

平成 30 年 6 月 18 日現在

機関番号：14303

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14274

研究課題名(和文) シングルショット全方位ナノオーダー精度3次元画像計測法の創成

研究課題名(英文) Single-shot, three-dimensional, and omni-directional image measurement of object with nanometer-order precision

研究代表者

粟辻 安浩 (Yasuhiro, Awatsuji)

京都工芸繊維大学・電気電子工学系・教授

研究者番号：80293984

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、動く物体に対して全方位から物体の3次元動画像を1台の撮像素子を用いてナノメートルオーダーで計測する技術の実現を目指して、ホログラフィを応用した技術とその技術に基づくシステムを創成した。本技術を実現するシステムとして、まず反射物体の表裏の3次元像を1台の撮像素子で同時記録する光学系を設計・構築した。実証実験により構築したシステムの有効性を確認した。さらに、透過物体の全方位画像として物体の光学的厚さを求め、さらに内部の3次元屈折率分布を1台の撮像素子でシングルショット記録、再生する技術を考案した。高速度偏光カメラを用いたシステムを構築し、透明ガスの流れに対して本技術の有効性を実証した。

研究成果の概要(英文)：To implement a technique for recording omni-directional and nano-metre-order precision three-dimensional (3D) image of object with a single image sensor and a single-shot exposure, digital holography systems were studied. First, a digital holography system based on the technique was designed and constructed for a reflective object. The recording and reconstruction capability of 3D images of both the front and back sides of the reflective object was experimentally confirmed by the system. Next, another digital holography system based on the technique was designed and constructed for a transparent object. This system is based on parallel phase-shifting digital holography using a high-speed polarization imaging camera. To record and reconstruct the 3D image of the internal 3D distribution of refractive index of a transparent object, Abel inversion was employed. Omni-directional 3D imaging of transparent and dynamic gas flow was experimentally demonstrated by the system.

研究分野：光応用計測

キーワード：計測工学 超精密計測 画像計測 光工学・光量子科学 3次元画像 ホログラフィー 位相計測

1. 研究開始当初の背景

近年、CCDカメラ、デジタルカメラの急速な発達に伴い、種々の最先端科学や工学、農学、工業検査など様々な分野で画像計測が重要な役割を担っている。これらの分野では、さらなる解明、高度化・高効率化のために、より高次元の情報獲得の要求が高まっている。特に、2次元情報だけでなく高さや奥行きなど3次元計測のニーズが高まっている。現在多用されている3次元計測技術では、接触探針や光ビームの走査、あるいはカメラレンズの焦点位置を変えて複数枚の画像撮影が必要である。そのため3次元動画画像計測が非常に困難であり、特に高速に動く物体の高精度3次元計測は不可能であった。このような状況の下、3次元表示技術であるホログラフィにおいてホログラムをイメージセンサを用いてシングルショットで記録し、コンピュータで物体の3次元像を再生するデジタルホログラフィ^①が、近年、盛んに研究されている。しかし、この技術でも、物体に対してカメラが向いている方向の3次元形状は記録できるが、カメラの反対側を記録するには、物体を回転させてあるいは、カメラを物体の裏側に回して複数枚のホログラム画像を逐次記録せねばならないという根本的な問題があり、全方位3次元形状のシングルショット記録はできなかった。ましてや、動く物体に対して全方位3次元形状動画画像記録はできなかった。

2. 研究の目的

高速に動く物体に対してナノメートルオーダーでの全方位からの3次元動画画像計測を可能にする技術を目指して、3次元画像表示技術であるホログラフィを応用した計測法の創成とその実証システムを設計、構築する。また動く物体を設定し、構築したシステムにより、そのシングルショット3次元画像計測能力を実証する。

3. 研究の方法

はじめに、反射物体の全方位3次元動画画像計測可能性を示す。次に、動く透明物体に対してその全方位からの光学厚さ分布のシングルショット3次元動画画像計測能力を試験する。透明物体として、高速に噴射される透明ガスを試料として実験を行い、その能力を実証する。

物体の全方位をナノメートルオーダーの精度で3次元画像として記録するために、まず反射物体からの表面と裏面それぞれについて高精度3次元情報を含む2枚のホログラムを同時に記録し、その複数のホログラム画像から物体の3次元像を記録し全方位の高精度3次元形状を求める方法とそのシステムを検討した。物体の表面と裏面それぞれのホログラムを1台の撮像素子に同時記録する方法として、物体の表面と裏面をそれぞれ直交する直線偏光で照明し、参照光を円偏光にしてホログラムを形成し、1台の偏光イメージングカ

メラでそのホログラムを画素ごとに空間分割多重記録する方法を考案した。図1に物体の表裏のホログラムの空間分割多重記録を説明する概略図を示す。また、図1を実現するための光学系の概略を図2に示す。

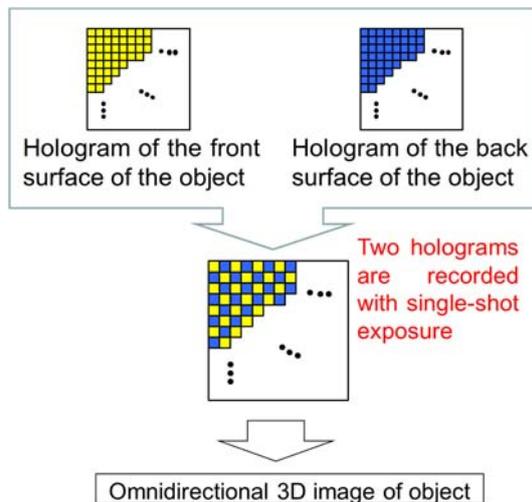


図1 物体の表裏3次元画像記録の原理。

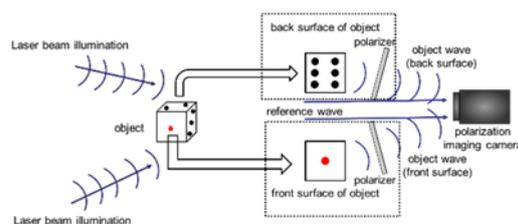


図2 反射物体に対する記録光学系の概要。

次に、透過物体の全方位をナノメートルオーダーの精度で3次元画像記録するために、1枚のホログラム画像から透過物体の光学的厚さを含むホログラムを並列位相シフトデジタルホログラフィ^②でシングルショット記録し、数学的変換を用いて物体の像を再生する方法とそのシステムを検討した。透過物体の光学的厚さを含むホログラムを1台の撮像素子に同時記録する方法として、マッハツェンダー型の干渉計を構築し、干渉計内における物体光アームに動的な透過物体を配置し、そのホログラムを記録した。記録光学系の概略を図3に示す。記録したホログラムから物体光の位相分布を再構成し、得られた位相分布に対して、下に示す逆アーベル変換^③を適用することにより、透過物体の内部の光学厚さ測定ならびにその厚さから屈折率分布を求めた。物体を照明する光が進む方向をz軸正方向にとる。その時物体光の位相遅れは式(1)で書ける。

$$\varphi(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n(x, y, z) dz, \quad (1)$$

ここで、 $\Delta n(x, y, z) = n(x, y, z) - n_0$ ただし、 n_0 は空気の屈折率、 λ は物体照明光の波長を表す。 $n(x, y, z)$ がy軸に沿って対称と仮定すると、位相遅れは次式で書ける。

$$\varphi(x, y) = \int_{-z_0}^{z_0} \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n(r, y) dz. \quad (2)$$

屈折率の3次元分布は位相遅れを次式のように逆アーベル変換することにより求まる。

$$n(r, y) = n_0 + \frac{\lambda}{2\pi^2} \int_r^R \left[\frac{d\varphi(x, y)}{dx} \right] \frac{dx}{\sqrt{x^2 - r^2}}, \quad (3)$$

ここで、 $r = (x^2 + y^2)^{1/2}$ で R は r の値の最大値である。

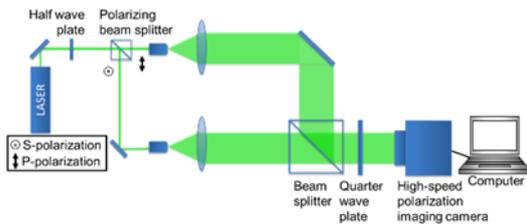


図3 透過物体に対する記録光学系の概要。

4. 研究成果

まず、反射物体の全方位3次元動画像計測のために図2を実現する光学系を設計、構築して考案法の実証実験を行った。実験に用いた物体の写真を図4に示す。

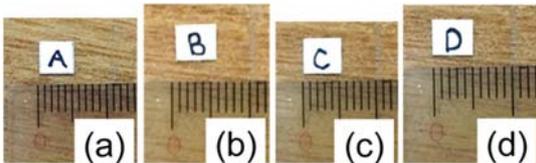


図4 反射物体に対する実験に用いた物体の写真。(a)物体1の表面、(b)物体2の表面、(c)物体1の裏面、(d)物体2の裏面。

物体として異なる奥行き位置に2個設定した。設定した物体2個それぞれの表裏を図4に示す。物体は表裏それぞれに文字が書かれた正方形の紙とした。物体1は表面に「A」、裏面に「C」と書かれたもの、物体2は表面に「B」、裏面に「D」と書かれたものとした。記録時は、これら2つの物体を異なる奥行き位置に配置し、それぞれの表面と裏面を同時に記録した。この際の物体間の距離を5cmとした。記録に用いたレーザー光の波長は532nm、撮像素子の画素サイズは $4.65 \mu\text{m} \times 4.65 \mu\text{m}$ 、撮像素子の画素数は 1120×868 、記録プログラムの階調は8bitであった。実験で得られた再生像を図5に示す。

図5に示すように物体の表面、裏面共に記録・再生できていることが分かる。これらの再生画像は1枚のホログラムから得られたものであり、物体の表裏のシングルショット記録に成功したことが示された。

次に透過物体の全方位3次元動画像計測のために図3を実現する光学系で実証実験を行った。実験に用いた物体の写真を図6に示す。物体としてスプレーノズルから発せられる透明のガスをホログラムとして記録した。記録

したホログラムから提案法に基づき、この物体の3次元屈折率分布を求めた。得られた結果を図7に示す。

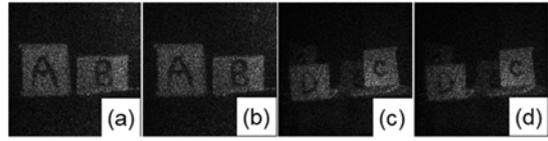


図5 反射物体を用いた実験で得られた再生像。(a)表面を伝搬距離が560mmで再生したとき、(b)表面を伝搬距離が590mmで再生したとき、(c)裏面を伝搬距離が810mmで再生したとき、(d)裏面を伝搬距離が840mmで再生したとき。

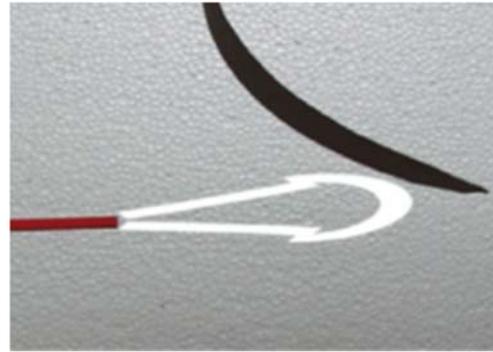


図6 透過物体に対する実験に用いた物体の写真。不可視である透明ガス流を模式的に白く示している。

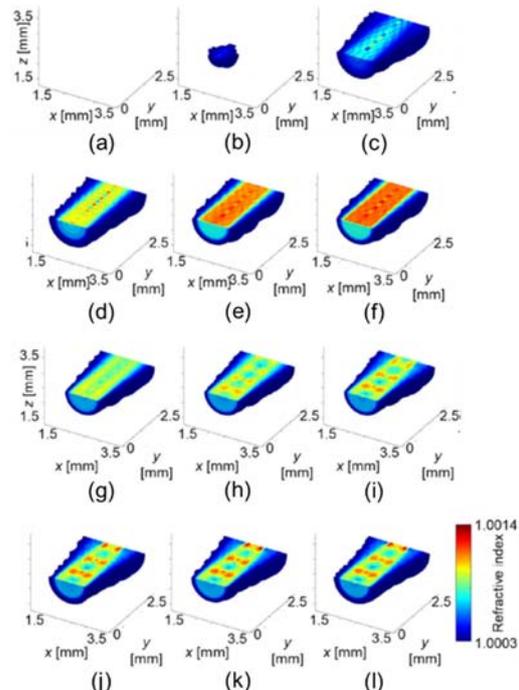


図7 透過物体に対する実験に得られた透明ガスの内部の3次元屈折率分布。各図は3次元分布の断面図を示し、屈折率の大きさは疑似カラー表示している。(a)-(f)の各像の時間間隔は2ms、(g)-(l)の各像の時間間隔は10msである。

図 7 に示すように透明物体の形状、内部分布共に記録・再生できていることが分かる。これらの各時間における再生画像は 1 枚のホログラムから得られたものであり、物体の全方位のシングルショット記録に成功したことが示せた。

以上のように、反射物体、透過物体に対して、それぞれに応じたシングルショット全方位ナノオーダー精度 3 次元画像計測法を考案し、その実証に成功した。この方法は生産ラインを流れる製品の高速精密検査や、生細胞の形状や動態の 3 次元計測、高速流れの 3 次元計測など、幅広い分野において、新たな計測法としての応用と貢献が期待される。

<引用文献>

- ① J. W. Goodman and R. W. Lawrence, "Digital image formation from electronically detected holograms," *Appl. Phys. Lett.* **11**, 77-79 (1967).
- ② Y. Awatsuji, M. Sasada, and T. Kubota, "Parallel quasi-phase-shifting digital holography," *Appl. Phys. Lett.* **85**, 1069-1071 (2004).
- ③ K. Bockasten, "Transformation of observed radiances into radial distribution of the emission of a plasma," *J. Opt. Soc. Am.* **51**, 943-947 (1961).

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 8 件)

- ① K. Shimizu, T. Fukuda, T. Hirakawa, P. Xia, Y. Awatsuji, K. Nishio, and O. Matoba, "Motion-picture phase imaging by an integrated optical system of a parallel phase-shifting digital holographic microscope," *Proc. SPIE* **10711**, pp.1071115-1-4, (2018). 査読有
DOI: 10.1117/12.2316616
- ② S. Mochida, M. Shinomura, T. Hirakawa, T. Fukuda, Y. Awatsuji, K. Nishio, and O. Matoba, "Parallel phase-shifting radial shearing interferometry and its numerical verification," *Proc. SPIE* **10711**, pp.1071114-1-3, (2018). 査読有
DOI: 10.1117/12.2305692
- ③ S. Mochida, M. Shinomura, T. Hirakawa, T. Fukuda, Y. Awatsuji, K. Nishio, and O. Matoba, "Single-shot incoherent digital holography using parallel phase-shifting radial shearing interferometry," *Proc. SPIE* **10711**, pp.107110U-1-3, (2018). 査読有
DOI: 10.1117/12.2316619
- ④ 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," *Optical Engineering* **57**, pp.061613-1-11

(2018). 査読有

DOI: 10.1117/1.OE.57.6.061613

- ⑤ Y. Awatsuji, T. Fukuda, Y. Wang, P. Xia, T. Kakue, K. Nishio, and O. Matoba, "3D motion picture of transparent gas flow by parallel phase-shifting digital holography," *Proc. SPIE* **10714**, pp.10718X-1-7 (2018). 査読有
DOI: 10.1117/12.2299497
- ⑥ T. Fukuda, Y. Wang, P. Xia, Y. Awatsuji, T. Kakue, K. Nishio, and O. Matoba, "Three-dimensional imaging of distribution of refractive index by parallel phase-shifting digital holography using Abel inversion," *Optics Express* **25**, pp.18066-18071 (2017). 査読有
DOI: 10.1364/OE.25.018066
- ⑦ P. Xia, Y. Awatsuji, and O. Matoba, "One million fps phase measurement by digital holography," *Proc. SPIE* **10328**, pp.103280K-1-6 (2017). 査読有
DOI: 10.1117/12.2268972
- ⑧ 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," *Optical Review* **24**, pp.206-211 (2017). 査読有
DOI: 10.1007/s10043-016-0279-6

[学会発表] (計 23 件)

- ① 荒尾耕平, 粟辻安造, 平川達也, 福田喬人, 持田尚吾, 西尾謙三, 的場 修, "1 台のカメラを用いたデジタルホログラフィによる物体の表裏のシングルショット記録," 第 43 回光学シンポジウム, (2018).
- ② 清水一希, 粟辻安造, "縦型並列位相シフトデジタルホログラフィック顕微鏡の試作," 日本光学会 情報フォトンクス研究グループ 第 16 回関西学生研究論文講演会, (2018).
- ③ 荒尾耕平, 粟辻安造, "Off-axis デジタルホログラフィによる物体の表裏のシングルショット記録," 日本光学会 情報フォトンクス研究グループ 第 16 回関西学生研究論文講演会, (2018).
- ④ Y. Awatsuji, T. Fukuda, Y. Wang, P. Xia, T. Kakue, K. Nishio, O. Matoba, "3D motion picture of transparent gas flow by parallel phase-shifting digital holography," 3rd International Conference on Photonics Solutions (ICPS2017), (2017).
- ⑤ Y. Awatsuji, T. Fukuda, P. Xia, O. Matoba, "3D tracking of micro object in liquid by parallel phase-shifting digital holographic microscope," 16th Workshop on Information Optics (WIO2017), (2017).
- ⑥ Y. Awatsuji, P. Xia, O. Matoba, "Parallel phase-shifting digital holography and

- its applications to high-speed 3D imaging and microscopy," 2017 OSA Topical Meeting Digital Holography and Three-Dimensional Imaging (DH2017), (2017).
- ⑦ 持田尚吾, 粟辻安浩, "ラディアルシアリ
ング干渉計における波面再構成法の雑音
に対する耐性の比較," 日本光学会 情報
フォトンクス研究グループ 第 15 回関西
学生研究論文講演会, (2017).
- ⑧ T. Hirakawa, T. Fukuda, Y. Awatsuji, P. Xia, K.
Nishio, and O. Matoba, "Observation of
dynamic droplets in liquid by parallel phase-
shifting digital holographic microscopy," The
6th Japan-Korea Workshop on Digital
Holography and Information Photonics
(DHIP2016), (2016).
- ⑨ T. Fukuda, P. Xia, Y. Awatsuji, K. Nishio, and
O. Matoba, "Three-dimensional motion
picture of an alum crystal sinking down
recorded by parallel-phase-shifting digital
holographic microscopy," The 6th Japan-
Korea Workshop on Digital Holography and
Information Photonics (DHIP2016), (2016).
- ⑩ Y. Awatsuji, Y. Wang, P. Xia, K. Nishio, and O.
Matoba, "3D imaging of transparent dynamic
object by parallel phase-shifting digital
holography system," The 6th Japan-Korea
Workshop on Digital Holography and
Information Photonics (DHIP2016), (2016).
- ⑪ 粟辻安浩, "レーザーホログラフィーが可
能にする新しいイメージング技術," 日本
顕微鏡学会 様々なイメージング技術研
究部会 第 4 回研究会, (2016).
- ⑫ Y. Miki, Y. Lee, R. Yonesaka, P. Xia, M.
Shinomura, Y. Awatsuji, and K. Nishio,
"Recording of high-speed and high-dynamic-
range motion picture using a polarization
imaging camera," The 31st International
Congress on High-Speed Imaging and
Photonics (ICHSIP31), (2016).
- ⑬ P. Xia, Y. Awatsuji, and O. Matoba, "One
million fps phase measurement by digital
holography," The 31st International Congress
on High-Speed Imaging and Photonics
(ICHSIP31), (2016).
- ⑭ Y. Awatsuji, "High-speed and ultrafast 3D
imaging by holography," The 31st
International Congress on High-Speed
Imaging and Photonics (ICHSIP31), (2016).
- ⑮ 三木陽介, 李 勇希, 米坂綾甫, 夏 鵬,
篠村将人, 粟辻安浩, 西尾謙三, "合成に用
いる画像間の露光比が既知でない場合
における偏光高速度カメラを用いた高速度
ダイナミックレンジ動画像記録," Optics
and Photonics Japan 2016, (2016).
- ⑯ Y. Awatsuji, Y. Wang, P. Xia, and O. Matoba,
"High-speed parallel phase-shifting digital
holography system," European Optical
Society Annual Meeting 2016 (EOSAM2016),
(2016).
- ⑰ Y. Awatsuji, Y. Wang, P. Xia, T. Kakue, K.
Nishio, and O. Matoba "Parallel phase-
shifting digital holography system using dual
polarization-imaging cameras for 3D imaging
of transparent dynamic object," Imaging and
Applied Optics 2016, OSA Digital
Holography and Three-Dimensional Imaging
(DH2016), (2016).
- ⑱ 福田喬人, 粟辻安浩, 夏 鵬, 西尾謙三,
的場 修, "倒立型拡大光学系を用いた並
列位相シフトデジタルホログラフイッ
ク顕微鏡法による 3 次元動画像イメージ
ング," 3 次元画像コンファレンス 2016,
(2016).
- ⑲ Y. Awatsuji, Y. Wang, P. Xia, and O. Matoba,
"3D image reconstruction of transparent gas
flow by parallel phase-shifting digital
holography," 15th Workshop on Information
Optics (WIO2016), (2016).
- ⑳ M. Shinomura, P. Xia, Y. Awatsuji, K. Nishio,
and O. Matoba, "Numerical simulation of
parallel phase-shifting digital holographic
tomography," The 2nd Biomedical Imaging
and Sensing Conference (BISC'16), (2016).
- ㉑ M. Shinomura, P. Xia, Y. Awatsuji, K. Nishio,
and O. Matoba, "Numerical simulation of
parallel phase-shifting digital holographic
tomography," The 2nd Biomedical Imaging
and Sensing Conference (BISC'16), (2016).
- ㉒ Y. Wang, P. Xia, Y. Awatsuji, K. Nishio, and O.
Matoba, "Quantitative imaging of refractive
index of transparent object by parallel phase-
shifting digital holography," The 2nd
Biomedical Imaging and Sensing Conference
(BISC'16), (2016).
- ㉓ T. Fukuda, P. Xia, K. Nishio, Y. Awatsuji, and
O. Matoba, "Phase measurement by using
parallel phase-shifting digital holographic
microscopy," The 2nd Biomedical Imaging and
Sensing Conference (BISC'16), (2016).

[産業財産権]

○出願状況 (計 3 件)

名称 : 3 次元物体情報計測装置
発明者 : 粟辻安浩, 篠村将人
権利者 : 国立大学法人京都工芸繊維大学
種類 : 特許
番号 : PCT/JP2018/005604
出願年月日 : 平成 30 年 2 月 27 日出願
国内外の別 : 国外

名称 : 干渉計測装置
発明者 : 粟辻安浩, 篠村将人
権利者 : 国立大学法人京都工芸繊維大学
種類 : 特許
番号 : 特願 2017-023023
出願年月日 : 平成 29 年 2 月 10 日

国内外の別：国内

名称：デジタルホログラフィ装置
発明者：粟辻安浩, 篠村将人
権利者：国立大学法人京都工芸繊維大学
種類：特許
番号：特願 2017-023018
出願年月日：平成 29 年 2 月 10 日
国内外の別：国内

[その他]

ホームページ等

<http://www.cis.kit.ac.jp/~awatsuji/index-j.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

粟辻安浩 (AWATSUJI, Yasuhiro)
京都工芸繊維大学・電気電子工学系・教授
研究者番号：80293984

(2) 研究分担者

無

(3) 連携研究者

無

(4) 研究協力者

的場 修 (MATOBA, Osamu)
神戸大学・システム情報学研究科・教授
研究者番号：20282593