

2枚のスペックルパターンのみを用いた高分解能電子 スペックル干渉計測法

新井 泰彦*・井上 拓也*・荒井 義和*・横関 俊介**

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

**常光応用光学研究所 〒811-4142 宗像市泉が丘 2-32-1

High Resolution Electronic Speckle Pattern Interferometry by Using Only Two Speckle Patterns

Yasuhiko ARAI*, Takuya INOUE*, Yoshikazu ARAI* and Shunsuke YOKOZEKI**

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

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

Electronic speckle pattern interferometry (ESPI) is a useful deformation measurement method. In this paper, new method that can measure the deformation by limited information without using much higher speed cameras is proposed. The optical system that can record some spatial information into each speckle of speckle pattern is set up by using basic characteristics of speckle that has never been used before. The out-of-plane deformation measurement by using only two speckle patterns before and after the deformation can be realized. In experimental results, it is confirmed that the resolution-power of new method is equivalent to that of ordinary method.

Key words: ESPI, high resolution, deformation measurement, high speed processing

1. はじめに

レーザー光源のような干渉性の強い光波が粗面に照射されると、粗面において散乱した光同士が複雑に干渉し合い、スペックルパターンが得られる。このスペックルパターンには、測定対象の粗面からの散乱光の位相情報が強度分布として記録されている。この情報を用いることにより、粗面の変形計測を行うことができる¹⁻⁵⁾。

1960年代に、この現象を用いて開発されたスペックル干渉計測技術は、TVカメラを利用した電子スペックル干渉計測 (ESPI: electronic speckle pattern interferometry) へと発展した¹⁻⁵⁾。1980年代後半には、縞走査技術^{1,5-7)}を導入することにより、光源波長の100分の1程度の高分解能な変形計測が行われるに至っている⁴⁾。1990年代には、高速度カメラを利用した temporal carrier 技術に基づく変形解析法^{8,9)}が報告され、さらに、この手法は二次元処理に拡張され、バーチャルスペックルパターンを用いた高分解能な縞解析法¹⁰⁻¹²⁾による動的変形計測へと発展している。加えて、高分解能かつ動的変形計測、大変形計測の実現のために、特殊な光学系を利用する手法¹³⁾などさまざま

な計測技術が現在までに、スペックル干渉計測の分野では開発されている⁴⁾。

スペックル干渉計測では、測定対象の変形が進むに従い、変形に伴う位相情報を保持するスペックルそのものが、その形状のみならず位置さえも変化する性質をもっている。そして、測定対象の変形前後で対応するスペックルが重なり合わなければ、変形に伴う縞情報を抽出することができないという問題がある。このために、大変形を伴う変形計測においては、スペックルが変形また移動する性質は重大な問題である¹⁻⁴⁾。

測定対象が変形しているにもかかわらず、スペックルとしての位相情報が変化しない、いわゆる unsolved speckle の存在は、スペックル干渉計測にとってさらなる問題となっている^{10,14)}。測定対象の変形スピードが高まり、変形量が増加すると、従来行われていた縞走査技術^{1,5-7)}による、少なくとも3枚以上のスペックルパターンを用いた縞解析を行うためには、より高速な画像採取が可能な高速度カメラが必要となる。しかし、そのような高速度カメラの使用には、物理的に限界がある。このような状況の回避の

ためには、縞解析時に用いるスペックルパターンの枚数を少なくする、またより高速なスペックルパターンの採取を必要としない、新たな解析法の開発が求められる。

一般に、スペックル干渉計測においては、変形前後の2枚のスペックルパターンを用いて変形に伴うスペックルグラムを演算し、変形に関する縞画像を得て、その縞画像の位相分布を求める手法^{1-4, 10-13)}が用いられる。また、各スペックルパターンそのものの位相分布を直接解析し、変形前後の位相を検出した後に、その差を演算することによって変形情報を得る手法が用いられている¹⁵⁻¹⁹⁾。いずれの手法を用いるとしても、変形前後の情報を得るためには、少なくとも2枚のスペックルパターンが必要である。

1970年代初頭、ダブル開口を用いるシアリング技術をもとにした、スペックルに空間情報を付与することのできるスペックル干渉計測技術が報告²⁰⁾されている。この技術は、Sirohiらのグループによって、スペックルグラムの空間的な縞情報を用いた縞増加¹⁵⁾へと改良され、さらに、積極的にシアリング技術を用いた空間的縞解析技術¹⁵⁻¹⁹⁾へと発展している。この技術を用いると、2枚のスペックルパターンのみによる縞解析が可能となる。

これらの処理に用いる基本的な光学系は、スペックル干渉計測の原理にシアリング干渉技術をたくみに導入したDuffyによるダブル開口を用いた光学系²⁰⁾、あるいはBurkeらによるファイバー等を用いた光学系¹⁷⁾である。しかし、これらの光学系は、シアリング干渉技術を基礎としたものであるため、光学素子の正確な製作・設置など取り扱いが煩雑なものである。さらに、空間的縞解析技術⁵⁻⁷⁾でスペックルパターンの位相を直接求める手法が用いられているために、ノイズの影響を強く受けるものであり、スペックルパターンの強度分布がもつバイアス成分、振幅成分等の空間的なばらつきによる測定結果への影響が問題として潜在し、その影響についての議論¹⁹⁾がなされている。

本研究では、Duffyによるシアリング干渉計測を基礎とした技術²⁰⁾を用いることなく、光波干渉計測の基本的な技術¹⁾である物体光と参照光との両波面の傾き角を用いることにより、スペックルパターン内のスペックルに空間情報を付与する新しいスペックル干渉光学系を提案している。この光学系では、Duffyの光学系におけるダブル開口の開口径の設定、ダブル開口間距離の正確な設定等の煩雑な問題を生じることなく、波面の交差角を1枚のミラーの傾き角を制御することによって、スペックルグラム内の位相シフト量に関する空間情報を設定可能としている。さらに、この空間情報を円滑に用いるために、スペックルパターンの横ずらしを用いたスペックルグラム演算時の強度

分布の振幅に関する対称性が利用され、従来問題とされていたスペックルグラムの強度分布におけるバイアス成分、振幅成分などがもつノイズ成分の測定精度への影響¹⁹⁾を解消している。

このような従来利用されていなかったスペックルパターンの性質を有効に利用することによって、簡易な光学系を用いた2枚のスペックルパターンのみによる縞解析法を、本研究では確立している。

本報では、粗面をもつ平面の回転に伴う面外変形計測に関する原理確認実験を行い、新しいスペックル干渉技術の有効性を検証している。実験結果は、新しい解析技術は、提案する簡易な光学系によって、3枚以上のスペックルパターンを用いなければならなかった従来法^{21, 22)}と変わらない、高い分解能を有する縞解析を、2枚のスペックルパターンのみを用いた縞解析法で実施可能なことを示している。

2. 測定原理

2.1 スペックルグラムの強度分布

Fig. 1に示すスペックル干渉光学系において、(a)に示すように光源の光軸に垂直な粗面-2を参照面として利用し、粗面-1を測定対象として回転させたときに発生する面外変位を測定する場合、変形前後に採取したスペクトルパターン S_0 と S_1 の強度分布は、それぞれ式(1)、式(2)として表すことができる^{5, 10, 19)}。

$$I_{S_0}(x, y) = A_0(x, y) + B_0(x, y) \cos(\phi_0(x, y)) \quad (1)$$

$$I_{S_1}(x, y) = A_1(x, y) + B_1(x, y) \cos(\phi_1(x, y) + \Delta\phi(x, y)) \quad (2)$$

ここで、 $A_m(x, y)$, $B_m(x, y)$, $\phi_m(x, y)$, $\Delta\phi(x, y)$ (ただし、 m は測定の順序を示すための整数)は、それぞれスペックルパターンのバイアス成分、振幅成分、ランダムな位相分布成分、ならびに変形に伴う位相の変化量である。

さらに、これらのスペックルパターンを用いた変形に伴う位相分布を縞画像として表すスペックルグラム SG_{01} の強度分布は、式(3)に示す演算によって求めることができる²¹⁾。

$$\begin{aligned} I_{SG_{01}}(x, y) &= (I_{S_0}(x, y) - I_{S_1}(x, y))^2 \\ &= (A_0(x, y) - A_1(x, y))^2 + 2(A_0(x, y) - A_1(x, y)) \\ &\quad (B_0(x, y) \cos\phi_0(x, y) - B_1(x, y) \cos(\phi_1(x, y) \\ &\quad + \Delta\phi(x, y))) + (B_0^2(x, y) + B_1^2(x, y))/2 \\ &\quad + \{B_0^2(x, y) \cos 2\phi_0(x, y) + B_1^2(x, y) \cos 2 \\ &\quad (\phi_1(x, y) + \Delta\phi(x, y))\}/2 - B_0(x, y)B_1(x, y) \\ &\quad \cos(\phi_0(x, y) + \phi_1(x, y) + \Delta\phi(x, y)) - B_0(x, y) \\ &\quad B_1(x, y) \cos(\phi_0(x, y) - \phi_1(x, y) - \Delta\phi(x, y)) \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、変形前後に採取した式(1)、式(2)に示すス

ベックルパターンのバイアス成分, 振幅成分, ランダム位相成分の間に式 (4) に示すような仮定が成立するとすれば, 式 (3) は式 (5) として簡略化することができる.

$$\left. \begin{aligned} A_0(x, y) &= A_1(x, y) = A(x, y) \\ B_0(x, y) &= B_1(x, y) = B(x, y) \\ \phi_0(x, y) &= \phi_1(x, y) = \phi(x, y) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$I_{SG01}(x, y) = B^2(x, y) - B^2(x, y) \cos(\Delta\phi(x, y)) + B^2(x, y) \{ \cos 2\phi(x, y)/2 + \cos 2(\phi(x, y) + \Delta\phi(x, y))/2 - \cos(2\phi(x, y) + \Delta\phi(x, y)) \} \quad (5)$$

式 (5) の第三項には, ランダムな位相成分 $\phi(x, y)$ が含まれているので, これらの項をすべてランダムな値をもつ項として考え, さらに, ローパスフィルターを用いてこのランダムな成分を除去することができる。式 (5) の第一項目をバイアス項 $AA(x, y)$, また第二項目を変形に伴う縞画像を表す項として考えると, スペックルグラム SG_{01} の強度分布モデルとして式 (6) が得られる.

$$I_{SG01}(x, y) \cong AA(x, y) + BB(x, y) \cos(\Delta\phi(x, y)) \quad (6)$$

ここで, $BB(x, y)$ は発生する縞の振幅を表している.

1980年代には, 式 (6) に示す強度分布モデルを用いて, 多くの高分解能なスペックル干渉計測法が提案されている⁴⁾.

2.2 スペックルパターンの横ずらしを考慮したスペックルグラムの強度分布

スペックル干渉計測では, 変形前後で得られたスペックルパターン内のスペックルが重なり合っていないければ, スペックルグラムとしての縞画像を得ることができない. すなわち, スペックルパターンの横ずらしを用いた処理を行う場合には, スペックルグラムを求める演算において, 変形前後で対象となるスペックルが重なり合うことが前提となる. したがって, 円滑に演算を実施するために, スペックル径を大きく設定しておく必要がある.

一般に, 粗面からの散乱光が複雑に干渉して得られるスペックルパターンは, 観察光学系の開口の大きさに依存したサイズをもつスペックルによって構成されている. この場合, 光源の波長が λ , 観察光学系のレンズの焦点距離と開口の比が F , さらにレンズ系の倍率が M の場合には, 平均的なスペックル径 S_d は式 (7) として表すことができる³⁾.

$$S_d \cong 1.22(1+M)\lambda F \quad (7)$$

式 (7) を用いて, 本研究ではスペックル径 S_d をコントロールした.

次に, Fig. 1 において, 参照光を得るための粗面-2が, (a) から (b) に示すように傾いた粗面に変更された場合を考える.

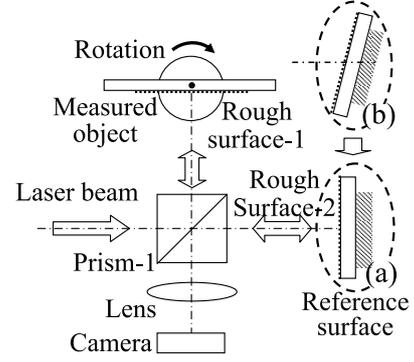


Fig. 1 Speckle interferometer.

この場合にも, 測定対象の回転によって発生する面外変形前のスペックルパターン S_2 の強度分布は, 式 (1) と同様に式 (8) によって表すことができる.

$$I_{S_2}(x, y) = A_2(x, y) + B_2(x, y) \cos(\phi_2(x, y)) \quad (8)$$

さらに, 式 (2) と同等の位相変化 $\Delta\phi(x, y)$ を与えた変形後のスペックルパターン S_3 の強度分布は, 式 (9) として与えられる.

$$I_{S_3}(x, y) = A_3(x, y) + B_3(x, y) \cos(\phi_3(x, y) + \Delta\phi(x, y)) \quad (9)$$

したがって, S_2 と S_3 によるローパスフィルタリング後のスペックルグラム SG_{23} の強度分布を, 粗面-1の変形に伴う位相の変化量 $\Delta\phi(x, y)$ に関するスペックルグラムとして考えると, 式 (6) に示すスペックルグラムの強度分布モデルと同様に式 (10) として表すことができる.

$$I_{SG23}(x, y) \cong AA'(x, y) + BB'(x, y) \cos(\Delta\phi(x, y)) \quad (10)$$

さらに, 式 (8) に示すスペックルパターンを1ピクセル横ずらしさせた場合を考えると, そのスペックルパターン S_{25} の強度分布は式 (11) によって表され,

$$I_{S_{25}}(x, y) = A_2(x-1, y) + B_2(x-1, y) \cos(\phi_2(x-1, y)) \quad (11)$$

式 (11) と式 (9) の間で求めたスペックルグラムは, 隣り合ったピクセルの強度分布の演算を含むことになるので, 必ずしも式 (4) に示す仮定がすべて成り立つわけではなく, この場合には, 式 (12) のようなローパスフィルタリング後の強度分布モデルが考えられることになる.

$$I_{SG25S} \cong AA''(x, y) + BB''(x, y) \cos(\phi_2(x-1, y) - \phi_3(x, y) - \Delta\phi(x, y)) \quad (12)$$

このような状況を実験によって検証した.

実験結果を Fig. 2 に示す. Fig. 2 では, Fig. 1 (b) に示すような光軸に対して傾きをもつ参照粗面を用い, 測定対象を回転させて画面内に14本の縦縞 (コントラストのよい9縞のみを Fig. 2 (a) に示す) が発生するように面外変形を与える条件のもとで, スペックルグラムを演算した. ま

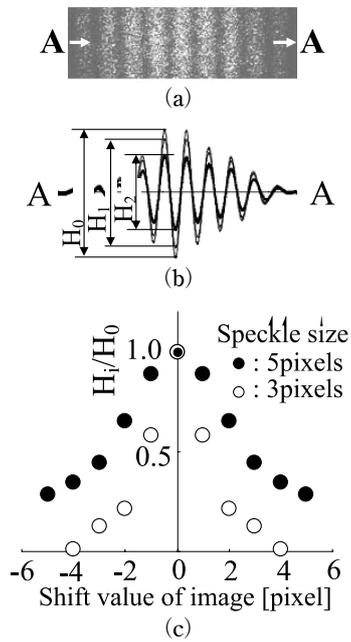


Fig. 2 Fringes' contrast. (a) Fringe image. (b) Intensity distribution in A-A. (c) Ratio of amplitude.

た、変形前後でのスペックルの重なり合いによる影響を調べるために、スペックルサイズを画像素子（画素の大きさは $5.2 \mu\text{m}$ ）に対して 5 ピクセル、3 ピクセルの 2 種類の大きさとして設定した。

Fig. 2 (a) に示す縞画像の A-A 断面における縞の両振幅 H_i (i は横ずらし量を表す) の変化を、横ずらしがない場合の最大値 H_0 に対して横ずらし量が増加した場合の H_1 , H_2 の変化を Fig. 2 (b) に示す。また、それらの振幅の H_0 に対する比を縦軸に、横ずらし量を横軸にとって変化の様子を示したものが Fig. 2 (c) である。

横ずらし量が増加するに従って、振幅が徐々に小さくなる様子を確認することができる。また、スペックルサイズがピクセルの 5 倍から 3 倍へと小さくなると、縞の振幅が横ずらしによって急速に小さくなることわかる。これは、スペックルサイズが 5 ピクセルの場合に比べ 3 ピクセルの場合には、横ずらしを行うことによってスペックルの重なりが少なくなり、その影響を受けて振幅成分が小さくなるためであると考えられる。しかし、横ずらしを行った場合でも、少なくとも縞画像が得られることがわかる。

また、式 (12) に示すモデルにおいて、ローパスフィルタリング処理では観察されたバイアス成分としての $AA'(x, y)$ は、Fig. 2 (b) に示すように、バンドパスフィルタリング処理を施すと除去されることが確認できる。さらに、Fig. 2 (c) より、右方向に横ずらしさせた場合と左方向に横ずらしさせた場合とでは、左右対称にその振幅は小

さくなる。すなわち、左右への横ずらし量と振幅との間に、対称性が存在していることが確認できる。

一方、縞の位相成分は、横ずらしが行われた場合においても、本来の横ずらしがなされていない場合と同じ位相をもった縞が発生していることがわかる。このことより、Fig. 1 (b) のような参照粗面を傾けた場合においても、横ずらしによってスペックルグラムの位相は影響を受けないことがわかり、同一スペックル内では、 $\phi_2(x, y) = \phi_2(x-1, y) = \phi_3(x, y)$ が成り立っているものと考えられる。Fig. 1 の参照粗面を (b) とした場合には、(a) の粗面に対して参照粗面を傾かせることによって空間的に光路長に差が発生するものの、散乱光間で複雑にスペックル内に干渉現象が記録されているために、採取したスペックルパターンの横ずらしを行っても、式 (12) に示すようなスペックルグラムでは位相が変化するには至らないものと考えられる。

2.3 スペックルに空間情報を与えるための光学系

Fig. 1 の参照粗面を (b) とした場合には、数ピクセルだけスペックルパターンを横ずらしただけでは、振幅が小さくなったスペックルグラムが得られるだけで、スペックルグラムに位相変化を与えることができなかった。そこで、Duffy がシアリング干渉計測の考え方に基づいて行った²⁰⁾ ように、ここでもスペックル内に積極的に空間的な位相情報を与え、スペックルパターンを横ずらしした場合にスペックルグラムの位相を変化させることができる新たな工夫を、干渉計測の最も基本的な考え方に基づいて施すことにした。

本研究で提案する光学系では、複雑にスペックル内で干渉現象が生じる散乱光を参照光として用いるのではなく、平面波を参照光として用い、発生する縞の位相を横ずらし量によって制御することを考えた。

Fig. 1 の参照面を粗面から鏡面におきかえると、平面波を与えることができる。しかし、Fig. 1 の光学系では、観察光学系にレンズが用いられているために、鏡面から反射しレンズに入射した平面波は、画像素子上に焦点を結ぶことになる。そこで、観察光学系のレンズを回避して平面波が直接画像素子へ至るようにするために、平面波がバイパスを経由して画像素子に至る Fig. 3 に示すような光学系を新たに設置した。この光学系は、いわゆるマッハ・ツェンダー干渉計と同様の構造をもったものである。

Fig. 3 の光学系のプリズム 2 とミラー 2 の部分を拡大したものが Fig. 4 である。白矢印に従って物体光は画像素子に到達する。一方、参照光は、固定されたミラー 1、回転させることのできるミラー 2、さらにプリズム 2 を経由して、黒矢印に従って画像素子に至る。

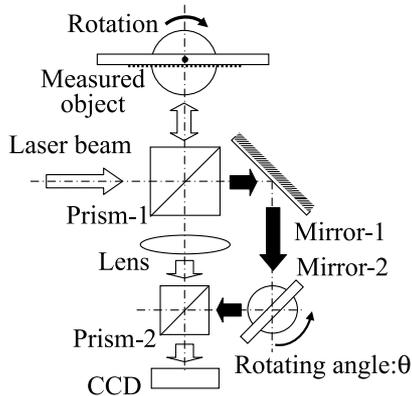


Fig. 3 Optical system.

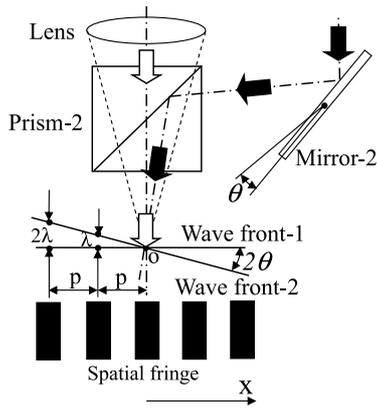


Fig. 4 Spatial information in speckles.

この光学系では、Fig. 3の光学系のミラー2を θ だけ回転させたときに、参照光の波面は 2θ だけ傾いて画像素子に到着することになる。この結果、レンズ径を通して結像された物体光との間で波面が 2θ だけ傾くことになる。一般の干渉光学系におけるこの現象をFig. 4で考えると、角度 2θ をもった波面間では、画像素子上で光源の波長 λ の光路長が発生するごとに x 方向に干渉縞が発生することになるので、発生する干渉縞のピッチ p は $\lambda/\tan(2\theta)$ となり、干渉縞の周波数 ω は $2\pi/p$ となる。このようにして、空間情報としての縞の周波数をミラー2の角度により制御することが可能となる。

この新しい光学系によって得られた変形前のスペックルパターンを S_{N0} とすると、平面波による空間情報が付加されていることを除いて、その強度分布は式(1)と同様に、式(13)として表すことができる。

$$I_{S_{N0}}(x, y) = A_{N0}(x, y) + B_{N0}(x, y) \cos(\phi_{N0}(x, y) + \omega x) \quad (13)$$

一方、変形後のスペックルパターン S_{N1} は、式(14)によって表すことができる。

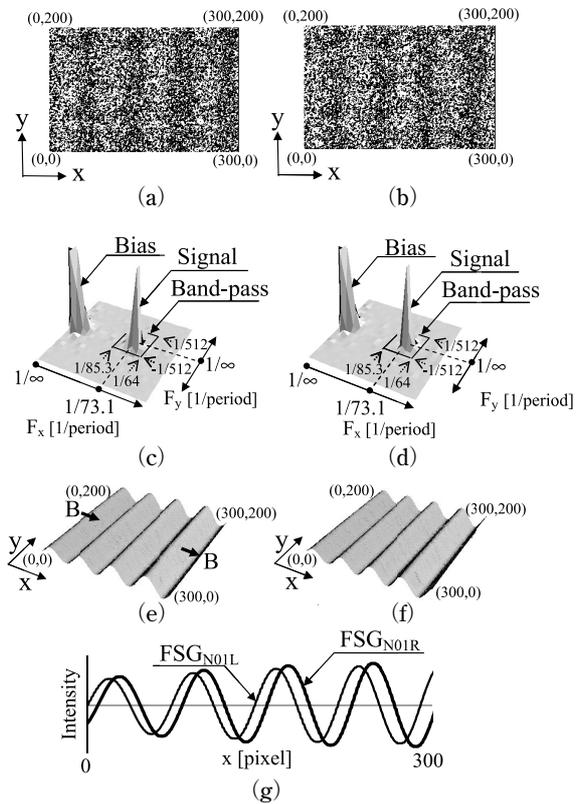


Fig. 5 Filtered specklegrams. (a) Specklegram: SG_{N01R} (by S_{N0R} and S_{N1}). (b) Specklegram: SG_{N01L} (by S_{N0L} and S_{N1}). (c) Fringe signal (SG_{N01R}) in frequency domain. (d) Fringe signal (SG_{N01L}) in frequency domain. (e) Filtered specklegram: FSG_{N01R} . (f) Filtered specklegram: FSG_{N01L} . (g) Intensity of filtered specklegram on section B-B.

$$I_{S_{N1}}(x, y) = A_{N1}(x, y) + B_{N1}(x, y) \cos(\phi_{N1}(x, y) + \Delta\phi + \omega x) \quad (14)$$

ここで、変形前のスペックルパターンを右へ1ピクセルだけ横ずらしすると、式(13)より式(15)が得られる。

$$I_{S_{N0R}}(x, y) = A_{N0}(x-1, y) + B_{N0}(x-1, y) \cos(\phi_{N0}(x-1, y) + \omega(x-1)) \quad (15)$$

この場合、式(14)と式(15)との間で、スペックルグラム SG_{N01R} を式(12)の演算に基づいて求めると、その強度分布モデルは式(16)として表すことができる。

$$I_{SG_{N01R}}(x, y) \cong AA_N(x, y) + BB_N(x, y) \cos(\Delta\phi(x, y) + \omega) \quad (16)$$

式(16)では、空間的に与えた情報としての縞成分の周波数 ω に相当する値だけ、スペックルグラムとしての縞の位相がシフトされていることがわかる。

その様子を確認するために、Fig. 3の光学系で得られた変形前後の2枚のスペックルパターン S_{N0} と S_{N1} との間で、変形前に採取された S_{N0} を左右に1ピクセルだけ横ずらしを行い、変形後に採取されたスペックルパターン S_{N1} との

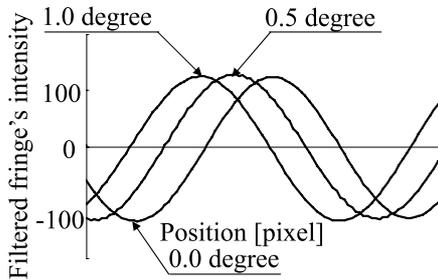


Fig. 6 Phase shift.

間で、それぞれスペックルグラム (SG_{NoIR} と SG_{NoIL}) を式 (3) に従って求めたものが Fig. 5 (a) (b) である。このスペックルグラムをフーリエ変換して周波数領域で観察したものが Fig. 5 (c) (d) である。それぞれの縞画像では、縞の周波数は変化しないので、 x 方向に対して周期が 73.1 ピクセルの縞が発生していることがわかる。この縞成分を Fig. 5 (c) (d) に示す通過帯域をもつバンドパスフィルターによってフィルタリング処理をすると、Fig. 5 (e) (f) に示すような滑らかな強度分布をもつ縞画像 FSG_{NoIR} と FSG_{NoIL} を得ることができる。この 2 つの縞画像の B-B 断面の強度分布を示したものが、Fig. 5 (g) である。両者の縞画像には位相差が発生していることがわかる。

この位相差は、式 (16) に示すように、Fig. 3 の光学系のミラー 2 の回転角 θ によって制御することができる。Duffy の考え方に基づくシアリング干渉計の原理に従った 2 つの開口を設置することにより、空間的な情報を与える手法²⁰⁾ に比べて、本研究で提案する光学系は、簡易に位相差を設定することができる。

2.4 発生する縞の位相差の確認

本研究で提案した手法による位相シフト量の状況を確認するために、Fig. 3 に示すミラー 2 の角度を 0 度、0.5 度、1.0 度と変化させ、参照光としての平面波と物体光との交差角を変化させた場合の、スペックルグラムの位相シフトの様子を観察したものが Fig. 6 である。ミラー 2 の角度が、0 度と 1 度との間で約 $\pi/2$ rad の位相シフトが発生していることがわかる。さらに、この状況を定量的に調べたものが Fig. 7 である。

Fig. 7 において、ミラー 2 の回転角が 0 度の場合、変化前のスペックルパターンを横ずらしすることなく求めたスペックルグラムとの間で 0.64 rad の位相シフトが発生していることがわかった。さらに、ミラー 2 の回転角を 10 分ごとに大きくしていくと、2 度で -2.26 rad の位相シフトが発生することがわかる。Fig. 7 より、本研究で行った実験の範囲では、ミラー 2 の回転角と位相シフト量との間の線形関係の存在が明らかになった。

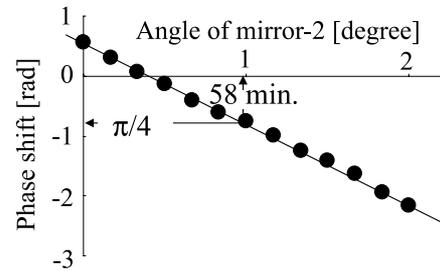


Fig. 7 Relationship between angle of mirror and phase shift.

ここで、位相シフト量を 0、すなわち参照光の進行方向を観察光学系の光軸に平行にするためには、約 26 分に設定しなければならない。ミラー 2 の回転角と画像素子への参照光の波面との角度は 2 倍となることから、光学系設置時に観察光学系の光軸と参照光の進行方向とは 52 分だけずれが生じていることがわかる。本研究では、この光学系のずれを補正することなく、ミラー 2 設置時の角度表示を直接利用して以下の実験を行った。

Fig. 7 に示すグラフより位相シフト量 S_f とミラー 2 の回転角 θ との間の近似直線を求めると、 $S_f = -1.450\theta + 0.62$ の関係があり、 S_f と θ との傾きは -1.450 であることがわかる。

ここで、Fig. 3 (特に Fig. 4) に示した光学系を考えると、この光学系の光源の波長 λ は 785 nm、使用したカメラは Silicon VIDEO9M001 でピクセルのピッチは $5.2 \mu\text{m}$ である。このことより、ミラー 2 が 1 度だけ回転すると、参照光としての平面波の画像素子への波面は 2 度傾くので、Fig. 4 に示すように、そこに発生する干渉縞のピッチは $0.785(\mu\text{m})/\tan(2) = 22.47 \mu\text{m}$ となる。これをピクセル数に換算すると、 $22.47(\mu\text{m})/5.2(\mu\text{m}) = 4.321$ ピクセルである。これらの値から式 (16) に示した ω を求めると、 $\omega = 2\pi/4.321 = 1.453$ であることがわかる。すなわち、ミラー 2 が 1 度回転すると、1.453 rad だけ位相シフトが発生することが明らかになった。この値は、Fig. 7 の傾き -1.450 の絶対値に近似する値であることより、本研究で示した考え方に従って、実験においても位相シフトが発生しているものと考えられる。

3. 平面の回転により発生する面外変形の計測

スペックルパターンを横ずらしさせることによって、スペックルグラムの位相を制御することができる性質が、面外変形計測に適用可能であるか否かを原理確認実験において検討した。この計測過程を、Fig. 8 のフローチャートを用いて説明する。

まず、Fig. 7 より、スペックルグラムの位相が $\pi/4$ rad

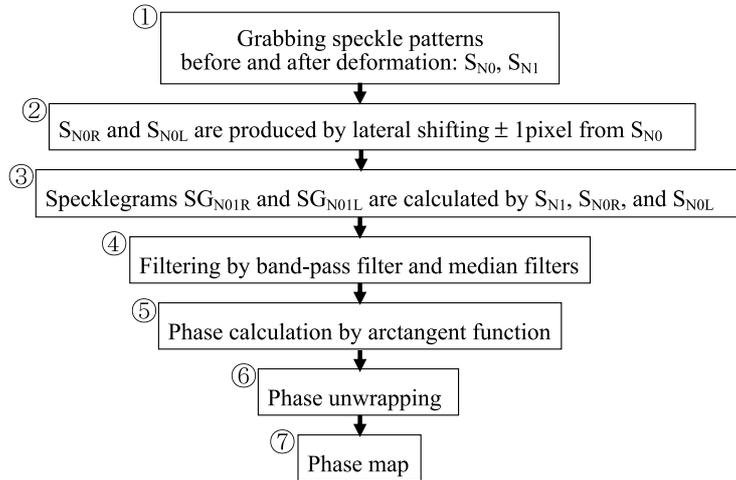


Fig. 8 Flow chart of processing.

だけ変化するために必要なミラー 2 の回転角は約 58 分であるので、Fig. 3 の光学系のミラー 2 の角度を 58 分に設定した。

また、Fig. 2 (c) に示すように、スペックル径をピクセルサイズの 5 倍に設定した場合に横ずらしを ±1 ピクセルだけ行くと、スペックルグラムの振幅は Fig. 2 (c) より対称性が存在していることがわかっている。そこで、スペックル径をピクセルサイズの 5 倍になるように設定し、 θ が 58 分に設定された光学系から、Fig. 8① に示すように変形前後のスペックルパターンを採取する。次に、Fig. 8② に示すように、採取された変形前のスペックルパターンを ±1 ピクセル横ずらしをする。その結果、それぞれ $\pi/4$ 、 $-\pi/4$ だけスペックルグラムの位相がシフトし、トータル $\pi/2$ rad の位相差をもつ 2 つのスペックルグラム SG_{N01R} と SG_{N01L} を得ることができる。

このようにして得られた SG_{N01R} 、 SG_{N01L} に、④ に示すようにバンドパスフィルタリング処理を行い、⑤ に示すようにそれぞれの縞画像から得られた $\pi/2$ rad だけ位相が異なる縞の強度の比を用いて、逆正接関数によって縞の位相分布を求める。最終的に、⑥ に示す位相つなぎを行うと、変形に伴う位相分布を求めることができる。

Fig. 8 のフローチャートに従って求めた位相分布を Fig. 9 (a) に示す。Fig. 9 (a) を位相つなぎしたものが Fig. 9 (b) である。Fig. 9 (b) の C-C 断面を示した結果が Fig. 9 (c) である。測定対象の回転に伴い平面が傾いていることがわかる。さらに、実際に圧電素子によって与えた測定対象としての平面の回転量を、Fig. 9 (c) の結果から減算したものを Fig. 9 (d) に示している。両者の差のばらつきの標準偏差は 0.0921 rad (実寸法で 5.8 nm) であり、これはレーザー波長の 135 分の 1 に相当している。また、従来の

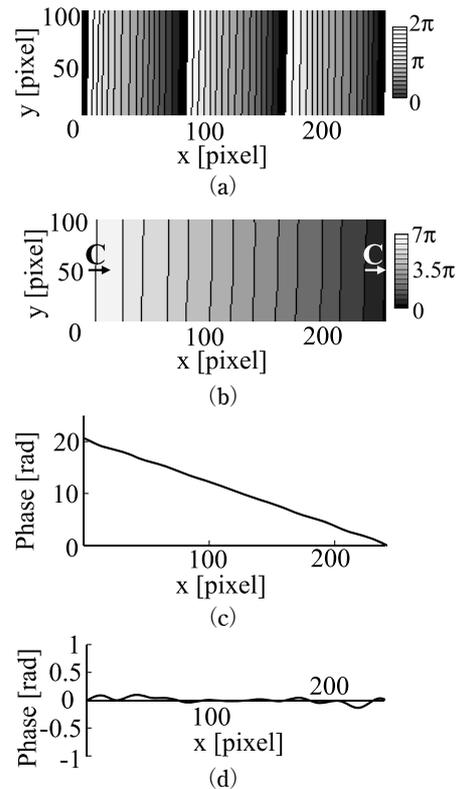


Fig. 9 Results of out-of-plane deformation measurement. (a) Wrapped phase map. (b) Unwrapped phase map by this method. (c) Phase map in section C-C. (d) Comparison this method with real deformation in section C-C.

3 枚のスペックルパターンを用いる解析法^{21,22)}で、本手法の解析に用いたと同じデータを処理した結果と、Fig. 9 (b) の C-C 断面との差を求めた場合の両者の差のばらつきの標準偏差は 0.0975 rad であった。これは、レーザー波長の 128 分の 1 に相当している。ただし、Fig. 9 (d) の x 軸方向で、回転中心から約 100 ピクセル (実寸法で約 6 mm)

程度の位置で、12 nm 程度の変動が観察されている。本実験では、マニュアル操作によってミラー2の回転角を設定しているが、レーザー波長の100分の1以上に相当する現状よりも高い測定精度を今後目指すためには、圧電素子等を用いた光学系のより正確な設定が求められるのではないかと考えている。

このように変形前後の2枚のスペックルパターンのみを用いた変形解析においても、従来法と変わらない高い分解能を有する変形計測が、本研究で提案した手法によって得られることがわかった。

4. おわりに

衝突、破壊現象などのように、高速に変化する変形現象を高速度カメラを用いてとらえなければならないような計測では、変形速度が高まるに従って、物理的に何枚ものスペックルパターンを採取することが困難な状況が発生する。このような超高速に変形する対象物の変形解析の実現を目指して、本研究では、変形前後2枚のスペックルパターンのみを用いたスペックル干渉計測法の開発を行った。

本研究と同様の目的をもつ従来の解析手法では、シアリング干渉計測技術を用いてスペックルパターンにキャリア縞情報を与え、変形前後のそれぞれのスペックルパターンの位相分布を空間的縞解析法を用いて求め、その差を演算することによりトータルの変形解析を行っていた。これに対して、本研究で新しく提案したスペックル干渉計測法では、変形前後で関連するスペックルが重なり合っていないと演算が困難であるスペックル干渉計測独特の環境下で従来困難であると考えられていた、変形前後の2枚のスペックルパターンのみを用い、スペックルパターンから演算したスペックルグラムに位相分布を検出することによって、トータルの変形量を直接求めることのできる解析法を提案している。この処理を実施するために、本研究では、スペックルパターンの横ずらしに伴うスペックルグラムの強度分布演算時の対称性を利用した処理過程を用いる新たな考え方を提示した。さらに、スペックルグラムを用いる処理過程を利用することによって、従来のスペックルパターンから直接位相分布を求める処理法に比べて、フィルタリング技術をより有効に利用することができる解析過程を確立している。スペックルノイズをはじめとするさまざまなノイズ成分の除去が求められるスペックル干渉計測において、フィルタリング処理の有効利用が可能な手法は、将来的により高分解能な変形解析の実現をもたらす重要な技術であると考えられる。

さらに、従来用いられていた、設定が煩雑であるシアリ

ング干渉計を基本とした光学系に比べて、本研究で提案したスペックル干渉計測法では、干渉計測の基本である2つの光波間の波面の交差角度を制御することにより、空間的な情報を与えることができる光学系を提案しているため、簡便に光学系を取り扱うことができた。

面外変形計測に関する原理確認実験を行い、本研究で提案した光学系がスペックルグラムに所要の位相シフト情報を容易に与えることが可能であることを確認し、この性質を利用することによって、本手法の正当性を検証した。

実験結果において、面外変形計測では圧電素子によって与えられた実際の変形量との比較、ならびに3枚のスペックルパターンを用いる従来法による解析結果との比較を行い、本手法による測定の際のばらつきが光源波長の100分の1以下に抑えられていることを確認した。

これらの結果より、本手法が、変形前後の2枚のスペックルパターンのみを用いて行う解析法であるにもかかわらず、3枚以上のスペックルパターンを用いる従来法と同等の高い分解能を有する変形解析法であることが示された。

また、本研究で新たに提案した光学系は、シアリング干渉計測技術を基礎としたDuffyの考え方に長年にわたって依存してきたこの分野の解析技術に、新しい考え方を提示するものであり、本研究で提案した技術は、今後この分野のさらなる飛躍を誘発するものであると考えている。

文 献

- 1) D. Malacara: *Optical Shop Testing* (John Wiley & Sons, 1992) pp. 501-652 and pp. 1-50.
- 2) R. S. Sirohi: *Speckle Metrology* (Marcel Dekker, New York, 1993) pp. 99-234.
- 3) G. Cloud: *Optical Methods of Engineering Analysis* (Cambridge University Press, New York, NY, 1995) pp. 395-476.
- 4) B. J. Thompson: *Selected Papers on Electronic Speckle Pattern Interferometry Principles and Practice* (SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, Washington, 1996) pp. 1-518.
- 5) D. W. Robinson and G. T. Reid: *Interferogram Analysis* (Inst. of Phys. Publ., Bristol, 1993) pp. 58-70 and pp. 141-193.
- 6) M. Kujawinska: "Spatial techniques of automatic fringe pattern analysis," *SPIE 1991 International Symposium on Optical Applied Science and Engineering, Short Course-77 Textbook* (SPIE, 1991) pp. 2-16.
- 7) 新井泰彦, 倉田忠雄: "縞走査干渉計の手法による高速かつ高分解能なモアレトポグラフィ法", *光学*, **15** (1986) 402-406.
- 8) C. Joenathan, B. Franze, P. Haible and H. J. Tiziani: "Large in-plane displacement measurement in dual-beam speckle interferometry using temporal phase measurement," *J. Mod. Opt.*, **45** (1998) 1975-1984.
- 9) C. Joenathan, B. Franze, P. Haible and H. J. Tiziani: "Speckle interferometry with temporal phase evaluation for measuring large-object deformation," *Appl. Opt.*, **37** (1998) 2608-2614.
- 10) 新井泰彦, 島村遼一, 横関俊介: "変形計測過程の情報のみを用いた高分解能スペックル干渉計測法の開発", *光学*, **36** (2007) 475-484.

- 11) 新井泰彦, 島村遼一, 横関俊介: “単調位相増加条件を必要としない変形過程情報のみを用いた高分解能スペックル干渉計測法”, 光学, **37** (2008) 41-49.
- 12) 新井泰彦, 島村遼一, 横関俊介: “電子スペックル干渉計測におけるバーチャルスペックルパターンを用いた面内変形計測”, 光学, **37** (2008) 119-129.
- 13) Y. Arai, H. Hirai and S. Yokozeki: “Electronic speckle pattern interferometry based on spatial fringe analysis method using two cameras,” J. Mod Opt., **55** (2008) 281-296.
- 14) J. A. Quiroga, M. Seven, J. L. Marroquin and J. A. Gomez-Pedrero: “An isotropic n -dimensional quadrature transform and its applications in fringe pattern processing,” Proc. SPIE, **5144** (2003) 259-267.
- 15) R. S. Sirohi, N. K. Mohan and T. Santhanakrishnan: “Optical configuration for measurement in speckle interferometry,” Opt. Lett., **21** (1996) 1958-1959.
- 16) R. S. Sirohi, J. Burke, H. Helmers and K. D. Hinsch: “Spatial phase shifting for pure in-plane displacement and displacement-derivative measurements in electronic speckle pattern interferometry (ESPI), Appl. Opt., **23** (1997) 5787-5791.
- 17) J. Burke, H. Helmers, C. Kunze and V. Wilkens: “Speckle intensity and phase gradients: Influence on fringe quality in spatial phase shifting ESPI-Systems,” Opt. Commun., **152** (1998) 144-152.
- 18) B. Bhaduri, N. K. Mohan, M. P. Kothiyal and R. S. Sirohi: “Use of speckle phase shifting technique in digital speckle pattern interferometry (DSPI) and digital shearography (DS),” Opt. Exp., **14** (2006) 11598-11607.
- 19) B. Bhaduri, N. K. Mohan and M. P. Kothiyal: “Digital speckle pattern interferometry using spatial phase shifting: Influence of intensity and phase gradients,” J. Mod. Opt., **55** (2008) 861-876.
- 20) D. E. Duffy: “Moire gauging of in-plane displacement using double aperture imaging,” Appl. Opt., **11** (1972) 1778-1781.
- 21) 新井泰彦, 藤本雅大, 横関俊介: “空間的縮解析法を用いた電子スペックル干渉法におけるオプティカルディスロケーション発生とフィルタリング処理との関係”, 光学, **31** (2002) 562-567.
- 22) 新井泰彦, 横関俊介: “2次元空間的縮解析法のスペックル干渉法への適用”, 光学, **29** (2000) 250-255.