

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 13 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2022

課題番号：21K14175

研究課題名（和文）多波長レーザーを用いたマルチスケール3次元動的計測システムの開発

研究課題名（英文）Development of a multi-scale 3D dynamic measurement system using multiple lasers with different wavelengths

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） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、波長が異なる複数のレーザーを用いて、奥行き方向にマルチスケールの高精度3次元動的計測が可能な校正型位相シフトデジタルホログラフィシステムを開発した。空間分割記録を利用して一回の撮影で、校正用の複数波長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。さらに、フーリエ領域において各波長の物体光のスペクトルを自動抽出、サイズ補正アルゴリズムを提案し、計算機シミュレーションによってその有効性を検証した。応用の一環として、金属試験片の変形の動的計測を行い、不連続物体に対して、奥行き方向に最大 $2.1\mu\text{m}$ の計測範囲を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

様々な科学研究や工学分野において高精度な3次元変位・形状の動的計測技術が必要とされている。例えば、材料科学では、物質の微細な構造や変形の解析において3次元計測技術が必要である。本研究では、波長が異なる複数のレーザーを用いて、奥行き方向にナノメートルオーダーからミリメートルオーダーまでのマルチスケールの高精度3次元動的計測を実現できる。様々な基礎科学研究や工業生産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 study, we have developed a calibration-based phase-shifting digital holography system using multiple lasers with different wavelengths. This system enables high-precision three-dimensional dynamic measurements at multiple scales in the depth direction. The proposed method allows for the simultaneous recording of holograms and fringe patterns to calibrate the phase-shifting amounts of multiple wavelengths in a single shot. Additionally, we have introduced an algorithm that automatically extracts and corrects the size of object wave spectra in the Fourier domain. The effectiveness of this algorithm has been validated through computer simulations. As part of our application, we conducted dynamic deformation measurements on a metal test specimen, achieving a measurement range of up to $2.1\mu\text{m}$ in the depth direction for discontinuous objects.

研究分野：計測工学

キーワード：計測工学 3次元計測 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が必要とされている。例えば、材料科学では、物質の微細な構造や変形の解析において3次元計測技術が必要である。産業分野においてMEMSは年々市場規模や応用分野が拡大しており、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次元変位計測も必要とされている。

既存の技術では、例えば共焦点顕微鏡やAFMなどでは、奥行き情報の計測に機械的な走査が必要であるため、数センチメートル以上のサイズの物体の3次元動画計測は困難とされている。しかしながら、近年、画像処理技術の高速化や、高解像度・高画素数化された撮像素子の進歩により、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が盛んに研究されている。本技術では、物体光と参照光によって生成された干渉縞画像である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、数センチメートル以上のサイズの物体でも3次元動画計測が可能となる。これまで様々なデジタルホログラフィシステムが提案されたが、利用できる帯域幅が最も広く、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手法[1]が注目されている。

位相シフト手法では、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でき倍場合がよくある。この問題を解決するために、我々が位相シフトのずれ量を高精度に検出できる校正型位相シフトデジタルホログラフィを提案し、電子デバイスのナノメートルオーダーの熱変形の動的計測を実現した[2]。さらに、提案システムを顕微鏡と組み合わせ、植物(玉ねぎ)細胞の高精度3次元形状計測に成功した[3]。しかしながら、この提案技術では、単一波長のレーザー光を測定物体に照射し、物体からの反射光あるいは透過光を記録するため、連続分布の物体にしか適用できない。そのため、段差があるような不連続的な物体を計測する際に、段差の光路長が用いたレーザーの波長を超えると正確に計測ができなくなる問題が生じる。実際に様々な形のMEMS部品や段差がある電子デバイスなどは多数存在しているため、奥行き方向にマルチスケールな精密計測技術が求められている。

2. 研究の目的

本研究の目的は多波長レーザーを校正型位相シフトデジタルホログラフィに導入することで、奥行き方向にマルチスケールな高精度3次元計測システムを開発することである。具体的には、空間分割記録を利用して一回の撮影で、多波長の位相シフト量を検出するための縞模様および物体情報が含まれたホログラムを同時に記録する計測システムを提案する。縞模様からサンプリングモアレ法を用いることで各波長の位相シフト量を定量的に検出し、ナノメートルオーダーからミリメートルオーダーまでの高精度な変位、形状計測を可能にする。

3. 研究の方法

図1に示すように、本研究では、多波長の位相シフト量を検出するための縞模様と像再生用のホログラムを同時に記録するシステムを開発する。像再生エリアに多波長のホログラムを重ねているが、多波長間の干渉はなく、フーリエ領域で各波長に空間フィルターをかけることにより、Cross-talkの問題を解決できる。縞模様からサンプリングモアレ法を用いて各波長の位相シフト量を定量的に検出し、ランダム位相シフト法により各波長の鮮明な物体像を再生する。図2は多波長計測の原理を示している。本技術では、逆三角

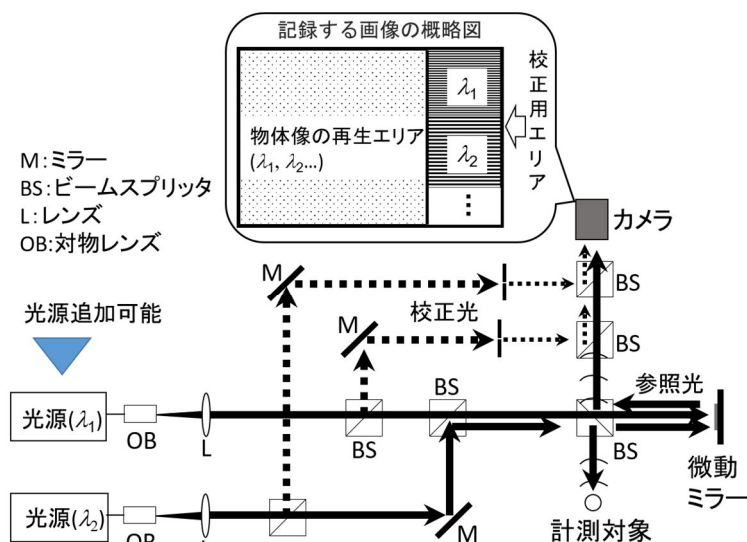


図1. 提案する光学系システムの一例

関数を用いて物体光の位相分布を求めるため、 $0 \sim 2\pi$ の位相分布しか得られず、不連続的な物体を計測する際に、段差の光路長が用いたレーザーの波長を超えると正確に計測ができなくなる。一方、多波長システムでは、任意の2波長の融合位相分布から奥行き方向の計測範囲を拡大することが可能である。奥行き方向の計測範囲は2波長の波長差に依存し、波長の組み合わせの最適化により奥行き方向にマルチスケールな3次元計測システムが可能となる。

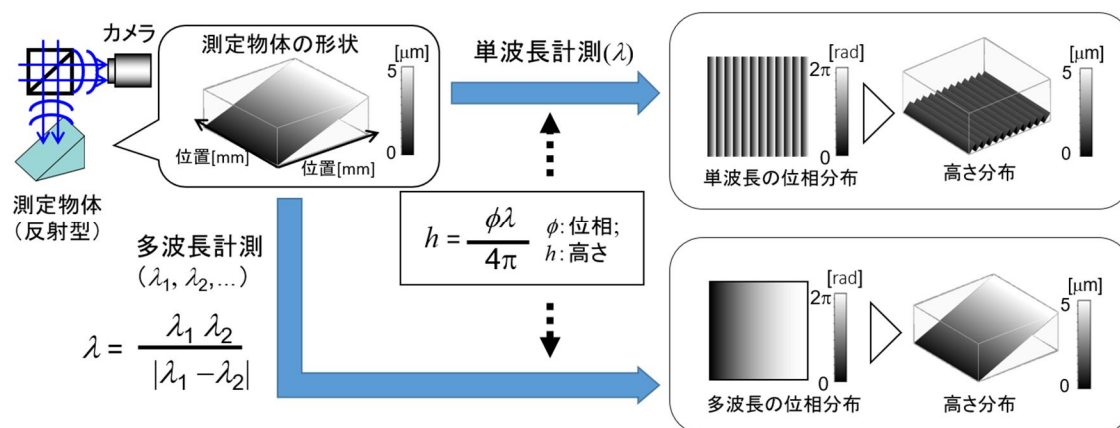


図2．多波長計測の原理

4．研究成果

提案手法の有効性を検証するために、MATLAB を使用して Windows 環境のワークステーション (Intel Xeon W-2255 プロセッサ) で計算機シミュレーションを行った。オブジェクトのサイズは $3.53 \text{ mm} \times 3.53 \text{ mm}$ に設定し、解像度は 1024×1024 ピクセルであった。オブジェクトとイメージセンサーの間の距離は 100 mm に設定され、レーザーの波長はそれぞれ 473 nm と 532 nm と仮定された。入力オブジェクトとシミュレーションの結果を図3に示す。最大 20% の位相シフト誤差がランダムに発生する際、提案手法は従来手法より正確な位相分布を再生することを検証し

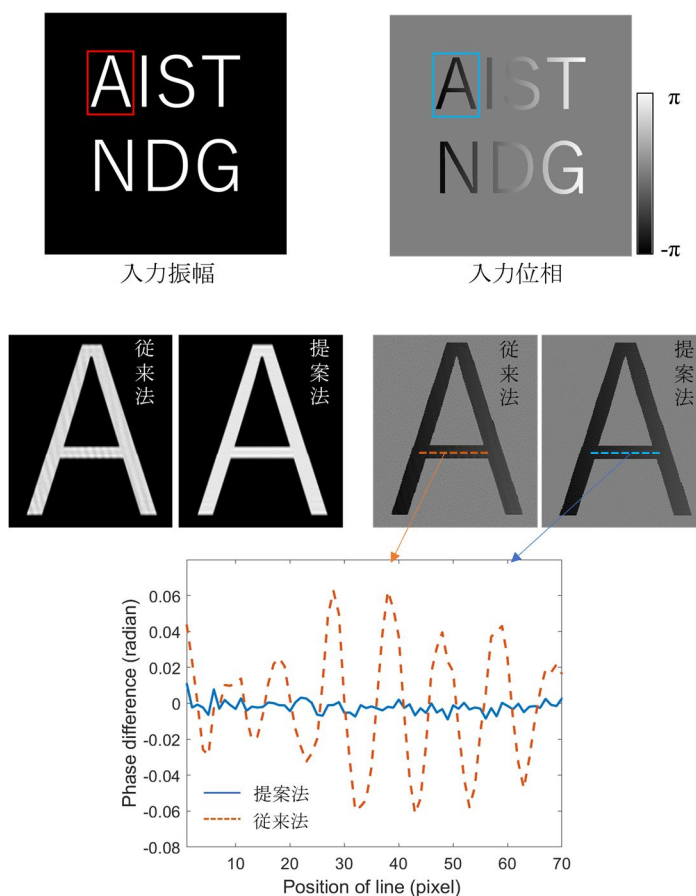


図3．計算機シミュレーションの結果

た。

次に、波長がそれぞれ 473nm と 532nm のレーザー及び解像度 2448 X 2048 の CMOS カメラと関連光学部品を導入し、空間分割記録を利用して一回の撮影で、多波長の位相シフト量を検出するための縞模様および物体情報が含まれたホログラムを同時に記録する計測システムを試作した。試作システムにより、金属試験片の変形の動的計測を行い、不連続物体に対して、奥行き方向に最大 2.1 μm の計測範囲を実現した[4]。実験結果を図 4 に示す。

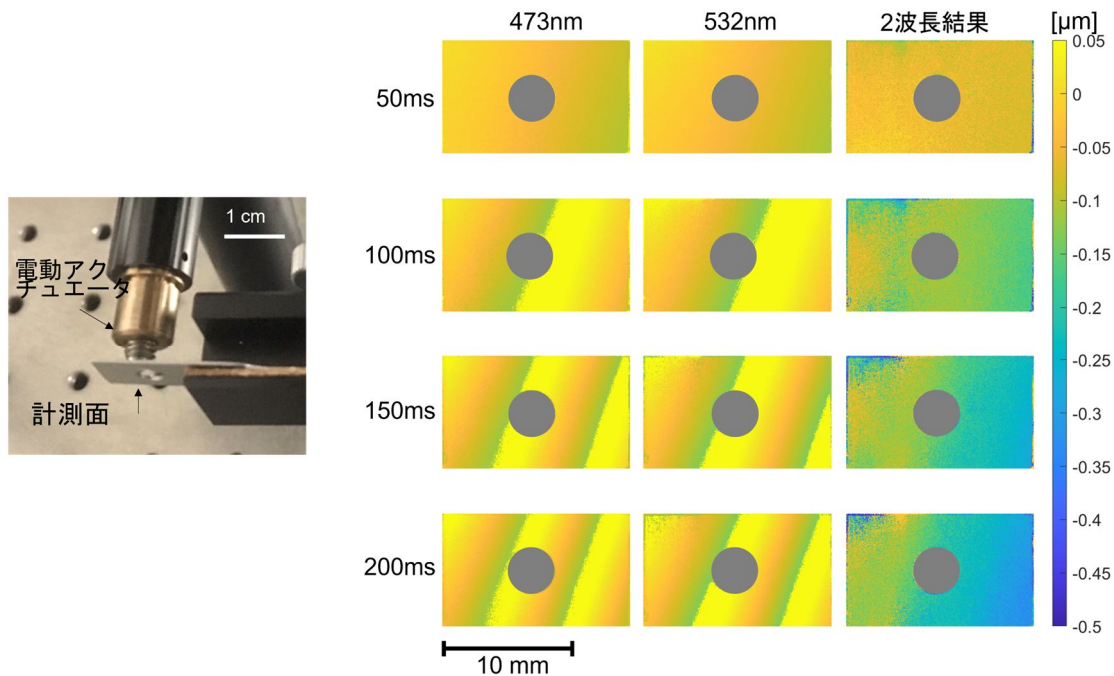


図 4 . 実験結果

単一ピエゾ素子で多波長の位相を同時にシフトすることで、システムの高効率化を確認した。また、多波長デジタルホログラフィに対して、記録したホログラムに各波長の再生像の位置とサイズが異なり、各波長の物体像の自動抽出とサイズ調整アルゴリズムを開発し、計算機シミュレーションで有効性を確認した。

様々な科学研究や工学分野において高精度な 3 次元変位・形状の動的計測技術が必要とされている。例えば、材料科学では、物質の微細な構造や変形の解析において 3 次元計測技術が必要である。本研究では、波長が異なる複数のレーザーを用いて、奥行き方向にナノメートルオーダーから数十マイクロメートルまでのマルチスケールの高精度 3 次元動的計測を実現できるため、様々な基礎科学研究や工業生産への応用が期待されている。

< 引用文献 >

1. I. Yamaguchi and T. Zhang, "Phase-shifting digital holography", *Opt. Lett.*, 22, 1268 (1997).
2. P. Xia, S. Ri, Q. Wang, and H. Tsuda, "Nanometer-order thermal deformation measurement by a calibrated phase-shifting digital holography system", *Opt. Express*, 26(10), 12594 (2018).
3. P. Xia, Q. Wang, S. Ri, H. Tsuda, "Calibrated phase-shifting digital holography based on space-division multiplexing", *Optics and Lasers in Engineering*, 123, 8-13 (2019).
4. P. Xia, S. Ri, Q. Wang, "Dynamic deformation measurement of dual-wavelength arbitrary phase-shifting digital holography with automatic phase-shift detection", *Applied Optics*, 61-5, B103-B110 (2022).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Xia Peng, Ri Shien, Wang Qinghua	4. 巻 61
2. 論文標題 Dynamic deformation measurement of dual-wavelength arbitrary phase-shifting digital holography with automatic phase-shift detection	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Optics	6. 最初と最後の頁 B103 ~ B103
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/AO.440048	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, Ri Shien	4. 巻 168
2. 論文標題 Three dimensional phase measurement of transparent gas by high speed digital holographic tomography system	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Optics and Lasers in Engineering	6. 最初と最後の頁 107656 ~ 107656
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.optlaseng.2023.107656	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0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

https://unit.aist.go.jp/rima/ndm/research/#archive-2021

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
---------	---------