

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 31 日現在

機関番号：14701

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360053

研究課題名（和文）デジタルホログラフィによるマイクロ三次元構造物の力学特性評価手法の開発

研究課題名（英文）Development of Mechanical Property Evaluation Method for Micro 3D-structure Using Digital Holography

研究代表者

藤垣 元治 (FUJIGAKI MOTOHARU)

和歌山大学・システム工学部・准教授

研究者番号：40273875

研究成果の概要（和文）：

外部から加えられた微細振動の振幅分布を時間平均干渉縞として得ることによって、内部欠陥の有無の判別が可能であることを確認した。マイクロ構造物の変位分布・ひずみ分布を計測する小型計測手法として、複数の撮像素子によるひずみ分布計測システムにおけるキャリブレーション方法を提案して、その実験と評価を行った。複数の撮像素子による変位分布・ひずみ分布計測システムの構造設計を行い、小型撮像素子4個が配置された撮像ヘッド部の試作を行った。

研究成果の概要（英文）：

The ability to apply a time-averaged digital holography to defect detection with applying vibrating was shown. We proposed a calibration method to measure the displacement and strain distributions using a number of imaging devices. The availability was confirmed with an experimental verification. A structure design of the compact displacement and strain distribution measurement system with a number of imaging devices was performed. A prototype of an imaging head with four imaging devices specialized for the digital holography was built.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	4,500,000	1,350,000	5,850,000
2010年度	3,900,000	1,170,000	5,070,000
2011年度	2,600,000	780,000	3,380,000
年度			
年度			
総計	11,000,000	3,300,000	14,300,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械材料・材料力学

キーワード：デジタルホログラフィ，力学特性評価，マイクロ三次元構造物，変位分布計測，ひずみ分布計測

1. 研究開始当初の背景

デジタルホログラフィによる変位計測・ひずみ計測の研究は比較的最近はじまり、実用的な方法である位相シフトデジタルホログラフィ干渉法（PSDHI）は日本の山口（1998年）により開発された。デジタルホログラフィを

用いた研究は、光情報処理の分野や三次元座標計測での研究は多くあるが、実際の構造物へ適用した研究は数少ない。とくに、マイクロ構造物の場合は、非接触式の手法でなければ変位分布やひずみ分布等の力学的な計測を行うことが困難であり、デジタルホログラフ

ィのような光学式の計測手法の必要性は高い。また、実際の構造物に適用するためには、光学実験室の防振台上で実験するだけでなく、現場に持ち出すことができる小型の計測装置も必要とされる。そのための技術開発について必要とされる。これにより今まで実現できなかったマイクロ構造物の強度評価が可能となるだけでなく、今後問題となる巨大構造物の健全性評価にも適用でき、その延命化に貢献する。

2. 研究の目的

本研究では、デジタルホログラフィを用いてマイクロマシンの微小変形やひずみ分布、加振時の振幅分布を計測する新しい技術を開発する。これにより、物体の内部欠陥の検出の可能性をさぐる。マイクロ構造物のひずみ分布計測へ展開するために、レンズを用いることで拡大撮影が可能な手法を確認し、さらに、光学系を小型にするための撮像手法の提案とそれを実現するためのキャリブレーション手法の提案を行う。

3. 研究の方法

まず、微小物体の変位分布・ひずみ分布計測手法として、レンズを用いて拡大して撮影する手法を提案し、その原理確認を行った。次に、時間平均干渉縞撮影による内部欠陥の検出手法を提案し、内部欠陥が検出可能な分解能を得ることができることを実験により確認した。さらに、複数の撮像素子を用いた光学系のキャリブレーション手法の提案と実験的検証を行った。これらについては、下の研究成果に概要を記す。

また、それ以外に、小型の装置をつくるための研究として、レーザーの干渉を利用したトリガ発生装置の開発を行った。位相シフト機構の構築によって、比較的波長が安定しない半導体レーザーであっても位相シフトによる撮影が可能となる。さらに複数の撮像素子による変位分布・ひずみ分布計測システムの構造設計を行った。それを実現するため、小型の CMOS 型撮像素子 4 個が配置された撮像ヘッド部と画像撮影用回路部分の試作を行った。4mm~7mm 角程度の微小領域が計測できる計測ヘッドを試作した。

4. 研究成果

(1) 微小物体の変位分布・ひずみ分布計測手法の確認

微小物体の変位分布・ひずみ分布計測手法として、レンズを用いて拡大して撮影する手法を提案し、その確認実験を行った。計測対象物として、厚さ 1.0mm の小型カンチレバーを用いた。原理は図 2 に示すように、レンズによって計測対象物の像を作ること、拡大された像のホログラムを撮影するというも

のである。

ただし、光路中にレンズを入れることにより、再生距離を精度よく実測することが事実上困難となる。そこで、筆者らが提案している再生像の標準偏差を用いる光学距離同定手法を適用する。これは図 3 に示すように、再生距離が実際の光学距離と等しくなる時に、再生像の標準偏差が極大になるという性質を利用した手法である。これにより途中でレンズ等の光学素子を設置しても再生距離を精度よく得られることが可能となる。

図 1 に示すようにカンチレバーの固定端から 5mm の位置に 13 マイクロメートルの変位を与えた際の変位分布とひずみ分布の計測結果を図 4 (a) と (b) にそれぞれ示す。

この手法により、レンズで拡大することで変位分布とひずみ分布の計測が行えることが確認できた。

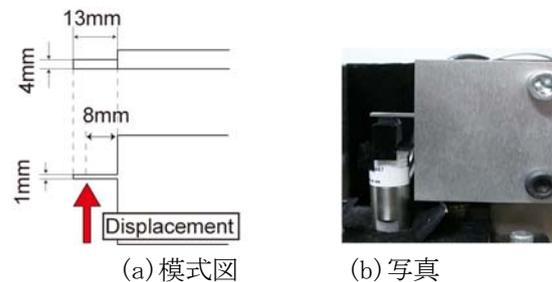


図 1 計測試料 (小型カンチレバー)

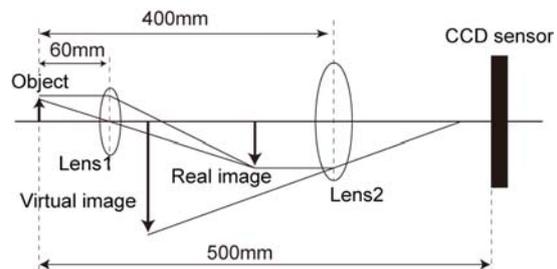


図 2 物体-CCD 間の光学系概略図

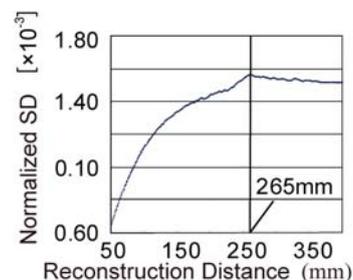
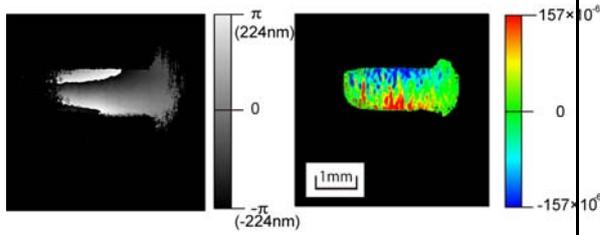


図 3 再生距離と標準偏差の関係



(a) 変位分布 (b) ひずみ分布

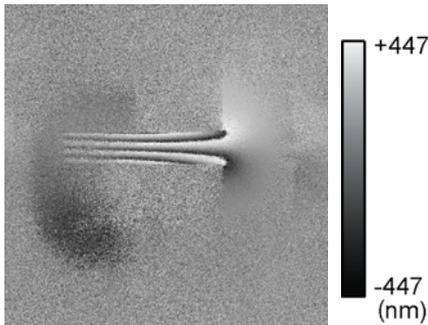
図4 計測結果

(2) 内部欠陥の検出

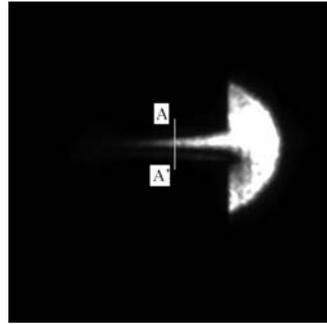
時間平均干渉縞撮影による内部欠陥の検出手法を提案し、その確認を行った。時間平均干渉縞は、振動時の振幅分布を長時間露光によって干渉縞として観察する手法である。デジタルホログラフィにおいては、スペックルノイズの影響によって、有意な干渉縞を得ることが難しかったが、我々が提案している位相差平均化手法を適用することで、内部欠陥が検出可能な分解能を得ることができることを実験により確認した。

図6に、内部欠陥のない試料と内部欠陥のある試料の変位分布と時間平均干渉縞の再生像のパターンを示す。内部欠陥がある場合は、画面中央部付近に内部欠陥による変位分布の乱れが発生しているのが図5(c)より確認できる。その場合に時間平均干渉縞においても、みだれが発生することが図5(d)よりわかる。また、このときに位相差平均化手法を用いることで、スペックルノイズが大幅に低減できることを図6に示す。図6は、図5(b)における A-A' の断面におけるノイズ除去手法の適用前後の時間平均干渉縞の輝度を比較したものである。

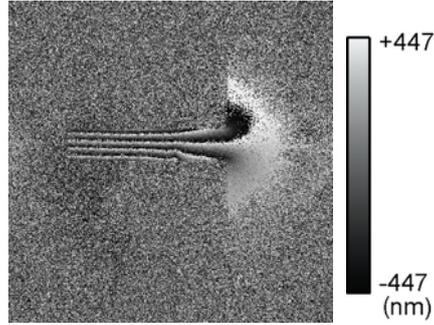
このように、外部から振動を加えることによって、内部欠陥の有無を検出することが可能であることが確認できた。



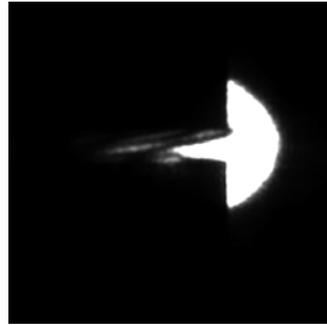
(a) 内部欠陥なし (変位分布)



(b) 内部欠陥なし (時間平均干渉縞)



(c) 内部欠陥あり (変位分布)



(d) 内部欠陥あり (時間平均干渉縞)

図5 時間平均干渉縞による内部欠陥の検出 (変位分布との比較)

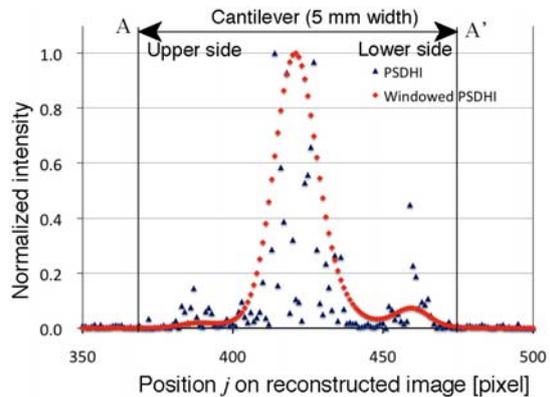


図6 位相差平均化手法によるノイズ除去の効果

(3) 複数の撮像素子を用いた光学系のキャリブレーション手法の提案と実験的検証

従来のデジタルホログラフィによる変位分布計測の光学系においては、撮像素子1個を計測試料の正面に配置し、複数の方向から

物体光を入射していた。しかし、複数の入射光を用いると、光学系が複雑となり、装置の小型化には限界があった。そこで、本研究では、入射光を1個にして、撮像素子を複数にする手法を提案した。これによって、小型の計測装置の構築が実現できる。

しかし、撮像素子を複数にするということは、異なる方向から撮影した再生像とその位相分布がそれぞれ得られることになり、物体上の同一点における複数の感度ベクトルを得るためには、それぞれの再生像における対応点を精度よく求める必要がある。そのためのキャリブレーション手法として、図7に示すような2次元格子が描かれた平板を用いる手法を提案した。このプレートは3軸ピエゾステージに取り付けられており、 x 、 y 、 z 方向にそれぞれ微小に変位させる。この平板の2次元格子パターンを位相解析することによって、各撮像素子によって得られた再生像における対応点を精度よく求めることができ、さらに x 、 y 、 z 方向に微小に変位させることによって、各画素における感度ベクトルも求めることが可能となる。

本手法を用いた計測例を示す。図8に、2個の撮像素子を用いた面外・面内変位計測の光学系を示す。試料正面から物体光を照射し、左右に配置された撮像素子によって、散乱光をホログラムとして撮影する。

図9に基準面の2次元格子の解析の様子を示す。図9(a)は左側の撮像素子で得られた2次元格子パターンの再生像である。この画像に対して、筆者らが提案しているサンプリングモアレ法によって位相解析を行うことで、図9(b)と(c)に示すような位相分布を得ることができる。サンプリングモアレ法は平滑化を含んだ解析手法のため、スペックルノイズに強く、精度よく位相解析ができる。図10に、これにより得られた画像中央付近の断面における座標と位相の対応付けの結果をグラフで示す。

図11に計測実験を行った試料を示す。試料は固定部分の中央に可動部分があり、可動部分はピエゾステージによって、 x 、 y 、 z 方向に任意に変位させることができる。これにより x 方向に300nmの変位を与えたときの面内変位と面外変位の計測結果をそれぞれ図12(a)と(b)に示す。

本手法を応用することで、図13に示すようにミラーを用いることで、撮像素子1個と正面からの1光束の入射光によって、面内変位と面外変位を計測することが可能となる。図14に再生像を示す。画像の右半分にはミラーに映った鏡像が再生されているのがわかる。これより得られた変位分布とひずみ分布を図15に示す。

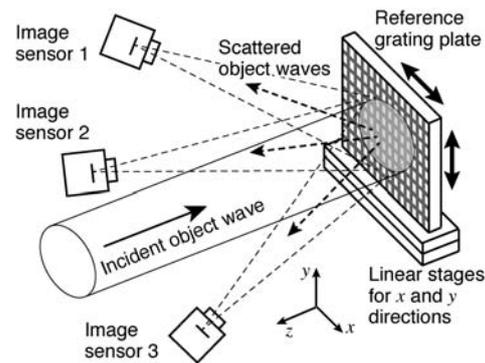


図7 複数の撮像素子を用いたデジタルホログラフィ光学系のキャリブレーション

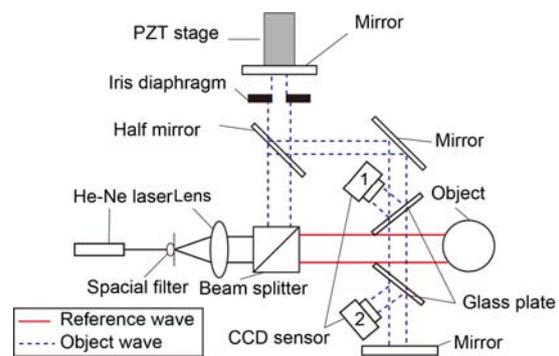
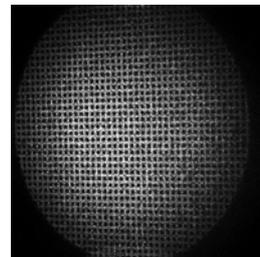
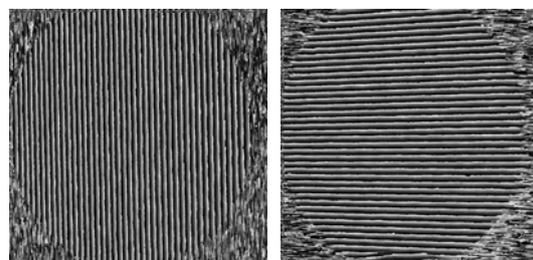


図8 2個の撮像素子を用いた面外・面内変位計測の光学系

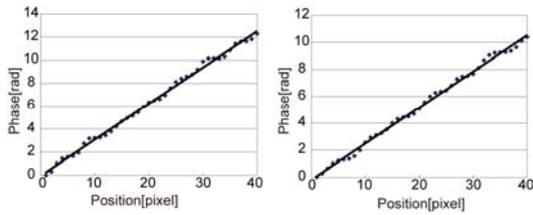


(a) 再生像 (2次元格子画像)



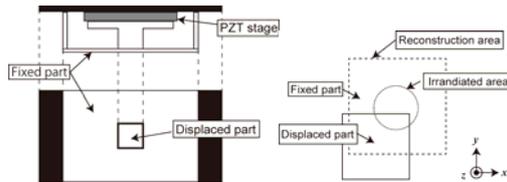
(b) x 方向位相分布 (c) y 方向位相分布

図9 基準面の2次元格子の解析 (左側の撮像素子)



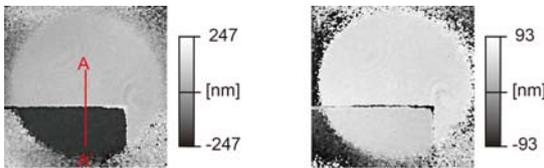
(a) x 方向位相分布 (b) y 方向位相分布

図 10 座標と位相の対応付け



(a) 計測試料 (b) 計測領域

図 11 計測試料



(a) 面内変位 (b) 面外変位

図 12 変位計測結果 (x 方向に 300nm の変位を加えた場合)

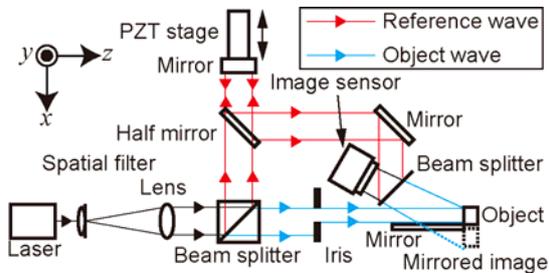


図 13 ミラーを用いた光学系

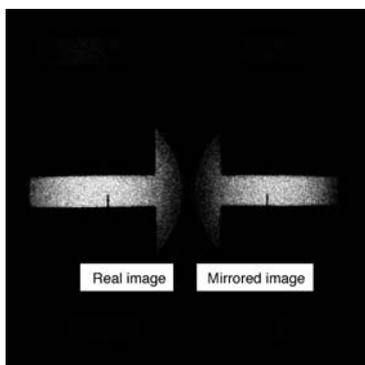
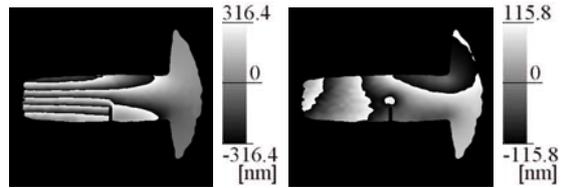
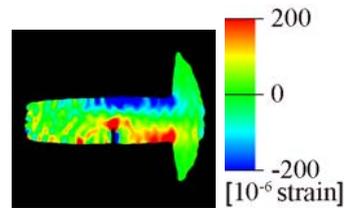


図 14 再生像



(a) x 方向面内変位分布 (b) 面外変位分布



(c) x 方向ひずみ分布

図 15 計測結果

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)

[学会発表] (計 13 件)

- ① Goto, R., Fujigaki, M., Time Series Deformation Measurement by Windowed Digital Holographic Interferometry, The 6th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics (6thISEM, 11-Sendai/Kansai), 133(CD-ROM), SEM XII International Congress & Exposition on Experimental and Applied Mechanics, 2011. 11. 5, 関西空港会議場
- ② Fujigaki, M. and Nishitani, R., Calibration Method for Strain Measurement Using Multiple Cameras in Digital Holography. Optical Measurements, Modeling, and Metrology, Vol. 5, SEM Annual Conference & Exposition on Experimental and Applied Mechanics, 2011. 6. 16, USA
- ③ 根木謙一, 福田智嘉羅, 藤垣元治, 柁谷明大, 位相シフトデジタルホログラフィを用いた時間平均法による構造物の欠陥検出, 分科会合同ワークショップ 2010, 2010. 11. 28, 熊本県阿蘇郡南阿蘇村
- ④ Fujigaki, M., Fukuda, C., Negi, K. and Morimoto, Y., Defect Detection Using Time-averaged Digital Holography with Noise Reduction by Windowed Hologram, Proceedings of International Symposium on Advanced Science and

- Technology in Experimental
Mechanic, 2010. 11. 5, 京都市
- ⑤ 西谷陸, 藤垣元治, 森本吉春, デジタルホ
ログラフィによる面内変位・ひずみ分布
計測手法における光学系の小型化, M&
M2010 材料力学カンファレン
ス, 2010. 10. 10, 長岡市
- ⑥ 後藤良介, 藤垣元治, 榎谷明大, 位相差平
均化手法を用いた位相シフトデジタルホ
ログラフィによる高さ分布計測第15回
知能メカトロニクスワークショップ,
2010. 9. 2, 松山市
- ⑦ Fujigaki, M. , Nishitani, R. ,
Morimoto, Y., Deformation and Strain
Measurement Using Phase-shifting
Digital Holography with Off-axis
Cameras,
SPIE Optics+Photonics, 2010. 8. 4, サン
ディエゴ (アメリカ)
- ⑧ Fujigaki, M. , Nishitani, R. , Morimoto,
Y. , Strain Measurement Using
Phase-shifting Digital Holography
with Two Cameras, ICEM 14, EPJ Web of
Conferences 6, 2010. 7. 7, フチュロスコー
プ (フランス)
- ⑨ 西谷陸, 藤垣元治, 森本吉春,
Identification of Reconstruction
Distance in Phase-shifting Digital
Holography for Microscope, 4th
ISEM '09-NIIGATA, 2009. 11. 30, 新潟市
- ⑩ 藤垣元治, 榎谷明大, 森本吉春, Off-axis
Reconstruction Method for
Displacement and Strain Distribution
Measurement with Phase-Shifting
Digital Holography Fringe '09,
2009. 9. 16, ニューティンゲン (ドイツ)
- ⑪ 藤垣元治, 塩谷航平, 西谷陸, 榎谷明大,
森本吉春, 2台のカメラを用いたデジタル
ホログラフィによる面内変位分布計測,
日本実験力学学会 2009 年度年次講演会,
2009. 8. 6, 東京都
- ⑫ 藤垣元治, 光メカトロニクス計測による
高速高精度な三次元形状計測・変位分布
計測・ひずみ分布計測システムの開発,
日本機械学会 流体工学部門 デジタル
ホログラフィック応用計測研究会 第7
回研究会, 2009. 5. 16, 京都市
- ⑬ 藤垣元治, Whole-Space Tabulation
Method for Real-time Shape Measurement
and Compact Strain Distribution
Measurement System, ICCES'09
Thailand, 2009. 4. 11, プーケット (タイ)

[産業財産権]

○出願状況 (計2件)

名称: 小型位相シフト装置

発明者: 藤垣元治, 西谷陸
権利者: 国立大学法人和歌山大学
種類: 特許
番号: 特願 2011-42235
出願年月日: 2011. 2. 28
国内外の別: 国内

名称: 変位分布計測方法、装置及びプログラム

発明者: 藤垣元治, 森本吉春, 榎谷明大, 塩
谷航平, 西谷陸

権利者: 国立大学法人和歌山大学

種類: 特許

番号: 2009-210972

出願年月日: 2009. 9. 11

国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等

<http://hamachi.sys.wakayama-u.ac.jp/research/about.html#hizumi>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤垣 元治 (FUJIGAKI MOTOHARU)
和歌山大学・システム工学部・准教授
研究者番号: 40273875

(2) 研究分担者

村田 頼信 (MURATA YORINOBU)
和歌山大学・システム工学部・准教授
研究者番号: 50283958

(3) 研究分担者

森本 吉春 (MORIMOTO YOSHIHARU)
和歌山大学・理事
研究者番号: 20029573