

スペックル干渉計測に基づく三軸方向に同一測定感度をもつ三次元変形計測法の開発

新井 泰彦*・横関 俊介**

*関西大学システム理工学部機械工学科 〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35

**常光応用光学研究所 〒811-4142 福岡県宗像市泉が丘 2-32-1

Development of Three-Dimensional Deformation Measurement Method with Same Sensitivities in Three Directions Using Speckle Interferometry

Yasuhiko ARAI* and Shunsuke YOKOZEKI**

*Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering Science, Kansai University, 3-3-35, Yamate-cho, Suita, Osaka 564-8680

**Jyouko Applied Optics Laboratory, 2-32-1, Izumigaoka, Munakata, Fukuoka 811-4142

Speckle interferometry is a useful deformation measurement method concerning objects with rough surfaces. The method using only two speckle patterns before and after a deformation has been proposed in ESPI by using Fourier transform. Some three-dimensional deformation measurement methods based on speckle interferometry have been proposed. However, the sensitivities of conventional methods in directions of three axes are not generally same. In this paper, a new method of which sensitivities in three directions are same is proposed. The new method employed a spatial frequency multiplexing technique that permits simultaneous recording of all the components of three-dimensional deformation with only one camera. The validity of novel method is confirmed by experimental results concerning an in-plane and an out-of-plane deformation.

Key words: speckle interferometry, ESPI, sensitivity, high resolution, Fourier transform, multi-recording

1. はじめに

レーザー光のような干渉性の強い光を粗面に照射すると、散乱光同士が互いに干渉し合い、さらに、有限開口を通して観測すると有限開口径に依存した大きさをもつスペックル¹⁾が観察される。このスペックルには、散乱光同士が干渉し合う際のそれぞれの散乱光の光路長が位相情報として記録されている。この位相情報を用いると、物体の変形計測が可能となるため、スペックル干渉計測法として利用されている²⁻⁴⁾。このスペックル干渉計測法は粗面をもつ物体の変形計測法として有効であり、現在、さまざまな分野で高分解能な変形計測法として利用されている⁵⁾。

このスペックル干渉計測法はTV技術の導入によりESPI (electronic speckle pattern interferometry) へと発展し¹⁾、縞走査技術²⁾の導入による高分解能化が進むとともに、

二光束干渉光学系を用いることによって、現在では面内変形計測も可能となっている^{6,7)}。さらに、複数の二光束干渉計を組み合わせることによって、三次元変形計測も実現され、高速度カメラを用いた新たな測定技術も報告されるに至っている⁸⁻¹³⁾。

スペックルパターンの強度分布には3つの未知数があることにより、縞解析技術を用いたスペックル干渉計測法の高分解能化を目指すためには、一般に、少なくとも3枚のスペックルパターンが必要になる⁶⁾。また、3枚のスペックルパターンに含まれる変形情報が記録された各スペックルは、変形過程でその形状を変えると同時に、スペックルパターン内を移動することが知られている。この現象において、たとえスペックルが移動するとしても、3枚のスペックルパターン間で位相の抽出などの演算が行われる場合には、変形情報が記録された変形前後の各対応するス

* E-mail: arai@kansai-u.ac.jp

ペックルは、部分的にでも空間的に重なり合っている必要がある¹⁴⁾。しかし、大変形計測では、変形によるスペックルの移動に伴い、3枚のスペックルパターン間でスペックルが重なり合わない状況が日常的に発生する。この問題の解消のために、2台のカメラを用い、それぞれのカメラで得られたスペックルパターン間での演算を行うスペックル干渉光学系¹⁵⁾、さらに、軸外しデジタルホログラフィーの考え方に基づく新たなスペックル干渉計測光学系^{14, 16-18)}が提案され、高分解能な変形前後の2枚のスペックルパターンのみを用いた変形解析が現在では可能となっている。

加えて、この2枚のスペックルパターンのみを用いて解析が可能なスペックル干渉光学系を基礎とした技術と二光束スペックル干渉計測法の技術を融合すると、面内・面外同時変形計測が高い分解能のもとに実施可能となっている¹⁹⁾。

ところが、このような光学系は、二光束干渉光学系の考え方に基づく技術であるために、面内変形計測技術の測定感度と面外変形計測技術の感度とが本来異なっている。そのために、三次元変形計測の実施は可能であっても、その測定感度は必ずしも一致しない⁸⁻¹¹⁾。測定感度が各軸で異なる問題は、各軸方向の不確かさが異なることにつながり、測定対象の測定時の設置の方向に依存した測定結果となり、必ずしも信頼のおける三次元計測とはならないという問題をもっている。

この問題に対して、本研究では、軸外しデジタルホログラフィーの考え方に基づく新たなスペックル干渉計¹⁴⁾を三次元に組み合わせ、配置することによって、三次元各軸方向の感度が同一となる粗面をもつ物体の三次元変形計測光学系を提案する。

新たに提案されたスペックル干渉計測技術に基づく三次元変形計測光学系が、高い分解能をもつ三次元の各軸方向の感度が同一である三次元変形計測光学系であることを、原理確認実験において確認している。

2. 2枚のスペックルパターンのみによるスペックル変形計測法^{17, 20)}

軸外しデジタルホログラフィーで一般に行われているように、参照光を平面波とし、さらに、物体光と角度をもたせて干渉させる Fig. 1 (a) に示す光学系で採取された Fig. 1 (b) に示すようなスペックルパターンの強度分布は、式 (1) で表すことができる²⁰⁾。

この場合、Fig. 1 (c) に示すこの強度分布のフーリエ変換結果は、式 (2) として示すことができる。さらに、スペックルに記録されている信号成分である $c(x, y) \exp$

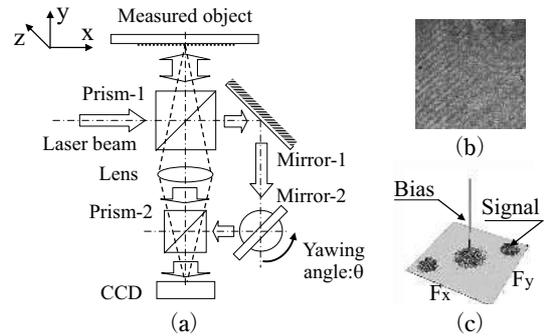


Fig. 1 Speckle interferometer which can analyze deformation by using only two speckle patterns before and after a deformation. (a) Optical system, (b) speckle pattern, (c) speckle pattern in frequency domain.

$(2\pi i f_0 x)$ をバイアス成分から分離抽出し、逆フーリエ変換をすると、式 (3) に示すような強度分布の実部と虚部成分を得ることができる。

$$I(x, y) = a(x, y) + c(x, y) \exp(2\pi i f_0 x) + c(x, y)^* \exp(-2\pi i f_0 x) \quad (1)$$

ここで、 $a(x, y)$ はバイアス成分、振幅成分 $b(x, y)$ に対して $c(x, y) = (1/2) b(x, y) \exp(i\phi(x, y))$ であり、* は共役な複素数を表している。さらに $\phi(x, y)$ は信号の位相成分である。

$$F[I(f, y)] = A(f, y) + C(f - f_0, y) + C^*(f + f_0, y) \quad (2)$$

f は x 方向の空間周波数を表す。

$$\begin{aligned} I_{\text{spIR}}(x, y) &= \text{Re}[c(x, y) \exp(2\pi i f_0 x)] \\ &= \text{Re}[(1/2) b(x, y) \exp(2\pi i f_0 x + i\phi(x, y))] \\ &= (1/2) b(x, y) \cos(2\pi f_0 x + \phi(x, y)) \end{aligned} \quad (3-1)$$

$$\begin{aligned} I_{\text{spII}}(x, y) &= \text{Im}[c(x, y) \exp(2\pi i f_0 x)] \\ &= \text{Im}[(1/2) b(x, y) \exp(2\pi i f_0 x + i\phi(x, y))] \\ &= (1/2) b(x, y) \sin(2\pi f_0 x + \phi(x, y)) \end{aligned} \quad (3-2)$$

このように、スペックルパターンから周波数領域において、信号成分を式 (3) のようにバイアスを含まない正弦波成分と余弦波成分として分離することができる。この結果、未知数の数が2つとして扱うことのできるスペックルパターンの強度分布を得ることができる。

一般に、スペックル変形計測においては、変形前後のスペックルパターンの位相分布を直接求め、変形前後のスペックルパターンの位相分布間の差より変形量を求める“difference of phase method”と、変形量に関する縞画像(スペックルグラム)を一度求めることによって、周波数領域でスペックルノイズ成分と信号成分とを分離したのちに変形に関する縞画像を解析することにより高い測定精度が期待できる“phase of difference method”という考え方が¹⁶⁻²⁵⁾ある。

本研究では、フィルタリング技術を用いることによって、高い測定精度が期待できる“phase of difference method”に基づく、2枚のスペックルパターンのみによる位相解析を実現している¹⁶⁻¹⁹⁾。

変形前のスペックルパターンへの演算と同様に処理することによって、変形後のスペックルパターンからバイアスを含まない正弦波成分と余弦波成分を式(4)として求めることができる。

$$I_{sp2R}(x, y) = (1/2) b(x, y) \cos(2\pi f_0 x + \phi(x, y) + \Delta\phi(x, y)) \quad (4-1)$$

$$I_{sp2I}(x, y) = (1/2) b(x, y) \sin(2\pi f_0 x + \phi(x, y) + \Delta\phi(x, y)) \quad (4-2)$$

この演算過程において“phase of difference method”に基づき変形情報をもつスペックルグラムを求めるにあたって、ヘテロダインの考え方に基いて式(3-1)の実部と式(4-1)の実部の積を式(5)として求め、変形情報の余弦成分をもつ画像を抽出している。

$$\begin{aligned} SG_1(x, y) &= b(x, y)^2 [\cos(2\pi f_0 x + \phi(x, y)) \\ &\quad \times \cos(2\pi f_0 x + \phi(x, y) + \Delta\phi(x, y))] \\ &= (1/2) b(x, y)^2 [\cos(4\pi f_0 x + 2\phi(x, y) + \Delta\phi(x, y)) \\ &\quad + \cos(\Delta\phi(x, y))] \end{aligned} \quad (5)$$

同様に、式(3-2)ならびに式(4-1)を用いることによって、式(5)とは位相が異なる正弦波成分をもつスペックルグラムを式(6)として求めている。

$$\begin{aligned} SG_2(x, y) &= b(x, y)^2 [\sin(2\pi f_0 x + \phi(x, y)) \\ &\quad \times \cos(2\pi f_0 x + \phi(x, y) + \Delta\phi(x, y))] \\ &= (1/2) b(x, y)^2 [\sin(4\pi f_0 x + 2\phi(x, y) + \Delta\phi(x, y)) \\ &\quad + \sin(\Delta\phi(x, y))] \end{aligned} \quad (6)$$

さらに、式(5)、(6)に示すようなスペックルグラムからスペックルノイズに伴うランダム成分によるノイズ成分をフィルタリング技術によって除去すると、式(7)、(8)に示す $\cos(\Delta\phi(x, y))$ ならびに $\sin(\Delta\phi(x, y))$ の変形量 $\Delta\phi(x, y)$ に関する正弦・余弦成分を抽出することができる。この処理は、“phase of difference method”に基づく縞解析が、本手法において実施されているからこそ行うことができるものである。

$$SG_1(x, y) = b(x, y)^2 \cos(\Delta\phi(x, y)) \quad (7)$$

$$SG_2(x, y) = b(x, y)^2 \sin(\Delta\phi(x, y)) \quad (8)$$

この式(7)、(8)の比を求め、逆正接関数を用いることによって、式(9)に示すように変形量 $\Delta\phi(x, y)$ を求める。

$$\Delta\phi(x, y) = \tan^{-1} [b(x, y)^2 \cos(\Delta\phi(x, y)) / b(x, y)^2 \sin(\Delta\phi(x, y))] \quad (9)$$

このように、スペックルパターンに含まれるノイズ成分

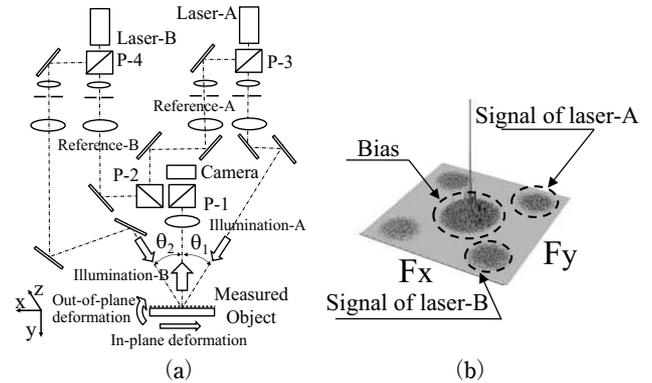


Fig. 2 Speckle interferometer in-plane and out-of-plane deformation measurement. (a) Speckle interferometer in-plane and out-of-plane deformation measurement, (b) deformation signals in frequency domain.

がフィルタリング技術に基づき除去され、その結果、高い分解能で変形前後の2枚のスペックルパターンのみを用いた高分解能変形解析が実現可能となる。

この技術を用いて二光束スペックル干渉計の考え方に従い、2台のカメラによる光学系が面内・面外同時変形計測が可能な光学系として構築されている¹⁹⁾。しかし、この光学系では2台のカメラの光軸合わせ、2台のカメラのレンズ倍率合わせ、さらに、最も重要な問題としてカメラが物体の両サイド斜めから画像を採取することになるために、採取された画像の縦横比が一对一ではなくするという問題が発生し、実用時の障害となっている¹⁹⁾。

そこで、さらにFig. 2(a)に示すような1台のカメラによって、Fig. 2(b)に示すように周波数領域において2方向からの信号分離が可能な多重記録法をスペックル干渉計測技術において確立している。そして、この技術に基づく面内・面外変形の同時計測が可能な光学系もまた提案されている²⁶⁾。しかし、この光学系においても、二光束干渉計測法の考え方に従った解析が行われているために、面内・面外各成分における変形に対する測定感度が一致しない問題の解決には至っていない。

3. 三軸方向の変形計測が同一の測定感度で実施可能な三次元スペックル干渉計

本研究では、二光束干渉計測法の測定原理に基づいて三次元変形計測を行うのではなく、三次元変形計測を行うために、三次元それぞれに上記の軸外レディジタルホログラフイーの考え方²⁷⁾に従ったスペックル干渉計¹⁷⁾を3セット組み込んだ光学系を提案する。さらに、この新たな光学系では、1台のカメラで情報収集を行うことによって、測定結果の縦横比が一对一になるように配慮され、加えて三

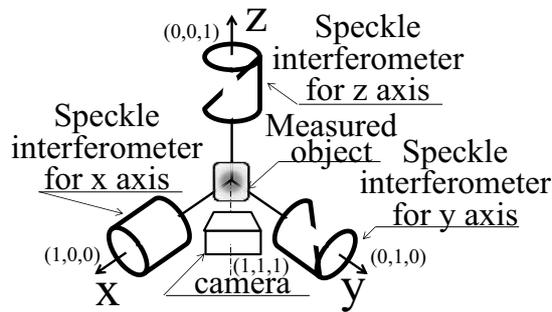


Fig. 3 Concept of proposed optical system.

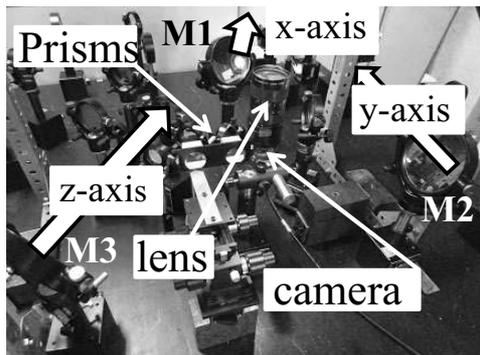


Fig. 4 Three axes and camera in optical system.

次元変形計測が、三次元それぞれの方向で測定感度が同一となるように構成されている。さらに、前章に示した解析技術を用いることにより、各軸の光学系において変形前後の2枚のスペックルパターンのみを用いた高分解能な変形解析が実現されている。提案する光学系の光学配置モデルを Fig. 3 に示す。

x 軸 $(1, 0, 0)$, y 軸 $(0, 1, 0)$, z 軸 $(0, 0, 1)$ に対して、カメラの光軸は $(1, 1, 1)$ 方向に設定され、 x, y, z 軸方向それぞれにスペックル干渉計が配置された構造となっている。Fig. 4 には実際の三軸方向ならびにカメラ部分の光学配置を示す。

本光学系では、3 台のレーザー光源 (波長 532 nm) が用いられ、カメラレンズの光軸は定盤に垂直に設置され、測定対象は定盤より 4 本の柱に支えられた上空に設置される構成がとられている。また、この測定対象に向かって、Fig. 5 に示すように M1, M2, M3 のミラーより x, y, z 軸に平行に測定対象への照明光がそれぞれ照射され、三次元座標の原点近傍が測定領域となっている。さらに、カメラには、ミラーによってプリズムを経由した x, y, z 軸それぞれに対する参照光を導入している。これらの参照光は、Fig. 6 に示すように 3 個のプリズムを組み合わせた光学素子によって画像素子に誘導されている。

光学系全体の光学配置を Fig. 7 に示す。参照光は、Fig. 7

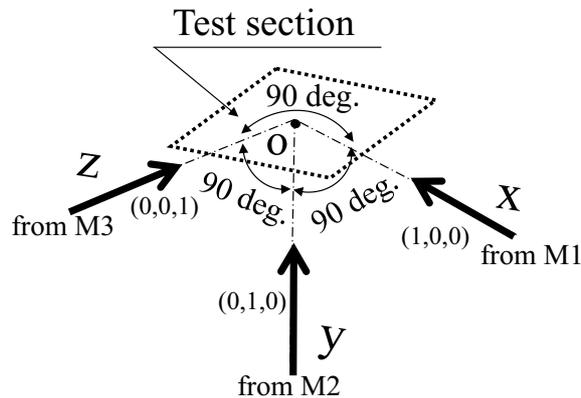


Fig. 5 Measuring area constructed by x - y - z axes.

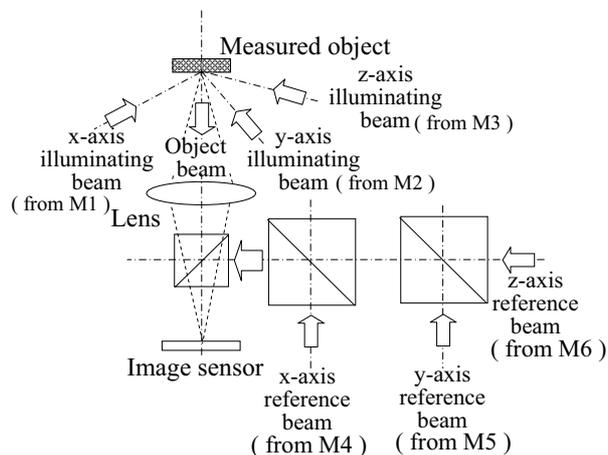


Fig. 6 Relationship between the object beam and three reference beams in optical system.

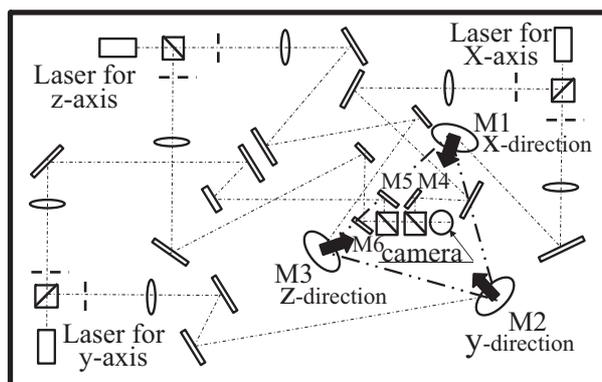


Fig. 7 Proposed optical system.

に示すように、M4, M5, M6 のミラーの角度を設定することによって、それぞれの波面に x, y, z 軸方向のそれぞれの信号に異なったキャリア成分を付加している。この結果、1 台のカメラによって撮像されたスペックルパターンをフーリエ変換すると、周波数領域において x, y, z 軸方向の各成分を分離することにより、三軸方向の変形情報を得

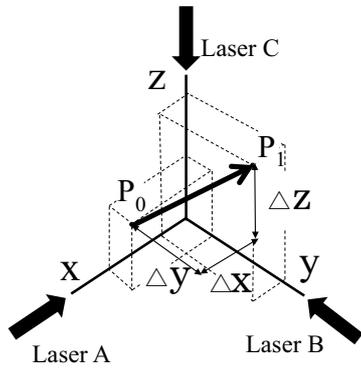
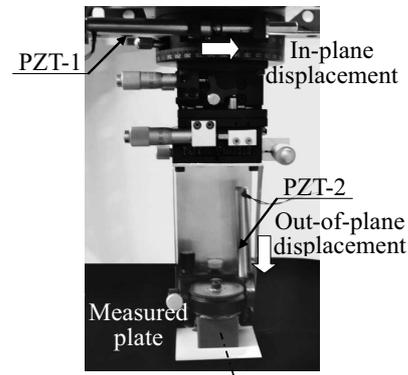


Fig. 8 Analysis of deformation.

る多重情報記録が可能となっている。

この光学系を用いて、(1, 1, 1) 方向からとらえたカメラにおける x, y, z 方向の変形に伴う光路長に関する位相の変化を ϕ_x, ϕ_y, ϕ_z とすると、Fig. 8 に示すように、変形に伴い点 P_0 が点 P_1 へ移動した場合には、 x 方向の光路長の変化(位相変化量) ϕ_x は x 方向から入射し、測定対象に至るまでに Δx だけ光路長が長くなるとともに、 x 軸のベクトル $(1, 0, 0)$ とカメラの光軸 $(1, 1, 1)$ 方向との関係より、測定対象から散乱した光の光路長はさらに $\Delta x/\sqrt{3}$ だけ長くなる。 y 軸、 z 軸も同様に考えることができるので、それぞれの軸に対して $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ だけ変形した場合のそれぞれ



Axis of rotation of object for producing out-of-plane displacement

Fig. 9 Measured object for generating precise displacements.

の方向における光路長変化は、光源波長を 532 nm とすると、式 (10) のように表すことができる。

$$\begin{aligned} \phi_x &= 2\pi/532\{\Delta x(1+1/\sqrt{3})+\Delta y/\sqrt{3}+\Delta z/\sqrt{3}\} \\ \phi_y &= 2\pi/532\{\Delta x/\sqrt{3}+\Delta y(1+1/\sqrt{3})+\Delta z/\sqrt{3}\} \\ \phi_z &= 2\pi/532\{\Delta x/\sqrt{3}+\Delta y/\sqrt{3}+\Delta z(1+1/\sqrt{3})\} \end{aligned} \quad (10)$$

この結果、 x, y, z 方向のそれぞれの変化量 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ は、各軸方向で測定された光路長の変化を用いることにより、式 (11) として求めることができる。

$$\begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix} = 532/2\pi \begin{pmatrix} (2+\sqrt{3})/(3+\sqrt{3}) & -1/(3+\sqrt{3}) & -1/(3+\sqrt{3}) \\ -1/(3+\sqrt{3}) & (2+\sqrt{3})/(3+\sqrt{3}) & -1/(3+\sqrt{3}) \\ -1/(3+\sqrt{3}) & -1/(3+\sqrt{3}) & (2+\sqrt{3})/(3+\sqrt{3}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \phi_x \\ \phi_y \\ \phi_z \end{pmatrix} \quad (11)$$

この際、同じ感度でそれぞれのスペックル干渉計において求められた位相分布 ϕ_x, ϕ_y, ϕ_z に対して、式 (11) が示すように $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ すべてにおいて同じ対角要素をもつことから、すべての方向において測定感度が等しい計測がなされることになる。

さらに、トータルの三次元変形量を式 (12) によって求めることができる。

$$\Delta_{\text{total}} = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2} \quad (12)$$

4. 実験結果

波長 532 nm のレーザーを 3 台使い、 x, y, z 軸をミラー M1, M2, M3 を調整することによって Fig. 7 に示すように光学系を設定した。この光軸合わせを行うために、現状では、 x, y, z 各方向ならびにカメラの光軸を立体的に設定するための治具を用いている。

さらに、本研究においては、Fig. 9 に示すように、PZT-1 によって水平面内で測定対象としての白くペイントされた平板に任意の面内変位を回転させることによって変位分布を与えることが可能な、そして PZT-2 を使い、測定対象を水平軸に対して回転させることによって面外変位を与えることができる測定対象をカメラ上空に設置し、任意の変位分布を与えた場合の測定結果を用いて、提案する光学系の有効性を検証している。本研究で提案する手法は、本来変形を測定する技術である。しかし、変形特性を検証するためには、容易に解析可能な変形が再現性よく発生する測定対象を必要とする。その場合、測定対象内の固定条件、構造解析を厳密に行わなければならない。本研究では測定対象として容易に発生させることができ、かつ容易に解析が可能な変位分布を、変形分布に置き換えて利用することによって、提案手法の検証を行っている。

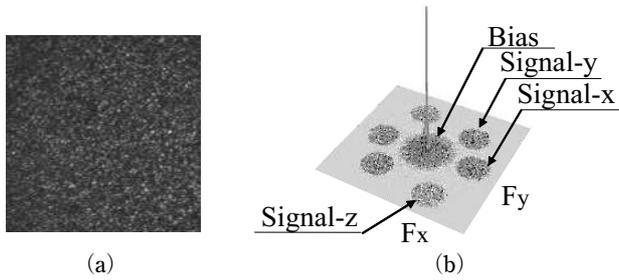


Fig. 10 Speckle pattern and signals in frequency domain. (a) Speckle pattern grabbed by this optical system, (b) signals of displacement in frequency domain.

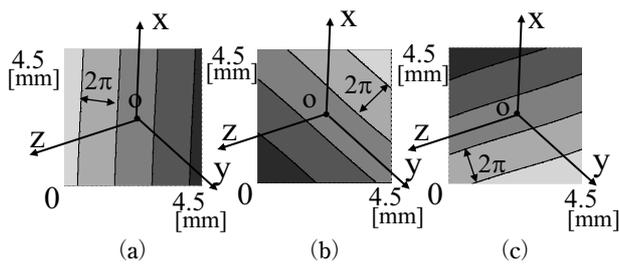


Fig. 11 Distribution of optical path distance by in-plane displacement. (a) x direction, (b) y direction, (c) z direction.

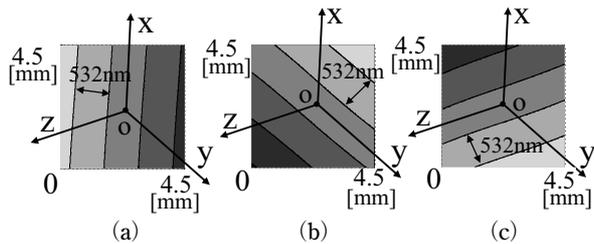


Fig. 12 Distribution of displacement in x - y - z axes.

本光学系で採取された Fig. 10 (a) に示すスペックルパターンをフーリエ変換すると、Fig. 10 (b) に示すように参照光の入射角の違いを用いて発生させたキャリアー偏信号によって、周波数領域において x , y , z 方向の信号の分離が可能となっている。

この x , y , z 方向の信号をそれぞれ二次元フィルターによって抽出し、前章に示したように処理すると、 x , y , z 方向それぞれの軸方向における光路長変化（位相変化）を求めることができる。

4.1 面内変位測定結果

面内変位を Fig. 9 に示す変位発生装置によって発生させ、その場合の各軸における光路長変化の測定結果を Fig. 11 に示す。 x , y , z それぞれの方向における面内変位は、 x , y , z 方向に沿って、同程度の光路長の変化が検出されていることがわかる。この結果を式 (11) に代入することによって、 x , y , z 各軸における変位量を求めたものが

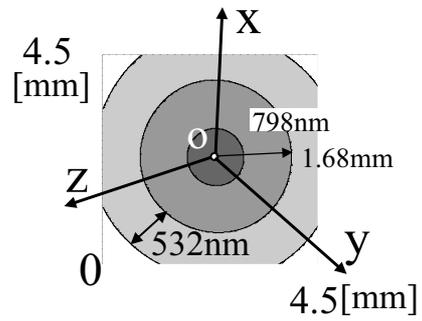


Fig. 13 Resultant displacement of x - y - z axes.

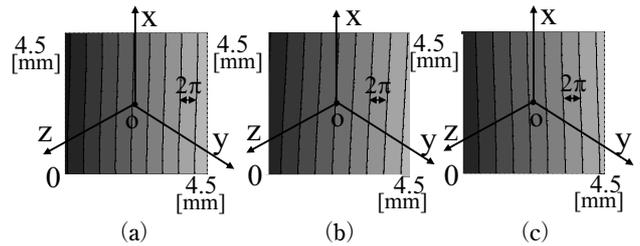


Fig. 14 Distribution of optical path distance by out-of-plane displacement. (a) x direction, (b) y direction, (c) z direction.

Fig. 12 である。この場合、面内変位のみが与えられているので、測定対象からの散乱光における新たな光路長変化がないことより、Fig. 11 に示す光路長変化と同じパターンの変位量が各軸において確認できる。

さらに、Fig. 12 に示す各軸方向の変位量からトータルの変形量を式 (12) によって求めたものが、Fig. 13 である。変位発生装置の面内変位における回転中心 o を中心に、同心円状の面内変位が発生していることがわかる。

Fig. 9 において、回転半径 50 mm の位置で $24 \mu\text{m}$ の変位量が PZT-1 に示す圧電素子によって与えられていることより、回転中心 o を中心とした面内変位の回転角は、 $\arctan(0.024/50)$ rad として与えられていることになる。Fig. 13 において、回転中心 o から 1.68 mm 離れた地点で 798 nm の変化が観察されている。ここで、 $\arctan(0.024/50) \times 1.68 = 806 \text{ nm}$ であることより、1.68 mm において 798 nm として測定された面内変位量は高精度に測定されているものと考えられる。

4.2 面外変位測定結果

Fig. 14 に、 x 軸方向に面外変位発生装置の回転軸方向を合わせた場合の面外変位による光路長変化の、各軸方向における測定結果を示す。この場合には、 x 軸方向に変位の回転軸を設定しているため、 x 軸に対して左側が PZT-2 によって押し付けられていることより、軸の左側の光路長が短くなっていることが確認できる。また、 y , z 軸方向から得られた光路長変化も、 x 軸方向と同様にそれぞれの軸の

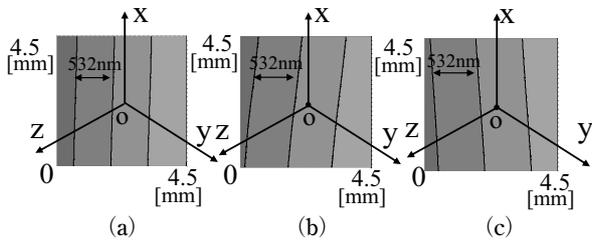


Fig. 15 Distribution of displacement in x - y - z axes. (a) x direction, (b) y direction, (c) z direction.

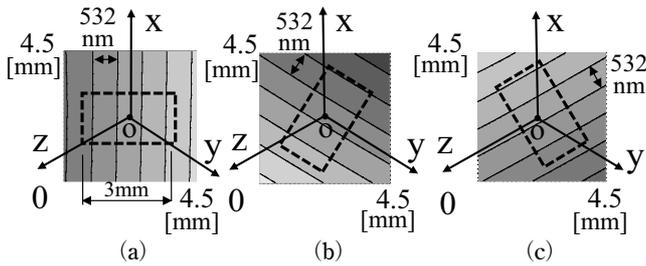


Fig. 16 Resultant displacement of x - y - z axes in out-of-plane displacement. (a) x direction, (b) y direction, (c) z direction.

左側が短くなるような光路長変化が観察できる。この結果を式 (11) に代入することによって、 x , y , z 各軸に対する変位量を求めた結果が Fig. 15 である。 x 軸に対称に面外変位が発生していることがわかる。この場合、面外変位の測定であることより、測定面からの散乱光の光路長も変化する。その結果、面内変位の場合とは異なり、Fig. 14 に示した光路長変化に比べて実際の変位量は小さなものであることがわかる。Fig. 15 に示す結果を式 (12) に代入することによって、トータルの変位量を求めた結果が Fig. 16 (a) である。 x 軸に対称に変位が発生していることがわかる。この場合の、測定結果における実際に与えた面外変位との差の分布を Fig. 17 に示す。差の分布のばらつきを標準偏差として求めると 2.5 nm であることより、光学系で用いているレーザー光源波長の約 200 分の 1 以上の高い分解能で測定がなされていることが確認できる。

ここで、Fig. 16 (a) の破線で示した領域を考えると、長さ 3.0 mm において約 3.5 縞の変位が確認できる。すなわち、3.0 mm において約 $1.86 \mu\text{m}$ ($532 \times 3.5 = 1862 \text{ nm}$) 変位していることになるので、1 mm では約 620 nm だけ変位していることになる。この結果は、実際の変位量が PZT-2 を用いて、1 mm 当たり 610 nm の変位が与えられていることによく対応した結果となっている。このことより、本光学系が高い分解能で面外変位を計測可能であることがわかる。

さらに、 y 軸方向ならびに z 軸方向に測定対象としての

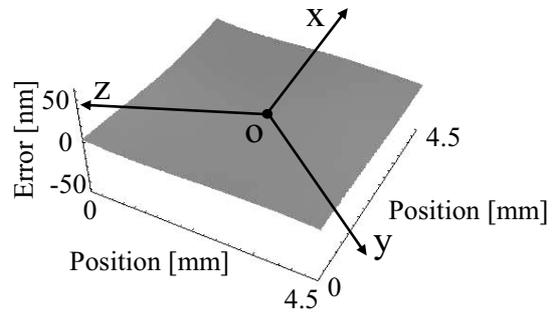


Fig. 17 Distribution of error of x -direction resultant displacement shown in Fig. 16 (a).

白くペイントされたプレートの面外変位の回転軸をそれぞれ設定し、 x 軸と同じ変位量を PZT-2 によって与えたときのトータルの変位量を示したものが、Fig. 16 (b) ならびに (c) である。それぞれの場合に、それぞれの軸に対称に変位が測定されていることがわかる。さらに、それぞれの結果においても x 軸と同様に設定された破線で示す領域を観察すると、すべて 3.5 縞程度の変位が検出されていることがわかる。したがって、本測定システムが x , y , z 軸それぞれの方向に同じ測定感度をもっていることが確認できる。

以上の結果より、本研究において提案した光学系は、高い分解能をもつとともに、 x , y , z 軸に同じ測定感度をもつ三次元変形計測が可能な測定システムであることがわかる。

5. おわりに

本研究では、粗面をもつ物体の変形測定に広く利用されているスペックル干渉計測法を用いた、高分解能三次元変形計測のための新しい光学系を提案した。

従来よりスペックル干渉計測法を用いたいくつかの高分解能三次元変形計測法は提案されているものの、それらの光学系は三次元座標における三軸の測定感度が必ずしも同一ではないという問題を抱えていた。

特に本研究では、軸外しデジタルホログラフィーで一般に用いられる 1 台のカメラによる多重記録技術をスペックル干渉計測法に導入することにより、変形前後の 2 枚のスペックルパターンのみを用いた三次元の三軸方向の測定感度がすべて同じになる変形前後の 2 枚のスペックルパターンのみを用いた新しい光学系を提案した。

原理確認実験において、面内変位計測ならびに面外変位計測を行い、三軸方向の測定感度が等しくそろえられていることを確認するとともに、高分解能に測定が可能であることを示した。

文 献

- 1) G. Cloud: *Optical Methods of Engineering Analysis* (Cambridge University Press, New York, 1995) pp. 395-476.
- 2) D. Malacara: *Optical Shop Testing* (John Wiley & Sons, New York, 1992) pp. 1-50, pp. 501-652.
- 3) R. S. Sirohi: *Speckle Metrology* (Marcel Dekker, New York, 1993) pp. 99-234.
- 4) D. W. Robinson and G. T. Reid: *Interferogram Analysis* (Inst. of Phys. Pub., Bristol, 1993) pp. 58-70, pp. 141-193.
- 5) B. J. Thompson: *Selected Papers on Electronic Speckle Pattern Interferometry Principles and Practice* (SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, 1996) pp. 1-518.
- 6) 新井泰彦, 藤本雅大, 横関俊介: 光学, **31** (2002) 562-567.
- 7) Y. Arai and S. Yokozeki: *Opt. Eng.*, **43** (2004) 2168-2174.
- 8) E. B. Flynn, L. C. Bassman, T. P. Smith, Z. Lalji, L. H. Fullerton, T. C. Leung, S. R. Greenfield, and A. C. Koskelo: *Appl. Opt.*, **45** (2006) 3218-3225.
- 9) S. Schedin, G. Pedrini, H. J. Tiziani and F. M. Santoyo: *Appl. Opt.*, **38** (1999) 7056-7062.
- 10) T. Takatsuji, B. F. Oreb, D. I. Farrant and J. R. Tyrer: *Appl. Opt.*, **36** (1997) 1438-1445.
- 11) A. Martinez, J. A. Rayas, R. Rodriguez-Vera and H. j. Puga: *Appl. Opt.*, **24** (2004) 4652-4658.
- 12) C. Joenathan, B. Franze, P. Haible and H. J. Tiziani: *J. Mod. Opt.*, **45** (1998) 1975-1984.
- 13) C. Joenathan, B. Franze, P. Haible and H. J. Tiziani: *Appl. Opt.*, **37** (1998) 2608-2614.
- 14) Y. Arai: *Mod. Opt.*, **61** (2014) 297-306.
- 15) Y. Arai, H. Hirai and S. Yokozeki: *J. Mod. Opt.*, **55** (2008) 281-296.
- 16) 新井泰彦, 井上拓也, 荒井義和, 横関俊介: 光学, **41** (2012) 96-104.
- 17) 新井泰彦, 横関俊介: 光学, **42** (2013) 256-265.
- 18) Y. Arai: *Opt. Eng.*, **53** (2014) 034107.
- 19) Y. Arai: *Opt. Eng.*, **54** (2015) 024102.
- 20) M. Takeda, H. Ina and S. Kobayashi: *J. Opt. Soc. Am.*, **72** (1982) 156-160.
- 21) B. Bhaduri, N. K. Mohan, M. P. Kothiyal and R. S. Sirohi: *Opt. Exp.*, **14** (2006) 11598-11607.
- 22) B. Bhaduri, N. K. Mohan and M. P. Kothiyal: *J. Mod. Opt.*, **55** (2008) 861-876.
- 23) R. S. Sirohi, N. K. Mohan and T. Santhanakrishnan: *Opt. Lett.*, **21** (1996) 1958-1959.
- 24) R. S. Sirohi, J. Burke, H. Helmers and K. D. Hinsch: *Appl. Opt.*, **23** (1997) 5787-5791.
- 25) J. Burke, H. Helmers, C. Kunze and V. Wilkens: *Opt. Comm.*, **152** (1998) 144-152.
- 26) Y. Arai: *Proc. SPIE*, **9489** (2015) 9489-14.
- 27) N. Pavillon, S. C. Seelamantula, J. Kuhn, M. Unser and C. Depeursinge: *Appl. Opt.*, **48** (2009) H186-H195.