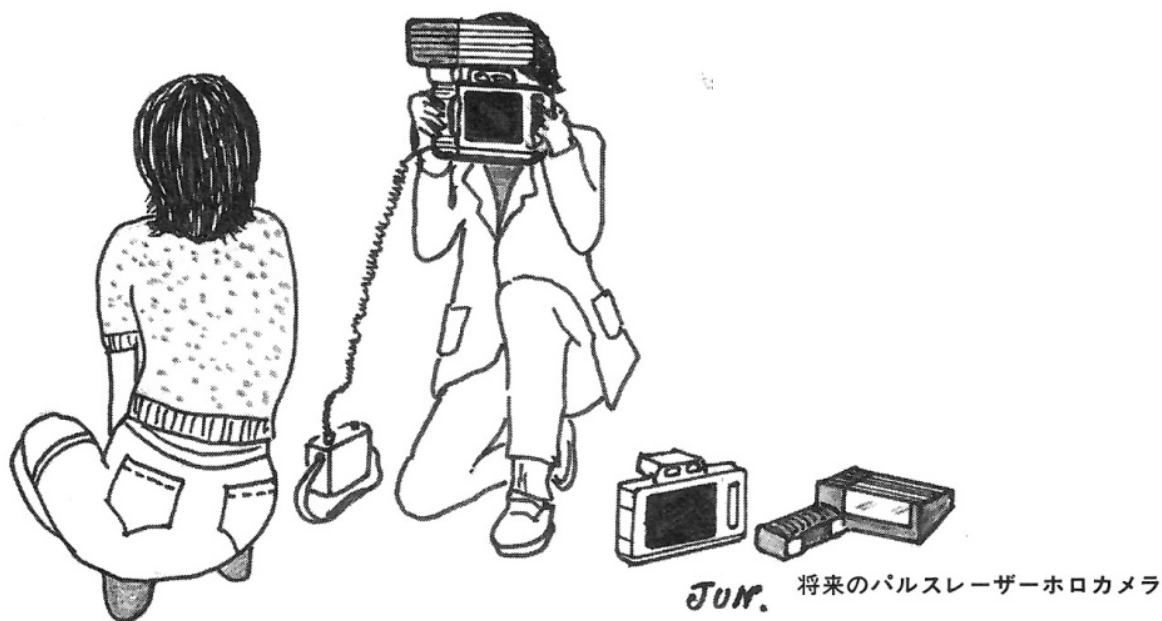
ように勘や手作業に頼るのでなく、可能な所は自動化することも大切である。

そして大切なことは、本物のホログラムを一人でも多くの人に見てもらい、再び仲間を増やしていく地道な努力ではないか。

そのためには絶えざる PR と、ワークショップ等で、ホログラムに触れてもらう機会を多くすることが重要で、カルチャースクール等に常設の講座も欲しい。そしてホログラフィに関わる我々の念願であるホログラフィミュージアム開設の夢も持ちたい。

一旦落ちた地の底から這いあがる努力と、今何ができるかの見極めが必要と思う。

資金ゼロでもできる展示やワークショップの機会を作る良い方法があったらご教示いただき、お力をいただきたいと思います。とりあえずは、「いいね」だけでも結構です。



できたらいいな！パルスレーザーのハンディホロカメラ ©1984

並列位相シフトデジタルホログラフィック顕微鏡とその応用

栗辻安浩^{1*}, 清水一希¹, 福田喬人¹, 西尾謙三¹, 夏 鵬², 的場 修³

¹京都工芸繊維大学 〒606-8585 京都市左京区松ヶ崎御所海道町

²産業技術総合研究所 〒305-8568 つくば市梅園 1-1-1 中央第2

³神戸大学 〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1

*E-mail: awatsuji@kit.ac.jp

アブストラクト 並列位相シフトデジタルホログラフィーは、位相シフトデジタルホログラフィーに必要な複数枚のホログラムを1枚のホログラムに空間分割多重し、シングルショットで記録する技術である。この技術により、動く物体に対して、高精度で3次元動画画像計測ができる。著者らは、並列位相シフトデジタルホログラフィーに基づく顕微鏡技術を開発し、その顕微鏡を構築してきた。本講演では、これまでに開発した顕微鏡とその顕微鏡で行った3次元動画イメージングや位相動画イメージングの結果を紹介する。

キーワード ホログラフィー, デジタルホログラフィー, 並列位相シフトデジタルホログラフィー, デジタルホログラフィック顕微鏡, 高速度イメージング

Parallel phase-shifting digital holographic microscopy and its application

Yasuhiro Awatsuji^{1*}, Kazuki Shimizu¹, Takahito Fukuda¹, Kenzo Nishio¹, Peng Xia², and Osamu Matoba³

¹Kyoto Institute of Technology Matsugasaki, Sakyo-ku, Kyoto-shi, 606-8585 Japan

²National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Tsukuba-shi, 305-8568, Japan

³Kobe University 1-1, Rokkodai, Nada-ku, Kobe-shi, 657-8501 Japan

E-mail: awatsuji@kit.ac.jp

Abstract Parallel phase-shifting digital holography (PPSDH) is a technique for recording multiple holograms required for phase-shifting digital holography with single-shot exposure. PPSDH is capable of high-precision and three-dimensional (3D) measurement of moving object. The authors has developed microscopy based on the PPSDH and constructed some microscope systems based on PPSDH. In this paper, we introduce the microscope systems. Also experimental results for 3D motion picture and phase motion picture obtained by the systems are described.

Keyword Holography, Digital Holography, Parallel Phase-Shifting Digital Holography, Digital Holographic Microscopy, High-Speed Imaging, 3D measurement.

1. はじめに

デジタルホログラフィー^[1]は干渉縞画像を撮像素子でホログラムとして記録し、このホログラムから物体光の複素振幅分布をコンピュータ内で数値再生する技術である。再生する奥行き距離を数値として任意に指定できるので、任意の奥行き位置での合焦画像が得られる。そのため、この技術では、焦点合わせに機械的な稼働が不要であり、記録した1枚の干渉縞画像から物体の3次元像を数値的に再構成できる。また、この技術では、物体の複素振幅分布が得られるために透明物体を通過させた光の位相変化を定量的に得られる。そのために透明物体の厚さ計測もできる。しかしながら高解像力の撮像素子であっても、その画素間隔は従来のホログラムに用いられていたホログラム記録材料には記録できていた干渉縞の間隔に比べて1桁以上大きい。そのため、デジタルホログラフィーは、物体光と参照光を撮像素子にほぼ垂直に照射する光学系を用いた in-line ホログラフィーが精力的に研究されている。

In-line ホログラフィーでは、物体光と参照光とが撮像素子にほぼ垂直に入射するために、このホログラフィーで得たホログラムから物体光を再生すると、非回折光と共役像が所望の像に重畳する。その結果、物体の正確な複素振幅分布が得られず、高精度計測が困難であった。この問題を解決するために位相シフトデジタルホログラフィー^[2]が考案された。

位相シフトデジタルホログラフィーは、参照光の位相を複数回変化させて、それぞれの位相に対してホログラムを記録する。記録した複数のホログラムから位相シフト計測法で用いられる計算により撮像素子上での物体光の複素振幅分布が得られる。この複素振幅分布を回折積分することで、撮像素子から任意距離での物体光の複素振幅分布が得られる。この方法では不要な像が重畳しない正確な再生像が得られる。しかし、参照光の位相がシフトされたそれぞれのホログラムは記録された時刻は異なる。そのため、動く物体に対して、この方法の適用は極めて困難である。

著者らは、動く物体に対しても位相シフト法が適用でき、不要な像が重畳しない正確な物体光の複素振幅を得る方法として並列位相シフトデジタルホログラフィー^[3-6]を提案した。また、著者らは、並列位相シフトデジタルホログラフィーに基づく3次元動画像システムを実証してきた^[7-14]。並列位相シフトデジタルホログラフィーに基づく顕微鏡や高速度動画顕微鏡も実証してきた^[15, 16]。しかしながら、これまでに構築した顕微鏡では横型の拡大光学系で構成されており、液体の入った容器の底に沈殿する物体等、顕微鏡試料の計測が困難である。近年著者らは、倒立型の拡大光学系で構成した並列位相シフトデジタルホログラフィック顕微鏡を構築している^[17, 18]。従来法では記録困難な物体を単一露光により記録・再生できる。本稿では、近年著者らが構築した倒立型の並列位相シフトデジタルホログラフィック顕微鏡とその顕微鏡で得た動画記録再生について紹介する。

2. 並列位相シフトデジタルホログラフイー

並列位相シフトデジタルホログラフイー^[3-6]の原理の概略図を Figure 1 に示す．この技術の基本的な考え方は，位相シフトデジタルホログラフイーに必要な位相が異なる複数の参照光で記録された複数のホログラムを 1 枚のホログラムに画素ごとに空間分割多重化してシングルショット記録することである．撮像素子上で，光軸に対して垂直な面内で周期的に変化した位相分布を持つ参照光を生成する．このような位相分布を持つ参照光を用いて記録されたホログラムから物体の像を再生する．再生には同じ位相シフト量をもつ参照光で記録された画素を抽出し，同じ位相シフト量ごとにホログラムを生成する．これらの位相シフト段階数と同数のホログラムを用いて従来の位相シフト法に則して物体光の複素振幅分布を計算する．

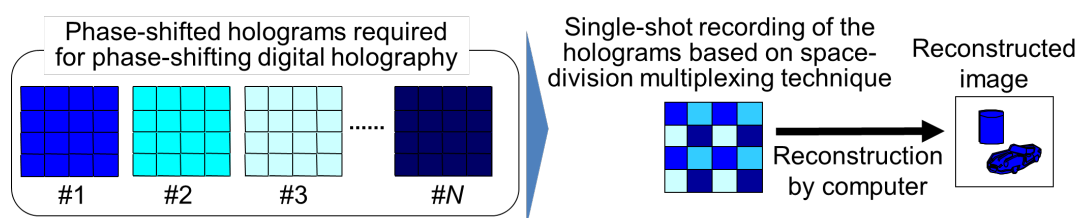


Fig.1. Principle of parallel phase-shifting digital holography.

3. 倒立型並列位相シフトデジタルホログラフィック顕微鏡

これまでに著者らは，数種の並列位相シフトデジタルホログラフィック顕微鏡を構築している^[15-18]．本講演では，倒立型拡大光学系を用いて構成した並列位相シフトホログラフィック顕微鏡システム^[17,18]を紹介する．

本システム^[17,18]の概要を Fig.2 に示す．レーザーからの光は半波長板を通過した後，偏光ビームスプリッターで二分される．一方の光は，反射鏡により鉛直方向上方に進行方向を変えられる．この光は反射鏡により水平方向に方向を変えられたあと，さらに反射鏡により進行方向を鉛直方向下方に進行方向を変えられる．この光が物体を照明し，この物体からの透過光(物体光)は拡大光学系に入射する．拡大光学系中の反射鏡により，物体光は水平方向に進行を変え，偏光板を通った後，ビームスプリッターに入射する．他方の光(参照光)も偏光板を通過後，ビームスプリッターに入射する．この 2 光波は，ビームスプリッターで結合された後，1/4 波長板を通り偏光検出機能を有する偏光高速度カメラへ到達する．偏光高速度カメラとして Photron FASTCAM-SA2-P を用いた．このカメラでは異なる 4 方向の直線偏光を画素ごとに検出できる機能を有している．このカメラの撮像素子の隣接画素間で参照光の位相を 90° シフトでき，2 段階位相シフト法^[6,19,20]に必要なホログラムをシングルショットで取得できる．取得したホログラムは，コンピューターによって像再生処理が行われる．

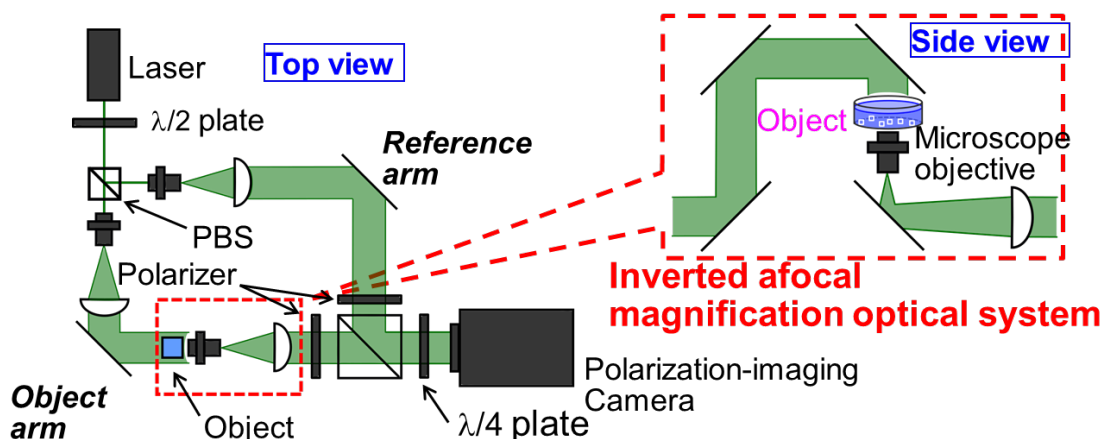


Fig.2. Schematic of the parallel phase-shifting digital holographic microscope using an inverted magnification optical system.

4. 動く微小物体の記録再生実験

構築システムを用いて、動く微小物体の3次元動画記録・再生を行った。飽和ミョウバン水溶液中で析出した微小ミョウバン結晶を物体として、その結晶が溶液中を沈む様子の動画像記録・再生を行った^[17, 18]。毎秒60コマで記録したホログラム動画像から再生した振幅動画像から抽出した10コマの画像をFig.4に示す。この図から、この結晶が溶液中を沈下する間の合焦動画像が得られていることがわかる。さらに、得られた動画からこの結晶の軌跡を求めた。その結果をFig.5に示す。このように、構築した倒立型並列位相シフトディジタルホログラフィック顕微鏡により微小物体の3次元動画記録・再生に成功した。

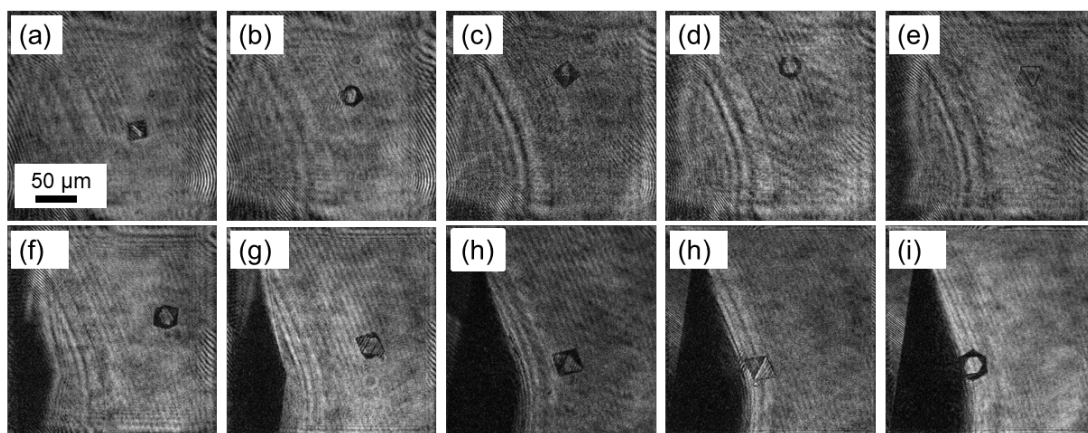


Fig.3. Reconstructed phase images of the minute crystal of alum. (a) 0 s, (b) 2 s, (c) 6 s, (d) 8 s, (e) 10 s, (f) 12 s, (g) 14 s, (h) 16 ms, (i) 18 s.

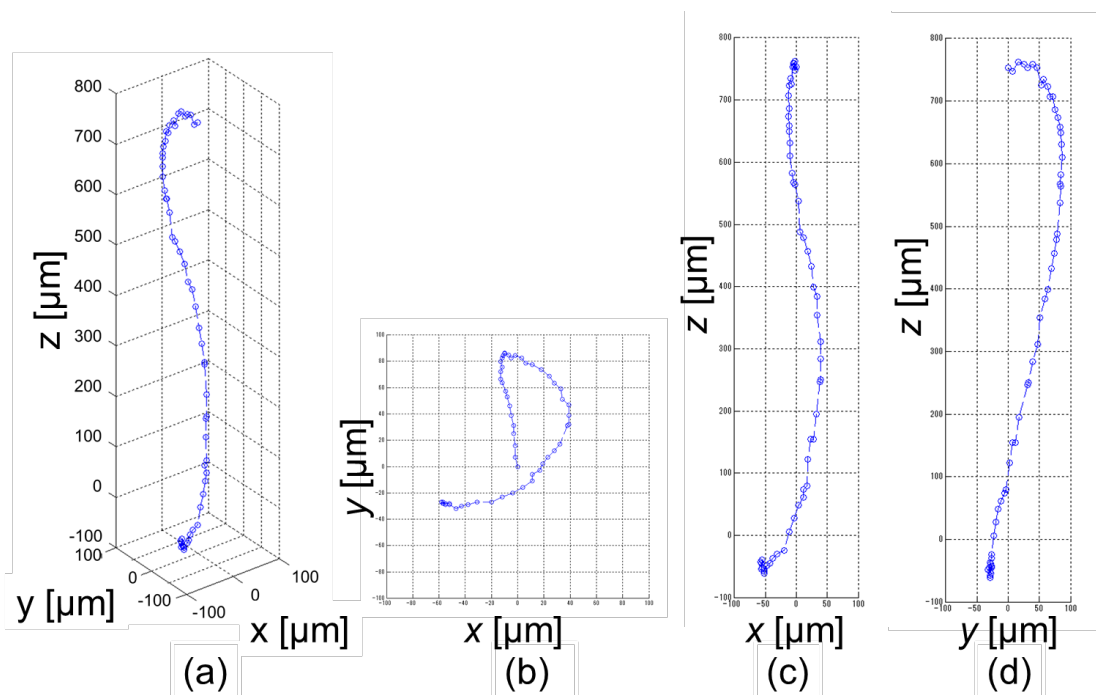


Fig.4. Trajectories of the minute crystal of boric acid. (a) Bird's-eye view, (b) xy -plane, (c) xz -plane, (d) yz -plane.

5. おわりに

近年、著者らが構築している倒立型の並列位相シフトデジタルホログラフィック顕微鏡について紹介した。紹介した顕微鏡で、飽和ミョウバン水溶液中を沈下するミョウバンの微小結晶の記録と再生を行った。得られた振幅画像から、微小結晶に常に合焦した動画像を得た。さらに、微小結晶の3次元軌跡も得た。

本技術は、微子領域を高速で動く3次元物体の計測、流れの3次元計測やフローサイトメトリー、生命科学やバイオテクノロジーにおける4次元(3次元(構造)+1次元(時間変化))顕微鏡^[15,16]、定量位相差動画顕微鏡をはじめとして種々の分野において強力な位相画像計測ならびに3次元計測技術になると期待できる。

6. 謝辞

本研究の実施に、(独)日本学術振興会 科学研究費補助金 挑戦的萌芽研究ならびに挑戦的研究(萌芽)で行われた。

文 献

- [1] J. W. Goodman and R. W. Lawrence, "Digital image formation from electronically detected holograms," *Appl. Phys. Lett.* **11**, 77-79 (1967).
- [2] I. Yamaguchi and T. Zhang, "Phase-shifting digital holography," *Opt. Lett.* **22**, 1268-1270 (1997)
- [3] M. Sasada, A. Fujii, Y. Awatsuji, and T. Kubota, "Parallel quasi-phase-shifting digital holography that can achieve instantaneous measurement," *2004 ICO International Conference Optics and Photonics in Technology Frontier*, 187-188, 2004.
- [4] M. Sasada, Y. Awatsuji, and T. Kubota, "Parallel quasi-phase-shifting digital holography implemented by simple optical set up and effective use of image-sensor pixels," *2004 ICO International Conference Optics and Photonics in Technology Frontier*, 357-358, 2004.
- [5] Y. Awatsuji, M. Sasada, and T. Kubota, "Parallel quasi-phase-shifting digital holography," *Appl. Phys. Lett.* **85**, 1069-1071 (2004).
- [6] Y. Awatsuji, T. Tahara, A. Kaneko, T. Koyama, K. Nishio, S. Ura, T. Kubota, and O. Matoba, "Parallel two-step phase-shifting digital holography," *Appl. Opt.* **47**, D183-D189 (2008).
- [7] T. Tahara, K. Ito, M. Fujii, T. Kakue, Y. Shimozato, Y. Awatsuji, K. Nishio, S. Ura, T. Kubota, and O. Matoba, "Experimental demonstration of parallel two-step phase-shifting digital holography," *Opt. Express* **18**, 18975-18980 (2010).
- [8] Y. Awatsuji, K. Ito, Y. Shimozato, T. Kakue, M. Fujii, T. Tahara, K. Nishio, S. Ura, T. Kubota, and O. Matoba, "20000-frames-per-second phase-shifting digital holography," *Technical Digest of 2010 OSA Optics & Photonics Congress, Biomedical Optics and 3-D Imaging, Digital Holography and Three-Dimensional Imaging (DH)*, DMA6 (2010).
- [9] M. Fujii, T. Kakue, K. Ito, T. Tahara, Y. Shimozato, Y. Awatsuji, K. Nishio, S. Ura, T. Kubota, and O. Matoba, "Construction of a portable parallel phase-shifting digital holography system," *Opt. Eng.* **50**, 091304 (2011).
- [10] T. Kakue, R. Yonesaka, T. Tahara, Y. Awatsuji, K. Nishio, S. Ura, T. Kubota, and O. Matoba, "High-speed phase imaging by parallel phase-shifting digital holography," *Opt. Lett.* **36**, 4131-4133 (2011).
- [11] T. Kakue, S. Itoh, P. Xia, T. Tahara, Y. Awatsuji, K. Nishio, S. Ura, T. Kubota, and O. Matoba, "Single-shot femtosecond-pulsed phase-shifting digital holography," *Opt. Express* **20**, 20286-20291 (2012).
- [12] T. Kakue, J. Yuasa, M. Fujii, P. Xia, T. Tahara, Y. Awatsuji, K. Nishio, S. Ura, T. Kubota, and O. Matoba, "Light-in-flight recording by parallel phase-shifting digital holography," *Appl. Phys. Express* **6**, 092501 (2013).
- [13] M. Fujii, T. Tahara, P. Xia, T. Kakue, Y. Awatsuji, K. Nishio, S. Ura, T. Kubota, and O. Matoba, "A4-sized parallel phase-shifting digital holography system," *J. Display Technol.* **10**, 132-137 (2014).

- [14] P. Xia, Y. Awatsuji, K. Nishio, and O. Matoba, "One million fps digital holography," *Electron. Lett.* **50**, 1693- 1695 (2014).
- [15] T. Tahara, K. Ito, T. Kakue, M. Fujii, Y. Shimozaoto, Y. Awatsuji, K. Nishio, S. Ura, T. Kubota, and O. Matoba, "Parallel phase-shifting digital holographic microscopy," *Biomed. Opt. Express* **1**, 610-616 (2010).
- [16] T. Tahara, R. Yonesaka, S. Yamamoto, T. Kakue, P. Xia, Y. Awatsuji, K. Nishio, S. Ura, T. Kubota, and O. Matoba, "High-speed three-dimensional microscope for dynamically moving biological objects based on parallel phase-shifting digital holographic microscopy," *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.* **18**, 1387-1393 (2012).
- [17] T. Fukuda, M. Shinomura, P. Xia, Y. Awatsuji, K. Nishio, and O. Matoba, "Three-dimensional motion-picture imaging of dynamic object by parallel-phase-shifting digital holographic microscopy using an inverted magnification optical system," *Opt. Rev.* **24**, 206-211 (2017).
- [18] T. Fukuda, Y. Awatsuji, P. Xia, T. Kakue, K. Nishio, and O. Matoba, "Review of three-dimensional imaging of dynamic objects by parallel phase-shifting digital holography," *Opt. Eng.* **57**, 061613 (2018).
- [19] X. F. Meng, L. Z. Cai, X. F. Xu, X. L. Yang, X. X. Shen, G. Y. Dong, and Y. R. Wang, "Two-step phase-shifting interferometry and its application in image encryption," *Opt. Lett.* **31**, 1414-1416 (2006).
- [20] T. Kakue, Y. Moritani, K. Ito, Y. Shimozaoto, Y. Awatsuji, K. Nishio, S. Ura, T. Kubota, and O. Matoba, "Image quality improvement of parallel four-step phase-shifting digital holography by using the algorithm of parallel two-step phase-shifting digital holography," *Opt. Express* **18**, 9555-9560 (2010).

ホログラフィック 3 次元蛍光イメージング

的場 修^{1*}, 全 香玉¹, Manoj Kumar¹, 栗辻安浩²

¹神戸大学 〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1

²京都工芸繊維大学 〒606-8585 京都市左京区松ヶ崎御所海道町

*E-mail: matoba@kobe-u.ac.jp

アブストラクト インコヒーレントデジタルホログラフィーは蛍光 3 次元イメージングを可能にする手法であり、バイオ分野への応用が期待されている。インコヒーレントデジタルホログラフィーを実現するためのアプローチとしては、自己干渉を利用するためマイケルソン型干渉計と共通光路型の 2 つに大別される。はじめにこの 2 つのアプローチの利点と課題について述べる。次に、我々が取り組んでいる共通光路型オフアキシス蛍光デジタルホログラフィーの手法とその結果について説明する。

キーワード デジタルホログラフィー, 蛍光 3 次元イメージング, 蛍光デジタルホログラフィー

Digital holographic 3D fluorescent imaging

Osamu Matoba^{1*}, Xiangyu Quan¹, Manoj Kumar¹, and Yasuhiro Awatsuji²

¹Kobe University 1-1, Rokkodai, Nada-ku, Kobe-shi, 657-8501 Japan

²Kyoto Institute of Technology Matsugasaki, Sakyo-ku, Kyoto-shi, 606-8585 Japan

E-mail: matoba@kobe-u.ac.jp

Abstract Incoherent digital holography enables us to record a three-dimensional (3D) fluorescence distribution and to reconstruct numerically the 3D distribution. It is expected to apply this technique to biological imaging. There are two approaches those are the Michelson-type interferometer and the common-path interferometer. First, we will describe the advantages and disadvantages of the two approaches. Then, our technique that is the common-path off-axis fluorescent digital holography is presented and the experimental results are provided.

Keyword Digital Holography, Fluorescent 3D imaging, Fluorescent digital holography.

1. はじめに

デジタルホログラフィー^[1,2]は物体光のもつ複素振幅分布を記録・再現するために、干渉強度分布をイメージセンサでデジタルホログラムとして記録し、計算機内で光波逆伝搬計算により元の 3 次元物体空間を断層像として再生する技術である。通常は、物体光と参照光の干渉が必要なため、可干渉距離の長いレーザー光が用いられる。特に、定量位相計測可能な 3 次元イメージング手法として盛んに研究されている^[3,4]。2008 年に J. Rosen と G. Brooker のグループがマイクロメートルオーダーの微小な蛍光物体に対して、位相変

調型の空間光変調素子により変調光と非変調光の同軸型干渉縞を撮影し、3次元再構成することに成功^[5]して以来、蛍光や白色光源、LEDを用いたインコヒーレント3次元イメージングの手法として注目されている。同軸型干渉計の場合には再生時に透過光、物体光、物体共役光の3つの成分が同時に再生されるため、位相シフト法により物体光のみを取り出し、再構成を行う。そのため、記録時に参照光の位相を3回程度変化させて複数枚の干渉画像を記録する必要があることから一度の計測で3次元情報を取得することができない。これを解決する手法の一つとして物体光と参照光の間に角度をつけて3つの再生項を分離するオフアクシスホログラフィーがある。蛍光を用いたオフアクシスホログラフィーとしては、ビームスプリッターで2光束に分離し、片側の反射鏡を傾けるマイケルソン型干渉計^[6,7]と共通光路型で回折光学素子を用いる^[8,9]方法の2つの方法がある。

我々は、共通光路型でオフアクシスホログラフィーが可能な蛍光デジタルホログラフィー法を提案している^[8,9]。本稿では、提案システムの概要と原理確認実験結果を示す。

2. インコヒーレントデジタルホログラフィー

本節では、インコヒーレントデジタルホログラフィーを実現する2つの実験系を示す。Fig. 1(a)はマイケルソン型干渉計であり、Fig. 1(b)は共通光路型干渉計である。いずれの系でも微小サイズの物体から出た蛍光を空間的に広げて2つの光波に分割し、再び合波することで自己干渉を実現する光学系となっている。Fig. 1(a)のマイケルソン型干渉計は、ビームスプリッターで2つの光波に分割した後、曲率半径の異なる凹面鏡で反射させ、ビームスプリッターで合波させる。片側の凹面鏡を傾けることでオフアクシスホログラムが形成される。ただし、空間的に異なる光路の2光波に分割するため、系が外乱に不安定であり、系の小型化が難しいという問題がある。Fig. 1(b)は同軸型の系であり、外乱に対して干渉縞が安定であり、小型化がしやすいという利点があるが、同軸型となるため再生時に透過

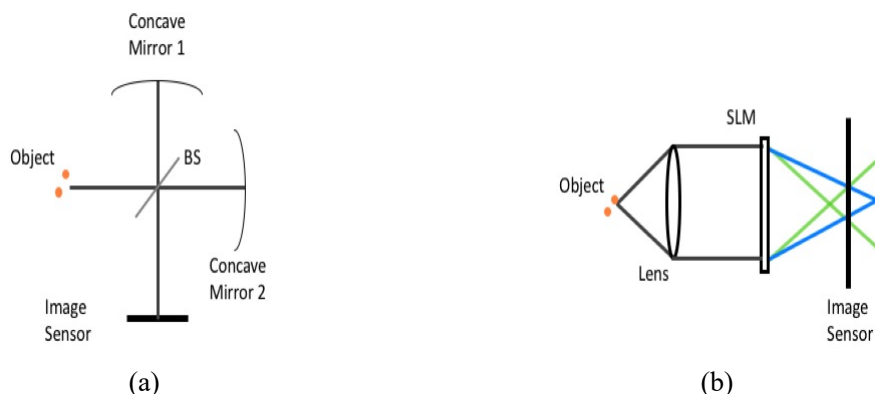


Fig.1. Two major configurations of incoherent digital holography. (a) Michelson-type interferometer and (b) common-path interferometer.

光や物体共役光が再生光に重畳する問題がある。そのため、位相シフト法を導入し、物体光のみを抽出する方法が用いられている。

我々は、Fig. 1(b)の光学系に回折格子を導入することでオフアクシス型とする方法を提案している^[8,9]。次節でその方法を紹介する。

3. 共通光路型オフアクシス蛍光デジタルホログラフィー

共通光路型オフアクシス蛍光デジタルホログラフィー^[8,9]の原理の概略図を Fig. 2 に示す。この原理の特徴としては、10 μm 程度の大きさの微小な蛍光物質から出た蛍光を平行光に近い状態にして、位相変調型空間光変調素子で、非変調光と変調光に分ける。この非変調光と変調光は直交する直線偏光になっているため、45 度の偏光子により干渉させる。また、変調光は凸レンズと回折格子が重畳された位相変調分布による変調を受けている。回折格子により非変調光に対して角度を持つためオフアクシス型の干渉縞が形成される。

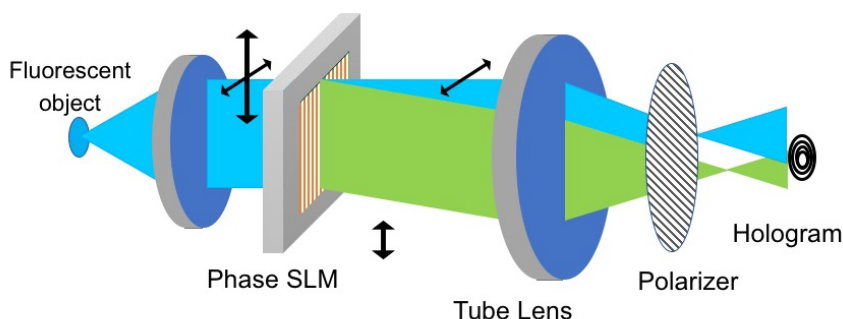


Fig.2. Principle of common-path off-axis fluorescence digital holography.

4. 原理検証実験

原理検証実験結果を示す。蛍光物質として直径 10 μm から 14 μm の蛍光ビーズを用いた。励起光源として波長 532 nm のレーザーを用いた。Fig. 3(a)にフォーカス位置に蛍光ビーズを設置したときの像を示す。3つの蛍光ビーズが見られる。この状態から蛍光ビーズを 80 μm 奥行きに移動させ、デフォーカスさせて取得したホログラム像を Fig. 3(b)に示す。位相変調型空間光変調素子には、焦点距離 800 mm と回折格子の周期 300 μm を用いた。Fig. 3(b)には同心円状の干渉縞が見られるが、ホログラムの中心付近に横縞の干渉が見られる。このホログラムからフーリエ変換し、物体光のみを抽出して、逆伝搬計算したときに得られた再生像を Fig. 3(c)に示す。3つのスポットが再生されていることがわかる。また、Fig. 3(a)と比較しても同じパターンが再生されていることがわかる。

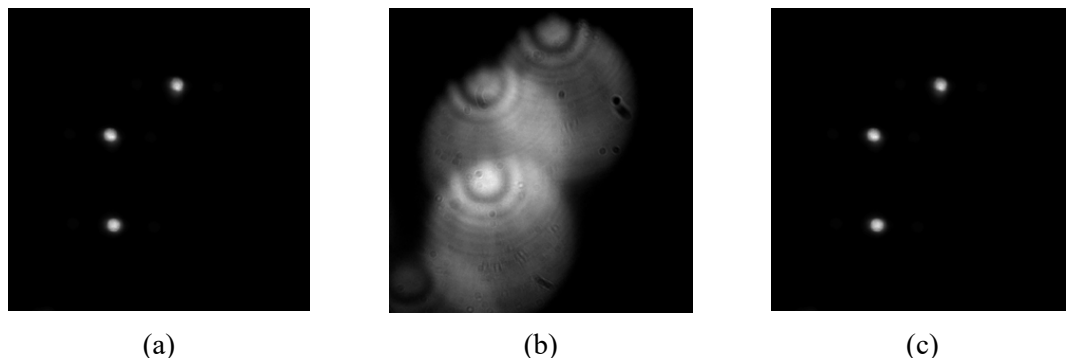


Fig.3. Experimental results of fluorescence imaging. (a) 2D focused image, (b) fluorescence hologram, and (c) its reconstructed image when the object is shifted by 80 μm along the depth.

5. おわりに

本稿では、バイオ応用に利用可能な蛍光3次元イメージング技術として共通光路型オフアクシスデジタルホログラフィーを紹介した。10 μm 程度の大きさの蛍光物質から発した蛍光を空間的に広げた後、位相変調型空間光変調素子で非変調光とレンズ及び回折格子を重畳させた位相変調による変調光を発生させ、その2つを干渉させることでオフアクシスホログラムが記録される。蛍光ビーズを用いた原理確認実験により奥行き方向にデフォーカスした場合にでも再生可能なことを実証した。

今後の課題として、3次元分布する蛍光物体の記録・再生と *in vivo* イメージングへの応用が挙げられる。

6. 謝辞

本研究は、(独)日本学術振興会 科学研究費補助金 15H03580, 17F17370, 18H03888 および CREST 17939097 の支援で行われものである。

文 献

- [1] J. W. Goodman and R. W. Lawrence, “Digital image formation from electronically detected holograms,” *Appl. Phys. Lett.* **11**, 77-79 (1967).
- [2] U. Schnars and W. Jüptner, “Direct recording of holograms by a CCD target and numerical reconstruction,” *Appl. Opt.* **33**, 179-181 (1994).
- [3] E. CuChe, F. Bevilacqua, and C. Depeursinge, “Digital holography for quantitative phase-contrast imaging,” *Opt. Lett.* **24**, 291-293 (1999).
- [4] B. Kemper and G. von Bally, “Digital holographic microscopy for live cell applications and technical inspection,” *Appl. Opt.* **47**, A52-A61 (2008).

- [5] J. Rosen and G. Brooker, “Non-scanning motionless fluorescence three-dimensional holographic microscopy,” *Nat. Photon.* **2**, 190–195 (2008).
- [6] J. Hong and M. K. Kim, “Single-shot self-interference incoherent digital holography using off-axis configuration,” *Opt. Lett.* **38**, 5196-5198 (2013).
- [7] T. Yanagawa, R. Abe, and Y. Hayasaki, “Three-dimensional mapping of fluorescent nanoparticles using incoherent digital holography,” *Opt. Lett.* **40**, 3312-3315 (2015).
- [8] X. Quan, O. Matoba, Y. Awatsuji, “Single-shot incoherent digital holography using a dual-focusing lens with diffraction gratings,” *Opt. Lett.* **42**, 383-386 (2017).
- [9] X. Quan, M. Kumar, O. Matoba, Y. Awatsuji, Y. Hayasaki, S. Hasegawa, and H. Wake, “Three-dimensional stimulation and imaging-based functional optical microscopy of biological cells,” *Opt. Lett.* **43**, 5447-5480 (2018).

デジタルホログラフィ粒子計測における反復像再生法

Iterative Image Reconstruction in Digital Holographic Particle Measurements

村田滋, 田中洋介

Shigeru MURATA, Yohsuke TANAKA

京都工芸繊維大学 機械工学系

Faculty of Mechanical Engineering, Kyoto Institute of Technology

Some iterative techniques of image reconstruction in digital holography are described in this report for improving the measurement accuracy of small particles distributed in three-dimensional space. The measurement accuracy is mainly evaluated in numerical simulation to examine the influence of the parameters of particle cloud on the accuracy. Experimental results are also presented to show the feasibility of the present techniques in real particle measurements.

1. 研究背景

粒子画像流速測定法 (Particle Image Velocimetry, PIV) は, 1980 年台からのデジタル画像処理技術の急速な発展を背景に, 流体力学分野における一つの主要な計測技術として成長してきた. 著者らは単眼観測による 3 次元 PIV を実現するために「観測ホログラムの数値像再生」を試み, これをスタートとして気泡運動計測, 高数密度噴霧計測, 微細繊維の形状・姿勢計測など, 数 μm から数十 μm 程度の微小体を対象としたデジタルホログラフィ計測法の開発に取り組んでいる. Fig. 1 はデジタルホログラフィ計測で取得できる微小体群の情報を纏めている. 観測ホログラムから計算した数値像再生空間の光情報から, 粒子など微小体の 3 次元空間位置, 数密度, 大きさ (粒径), 形状, アスペクト比の高いものなら姿勢, さらに時系列観測ホログラムが取得できれば微小体の運動速度分布など, 通常の計測では不可能な様々な量を同時計測できる. 以下では, 既報¹⁾⁻³⁾ を基として, デジタルホログラフィによる粒子計測精度の改善するための反復像再生法について述べる.

2. 反復像再生

本稿で述べる反復法は, Fig. 2 で示すように, 一旦検出された粒子情報が観測されたホログラムパターンに正しく対応するものか数値像再生によって改めて評価し, そのずれが認められれば, 検出結果を逐次更新していくものである. この図では粒子奥行き位置の修正を図る反復手順を概念的に示しており, 検出された粒子位置に置いた仮想粒子を反復計

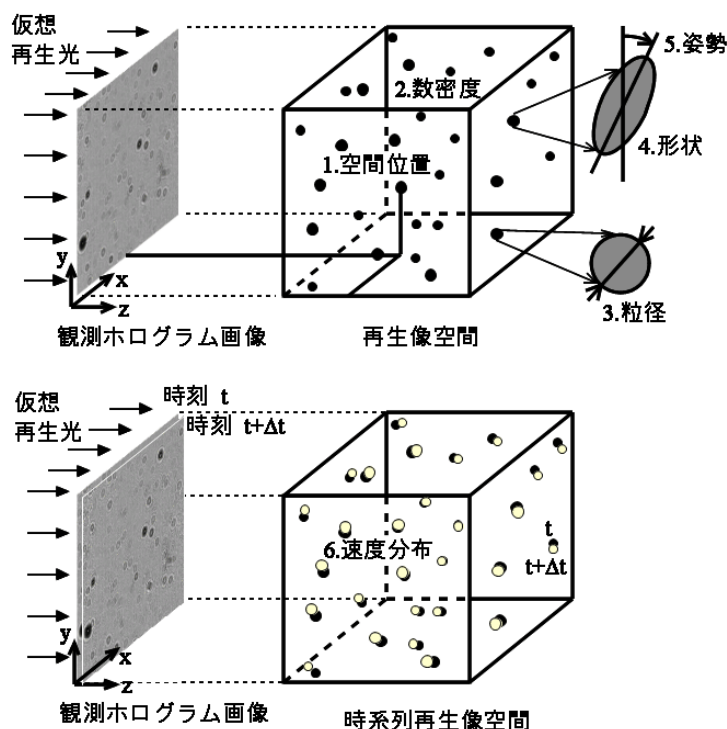
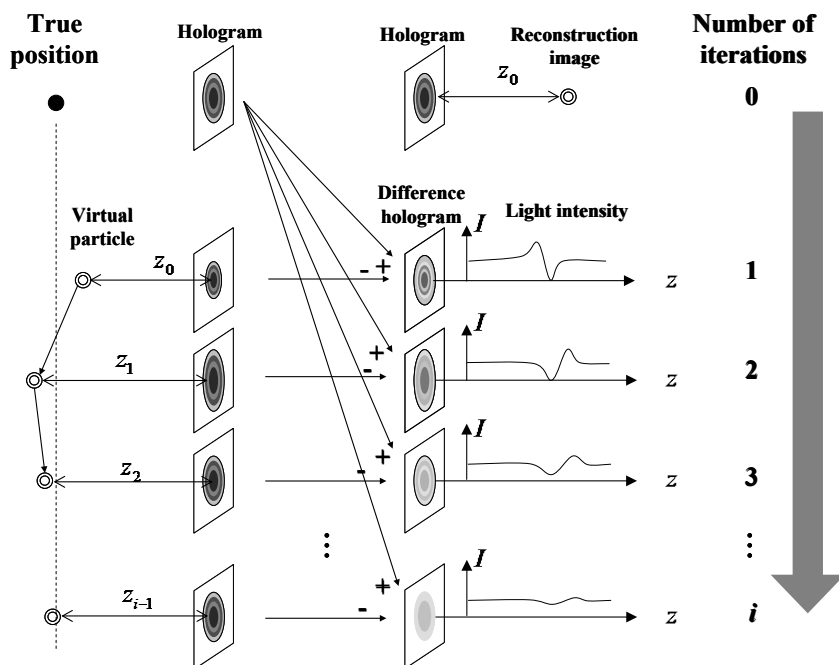


Fig. 1 Digital holographic particle measurements.

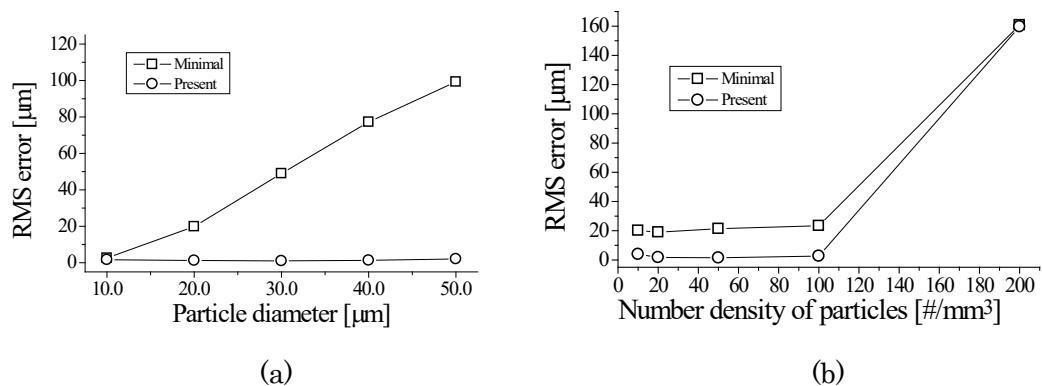
算過程で更新しており、図中には左から、仮想粒子奥行き位置、仮想粒子に対する仮想ホログラム、観測ホログラム（最上段）と仮想ホログラムとの差ホログラムおよび再生像の奥行き方向強度分布、反復計算段階を示している。粒子位置が適切に修正されるにつれて仮想ホログラムと観測ホログラムは一致するようになり、その差ホログラムには干渉縞パターンが生じなくなるため、差ホログラムを再生しても粒子像は現れなくなる。この粒子像が現れなくなった状態を判断できる指標を設け、反復計算を終了すれば良い。

近年、3次元 PIV の一つの到達点として複数台の高速度カメラで様々な方向から流れを観測するトモグラフィック PIV (Tomographic PIV) があるが、この手法でも上記の反復法に近い反復粒子再構成 (Iterative Particle Reconstruction, IPR) が粒子検出精度の向上に大きな役割を果たしている。これは、検出された粒子情報を用いて記録を仮想的に行い、実際に記録した画像と比較して相関値が高くなるように検出粒子の数や位置を変化させることで、検出情報をより正確なものに修正する手法であり、測定精度を改善する方針は同じである。著者らの報告である文献 3) では、多波長により再構成した再生像を用いて粒子位置を検出しているが、それらの検出情報に IPR 処理を施すことで、誤検出除去、粒子位置修正、未検出低減が効果的に行える。

Fig. 2 Iterative procedure for correcting particle position in depth ²⁾.

3. 性能評価

粒径が安定している可視化トレーサーを利用した場合を念頭におき、粒径を既知として行った数値シミュレーションの結果を示す。本節の結果はホログラムサイズ 512×512 pixel, 画素サイズ 2 $\mu\text{m}/\text{pixel}$, 奥行き位置 5mm, 奥行き範囲 1mm の数値モデルに対して得た。Fig. 3(a)は粒子数 25 個 (粒子数密度 50.1 $\#/\text{mm}^3$) の場合について検出位置における RMS 誤差に及ぼす粒径の影響を示している。□印は最小強度値法に基づく結果を示し、反復像再生法の結果は○印で示しており、粒径に関わらず本手法により RMS 誤差が著しく低い値となっていることがわかる。Fig. 3(b)は粒子数を変化させた時の RMS 誤差

Fig. 3 Effect of particle parameters on RMS error ²⁾.

を従来法による結果と比較しているが、粒子数密度 $100\#/mm^3$ までは本手法の結果は従来法よりも改善されていることがわかる。Fig. 4(a)に波長 632.8 nm で記録したチャンネル流のホログラム画像を示す。この画像と 532 nm の波長で記録したホログラム画像を利用して2波長法により粒子位置を算出し、時空間微分法により奥行き移動量を算出したベクトル図を Fig. 4(b)に示す。この結果から、速度のばらつきが大きいものの、 x - z 面内においてはポアズイユ流のような速度成分が確認できる。

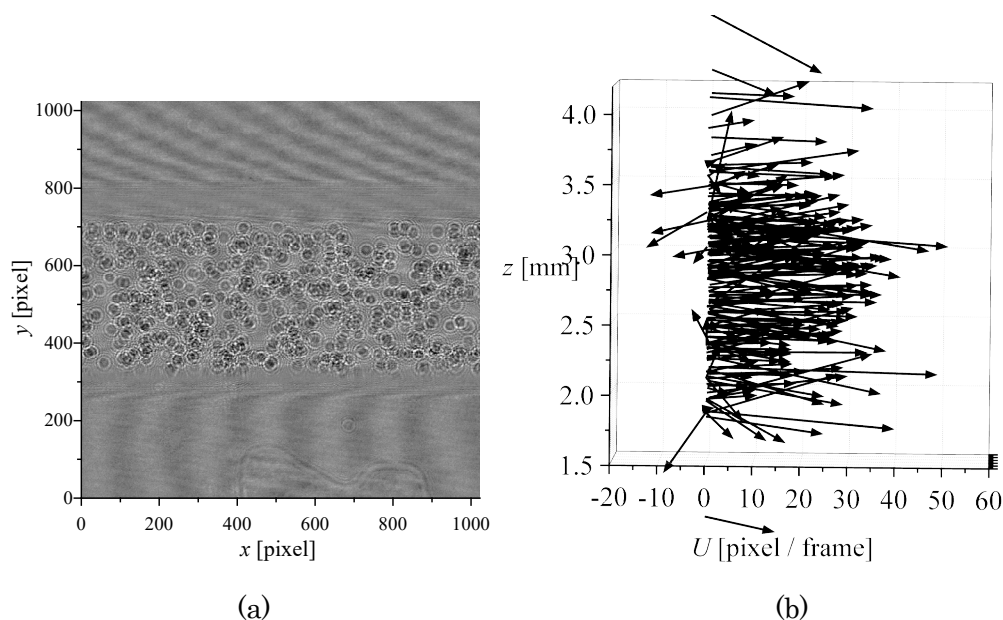


Fig. 4 Experimental results in a channel flow
by the iterative image reconstruction.

参考文献

- 1) 江川 宜範, 村田 滋, 田中 洋介, 仮想粒子デジタルホログラムを用いた粒子反復検出法, 日本機械学会関西支部第 88 期定時総会講演会講演論文集, No.134-1 (2013), p.2-27.
- 2) 村田 滋, 田中 洋介, 江川 宜範, 仮想粒子デジタルホログラムを用いた高精度粒子検出反復法, 日本機械学会第 92 期流体工学部門講演会講演論文集, No.14-20 (2014), Paper No.GS13, DOIhttps://doi.org/10.1299/jsmefed.2014._GS13-1_.
- 3) N. Hayashi, S. Murata, Y. Tanaka, Measurement of Particle Movement in 3D Flows Using Multi-wavelength Digital Holograms, Proc. of the Ninth JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference (October 28-30, 2017, Okinawa), Paper ID TFEC9-1559 (2017).

位相シフトデジタルホログラフィーによるすりガラスの奥の物体の可視化**Visualization of objects behind diffusive glass phase-shift digital holographic microscopy****渡邊 歴、荒木郁斗****Wataru WATANABE and Fumito ARAKI****立命館大学 理工学部****College of Science and Engineering, Ritsumeikan University**

Optical imaging through diffusive or scattering media has attracted much attention. We report on reconstruction of intensity and phase images of an object through a ground glass plate by 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または拡散媒体を通して画像化する技術が注目を集めている．散乱媒体，拡散媒体は，透過画像の品質を著しく低下させるため，光を用いて散乱媒質や拡散体の奥の物体の可視化は難しく技術が限られている．近年，レンズレスデジタルホログラフィー[1]を用いて拡散体の奥の物体の複素振幅を算出する研究が報告されている[2]．報告例では物体の光波を近似しているため分解能が低くなる点やすりガラスの拡散が大きい場合に物体の光波の再生が難しいなどの問題点がある．本研究では，レンズレス位相シフトデジタルホログラフィーにより，すりガラスの向こう側に配置された物体の複素振幅の再構成方法について報告する[3]．

2. 実験光学系

すりガラスの向こう側の物体の可視化には Fig. 1 に示すようなレンズレスデジタルホログラフィック光学系を作製した．光源には He-Ne レーザー（波長：632.8 nm）を用いた．光源から出た光をビームエキスパンダーにより拡大する．その後，ビームスプリッターにより物体光と参照光にわけると．物体光と参照光を重ね合わせ，撮像素子で干渉画像を取得する．参照光路ではピエゾ素子により光路差を制御する．ピエゾ素子を用いた4段階位相シフト法により位相を算出した．本実験では撮像素子とすりガラスの距離，すりガラスと物体との距離を変化させた．

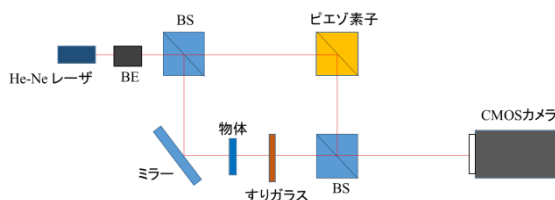


Fig. 1 Schematic for lensless phase shift digital holography of an object through diffuse media. BE: Beam expander, BS: Beam splitter.

3. すりガラスの奥にある物体の複素振幅の再構成

本研究における物体の強度と位相の再構成の手順を以下に示す.

1. 物体光路にすりガラスのみを設置し、参照光を遮断し、すりガラスのみの強度画像を取得する.
2. 参照光を導入し、位相シフト法により干渉画像を取得する.
3. カメラ面でのすりガラスの位相分布を計算する.
4. カメラ面からすりガラスまでの光逆伝搬を計算し、すりガラス面での複素振幅を算出する.
5. すりガラスの向こう側に被測定試料を設置する
6. 物体光路にすりガラスと試料を設置した状態で参照光を遮断し、強度画像を取得する.
7. 参照光を導入し、位相シフト法により干渉画像を取得する.
8. カメラ面でのすりガラスと試料の位相分布を計算する.
9. カメラ面からすりガラス面までの光逆伝搬を計算し、すりガラス面でのすりガラスと試料の複素振幅を算出する.
10. すりガラス面でのテストチャートの複素振幅を、すりガラスからテストチャートまでの光逆伝搬を計算し、テストチャート面でのテストチャートの複素振幅を求める.

4. 実験結果

物体としてテストチャートを用いた．厚さ 2 mm，拡散角が 21° のすりガラスを使用した．有効画素数が 1920×1440 ，画素サイズが $3.63 \times 3.63 \mu\text{m}$ の CMOS イメージセンサにより画像を取得した．撮像素子とすりガラスの距離を 11 cm，すりガラスとテストチャートの距離が 6 cm の場合の，テストチャート面での位相分布と強度分布の再構成画像をそれぞれ Fig. 2 (a), (b)で示す．

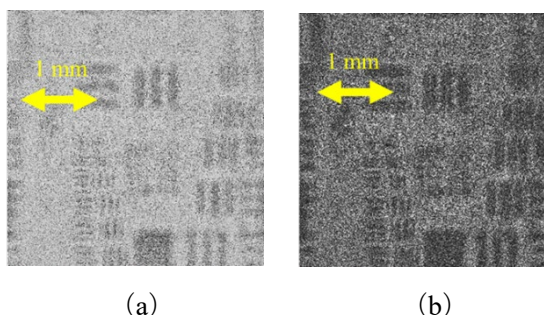


Fig. 2 (a) Reconstructed intensity of the object. (b) Reconstructed phase of the object. The distance between the sample and ground glass was 6 cm and the distance between ground glass and CMOS sensor was set to be 11 cm. The thickness of ground glass was 2 mm and diffusive angle was 21° degree. The sample was test-chart.

次に、すりガラスと物体の距離 9 cm，すりガラスとカメラの距離 6 cm の場合にすりガラスの奥にある物体の複素振幅の再構成を行った．試料での位相分布と強度分布の再構成画像をそれぞれ Fig. 3 (a), (b)で示す

すりガラスのみの位相分布画像と強度分布画像を事前に計測し、すりガラスの奥に試料を設置し、物体とすりガラスの複素振幅を計測後、光逆伝搬計算を行い、すりガラスの奥に設置された試料の複素振幅を再構成すること可能性を示すことができた．

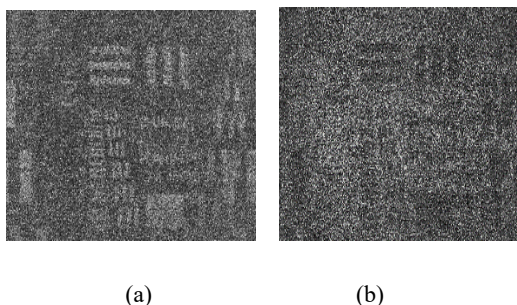


Fig. 3 (a) Reconstructed intensity of the object. (b) Reconstructed phase of the object. The distance between the sample and ground glass was 9 cm and the distance between ground glass and CMOS sensor was set to be 6 cm. The thickness of ground glass was 2 mm and diffusive angle was 21 degree. The sample was test-chart.

5. まとめ

位相シフトデジタルホログラフィーにより，すりガラスの位相分布を事前に計測し，すりガラスと物体の複素振幅から物体の複素振幅を再構成手法について述べた．

謝辞

実験を遂行していただきました立命館大学五十嵐成政氏ならびに有益なご助言をいただきました産業技術総合研究所有本英伸博士に感謝いたします．

参考文献

- 1) M. K. Kim, “Principles and techniques of digital holographic microscopy,” SPIE Review **1** (2010) 018005.
- 2) W. Harm, C. Roider, A. Jesacher, S. Bernet, and M. Ritsch-Marte, “Lensless imaging through thin diffusive media,” Opt. Express **22**, 22146-22156 (2014).
- 3) 五十嵐 成政, 有本 英伸, 渡邊 歴, 散乱体を透過した物体のレンズレスデジタルホログラフィ, 第 37 回レーザー学会講演会 (徳島大学, 2017 年 1 月) .

強度輸送方程式を用いた定量位相計測

Quantitative phase retrieval by means of transport of intensity equation

小室 幸士¹, 野村 孝徳²

Koshi Komuro¹, 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

Wakayama Univ.^{1,2}

Transport of intensity equation (TIE) allows ones to retrieve quantitative phase without optical interference. Because of its stability against vibration, the TIE is expected to be used for biomedical imaging. In this paper, the principle of the TIE-based phase retrieval is described. Furthermore numerical autofocusing algorithm is applied to the TIE-based phase retrieval. The method is termed “Autofocus TIE.” Experimental results are shown and confirm the feasibility of Autofocus TIE.

1. はじめに

生細胞などの無色透明な物体は染色なしで一般の光学顕微鏡を用いて観察することは困難である。Zernike の位相差顕微鏡は、直接光と回折光に位相差を与えることにより、物体の位相分布を明暗のコントラストに変換して可視化する。これにより物体の定性的な観察は可能となるが、位相分布を定量的に求めることができない。位相には物体の厚さ・屈折率といった情報が含まれるため、定量位相イメージング手法が盛んに研究されている。なかでも位相シフトデジタルホログラフィ¹⁾は高精度な位相計測手法としてよく用いられる。しかし、一般的にこの手法は物体光路とは別に追加の参照光路を必要とするため、光学系は複雑である。したがって、振動に弱いという欠点がある。また、Fienup のアルゴリズム²⁾に代表される反復位相回復法は、基本的には物体のフーリエスペクトルの計測に基づくが、解が発散する場合や、停滞問題という独特の問題を抱える。さらに膨大な反復回数を要する。

一方、強度輸送方程式 (TIE: Transport of Intensity Equation) を用いた定量位相計測手法³⁾は光波の干渉を用いず、深さ方向違いに取得した強度分布から位相計測が可能である。したがって光学系は単なるテレセントリック系であり、簡易である。また数値演算は高速フーリエ変換に基づく⁴⁾ため計算コストは低い。振動に対する安定性から近年、バイオイメージングへの応用が期待されており、研究が進められている⁵⁾。バイオイメージングをおこなう際に重要とされる性能としてオートフォーカシング機能が挙げられる。微小な細胞を観察する際は、高倍率な対物レンズが必要であるため、必然的に被写界深度は浅くなる。このような環境で物体が光軸方向へ移動するとフォーカス面からはずれてしまい、位相計測が困難となる。そこで、我々は TIE を用いた定量位相計測に対して鮮鋭度評価に基づく数値的オートフォーカシング手法⁶⁾を導入したオートフォーカス TIE を提案してきた⁷⁾。本稿では TIE を用いた定量位相計測の原理とオートフォーカス TIE について概説する。

2. 強度輸送方程式を用いた定量位相計測の原理

TIE を用いた定量位相計測原理について概要を述べる．TIE は近軸のヘルムホルツ方程式から簡単な数学的手続きを経て導かれ、

$$\nabla \cdot [I_z(x, y) \nabla \varphi_z(x, y)] = -\frac{2\pi}{\lambda} \frac{\partial I_z(x, y)}{\partial z} \quad (1)$$

とあらわされる³⁾．TIE は強度分布 $I_z(x, y)$ と位相分布 $\varphi_z(x, y)$ の変化を強度分布の光軸方向 z の微分と関連付ける式である． λ は光源の波長、 ∇ は (x, y) 平面に作用する勾配演算子である．式(1)右辺の強度分布の微分は有限差分近似

$$\frac{\partial I_z(x, y)}{\partial z} \approx \frac{1}{2d} \{I_{z+d}(x, y) - I_{z-d}(x, y)\} \quad (2)$$

により算出可能である．すなわち図 1 に示すように、 z 位置から光軸方向に $\pm d$ の距離だけ撮像素子を走査して強度分布を取得することにより微分値を算出できる．式(1)はフーリエ変換を用いることにより位相分布について解くことが可能である⁴⁾．したがって、撮像素子を光軸方向に走査して取得した強度分布群から定量位相計測が可能である．

3. オートフォーカス TIE

鮮鋭度評価に基づく数値的オートフォーカシングの手順を述べる．まず、TIE を用いて算出した位相分布と撮像素子を用いて取得した強度分布から複素振幅分布を算出する．算出された複素振幅分布を伝搬し、異なる深さ位置における振幅分布群を算出する．算出された異なる光軸位置の振幅分布の鮮鋭度 (sharpness) を評価する．鮮鋭度の評価結果を光軸方向に対して比較して物体位置を特定する．物体の振幅が一樣な場合は、鮮鋭度が最も低くなる位置を物体位置として特定する．一樣でない場合は、鮮鋭度が最も高くなる位置を物体位置として特定する．このような鮮鋭度評価に基づく数値的オートフォーカシングは従来からホログラフィック顕微鏡に用いられている⁶⁾．代表的な評価関数に、

$$v_z = \frac{1}{N^2} \sum_{x,y} \{a_z(x, y) - \bar{a}_z\}^2, \quad (3)$$

$$g_z = \iint \sqrt{\left(\frac{\partial a_z(x, y)}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial a_z(x, y)}{\partial y}\right)^2} dx dy, \quad (4)$$

$$L_z = \iint \{\Delta a_z(x, y)\}^2 dx dy \quad (5)$$

がある．式(3)は振幅分布の分散である．式(4), (5)はそれぞれ振幅分布の勾配とラプラシアンに基づいている．ここではそれぞれ、分散、勾配、ラプラシアンに基づく評価関数と称することにする． $a_z(x, y)$ は異なる z における伝搬後の振幅分布である． N は画素数であり、 $\bar{}$ は平均を

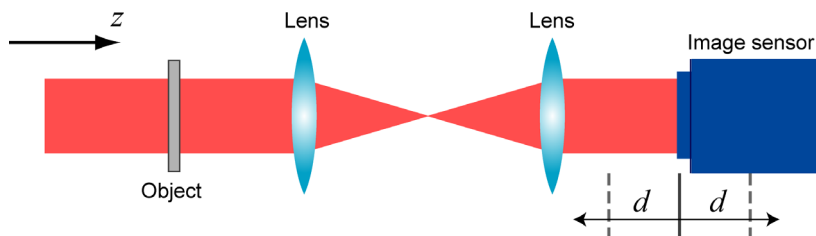


図1 TIE を用いた位相計測に用いる光学系

あらわす．本研究では，TIE を用いた位相計測において三つの評価関数の性能を実験的に検証・比較した．

4. 光学実験

ゾウリムシの標本を計測対象として光学実験をおこなった．光源には中心波長 685.2 nm ，半値全幅が 8.3 nm のスーパールミネッセントダイオードを用いた．用いた撮像素子の画素サイズは $4.65\text{ }\mu\text{m}$ である．はじめに，計測対象を撮像素子から 65 mm 離れた位置に配置し，オートフォーカス TIE により物体位置を特定した．なお，走査距離 d は 1 mm とし，伝搬計算の深さ方向分解能は，実験条件により定まる被写界深度に基づき， 0.1 mm とした．次に動的物体を想定し，物体を光軸の正方向に 1 mm 移動させ，同様の計測をおこなった．物体移動前後の特定位置の差を算出することにより，三つの評価関数の性能を比較した．

物体移動前後においてそれぞれの評価関数により特定された位置(伝搬距離)を表1に示す．特定された物体位置の差を比較すると，勾配を用いた場合に，実際の移動距離である 1 mm に対して誤差が小さく，高精度に物体位置を特定していることがわかる．続いて，それぞれの評価関数を用いて特定された光軸位置における振幅分布および位相分布を図2に示す．振幅分布を比較すると，分散，ラプラシアンを用いた場合は，明らかにデフォーカスされた振幅分布が得られていることがわかる．一方，勾配を用いて特定された位置において取得された振幅分布は物体移動前後どちらにおいてもフォーカスが合った分布が得られている．位相分布を比較すると，分散，ラプラシアンを用いた場合は物体移動前後で異なる位相値が得られているのに対し，勾配を用いた場合は同等の位相値が得られている．以上の実験結果から勾配に基づく評価関数を用いることにより高精度に物体位置が特定可能なことが実証された．

表1 特定された物体位置の比較

Focus function	Variance	Gradient	Laplacian
Distance (before) [mm]	63.4	64.8	64.3
Distance (after) [mm]	62.6	63.7	63.1
Difference [mm]	0.8	1.1	1.2

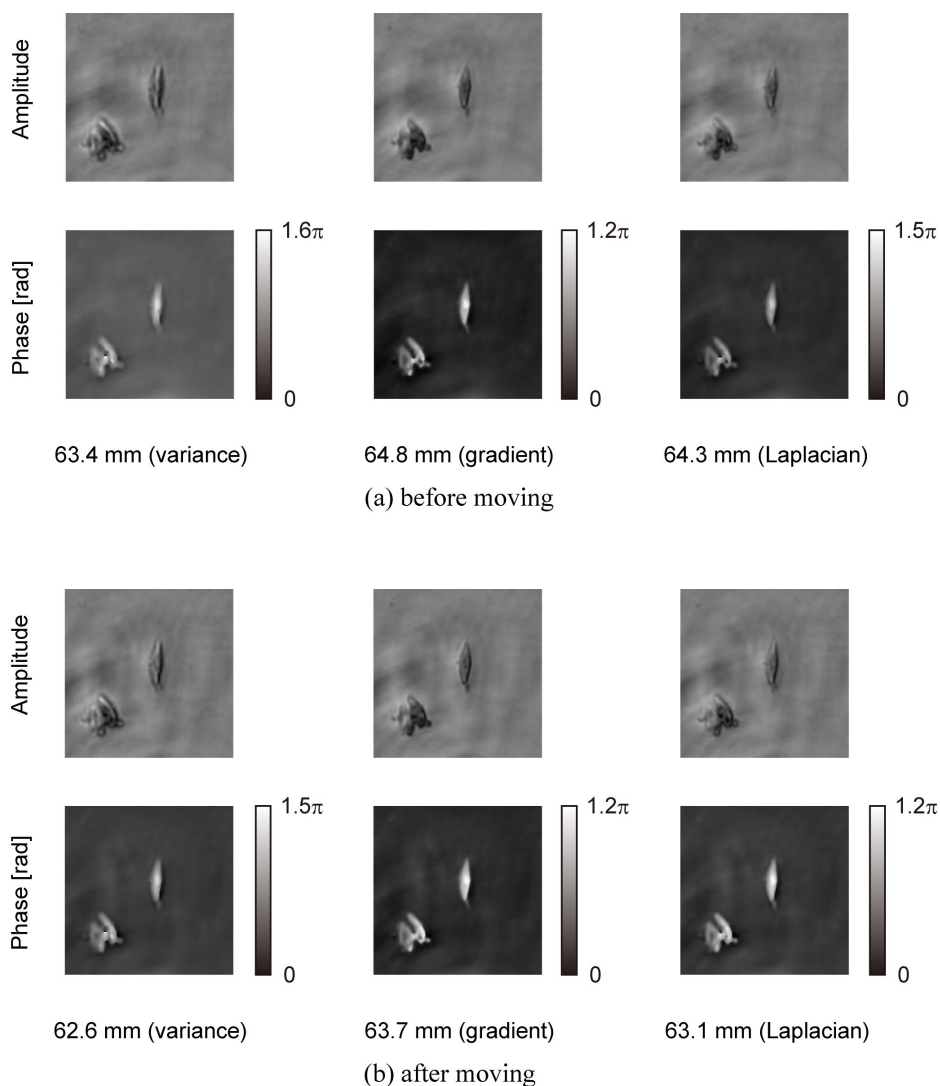


図2 分散，勾配，ラプラシアンに基づく評価関数により特定された位置における振幅分布および位相分布：(a) 移動前，(b) 移動後

5. まとめ

TIE を用いた定量位相計測およびオートフォーカス TIE の原理を概説した．オートフォーカス TIE を用いた光学実験をおこない，分散，勾配，ラプラシアンに基づく三つの評価関数の性能を比較した．実験結果から勾配に基づく評価関数を用いた場合に良好な結果が得られることが明らかとなった．今後の展望として，オートフォーカス TIE の生細胞ライブイメージングへの応用が期待される．

参考文献

- 1) I. Yamaguchi and T. Zhang, “Phase-shifting digital holography,” *Opt. Lett.* **22**, 1268–1270 (1997).
- 2) J. R. Fienup, “Phase retrieval algorithms; a comparison,” *Appl. Opt.* **21**, 2758–2769 (1982).
- 3) M. R. Teague, “Deterministic phase retrieval: a Green’s function solution,” *J. Opt. Soc. Am.* **73**, 1434–1441 (1983).
- 4) L. J. Allen and M. P. Oxley, “Phase retrieval from series of images obtained by defocus variation,” *Opt. Commun.* **199**, 65–75 (2001).
- 5) Z. Jingshan, R. A. Claus, J. Dauwels, L. Tian, and L. Waller, “Transport of intensity phase imaging by intensity spectrum fitting of exponentially spaced defocus planes,” *Opt. Express* **22**, 10661–10674 (2014).
- 6) P. Langehanenberg, B. Kemper, D. Dirksen, and G. von Bally, “Autofocusing in digital holographic phase contrast microscopy on pure phase objects for live cell imaging,” *Appl. Opt.* **47**, D176–D182 (2008).
- 7) K. Komuro and T. Nomura, “Object plane detection and phase-amplitude imaging based on transport of intensity equation,” *Opt. Rev.* **24**, 626–633 (2017).

平成 30 年第 4 回 ホログラフィック・ディスプレイ研究会のお知らせ

■日時： 2018 年 11 月 30 日 13:30～16:30

■場所： 京都工芸繊維大学（松ヶ崎キャンパス）
東 3 号館(旧ノートルダム館)3 階 K303 講義室
（京都市左京区松ヶ崎御所街道町）

アクセス：https://www.kit.ac.jp/uni_index/access/

キャンパス案内：https://www.kit.ac.jp/uni_index/matsugasaki/
https://www.kit.ac.jp/uni_index/campus-map/

■テーマ デジタルホログラフィーならびに強度輸送方程式の計測応用

■プログラム 最新情報は HODIC の WEB ページで公開いたします。

13:30 HODIC 会長挨拶

13:35-14:05 並列位相シフトデジタルホログラフィック顕微鏡とその応用

栗辻安浩，清水一希，福田喬人，西尾謙三（京都工芸繊維大学），
夏 鵬（産業技術総合研究所），的場 修（京都工芸繊維大学）

14:05-14:35 ホログラフィック 3 次元蛍光イメージング

的場 修，全 香玉（神戸大学）

14:35-15:00 休憩

15:00-15:30 デジタルホログラフィ粒子計測における反復像再生法

村田 滋，田中洋介（京都工芸繊維大学）

15:30-16:00 位相シフトデジタルホログラフィーによるすりガラスの奥の物体の可視化

渡邊 歴，荒木郁斗（立命館大学）

16:00-16:30 強度輸送方程式を用いた定量位相計測

小室幸士，野村孝徳（和歌山大学）

16:30-16:35 情報コーナー

16:35-17:35 見学会（予定）

■研究会参加申込 当日受付（事前の申込は不要です）

■参加費 会員 無料，非会員 2,000 円，学生で会報不要の場合は無料

■問合せ先

HODIC 事務局

日本大学 理工学部 応用情報工学科 吉川・山口研究室 気付

E-mail: office@hodic.org

会場問い合わせ

栗辻安浩 〒606-8585 京都市左京区松ヶ崎御所街道町

京都工芸繊維大学 電気電子工学系

phone/fax: 075-724-7444/7400

e-mail: awatsuji@kit.ac.jp

平成 31 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

- 日時： 2019 年 2 月下旬ころから 3 月中旬頃
- 場所： 未定（東京または近郊を予定）
- テーマ 未定
- プログラム 未定. 最新情報は HODIC の WEB ページで公開いたします.
<http://www.hodic.org/>
- 研究会参加申込 当日受付（事前の申込は不要です）
- 参加費 会員 無料, 非会員 2,000 円, 学生で会報不要の場合は無料
- 問合せ先 HODIC 事務局
日本大学 理工学部 応用情報工学科 吉川・山口研究室 気付
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

<http://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, 分からない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（三菱電機）	企画委員長	山口 健（日本大学）
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 洵（石川光学造形研究所）	岩田 藤郎
植田 健治（大日本印刷）	太田 和哉（トリマティス）	角江 崇（千葉大学）
鎌田 康昌（凸版印刷）	久保田敏弘（久保田ホログラム工房）	酒井 朋子（千葉大学）
坂本 雄児（北海道大学）	佐藤 甲癸	佐藤 俊一（シャープ）
下馬場朋禄（千葉大学）	白倉 明（アーティエンス・ラボ）	高木 康博（農工大）
高橋 進（凸版印刷）	田中 賢一（長崎総合科学大）	谷口 幸夫（大日本印刷）
福田 隆史（産総研）	本田 捷夫（本田ひかり技研）	松島 恭治（関西大学）
三科 智之（日本放送協会）	森田 正紀（アルファバグ）	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（エコミナルプラネタリウム）	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	永田 忠昭（arts-unis）	三田村峻右
堀内 道夫（光と風の研究所）		

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. 38, No. 4 (Nov. 2018)

2018 年 11 月 30 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 にてお願いいたします。

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