

ホログラムカレンダー

2023年4月17日（月）～21日（金） Optics & Photonics International Congress 2023

パシフィコ横浜 <https://opicon.jp/>

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

2023年7月13日（木），14日（金） 3次元画像コンファレンス

kokoka 京都市国際交流会館+オンライン併設 <http://www.3d-conf.org/>

2023年8月14日（月）～17日（木） Digital Holography and Three-Dimensional Imaging meeting
(Optica Imaging Congress) Boston Park Plaza, Massachusetts United States

https://www.optica.org/en-us/events/congress/imaging_and_applied_optics_congress/program/adaptive_optics_methods_analysis_and_applications/

2023年10月14日（土）～16日（月） SPIE/COS Photonics Asia 2023, Beijing, China
<https://spie.org/conferences-and-exhibitions/photonics-asia?SSO=1>

2024年1月27日（土）～2月1日（木） SPIE Photonics West, San Francisco, California, United
States <https://spie.org/conferences-and-exhibitions/photonics-west/>

目 次

1. ホログラムカレンダー:	表紙
2. 液晶偏光性 GRIN レンズを用いた FINCH 蛍光顕微鏡	橋本信幸 1
3. 並列位相シフト法を用いたデジタルホログラフィーの像再生の高速化	高木康博, 他 8
4. 自然光多次元デジタルホログラフィ	田原 樹, 他 15
5. 高精細 3次元撮像技術の実現に向けたインコヒーレント デジタルホログラフィの研究	信川輝吉, 他 20
6. 次回研究会のお知らせ	巻末

液晶偏光性 GRIN レンズを用いた FINCH 蛍光顕微鏡

FINCH fluorescence microscopy using liquid crystal polarization GRIN lens

橋本 信幸

Nobuyuki HASHIMOTO

日本女子大学理学部教物科学科

Dept. of Science, Japan Women's University

nobuhashimoto@fc.jwu.ac.jp / crystaloptics2@gmail.com

Recently, super resolution microscopy played an important role for bio imaging such as in vivo cell imaging. In this paper, Fresnel Incoherent Correlation Holography (FINCH) to apply 3D super-resolution fluorescence holographic microscopy using a liquid crystal polarized GRIN lens is presented. Autocorrelation holograms of fluorescence image are generated on the digital camera and then super-resolution (enhanced high frequency) images are reconstructed by mathematical calculations. Experimental results of HeLa cell images are presented.

1. はじめに

基礎生物学や基礎医学の進歩は顕微鏡の進歩の歴史といつても過言ではない。それはフックの顕微鏡に見られるビーズ玉の単レンズから始まり、接眼レンズとの組み合わせ、色収差補正そして液浸レンズ等の NA (開口数)が 1 を越える顕微鏡へと発展した。また近年ではレーザー共焦点顕微鏡や近赤外パルスレーザーを光源とする二光子顕微鏡の発明と蛍光蛋白 (GFP) の発見により、生体組織の深部まで高分解で観測し生命機能の本質を探ろうとするチャレンジングな研究の基礎を築いた。更に SIM や STORM, STED 等に見られるレーリーの解像限界を遥かに超えて数十 nm オーダまで分解可能な顕微鏡も実用化がはじまつた¹⁾。

一方ホログラフィー顕微鏡は構造がシンプルで原理的に 3D 記録であるという利点があるが、コヒーレント光をベースにしているためスペックルノイズの問題や蛍光観察には使用が困難であった。この問題を解決したのがフレネルインコヒーレント相関ホログラフィー(FINCH) 顕微鏡であるが、従来のものは光学構成が複雑で実用性に課題があった²⁾。

ここでは液晶 GRIN レンズとその偏光依存性を応用した構成が容易で実用的な FINCH 顕微鏡について特徴と効果を解説する。液晶といえば表示デバイスとして発展し巨大なマーケットを築いてきたが、液晶の本質である半波長電圧がわずかに数 V かつ CMOS で直接駆動可能であることを考えると、光波の位相変調素子として本質的に優れていることがわかる。液晶の光学素子応用の研究は液晶表示素子の研究とほぼ同時期にははじまり、筆者も 80 年代後半から液晶ホログラフィーや液晶レンズの研究をはじめ、その成果を光ピックアップ用収差補正素子として実用化した³⁾。近年では液晶幾何位相光学素子やベクトルビーム発生素子等へと発展し更なる応用が期待されている⁴⁾。

2. 液晶素子と位相変調⁵⁾

図1に液晶素子による位相変調原理を示す³⁾。透明なITO電極が上下に2分割された2画素の素子例で、液晶分子がY軸方向に平行に並んだホモジニアス（平行配向）型液晶素子でありECBモードとも言われる。液晶分子は誘電異方性を持ち、分子の長手方向と短手方向の電場成分に対して屈折率が異なる。本素子にY軸方向の直線偏光が入射した場合を考える。下側の電極は電圧が無印加の状態で、この画素では光波はほぼ液晶分子の長手方向である n_e の屈折率を見ながら伝搬する。一方、上側の電極は電圧が印加された状態で液晶分子はその長手方向を電場Xの方向に揃えようと配向する。このとき光波は n_θ ($n_o < n_\theta < n_e$) の屈折率を見ながら伝搬する。したがって電圧を加える前後で $\Delta n (=n_e - n_\theta)$ dの光路長変調が生じ、その結果として入射光の位相変調が可能となる。もちろん電圧の値を調整すれば n_θ は連続的に可変可能で連続的な位相変調が行える。

位相変調量は液晶層厚dが大きいほど大きくなるが応答速度は d^2 に比例して遅くなるのと、面精度の観点から $20\mu m$ 程度が上限である。このとき可視光に対し2~4λ程度の位相変調が可能で応答速度は常温かつ単純駆動で500ms、0度では1秒程度となる。また基本的には直線偏光のみの作用で（図ではY軸方向の直線偏光成分のみ位相変調され、X軸方向の直線偏光成分は変調されない）任意の偏光に作用させるとときは配向が直交した2素子を重ねる等の工夫が必要である。また液晶は一般に電圧に対し実効値応答を示し、また液晶分子の分解を防ぐため直流成分のない交流で駆動を行う。

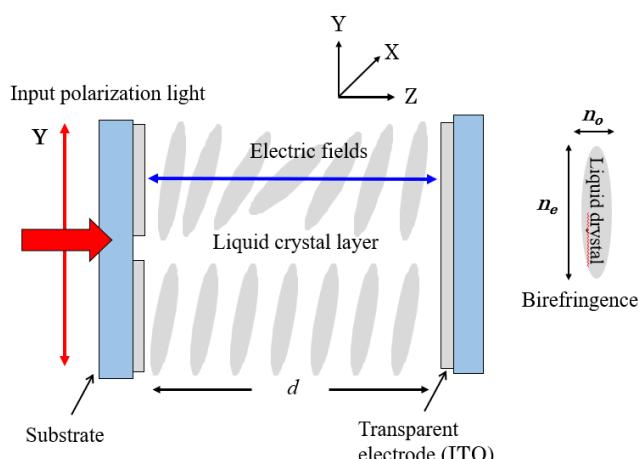


Fig. 1 Principle of liquid crystal phase modulator

3. 液晶偏光性GRINレンズ⁶⁾

GRIN(Gradient Index)レンズは分布屈折率型レンズとも言われ、中心から半径r方向に向かって屈折率 $n(r)$ が2乗屈折率分布を示す $n_s ar^2$ (n_s は中心屈折率、aは定数でレンズパワーを決める)で表される平板レンズである。そのため一般に平板である液晶素子と整合性が良い（既存の製造プロセスが利用できる）。

図2に液晶偏光性GRINレンズの断面図と、透明電極パターンを示す。図から分かるように連続的な屈折率分布を階段近似するための電圧分布（階段状）を与える同心円状の輪帶電極を持つ。輪帶数は多い程連続分布に近づくが、輪帶電極間のスペースによる回折の影響が無視でき

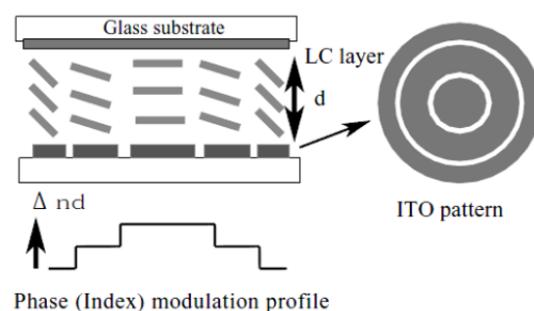


Fig. 2 Structure of liquid crystal GRIN lens

なくなる。そのため用途に応じて 16~64 輪帯を用い、回折光は 5%以下に抑制される。輪帯電極に電圧を加えることで液晶レンズを正（周辺電圧>中心電圧）、負（周辺電圧<中心電圧）、平板（電圧無）に連続的に切り替えることができる。液晶に階段状の電圧分布を与えるためには、階段数に応じた電極を外部に引き出す必要があるが、液晶素子内に外部電圧を分圧する抵抗回路を内蔵させることで、階段数に無関係に引き出し電極数を 3 本にできる。前項で述べたように Y 軸方向の直線偏光成分に対してレンズとして作用し、X 軸方向成分に対しては常に平面板として作用する。焦点距離を可変にする必要がなければ、光硬化性液晶等を用いて固定の偏光性レンズにすることもできる。

4. フレネルインコヒーレント相関ホログラフィー(FINCH)

良く知られているようにホログラフィーとは光波の干渉現象を利用して、光波の位相情報を記録再生する技術で光学的手法、計算機的（干渉縞とその回折伝搬光を計算）手法あるいはハイブリッド手法がある。共にコヒーレント光である物体光 \mathbf{A} と参照項光 \mathbf{B} を干渉させ、その強度分布（絶対値）を計算すると(1)式で表される。ここで*は複素共役を表す。

$$H = | \mathbf{A} + \mathbf{B} |^2 = \mathbf{AA}^* + \mathbf{BB}^* + \mathbf{AB}^* + \mathbf{A}^*\mathbf{B} \quad (1)$$

(1)式で右辺第三項は物体光 \mathbf{A} の複素振幅成分が含まれ再生時は一次光となる。第 4 項は物体光 A の共役光（位相が反転）の複素振幅成分が含まれ再生時は -1 次光となる。ここで右辺第一項に注目すると物体光 \mathbf{A} の自己相関 (\mathbf{AA}^*)（ホログラム）が生成されていることがわかり、FINCH はこの情報を利用する。すなわちインコヒーレント光であっても自身同士なのでは相互干渉を実現できる。これは医学や生物学において重要な生体組織の蛍光観察において、通常では使用できないホログラフィー技術を適用できることを示している。また蛍光観察なのでもともと単色性（時間的コヒーレンス）もよいが、必要に応じ波長帯域フィルターも使用すればよい。ただし \mathbf{AA}^* の状態では互いの位相がキャンセルされ干渉縞は生じないので次に述べる 2 焦点レンズを利用して位相差を発生させる。

図 3 に二焦点レンズ（焦点距離 f と ∞ すなわち素通し）を利用した FINCH の基本的な記録光学系を示す。簡単のため点物体の記録を考えると、記録面にはフレネルゾーンレンズに相当する干渉パターンが表れることがわかる（球面波と平面波の干渉）。物体は非発光でも発光（蛍光）でもよいが、普通は光波の干渉性を高くするために必要に応じて波長帯域制限フィルター（バンドパスフィルター）を併用し、また二光波の光路差も必要に応じて補償する。

5. デジタルホログラフィック顕微鏡⁷⁾

デジタルホログラフィック顕微鏡の記録再生は基本的に光学ホログラムの原理に基づき行われる。しかし記録光学系では撮像素子の画素ピッチを考慮し、サンプリング定理からエリアシングに注意してホログラムのキャリア空間周

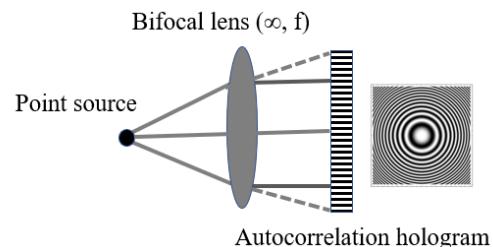


Fig. 3 Autocorrelation hologram

波数とその帯域幅を制限する必要がある⁸⁾. すなわち物体光と参照光がほぼ同一光路になる. このさい記録時に位相シフト法(参照光の位相を3段階以上変化させホログラムを記録)⁹⁾を用いることで、一次光のみを分離計算可能で0次光や-1次光を除去できる. 撮像されたホログラムの再生計算ではホログラムを開口関数とし、参照光による回折伝搬計算を行うことになる¹⁰⁾. ここでも計算処理に伴うサンプリングや有限開口特有の課題が生じる.

図4に代表的なデジタルホログラフィック顕微鏡の記録光学系を示す. 簡単なため点物体としている. 図4(a)は点物体からの回折光と参照光が撮像素子上で干渉しホログラムが記録され、この場合はフレネルゾーンプレートとなる. このとき撮像素子の解像度を考えなければ、ホログラムの分解能は $\sin\theta/\lambda$ で与えられる. ここで $\sin\theta$ はレンズの NA (開口数) と等価である. この系は単純でレンズも必要としないが、物理的に参照光を入れにくいという欠点がある.

図4(b)は記録に顕微鏡用対物レンズを用いた場合で、その解像度は対物レンズの NA で決定される. この系は参照光の取り込みが容易でありよく利用されている.

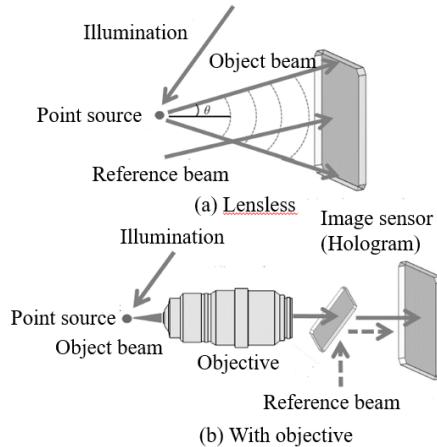


Fig. 4 Elemental optics of holographic microscope

6. FINCH 顕微鏡の原理と特長¹¹⁾

図5にFINCH顕微鏡の原理図を示す. 最初にホログラムの記録について説明する. 簡単のため対物レンズの焦点面近傍で物点 P_1 (像高 Y_1) から発した光波を考える. 光波は対物レンズでほぼ平行光に変換され、引き続き2種類の焦点距離 (一つは ∞) を持つ結像レンズにより一部の光波Aが P_2 点 (像高 Y_2) に集光し物体光となる. このとき結像倍率は Z_1/Z_2 となる. 他の光波Bはそのまま素通りし (焦点距離が ∞ のため) 参照光となる. これらの二光束が撮像素子上で干渉し物体の自己相關ホログラムが記録される. このとき幾何的な関係から撮像素子上で二光束が完全に重なるためには $Z_3=2Z_2$ の関係を満たさなければならないことがわかる.

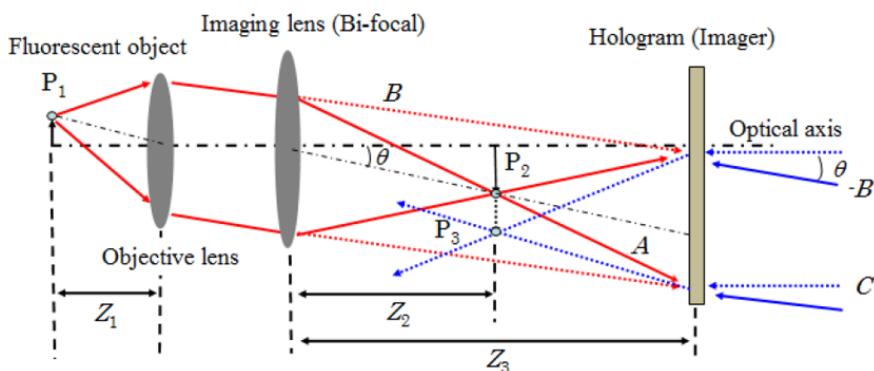


Fig. 5 Principle of FINCH microscope

FINCH のホログラムは物体形状に応じた多数の中心と周波数を持ったフレネルゾーンプレートが重ね合わさったものとなっている。これはホログラムが物体関数とフレネルゾーンプレートの合成積であることを利用した OSH（光走査ホログラフィー）と類似性が見られる¹²⁾。

次に再生では伝搬計算を行うが、特徴を分かり易くするため光学的再生で説明する。再生において普通は参照光の共役波 $\cdot B$ を照射するが、ここでは図に示すように光軸に対して平行な再生平面波 C を照射する。すなわち本来の再生光に対し θ の角度を持ってホログラムに入射回折し P_3 点（像高 Y_3 ）に集光する。幾何学的な関係から光軸近傍においては $Y_3=2Y_2$ の関係を持つことがわかる。これは視野角（ $NA \Rightarrow$ 分解能）を保ったまま像の倍率が2倍になったことを示し、ラグランジュの不变量が保存されない特殊な状態であることがわかる。

FINCH 顕微鏡において特徴的なことはその MTF (Modulation Transfer Function: 振幅伝達関数)である。インコヒーレント系で照明、あるいは蛍光を用いているのでコヒーレント系に比べ遮断周波数は 2 倍となる。さらにコヒーレントな再生計算を行うことで図 6 に示すように通常のコヒーレント系の MTF と比べ 2 倍の遮断周波数 $2\alpha_s$ を持つ矩形状の MTF が得られる²⁾。これは先に述べたように視野角 (NA) を保

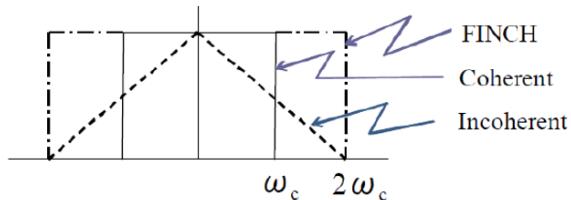


Fig. 6 Modulation transfer function (MTF)

7. 液晶偏光性 GRIN レンズを用いた FINCH 顕微鏡¹³⁾¹⁴⁾

図 7 に実際の FINCH 顕微鏡の光学系模式図を示す。蛍光物体から発した光波（一般にランダム偏光）は対物レンズにより集光されバンドパスフィルタにより波長帯域幅が制限される。そしてリレーレンズ系とチューブレンズを通過し偏光板で P 偏光方向と 45 度方向の直線偏光に変換され、液晶 GRIN レンズ（可変焦点範囲 $\pm 5000\text{mm} \sim \infty$, 48 輪帶素子、有効直径 15mm）に入射する。液晶 GRIN レンズは偏光依存性を持ち例えば P 偏光成分（図で破線）にのみに作用する。その後 P 偏光に対し 45 度方向の方位に設置された偏光板により P 偏光成分と X 偏光成分の干渉が生じ、カメラ上に物体の自己相關ホログラムが形成される。リレー光学系は 1/2 縮小光学系となっていて、対物レンズの瞳面と液晶レンズの瞳面を共役の関係にする。液晶 GRIN レンズの後に設置された液晶位相板(LC phase plate)は電気的に位相変調可能で、P 偏光のみに作用することで位相シフトホログラムを実現する。撮像されたホログラムから光波の伝搬計算を行い、物体が計算再生される。

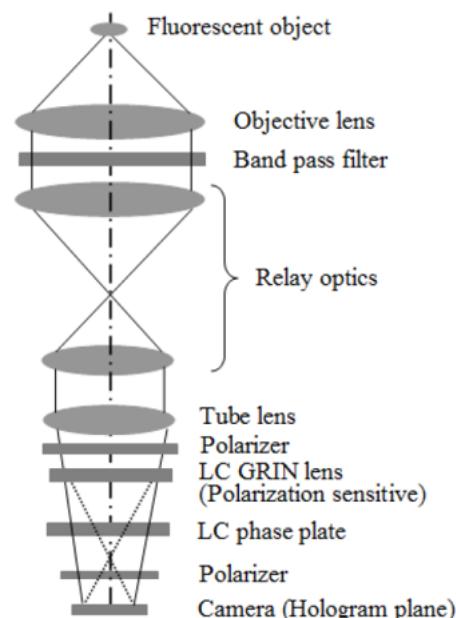


Fig. 7 Optical setup of FINCH microscope

8. FINCH顕微鏡による観察結果¹¹⁾

次に観察結果について解説する。撮像カメラとして浜松ホトニクス社の ORCA4.0 (2048×2048画素, 画素ピッチ 6.5μm, 冷却 CMOS センサ) を用いた。

図 8 は花粉の蛍光観察像で GFP (Green Fluorescent Protein, 緑色蛍光蛋白) とそのエミッションフィルタを、対物レンズは NA1.4 (油浸, 100 倍, ニコン製) を用いた。また比較のため同じ対物レンズを用いた共焦点顕微鏡と SEM (Scanning Electron Microscopy) による観察像も示した。SEM

では解像されているが共焦点顕微鏡では解像されていない花粉の気孔が FINCH では解像されているのがわかる。またインコヒーレントであるためコヒーレント系特有のスペックルノイズは見られない。

図9は QDOT 525 でラベリングされた HeLa 細胞 (ヒト子宮頸がん由来の細胞) を、そのエミッションフィルタを用いて記録再生した観察像である。対物レンズは NA1.4 (油浸、100 倍、ニコン製) を用いた。比較のため同じ対物によるワイドフィールド顕微鏡の観察像も示す。FINCH では微小管の構造がより鮮明になっている。

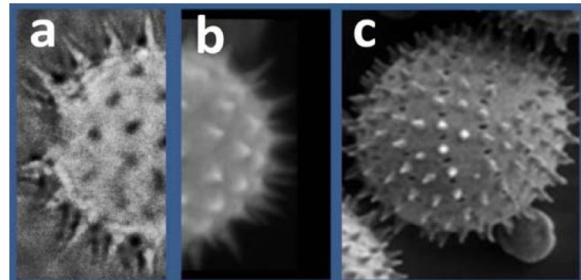


Fig. 8 Microscopic images of pollen. (a) FINCH, (b) Confocal, (c) SEM

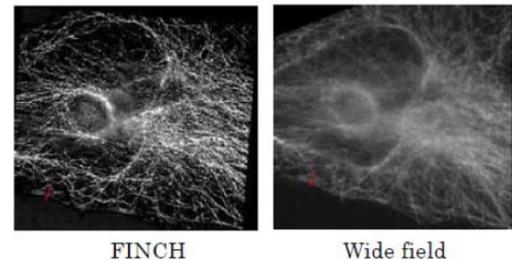


Fig. 9 Microscopic images of a Hela cell observed by FINCH and Wide field microscope

9. まとめと展望

医学や生物学において重要な観察手段である蛍光観察可能なフレネルインコヒーレント相關ホログラフィー(FINCH)顕微鏡の特徴について解説した。本顕微鏡はレーザー光源を必ずしも必要とせず、同軸光学系であるため振動の影響も受けにくい。またその再生法の特徴から高域強調された超解像観察が可能であり、ワイドフィールド顕微鏡等と比べ高い分解能が得られている。更に原理的に 3D 再生可能かつスペックルノイズの影響も現れにくい。

顕微鏡装置の試作では液晶 GRIN レンズとその偏光依存性を利用してシンプルかつコンパクトな同軸干渉光学系を実現し、更に液晶位相変調素子を位相シフトホログラフィーに適用した。本液晶素子は光ディスク装置の光ピックアップ用に量産化した収差補正用液晶素子と基本技術は同じで実用性や信頼性の高いものである。また FINCH は主に顕微鏡応用として研究が発展しているが、撮像一般に適用することも可能である。また光学記録が主体となっているが FINCH-CGH (筆者の知る限り先行例はあまり耳にしない) の試みも、光学 FINCH 研究との相乗効果も期待でき興味深いのではないかだろうか。本研究は筆者がシチズン時計在職中に Johns Hopkins 大学の Gary Brooker 教授, Nisan Siegel 博士及び Ben-Gurion University of the Negev の Joseph Rosen 教授との共同研究として実施されたものである。

参考文献

- 1) C. G. Galbraith and J. A. Galbraith: *J. Cell Science.* 124, pp.1607-1611(2011).
- 2) J. Rosen and G. Brooker: *Adv. Opt. Techn.* Vol. 1, pp. 151-169 (2012).
- 3) 橋本：“液晶による波面補正素子とその応用”, 光学, Vol. 36, No. 3, pp. 149-153 (2007).
- 4) 橋本：“液晶位相子によるラゲールガウスベクトルビームの生成と応用”, 液晶, Vol. 24, No.4, pp.213-217 (2020).
- 5) N. Hashimoto, L. Vicari Ed.: Optical applications of liquid crystals, pp. 150-200 (CRC press, 2003).
- 6) N. Hashimoto and M. Kurihara: Proc. SPIE 7232, Boston. 72320N-1-8 (2009).
- 7) 橋本：“ホログラフィック顕微鏡”, 映像メディア誌, Vol.72, No.1, pp.54-58 (2018).
- 8) N. Hashimoto, S. Morokawa and K. Kitamura: “Real-time holography using high-resolution LCTV-SLM”. Proc. SPIE1461, pp.291-302(1991).
- 9) I. Yamaguchi and T. Zhang: “Phase-shifting digital holography”, *Opt. Lett.*, 22, pp.1268 – 1269(1997).
- 10) 高橋：“FFT 法を用いるフレネル回折計算”, 光学. Vol. 39, No. 4, pp.209 – 210 (2010).
- 11) 橋本:”液晶偏光 GRIN レンズを用いたフレネルインコヒーレント自己相關ホログラフィー顕微鏡”, 応物, Vol.84, No. 9, pp.798-804 (2015).
- 12) T.-C. Poon *et al.*, “Three-dimensional microscopy by optical scanning holography,” *Opt. Eng.*, vol. 34, pp. 1338-1344(1995).
- 13) 田辺, 栗原, 横山, 松本, 橋本: “HODIC Circular”, Vol. 35, No. 2, pp.11- pp.14(June 2015).
- 14) G. Brooker, N. Siegel, J. Rosen, N. Hashimoto, M. Kurihara and A. Tanabe: *Opt. Lett.* Vol. 38, No. 24, pp. 5264-5267 (2013).

並列位相シフト法を用いたデジタルホログラフィーの像再生の高速化

Fast Image Reconstruction Technique for Parallel Phase-Shifting Digital Holography

高木康博

Yasuhiro Takaki

東京農工大学大学院工学研究院

Institute of Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology

For incoherent and coherent digital holography, the parallel phase-shifting technique has been used to reduce the number of exposures required for the phase-shifting technique which eliminates zero-order diffraction and conjugate image components. Although the parallel phase-shifting technique can decrease the hologram recording time, the image interpolations require additional calculation time. In this study, we propose a technique that reduces the calculation time for image interpolations; this technique is based on the convolution theorem. We experimentally verified the proposed technique and compared it with the conventional technique. The proposed technique is more effective for more precise interpolation algorithms because the calculation time does not depend on the size of interpolation kernels.

1. はじめに

デジタルホログラフィーは、空間走査を必要とせず、物体の2次元的な振幅・位相分布を測定できる。従って、回折計算で物体の3次元構造を得られ、位相情報をを利用してラベルフリーなイメージングが可能である。従来のデジタルホログラフィーは、干渉計とコヒーレント光を用いたが[1]、インコヒーレントデジタルホログラフィーは自己干渉計を用いることで、インコヒーレント光の使用を可能にする[2-12]。インコヒーレント光を利用すると、蛍光顕微鏡[2-8]、自然光やLED照明下での物体の3次元計測[9-11]、放射温度計測[12]など、幅広い用途への利用が可能になる。

デジタルホログラフィーは、物体から回折した波面の複素振幅を、位相シフト法でゼロ次回光折と共に像成分を除去することで求める[13,14]。そのために、多くのインコヒーレントデジタルホログラフィーは位相シフト法を用いている。しかし、位相シフト法は異なる位相シフトを持つ3、

4枚のホログラムを撮影する必要があり露光回数が多くなる問題点がある。そのため、1回の露光で物体波の複素振幅分布を得る並列位相シフト法[15,16]が提案された。並列位相シフト法は、位相シフト量が異なる複数のホログラムを空間多重化して記録するもので、偏光イメージセンサを用いると効率的に実装できる[17]。最近実用化された偏光イメージセンサは、高解像度($1,000 \times 1,000$ 以上)で、ビデオレート(60Hz以上)かそれよりも高いフレームレートで動作する[18]。並列位相シフト技術は、リアルタイムのデジタルホログラフィーを可能にする[19-21]。また、ワンショット記録は、短時間の露光[22-24]や高速で移動する微生物[25,26]の計測を可能にする。さらに、カラー偏光イメージセンサ[27]や偏光依存性をもつ位相シフトアレイ[28]を用いて、ワンショット記録で多波長のインコヒーレントデジタルホログラフィーが実証されている。

偏光イメージセンサは、4つの位相シフトに対応する4つの画素群で構成される。位相シフト技術に必要な4つの画像を合成するために、同じ位相シフトを持つ画素を取り出す。つぎに、4つの位相シフトに対応する4つの画像について、位相値がない画素の位相値を得るために、補間かデモザイク処理を行う。並列位相シフト技術は、画像撮影にかかる時間を短縮できるが、画像補間に時間が必要である。この補間処理の時間は、特にイメージセンサの解像度が向上した場合、リアルタイム動作の妨げとなる。一般に、精度が高い補間アルゴリズムは、計算時間が長くなる傾向がある。従って、画像補間に要する時間の短縮は、回折計算に要する時間の短縮と同じくらい重要である。本研究では、並列位相シフト法の画像補間の計算時間を短縮する技術を提案する。

2. 理論

まず、偏光イメージセンサを用いた並列位相シフト技術について説明する[17]。図1 (a) にイメージセンサの画素に取り付けられたマイクロ偏光子の配置を示す。偏光子の偏光軸の方向は、 0° 、 45° 、 90° 、 135° である。回転方向が異なる円偏光をもつ物体波と参照波がイメージセンサ上に干渉すると、図1 (b) に示すように、偏光画素で記録される2つの波の間の位相シフト量は、 $\delta = 0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ となる。

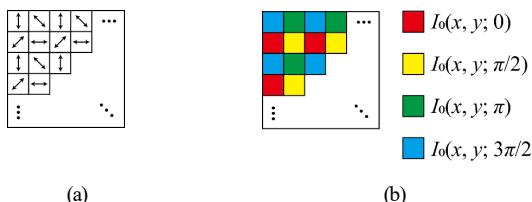


Figure 1. Parallel phase-shifting technique using the polarization image sensor: (a) polarizing axes of micro-polarizers attached to pixels and (b) phase shifts for pixels.

図2に従来の並列位相シフト法[15,16]の計算手順を示す。同じ位相シフト量を持つ画素を取り出し、4つの疎な画像を得る。取り出された画像は、 $\delta = 0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ の位相シフトに対応して、 $I_0(x, y; 0)$ 、 $I_0(x, y; \pi/2)$ 、 $I_0(x, y; \pi)$ 、 $I_0(x, y; 3\pi/2)$ で表される。つぎに、疎な画像を画像補間にし、隙間がない密な画像にする。 $\delta = 0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ の位相シフトに対応する補間画像をそれぞれ $I(x, y; 0)$ 、 $I(x, y; \pi/2)$ 、 $I(x, y; \pi)$ 、 $I(x, y; 3\pi/2)$ と表す。その後、下式を計算することで、イメージセンサ上の物体波の複素振幅分布が得られる。

$$u(x, y) = [I(x, y; 0) - I(x, y; \pi)] + i[I(x, y; \frac{\pi}{2}) - I(x, y; \frac{3\pi}{2})] \quad (1)$$

$u(x, y)$ に回折計算を適用することで、再生像が得られる。回折計算には、フレネル回折式やフランホーファー回折式などいくつかの回折計算が利用できる。本研究では、回折計算に角スペクトル法を用いる[29, 30]。以下の式から、角スペクトル法を用いて距離 z_r における再生像 $u(x, y)$ が得られる。

$$v(x, y) = IFT \left[U(f_x, f_y) \exp \left(\frac{i2\pi}{\lambda} z_r \sqrt{1 - (\lambda f_x)^2 - (\lambda f_y)^2} \right) \right] \quad (2)$$

ここで、IFTは逆フーリエ変換を表し、 $U(f_x, f_y)$ は $u(x, y)$ のフーリエ変換を表す。フーリエ変換 $U(f_x, f_y)$ に位相項を乗算し逆フーリエ変換を行うことで、再生像が得られる。

次に、本研究で提案する計算技術を説明する。フーリエ変換の計算時間は、回折計算に高速フーリエ変換(FFT)アルゴリズムを使用する場合、イメージセンサの解像度の向上に対して対数的に増加する。これに対して、補間計算の計算時間は、解像度に比例して増加する。そのため、補完計算の時間を短縮することが重要である。

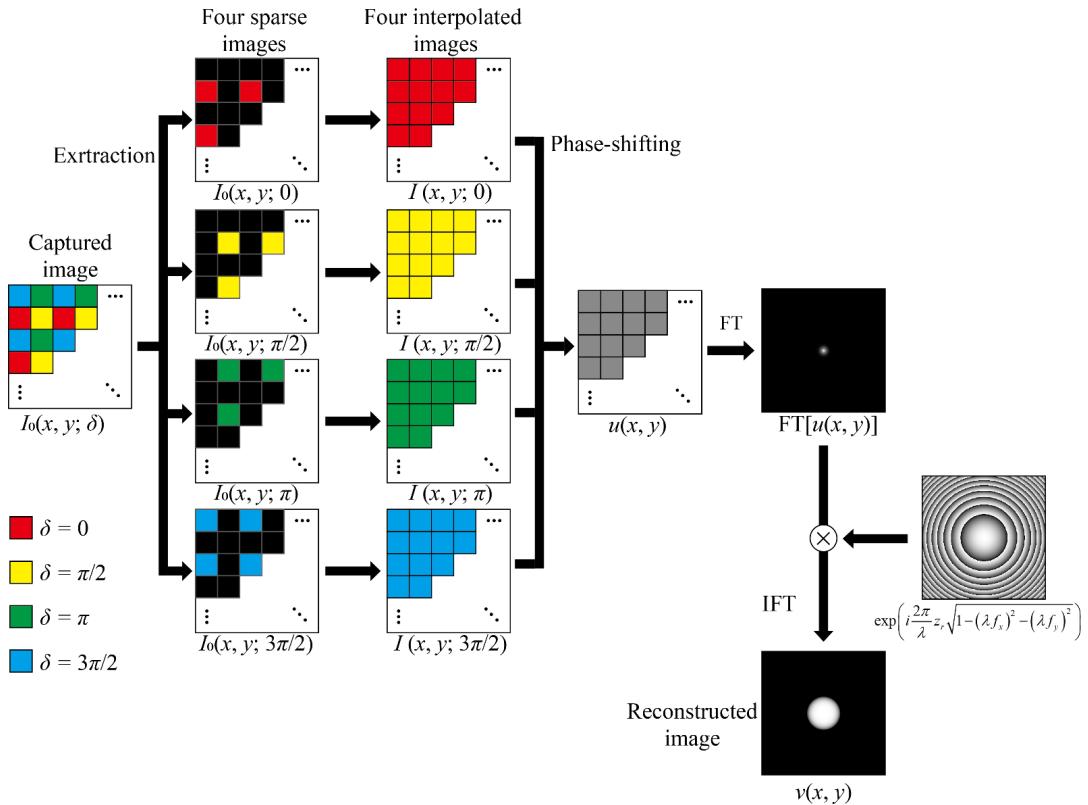


Figure 2. Conventional calculation procedure for parallel phase-shifting digital holography.

本研究では、補間カーネルとのコンボリューションで補間を表現する。以下の式により、位相シフト $\delta = 0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ に対して 4 つの補間画像を得る。

$$I(x, y; \delta) = I_0(x, y; \delta) * f(x, y) \quad (3)$$

ここで、*はコンボリューション演算、 $f(x, y)$ は補間カーネルを表す。補間カーネルを変えることで、様々な種類の補間アルゴリズムに対応できる。コンボリューションとフーリエ変換の関係から、角スペクトル法で計算される物体波の複素振幅分布は以下の式で与えられる。

$$v(x, y) = \text{IFT} \left[\text{FT}[u_0(x, y)] \text{FT}[f(x, y)] \exp \left(i \frac{2\pi}{\lambda} z_r \sqrt{1 - (\lambda f_x)^2 - (\lambda f_y)^2} \right) \right] \quad (4)$$

ここで、FT はフーリエ変換を表し、 $u_0(x, y)$ は次式で与えられる。

$$u_0(x, y) = [I_0(x, y; 0) - I_0(x, y; \pi)] + i \left[I_0\left(x, y; \frac{\pi}{2}\right) - I_0\left(x, y; \frac{3\pi}{2}\right) \right] \quad (5)$$

以上の説明は、従来の位相シフト技術に基づくものである[13, 31]。

図 3 に提案手法を示す。4 枚の疎な画像の取り出しと補間を削除した。撮像素子で撮影した画像に複素数行列 C を掛けて $u_0(x, y)$ を求め、フーリエ変換する。次に、補間カーネルのフーリエ変換を乗じ、さらに位相項を乗じる。最後に逆フーリエ変換することで、再生像が得られる。

案手法は、計算過程から 4 つの画像補間計算を完全になくなるが、複素数行列 C とカーネルのフーリエ変換との 2 つの乗算演算とが加わる。ここで、カーネルのフーリエ変換は事前に計算しておくことができる。一般に、画像補間は、画像乗算

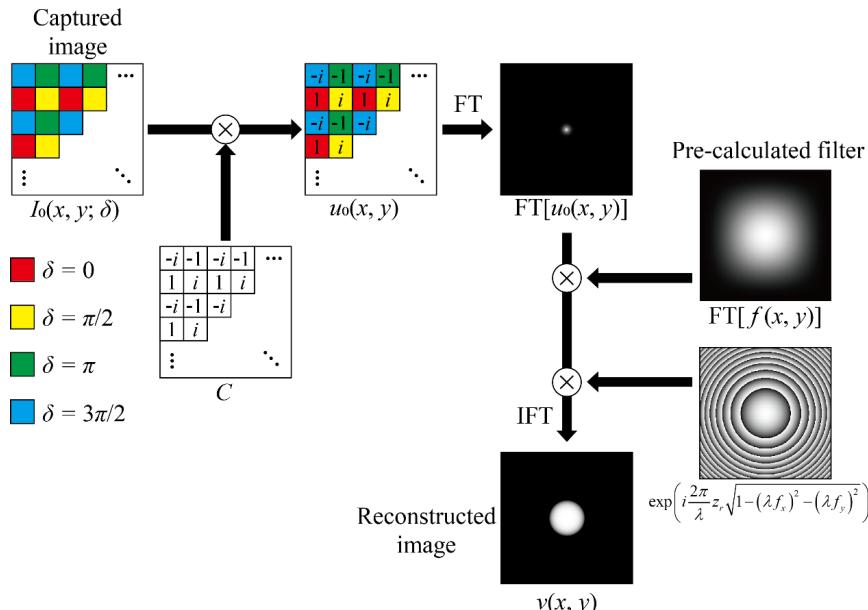


Figure 3. Proposed calculation procedure for parallel phase-shifting digital holography.

より時間を要する。従って、提案手法により並列位相シフト法の計算時間が短縮できる。

補間カーネルのフーリエ変換を事前に計算しておくと、提案手法の計算時間は補間カーネルサイズに依存しなくなる。カーネルサイズは補間アルゴリズムに依存し、一般に画像補間アルゴリズムの質が向上するとカーネルサイズも大きくなる。バイキューピック補間(カーネルサイズ 7×7)のような高精度な補間アルゴリズムでは、再構成画像の二乗平均誤差が減少することを示されている[32]。提案法は、角スペクトル法以外のフーリエ変換を用いた回折計算と組み合わせることが可能である。ただし、提案手法は、補間過程が空間不変であることを前提としている。近年、より正確な画像補間を行うために空間不変の手法[33]が提案されている。これらの補間処理はコンボリューション演算で表現できないため、提案手法は利用できない。

3. 実験

提案手法を実験的に検証した。実験システムは、FINCH 光学系[3-7]に基づき設計した。

図 4 に FINCH の記録システムを示す。対物レンズは、物体から回折されたインコヒーレント光で波面を収束させる。偏光子でインコヒーレント光を偏光角 45° の直線偏光にする。位相変調型空間光変調器 (SLM) は、水平方向または垂直方向に振動する直線偏光の位相を変調するが、これと直交方向の直線偏光の位相は変調しない。位相変調 SLM には、水平偏光と垂直偏光が異なる曲率半径の波面を持つように、2 次関数の位相分布を表示する。次に、 $1/4$ 波長板で水平、垂直偏光を右回り、左回りの円偏光にする。最後に、偏光イメージセンサを用いて 2 つの円偏光の干渉を記録する。

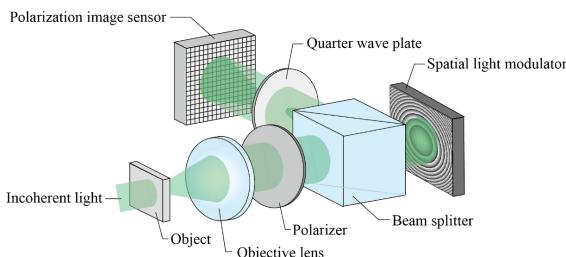


Figure 4. Experimental system based on Fresnel incoherent correlation holography (FINCH).

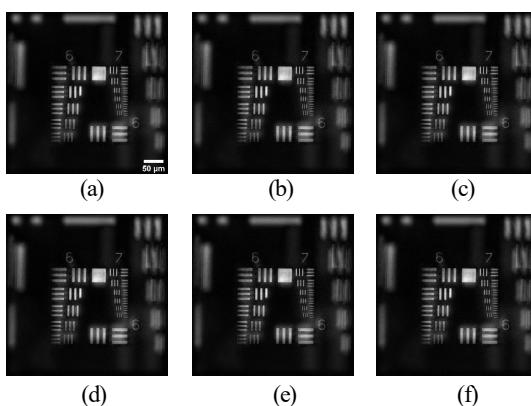


Figure 5. Reconstructed images using (a)–(c) the conventional technique and (d)–(f) the proposed technique using the interpolation algorithms (a) & (d) bilinear, (b) & (e) bicubic, and (c) & (f) Lanczos-3.

インコヒーレント光源として、中心波長 525nm、帯域幅 30nm の LED を使用した。位相変調型 SLM として解像度 1440×1050、画素ピッチ 10.4μm の SLM-100 (Santec Corporation) を使用した。偏光カメラは、解像度 2448×2048、画素ピッチ 3.45μm の VP-TRI050S-P (Lucid Vision Labs, Inc) を使用した。中央の 2,048×2,048 画素をホログラムの記録に使用した。対物レンズの焦点距離は 20 mm、SLM 上に表示される位相分布の焦点距離は 600 mm とした。理論的な最小分解距離は 1.60μm である[6]。記録対象にはテストターゲット USAF1951 を用いた。計算にはパーソナルコンピュータ (Intel

Core i7-8550U 4.0GHz CPU、8GB RAM) を使用した。

図 5 (a) ~ (c) は従来手法で得られた再生像、図 5 (d) ~ (f) は提案手法で得られた再生像である。画像補間には、バイリニア、バイキューピック、Lanczos-3 アルゴリズムを用い、カーネルサイズはそれぞれ 3×3、7×7、11×11 である。バイリニア、バイキューピック、Lanczos-3 アルゴリズムの従来手法と提案手法で計算した画像のピーク信号対雑音比 (PSNR) はそれぞれ 61.2、61.3、62.1 dB であった。従って、2 つの手法で得られた再構成画像は事実上同等とみなせる。

表 1 に、計算時間を示す。これは、100 回の平均値である。提案法は、計算時間の短縮に有効であることがわかる。ただし、提案法の回折計算に要する時間は従来法より若干長くなっているが、これは、複素数行列 C とカーネルのフーリエ変換との 2 つの乗算が加わったためである。

4. まとめ

本研究では、デジタルホログラフィーで用いる並列位相シフト法の高速計算法を提案した。提案法では、4 つの画像補間処理を 2 つの乗算に置き換える。提案法を、FINCH 光学系を用いた実験で検証した結果、補間アルゴリズムにバイリニア、バイキューピック、Lanczos-3 アルゴリズムを用いた場合、計算速度が 6.4、9.3、15.2 倍に向上した。

Table 1. Calculation time for the conventional and proposed techniques.

	Bilinear (3×3 kernel)		Bicubic (7×7 kernel)		Lanczos-3 (11×11 kernel)	
	Conventional [ms]	Proposed [ms]	Conventional [ms]	Proposed [ms]	Conventional [ms]	Proposed [ms]
Object wave generation	116 ± 5	18 ± 1	167 ± 8	18 ± 1	274 ± 13	18 ± 1
Diffraction calculation	345 ± 14	398 ± 17	350 ± 14	399 ± 17	349 ± 15	395 ± 17
Total	461 ± 19	416 ± 18	518 ± 22	417 ± 18	623 ± 28	413 ± 18

参考文献

- 1) Nehmetallah, G.; Banerjee, P.P. Applications of digital and analog holography in three-dimensional imaging. *Adv. Opt. Photonics* **2012**, 4, 472-553.
- 2) Schilling, B.; Poon, T. Three-dimensional holographic fluorescence microscopy. *Opt. Lett.* **1997**, 22, 1506-1508.
- 3) Rosen, J.; Brooker, G. Digital spatially incoherent Fresnel holography. *Opt. Lett.* **2007**, 32, 912-914.
- 4) Rosen, J.; Brooker, G. Non-scanning motionless fluorescence three-dimensional holographic microscopy. *Nat. Photonics* **2008**, 2, 190-195.
- 5) Brooker, G.; Sigel, N.; Wang, V.; Rosen, J. Optimal resolution in Fresnel incoherent correlation holographic fluorescence microscopy. *Opt. Express* **2011**, 19, 5047-5062.
- 6) Rosen, J.; Sigel, N.; Brooker, G. Theoretical and experimental demonstration of resolution beyond the Rayleigh limit by FINCH fluorescence microscopic imaging. *Opt. Express* **2011**, 19, 26249-26268.
- 7) Siegel, N.; Lupashin, V.; Storrie, B.; Brooker, G. High-magnification super-resolution FINCH microscopy using birefringent crystal lens interferometers. *Nat. Photonics* **2016**, 10, 802-808.
- 8) Jang, C.; Kim, J.; Clark, D.C.; Lee, S.; Lee, B.; Kim, M.K. Holographic fluorescence microscopy with incoherent digital holographic adaptive optics. *J. Biomed. Opt.* **2015**, 20, 111204.
- 9) Kim, M.K. Adaptive optics by incoherent digital holography. *Opt. Lett.* **2012**, 37, 2694-2696.
- 10) Kim, M.K. Full color natural light holographic camera. *Opt. Express* **2013**, 21, 9636-9642.
- 11) Wan, Y.; Man, T.; Wang D. Incoherent off-axis Fourier triangular color holography. *Opt. Express* **2014**, 22, 8565-8573.
- 12) Imbe, M. Radiometric temperature measurement by incoherent digital holography. *Appl. Opt.* **2018**, 58, A82-A89.
- 13) Yamaguchi, I.; Zhang, T. Phase-shifting digital holography. *Opt. Lett.* **1997**, 22, 1268-1270.
- 14) Takaki, Y.; Kawai, H.; Ohzu, H. Hybrid holographic microscopy free of conjugate and zero-order images. *Appl. Opt.* **1999**, 38, 4990-4996.
- 15) Awatsuji, Y.; Sasada, M.; Kubota, T. Parallel quasi-phase-shifting digital holography. *Appl. Phys. Lett.* **2004**, 85, 1069-1071.
- 16) Awatsuji, Y.; Tahara, T.; Kaneko, A.; Koyama, T.; Nishio, K.; Ura, S.; Kubota, T.; Matoba, O. Parallel two-step phase-shifting digital holography. *Appl. Opt.* **2008**, 47, D183-D189.
- 17) Millerd, J.; Brock, N.; Hayes, J.; Morris, M.; Novak, M.; Wyant, J. Pixelated Phase-Mask Dynamic Interferometer. *Proc. of SPIE* **2004**, 5531, 304-314.
- 18) Sony Semiconductor Solutions Corporation, Available online: <https://www.sony-semicon.co.jp/e/products/IS/industry/technology/polarization.html> (accessed on 24th August 2021).
- 19) Tahara, T.; Kanno, T.; Arai, Y.; Ozawa, T. Single-shot phase-shifting incoherent digital holography. *J. Opt.* **2017**, 19, 065705.
- 20) Choi, K.; Joo, K.; Lee, T.; Kim, H.; Yim, J.; Do, H.; Min, S. Compact self-interference incoherent digital holographic camera system with real-time operation. *Opt. Express* **2019**, 4, 4818-4833.
- 21) Siegel, N.; Brooker, G. Single shot holographic super-resolution microscopy. *Opt. Express* **2021**, 29, 15953-15958.
- 22) Kakue, T.; Itoh, S.; Xia, P.; Tahara, T.; Awatsuji, Y.; Nishio, K.; Ura, S.; Kubota, T.; Matoba, O. Single-shot femtosecond-pulsed phase-shifting digital holography. *Opt. Express* **2012**, 20, 20286-20291.

- 23) Kakue, T.; Endo, Y.; Nishitsui, T.; Shimobaba, T.; Masuda, N.; Ito, T. Digital holographic high-speed 3D imaging for the vibrometry of fast-occurring phenomena. *Sci. Rep.* **2017**, 7, 10413.
- 24) Takase, Y.; Shimizu, K.; Machida, S.; Inoue, T.; Nishio, K.; Rajput, S.; Matoba, O.; Xia, P.; Awatsuji, Y. High-speed imaging of the sound field by parallel phase-shifting digital holography. *Appl. Opt.* **2021**, 60, A179-A187.
- 25) Tahara, T.; Yonesaka, R.; Yamamoto, S.; Kakue, T.; Xia, P.; Awatsuji, Y.; Nishio, K.; Ura, S.; Kubota, T.; Matoba, O. High-speed three-dimensional microscope for dynamically moving biological objects based on parallel phase-shifting digital holographic microscopy. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron* **2012**, 18, 1387-1393.
- 26) Inamoto, J.; Fukuda, T.; Inoue, T.; Shimizu, K.; Nishio, K.; Xia, P.; Matoba, O.; Awatsuji, Y. Modularized microscope based on parallel phase-shifting digital holography for imaging of living biospecimens. *J. Biomed. Opt.* **2020**, 25, 123706.
- 27) Tahara, T.; Ito, T.; Ichihashi, Y.; Oi, R.; Single-shot incoherent color digital holographic microscopy system with static polarization-sensitive optical elements. *J. Opt.* **2020**, 22, 105702.
- 28) Tahara, T.; Ishii, A.; Ito, T.; Ichihashi, Y.; Oi, R. Single-shot wavelength-multiplexed digital holography for 3D fluorescent microscopy and other imaging modalities. *Appl. Phys. Lett.* **2020**, 117, 031102.
- 29) Goodman, J. W. Chap. 3.10 THE ANGULAR SPECTRUM OF PLANE WAVES. *Introduction to Fourier Optics*, 2nd ed.; Director, S.W.; McGraw-Hill: New York, USA, 1996; pp. 55-61.
- 30) Matsushima, K.; Shimobaba, T. Band-limited angular spectrum method for numerical simulation of free-space propagation in far and near fields. *Opt. Express* **2009**, 17, 19662–19673.
- 31) Yaroslavsky, L. Chap. 9 IMAGE RESAMPLING AND GEOMETRICAL. *Digital holography and digital image processing*; Springer, LLC: Boston, MA, USA, 2004; pp. 373-410.
- 32) Xia, P.; Tahara, T.; Kakue, T.; Awatsuji, Y.; Nishio, K.; Ura, S.; Kubota, T.; Matoba, O. Performance comparison of bilinear interpolation, bicubic interpolation, and B-spline interpolation in parallel phase-shifting digital holography. *Opt. Rev.* **2013**, 20, 193-197.
- 33) Ramponi, G. Warped distance for space-variant linear image interpolation. *IEEE Transactions on Image Processing* **1999**, 8, 629-639.
- 34) Frigo, M.; Steven, G.J.; FFTW: An adaptive software architecture for the FFT. *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, Seattle, USA, 15th May **1998**, 3, 1381-1384.
- 35) Shimobaba, T.; Sato, Y.; Miura, J.; Takenouchi, M.; Ito, T. Real-time digital holographic microscopy using the graphical processing unit. *Opt. Express* **2008**, 16, 11776-11781.

自然光多次元デジタルホログラフィ

田原 樹[†], 小澤 祐市[‡], 中村 友哉^{*}, 松田 厚志^{**}, 下馬場 朋祿^{***}

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

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

* 大阪大学 産業科学研究所 〒567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘 8-1

** 国立研究開発法人情報通信研究機構 未来 ICT 研究所 〒651-2492 兵庫県神戸市西区岩岡町 588-2

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

E-mail: tahara@nict.go.jp

あらまし 自然光デジタルホログラフィとは、空間的、時間的にインコヒーレントな光のホログラムを取得し、ホログラフィック 3 次元イメージングを行なう技術である。太陽、LED、ランプ、自発光体など自然な光源を適用できる特徴がある。本稿では、3 次元空間、波長、偏光など多次元の情報をホログラフィック記録する方法を紹介する。また、空間および時間コヒーレンスを利用して、透明物体の定量位相計測や光波の種類の識別を行える方法も紹介する。位相変調を介して、フィルタレスホログラフィック多次元イメージングが可能である。

キーワード デジタルホログラフィ, インコヒーレントホログラフィ, 多重センシング, 多次元イメージング

Multidimensional digital holography with daily-use light

Tatsuki TAHARA[†] Yuichi KOZAWA[‡] Tomoya NAKAMURA^{*} Atsushi MATSUDA^{**} and
Tomoyoshi SHIMOBABA^{***}

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

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

* SANKEN, Osaka University, 8-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, 567-0047, Japan

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

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

E-mail: tahara@nict.go.jp

Abstract Natural light digital holography is a technique to obtain a digital hologram of spatially and temporally incoherent light and to achieve holographic three-dimensional (3D) imaging of incoherent light. Daily-use light sources such as the sun, a light-emitting diode, a thermal lamp, and a self-luminous object can be applied in this holography technique. In this proceeding, we present methods for holographic imaging of multidimensional information such as 3D space, multiple wavelengths, and state of polarization. Quantitative phase measurement of transparent specimens and identification of the variety of light are also conducted. Filterless multidimensional imaging of light can be achieved through the phase encoding scheme of computational coherent superposition (CCS) and multidimension-multiplexed full-phase-encoding holography (MPH).

Keywords Digital holography, incoherent holography, multiplexed image sensing, multidimensional imaging

1. はじめに

ホログラフィ[1-3]は、単板の記録材料すなわち 2 次元空間に 3 次元画像情報を記録し、自然な 3 次元画像の可視化や精密な 3 次元画像計測を実現する技術である。レーザなど干渉性の良い光源の寄与により技術が格段に進歩した。一方、干渉縞を生成できれば、自然

な光であってもホログラムを得ることができる。そして、ニュートンリングやシャボン玉の干渉模様に見られる様に、太陽光を含むあらゆる光は自らの光に対して干渉する。数々の Review 論文に記述される様に[4-8]、自己干渉計を構築してランプ等の空間的にインコヒーレントな光のホログラムを取得する技術は、インコヒ

レントホログラフィとして 1960 年代に提案されている[9,10]。そして、電子機器の性能、信号処理技術の向上に伴い、空間的・時間的にインコヒーレントな、自然な光であってもデジタルホログラムとして記録でき、3 次元イメージングできることが示されている[11,12]。

インコヒーレントホログラフィと呼ばれる技術に対し、著者らはこれまでに、レーザ光ホログラフィで研究開発してきた技術[13-17]を導入し、3 次元空間[18]、時間[8]、波長[19-25]、偏光[26]などの多次元情報取得を行ってきた。また、空間および時間コヒーレンスを利用して、透明体であっても定量位相計測することや[27,28]、光波の種類の識別[25]を行なうことを実現してきた。本稿では、自然光デジタルホログラフィに基づく多次元イメージング技術、コヒーレンスを活用したイメージング技術を紹介する。

2. 自然光多次元デジタルホログラフィ

図 1 に自然光多次元デジタルホログラフィの概略を示す。自然な光のホログラムは自己干渉光学系を用いて得られる。自己干渉光学系には一般に、干渉縞を得るために 2 光波生成部、位相シフト干渉法の実装や光路長差の調整を行うための位相変調部が備えられる。多次元情報の取得においては、表 1 に示す通り、フィルタを用いる強度変調に基づく方法と、物理量毎に異なる位相変調を与える多重センシングの方法が挙げられる。カラー 3 次元画像計測においては、時間分解能を上げるために、単一露光位相シフト法[13-15]のインコヒーレントデジタルホログラフィへの適用や、強度または位相の変調を空間方向に展開するための波長フィルタアレイ素子[22]または波長分散を有する位相シフトアレイ素子[21]の採用等が見られる。イメージセンサで記録されるデジタルホログラム(群)から、位相シフト干渉法を介して多次元情報を含む物体光を抽出し、回折積分等の演算を通じて多次元情報を含む物体の像を再生する。位相変調を活用して多重センシング

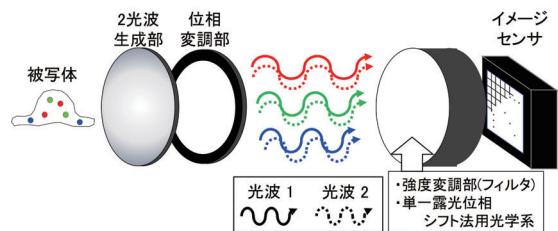


図 1. 自然光多次元デジタルホログラフィの概略。採用システムによっては、強度変調部、単一露光位相シフト法用光学系は不要。

を行う場合、光エネルギーの損失を抑えて明るく計測できる利点がある。また、計測精度は位相変調素子の変調レンジ、位相安定性、位相シフトに対する光利用効率の安定性に依る。

図 1 の光学系に対して、空間または時間のコヒーレンスを制御することにより、透明体の定量位相計測や光波の種類の識別へ展開できる。具体的には、光波 1 または 2 を球面波や平面波などの光波にすることで参照光として利用でき、定量位相計測を実現する。その実装には自己参照型の干渉光学系がよく採用される[27,28]。時間コヒーレンスに目を向けると、波長幅に応じて可干渉距離が異なることで光波の種類識別を行える[25]。具体的には光の種類ごとに波長幅が異なることが条件であるが、位相変調部での位相シフト量を大きく取ることで、光の種類ごとに干渉縞の振幅の減衰量が変わることで、位相シフト量を幾種類か与えながら多重ホログラムを取得し、行列式[25]を解くと、それぞれの物体の複素振幅分布を分離抽出することができる。波長の重畠が顕著、ピーク波長が同じという条件でも、光の種類の識別ができる[25]。

3. 実験結果の例

自然光多次元デジタルホログラフィの実験結果を幾つか紹介する。

表 1. イメージセンサを用いる自然光多次元デジタルホログラフィの分類。

基本技術	計測情報	多次元計測手段	関連の深い研究者 [論文]
位相シフトインコヒーレントデジタルホログラフィ[4,6-8]	カラー 3D 画像	波長フィルタ	Rosen and Brooker [32], Kim [12]
		波長多重	Vijay and Rosen [33], Hara [19], Tahara [20,25]
	偏光 3D 画像	偏光フィルタ	Sheng [34]
		偏光多重	Tahara [26]
単一露光位相シフトインコヒーレントデジタルホログラフィ[4-8,18,22,29-31]	カラー 3D 画像	波長フィルタ	Tahara [22], Choi [8]
		波長多重	Tahara [21]

3.1 波長多重技術を用いる位相シフトインコヒーレントデジタルホログラフィ

図 2 に、手のひらサイズのインコヒーレントカラーデジタルホログラフィシステム「ホロセンサ」を示す。2 光波生成部に複屈折レンズを用い、位相変調部に複屈折位相板と液晶位相変調器を用いた。偏光を利用する自己干渉計を導入したため、複屈折レンズの前とイメージセンサの前に偏光子を配置した。波長 530 nm, 625 nm の LED を用いて被写体を照明し、単板単色イメージセンサを用いて 7 種類の波長多重ホログラムを得た。実験結果を図 3 に示す。波長多重ホログラムから物体のカラー合焦像を得られる事が分かった。また、構築したシステムを用いて、同じ青色波長域の LED と蛍光体の光の識別にも成功している。実験条件の詳細は参考文献 25 を御覧いただきたい。

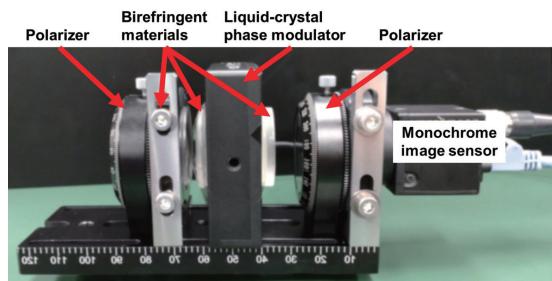


図 2. 試作した手のひらサイズのインコヒーレントカラーデジタルホログラフィシステム「ホロセンサ」[25]。

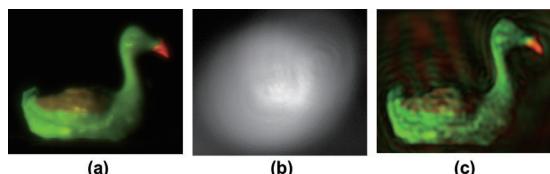


図 3. 図 2 のシステムを用いた実験結果[25]。(a)被写体、(b)波長多重ホログラムの一枚、(c)再生像。

3.2 波長フィルタアレイを用いる単一露光位相シフトインコヒーレントカラーデジタルホログラフィ

図 4 に、手のひらサイズの単一露光インコヒーレントカラーデジタルホログラフィシステムとカメラレンズからなる、ホロカメラを示す[35]。2 光波生成部に複屈折レンズを用い、位相変調部に複屈折位相板と液晶位相変調器を用いたことに加え、1/4 波長板とカラー偏光イメージセンサ(Lucid 社 PHX050S-Q)からなる単一露光位相シフト法のシステムを導入した。イメージセンサのカラーフィルタアレイにより波長情報を単一露光で同時記録する。波長 455 nm, 530 nm, 625 nm の

LED を用いて被写体を照明し、1 枚のホログラムから像再生した結果を図 5 に示す。本実験より、1 回の露光でフルカラーの合焦像を得られる事が分かった。また、構築したシステムを用いて、太陽光照明された屋外風景のフルカラーホログラフィックイメージングや、LED 照明を用いたビデオレートのフルカラーホログラフィック 3D 動画イメージングにも成功している。これらの実験結果は講演にて紹介する。

また、透明体の定量位相計測に関する内容[27,28]等も併せて講演にて紹介する。



図 4. 試作したホロカメラ[35]。

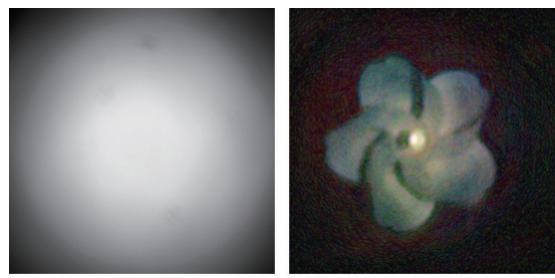


図 5. 図 4 のカメラを用いた実験結果。(a)フルカラー ホログラム、(b)再生像。(a)のホログラムはモノクロ表示で示している。

4.まとめ

自然光デジタルホログラフィに基づく多次元イメージング技術、コヒーレントレンズを活用したイメージング技術を紹介した。空間的にインコヒーレントな光の適用により、レーザ光ホログラフィでは粗面とされてきた物体のホログラムを、単一光路の自己干渉計で得られる様になった。また、時間コヒーレンスの低さから光路長差の調整が重要であるが、精密な光路長差の調整により自然な光でも明瞭な干渉縞を得られる様になった。加えて、スペックルノイズなく通常の光イメージング技術と同様の再生像を得られることから、先端信号処理技術を容易に適用できる様になった。結果として、コンパクトな光学系で、LED 光源と汎用の机を用い、人間の顔程度を対象としてビデオレートのフルカラー ホログラフィック 3D 動画イメージングができる

るようになった。今後は更なる計測性能の向上が課題である。

5. 謝辞

本研究の一部は科学技術振興機構(JST)さきがけ(JPMJPR16P8), 物質・デバイス領域共同研究拠点 基盤共同研究(No. 20224020), JSPS KAKENHI Grant Number JP19H03202, 公益財団法人 三菱財団(202111007)の助成を受けた。

文 献

- [1] D. Gabor, "A new microscopic principle," *Nature* **161**, 777–778 (1948).
- [2] E. N. Leith and J. Upatnieks, "Reconstructed wavefronts and communication theory," *J. Opt. Soc. Am.* **52**, 1123–1128 (1962).
- [3] 久保田敏弘：“新版ホログラフィ入門-原理と実際-”，朝倉書店，東京 (2010)
- [4] J. Rosen, A. Vijayakumar, M. Kumar, M. R. Rai, R. Kelner, Y. Kashter, A. Bulbul, and S. Mukherjee, "Recent advances in self-interference incoherent digital holography," *Adv. Opt. Photonics* **11**, 1–66 (2019).
- [5] J.-P. Liu, T. Tahara, Y. Hayasaki, and T.-C. Poon, "Incoherent digital holography: a review," *Appl. Sci.* **8**, 143 (2018).
- [6] J. Rosen, S. Alford, A. Vijayakumar, J. Art, P. Bouchal, Z. Bouchal, M.-U. Erdenebat, L. Huang, A. Ishii, S. Juodkazis, N. Kim, P. Kner, T. Koujin, Y. Kozawa, D. Liang, J. Liu, C. Mann, A. Marar, A. Matsuda, T. Nobukawa, T. Nomura, R. Oi, M. Potcoava, T. Tahara, B. L. Thanh, and H. Zhou, "Roadmap on recent progress in FINCH technology," *J. Imaging* **7**, 197 (2021).
- [7] T. Tahara, "Review of incoherent digital holography: applications to multidimensional incoherent digital holographic microscopy and palm-sized digital holographic recorder – Holosensor," *Front. Photonics* **2**, 829139 (2022).
- [8] T. Tahara, Y. Zhang, J. Rosen, A. Vijayakumar, L. Cao, J. Wu, T. Koujin, A. Matsuda, A. Ishii, Y. Kozawa, R. Okamoto, R. Oi, T. Nobukawa, K. Choi, M. Imbe, and T.-C. Poon, "Roadmap of incoherent digital holography," *Appl. Phys. B* **128**, 193 (2022).
- [9] A. W. Lohmann, "Wavefront reconstruction for incoherent objects," *J. Opt. Soc. Am.* **55**, 1555 (1965).
- [10] P.J. Peters, *Appl. Phys. Lett.* "Incoherent Holograms with Mercury Light Source," **8**, 209 (1966).
- [11] J. Rosen and G. Brooker, "Digital spatially incoherent Fresnel holography," *Opt. Lett.* **32**, 912–914 (2007).
- [12] M. K. Kim, "Full color natural light holographic camera," *Opt. Express* **21**, 9636–9642 (2013).
- [13] B. Zhu and K. Ueda, "Real-time wavefront measurement based on diffraction grating holography," *Opt. Commun.* **225**, 1–6 (2003).
- [14] J. Millerd, N. Brock, J. Hayes, M. N. Morris, M. Novak, and J. Wyant "Pixelated phase-mask dynamic interferometer," *Proc. SPIE* **5531**, 304 (2004).
- [15] Y. Awatsuji, M. Sasada, and T. Kubota, "Parallel quasi-phase-shifting digital holography," *Appl. Phys. Lett.* **85** 1069–1071 (2004).
- [16] T. Tahara, R. Mori, S. Kikunaga, Y. Arai, and Y. Takaki, "Dual-wavelength phase-shifting digital holography selectively extracting wavelength information from wavelength-multiplexed holograms," *Opt. Lett.* **40**, 2810–2813 (2015).
- [17] T. Tahara, R. Otani, K. Omae, T. Gotohda, Y. Arai, and Y. Takaki, "Multiwavelength digital holography with wavelength-multiplexed holograms and arbitrary symmetric phase shifts," *Opt. Express* **25**, 11157–11172 (2017).
- [18] T. Tahara, T. Kanno, Y. Arai, and T. Ozawa, "Single-shot phase-shifting incoherent digital holography," *J. Opt.* **19**(6), 065705 (2017).
- [19] T. Hara, T. Tahara, Y. Ichihashi, R. Oi, T. Ito, "Multiwavelength-multiplexed phase-shifting incoherent color digital holography," *Opt. Express* **28**, 10078 (2020).
- [20] T. Tahara, T. Ito, Y. Ichihashi, and R. Oi, "Multiwavelength three-dimensional microscopy with spatially incoherent light, based on computational coherent superposition," *Opt. Lett.* **45**, 2482–2485 (2020).
- [21] T. Tahara, A. Ishii, T. Ito, Y. Ichihashi, and R. Oi, "Single-shot wavelength-multiplexed digital holography for 3D fluorescent microscopy and other imaging modalities," *Appl. Phys. Lett.* **117**, 031102 (2020).
- [22] T. Tahara, T. Ito, Y. Ichihashi, and R. Oi, "Single-shot incoherent color digital holographic microscopy system with static polarization-sensitive optical elements," *J. Opt. (IOP Publishing)* **22** (2020) 105702.
- [23] T. Tahara, T. Koujin, A. Matsuda, A. Ishii, T. Ito, Y. Ichihashi, and R. Oi, "Incoherent color digital holography with computational coherent superposition (CCS) for fluorescence imaging," *Appl. Opt.* **60**, A260–A267 (2021).
- [24] T. Tahara, Y. Kozawa, A. Ishii, K. Wakunami, Y. Ichihashi, and R. Oi, "Two-step phase-shifting interferometry for self-interference digital holography," *Opt. Lett.* **46**, 669–672 (2021).
- [25] T. Tahara, "Multidimension-multiplexed full-phase-encoding holography," *Opt. Express* **30**, 21582–2198 (2022).
- [26] T. Tahara, "Incoherent digital holography system for simultaneous imaging of three-dimensional and polarization information without a polarization filter," in *Proceedings of BISC2022*.
- [27] T. Tahara, Y. Kozawa, A. Matsuda, and R. Oi, "Quantitative phase imaging with single-path phase-shifting digital holography using a light-emitting diode," *OSA Continuum* **4**(11), 2918–2927 (2021).
- [28] T. Tahara, Y. Kozawa, and R. Oi, "Single-path single-shot phase-shifting digital holographic microscopy without a laser light source," *Opt. Express* **30** 1182–1194 (2022).
- [29] T. Nobukawa, T. Muroi, Y. Katano, N. Kinoshita, and N. Ishii, "Single-shot phase-shifting incoherent digital holography with multiplexed checkerboard phase gratings," *Opt. Lett.* **43**(8), 1698–1701 (2018).
- [30] K. Choi, K.-I. Joo, T.-H. Lee, H.-R. Kim, J. Yim, H.

- Do, and S.-W. Min, "Compact self-interference incoherent digital holographic camera system with real-time operation," *Opt. Express* **27**(4), 4818–4833 (2019).
- [31] D. Liang, Q. Zhang, J. Wang, and J. Liu, "Single-shot Fresnel incoherent digital holography based on geometric phase lens," *J. Mod. Opt.* **67**(2), 92–98 (2020).
- [32] J. Rosen and G. Brooker, "Fluorescence incoherent color holography," *Opt. Express* **15**, 2244-2250 (2007).
- [33] A. Vijayakumar and J. Rosen, "Spectrum and space resolved 4D imaging by coded aperture correlation holography (COACH) with diffractive objective lens," *Opt. Lett.* **42**(5), 947–950 (2017).
- [34] W. Sheng, Y. Liu, H. Yang, Y. Shi, and J. Wang, "Polarization-sensitive imaging based on incoherent holography," *Opt. Express* **29**(18), 28054-28065 (2021).
- [35] T. Tahara, "Single-shot full-color holography with sunlight," in *Proceedings of Digital holography and 3-D imaging 2022 (DH2022)*, OPTICA, M1A.6, UK, August 2022.

高精細3次元撮像技術の実現に向けた インコヒーレントディジタルホログラフィの研究

信川 輝吉^{†,*} 片野 祐太郎[†] 後藤 正英[†]

萩原 啓[†] 室井 哲彦[†]

† NHK 放送技術研究所 〒157-8510 東京都世田谷区砧 1-10-11

*E-mail: nobukawa.t-eq@nhk.or.jp

あらまし インコヒーレントディジタルホログラフィ(IDH: Incoherent Digital Holography)は、空間的コヒーレンスの低い照明光でホログラムを記録でき、優れた空間周波数応答特性の再生像が得られるため、高精細な3次元撮像を実現するために有望な技術である。しかし、IDHに基づく撮像技術を実現するためには、ホログラム記録時のノイズ、リングングを伴う不自然なぼけ像、動画像撮影への対応など、多くの解決すべき技術課題がある。これらの課題を解決するため、私たちは、適応的空間平均、自然なぼけ像を生成するホログラム再生法、空間分割位相シフト法を提案・検討してきた。本稿では、それぞれの技術課題を概説し、それらを解決するための取り組みを紹介する。

キーワード インコヒーレントディジタルホログラフィ、回折光学素子、ぼけ、空間周波数フィルタリング

Study on incoherent digital holography towards high-definition 3D imaging technique

Teruyoshi Nobukawa^{†,*} Yutaro Katano[†] Masahide Goto[†]

Kei Hagiwara[†] and Tetsuhiko Muroi[†]

† NHK Science & Technology Research Laboratories 1-10-11 Kinuta, Setagaya-ku, Tokyo, 157-8510 Japan

*E-mail: nobukawa.t-eq@nhk.or.jp

Abstract Because incoherent digital holography (IDH) allows us to record a hologram under spatially incoherent illumination and to obtain reconstructed images with the property of a superior spatial frequency response, it is attractive for a high-definition 3D imaging technique. However, to develop a practical 3D imaging technique based on IDH, it is necessary to solve technical obstacles, such as noises while recording hologram, unnatural bokeh with ringing, and implementation of videography. To address these obstacles, we have proposed adaptive spatial averaging, reconstruction for natural bokeh, and a space-division phase-shifting method. Herein, we briefly review the abovementioned technical obstacles and introduce our proposed method.

Keyword incoherent digital holography, diffractive optical element, bokeh, spatial frequency filtering

1.はじめに

インコヒーレントディジタルホログラフィ (IDH: Incoherent Digital Holography) では、レーザのようなコヒーレントな光を必要とせず、太陽光や蛍光、白熱灯、発光ダイオード (LED: Light-Emitting Diode) などの空間的にインコヒーレントな光の自己干渉を利用することにより、ホログラムを形成できる [1-3]。この特徴から、IDH は、レーザ光源を用いる従来のディジタルホログラフィ [4] では応用困難であった、太陽光下でのカラー3次元像の撮影 [5]、3次元の蛍光顕微鏡 [6-8]、放射温度の3次元測定 [9] などに応用できる。特に、IDH

をカメラとして利用する場合、空間的にインコヒーレントな光は身の回りにあふれており、これを照明光として利用するため、レーザなどの特殊な光源装置を用意して3次元情報を取得するカメラに対して、IDH ではアイセーフや複数の光源装置間の混信の課題がない。さらに、IDH は、従来のイメージング技術では得られない特異な撮像特性を有し、ラグランジュの不变則の制約を受けない高分解能の撮像 [10, 11] や、理論的に無限大の被写界深度の撮像 [12-15] を実現できる。

上述の IDH 固有の特徴・機能は、周囲光で高精細な3次元情報を取得するために有効である。さらに、IDH

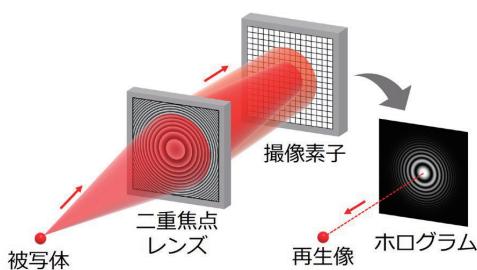


図 1 IDH のホログラム記録・再生過程.

の原理に基づくカメラを実現できれば、小型 4K, 8K カメラにおけるレンズ系の光学的伝達関数の高周波成分の減衰[16]や、フォーカス調整の困難さ[17]を解決できる可能性を秘めている。しかしながら、IDH では、ホログラム記録時のノイズ[18]、リングングを伴う不自然なぼけ像[19]、動画像撮影への対応[20-22]など、複数の解決すべき技術課題がある。

本稿では、はじめに、基本的な IDH のホログラム記録・再生手順を述べる。次に、上述の 3 つの技術課題である、ホログラム記録時のノイズ、リングングを伴う不自然なぼけ像、動画像撮影への対応に関して節ごとにそれぞれ概説し、各技術課題を解決するための私たちの取り組みを紹介する。最後に、まとめと今後の展望を述べる。

2. IDH のホログラム記録・再生手順

IDH では、被写体から反射あるいは発光し、伝搬してきたインコヒーレントな光を 2 つに分割し、これらの光波の間にシア量を与えた上で、自己干渉を利用してことにより、ホログラムを形成する。なお、IDH では光源のコヒーレンスに関して、空間的コヒーレンスが低いほどアーチファクトが少なく[23]、時間的コヒーレンスが高いほど分解能が高くなる[24, 25]。

図 1 に IDH の光学系の概念図を示す。二重焦点レンズにより、被写体から伝搬してきた光を 2 つの光波に分割しつつ、これらに曲率が異なる球面位相を付与する。これらの光波が撮像素子面で干渉することで、自己干渉のホログラムを形成できる[1, 2]。このホログラムを撮像素子によりデジタル信号として記録する。図 1 では、付加的な光学素子を記載していないが、二重焦点レンズの前後にレンズ群を追加することで、光利用効率を高め、分解能や画角を調整することもできる[18, 21]。また、時間分割の位相シフト法を適用する場合には、適忯的に位相を変調できる位相変調型の空間光変調器(PSLM: Phase-only Spatial Light Modulator)や液晶レンズを導入する必要がある[1, 2]。あるいは、

二重焦点レンズを、曲率半径が異なる 2 枚のミラーで構成されるマイケルソン干渉系で実現し、ピエゾ素子により一方の光路の光路長を変更する必要がある[5, 9]。

ホログラム再生過程では、コヒーレント光を用いるデジタルホログラフィ[4]と同様に、記録したホログラムの強度分布に、あるいは、位相シフト法により複数枚のホログラムから抽出した複素振幅分布に対して、フレネル回折積分や角スペクトル法などの回折伝搬計算を適用することで、被写体の再生像が得られる。

3. 適忯的空間平均によるノイズ量の低減

IDH で形成されるホログラムのコントラストは、被写体の大きさ・光学系の構成に依存して変化するが、一般に、十分高くないことが現状の課題である[26]。コントラストが低いと、ホログラムを記録する際のノイズの影響を無視できなくなり、再生像の品質が低下する[18]。IDH の画質低下の主因のノイズは、撮像素子でのショットノイズと熱雑音であり、これらは画素ごとに独立かつランダムで、記録したホログラムに重畠する。これらを低減するためには、記録したホログラムに対してローパスフィルタリングをおこなうことが簡易で有効な方法であるが、信号の高周波成分も除去してしまう恐れがあり、ノイズ低減量と、ホログラムあるいは再生像の分解能はトレードオフの関係にある。

そこで、高周波成分を保持したままノイズを除去する、適忯的空間平均手法を提案してきた[18]。ローパスフィルタリングの通過帯域幅には、被写体の奥行き距離に依存して変化するホログラムの最小ピッチの逆数を設定する。例えば、図 2(a)に示す IDH の光学系を構築する場合、撮像素子面で形成されるホログラムの最小ピッチは、図 2(b)で示すように、レンズから被写体までの奥行き距離に依存して変化する[18, 21]。IDH のホログラムの最小ピッチは、光学系を構成する各光学素子の有限な開口幅を考慮して光波の伝搬を考えることで算出できる[18]。コヒーレント光を用いるデジタルホログラフィ[4]では、被写体の奥行き距離が撮像素子に近くなるほど、ホログラムの最小ピッチが単調に減少する傾向を示すが、図 2(b)のように極小値を有するのは IDH 特有の性質である。図 2(b)の極小値、つまりホログラムの最小ピッチの情報を踏まえると、例えば、画素ピッチ 8 μm の撮像素子を図 2(a)の光学系に導入すれば、あらゆる奥行き距離に配置された被写体のホログラムを、エイリアシングを発生させることなく標本化して、記録できる。しかし、図 2(b)から分かるように、被写体の奥行き距離が 789 mm から近くなるほど、あるいは遠くなるほど、ホログラムの最小ピッチが大きくなる。したがって、画素ピッチ 8 μm の撮像素子では、オーバー

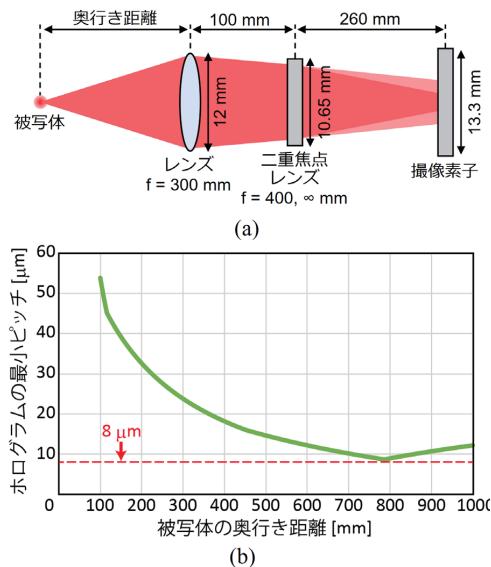


図 2 IDH の光学系の(a)構成例とその光学系における(b)被写体の奥行き配置距離に対するホログラムの最小ピッチの変化.

サンプリングしてホログラムを記録することになる。この撮像素子の空間周波数帯域幅と、形成されるホログラムの空間周波数帯域幅とのギャップを埋める形で、伝搬距離に応じて、通過帯域幅を適応的に設定したローパスフィルタリングを適用することで、ホログラムあるいは再生像の分解能を犠牲にすることなく、ノイズを低減できる。

図 2(a)に示す光学系を構築し、奥行き距離 400 mm に配置した透過型 USAF テストチャートのホログラムを実験により記録・再生した結果を図 3(a)に示す。また、適応的空間平均を適用した結果を図 3(b)に示す。図中に示す実線の矩形領域と、破線の矩形領域の輝度値のそれぞれの平均値の比をコントラスト比 (CR: Contrast Ratio)として、画質を評価した。その結果、適応的空間平均により CR が 2.29 から 5.49 に向上了した。また、USAF テストチャートの像から光学的伝達関数を評価した結果、空間平均により分解能・空間周波数応答にも影響を与えないことを確認した[18]。適応的空間平均の画質改善の効果は、図 3(c), (d)に示すように、反射物体を撮影する場合でも有効であることを確認している[18]。

4. 自然なぼやけ像のホログラム再生法

第 2 節で述べたように、IDH では再生像を得るために、回折伝搬計算を利用しておらず、インコヒーレント光で記録したホログラムの情報を、暗黙のうちにコヒ

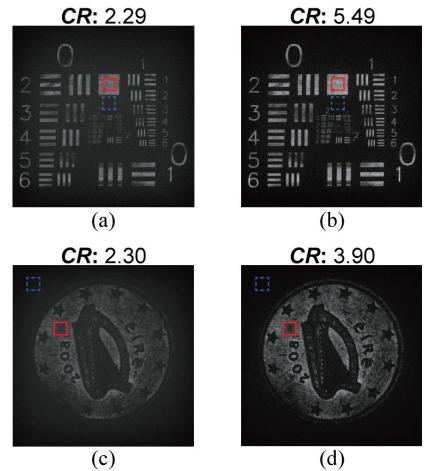


図 3 実験による比較。透過型 USAF テストチャートのホログラムに適応的空間平均を(a)適用しない場合と、(b)適用した場合の再生像。反射物体であるコインのホログラムに適応的空間平均を(c)適用しない場合と、(d)適用した場合の再生像.

ーレントな光としてみなして再生像を得ている。これが原因で、再生像の合焦点以外の像（ぼやけ像）では、リングングが発生する[19]。リングングを伴うぼやけ像は、人の目やカメラのようなインコヒーレント光学系での滑らかなぼやけ方とは異なるため、多くの人に不自然な印象を与える恐れがある。

そこで、IDH で記録したホログラムから、インコヒーレント光学系における自然なぼやけ像を得るために、図 4 に示すホログラム再生法を提案した[19]。本手法

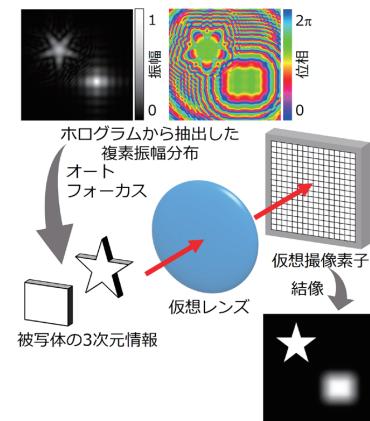


図 4 自然なぼやけ像のホログラム再生法.

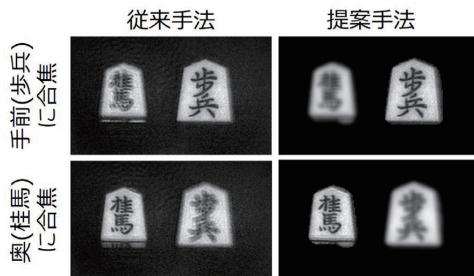


図 5 駒の合焦とぼやけのぐあい。従来手法と提案手法の再生像。

では、あらかじめ、IDH の光学系で取得したホログラムから位相シフト法などにより複素振幅分布を抽出する。この複素振幅分布から、オートフォーカスのアルゴリズム[27, 28]により、被写体の 3 次元情報を得る。具体的には、複素振幅分布に対して、伝搬距離を微小な間隔で変化させ、その都度、回折伝搬計算をおこない、再生像群を得る。この再生像群から、各再生像の面内の局所領域ごとに鮮銳度を評価する。鮮銳度が最も高い再生像が得られる伝搬距離を被写体の奥行き距離とみなすことで、被写体の 3 次元情報を同定できる。なお、IDH では、ホログラム記録時の被写体の奥行き距離と、ホログラム再生時の伝搬距離が非線形の関係にあるため、オートフォーカスで得た 3 次元情報を補正する必要がある[19, 20]。ホログラムの複素振幅分布から得た 3 次元情報に対して、計算機内で仮想レンズと仮想撮像素子で構成されるインコヒーレント結像系での結像の過程を、結像系の光学的伝達関数との畳み込み積分により計算することで、自然なぼやけ像の再生像が得られる。

本手法および従来の回折伝搬計算で得た再生像を図 5 に示す。被写体は、奥行き方向の異なる位置に配置された 2 枚の将棋の駒（桂馬と歩兵）とした。従来手法では、ぼやけ像にコヒーレント光特有のリンギングが発生している。一方、提案手法では、リンギングが発生しておらず、滑らかなぼやけ像を得ることに成功している。

5. 空間分割位相シフト法に基づく動画像撮影

記録したホログラムから高精度な被写体の 3 次元情報を抽出するために、空間的にスペースな被写体でない限り、0 次光と共役像成分を除去する必要がある。従来の IDH の多くの研究では、時間分割位相シフト法が適用されている[5-9]。しかし、この方法では、複数枚のホログラムを逐次的に記録する必要があり、動画像撮影に応用することは困難である。

これまで、私たちは、動画像撮影に対応するために、

位相シフト法に必要な複数枚のホログラムを一括で形成・記録する、空間分割位相シフト法を利用することを前提に、さまざまな光学系を検討してきた[20-22]。これまでに検討してきた空間分割位相シフト法の光学系の概念図を図 6 に示す。

図 6(a)は、マイケルソン干渉計で 2 枚の市松状の回折光学素子を導入し、それらの 1 次回折光成分で 4 枚のホログラムを形成させる光学系である[20]。フーリエ変換のシフト則に基づいて、2 枚の回折光学素子の相対的な距離を面内でずらすことで、4 枚のホログラムに異なる位相シフト量を付与し、一度の露光で位相シフト法を実現できる。しかし、本光学系では、非常に高精度なアライメント技術が必要であり、光学系を構築する難易度が高いことが課題である。

この課題を解決するために、図 6(b)に示す、偏光を利用して共通光路の干渉計を提案した[21]。本光学系は、複屈折性を有する光学素子を二重焦点レンズとして用い、1 枚の市松状の回折光学素子により、4 枚のホログラムを形成する。円偏光の幾何位相を利用することで、各ホログラムに異なる位相シフト量を付与できる。

図 6(a), (b)の光学系はともに撮像素子の選択肢の自由度が高く、アプリケーションや撮影対象に応じて、所望の画素ピッチ、階調数、耐ノイズ性能の撮像素子を使用できる。また、撮像素子以外の光学系をモジュール化すれば、既存の放送用カメラや民生用カメラの交換レンズの一つとして利用可能である。一方で、図 6(a), (b)の光学系の共通する短所として、画角を広げにくい点が挙げられる。回折光学素子から回折される 4 枚のホログラムが互いに重ならないように、撮像素子の配置位置を離して配置する必要があり、さらに、撮像素子の受光領域を 4 分割して、各ホログラムを独立に記録するため、画角が犠牲になる。

画角を広げるためには、図 6(c), (d)の偏光子アレイセンサを導入した光学系が有効である。偏光子アレイセンサは、画素ごとに透過軸の角度が 45 度ずつ異なる直線偏光子が搭載されているため、円偏光の幾何位相を利用することで、隣接画素ごとに位相シフト量が異なる 4 枚のホログラムが得られる。図 6(c)はマイケルソン干渉計[22]、図 6(d)は共通光路干渉計に基づいている。位相シフト法を適用するためには、撮影画像に対してデモザイキングが必要となるため、ホログラム記録時の分解能が実質的に $1/2 \times 1/2$ に低下する。また、現状では、市販されている偏光子アレイセンサの選択肢は限定的であり、アプリケーションに応じた撮像素子の仕様の柔軟な変更は困難である。なお、図 6(d)の光学系は、これまで多くの研究グループから報告されており、二重焦点レンズの役割をもつ光学素子とし

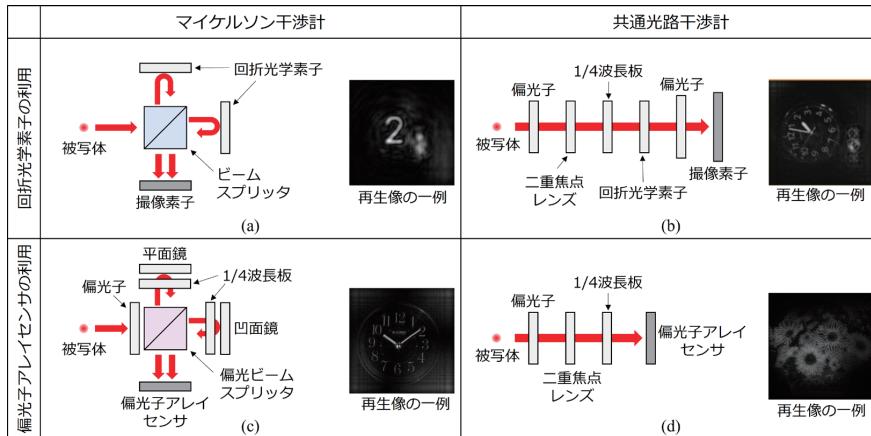


図 6 動画像撮影のための IDH の光学系. 回折光学素子を導入した(a)マイケルソン干渉計と(b)共通光路干渉計. 偏光子アレイセンサを導入した(c)マイケルソン干渉計と(d)共通光路干渉計.

て、反射型の PSLM [29, 30]、複屈折レンズ[31]、偏光回折レンズ[32-34]、メタレンズ[35]が提案されている。これらに対して、私たちは液晶レンズ[36]を用いた光学系を構築している。液晶レンズは、透過型の光学デバイスであり、焦点距離を変更できるため、小型な光学系で、被写体の奥行き距離に応じて、分解能を適応的に変更できる。

マイケルソン干渉計と共通光路干渉計の大きな違いは、光波に付与する球面位相量の自由度にある。共通光路干渉計を利用する場合には、二重焦点レンズとして複屈折性のある特殊な光学素子の利用が必須であり、焦点距離の選択肢が限られたため、分解能や倍率の調整に制限がある。一方、マイケルソン干渉計の場合には、凹面鏡を利用できるため、焦点距離の選択肢の自由度が高く、分解能や倍率を比較的柔軟に設定できる。表 1 に、上述した 4 種類の光学系の長所・短所の関係を示す。なお、分解能・画角に関しては、各光学系でレンズ系を適切に選定することで改善可能であるが、表 1 では共通仕様の光学素子を用いることを前提とし、相対的に比較したものである。

以上のように、動画像撮影のための IDH の光学系は、一長一短であり、アプリケーションやコンテンツ、カメラとして実装する際の形態に応じて、適切な光学系を選定する必要がある。

表 1 動画像撮影のための図 6 の各種光学系の比較

	分解能	画角	構築の 容易さ	素子の 選択肢	モジュ ール化
(a)	◎	×	×	○	◎
(b)	◎	△	△	△	◎
(c)	○	○	△	◎	×
(d)	○	◎	◎	△	×

6.まとめ

高精細な 3 次元撮像技術を目指した IDH の研究を紹介した。ホログラム記録時のノイズ、リングングを伴う不自然なぼけ像、動画像撮影への対応に関する 3 つの技術課題に対する解決法を概説した。今後、各手法の完成度を高め、高精細な 3 次元動画像を撮影可能な IDH ベースのカメラの実現を目指していく。

謝辞

本研究を進めるにあたり、シチズン時計株式会社様より液晶レンズを貸与いただきました。ここに深く謝意を表します。

文 献

- [1] J. Rosen, A. Vijayakumar, M. Kumar, M. R. Rai, R. Kelner, Y. Kashter, A. Bulbul, and S. Mukherjee, "Recent advances in self-interference incoherent digital holography," *Adv. Opt. Photon.* **11**, 1-66 (2019)
- [2] G. Brooker and N. Siegel, "Historical development of FINCH from the beginning to single-shot 3D confocal imaging beyond optical resolution," *Appl. Opt.* **61**, B121-B131 (2022)
- [3] T. Tahara, Y. Zhang, J. Rosen, V. Anand, L. Cao, J. Wu, T. Koujin, A. Matsuda, A. Ishii, Y. Kozawa, R. Okamoto, R. Oi, T. Nobukawa, K. Choi, M. Imbe, and T.-C. Poon, "Roadmap of incoherent digital holography," *Appl. Phys. B* **128**, 193 (2022)
- [4] B. Javidi, A. Carnicer, A. Anand, G. Barbastathis, W. Chen, P. Ferraro, J. W. Goodman, R. Horisaki, K. Khare, M. Kujawinska, R. A. Leitgeb, P. Marquet, T. Nomura, A. Ozcan, Y. Park, G. Pedrini, P. Picart, J. Rosen, G. Saavedra, N. T. Shaked, A. Stern, E. Tajahuerce, L. Tian, G. Wetzstein, and M. Yamaguchi, "Roadmap on digital holography [invited]," *Opt. Express* **29**, 35078-35118 (2021)
- [5] M. K. Kim, "Full color natural light holographic camera," *Opt. Express* **21**, 9636-9642 (2013)
- [6] J. Rosen and G. Brooker, "Non-scanning motionless

- fluorescence three-dimensional holographic microscopy," *Nat. Photon.* **2**, 190-195 (2008)
- [7] N. Siegel, V. Lupashin, B. Storrie, and G. Brooker, "High-magnification super-resolution FINCH microscopy using birefringent crystal lens interferometers," *Nat. Photon.* **10**, 802-809 (2016)
- [8] A. Marar and P. Kelner, "Three-dimensional nanoscale localization of point-like objects using self-interference digital holography," *Opt. Lett.* **45**, 591-594 (2020)
- [9] M. Imbe, "Radiometric temperature measurement by incoherent digital holography," *Appl. Opt.* **58**, A82-A89 (2019)
- [10] J. Rosen and R. Kelner, "Modified Lagrange invariants and their role in determining transverse and axial imaging resolutions of self-interference incoherent holographic systems," *Opt. Express* **22**, 29048-29066 (2014)
- [11] X. Lai, S. Xiao, Y. Guo, X. Lv, and S. Zeng, "Experimentally exploiting the violation of the Lagrange invariant for resolution improvement," *Opt. Express* **23**, 31408-31418 (2015)
- [12] D. L. Marks, R. A. Stack, D. J. Brady, D. C. Munson, and R. B. Brady, "Visible cone-beam tomography with a lensless interferometric camera," *Science* **284**, 2164-2166 (1999)
- [13] D. Weigel, H. Babovsky, A. Kiessling, and R. Kowarschik, "Widefield microscopy with infinite depth of field and enhanced lateral resolution based on an image inverting interferometer," *Opt. Commun.* **342**, 102-108 (2015)
- [14] D. Weigel, A. Kiessling, and R. Kowarschik, "Aberration correction in coherence imaging microscopy using an image inverting interferometer," *Opt. Express* **23**, 20505-20520 (2015)
- [15] T. Nobukawa, Y. Katano, T. Muroi, N. Kinoshita, and N. Ishii, "Bimodal incoherent digital holography for both three-dimensional imaging and quasi-infinite-depth-of-field imaging," *Sci. Rep.* **9**, 3363 (2019)
- [16] 山下 誉行, 崎山剛, 三橋政次, "4K/8K カメラの光学系について," *映像情報メディア学会誌* **71**, 819-824 (2017)
- [17] 舟津良平, 山下 誉行, 三谷公二, 野尻裕司, "スーパーハイビジョンカメラ用フォーカス補助信号," *映像情報メディア学会誌* **65**, 531-539 (2011)
- [18] T. Nobukawa, Y. Katano, T. Muroi, N. Kinoshita, and N. Ishii, "Sampling requirements and adaptive spatial averaging for incoherent digital holography," *Opt. Express* **27**, 33634-33651 (2019)
- [19] T. Nobukawa, M. Maezawa, Y. Katano, M. Goto, T. Muroi, K. Hagiwara, and N. Ishii, "Transformation of coherence-dependent bokeh for incoherent digital holography," *Opt. Lett.* **47**, 2774-2777 (2022)
- [20] T. Nobukawa, T. Muroi, Y. Katano, N. Kinoshita, and N. Ishii, "Single-shot phase-shifting incoherent digital holography with multiplexed checkerboard phase gratings," *Opt. Lett.* **43**, 1698-1701 (2018)
- [21] T. Nobukawa, Y. Katano, M. Goto, T. Muroi, K. Hagiwara, and N. Ishii, "Grating-based in-line geometric-phase-shifting incoherent digital holographic system toward 3D videography," *Opt. Express* **30**, 27825-27840 (2022)
- [22] 室井哲彦, 信川輝吉, 片野祐太郎, 萩原啓, "インコヒーレントデジタルホログラフィにおける偏光ビームスプリッタを用いたマイケルソン干渉計による光利用効率の向上," OPJ2022 16pC4 (2022)
- [23] X. Chao, Y. Gao, J. Ding, and H.-T. Wang, "Impact of the spatial coherence on self-interference digital holography," *Chin. Phys. B* **330**, 084212 (2021)
- [24] P. Bouchal and Z. Bouchal, "Concept of coherence aperture and pathways toward white light high-resolution correlation imaging," *New J. Phys.* **15**, 123002 (2013)
- [25] T. Nobukawa, Y. Katano, M. Goto, T. Muroi, N. Kinoshita, Y. Iguchi, and N. Ishii, "Coherence aperture restricted spatial resolution for an arbitrary depth plane in incoherent digital holography," *Appl. Opt.* **60**, 5392-5398 (2021)
- [26] 信川輝吉, 片野祐太郎, 室井哲彦, 木下延博, 石井紀彦, "インコヒーレントデジタルホログラフィのホログラムのコントラスト," OPJ2021 28pC3 (2021)
- [27] C. P. McElhinney, B. M. Hennelly, and T. J. Naughton, "Extended focused imaging for digital holograms of macroscopic three-dimensional objects," *Appl. Opt.* **47**, D71-D79 (2008)
- [28] E. S. R. Fonseca, P. T. Fiadeiro, M. Pereira, and A. Pinheiro, "Comparative analysis of autofocus functions in digital in-line phase-shifting holography," *Appl. Opt.* **55**, 7663-7674 (2016)
- [29] Z. Zhu and Z. Shi, "Self-interference polarization holographic imaging of a three-dimensional incoherent scene," *Appl. Phys. Lett.* **109**, 091104 (2016)
- [30] T. Tahara, T. Kanno, Y. Arai, and T. Ozawa, "Single-shot phase-shifting incoherent digital holography," *J. Opt.* **19**, 065705 (2017)
- [31] N. Siegel and G. Brooker, "Single shot holographic super-resolution microscopy," *Opt. Express* **29**, 15953-15968 (2021)
- [32] K. Choi, K.-I. Joo, T.-H. Lee, H.-R. Kim, J. Yim, H. Do, and S.-W. Min, "Compact self-interference incoherent digital holographic camera system with real-time operation," *Opt. Express* **27**, 4818-4833 (2019)
- [33] D. Liang, Q. Zhang, and J. Liu, "Single-shot Fresnel incoherent digital holography based on geometric phase lens," *J. Mod. Opt.* **67**, 92-98 (2020)
- [34] T. Tahara and R. Oi, "Palm-sized single-shot phase-shifting incoherent digital holography system," *OSA Contin.* **4**, 2372-2380 (2021)
- [35] J. Lee, Y. Kim, K. Choi, J. Hahn, S.-W. Min, and H. Kim, "Digital incoherent compressive holography using a geometric phase metasensor," *Sensors* **21**, 5264 (2021)
- [36] G. Brooker, N. Siegel, J. Rosen, N. Hashimoto, M. Kurihara, A. Tanabe, "In-line FINCH super resolution digital holographic fluorescence microscopy using a high efficiency transmission liquid crystal GRIN lens," *Opt. Lett.* **38**, 5264-5267 (2013)

令和5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： 2023年3月27日（月） 13:00～16:00
- 場 所： 千葉大学西千葉キャンパスおよびZoomによるハイブリッド開催
- テーマ： インコヒーレントホログラフィの進展
- プログラム：

13:00-13:10 開会挨拶

13:10-13:45 橋本 信幸（日本女子大学）

「液晶偏光 GRIN レンズを用いた FINCH 蛍光顕微鏡」

13:45-14:20 高木 康博（東京農工大）

「並列位相シフト法を用いたデジタルホログラフィーの像再生の高速化」

14:20-14:40 休憩

14:40-15:15 田原 樹（情報通信研究機構）

「自然光多次元デジタルホログラフィ」

15:15-15:50 信川 輝吉（日本放送協会）

「高精細3次元撮像技術の実現に向けたインコヒーレント
デジタルホログラフィーの研究」

15:50-16:00 情報コーナー、閉会挨拶

- 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

令和 5 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： 2023 年 6 月ころを予定
- 場 所： 未定
- テー マ： 未定
- プロ グラム： 未定
- 研究会参加申込：現地参加の場合は当日／オンライン参加の場合は事前申込
- 参加費：現地参加の場合は HODIC 会員 無料，非会員 2,000 円，学生で会報不要の場合は無料／オンライン参加の場合は会員，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。

HODIC 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	山本 健詞（徳島大学）
副 会 長	高橋 進（凸版印刷）	前 会 長	伊藤 智義（千葉大学）
国際 担当	松島 恭治（関西大学）	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）	西辻 崇（東京都立大学）
橋本 信幸	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. 43, No. 1 (Mar. 2023)

2023年3月27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