

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 2 日現在

機関番号：14701

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656089

研究課題名(和文)変位・ひずみ分布計測におけるデジタルホログラフィ光学系の複数撮像素子による小型化

研究課題名(英文)Miniaturization of Digital Holographic Optical System for Displacement and Strain Measurement Using Multiple Imaging Device

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：インフラ構造物等の欠陥検査のために、効率のよいひずみ分布計測システムが必要とされている。位相シフトデジタルホログラフィは、変位分布やひずみ分布を計測できる手法のひとつである。実用化するためには、その光学系を単純化してコンパクトな計測装置を作る必要がある。これまでに複数の撮像素子を用いることで光学系を単純化する方法を提案してきた。本研究では、参照光に球面波を用いることで、単純な光学系で参照光を作成する手法を提案した。また、撮像素子を5個用いた光学系を構築し、実験により本手法の効果を確認した。

研究成果の概要(英文)：Efficient strain measurement technique is required to inspect defects in the infra structure. Phase-shifting digital holography is a convenient method to measure displacement and strain distributions. To simplify the optical setup is required for producing more compact equipment for practical use. Authors proposed a method to measure displacement and strain using multiple imaging devices. An optical setup using five imaging devices was developed. A simple phase-shifting optical setup to provide reference wave to each imaging device using a spherical wave was proposed. The effectiveness of this proposed method was confirmed.

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 複数撮像素子 光学系 変位分布計測 ひずみ分布計測 小型化 高精度化

1. 研究開始当初の背景

橋梁や鉄塔などの鋼材でつくられた構造物の内部欠陥の検査を効率的に行うためには、微小な変位やひずみを分布として非接触で計測する手法の開発が求められている。デジタルホログラフィを用いた変位・ひずみ分布計測手法は、塗装の上からでも計測が可能な手法であるが、現在は光学系が複雑で大きな装置となるために、実際には用いられていない。

実用化するためには、その光学系を単純化してコンパクトな計測装置を作る必要がある。デジタルホログラフィによる変位・ひずみ分布計測装置を小型化する研究は国内外でいくつか行われているが、面外変位だけの簡易的なものが多く、三次元の変位分布が計測できる装置の研究はほとんど行われていない。

これまでに物体光3光束をできるだけコンパクトに詰め込んだ装置を開発したが、それ以上の小型化は限界であった。筆者は図1.1に示すように、光学系を複雑にするよりも、撮像素子を複数にすることで3次元の変位が計測でき、格段に小型化ができるということに気がつき、これによって光学系を格段に小型化することができるようになり、デジタルホログラフィが新しい多くの分野で利用できるようになる。

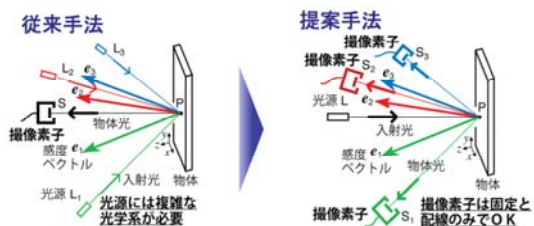


図1.1 提案手法 (撮像素子を複数にすることによる複数の感度ベクトルの取得)

2. 研究の目的

本研究では、参照光に球面波を用いることで、単純な光学系で参照光を作成する手法を提案する。また、撮像素子を5個用いた光学系を構築し、実験により本手法の効果を確認する。

3. 研究の方法

本研究では次の項目を実施することによって、複数の撮像素子を用いた変位分布・ひずみ分布の計測原理を実験的に確認し、さらに撮像素子の個数を増やすことで、精度向上の可能性について確認した。

- (1) 参照光の入射と位相シフトを行う光学系の考案および実験装置の構築
- (2) 複数撮像素子 (3 個) による三次元変位分布・ひずみ分布計測の解析アルゴリズムの構築とソフトウェアの開発
- (3) 撮像素子を多数 (5 個) にすることによる計測精度向上の確認

4. 研究成果

(1) 参照光作成手法

図4.1に示すように、物体への入射光の光路中に一部を反射する光学部品を配置することで、入射光の周囲に設置された撮像素子に参照光を入射することができるようになる。図4.1においては、入射光の光源側に凸になったガラス板を用いている。入射光を平行光として凸面に入射することで、この凸面の角度によって、入射光の反射角度が変わり、撮像素子に参照光として入射させることができる。凸面を透過した光は物体に照射される。

図4.2に、入射光を凸レンズによって球面波にして、その球面波を平面状のガラス板に入射することで、入射光の周囲に配置した撮像素子に参照光として入射させることができる構造を示す。光学部品が平面ガラス板を用いることで、容易に作成することができるようになる。また、光学系の設計も容易になる。計測対象物体には、球面波が照射され、物体表面での散乱光がガラス板を通り抜けて、撮像素子に入射してホログラムとして撮影される。

図4.1と図4.2に示すように、物体への入射光の光路中に一部を反射する光学部品に、面外方向に微小に移動するようなアクチュエータとしてピエゾ素子を取り付けている。このアクチュエータに信号を送り、伸縮させることで、撮像素子に入射させる参照光の位相シフトを行うことができる。

さらに、図4.3に示すように、光源から出た光の一部を取り出して干渉計を構築し、干渉計を構成する反射光学部品にも参照光の位相シフトを行う光学部品に取り付けられている物と動作の対応関係のわかっているアクチュエータを取り付け、対応関係に応じた信号で駆動することによって、その干渉計によって得られる干渉縞の変化から撮影タイミングを決めることによって、ピエゾ素子のような入力電圧と変位量の関係にヒステリシスを持つようなアクチュエータを用いる場合であっても、再現性よく、所定の位相シフト量となった場合に撮影を行うことができる。

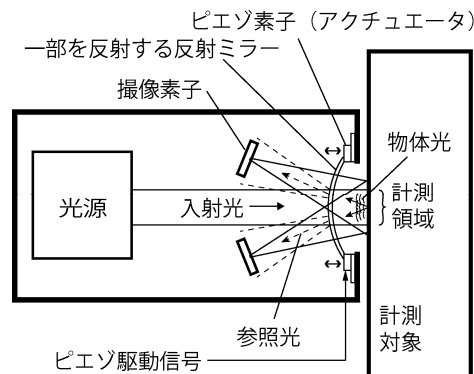


図4.1 照射光路中に反射ミラーを設置することによる参照光を得る構成 (照射光を平面波とする場合の構成)

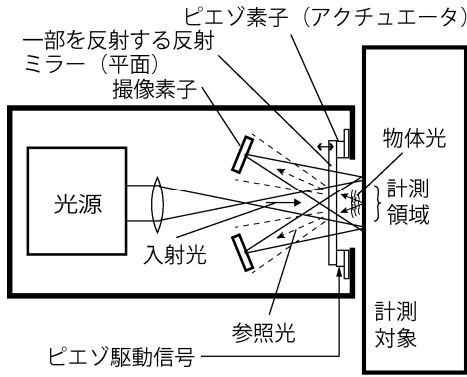


図 4.2 照射光路中に反射ミラーを設置することによる参照光を得る構成 (反射ミラーを平面にする構成)

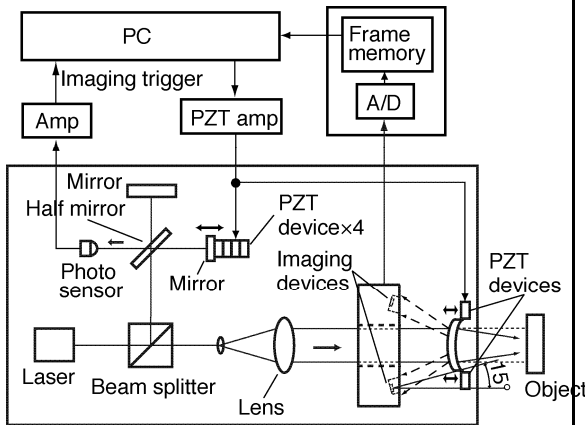


図 4.3 干渉計によって得られる干渉縞の変化から撮影タイミングを決める構成の例

(2) 複数台の撮像素子を用いた変位・ひずみ計測アルゴリズムの構築とソフトウェアの開発

複数の撮像素子を用いた場合、それぞれの撮像素子において変位前後の位相差分布を得ることができる。そこから変位とひずみ分布を求めるアルゴリズムを構築した。擬似逆行列を用いた変位計測を行なう。撮像素子を n 個としたときの感度マトリックス S は式(1)となる。

$$S = \begin{bmatrix} e_{1x} & e_{1y} & e_{1z} \\ e_{2x} & e_{2y} & e_{2z} \\ e_{3x} & e_{3y} & e_{3z} \\ \mathbf{M} & \mathbf{M} & \mathbf{M} \\ e_{nx} & e_{ny} & e_{nz} \end{bmatrix} \quad (1)$$

感度マトリックス S が正則でない場合、 S の擬似逆行列 S^+ は式(2)で表される。

$$S^+ = (S^T S)^{-1} S^T = \begin{bmatrix} f_{1x} & f_{2x} & f_{3x} & \mathbf{L} & f_{nx} \\ f_{1y} & f_{2y} & f_{3y} & \mathbf{L} & f_{ny} \\ f_{1z} & f_{2z} & f_{3z} & \mathbf{L} & f_{nz} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式(2)を用いることで、式(1)は式(3)のように変形することができる。

$$\begin{bmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{bmatrix} = S^+ \begin{bmatrix} \Delta\phi_1 \\ \Delta\phi_2 \\ \Delta\phi_3 \\ \mathbf{M} \\ \Delta\phi_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

上式から、各感度ベクトル方向の変位成分を表す位相値から x , y , z 方向の変位成分を式(4)のようにそれぞれ求めることができる。

$$\begin{aligned} d_x &= f_{1x}\Delta\phi_1 + f_{2x}\Delta\phi_2 + f_{3x}\Delta\phi_3 + \mathbf{L} + f_{nx}\Delta\phi_n \\ d_y &= f_{1y}\Delta\phi_1 + f_{2y}\Delta\phi_2 + f_{3y}\Delta\phi_3 + \mathbf{L} + f_{ny}\Delta\phi_n \\ d_z &= f_{1z}\Delta\phi_1 + f_{2z}\Delta\phi_2 + f_{3z}\Delta\phi_3 + \mathbf{L} + f_{nz}\Delta\phi_n \end{aligned} \quad (4)$$

また、ひずみも n 個の位相差をそれぞれ x 方向と y 方向に偏微分した値を用いて、次式のように求めることができる。

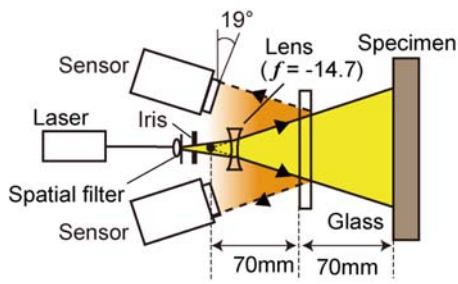
$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= f_{1x} \frac{\partial \Delta\phi_1}{\partial x} + f_{2x} \frac{\partial \Delta\phi_2}{\partial x} + f_{3x} \frac{\partial \Delta\phi_3}{\partial x} + \mathbf{L} + f_{nx} \frac{\partial \Delta\phi_n}{\partial x} \\ \varepsilon_y &= f_{1y} \frac{\partial \Delta\phi_1}{\partial y} + f_{2y} \frac{\partial \Delta\phi_2}{\partial y} + f_{3y} \frac{\partial \Delta\phi_3}{\partial y} + \mathbf{L} + f_{ny} \frac{\partial \Delta\phi_n}{\partial y} \end{aligned} \quad (5)$$

上記のアルゴリズムをこれまでに作成してきたデジタルホログラフィ実験用のソフトウェアに組み込んだ。

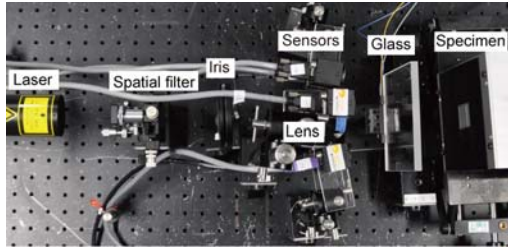
(3) 光学系の構築による有効性の確認実験

提案した光学系の有効性を確認するために、図 4.4 に示す実験装置を構築した。参照光を点光源とするために凹レンズ ($f=-14.7$ mm) を使用する。また、余分な反射成分を低減するため、片面にのみ反射防止膜をコートしたガラス板を使用する。このとき、ガラス板のコート面はレーザー光が入射される側の面とする。点光源からガラス板までの距離を 70mm、ガラス板から撮像素子までの距離を 70mm とする。また計測物体から撮像素子までの距離を 140 mm とすることで、撮像素子から点光源の距離と、撮像素子から物体までの距離を等しくする。

図 4.5 に複数撮像素子部分を示す。撮像素子は、点光源を中心に半径 50 mm の円状に配置されている。このとき、撮像素子への参照光の入射角は 19 度となる。光源は、出力 5 mW、波長 633 nm の He-Ne レーザを用いる。ホログラムの記録には、1 画素の大きさが $3.75 \mu\text{m} \times 3.75 \mu\text{m}$ のデジタルインターフェースの撮像素子 (Point Gray Research 社製 FL2G-13S2M-C) を用いる。このとき、撮像素子の撮影範囲は $28 \text{mm} \times 28 \text{mm}$ となる。また、取り込む画像の画素数は、960 画素 \times 960 画素で、濃度段階は 256 階調である。

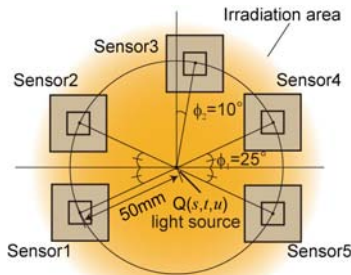


(a)配置

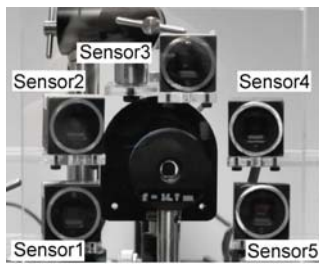


(b)写真

図 4.4 複数撮像素子の実験装置



(a)配置



(b)写真

図 4.5 複数撮像素子部分

図 4.6 に 3 軸ピエゾステージに取付けられた基準面の写真を示す。中央部の四角い領域が 3 軸ピエゾステージによって任意の方向に微小な変位を与えることができる領域である。この基準面全体がジャッキによって、上下に平行移動できるようになっている。

これを用いて、まずキャリブレーションを行い、前述の感度マトリックスを求めた。次に、移動部分と固定部分が撮像領域に半々に入るようにジャッキにより下方向に移動する。その後、 x 方向に 100 nm、 y 方向に 100 nm、 z 方向に 30 nm の変位を与えて、それぞれの撮像素子に対して位相差を求め、

そこから変位分布を求めた結果を図 4.7 に示す。

領域 A と領域 B において、それぞれ得られた変位量と誤差、標準偏差を表 4.1 に示す。このように有意な変位を得られており、提案した計測原理の有効性が確認できた。

また、 x 方向に 100 nm、 y 方向に 100 nm、 z 方向に 30 nm の変位を与えて、10 回計測を繰り返した際の標準偏差を変位計測に使用した撮像素子の組み合わせごとに表 4.2 に示す。3 個の撮像素子の組み合わせで得られた変位の標準偏差と 5 個の撮像素子によって得られた結果についても合わせて表に載せる。これより、5 個の撮像素子の場合は、 x 方向、 y 方向、 z 方向ともに良好な結果が得られている。一方、3 個の撮像素子の組み合わせの場合は、5 個の場合よりも標準偏差が小さくなる変位成分があったとしても、別の変位成分は大きな標準偏差になることが確認できる。これにより、複数個にすることの有効性も確認することができた。これにより、撮像素子を複数個にすることで精度向上の可能性について確認することができた。

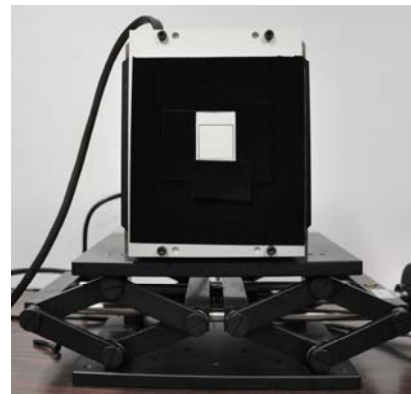


図 4.6 3 軸ピエゾステージに取付けられた基準面

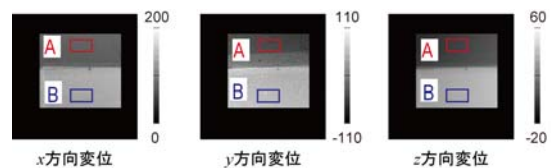


図 4.7 変位分布計測結果

表 4.1 変位計測結果(5台の撮像素子を用いた場合)

変位量	固定部(領域A)		移動部(領域B)		計測結果	誤差
	平均	標準偏差	平均	標準偏差		
$x:100\text{nm}$	66	3.6	145	3.8	79	-21
$y:100\text{nm}$	-62	6.0	72	6.6	134	34
$z:30\text{nm}$	0	1.0	33	1.2	33	3

(単位 : nm)

表 4.2 計測結果の標準偏差

使用した撮像素子の番号	誤差の標準偏差 (nm)		
	x 方向	y 方向	z 方向
1, 2, 3	79.1	54.7	9.3
1, 2, 4	21.9	47.9	12.1
1, 2, 5	11.7	45.7	12.9
1, 3, 4	36.3	56.9	4.5
1, 3, 5	11.8	31.5	3.5
1, 4, 5	11.8	33.7	3.7
2, 3, 4	22.4	104.3	10.6
2, 3, 5	37.9	49.4	4.8
2, 4, 5	22.3	34.3	4.2
3, 4, 5	106.9	36.4	18.2
1, 2, 3, 4, 5	14.6	21.4	4.3

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 1 件)

Otsuka, N., Nishitani, R., Fujigaki, M. and Murata, Y., Trigger Mechanism Using Interferometer for Displacement Measurement Device by Phase-Shifting Digital Holography, Journal of JSEM, Vol. 13, Special Issue, s178-s183(2013).
査読有

[学会発表] (計 6 件)

大塚展弘, 藤垣元治, 村田頼信, 位相シフトデジタルホログラフィにおける球面波参照光を用いた位相差解析手法の提案, 日本非破壊検査協会平成 25 年度秋季講演大会, RCC 文化センター, (2013. 11. 27).

Minamino, H., Fujigaki, M. and Murata, Y., Development of Multiple CMOS Head for Digital Holographic Interferometry, Abstracts of 9th International Conference on Advances in Experimental Mechanics, BSSM, University of Cardiff, UK, (2013. 9. 3).

南野宏紀, 藤垣元治, 複数のピエゾ素子を用いた干渉縞トリガ機構の構築, 日本機械学会関西学生会平成 24 年度卒業研究発表講演会, 大阪工業大学, (2013. 3. 15).

Otsuka, N., Fujigaki, M. and Murata, Y., Phase-shifting and Trigger Mechanism Using Interferometer for Compact Measurement Device by Phase-shifting Digital Holography, Joint International Conference of ISEM-ACEM-SEM-7th ISEM' 12-Taipei, Taipei, (2012. 11. 10).

藤垣元治, 後藤良介, 大塚展弘, 村田頼信, 複数撮像素子を用いた位相シフトデジタルホログラフィ干渉法における基準面キャリブレーション手法の適用, 日本実験力学学会講演会, 豊橋技術科学大学, (2012. 7. 14).

大塚展弘, 藤垣元治, 村田頼信, 位相シフトデジタルホログラフィにおける干渉計を利用した小型位相シフト装置の計測精度の評価, 平成 24 年度日本非破壊検査協会春季講演大会, アルカディア市ヶ谷, (2012. 5. 23).

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: デジタルホログラフィによる変位・ひずみ分布計測装置
発明者: 藤垣元治, 大塚展弘, 南野宏紀
権利者: 藤垣元治
種類: 特許
番号: 特願 2013-189840
出願年月日: 2013. 9. 12
国内外の別: 国内

[その他]

<http://hamachi.sys.wakayama-u.ac.jp/>

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: 4 0 2 7 3 8 7 5

(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: 5 0 2 8 3 9 5 8