

自然光デジタルホログラフィの現在と将来展望

田原 樹

国立研究開発法人情報通信研究機構 電磁波研究所 電磁波先進研究センター
(〒 184-8795 東京都小金井市貫井北町 4-2-1)

Present and Future of Digital Holography with Natural Light

Tatsuki TAHARA

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

(Received July 1, 2022)

Developments of incoherent digital holography (IDH) with daily-use light are presented, and its prospective applications are discussed. Optical systems of IDH have become extremely compact, and the applications of IDH have been extended to various imaging techniques and apparatus. A theory of IDH for spatially and temporally incoherent light has been confirmed by various research studies. Directions of the developments and applications of IDH are discussed on the basis of research achievements.

Key Words: Incoherent digital holography, Holography with natural light, Computational imaging, Multidimension-multiplexed full-phase-encoding holography (MPH), Holosensor

1. はじめに

生物は一般に2視点以上の画像情報をセンシングして3次元空間を認識する。一方、自然界に無い3次元情報センシング技術であるホログラフィ¹⁻³⁾では、光の干渉を利用して2光波の位相差情報を干渉縞画像(ホログラム)として取得し、2次元の位相差情報を介して3次元情報を記録する。そして、光の回折を利用し、ホログラムから3次元画像の情報を再生する。ホログラムをデジタル記録し、計算機で定量的な3次元情報を像再生する技術はデジタルホログラフィと呼ばれる^{4,5)}。中でも、空間コヒーレンスの低いデジタルホログラムを取得する技術はインコヒーレントデジタルホログラフィ(Incoherent digital holography: IDH)⁶⁻¹⁰⁾と呼ばれ、蛍光や非線形光のホログラムを取得可能^{11,12)}、一般照明光を適用可能^{10,13)}である事から盛んに研究されている。また、日常生活で使用される光は時間コヒーレンスにも乏しいため、レーザー光源を用いるIDH⁷⁾とは異なり、コヒーレンス長も考慮する必要がある。自然光の様な、時間的、空間的にインコヒーレントな光のホログラムをデジタル記録する技術は自然光デジタルホログラフィとされ、研究開発がなされている。

本稿では、自然光デジタルホログラフィの世界的な研究開発状況を紹介します。将来展望について論じる。

2. インコヒーレントデジタルホログラフィ (IDH)

Fig. 1にIDHの概略を示す。IDHでは、太陽光を介してシャボン玉が干渉模様を形成する様に、自然光でも自らの光に対しては干渉する性質を利用する。物体から来る光は、自己干渉光学系を通して干渉縞に変換され、ホログラムとして記録される。ホログラムに対し、デジタルホログラフィで採用される信号処理を計算機内で施し、定量的な3次元情報を像再生する。ここで、スペクトル幅が $2\Delta k$ 、中心スペクトルが k_c 、矩形の波長分布の物体光を仮定し、物体の一点 $u(x_0, y_0, z_0)$ から2光波が生成され、その2光波が形成する干渉縞画像を $I(x, y)$ とすると、参考文献14より $I(x, y)$ は次式で表せる。

$$I(x, y) = I_0(x, y) + q(x, y, \Delta k, \phi_p) u_h(x, y) \exp[-i\phi_p(k_c)] + C.C., \quad (1)$$

$$q(x, y, \Delta k, \phi_p) = \text{sinc} \left[\Delta k \left\{ [r_1(x, y, z) - r_2(x, y, z)] + OPL - \frac{\phi_p(k_c)}{k_c} \right\} \right], \quad (2)$$

$$u_h(x, y) = I_1(x, y) \exp \left[ik_c \left\{ [r_1(x, y, z) - r_2(x, y, z)] + OPL \right\} \right], \quad (3)$$

ここで、 $I_0(x, y)$ は0次回折光強度分布、 $q(x, y, \Delta k, \phi_p)$ は干渉縞の減衰項、 $u_h(x, y)$ はイメージセンサ面における干渉縞の複素振幅分布、 $\phi_p(k_c)$ は位相シフト量、 $C.C.$ は

(1)式の右辺第2項の複素共役, $r_1(x, y, z)$, $r_2(x, y, z)$ は2光波の位置ベクトル, OPL は複屈折位相板と位相シフトによる2光波間の光路長差の調整量, $I_1(x, y)$ は干渉縞の強度分布を示す. 自然光の位相は空間的にも時間的にも一貫性がない. 自己干渉光学系の特徴的な点として, Fig. 1の複屈折レンズからイメージセンサまで, 自然な光で生成された2物体光間の位相差がコヒーレントになる様に設計する. その結果, 安定した位相差をもって干渉縞を記録する. その一方で, 物体本来の複素振幅分布を記録している訳ではない. 自然な光で物体の位相を得るには自己参照型のホログラフィシステム²⁷⁾を導入することが一つの手段として挙げられる. (1)~(3)式より, 2光波の光路長差, 位相シフト量に応じて干渉縞の可視度が低下する事が示されている. また, 波長幅が広いほど, 光路長差や位相シフトに伴う干渉縞の減衰が顕著である事が示されている. 光路長差の調整の難易度を下げ, 且つ曲率半径差の大きな干渉縞が必要な際, 波長フィルタが挿入される. 物体の各点が形成する干渉縞画像 $I(x, y)$ の, インコヒーレントな重ね合わせを記録する事で物体のホログラムを得る. 物体が大きくなるにつれて点光源数が増える. イメージセンサのダイナミックレンジが記録可能な点光源数に関係するため, ダイナミックレンジは記録可能な物体の大きさに重要な要因となる.

3. 自然光デジタルホログラフィの現在

自然な光を用いるデジタルホログラフィの研究者はこの5年で著しく増加した. 応用分野の開拓ならびに応用に向けた研究開発が迅速に進められている. 中でも3次元顕微鏡, 3次元カメラ応用に向けた研究開発が活発である.

3.1 自然光ホログラフィの顕微鏡への応用

蛍光顕微鏡への応用は1997年に示された後¹¹⁾, 2010年前後から継続して盛んに行なわれるようになったこともあり¹⁵⁾, 生命科学研究者へ観察系を提供する段階になりつつある. IDHを顕微鏡へ応用する事例が多い理由には, 面内方向の点像分布関数が通常の広視野顕微鏡に比べ向上し^{16,17)}, 単眼の撮像素子の1回の露光で3次元情報を記録できることなどが挙げられる^{18,19)}. 蛍光顕微鏡への応用は, 生命科学に貢献するために重要である. 自発光体のホログラムを得られるIDHの有望な応用先として多くの研究者が集まっている. 直径40 nmの蛍光粒子のホログラムが取得され, 位置特定としては直径100 nmの蛍光粒子の動態に対し面内5 nm, 面外

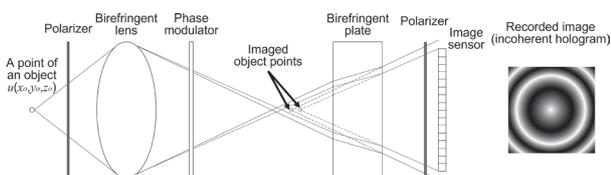


Fig. 1 Schematic of a self-interference incoherent digital holography setup.¹⁴⁾

40 nmの精度が報告されている²⁰⁾. 他に3次元的にサブミクロンの分解能が実験的に示された報告や²¹⁾, 共焦点顕微鏡との組み合わせによる118 nmの面内空間分解能²²⁾, 構造化照明との組み合わせによる点像分布関数の向上²³⁾が報告されている. 動画計測に関しては, 細胞内の分子のトラッキングを行なった研究や²⁴⁾, 3次元光励起と組み合わせて3次元動画記録した研究²⁵⁾, 直径210 nmの多数の蛍光粒子群を100 fps超の速度で3次元動画記録する実験研究²⁶⁾など, 観察系として使えるレベルまで性能を引き上げるための試みが多数見られる. また, 任意の光をホログラムとして記録できる特徴から, 自然放出のラマン散乱光のホログラフィック動画記録¹²⁾, 蛍光と定量位相を同時動画計測することを志向したLEDを用いる定量位相動画顕微鏡への応用なども提案されている²⁷⁾. そして, 空間, 時間軸の性能向上に加えて, 波長情報の同時取得にも研究者が集まりつつある. 記録可能な蛍光色の数は同時計測可能な分子組成の数に直結するため, カラー蛍光情報は細胞計測に必要不可欠である. そこで, 蛍光の波長と3次元情報を同時動画記録可能なホログラフィック蛍光顕微鏡システムが開発されている²⁸⁾. また, 蛍光染色されたHeLa細胞のカラーホログラフィック蛍光イメージングも示されている²⁹⁾. これまでに記録速度72 fpsのカラー蛍光ホログラフィック動画イメージングが実証された³⁰⁾. 今後は, 前述の空間分解能や位置特定精度を兼ね備えたカラーホログラフィック蛍光動画顕微鏡への発展が考えられる.

3.2 自然光ホログラフィの3次元カメラへの応用

LED, ランプ, 太陽光など, 日常で用いられる光で鮮明な再生像が得られて以来, ホログラフィを3次元カメラへ応用させようとする研究が年々増加している. 光源をレーザーに限定せず, 任意の奥行範囲の合焦像を, 単眼のイメージセンサで取得できる点が特長として挙げられる. IDHを用いる自然な光の3次元イメージングに関する研究は, Rosenらの研究グループが先駆的に行なっている¹⁷⁾. LED光源を用いた僅か数回の露光で, スペックルノイズの見られないホログラフィック3次元イメージングが可能である事など, ホログラフィの適用範囲を大きく広げ得る研究成果が示されている¹⁷⁾. また, Kimは太陽光でフルカラーのホログラムを得られる事を実証し, ホログラフィが屋外の風景を記録可能な技術である事が知られるようになった¹³⁾. この様な状況においても解決すべき研究課題や応用先の模索, ホログラフィを活用した新しい計測法の提案など, 多様な方向に研究が進められている. IDHでは従来, コヒーレント光と見なして光波伝播計算を行なう回折積分の適用のために, デジタルカメラで見られるようなボケ感が得られなかった. 信川らNHK技術研究所のグループは, 再生像に対して意図的にボケ関数を与える事で, 自然なボケ感のある再生像の取得に成功している³¹⁾. Minらのグループでは, ホログラフィック光学素子から出力される3次元情報を, IDHで計測するという応用例を提案している³²⁾. 他には, 偏光イメージセンサ上にIDH光学シ

システムを集積した単一露光のホログラムセンサの提案^{33,34)}、手のひらサイズの IDH 光学系を用いたカラー多重 3 次元イメージングが報告されている¹⁴⁾。また、単一光路の自己干渉計と単一露光位相シフト法を用いた、太陽光の単一露光フルカラーホログラフィック 3 次元イメージングが報告された³⁵⁾。

また、インコヒーレントホログラフィの原理を利用した新たな計測方法も提案されている¹⁴⁾。光波の種類を識別する事は、反射光と蛍光の分離と同時計測による、物体の反射特性および物質分布の推定、顕微鏡における定量位相と蛍光の同時イメージング等、物体の多様な情報を計測するために重要な方法として示されている。アクティブ照明した光の回折光と、蛍光等の自発光の波長帯が重畳する時、機械的走査や照明の変調無しに回折光と自発光の両方を 3 次元イメージングすることは難しいとされてきた。そこで、IDH、時間コヒーレンスの差、位相シフトを利用して、波長帯が重畳し、ピーク波長の差が 5 nm 以下の LED 光と蛍光を識別しながら同時 3 次元イメージング可能な方法が提案された¹⁴⁾。波長幅と時間コヒーレンスの関係から光波を識別可能な 3 次元イメージング法は、同じ波長帯で波長幅の異なる蛍光の識別も可能である事から、ビジョン応用時には反射光と蛍光の同時 3 次元イメージング応用のみならず、アクティブ照明光と周辺環境光(パッシブ光)の識別・同時 3 次元イメージング応用が期待され、顕微鏡応用時にはより多くの蛍光標識を用いた分子組成のイメージング、非線形

光計測時に発生する物質からの蛍光の分離、同時 3 次元イメージング等にも適用可能と期待される。

以上、空間と時間のコヒーレンスを制御し、太陽光であってもフルカラーホログラムを単一露光で取得できるようになり、コヒーレンス制御に基づく計測法も提案されている。手のひらサイズ、またはイメージセンサ上に IDH 光学系を集積化するなど、コンパクト化が達成され、さらには除振台を必要としないホログラム記録が達成されている。各種ホログラフィ技術の応用範囲の拡大が期待される。

4. 自然光デジタルホログラフィの将来展望

任意の光のフルカラーホログラムを単一露光で取得でき、応用の提案も増加している。本節では、現在までに得られている成果に鑑みた IDH の将来展望を論じる。IDH システムのサイズと計測性能の関係と、将来に考え得る応用展開先を Fig. 2 に示す。IDH は既存の光学機器に、ドッキングしてホログラム記録の機能を与えることができる。IDH システムのサイズと性能は比例する傾向にあり、用途によってはコンパクト化を優先する必要がある。例えば顕微鏡や高速度カメラ等の先端計測機器へ応用展開する時、性能を重視して系全体が大きくなることは比較的許容される。一方で、携帯電話内のカメラなどボードカメラへの応用、機械装置のセンサ、車載カメラ、ドローン等の軽量の移動体に搭載されるカメラ、一

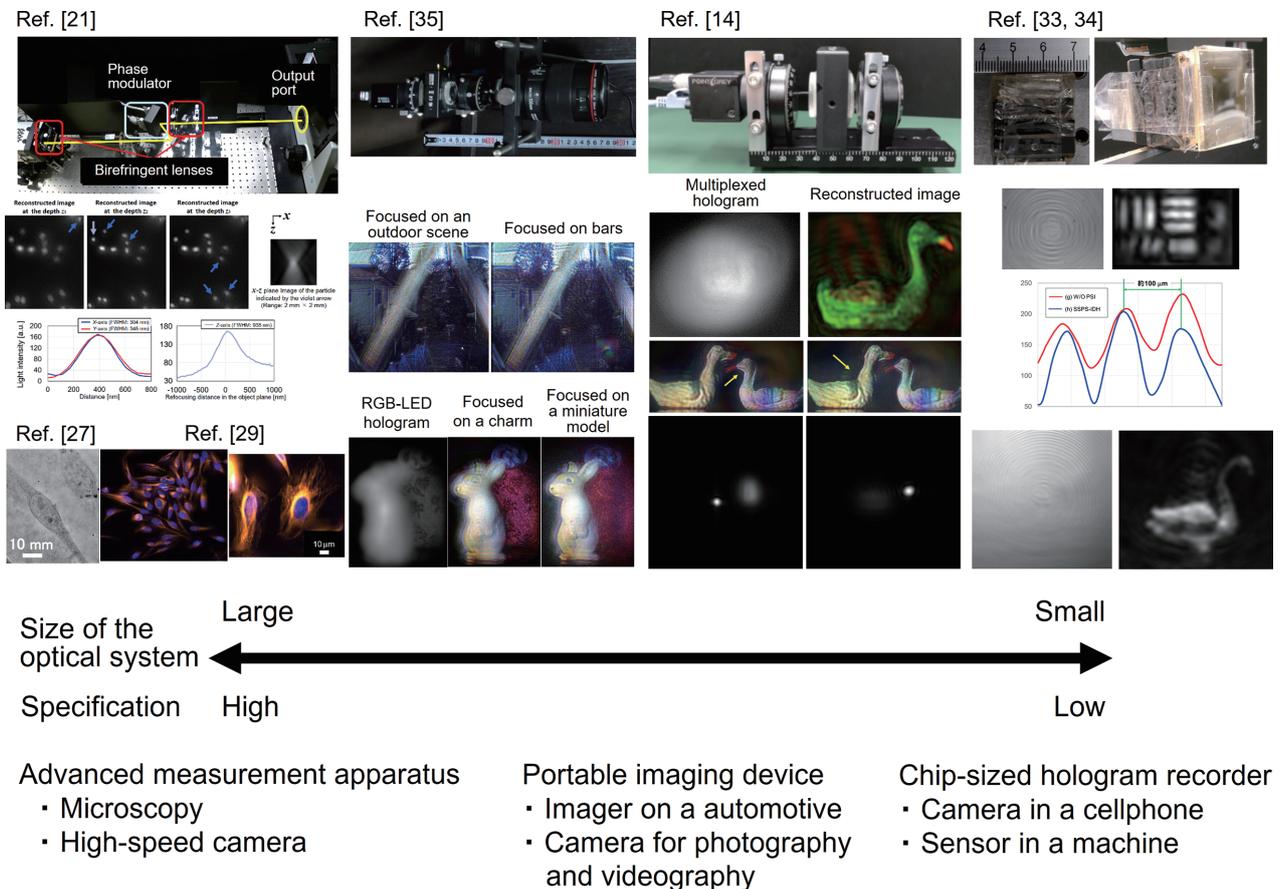


Fig. 2 Prospective applications of IDH considering the size of the optical system.

眼レフカメラ等への応用では、サイズ、重量に制限が掛かる。応用展開を考える時、性能だけでなくサイズ、重量など、用途に応じて求められる光学系の性質が異なるため、今後は応用先に適合する形で IDH システムを設計することは重要な研究課題になる。もちろん、多次元情報を一括記録できるホログラフィの強みから、先端計測機器への展開は有望な応用先であるため、性能を重視しユニークな計測機器を社会へ提供することも重要な研究課題である。一方で、コンパクト化により適用範囲が飛躍的に拡大するため、コンパクト化且つ高性能化を達成することも IDH の研究の方向性に挙げられる。筆者はイメージセンサ上に IDH 光学系を集積することを志向しており、手のひらサイズに収まる IDH 光学系をホロセンサと名付けている^{14,31,32}。イメージセンサに IDH 光学系を集積化し、イメージセンサがホログラム記録の機能を標準搭載する、という究極的な目標が達成されれば、あらゆる光学測定で貢献できると期待される。そこで筆者は、IDH の発展の一つの方向性として「ホロセンサ構想」を提案する。Fig. 3 に、IDH の考え得る研究展開先をまとめる。Fig. 2 ではサイズと計測性能で分類したのに対し、Fig. 3 では科学研究か産業応用か、ユーザを含め集まる専門家の多様性に応じて展開先の幅が変わってくることを示す。筆者の様な光学分野の研究者が IDH の基礎原理を研究する時は、光学分野の少人数の研究グループで完結する。一方、IDH を社会へ提供する際には、IDH を観察系として使う異分野の研究者、または IDH システムを洗練させる企業の存在が必要不可欠となる。例えばホログラフィの顕微鏡への応用は長い年月を掛けて取り組まれ、生命科学分野等の異分野の研究者との共同研究を通じて具体的な価値が年々示されてきて

いる。また、高速度イメージングへの展開においては高速度カメラメーカーの力添えが必要不可欠で、計測対象や求められる記録速度、空間性能などに応える様、柔軟な設計を行なうことが方向性として考えられる。このような展開は IDH においても同様で、そしてレーザー光ホログラフィでは困難だった自発光体や自然な照明光の計測に対して展開されるものと考えられる。また、自然な光のホログラフィック計測が可能になった事から、今まで考えられてこなかった車載カメラ、ドローン等の軽量の移動体に搭載されるカメラ等の、機械装置における画像計測機器、一眼レフカメラや放送用映像機器、さらには携帯電話のカメラ等への応用展開の道が拓かれる。機械装置の眼としてホログラフィを活用する、いわばホログラフィックマシンビジョンへの展開を考える時、光学の研究グループで完結する事は無く、機械工学、電子工学、情報科学の専門家や、関係する光・電子デバイスを開発・製造している企業の協力が必須である。長い道のりと数多くの人物との交流が必要不可欠であるが、世界中のイメージセンサにホログラムセンシングの機能を与え、イメージセンサが定量 3 次元計測の機能を標準装備する事をホロセンサ構想の目標と考える時、取り組む価値ある方向性であると考えられる。例えば携帯電話のカメラシステムに導入すれば、誰もが手元に 3 次元計測機器を持ち、日常における 3 次元(動画)計測が常識になる。また、光学定盤上で長年研究開発されてきた光干渉計測技術を、広く社会に提供する機会にも繋がる。例えば、光波の位相という極めて高感度、高分解能な 3 次元形状、変位、加速度計測が可能な物理量をもって、圧倒的な精密計測を達成する事により、社会へ新しい計測の形を提供する事も可能になると考えられる。

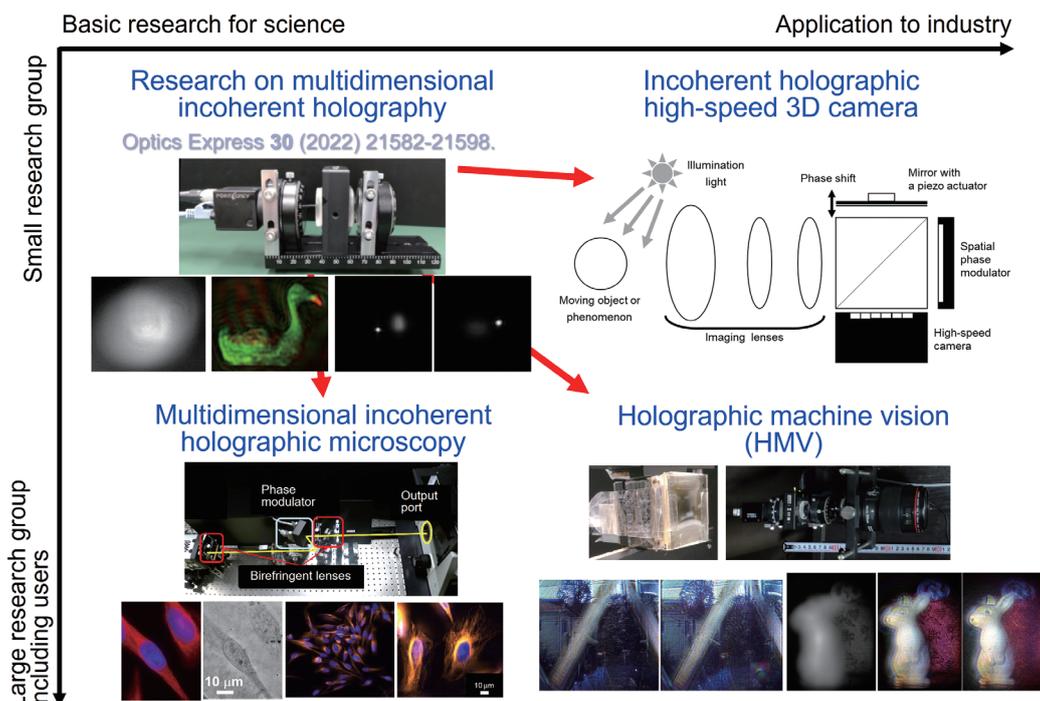


Fig. 3 Schematic of “holosensor vision”. The direction of applications of IDH and holosensor depends on the field of researchers and companies.

5. おわりに

自然光デジタルホログラフィの世界的な研究開発状況を紹介します。現在までの研究成果に基づいて、将来展望について論じた。3次元空間や多様な物理情報を1回の露光で同時記録というホログラフィの特徴に加え、自然光でもホログラム記録可能というIDHの特徴から、先端計測機器へ展開することは極めて有望な応用と考えられる。特に、グローバルシャッタ型の多次元動画計測機器として、応用展開の道を探る事は有望視される。その一方で、光学定盤、暗室、レーザー光源を必須とせず、さらには手のひらサイズまたはイメージセンサ上に光学系を集積可能という特徴から、今までホログラフィで考えられてこなかった、自動車、ドローン等の機械装置、さらには携帯電話などの移動体にホログラフィを搭載させるという展開さえ現実味を帯びている。IDHが今後どのような発展を遂げるかは、IDHにどのような分野の研究者や企業が集まるかに大きく依存する。光学研究者としてIDHの性能を上げる研究や各種のデモンストレーションに努めながら、技術の潜在的な能力を引き出すためにより多くの分野の研究者、企業人が集まる事を願う。

謝辞

関係する論文の共著者、研究をご支援下さった皆様に御礼申し上げます。本研究の一部は三菱財団(202111007)、物質・デバイス領域共同研究拠点基盤共同研究(No. 20224020)、JST さきがけ(JPMJPR16P8)、JSPS 科研費(18H01456)の助成を受けて行われた。

参考文献

- 1) D. Gabor: *Nature* **161** (1948) 777.
- 2) E. N. Leith, and J. Upatnieks: *J. Opt. Soc. Am.* **52** (1962) 1123.
- 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, 2010)
- 4) L. H. Enloe, J. A. Murphy, and C. B. Rubinsten: *B. S. T. J. briefs* **45** (1966) 333.
- 5) J. W. Goodman and R. W. Lawrence: *Appl. Phys. Lett.* **11** (1967) 77.

- 6) T.-C. Poon: *J. Opt. Soc. Am. A* **4** (1985) 521.
- 7) L. Mugnier and G. Sirat: *Opt. Lett.* **17** (1992) 294.
- 8) K. Yoshimori: *J. Opt. Soc. Am. A* **18** (2001) 765.
- 9) M. Takeda, W. Wang, Z. Duan, and Y. Miyamoto: *Opt. Express* **13** (2005) 9629.
- 10) J. Rosen and G. Brooker: *Opt. Lett.* **32** (2007) 912.
- 11) B. W. Schilling, T.-C. Poon, G. Indebetouw, B. Storrie, K. Shinoda, Y. Suzuki, and M. H. Wu: *Opt. Lett.* **22** (1997) 1506.
- 12) M. Liebel, N. P.-Perez, N. F. Hulst, and R. A. Puebla: *Nat. Nanotech.* **15** (2020) 1005.
- 13) M. K. Kim: *Opt. Express* **21** (2013) 9636.
- 14) T. Tahara: *Opt. Express* **30** (2022) 21582.
- 15) J. Rosen and G. Brooker: *Nat. Photon.* **2** (2008) 190.
- 16) G. Brooker, N. Siegel, J. Rosen, N. Hashimoto, M. Kurihara, and A. Tanabe: *Opt. Lett.* **38** (2013) 5264.
- 17) J. Rosen, A. Vijayakumar, M. Kumar, M. R. Rai, R. Kelner, Y. Kashter, A. Bulbul, and S. Mukherjee: *Adv. Opt. Photon.* **11** (2019) 1.
- 18) J. Hong and M. K. Kim: *Opt. Lett.* **38** (2013) 5196.
- 19) T. Tahara, T. Kanno, Y. Arai, and T. Ozawa: *J. Opt.* **19** (2017) 065705.
- 20) A. Marar and P. Kner: *Opt. Lett.* **45** (2020) 591.
- 21) T. Tahara, Y. Kozawa, A. Ishii, K. Wakunami, Y. Ichihashi, and R. Oi: *Opt. Lett.* **46** (2021) 669.
- 22) N. Siegel and G. Brooker: *Opt. Express* **29** (2021) 15953.
- 23) Y. Kashter, A. Vijayakumar, Y. Miyamoto, and J. Rosen: *Opt. Lett.* **41** (2016) 1558.
- 24) M. Liebel, J. O. Arroyo, V. S. Beltrán, J. Osmond, A. Jo, H. Lee, R. Quidant, and N. F. Hulst: *Sci. Adv.* **6** (2020) eabc2508.
- 25) X. Quan, M. Kumar, O. Matoba, Y. Awatsuji, Y. Hayasaki, S. Hasegawa, and H. Wake: *Opt. Lett.* **43** (2018) 5447.
- 26) T. Tahara, Y. Zhang, J. Rosen, V. Anand, L. Cao, A. Ishii, Y. Kozawa, R. Okamoto, R. Oi, T.-C. Poon, *et al.*: *Appl. Phys. B* **128** (2022) 193.
- 27) T. Tahara, Y. Kozawa, and R. Oi: *Opt. Express* **30** (2022) 1182.
- 28) T. Tahara, A. Ishii, T. Ito, Y. Ichihashi, and R. Oi: *Appl. Phys. Lett.* **117** (2020) 031102.
- 29) T. Tahara, T. Koujin, A. Matsuda, A. Ishii, T. Ito, Y. Ichihashi, and R. Oi: *Appl. Opt.* **60** (2021) A260.
- 30) T. Tahara, T. Koujin, A. Matsuda, Y. Kozawa, Y. Ichihashi, and R. Oi: *OSA Digital holography and 3-D imaging 2021* (2021) DTu6H.5.
- 31) T. Nobukawa, M. Maezawa, Y. Katano, M. Goto, T. Muroi, K. Hagiwara, and N. Ishii: *Opt. Lett.* **47** (2022) 2774.
- 32) Y. Kim, S. Park, H. Baek, and S.-W. Min: *Opt. Express* **30** (2022) 902.
- 33) T. Tahara and R. Oi: *OSA Continuum* **4** (2021) 2372.
- 34) T. Tahara: *Front. Photonics* **2** (2022) 829139.
- 35) T. Tahara, Y. Kozawa, A. Ishii, and R. Okamoto: *Proc. 3D Image Conf. 2022*, (2022) p. 2-1 (in Japanese).
田原 樹, 小澤 祐市, 石井 あゆみ, 岡本 亮: 3次元画像コンファレンス 2022 講演予稿集 (2022) 2-1.