

令和 3 年 6 月 10 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K15003

研究課題名（和文）単一カメラを用いた校正型位相シフト計測装置の開発

研究課題名（英文）Development of a calibrated phase-shifting digital holography based on space-division multiplexing

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・主任研究員

研究者番号：80768458

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、単一カメラのみで参照光の位相シフト量の検出が可能な高精度位相シフトデジタルホログラフィ計測システムを開発した。空間分割記録を利用して単一カメラによる一回の撮影で校正用の規則性の縞模様と物体情報が含まれたホログラムを同時に記録できることを検証した。規則性の縞模様からサンプリングモアレ法のような画像処理手法を用い、参照光の位相シフト量を精確に検出し、高精度・高安定性の3次元計測システムを実現した。顕微鏡システムを開発したシステムを導入して透過型測定物体である植物細胞の記録・像再生を行い、高精度な細胞の形状計測に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

様々な学術分野、産業分野において高精度な3次元変位・形状の動的計測技術に対するニーズが高まっている。本研究では、追加のデバイスを必要せず、単一カメラのみで経済的、操作が簡単で、十分な記録スピード(数十fps以上)、高安定性の3次元計測システムを実現できる。研究成果として、本システムを用いて高精度な細胞の形状計測の可能性を示した。本研究を工業検査、バイオ、医療など様々な分野への応用が期待できるため、学術的意義と社会的意義が大きい。

研究成果の概要（英文）：In this project, we developed a calibrated phase-shifting digital holography system by using a single camera. Two types of information were recorded simultaneously in one image based on the space-division-multiplexing in the proposed system. One type of information was used to reconstruct the object image, while the other was used to calculate the phase-shifting amount of the reference beam. By combining the developed system with a microscope, we have successfully recorded the hologram and reconstructed the phase image of the cells which achieved the high precision shape measurement of the cells. A high-precision and high-stability 3D measurement system was realized by this research.

研究分野：計測工学

キーワード：計測工学 3次元計測 ホログラフィー 位相計測 デジタルホログラフィ

1. 研究開始当初の背景

近年、工業検査、バイオ、医療など様々な分野において高精度な3次元変位・形状の動的計測技術に対するニーズが高まっている。例えば、MEMSは年々市場規模や応用分野が拡大してきており、その信頼性を確保することが益々重要になっている。構成要素である各種合金材料、基板、有機材料などの強度や弾性などの力学特性を正確に評価するために、高精度な3次元変位計測が必要とされている。

既存技術の共焦点顕微鏡やAFMなどでは、奥行き情報の計測に際して機械的走査が必要になるため、大きなサイズ(数センチ以上)の物体の3次元動画計測は困難であるという課題がある。近年、画像処理技術の高速化、撮像素子の高解像・高画素数化が進んだことから、これらの技術とホログラフィを組み合わせたデジタルホログラフィ⁽¹⁾が提案された。本技術では、撮像素子を用いて物体光と参照光によって生成された干渉縞画像(ホログラム)を撮影し、計算機上で干渉縞画像の解析を行うことで、数センチ以上の計測対象でも3次元動画計測が可能である。これまで様々なシステムが提案されたが、計測範囲が最も広く、かつ干渉縞に含まれる不要な成分である0次回折光と共役像(-1次回折光)を除去することが可能な位相シフトデジタルホログラフィが注目されている。

位相シフト方法では、参照光側にミラー付きピエゾ素子から構成される微動ミラーなどの位相シフト装置を導入し、ナノメートルオーダーの精度で参照光の光路長を光軸に沿って変化させることにより、複数の位相シフトされたホログラムを記録する。しかしながら、ピエゾ素子の動作不安定(非線形応答)から、位相シフトを正確に制御することは困難であった。位相シフト誤差を補正する方法は多く提案されたが、それらを実現するために追加のデバイスが必要となり、システムの複雑化になってしまったという問題があった。

2. 研究の目的

本研究では、単一カメラのみを使用して、高速処理が可能で、経済的で、操作が簡単でかつ位相ずれ量の検出が可能な校正型位相シフトデジタルホログラフィ計測システムを開発することを目指す。具体的には、空間分割記録を利用して単一カメラによる一回の撮影で校正用の規則性の縞模様と物体情報が含まれたホログラムを同時に記録し、校正用の規則性の縞模様を用いて、参照光のシフト量を定量的に検出できるシステムを実現する。

3. 研究の方法

デジタルホログラフィでは、像再生アルゴリズムに高速フーリエ変換が必要である。高速フーリエ変換計算は、2のべき乗個のデータを対象としているので、イメージセンサで記録された干渉縞画像の正方形エリアしか利用しない。現在市販されているイメージセンサはほとんど長方形であり、物体像再生用エリア以外の場所に校正用の縞模様を記録することを発案した。記録の原理を図1(a)に示す。本システムでは単一カメラで参照光、物体光、校正光の3種類の光成分を記録する。参照光と物体光はイメージセンサ全面に照射され、校正光をイメージセンサの一部のエリアに照射する。参照光と物体光が干渉することで、ホログラムが生成される。また参照光と校正光が干渉することで、規則性の干渉縞が生成される。物体光の強度を弱めに、校正光の強度を強めに調整することで、得られる画像記録は図1(b)に示すように、校正光が照射された領域には、校正光と参照光の規則性の干渉縞が発生する。ビーム幅調整装置により、校正光の幅を調整し、図1(b)のような画像データを記録することができる。微動ミラーを移動させることで、参照光の光路長をシフトし、物体像の再生エリアと規則性の干渉縞は同じ位相シフト量を受ける。規則性の縞模様画像処理を適用することで、参照光の位相シフトずれ量を検出できる。画像処理手法としては、規則性の縞模様を用いて、縞間隔の1/1000程度の微小な変位を検出できるサンプリングモアレ法⁽²⁾を使用する。補正用のアルゴリズムを開発することで、再生像の画質を改善し、計測精度を向上することができる。

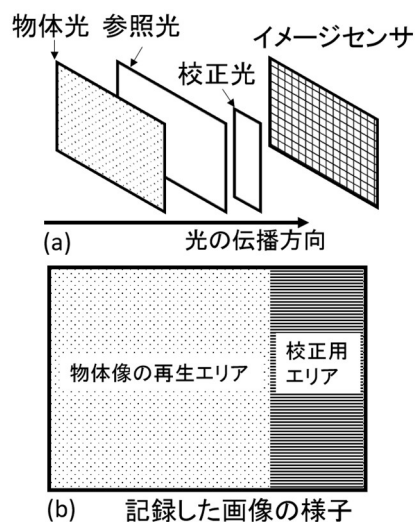


図1. 提案法の原理

4. 研究成果

提案手法の有効性を確認するために、図2に示すような光学システムを構築した。構築したシステムでは、波長532nmのレーザー、画素サイズ3.45μmのカメラを用いた。単一のカメラを

利用して、参照光、物体光(測定物体の反射光或いは透過光)、校正用物体光の3種類の光成分を記録する。図2に示すように、光源からのレーザー光を一部校正光としてカメラに入射する。校正光の幅をスリットで調整する。一部レーザー光はミラー付きピエゾ素子に照射し、ミラー付きピエゾ素子からの反射光は参照光として、計測対象からの反射光とイメージセンサ面で干渉する。このように、図1(b)のような画像データを1回撮影で記録した。その記録の一例を図3に示す。つきまして、微動ミラーをシフトすることにより位相シフトされた4枚の画像を記録し、提案の計算手法により物体の振幅と位相画像を再生した。その結果を図4に示す。測定対象は玉ねぎ細胞であった。

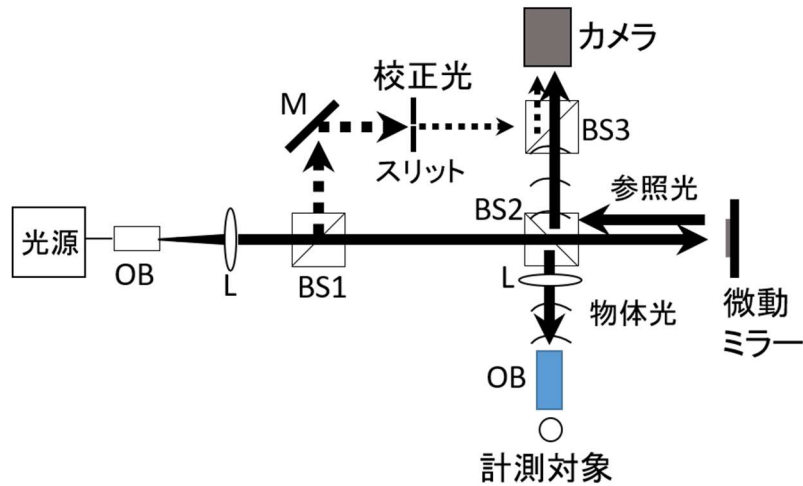


図2. 提案システムの光学系の一例 (OB:対物レンズ, BS:ビームスプリッタ,L:レンズ, M:ミラー)

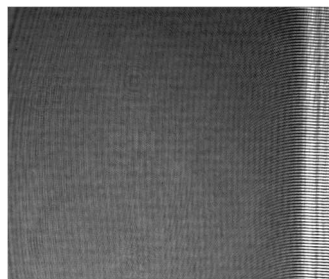


図3. 記録した画像の一例

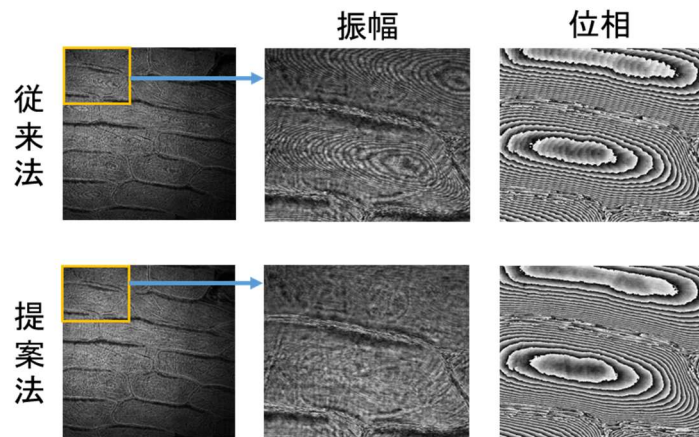


図4.実験結果

デジタルホログラフィでは、物体の振幅と位相情報を得られるが、一般的に位相情報から物体の変形・形状の解析を行う。参照光の位相が正確にシフトされない場合は、不要な像成分を完全に除去できず、計測精度が低下する原因となる。図4に示すように、従来法では位相シフト誤差が発生したため、不要な像成分を完全に除去できなかった。一方、提案法では不要な像成分が完全に除去され、高精度な物体像の再生を確認できた。

<引用文献>

- (1) Goodman J W, Lawrence R W. Digital Image Formation from Electronically Detected Holograms. *Applied Physics Letters* 1967; 11:77-79.
- (2) Ri S, Muramatsu T. Theoretical error analysis of the sampling moire method and phase compensation methodology for single-shot phase analysis. *Appl Opt* 2012; 51:3214-3223.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Xia Peng, Wang Qinghua, Ri Shien, Tsuda Hiroshi	4. 巻 123
2. 論文標題 Calibrated phase-shifting digital holography based on space-division multiplexing	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Optics and Lasers in Engineering	6. 最初と最後の頁 8～13
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.optlaseng.2019.06.022	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Xia Peng, Wang Qinghua, Ri Shien	4. 巻 28
2. 論文標題 Random phase-shifting digital holography based on a self-calibrated system	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 19988～19988
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OE.395819	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Xia Peng, Ri Shien, Inoue Tomoyoshi, Awatsuji Yasuhiro, Matoba Osamu	4. 巻 141
2. 論文標題 Dynamic phase measurement of a transparent object by parallel phase-shifting digital holography with dual polarization imaging cameras	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optics and Lasers in Engineering	6. 最初と最後の頁 106583～106583
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.optlaseng.2021.106583	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件／うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Xia Peng, Wang Qinghua, Ri Shien, Tsuda Hiroshi
2. 発表標題 Improvement of recording speed in calibrated phase-shifting digital holography based on dual-camera system
3. 学会等名 Information Photonics 2019 (IP'19)（国際学会）
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<https://unit.aist.go.jp/rima/ndm/research/#archive-2019>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------