

平成 30 年 5 月 23 日現在

機関番号：82626

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2016～2017

課題番号：16H07472

研究課題名(和文)強度輸送方程式に基づくシングルショット複素振幅動画像計測システムの開発

研究課題名(英文)Single-shot complex amplitude measurement system based on transport of intensity equation

研究代表者

夏 鵬 (Xia, Peng)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・研究員

研究者番号：80768458

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、強度輸送方程式による複素振幅計測法に必要な複数の強度画像を単一の撮像素子を用いて1回の撮影で、光の干渉を利用しなく、動く物体の強度と位相情報を同時に取得することを実現する。構築したシステムの照明光の強度、結像レンズの収差、照明光波面の均一性などを評価し、測定精度に最も影響する要素は照明光プロファイルのばらつきであることを明らかにした。さらに、システムの汎用性のために、複数種類の物体を仮定し、計算機シミュレーションにより各物体(透明フィルムや細胞液など)の最適な2枚強度画像の間隔を解明した。

研究成果の概要(英文)：In this subject, we proposed a single-shot complex amplitude measurement method based on transport of intensity equation (TIE), which can acquire amplitude and phase information of moving object. Two intensity object images at different planes in the propagation direction are required for the amplitude and phase information calculation. In general, the optimum distance between these two intensity images is not a constant due to the different dispersion of the object. Therefore, the optimum distance between two intensity images were confirmed by the numerical simulation. Afterwards, to improve the performance of the system, we constructed the experiment setup and tested the system using various samples. We confirmed that the non-uniformity of the wave-front of the beam used for illuminating the object greatly influences the precision of the technique.

研究分野：計測工学

キーワード：強度輸送方程式 位相計測

1. 研究開始当初の背景

近年の工業や産業の発展に伴い、より高精度、高速な計測技術が求められている。これを実現するために、高感度性、並列処理性、などの各種特長を持つ光計測技術が不可欠となっている。

物体の高速現象の観察方法としては、高速カメラで直接撮影するのが一番簡単な方法である。ここで、物体の複素振幅は強度情報と位相情報を含んでいるが、本方法では、物体の強度情報しか記録できず、位相物体に対して計測できない。干渉計測システムの光学系は複雑で、記録環境の影響（振動など）が大きいなどの問題があるため、光の干渉を利用しない安定性にすぐれた複素振幅計測法の実現が期待されている。その有力候補の1つとして、強度分布に隠された複素振幅情報を読み取る方法がある。この方法では、伝播方向に沿った複数の観測面の強度を記録し、複数の観測面における強度の変化から、強度輸送方程式 (Transport of Intensity Equation : TIE) により、伝播する波動の位相分布を計測する方法がある。しかし、これまでの TIE に関する研究は複数回の撮影を必要とするため、瞬時に動く物体の複素振幅情報を取得することが不可能であった。この様な状況の下で、TIE 法に必要な複数の強度画像を単一の撮像素子を用いて 1 回の撮影で記録できる方法を提案した⁽¹⁾。本技術をさらに発展させるために、シングルショット TIE 法の実験システムを構築し、性能を評価する。さらに、異なる物体に対して 2 枚の強度画像の最適な間隔を調査する。

2. 研究の目的

シングルショット TIE 法に必要な複数の強度画像を単一の撮像素子を用いて 1 回の撮影で記録できるシステムを構築し、システムの性能を向上するために構成の各要素を評価する。さらに、システムの汎用性のために、異なる物体に対して 2 枚の強度画像の最適な間隔を調査することを目的とする。

3. 研究の方法

光源、偏光板、一軸性光学結晶(マルチオーダー波長板)、カメラを利用して文献(1)に提案されたシステムを構築する。システム構成の各要素である光源（照明光の強度、照明光波面の均一性）、光学部品（結像レンズの収差など）、イメージセンサ（暗電流ノイズ）などを逐次的に評価する。

各物体の散乱性が異なるため、複素振幅情報の計算に必要な 2 枚強度画像の間隔が異なる。そのため、様々な測定物体の散乱性を調査し、計算機シミュレーションで対応する物体の複素振幅分布を作成し、2 枚の強度画像の最適な間隔を調査する。

4. 研究成果

偏光イメージングカメラを導入する前に、高出力 LED 光源、偏光板、一軸性光学結晶(マルチオーダー波長板)、汎用カメラを利用して

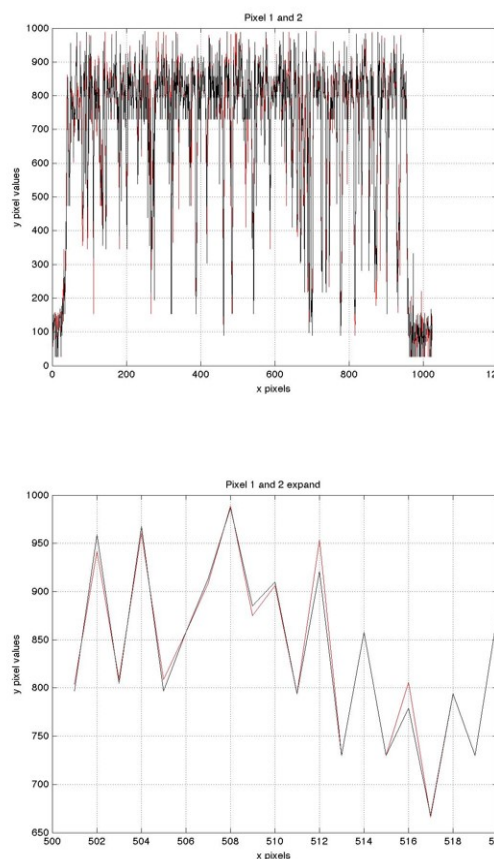


図1 照明光波面評価の結果

評価用のシステムを構築した。照明光の強度、結像レンズの収差、照明光波面の均一性などを評価し、測定精度に最も影響する要素は照明光プロファイルのばらつきであることを明らかにした。

その結果の 1 例を図 1 に示す。図 1(上)は記録した画像の任意の 1 行から抽出した隣接画素の画素値の比較である。用いた汎用カメラの画素ピッチは $1.67\mu\text{m}$ であり、記録画像の中心の $2048\times 2048\text{pixel}$ エリアを評価した。隣接画素の画素値のプロファイルはそれぞれ赤線と黒線で表している。

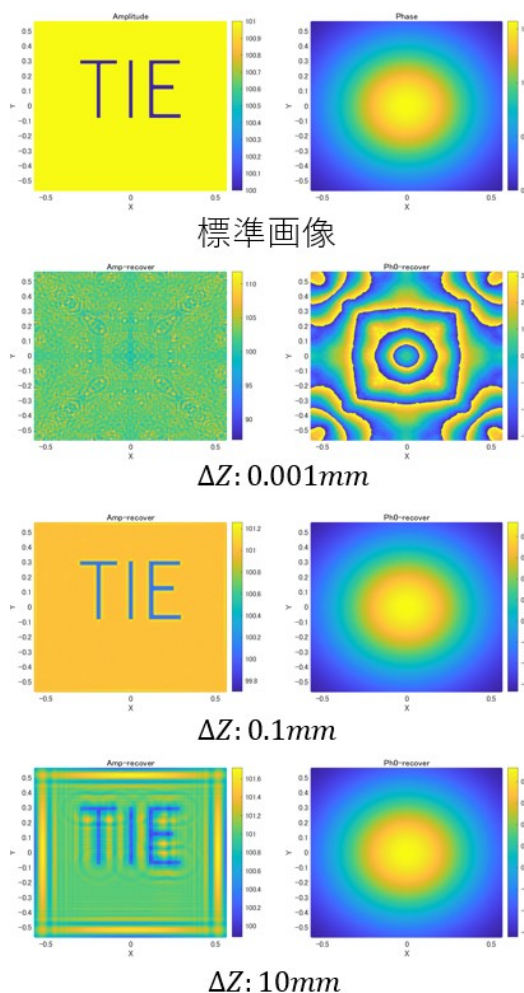


図 2 強度画像最適間隔結果の 1 例 (左 : 振幅画像、右 : 位相画像)

図 1(下)は図 1(上)の一部拡大図である。物体を設置せず、照明光画像の隣接画素の画素値は 5%程度のばらつきがあることを分かった。その結果により、提案システムの性能を向上するために、照明光波面補正アルゴリズムなどの導入が必要であると考えられる。

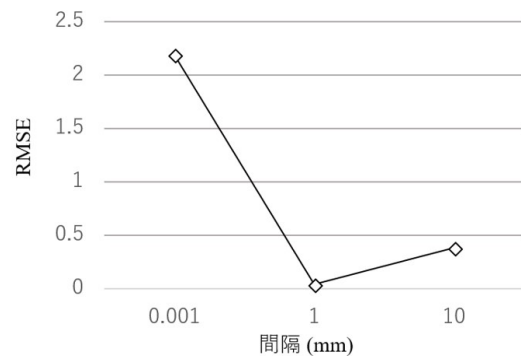


図 3 振幅画像の RMSE 結果

また、計算機シミュレーションで様々な測定物体を作成し、2 枚の強度画像の最適な間隔を調査した。その結果の 1 例を図 2 に示す。標準画像を異なる間隔における再生像を示している。2 枚の強度画像の間隔(0.001mm)が小さい場合は、物体の振幅と位相を両方正確に再生できなかった。2 枚の強度画像の間隔(10mm)が大きな場合は、物体の位相画像を再生できたが、振幅画像は正確に再生できなかった。各画像を用いて標準画像との平均 2 乗誤差(RMSE)の計算を行った。振幅画像の計算の結果を例として、図 3 に示す。本調査により、様々な測定物体に対して、2 枚の強度画像の最適な間隔が分かった。本研究により、シングルショット TIE 計測法の実用化に貢献でき、生細胞や生体などの動的位相計測が期待される。

〔引用文献〕

(1) 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 2 件)

(1) P. Xia, Q. Wang, S. Ri, H. Tsuda, "Calibrated Phase-Shifting Digital Holographic Microscope Using a Sampling Moiré Technique," *Appl. Sci.*, **8**(5), 706-1-10, (2018). 査読有
DOI:10.3390/app8050706

(2) P. Xia, Q. Wang, S. Ri, H. Tsuda, "Nanometer-order thermal deformation measurement by a calibrated phase-shifting digital holography system," *Opt. Express*, **26**(10), 12594-12604 (2018). 査読有
DOI: 10.1364/OE.26.012594

〔学会発表〕 (計 5 件)

(1) P. Xia, Y. Awatsuji, and O. Matoba, "One million fps phase measurement by digital holography," *Proceedings of the 31st International Congress on High-Speed Imaging and Photonics (ICHSIP31)*, pp.114-119, Suita, Nov. 2016. (invited).

(2) P. Xia, Q. Wang, S. Ri, H. Tsuda, "High Precision Phase-Shifting Digital Holography Using the Sampling Moiré Method," *Proceedings of 2017 International Symposium on Optomechatronic*

Technologies (ISOT2017), Tainan, Taiwan, Nov. 2017.

(3) 夏 鵬, 王 慶華, 李志遠, 津田 浩, "デジタルホログラフィとモアレ縞融合による高精度 3 次元計測," 日本実験力学会 2017 年度年次講演会, 岡山市, 2017 年 8 月.

(4) 夏 鵬, 王 慶華, 李志遠, 津田 浩, "デジタルホログラフィによる 3 次元形状変形計測," 時間依存性材料分科会・光学的手法分科会合同研究会 (2017), 松山市, 2017 年 9 月.

(5) 夏 鵬, 王 慶華, 李志遠, 津田 浩, "モアレ法を導入した高精度位相シフトデジタルホログラフィ," レーザー学会学術講演会第 38 回年次大会講演予稿集, H324pIX03, 京都市, 2018 年 1 月.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

夏 鵬 (PENG XIA)

国立研究開発法人産業技術総合研究所

計量標準総合センター 研究員

研究者番号 : 80768458