

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：14303

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630183

研究課題名(和文)非干渉型ナノオーダー精度3次元高速度動画像計測法の創成

研究課題名(英文)High-speed, three-dimensional, and nanometer-order precision motion picture measurement technique based on non-interferometry

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

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文):本研究では、動く物体に対するナノメートルオーダーでの3次元動画像計測が可能かつ堅牢かつ装置化が簡便な技術の実現を目指して、光干渉が不要な並列強度輸送方程式を用いた計測法(並列TIE法)の正当性を実験的に確認するためのシステムの設計と構築を行った。並列TIE法に基づくシステムとして、光源にLEDを、さらに1画素毎に光路長を変えられる素子として、偏光板と偏光カメラを用いた光学系を設計・構築した。構築したシステムにおいて、記録した1枚の画像から、並列TIE法の像再生処理を行った。その結果、被写体の厚さの2次元分布を、位相イメージとして得られ、所望の結果を得た。

研究成果の概要(英文):To validate the parallel transport of intensity equation technique, experimental systems were designed and constructed. The parallel transport of intensity equation technique is a measurement technique of two-dimensional phase distribution of an object. In spite of not being based on interferometry, this technique can provide nano-meter order precision in three-dimensional shape measurement of object with a single-shot exposure. One of the designed systems of the parallel transport of intensity equation technique was constructed. The system consisted of a light-emitting diode for the optical source to illuminate the object, a polarizer, and a polarization imaging camera for the device to generate optical path difference of object wave pixel by pixel. The image reconstruction algorithm of the technique was applied to the image recorded by the system. Then the phase image of the object was reconstructed.

研究分野：計測工学

キーワード：計測工学 可視化 3次元計測 強度輸送方程式 位相計測 応用光学・量子光学

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次元情報の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。また、強度輸送方程式(transport of intensity equation: TIE)を用いた3次元計測法が提案されている。以下この方法をTIE法と呼ぶ。TIE法は物体からの光(物体光)の強度画像を物体と撮像素子との距離を変えて、2枚以上記録し、記録画像から物体の位相画像を計算できる手法である。TIE法には、次の利点がある。(1)簡単な光学系で実現できる、(2)位相飛びが起こらない。しかしながら、TIE法では物体光を複数回記録する必要があるため、動画計測はできないという問題があった。このような状況の下、申請者は上記問題を解決できる技術として、高精度3次元動画計測が可能な技術である並列TIE法を考案した。本技術では、物体からやって来る光に対して画素を交互に光路長を変化させた1枚の画像としてシングルショットで記録する。

2. 研究の目的

動く物体に対するナノメートルオーダーでの3次元動画計測が可能かつ堅牢かつ装置化が簡便な技術の実現を目指して、並列強度輸送方程式を用いた計測法の実証システムを設計、構築する。また、構築したシステムにより、動く物体を設定し、並列TIE法を実証する。

3. 研究の方法

TIE法では、物体光の伝搬方向に沿った z 面と $(z+\Delta z)$ 面における2枚の強度画像 I_z と $I_{z+\Delta z}$ を記録する必要がある。図1に並列TIE法の概略を示す。並列TIE法では、1画素ごとに光路長 Δz を変えた1枚の画像を記録する。記録した1枚の強度画像において、同じ光路長で記録された画素を抜き出し2枚の画像を作成する。画素値が無い画素に対しては、その近傍画素の画素値を用いて補間する。この手続きで得られた2枚の画像から、TIEにおける位相導出の計算式を用いて物体光の位相 ϕ_z を求める。

4. 研究成果

並列TIE法の有効性を示すための実証システムを設計した。図2にそのシステムの概要を示す。光源にはLEDを用いる。LEDから

の光はコリメートされ平行光となり物体を照明する。物体光は偏光子、 $1/4$ 波長板を通り、偏光イメージングカメラの撮像素子面上で結像する。ここで用いる偏光イメージングカメラは、そのイメージセンサーが1画素おきに45度方向と135度方向のそれぞれの直線偏光を検出できる機能を持つ。図中の矢印の方向は光の偏光方向を表している。この構成により、伝搬距離が $\Delta z = \lambda/4$ 異なる I_z と $I_{z+\Delta z}$ が画素ごとに交互に配置された画像を一台の撮像素子を用いてシングルショットで記録できる。

図2に示す光学系を構築した。光源には、中心波長525nm、半値全幅45nmのLEDを用いた。物体には、図3に示す無色透明のプラスチックフィルムを用いた。物体の厚さを変えるために、フィルムを3枚重ねて固定した。フィルムは左側が3枚、中央が2枚、右側が1枚重なっている。図中に示す赤い正方形はおおよその記録範囲である。

実験結果を図5に示す。(a)は記録した物体の強度画像である。(b)は、(a)からTIEの計算に必要な2枚の強度画像を作り、その2枚の強度画像から計算された位相画像である。(c)は(b)中に引かれた赤い直線部分の位相値をプロットしたグラフである。物体の厚みに応じて位相が階段状に変化している様子を確認できる。

グラフから、フィルム1枚分の厚さに対応する位相差 $\Delta\phi$ を読み取ると、 $\Delta\phi \cong 700\text{rad}$ であった。 λ を光の波長、 d をフィルムの厚さ、 n をフィルムの屈折率、 n_0 を空気の屈折率とすると、実験条件より $\lambda = 525\text{nm}$ 、 $n \cong 1.50$ 、 $n_0 \cong 1.00$ である。フィルム1枚の厚さ d を $\lambda\Delta\phi/2\pi = d(n - n_0)$ を用いて計算すると、 $d \cong 117\mu\text{m}$ となった。これは、事前にマイクロメータで測定したフィルムの厚さと非常に近い値である。

以上より、並列TIE法の有効性を示せた。

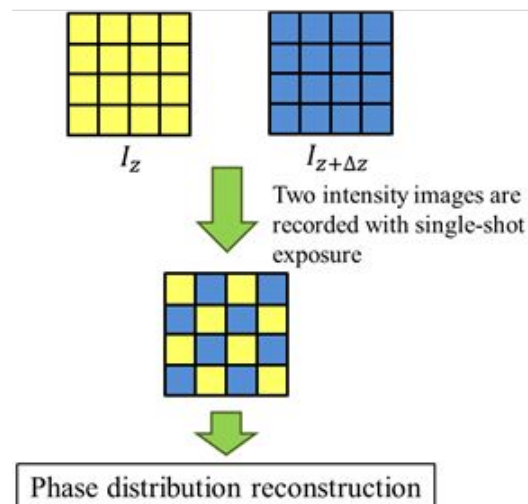


図1 並列TIE法の概略。

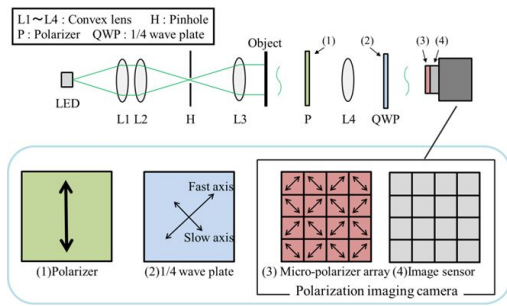


図 2 並列 TIE 法の実証システムの概要 .

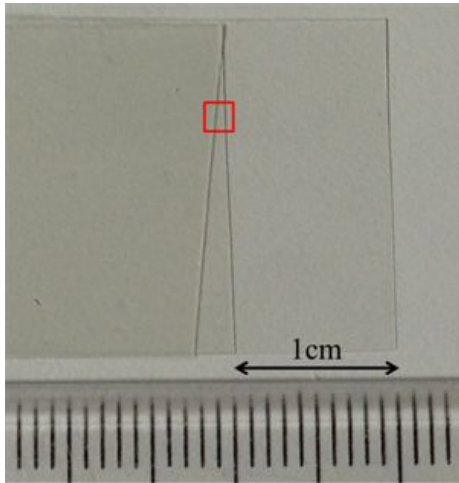
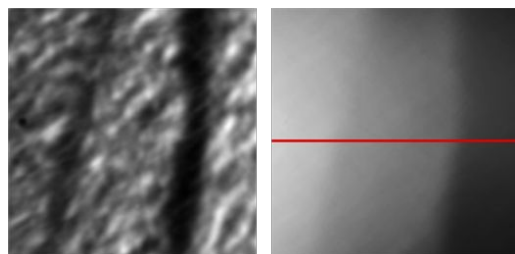
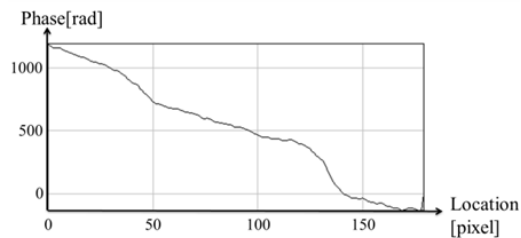


図 3 実験に用いた物体の写真 .



(a)

(b)



(c)

図 4 実験結果.(a)記録された強度画像 , (b)再生された位相画像 , (c)位相画像(b)中の朱線上の物体と空気との位相差さをプロットした結果 .

非干渉計測法に基づきナノメートルオーダーの精度の 3 次元高速度動画画像計測法である並列強度輸送方程式法(並列 TIE 法)の有効性

を実証した . 並列 TIE 法は , 生細胞イメージングや流体などの透明物体の動きの 3 次元計測などにおいて , 新たな計測法としての貢献が期待される .

< 引用文献 >

M. R. Teague, "Deterministic phase retrieval: a Green's function solution," J. Opt. Soc. Am. **73**, 1434-1441 (1983).
 P. Xia, Y. Awatsuji, S. Ura, K. Nishio, and O. Matoba, "One-shot complex amplitude measurement using transport of intensity equation," Technical Digest of 2013 OSA Topical Meeting, Digital Holography and Three-Dimensional Imaging (DH), DTh5A.3, Kohala Coast, U.S.A., Apr. 2013.

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 3 件)

R. Yonesaka, Y. Lee, P. Xia, T. Tahara, Y. Awatsuji, K. Nishio, and O. Matoba, "High dynamic range digital holography and its demonstration by off-axis configuration," IEEE Trans. Ind. Informat. **12**, (2016). [in press] 査読有
 DOI: 10.1109/TII.2016.2542023
Y. Awatsuji, P. Xia, Y. Wang, and O. Matoba, "Parallel phase-shifting digital holography and its application to high-speed 3D imaging of dynamic object," Proc. SPIE 9720, pp.972007-1-7 (2016). 査読無
 DOI: 10.1117/12.2213029
Y. Awatsuji, P. Xia, and O. Matoba, "One-mega frame-per-second phase-shifting digital holography," Proceedings of 13th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN 2015), pp.721-726, 2015. 査読有
 DOI: 10.1109/INDIN.2015.7281825

[学会発表] (計 20 件)

Y. Awatsuji, Y. Wang, P. Xia, and O. Matoba, "High-speed parallel phase-shifting digital holography system," European Optical Society Bi-Annual Meeting 2016 (EOSAM2016), Berlin, Germany, 2016. [発表予定]
Y. Awatsuji, Y. Wang, P. Xia, T. Kakue, K. Nishio, and O. Matoba, "3D imaging of transparent gas flow by parallel phase-shifting digital holography using two polarization cameras," Digital Holography & 3-D Imaging (DH), Imaging and Applied Optics Congress 2016, Heidelberg,

Germany, Jul. 27, 2016.
福田喬人, 夏 鵬, 粟辻安浩, 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ィ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, 関西大学, 吹田市, 2016年7月13日.
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, Barcelona, Spain, Jul. 12, 2016.
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, Barcelona, Spain, Jul. 12, 2016.
M. Shinomura, P. Xia, Y. Awatsuji, K. Nishio, and O. Matoba, "Numerical simulation of parallel phase-shifting digital holographic tomography," Technical Digest of The 2nd Biomedical Imaging and Sensing Conference (BISC'16), BISCp6-14, Pacifico Yokohama, Yokohama, May 20, 2016.
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," Technical Digest of The 2nd Biomedical Imaging and Sensing Conference (BISC'16), BISCp6-13, Pacifico Yokohama, Yokohama, May 20, 2016.
T. Fukuda, P. Xia, K. Nishio, Y. Awatsuji, and O. Matoba, "Phase measurement by using parallel phase-shifting digital holographic microscopy," Technical Digest of The 2nd Biomedical Imaging and Sensing Conference (BISC'16), BISCp6-12, Pacifico Yokohama, Yokohama, May 20, 2016.
福田喬人, 粟辻安浩, "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ィック顕微鏡法," 日本光学会情報フォトンクス研究グループ第14回関西学生研究論文講演会講演論文集, pp.3-4, 京都工芸繊維大学, 京都市, 2016年3月9日.
粟辻安浩, "ホログラフィが可能にする高速度ならびに超高速3次元動画像記録," 第20回関西大学先端科学技術シンポジウム講演集, pp.138-141, 関西大学, 吹田市, 2016年1月22日.
粟辻安浩, "デジタルホログラフィーにおけるホログラム生成," 一般社団法人日本光学会第42回冬期講習会資料, pp.41-82, 東京大学, 東京都, 2016年1月14日.
粟辻安浩, 王 燁歆, 夏 鵬, 西尾謙三,

的場 修, "並列位相シフトデジタルホログラフィーシステムと其の高速度記録応用," 2015年度第4回ホログラフィック・ディスプレイ研究会 HODIC Circular 35, No.4, pp.8-14, 京都工芸繊維大学, 京都市, 2015年12月8日.
王 燁歆, 夏 鵬, 粟辻安浩, 西尾謙三, 的場 修, "並列位相シフトデジタルホログラフィーを用いたガス噴流の3次元動画像計測," 高速度イメージングとフォトンクスに関する総合シンポジウム2015論文集, 5-14, アイーナ, 盛岡市, 2015年11月.
王 燁歆, 夏 鵬, 粟辻安浩, 西尾謙三, 的場 修, "並列位相シフトデジタルホログラフィーを用いた高速ガス噴射の3次元分布の記録と再生," Optics and Photonics Japan 2015講演予稿集, P19, 筑波大学東京キャンパス文京校舎, 東京都, 2015年10月.
粟辻安浩, "デジタルホログラフィによる3次元動画像計測とその流れの可視化計測応用," 公益社団法人精密工学会関西支部2015年度関西地方学術講演会特別講演, 京都工芸繊維大学, 京都市, 2015年6月23日.
篠村将人, 粟辻安浩, "フィルタ補正逆投影法を用いた並列位相シフトデジタルホログラフィクトモグラフィの計算機シミュレーションによる検討," 日本光学会情報フォトンクス研究グループ第13回関西学生研究論文講演会講演論文集, pp.21-22, 大阪市立大学, 大阪市, 2015年3月9日.
李 勇希, 米坂綾甫, 田原 樹, 夏 鵬, 粟辻安浩, 西尾謙三, 裏 升吾, "高ダイナミックレンジ合成の適用によるデジタルホログラフィーの再生像の画質向上," Optics and Photonics Japan 2014講演予稿集, 5aDS18, 筑波大学東京キャンパス文京校舎, 東京都, 2014年11月5日.
佐々木翼, 夏 鵬, 粟辻安浩, 西尾謙三, 裏 升吾, 的場 修, "並列強度輸送方程式複素振幅計測法," Optics and Photonics Japan 2014講演予稿集, 5aDS22, 筑波大学東京キャンパス文京校舎, 東京都, 2014年11月5日.
李 勇希, 田中勇祐, 米坂綾甫, 伊藤誠也, 田原 樹, 夏 鵬, 粟辻安浩, 西尾謙三, 裏 升吾, "高速度高ダイナミックレンジイメージング," Optics and Photonics Japan 2014講演予稿集, 7pD4, 筑波大学東京キャンパス文京校舎, 東京都, 2014年11月.
佐々木翼, 夏 鵬, 粟辻安浩, 西尾謙三, 裏 升吾, 的場 修, "強度輸送方程式を用いたシングルショット位相計測," Optics and Photonics Japan 2014講演予稿集, 6aB6, 筑波大学東京キャンパス文京校

舎, 東京都, 2014 年 11 月.

〔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