

2枚のスペックルパターンのみを用いたフーリエ変換技術による電子スペックル干渉法

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 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

Electronic Speckle-Pattern Interferometry Using Only Two Speckle Patterns Based on Fourier Transform

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

Electronic speckle pattern interferometry with high resolution power based on Fourier transform using only two speckle patterns is proposed by using the new optical system. Furthermore, the distributing situation of deformation information in speckle pattern which is grabbed by the optical system is also discussed in frequency domain. In experiments, the measuring accuracy of the method is discussed in the measurement of out-of-plane deformation by rotating a flat plane. It is confirmed that the accuracy of the method is higher than $1/250$ wavelength of light source and that the out-of-plane deformation with a concave phase distribution can be also measured.

Key words: electronic speckle pattern interferometry (ESPI), convex or concave out-of-plane deformation measurement, high resolution power measurement, unresolved speckle

1. はじめに

粗面に干渉性の強い光が照射されると、散乱した光が複雑に干渉し合い、スペックルが発生する。このスペックルには粗面からの光の位相情報が記録されているので、この位相情報を用いると粗面の変形計測が可能となる¹⁻⁵⁾。このようなスペックル干渉計測技術では、TVカメラ技術を用いて電子スペックル干渉計測 (ESPI: electronic speckle pattern interferometry)³⁾が開発され、さらに、縞走査技術^{1,6,7)}を用いることによって、光源波長の100分の1を超える高分解能な計測が実現されている^{4,7-11)}。

一般に、これらのスペックル干渉計測では縞走査技術^{1,5,7)}を用いるために、少なくとも3枚のスペックルパターンが必要であると考えられてきた。したがって、高速に変化する変形解析においては、3枚以上のスペックルパターンを採取するために、より高速に画像採取が可能な高速度カメラ^{12,13)}の使用が不可欠となっている。ところ

が、そのような高速度カメラの使用にもおのずから物理的限界があり、このような状況を回避するために、特殊な光学系¹¹⁾を用いる等、画像採取の機会を少なくすることによって、縞解析に用いるスペックルパターンの枚数を可能な限り減少させる取り組みがなされてきている。

その一例として、ダブル開口を用いるシアリング技術に基にした、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計測技術が報告¹⁴⁾されている。この技術はさらに空間的縞解析技術^{15,16)}を用いた新たな技術へと発展している。これらの技術を用いると、空間的な縞の位相の取り扱いが可能な光学系^{17,18)}を設置することができる。これにより、変形前後の縞の位相を制御することによって、2枚のスペックルパターンのみを用いた縞解析が実現されるに至っている。

ところが、これらの光学系はシアリング干渉技術¹⁹⁾を基礎としているので、光学素子の正確な製作や、設置の取

り扱いが煩雑であり、さらに、解析過程がスペックルパターンの位相を空間的編解析技術⁵⁻⁷⁾を用いて直接求める手法 (difference of phase method) に基づく技術¹⁴⁻¹⁸⁾ であるため、ノイズの影響を強く受ける問題がある。そのため、スペックルパターンの強度分布がもつバイアス成分や振幅成分の空間的なばらつきが測定結果へと強く影響する等の新たな問題が生じている¹⁸⁾。

このような問題に対して、前報²⁰⁾ では、シアリング干渉計測を基礎とした技術を用いることなく、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制御することにより、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ことができる新しいスペックル干渉光学系を提案し、2枚のスペックルパターンのみを用いた高分解能な面外変形計測を実現した。しかし、前報²⁰⁾ で示した手法では、所要の変形にかかわる信号成分と編解析演算時に不要となるバイアス成分とをフィルタリング技術を用いて分離する処理が行われていた。そのため、測定対象となる変形時の位相分布は、単調増加・単調減少に限定されるにとどまっていた。

本研究では、前報²⁰⁾ で提案した光学系によって採取されたスペックルパターン内に記録されている変形に関する情報の周波数領域における分布状況を検討している。また、電子スペックル干渉変形計測においてしばしば問題となるアンリソルブドスペックル (unresolved speckle) に対する取り扱い方法も検討している。アンリソルブドスペックル²¹⁻²⁴⁾ は、1個の受光素子内に多数のスペックルが存在することにより本来変形前後でそれぞれのスペックルの位相が変化し、その強度がそれぞれ変化するにもかかわらず、「当該の受光素子内の総合したスペックルの強度変化が受光素子の分解能を下回っている」、あるいは「スペックル強度が受光素子の検出強度の上限を超えて飽和している」等の理由により、当該の受光素子 (ピクセル) の出力が変形時に変化しない現象として知られているものである。

これらの検討結果に基づき、本研究では前報²⁰⁾ に示した技術を発展させることによって、単調増加・単調減少に限らず凹凸位相分布をもつ変形解析を2枚のスペックルパターンのみで実現することのできる手法を、フーリエ変換技術をもとにした新たなスペックル変形解析法として提案した。

この解析法は phase of difference method^{1-4, 8-11)} に基づくものであり、その利点であるフィルタリング技術を有効に利用することによってノイズの影響を軽減し、高分解能な編解析を実現している。

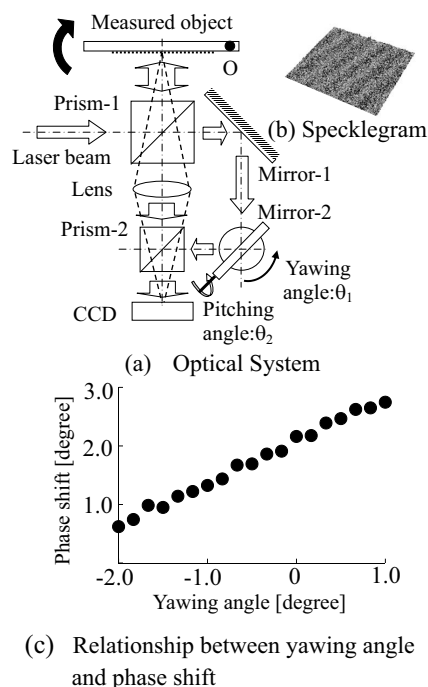


Fig. 1 Optical system.

本報では、凹凸情報の位相分布をもつ面外変形を対象として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示している。さらに、平面の回転により発生する面外変形の計測実験によって、変形計測時の解析精度を検討している。

これらの実験結果より、新しい解析技術は2枚のスペックルパターンのみを用いて、凹凸情報の位相変化を伴う変形解析が高分解能に実現可能であることを示している。

2. 新しい光学系により採取されたスペックルパターンの性質

2.1 本研究で用いるスペックル干渉光学系

本研究では、Fig. 1 (a) に示すような光学系を用いて、変形前後のスペックルパターンを採取し、変形計測を行っている。一般に、スペックル干渉計では、測定対象からの物体光を観察光学系で結像させる必要があるために、従来の光学系では参照光も結像されていた。本研究で用いる光学系では、観察光学系の結像レンズの影響を受けることなく、参照光を平面波として与えることができるように構成されている²⁰⁾。これにより、光学系のミラー2を紙面内で回転 (yawing) させることによって、スペックル内に記録される空間的な編情報の周波数を制御することができる。また、ミラー2を回転 (pitching) させることによって、空間的な編情報の編の方向を変化させることも可能である。この光学系を用いて、Fig. 1 (a) に示すような測定対

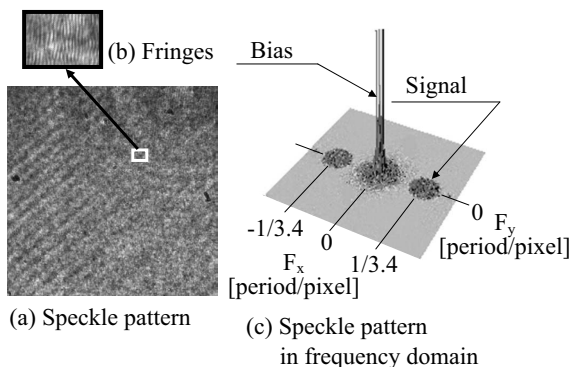


Fig. 2 Feature of speckle pattern grabbed by the optical system.

象を回転させた場合に発生する面外変形を観察すると、Fig. 1 (b) に示すようなスペckルグラムを変形に伴う縞画像として得ることができる²⁰⁾。

さらに、この光学系では、回転 (yawing) 角を適宜変化させ、かつ変形前後で採取したスペckルパターンを1ピクセルだけ横方向にシフトさせてスペckルグラムを演算すると、前報²⁰⁾ に示したように、発生する縞画像の位相を変化させることができる。この性質を、回転 (yawing) 角を変化させつつ縞画像の位相の変化をグラフにまとめたものが、Fig. 1 (c) である。ミラー2の回転 (yawing) 角に応じて、位相が線形に変化することが確認されている²⁰⁾。本研究で用いる光学系は、このような性質をもっている。

2.2 スペckルパターンにおける情報

2.2.1 スペckルパターン内の変形信号成分

Fig. 1 (a) に示す光学系によって採取されたスペckルパターンは、Fig. 2 (a) に示すように、一見通常のスペckルパターンと何ら変わらないようなものである。ところが、その一部分 (たとえば、白く枠取りされたような領域) を拡大して観察すると、Fig. 2 (b) に示すようにいくつかの粒状のスペckルが重なり合ったような状況がみられ、かつ、それぞれのスペckルの中には、縦方向に伸びた干渉縞が存在していることがわかる。さらに、これらの干渉縞は、すべてそれぞれのスペckル内にのみ存在がとどまり、隣り合ったスペckルとの間ではその周期はほぼ等しいものの、干渉縞としての繋がりをもつものではないことがわかる。Fig. 2 (b) に示す干渉縞の周期は3ピクセル程度であり、1ピクセルあたりの縞の位相は、約 $2\pi/3$ rad (=1.8 rad) である。この場合、変形前に採取されたスペckルパターンを1ピクセル水平方向に横ずらしをし、変形後のスペckルとの間でスペckルグラムを求めた場合には、前報で示したように $2/3\pi$ rad 程度位相がシ

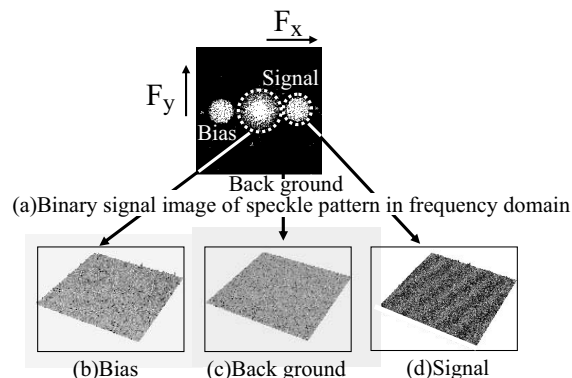


Fig. 3 Location of information of deformation.

フトされることになる²⁰⁾。

本研究で用いる光学系によって採取された、Fig. 2 (a) に示されるスペckル内に干渉縞が存在するスペckルパターンをフーリエ変換して周波数領域で観察すると、このスペckルパターンには、Fig. 2 (c) に示すように周波数領域内で独特な情報分布が存在していることがわかる。

Fig. 2 (c) に示された信号の周波数領域での情報は、i) 低い周波数領域に存在するバイアス成分、ii) 正負の周波数領域にバイアス成分を挟んで対称に存在する特徴的な円形分布をもった信号成分、ならびに iii) それ以外の領域に存在する信号成分に大別することができる。

この3領域にどのような信号成分が含まれているのかを確認するために、変形前後のスペckルに対してそれぞれの領域に含まれる信号成分を調べた結果が Fig. 3 である。

Fig. 3 (a) は、Fig. 2 (a) に示すスペckルパターンのフーリエ変換により求めた Fig. 2 (c) に示す周波数領域での信号分布をより視覚的にとらえるために、二値化処理した画像である。Fig. 2 (c) に示したものと同様に、i) 中心にバイアス成分が存在し、ii) その両サイドに特徴的な円形の信号成分が分布している。さらに、iii) それ以外の領域での情報が考えられる。

これらのそれぞれの領域にどのような変形に係る成分が存在しているのかを調べるために、変形前後に採取したスペckルパターンを二次元バンドパスフィルターによって Fig. 3 (a) に示すそれぞれの領域のみの成分を抽出し、変形前後におけるそれぞれの成分の差の二乗演算によって従来のスペckルグラムに相当するものを求めた。それぞれの結果を Fig. 3 (b), (c), (d) に示している。

Fig. 3 (b) に示す変形前後のバイアス成分、ならびにその周りに存在する信号成分同士によるスペckルグラムでは、変形に係る縞画像信号を確認することはできない。また、Fig. 3 (c) に示すバイアス成分、円形の信号成分以外

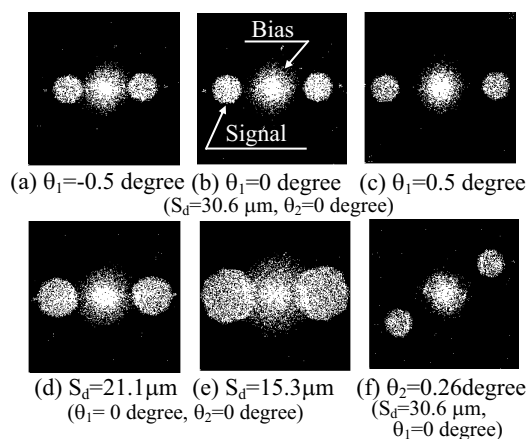


Fig. 4 Relationship between location of information of deformation and angle of mirror.

の領域から抽出した成分によって求めたスペックルグラムにおいても、バイアス成分の場合と同様に、何ら変形に係る縞成分を観察することはできない。

一方、Fig. 3 (d) に示す円形の信号成分により求めたスペックルグラムでは、Fig. 1 (b) に示すスペックルグラムと同様の縞画像を得ることができる。

これらの結果から、本研究で用いる光学系により得られたスペックルパターンでは、周波数領域において特徴的な円形分布を形成する信号成分のみに、変形に係る信号が存在していることがわかる。

この結果をもとに、さらにそれぞれの領域に関する信号成分の特徴を検討する。

2.2.2 空間的な周波数分布としての信号成分の広がり

次に、平均的なスペックル径 S_d を式 (1) によって設定³⁾ し、スペックル径を変化させた場合に、バイアス成分ならびにその周りに存在する信号成分がどのように分布しているかについて検討した。

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

ここで、 λ は光源の波長、 F は観察光学系のレンズの焦点距離と開口の比、さらに、 M はレンズ系の倍率である。

Fig. 3 (a) と同様にそれぞれの条件で採取したスペックルパターンをフーリエ変換し、周波数領域での信号分布として示したものが Fig. 4 である。式 (1) に基づき観察光学系の開口を変化させることによってスペックル径を約 $30 \mu\text{m}$ に設定した Fig. 4 (a)~(c) の場合に比べて、スペックル径を約 $20 \mu\text{m}$ 、約 $15 \mu\text{m}$ に設定した Fig. 4 (d), (e) では、バイアス成分の周波数領域での広がり大きくなっていることがわかる。

Fig. 4 で観察することのできるバイアス成分の周波数領域での広がりに関する現象は、スペックル径が小さくなる

ことによって、各スペックルがもつ空間的な周波数成分が高くなることによると考えられる。本研究で使用するカメラのピクセルサイズは $2.2 \mu\text{m}$ であり、スペックル径が約 $30 \mu\text{m}$ 、 $20 \mu\text{m}$ 、 $15 \mu\text{m}$ と変化すると、スペックル径はそれぞれ、ピクセルサイズの約 15 倍、10 倍、7 倍となる。その結果、約 $30 \mu\text{m}$ のスペックル径に対して約 $15 \mu\text{m}$ ではスペックルに含まれる空間的な周波数分布は 2 倍近く高くなり、Fig. 4 (e) に示されるように、バイアスの周波数領域での広がり Fig. 4 (b) に比べて 2 倍近くになっている。

このスペックル径の大きさの変化による空間的な周波数分布の広がりに関する現象は、バイアス周辺の低周波数領域の信号成分にとどまらず、特徴的な円形分布を形成する信号成分においても確認することができる。Fig. 4 (a)~(c) に比べて、Fig. 4 (e) に示すスペックルサイズが約 $15 \mu\text{m}$ の場合には、円形分布を形成する信号成分の広がり約 2 倍程度大きくなっている。これらのことより、周波数領域における信号の広がり、明らかにスペックルサイズに依存していると考えられる。

2.2.3 特徴的な円形分布を形成する信号成分の存在位置とその分布形状

Fig. 3 の結果より、変形に係る情報は、特徴的な円形分布を形成する信号成分に含まれていることがわかる。そこで次に、この信号の周波数領域における分布位置について検討する。

Fig. 2 (b) に示すように、各スペックル内には光学系のミラー 2 の傾き角に応じた干渉縞が発生している。

ここで、光学系のミラー 2 の角度 (yawing) を変化させて、スペックル内に発生している干渉縞の周期を変化させた場合の信号情報の変化を調べたものが、Fig. 4 (a)~(c) である。Fig. 4 (b) に示した状態を、ミラー 2 の角度を仮に 0 度と設定した場合、その角度よりも Fig. 4 (c) に示したように大きくすると、干渉縞の周期は小さくなり、その周波数は高くなる。また、角度を小さくすると、干渉縞の周期は大きくなる。これらの結果より、角度が大きくなった場合には、Fig. 4 (c) に示すように円形情報の中心周波数は高くなり、バイアス成分から遠ざかる。また、角度を小さくすると、Fig. 4 (a) に示すように円形情報の中心周波数は低くなり、バイアス成分に近づくことがわかる。

Fig. 2 (c) に示すように、干渉縞の周期と円形情報の周波数領域における分布の中心周波数とは明らかに関連するものであり、Fig. 4 の結果からも、円形情報の周波数領域における分布の中心周波数は干渉縞の周波数に依存しているものと考えられる。

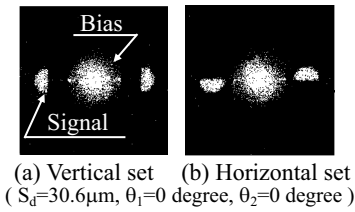


Fig. 5 Speckle patterns grabbed by using half-circle aperture.

また、Fig. 2 (b) で観察されるようにスペックル内に包含される干渉縞の縞方向が垂直方向であることより、Fig. 2 (c) ならびに Fig. 4 (a)~(e) に示すように円形情報の中心周波数は周波数領域においてバイアスを挟んで水平方向の対称の位置に存在している。この場合のスペックルパターンの強度分布 $I(x, y)$ は、円形情報の中心周波数を f_0 とすると、式 (2) として表わすことができる。

$$I(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos(2\pi f_0 x + \varphi(x, y)) \quad (2)$$

ここで、 $a(x, y)$ はバイアス成分、 $b(x, y)$ は振幅成分、さらに $\varphi(x, y)$ はランダム成分を含んだ情報成分である。

そこで、Fig. 1 に示す光学系のミラー 2 のピッチング角度を変化させ、スペックル内に発生する干渉縞の水平方向に対する角度を約 45 度に設定すると、Fig. 4 (f) に示すように円形情報の中心周波数は x 方向のみならず y 方向の成分も含むことになり、周波数領域でその位置は変化し、バイアスに対して対称な水平方向の位置ではなくなることがわかる。これらのことより、この円形情報の信号の中心周波数の位置は、スペックル内に包含される干渉縞の周波数ならびにその方向に依存していることがわかる。

さらに、Fig. 4 に示すように、本光学系においては、変形に関する情報をもつ周波数領域における信号成分の分布形状は円形である。この円形形状についても興味深い性質があることが、Fig. 5 において明らかとなっている。

Fig. 4 に示すように信号情報の円形形状としての広がりがあることが、Fig. 2 (b) に示すように干渉縞の分布が個々のスペックル内に空間的に制限されていることを考慮すると、干渉縞の分布は空間的にそれぞれのスペックルの形状に制約され、さらに、その形状に依存するものであると考えられる。

一般に、スペックルの形状は、観察光学系の絞りの形に依存していることが知られている²³⁾。そこで、本研究で用いた観察光学系の絞りを円形形状から半円形状に変化させた場合に、周波数領域における円形信号の分布形状にどのような変化が生じるかを検討した。この結果が Fig. 5 である。

Fig. 5 (a) では、半円形の開口をもつ絞りを垂直方向に

セットした場合の結果を示している。この場合に採取されたスペックルパターンをフーリエ変換し、周波数領域でその信号分布を観察すると、円形開口を用いていた Fig. 4 では、周波数領域で円形状として広がりをもせていた信号分布は明らかに半円形状として周波数領域に存在している。さらに、Fig. 5 (b) は半円開口を水平に設置した場合の結果である。この場合には、水平方向の半円形状をもつ信号分布として観察することができる。これらのことより明らかに、変形信号は観察光学系の絞り開口の形状に基づいた分布を周波数領域で形成していることがわかる。

以上のように、本研究で用いる光学系によって採取されたスペックルパターンには、さまざまな性質があることがわかる。本研究では、新たに確認されたスペックル干渉現象を積極的に利用することによる、新たな変形解析法を次に提案する。

3. フーリエ変換を用いた 2 枚のスペックルパターンのみによる変形解析

3.1 2 枚のスペックルパターンのみによる縞解析

変形前後のスペックルパターンを用いて変形解析を行う場合には、スペックルパターンを直接解析する手法¹⁵⁻¹⁹⁾と、スペックルグラムを演算したのちに、このスペックルグラムを解析することによって変形解析を行う手法⁸⁻¹¹⁾の 2 つがある。前者はノイズ成分を含む複雑な信号を扱わなければならないために、一般には、高い測定精度を期待することは難しい。

一方、後者は、縞画像を扱うことになるので、従来行われてきたフィルタリング技術を用いる手法が利用でき、このことより高い測定精度を期待できる。ところが、この手法に基づく従来のスペックルグラムの演算過程では、変形前後のスペックルグラム間の差の二乗演算、または絶対値演算によって、スペックルグラムは求められてきた。

これらの考えに基づき、変形前後の 2 枚のスペックルパターン SP_1 , SP_2 の強度分布を式 (3), (4) として定義して、その差の二乗演算を考えると、式 (5) が得られる²⁰⁾。

$$I_{sp1}(x, y) = A_0(x, y) + B_0(x, y) \cos(\varphi_0(x, y)) \quad (3)$$

$$I_{sp2}(x, y) = A_0(x, y) + B_0(x, y) \cos(\varphi_0(x, y) + \Delta\varphi(x, y)) \quad (4)$$

ここで、 $A_0(x, y)$, $B_0(x, y)$, $\varphi_0(x, y)$, $\Delta\varphi(x, y)$ 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。また、本研究で用いる光学系によって採取されたスペックルパターンでは、 $\varphi_0(x, y)$ は式 (2) における $2\pi f_0 x$

+ $\varphi(x, y)$ に相当するものとなる。

$$\begin{aligned} I_{\text{sg}} &= (I_{\text{sp1}}(x, y) - I_{\text{sp2}}(x, y))^2 \\ &= \frac{B_0^2(x, y) + B_0^2(x, y)}{2} \times \cos 2\varphi_0(x, y) + \frac{B_0^2(x, y)}{2} \\ &\quad \times \cos 2(\varphi_0(x, y) + \Delta\varphi(x, y)) \\ &\quad - B_0(x, y)^2 \cos(2\varphi_0(x, y) + \Delta\varphi(x, y)) \\ &\quad - \frac{B_0(x, y)^2 \cos \Delta\varphi(x, y)}{2} \end{aligned} \quad (5)$$

得られた式 (5) の各項を検討すると、下線を引いた 1 項目と 5 項目以外は、すべてランダム成分を含んでいることがわかる。また、1 項目はバイアス成分であることより、主たる変形信号は、第 5 項目に存在していることがわかる。すなわち、バイアス成分を含まない第 5 項のみをスペックルパターンから抽出することができれば、スペックルグラムの解析時において、バイアス成分として振る舞う未知数を 1 つ減らすことができる。このことが実現すると、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。

3.2 フーリエ変換を用いたバイアス成分を含まない縞情報の抽出

式 (2) に示すスペックルパターンからあらかじめフーリエ変換を用いて、バイアス成分を除去し、変形位相を求めることを次に検討する。具体的には、Fig. 2 (c) に示されるような円形形状をした信号分布成分のみをスペックルパターンから抽出し、縞解析を行っている。

式 (2) に示されるようなスペックルパターンの強度分布 $I(x, y)$ は、武田によって示されたように、式 (6) として表され、その式 (6) のフーリエ変換結果 $\mathcal{F}[I(f, y)]$ は式 (7) となる^{25, 26)}。

$$\begin{aligned} I(x, y) &= a(x, y) + c(x, y) \exp(2\pi i f_0 x) \\ &\quad + c(x, y)^* \exp(-2\pi i f_0 x) \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 $c(x, y) = (1/2)b(x, y) \exp(i\varphi(x, y))$ であり、* は共役な複素数を表している。

$$\mathcal{F}[I(f, y)] = A(f, y) + C(f - f_0, y) + C^*(f + f_0, y) \quad (7)$$

ここで、 f は x 方向の空間周波数を表す。

さらに、 $C(f - f_0, y)$ のみを Fig. 3 (d) に示すように周波数領域において抽出し、逆フーリエ変換すると、武田が行ったのと同様に、 $c(x, y) \exp(2\pi i f_0 x)$ 成分を実部と虚部として式 (8) のように得ることができる。ただしここでは、武田によって行われたような周波数領域内の信号成分の移動は行わないものとする。

$$\begin{aligned} I_{\text{sp1R}}(x, y) &= \text{Re}[c(x, y) \exp(2\pi i f_0 x)] \\ &= \text{Re}[(1/2)b(x, y) \exp(2\pi i f_0 x + i\varphi(x, y))] \\ &= (1/2)b(x, y) \cos(2\pi f_0 x + \varphi(x, y)) \end{aligned} \quad (8-1)$$

$$\begin{aligned} I_{\text{sp1I}}(x, y) &= \text{Im}[c(x, y) \exp(2\pi i f_0 x)] \\ &= \text{Im}[(1/2)b(x, y) \exp(2\pi i f_0 x + i\varphi(x, y))] \\ &= (1/2)b(x, y) \sin(2\pi f_0 x + \varphi(x, y)) \end{aligned} \quad (8-2)$$

以上の演算によって、本研究において示したスペックルパターンの周波数領域における円形形状の信号成分は、式 (8) 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。

同様の演算により、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 (9) として求めることができる。

$$I_{\text{sp2R}}(x, y) = (1/2)b(x, y) \cos(2\pi f_0 x + \varphi(x, y) + \Delta\varphi(x, y)) \quad (9-1)$$

$$I_{\text{sp2I}}(x, y) = (1/2)b(x, y) \sin(2\pi f_0 x + \varphi(x, y) + \Delta\varphi(x, y)) \quad (9-2)$$

さらに、スペックルグラムを求めるにあたって、従来のように差の二乗演算を行うと、式 (5) に示すように新たなバイアス成分が発生するので、二乗演算を行うのではなく、式 (8), (9) の実部・虚部を用いた演算により、式 (5) の第 5 項に対応するような変形に関するスペックルグラムを本研究では直接求めることにする。すなわち、あらかじめ式 (8), (9) を 2 倍し、式 (8-1) の実部と式 (9-1) の実部の積、式 (8-1) の実部と式 (9-2) の虚部の積を式 (10), (11) として、 $\pi/2$ rad 位相が異なる信号として求めた。

$$\begin{aligned} SG_1(x, y) &= b(x, y)^2 [\cos(2\pi f_0 x + \varphi(x, y)) \\ &\quad \times \cos(2\pi f_0 x + \varphi(x, y) + \Delta\varphi(x, y))] \\ &= (1/2)b(x, y)^2 [\cos(4\pi f_0 x + 2\varphi(x, y) + \Delta\varphi(x, y)) \\ &\quad + \cos(\Delta\varphi(x, y))] \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} SG_2(x, y) &= b(x, y)^2 [\cos(2\pi f_0 x + \varphi(x, y)) \\ &\quad \times \sin(2\pi f_0 x + \varphi(x, y) + \Delta\varphi(x, y))] \\ &= (1/2)b(x, y)^2 [\sin(4\pi f_0 x + 2\varphi(x, y) + \Delta\varphi(x, y)) \\ &\quad - \sin(\Delta\varphi(x, y))] \end{aligned} \quad (11)$$

このようにして 2 つのスペックルグラムを求めると、Fig. 6 (a), (b) に示すように位相が $\pi/2$ rad 異なった縞画像を得ることができる。

さらに、式 (10), 式 (11) では、第 1 項目に示すスペックルパターン内の干渉縞の周波数 f_0 の 2 倍の周波数領域に広がる $2\varphi(x, y)$ としてのランダム成分と第 2 項目に示す周波数領域における原点周りの $\cos \Delta\varphi(x, y)$ と $\sin \Delta\varphi(x, y)$ とのように、明確に周波数領域で信号成分が分離されている。この性質を用いて、本手法の解析プロセスでは phase of difference method の考え方にに基づき、フィルタリング処理によって所要な信号成分を抽出し、高分解能計測が実現されている。

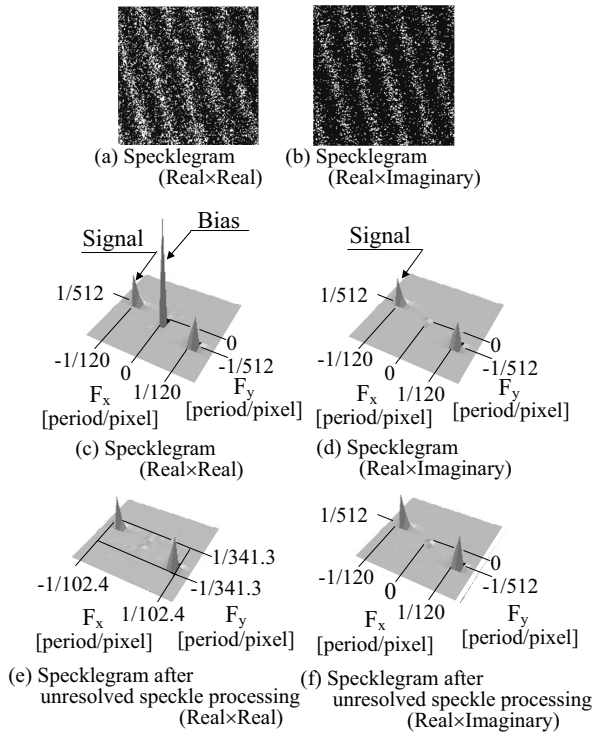


Fig. 6 Processing of speckle patterns.

3.3 アンリソルブドスペckルへの対応

前節までに示した演算においては、式 (10), (11) が示すように、バイアス成分を含まないスペckルグラムとして縞画像を得ることができるはずである。ところが、アンリソルブドスペckルが存在する場合には、変形前後でスペckルパターン強度が変化しないために、変形前後で位相の変化が存在していないかのような状況が発生し、式 (10) の $\cos(\Delta\varphi(x, y))$ は、本来の変形に基づく位相変化 $\Delta\varphi$ による値ではなく、あたかも $\Delta\varphi = 0$ であるかのような演算がなされ、 $\cos(\Delta\varphi) = 1$ として扱われることになる。このような状況は、アンリソルブドスペckルが存在するすべての位置で発生するとともに、アンリソルブドスペckルがスペckルパターン全体に広がると、その地点では本来 $\cos(\Delta\varphi)$ の値であるべき分布が $\cos(\Delta\varphi) = 1$ の値となるために、強度分布が全体的にプラス方向にシフトされることになる。この結果、Fig. 6 (c) に示すように Fig. 6 (a) をフーリエ変換した場合には、あたかもバイアス成分が存在するかのような状況が発生する。一方、Fig. 6 (b), (d) に示す変形前後のスペckルパターンから得られた実部と虚部との演算では、式 (11) に示すように sine 関数の演算となることより、 $\sin(0) = 0$ の関係から、バイアス成分はほとんど存在していないことがわかる。しかし、変形前後のスペckルパターンから得られた実部同士の演

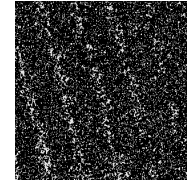


Fig. 7 Map of unsolved speckle in speckle pattern.

算では、上記のような cosine 関数の演算に伴い、Fig. 6 (c) にみられるように大きくバイアス成分の存在が確認されることになる。

このようなアンリソルブドスペckルによる影響を軽減させるために、本研究では、変形前後で強度が変化しない ($I_{sp1}(x, y) = I_{sp2}(x, y)$) 点としてアンリソルブドスペckルの位置を定義し、式 (12) に示すようにアンリソルブドスペckルの存在位置で値を「0」、それ以外の点では、「1」となるような信号分布 $\text{Signal}(x, y)$ を、あらかじめ変形前後のスペckルパターンから Fig. 7 に示すようなアンリソルブドスペckルの存在位置を示したマップとして求め、これを用いて対処することにした。

$$\text{Signal}(x, y) = \begin{cases} 0 & : I_{sp1}(x, y) = I_{sp2}(x, y) \\ 1 & : I_{sp1}(x, y) \neq I_{sp2}(x, y) \end{cases} \quad (12)$$

しかし実際の測定環境では、機械的な振動、空気の擾乱などにより、実際の光学系におけるスペckルパターンの強度信号は一般に変動している。したがって、式 (12) に基づきアンリソルブドスペckルの存在位置を求める際には、変形前後の各スペckルの強度が $I_{sp1}(x, y) = I_{sp2}(x, y)$ となる点のみによって、アンリソルブドスペckルの位置を検出することは難しいものであると考えた。そこで、実際には変形計測を行う前に、実験環境をあらかじめ明確に同定し、振動などによるスペckルパターンの強度分布の変動状況を観察し、変形を伴わない場合の強度変化に関する標準偏差 σ を変形計測実験を行う前に求めた。そして、この強度変化の標準偏差 σ をパラメーターとして、本研究では、変形前後に 2 回の画像サンプリングを行うことを考慮して、 $\pm\sigma$ の範囲、すなわち式 (13) に示すように変形前後の強度の差の絶対値が 2σ よりも小さい点を、アンリソルブドスペckルの存在する点として定義することにした。

$$|I_{sp1}(x, y) - I_{sp2}(x, y)| < 2\sigma \quad (13)$$

本実験結果では、式 (13) の定義に基づくと全画素数の約 70% がアンリソルブドスペckルであると定義されている。ただし、Fig. 7 をみると、Fig. 6 (a) に示す縞画像における本来の変形にかかわる縞画像の黒い部分の多くが、上記の定義に従ってアンリソルブドスペckルである

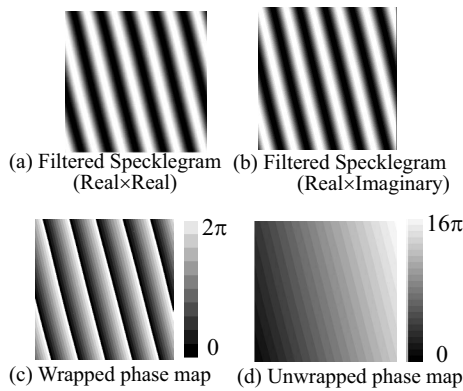


Fig. 8 Specklegrams and phase maps.

と分類されていることがわかる。縞画像の黒い部分は本来変形に伴う強度変化の少ない部分であり、必ずしもアンリソルブドスペckルとはいえないものである。しかし、上記の定義では、明らかにアンリソルブドスペckルと分類されてしまっている。今後、より実質的なアンリソルブドスペckルを抽出する技術の開発をスペckルの性質²⁷⁾に基づいて検討しなければならないものと考えているものの、本研究では、図7に示したマップを用いて、ひとまずアンリソルブドスペckルの影響を回避し、縞解析を続行することとした。

以上のようにして求めたアンリソルブドスペckルの存在位置マップと、式(10)、式(11)で求めたスペckルグラムとの積を求めることによって、アンリソルブドスペckルの影響を軽減させた信号成分を抽出した。これをフーリエ変換して周波数領域で観察したものが、Fig. 6(e)、(f)である。変形にかかわる信号成分の位置は変化していないものの、周波数領域でバイアス成分が解消されていることを確認することができる。

3.4 位相検出演算

Fig. 6(e)に示す通過帯域をもつ二次元バンドパスフィルターを用いて信号成分のみを抽出すると、変形に係る位相が $\pi/2$ rad異なるFig. 8(a)、(b)に示す縞画像が得られる。

Fig. 8(a)、(b)は互いに縞の位相が $\pi/2$ rad異なっているので、Fig. 8(b)の成分をFig. 8(a)の成分で除し、その値を逆正接関数に代入すると、変形に伴う位相の変化成分 $\Delta\phi$ を得ることができる。このようにして得られた位相分布がFig. 8(c)である。これを位相接続したものがFig. 8(d)である。さらに、Fig. 8(d)の位相分布を実際に変形させた量と比較したものがFig. 9である。若干のうねりがローカルに存在しているものの、この場合の実際に回転させた位相分布と計測した位相分布との差のばらつきは

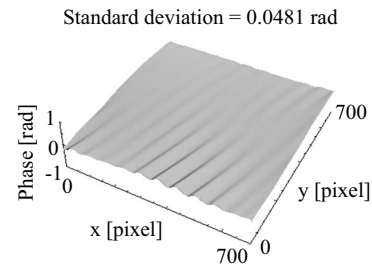


Fig. 9 Error distribution in phase map.

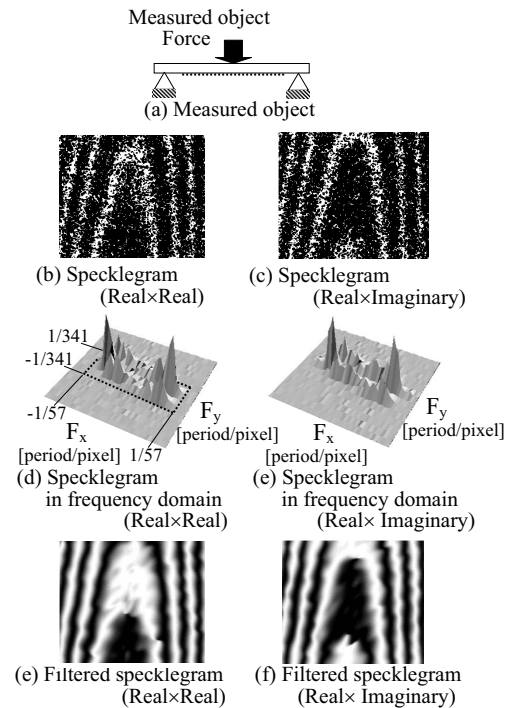


Fig. 10 Processing in deformation including concave phase distribution.

0.0481 radであり、Fig. 1に示す光学系が測定対象に対してダブルパスになっていることを考えると、この値は光源波長の261分の1であることがわかった。非常に高分解能な計測が実現されていることがわかる。

3.5 凹形状に分布した位相分布の測定

次に、Fig. 1に示す光学系において、測定対象を平面の回転による面外変形ではなく、Fig. 10(a)に示す梁の変形として、本手法が凹面変形分布をもつ測定対象に利用可能であるかを検討した。

結果をFig. 10に示す。Fig. 10に示すように、梁の変形の場合についてもFig. 6～Fig. 8と同様の処理を行うと、Fig. 11(b)に示すように、位相接続を行った位相分布を得ることができる。この場合のA-A断面をFig. 11(c)に示す。これらの結果より、凹形状の位相分布の測定も本手法では可能であることがわかる。

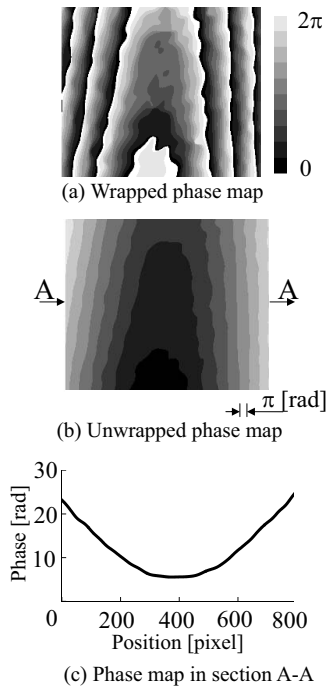


Fig. 11 Phase maps.

本研究において示したように、干渉縞解析で実施されていた縞解析法と同様に、フーリエ変換を用いることによって、位相が $\pi/2$ rad 異なる縞画像を抽出し、その比を求め、逆正接関数によって位相分布を求めることが可能であることがわかる。このようにして、単調増加する位相分布のみならず、凹形状の位相分布をもつ測定対象に対して、縞解析を変形前後の2枚のスペックルパターンのみを用いて計測することが可能であることがわかった。

4. おわりに

本研究では、単調増加・単調減少に限らず凹凸位相分布をもつ変形解析が2枚のスペックルパターンのみで実現可能な手法を提案した。また、新しい光学系によって採取されたスペックルパターン内に記録されている変形に関する情報の周波数領域における分布状況を検討し、アンリソルブドスペックルについての取り扱いについても検討した。

これらの議論に基づき、フーリエ変換技術をもとにした新たなスペックル変形解析法を提案した。この解析法は phase of difference method^{1-4, 8-11)} に基づくものであり、フィルタリング技術を有効に利用することによって、ノイズの影響を軽減し、高分解能な縞解析が実現可能であることを示した。

本報では凹情報の位相分布をもつ面外変形を用いて原理確認実験を行い、新しい解析法の有効性を示した。さらに、平面の回転により発生する面外変形の計測実験によっ

て変形計測時の解析精度を検討し、新しい解析技術が非常に高い測定精度を有していることを示した。

文 献

- 1) D. Malacara: *Optical Shop Testing* (John Wiley & Sons, 1992) pp. 501-652, 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, 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. Pub., Bristol, 1993) pp. 58-70, 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) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) R. S. Sirohi, N. K. Mohan and T. Santhanakrishnan: "Optical configuration for measurement in speckle interferometry," *Opt. Lett.*, **21** (1996) 1958-1959.
- 15) 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.
- 16) 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. Comm.*, **152** (1998) 144-152.
- 17) 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.
- 18) 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.
- 19) D. E. Duffy: "Moire gauging of in-plane displacement using double aperture imaging," *Appl. Opt.*, **11** (1972) 1778-1781.
- 20) 新井泰彦, 井上拓也, 荒井義和, 横関俊介: "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”, 光学, **41** (2012) 96-104.
- 21) M. Lehmann: “Optimization of wavefield intensities in phase-shifting speckle interferometry,” *Opt. Comm.*, **118** (1995) 199-206.
 - 22) M. Lehmann: “Phase-shifting speckle interferometry with unresolved speckles: A theoretical investigation,” *Opt. Comm.*, **128** (1996) 325-340.
 - 23) 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.
 - 24) 新井泰彦, 藤本雅大, 横関俊介: “空間的編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.
 - 25) M. Takeda, H. Ina and S. Kobayashi: “Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry,” *J. Opt. Soc. Am.*, **72** (1982) 156-160.
 - 26) W. W. Macy: “Two-dimensional fringe-pattern analysis,” *Appl. Opt.*, **22** (1983) 3898-3901.
 - 27) J. W. Goodman: *Statistical Optics* (John Wiley & Sons, 1985) pp. 347-356.