

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

新井 泰彦*・島村 遼一*・横関 俊介**

*関西大学工学部機械工学科 〒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

Development of High Resolution Speckle Interferometry Using Only Information in Deformation Measurement Process

Yasuhiko ARAI*, Ryouichi SHIMAMURA* and Shunsuke YOKOZEKI**

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

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

A high resolution new fringe analysis method for ESPI with only one camera is proposed by using features of speckle interferometry in deformation process. The profile of intensity of each speckle of speckle patterns in the deformation process is analyzed by Hilbert transformation. A virtual speckle pattern for creating a carrier fringe image is produced artificially. The deformation map can be detected by the virtual speckle pattern in the operation based on spatial fringe analysis method. Experimental results show that the difference between the results by the new and the ordinary methods is less than 0.12 rad as standard deviation.

Key words: speckle interferometry, ESPI, Hilbert transformation, fringe scanning, deformation measurement

1. はじめに

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なものである¹⁻⁴⁾。この計測法では、一般に、変形前後のスペックルパターンが収録され、これらのスペックルパターン間の強度分布の差の二乗演算あるいは絶対値演算を行うことによってスペックルグラムを求め、その結果として、測定対象の変形量を縞画像として得ることができる。このスペックル干渉計測法は、TVカメラを用いてスペックルパターンを収録する電子スペックルパターン干渉法 (electronic speckle pattern interferometry: ESPI) へと発展し、さらに縞走査技術⁵⁾の導入によって、高分解能化がはかられてきている⁶⁻¹²⁾。

この高分解能化を行うための縞走査技術の導入に当たっては、参照光の位相を制御することによる時間的縞解析法^{6,8)}と参照光の波面を傾けることによってキャリアー縞を発生させる空間的縞解析法とが用いられている⁹⁻¹¹⁾。と

ころが、前者の縞解析技術では、少なくとも3枚の縞画像が必要となるために、ダイナミックに変形する測定対象の変形量を高分解能に捉えるためには、一例として、マルチカメラ技術を利用するなどの光学系¹³⁾が必要となる。

一方、後者の空間的縞解析技術では、変形量が少ない場合には、変形前後の2枚のスペックルパターンに加えて、変形前にあらかじめ参照光の波面を微小角傾けた、キャリアー縞を発生させるための新たなスペックルパターンを収録しておくことによって、キャリアー縞ならびに変形キャリアー縞をスペックルグラムとして求めることができる。この結果、高分解能な縞解析を実現することができる⁹⁾。

ところが、この縞解析技術では、変形量が大きくなり、変形前後のスペックルが空間的に重ならなくなるような状況が発生すると、変形前に収録したキャリアー縞を得るために求めた基準となるスペックルパターンと変形後のスペックルパターンとの間で、測定対象の変形情報を含む変形

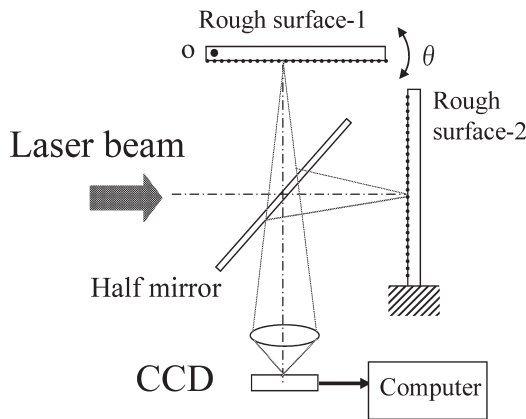


Fig. 1 Optical system.

キャリア縞を得ることができなくなる状況が発生する。このような状況を回避するためには、常にキャリア縞を得ることが可能であり、かつ変形キャリア縞を得ることのできるような基準となるスペックルパターンを確保できる状況を作り出す必要がある。しかしながら、ダイナミックにかつ大変形する測定対象の解析では、時々刻々測定対象が変形する状況の中で、このような都合のよい基準となるスペックルパターンを得ることは、たとえばマルチカメラ技術を用いた解析法などを用いない限り、その実現は不可能である。

このような状況のもとで、変形過程の解析を高分解能に行うための研究がなされている¹²⁻¹⁷。本研究では、このような従来の試みとは異なった考え方のもとに、順次変形するスペックルパターンを連続して収録し、この連続するスペックルパターン内の変形に伴うスペックルの強度変化を用いた、TSPI (temporal speckle pattern interferometry) の考え方¹⁸⁾をさらに発展させることによる高分解能化を目指した新しいスペックル干渉計測法を提案する。

本報では、平面の回転に基づく変位と梁のたわみ変化に基づく変形過程を対象とした実験結果により、提案するスペックル干渉計測法が、上記の大変形時の問題を解決するものであり、かつその測定結果が3枚のスペックルパターンを用いる従来法との差のばらつきが約1/100波長程度に収まることを示している。このことより、変形計測において、変形過程内の情報のみを用いて、従来と同程度に高分解能なスペックル干渉計測が実現可能であることを示している。

2. 縞解析原理

2.1 従来法とその問題点

本研究において提案する縞解析技術を実現するために、Fig. 1 に示すスペックル干渉光学系を用意した。レーザー

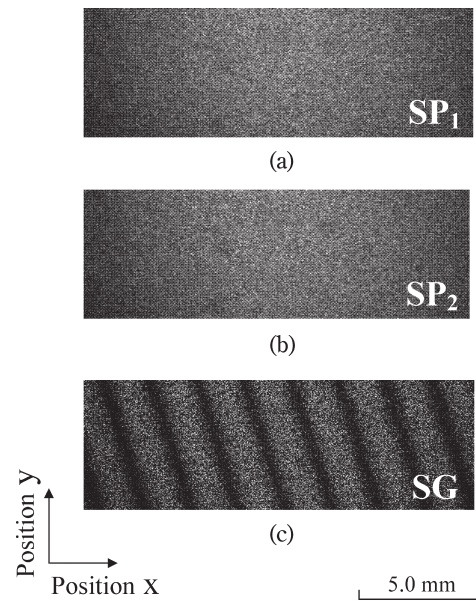


Fig. 2 Speckle patterns and specklegram for deformation. (a) Speckle pattern before deformation, (b) Speckle pattern after deformation, (c) Specklegram of deformation.

光源からのビームは、ハーフミラーによって分割され、それぞれの粗面に到達する。ここで、粗面1を測定対象とし、粗面2を参照面とする。このようにした場合に、それぞれの粗面からの散乱光が再びハーフミラーを介してCCDカメラに到達するとき、それぞれの散乱光間で複雑に干渉し合うことによって、Fig. 2 (a) に示すようなスペックルパターン (SP₁) が得られる。ここで、Fig. 1 の粗面1がoを中心として微小角(θ)回転したものとすると、この粗面1の回転に伴う変位を測定対象とし、Fig. 2 (b) に示すように測定対象の変形後のスペックルパターン (SP₂) を変形後の状態の記録として収録しておく。

この場合に、次の式(1)のように演算を行うと、Fig. 2 (c) に示すような変形情報を含むスペックルグラムSGが得られる。

$$SG = (SP_1 - SP_2)^2 \quad (1)$$

このようなスペックルグラムによって変形の状況は可視化され、観察可能となる。ただし、Fig. 2 (c) に示すように、本実験では、本手法の有効性を示すために若干干渉縞が傾きをもつような状況を意識的に作り出して以下の実験を行った。

このようなスペックル干渉計測において、Fig. 3 に示すように変形前にスペックルパターンAを、変形後にスペックルパターンBを収録し、式(1)に基づき変形に関するスペックルグラムを求めるだけでなく、変形前にあらかじめ基準となる粗面を微小角(δθ)回転させ、キャリア

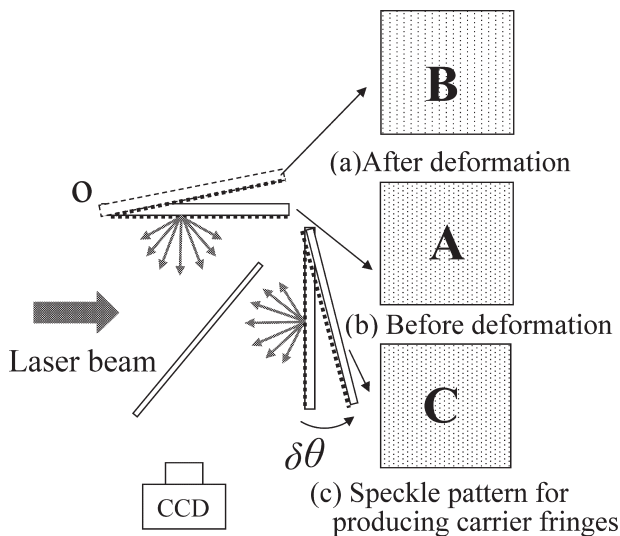


Fig. 3 Fringe scanning by spatial fringe analysis.

一縞を発生させるためにスペックルパターン C を収録することが従来行われていた。

このようにすれば、スペックルパターン A と C との間で式 (1) に基づいてスペックルグラムを求めれば、キャリア縞となり、スペックルパターン B と C では変形キャリア縞を得ることができる。これらのスペックルグラムをそれぞれに解析し、その差の位相分布を求めると高分解能な縞解析が実現する。

ところが、このような縞解析では、変形量が大きくなり、変形前後で対応するスペックルが空間的に重ならなくなった場合には、スペックルパターン C と大変形した後に捉えられたスペックルパターン B との演算において、縞が発生しなくなる。この状況は、変形過程が高速であり、かつ短時間に大変形が生じる場合を考えると、従来法による縞解析法では、ダイナミックに大変形する変形計測の実施は困難であることがわかる。

このような状況を打開するためには、キャリア縞を発生させるために必要なスペックルパターン C に存在するスペックルと変形後に改めて収録されたスペックルパターン B に存在するスペックルが重なり合わない場合の問題、すなわちスペックルの空間的な対応が必要であるといった解析過程での条件を必ずしも満たさなくてもよい処理法が求められる。

2.2 変形過程におけるスペックルパターン内のスペックル強度の変化

Fig. 1 に示す光学系において、測定対象が変形した場合に、微小変形であれば、測定対象はほぼ同一方向に平行移動 (本報で取り扱う以下に示す実験は、測定対象としての

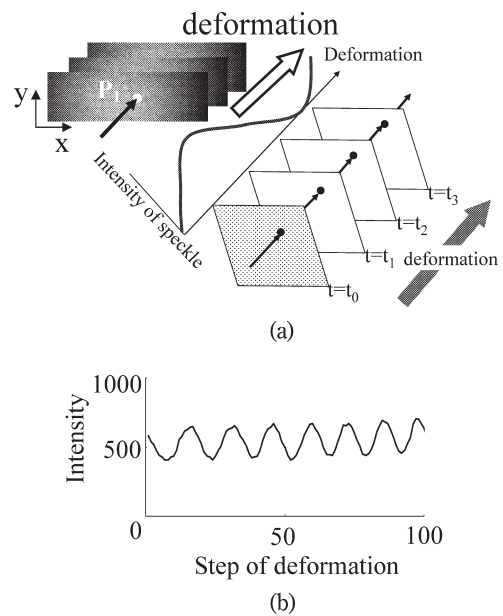


Fig. 4 Change of intensity of speckle in deformation process. (a) Schematic of changing intensity of speckle, (b) Change of intensity in deformation.

粗面の法線ベクトルが 8.5×10^{-5} rad 程度変化するような状態を対象に実施している) しているものと考えられる。この場合、スペックルパターン内のスペックルの強度変化は、Fig. 4 (a) に示すように光路長の変化に伴い、光源の波長の 2 分の 1 を周期として変化する強度分布をもつことになる (Fig. 4 (b) 参照)。ただし、本研究では、1 s 間に 30 枚の画像を収録することができるカメラを用いて、スペックルパターンを時系列に記録した。したがって、変形過程は、1/30 s を 1 step として記録されている。

ところが、スペックルパターン内のすべてのスペックルが変形に伴いこのように強度変化をするわけではない。

Fig. 5 (a) に示すように、変形に伴いスペックルの強度が Fig. 4 (b) に示すような正弦波状の挙動を示さないものがスペックルパターン内には多数存在する。このようなスペックルは、一般には unsolved speckle¹⁹⁾ とよばれている。このようなスペックルの存在を、実際に個々のスペックルの強度分布としてひとつひとつ目視 (実験では、1 枚のスペックルパターンにおいて 1 万個のスペックルを対象として、それぞれの条件で、5 枚のスペックルパターンに対して実施した) で調べてみると、Fig. 5 (b) に示すような傾向があることがわかる。すなわち、スペックル径が大きくてもあるいは小さくても unsolved speckle の存在確率は高く、CCD のピクセルとほぼ同等の大きさになった状況で、その存在確率は小さくなることがわかる。この結果に基づけば、スペックルパターンを収録する CCD の画

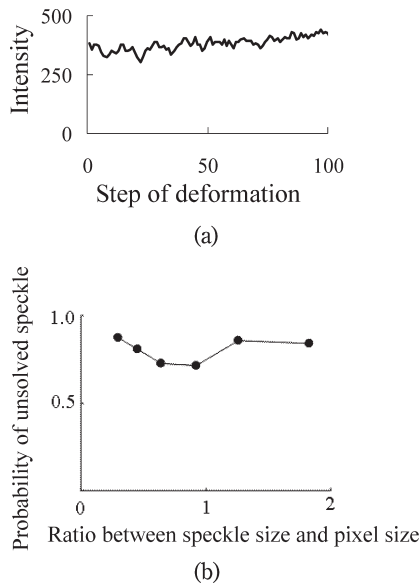


Fig. 5 Unsolved speckle in speckle pattern. (a) Profile of intensity in deformation, (b) Probability of unsolved speckle.

素の大きさ程度にスペックル径を設定するように観察系の絞りを設定して、スペックルパターンを記録すればよいことがわかる。しかしながら、ここに示す結果においても、最もよいと考えられる状況でさえも、全体の4分の3程度が unsolved speckle であることがわかる。本研究では、このような unsolved speckle を演算過程からできる限り排除するために、本実験では、 $6.7\ \mu\text{m}$ のピクセルサイズの CCD カメラを用いて、平均のスペックル径が $6.14\ \mu\text{m}$ になるように絞りを設定して、実験を行った。この結果、スペックルサイズとピクセルサイズとの比は 0.92 となり、Fig. 5 (b) に基づくと、unsolved speckle の発生確率が低い条件で実験を行うことができた。

しかしながら、現状では、これらの unsolved speckle が本手法の処理結果にどのように影響するかについては、十分に検討がなされていない。今後、より高精度な演算を行うために、この問題を検討する必要があるものと考えている。

2.3 新しい縞解析原理

Fig. 4 (b) のスペックルの強度分布の変化についてのグラフでは、Fig. 3 の測定対象の回転中心が大きく画像の枠内から外れているために、Fig. 2 (c) に示すカメラで観察した変形に伴う縞数と Fig. 4 (b) の縞数とは対応していない。しかしながら、Fig. 4 (b) に示す変形に伴うスペックルの強度分布の変化は、Fig. 4 (a) に示すような測定対象の変形過程をすべて記録しているのものであると考えられる。ここで、微小変形時には、変形量は単調増加あるいは単調減少していると仮定するとともに、ピクセルごとに変形過

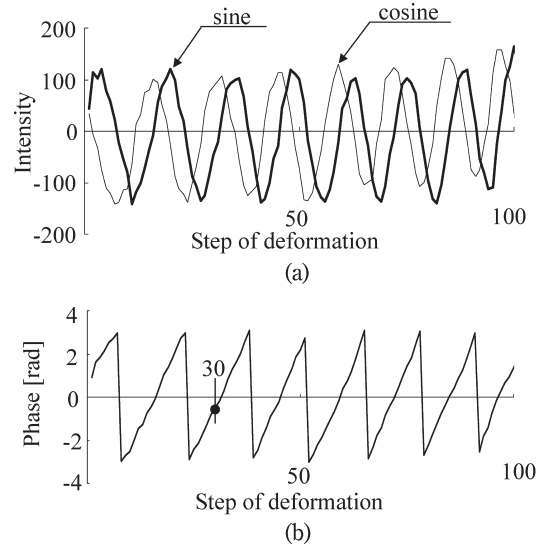


Fig. 6 Phase of speckle in deformation process. (a) Intensity of speckle in deformation process, (b) Phase of intensity of speckle in deformation process.

程を横軸としてグラフを描くと、変形量とスペックルの強度との関係は以下に示すように取り扱うことができる。

ここで、Fig. 4 (b) に示す信号の位相が単調増加信号であると仮定してヒルベルト変換²⁰⁻²⁵⁾すると、Fig. 6 (a) に示すような cosine 成分と sine 成分を得ることができる。

このようにして得られた cosine 成分と sine 成分の結果から逆正接関数を用いてこの信号の位相を求めると、Fig. 6 (b) に示すような位相分布を求めることができる。

この場合に、Fig. 6 (b) に示す位相分布を常に正確に求めることができるのであれば、個々のスペックルにおいて変化前のスペックルパターン内のスペックルの位相と変形後の位相との位相差を求めれば、それがすなわち、変形過程トータルの変形対象のこの点における位相の変化量として求めることができるはずである。

しかしながら、このような位相分布を求める過程において用いるヒルベルト変換はフーリエ変換演算をもとに行っている²¹⁾ので、窓関数を用いた演算を用いても、信号の始点・終点付近の演算結果には、若干振動するなどのあいまいさが存在し、単に上記の変形前後の位相差を求める処理では、高い精度の結果を得ることができない問題がある。さらに、unsolved speckle の存在によって、単に位相差を求める演算手法では、Fig. 5 (a) に示す変形過程における挙動からもわかるように、Fig. 6 (b) に示すような正確な変形に伴う位相分布を求めることができない。この結果として、正確な位相分布を測定対象全面において求めることはできなかった。したがって、ここでは上記のような始点と終点の位相差を求めるような単純な演算による位

相分布解析法ではなく、Fig. 3のCに相当するようなキャリア縞を発生させることのできる新たなスペックルパターンを人工的に創成し、それをを用いて縞解析を行う手法を提案する。

Fig. 6 (b) は、変形過程におけるスペックルパターン内のひとつのスペックルに注目した場合の強度分布の位相を示している。ただし、前述のように変形の始点・終点においての位相値にはあいまいさが残っているので、ここでは、このあいまいさの問題を回避するために、変形開始後30 step目に収録した画像に着目して、30 step目でのFig. 3のCに相当する人工的なスペックルパターンを変形過程内で得られた100枚のスペックルパターンを用いて創成した。この場合に、画像内のひとつひとつのピクセルにおける30 step目での位相の値は、上記のように対象となるスペックルに対して変形過程で収録したすべてのスペックルパターン（具体的には、この実験では100枚として行った）を用いて、Fig. 6 (a) から Fig. 6 (b) に示す結果を得るのと同じ演算によって求められた。また、同時にスペックルパターンのバイアス成分と振幅成分はヒルベルト変換演算時に、周波数の低い成分を用いてバイアス成分を推定し、かつヒルベルト変換によって求めた cosine 成分と sine 成分とをそれぞれ2乗し加え合わせ、その後平方根を求めることによって振幅成分を推定した。

このようにして、本研究においては、Fig. 3に示すCに相当するスペックルパターンを変形が始まった後30 step目の画像として人工的に創成した。

Fig. 7 (a) に、個々のピクセルにおいて求めた30 step目の位相値を、空間的な1ラインとして並べることによって、スペックルパターンの位相分布の一例として示している。さらに、次に示す式(2)のようにスペックルパターンの強度分布を数式モデルとして表すと、Fig. 7 (a) に示す位相分布 $\phi(x)$ と、上記の演算によって求めたバイアス成分 $A(x)$ ならびに振幅成分 $B(x)$ を用いて創成したスペックルパターンの強度分布を Fig. 7 (b) として示すことができる。

$$I = A(x) + B(x) \cos[\phi(x)] \quad (2)$$

さらに、次に示す式(3)のように式(2)にキャリア成分を与えた場合の強度分布は Fig. 7 (c) に示すことができる。ただし、 x はスペックルパターン画像の水平方向の位置の座標を示す。

$$I = A(x) + B(x) \cos[\phi(x) + \omega_c \cdot x] \quad (3)$$

このようにして求めた Fig. 3に示すCに相当するスベ

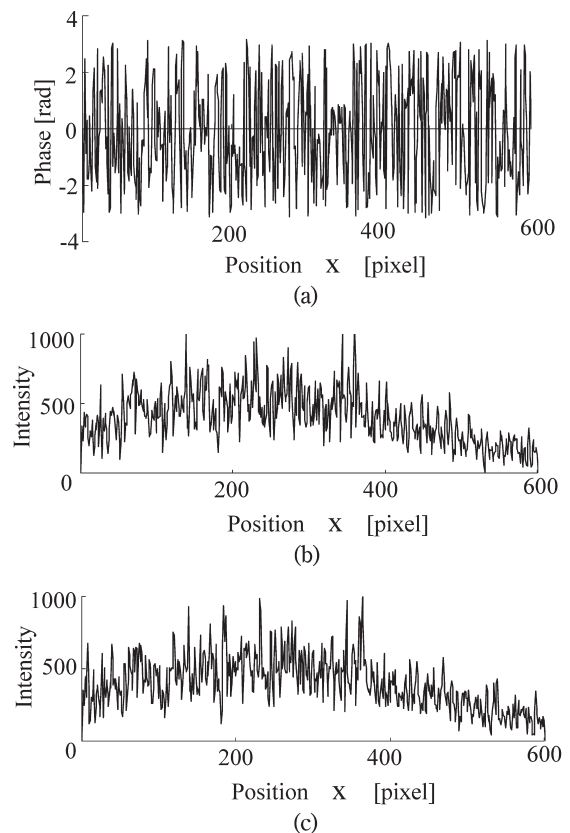


Fig. 7 Phase of speckle and virtual speckle pattern. (a) Phase map of speckle pattern, (b) Intensity distribution of virtual speckle pattern, (c) Intensity distribution of virtual speckle pattern with carrier information.

ックルパターンと、変形過程で収録した30 step目のスペックルパターンとの間で式(1)の演算を行うと、Fig. 8 (a) に示すようなキャリア縞を求めることができる。さらに、このキャリア縞をフーリエ変換すると、このキャリア縞には、Fig. 8 (b) に示すようにキャリア信号成分とバイアス成分とが存在することがわかる。この場合、キャリア縞の周波数成分は、式(3)に示すキャリア縞周波数 ω_c の値によって設定することができる。実験では、Fig. 8 (b) に示すように、キャリア縞の周波数は12 pixel 1周期になるように設定した。

ここで、Fig. 9に示すように、変形前のスペックルパターンと変形後のスペックルパターンに対して、新たに人工的に創成した Fig. 3のCに相当するキャリア縞を発生させるための仮想スペックルパターンを用いて、それぞれの変形キャリア縞およびキャリア縞を式(1)によって演算した。それらの結果を Fig. 9 (a), (b), (c) にそれぞれ示す。Fig. 9 (a), (b), (c) に示す x, y は、Fig. 8 (a) に示す空間座標における位置 x, y を表している。また、それらの結果をフーリエ変換したものを Fig. 9 (d), (e), (f)

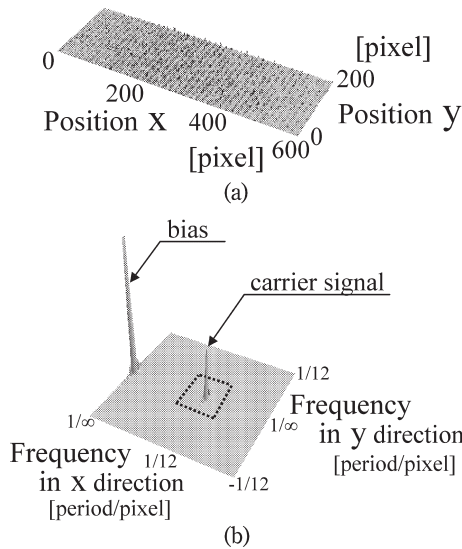


Fig. 8 Carrier fringes at 30th step of deformation. (a) Carrier fringes at 30th step, (b) Carrier fringes at 30th step in frequency domain.

に示す。この場合の F_x , F_y は Fig. 8 (b) に示す x , y 座標に関する空間周波数と同じものを表している。

Fig. 9 (e) に示す 30 step 目のキャリア縞の周波数領域でのキャリア信号（ここでは、キャリア縞は、12 pixel 1 周期として設定されている）に比べて、Fig. 9 (d) に示す変化前のスペックルパターンによって求めた変形キャリア縞では、若干周波数領域において変形キャリア縞信号の存在位置は変化していることがわかる。同時に、Fig. 9 (f) の変化後の変形キャリア縞信号の位置は、 x 方向のみならず y 方向へも変形が進んでいることを示し

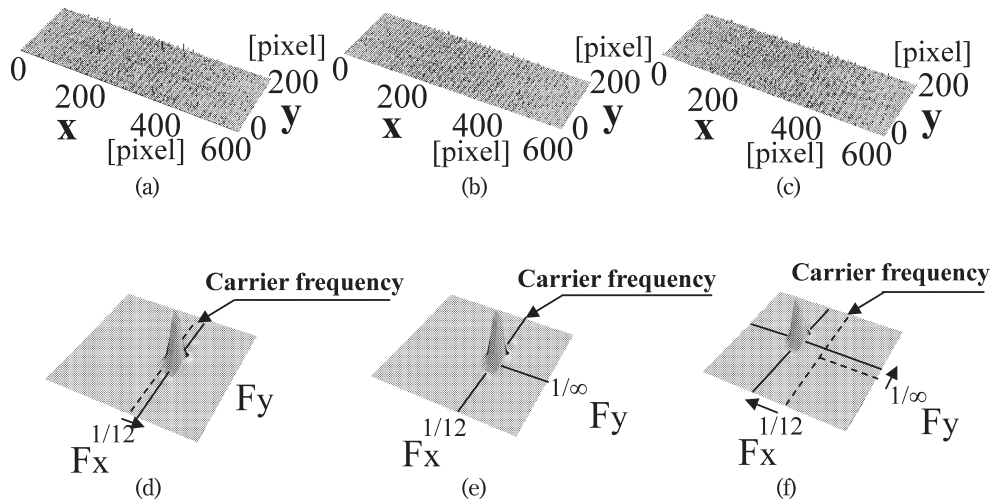


Fig. 9 Deformed carrier fringes. (a) Deformed carrier fringes by before deformation and virtual speckle patterns, (b) Carrier fringes by 30th step and virtual speckle patterns, (c) Deformed carrier fringes by after deformation and virtual speckle patterns, (d) Fringes shown in (a) in frequency domain, (e) Fringes shown in (b) in frequency domain, (f) Fringes shown in (c) in frequency domain.

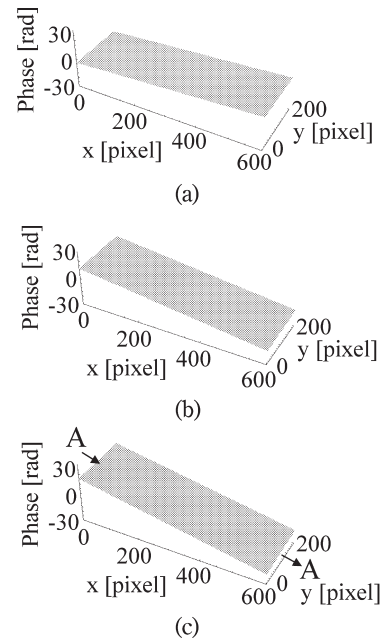


Fig. 10 Phase maps in deformation process of plane. (a) Phase map of deformation-1 (0-30), (b) Phase map of deformation-2 (30-100), (c) Phase map of total deformation (0-100).

ている。すなわち、これらの結果より発生した縞が傾いていることがわかる。

Fig. 9 (d), (f) に示す 2 つのスペックルグラムを空間的縞解析法によって位相を求めたものが、Fig. 10 (a), (b) の位相分布である。これら 2 つの位相分布は、30 step までの変形過程と 30 step 以降の変形過程とに全体の変形過程を分けて求められたものであり、その処理は、従来のスペ

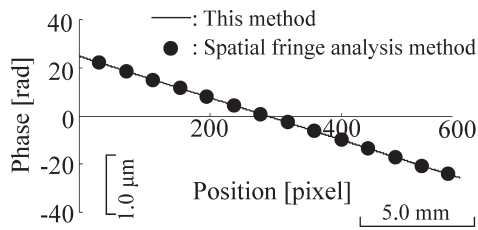


Fig. 11 Comparison of the this method and spatial fringe analysis method.

ックルパターンCを用いて求められたと同じ演算に基づいて行われている。また、それぞれの位相分布が30 stepで分離されて求められているものであるから、30 step以降の位相分布は従来どおりに取り扱われ、30 step以前の位相分布は位相の符号が逆になっている。したがって、2つの位相分布において30 step以降の位相分布から30 step以前の位相分布を減算すれば、トータルの位相分布を統合して求めることができる。このようにして求めたものが、Fig. 10 (c) に示すトータルの変形に対する位相分布である。このようにして、変形前後間のスペックルパターンを順次収録し、処理することによって、Fig. 3 に示すような第3番目のスペックルパターンCを収録することなく高分解能な縞解析の実現が可能であることがわかった。

現状では、測定対象の変形過程を1/30 sごとに記録している。この場合に、変形量に応じて収録するスペックルパターンの枚数を適宜定める必要がある。本研究における実験では、メモリー容量、カメラのシャッタースピード、画像サンプリングタイムなどを考慮して、ひとまず100枚の収録を行うことにした。演算時間は、横600 pixel、縦200 pixelの100枚のスペックルパターンすべてのピクセルにおいて30 step目の位相分布を求め、さらにキャリア縞を発生させるためにその位相分布にキャリア成分を与え、Fig. 3のCに相当するスペックルパターンを創成する処理において、Pentium-4 レベルのクロック3.0 GHzのパソコン3台で約6時間が必要であった。今後、より演算時間の短縮が求められる状況にある。

3. 結果と検討

Fig. 10 (c) に示した位相分布のA-A断面の位相を、従来法としての3枚のスペックルパターンを用いて縞解析⁸⁻¹⁰⁾したものと比較した結果が、Fig. 11 である。この結果において、従来法の結果と本手法との差の標準偏差は、0.079 radであり、光学系がダブルパスであることを考慮すると、従来法との差異は1/160 波長であることがわかる。

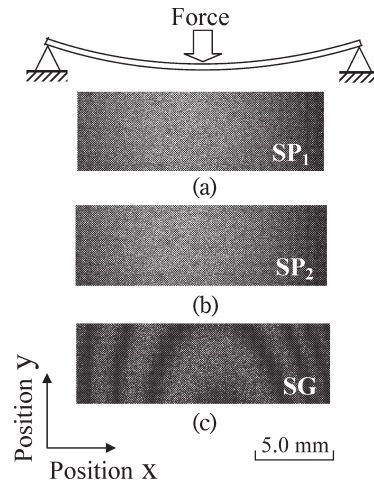


Fig. 12 Speckle patterns and specklegram in deformation of beam. (a) Before deformation, (b) After deformation, (c) Specklegram.

2章に述べたように、平面が回転するような単純な変位過程では、Fig. 3のCに示すような役割を果たすスペックルパターンの人工的創成は可能であることがわかった。

次に、Fig. 12 に示すような梁がたわむ場合の変形解析を検討した。

3.1 梁のたわみ計測への適用

平面の回転による変位過程の解析と同様に、Fig. 12 に示すように、スペックルパターン内のスペックルの変形に伴う強度分布より、変形時のそれぞれの点における位相分布をFig. 6に示した結果と同様の演算によってFig. 13として求めた。この場合にも、Fig. 12に示すような梁の固定点は、今回の画像の枠外であるために、Fig. 12 (c)の変形を示した縞画像における縞数とFig. 13 (a)の変形に伴うスペックルの強度分布における縞数とは一致していない。Fig. 3のCに相当するスペックルパターンを、Fig. 14 (a)に示すように位相分布をそれぞれのスペックルの変形過程に対して求め、Fig. 7 (c)に示すものと同様にFig. 14 (b)として求めた。この場合も、30 step目の縞情報を求めている。すなわち、Fig. 9と同様に変形開始後30 step目を境として2種類の変形キャリア縞（変形前と創成した30 step目のキャリア情報をもつ仮想スペックルパターンとによる変形キャリア縞ならびに、変形後と創成した30 step目のキャリア情報をもつ仮想スペックルパターンとによる変形キャリア縞）をFig. 15に示すように求めて、以下の処理を行った。

Fig. 15では、Fig. 9に示すような平面の回転に伴う変位過程とは異なり、Fig. 15 (a), (b), (c)に示す変形キャリア信号は、Fig. 15 (d)ならびに(f)に示すように

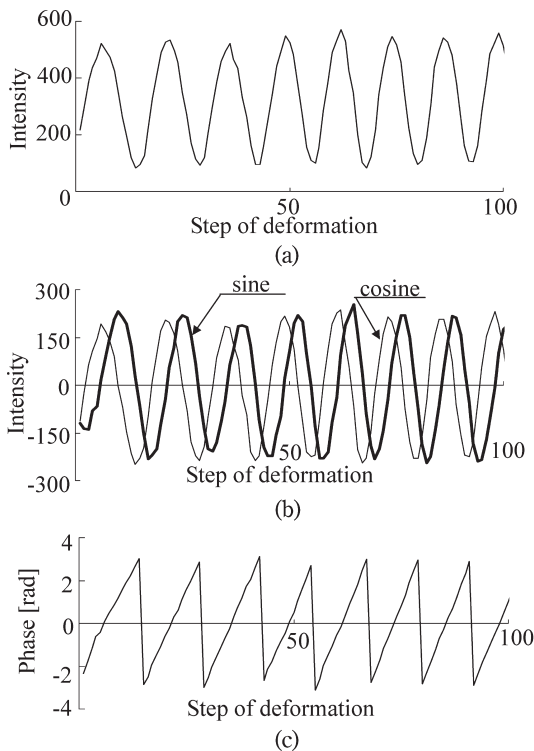


Fig. 13 Phase of speckle in deformation process. (a) Profile of intensity in deformation process, (b) Intensity of speckle in deformation process, (c) Phase of intensity of speckle in deformation process.

周波数領域において複雑な分布をもっている。

これらの縞画像を位相解析すると、Fig. 16 (a), (b) に示すような2種類の位相分布として求めることができる。この結果を Fig. 10 で行ったと同様に処理することによっ

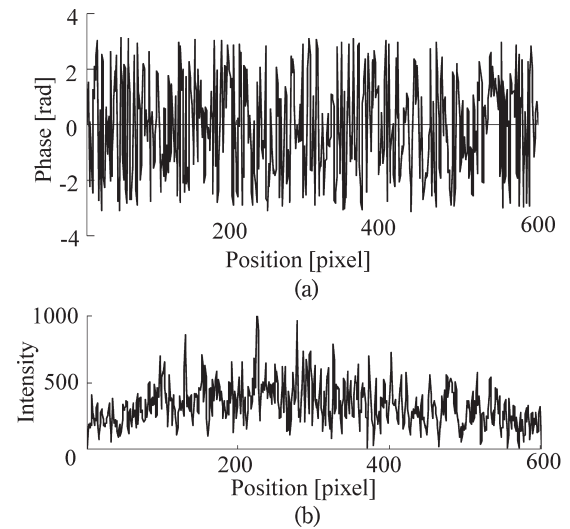


Fig. 14 Phase of speckle and virtual speckle pattern. (a) Phase map of speckle pattern, (b) Intensity distribution of virtual speckle pattern with carrier information.

て、変形開始より変形が終了するまでのトータルの変形過程における位相分布を、Fig. 16 (c) として求めることができる。

Fig. 16 (c) に示した結果のB-B断面を3枚のスペックルグラムを用いた従来法による結果と比較したものが、Fig. 17 である。この場合の両者の差の標準偏差は0.111 radであり、平面の回転による変形計測結果とほぼ同等に、1/110 波長で従来法と同様に測定が行われていることがわかった。さらに、ここでは変形終了後の変形量のみならず、変形開始後から20 step ごとの変形量も求めた。こ

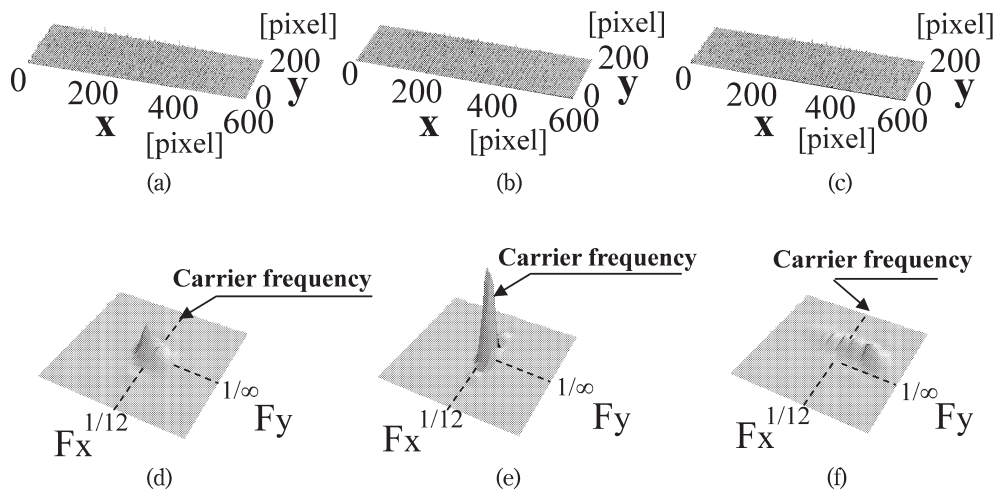


Fig. 15 Deformed carrier fringes. (a) Deformed carrier fringes by before deformation and virtual speckle patterns, (b) Carrier fringes by 30th step and virtual speckle patterns, (c) Deformed carrier fringes by after deformation and virtual speckle patterns, (d) Fringes shown in (a) in frequency domain, (e) Fringes shown in (b) in frequency domain, (f) Fringes shown in (c) in frequency domain.

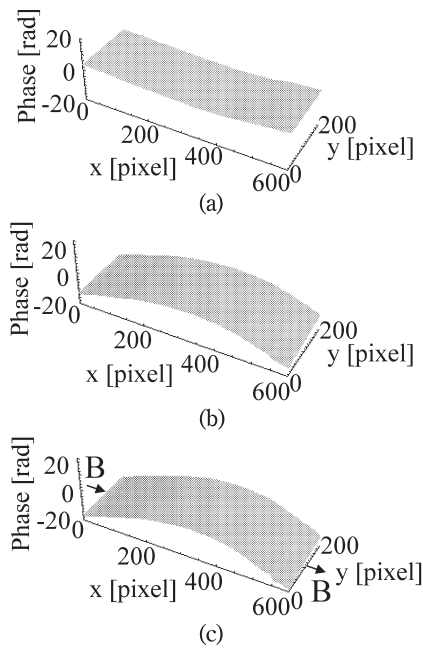


Fig. 16 Phase maps in deformation process of beam. (a) Phase map of deformation-1 (0-30), (b) Phase map of deformation-2 (30-100), (c) Phase map of total deformation (0-100).

のような変形過程内の変形量も、容易に求められることがわかった。

以上のように、本研究で提案した新しい縞解析法は、スペックル干渉計測において、従来の3枚の縞画像を用いた縞解析では行うことができなかった変形過程のみの情報で、従来法と同程度に高分解能な縞解析が行えるものであった。

現状での解析法では、変位(変形)時に位相が単調増加/単調減少であることが求められている。今後、より一般的な変形計測を行うために、このような仮定を必要としない解析法の開発が必要であると考えている。

4. おわりに

本研究において、以下の事柄について検討し、実験によりその有効性を示した。

- (1) 本研究では、ダイナミックに変形する測定対象の変形過程のスペックルを記録することによって、従来行われていたようなキャリヤー縞を発生させるための基準となるスペックルパターンを記録することなく、従来法と同程度の測定精度で縞解析を実現することができた。この場合に、従来法としての空間的縞解析に基づく結果との比較を行うと、その演算結果の差のばらつきは、平面の回転による変形の場合には、0.079 [rad] であり、梁のたわみ実験では、0.111 [rad] で

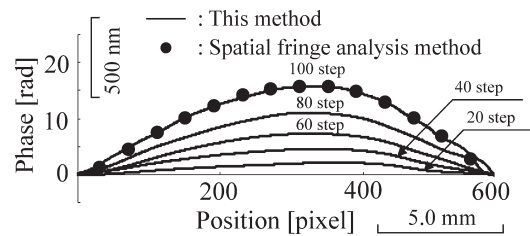


Fig. 17 Comparison of the this method and spatial fringe analysis method.

あった。この結果は、いずれも波長の100分の1以上に従来法の結果と差異はない縞解析が実現されていることを示すものである。

- (2) 本手法は、平面の回転に伴う変形のような単純変形過程のみならず、梁が変形するような凸状態の位相情報をもつ変形過程でも、従来法と変わらない測定精度で変形解析が可能であることがわかった。
- (3) 本手法による演算は、変形過程のすべての画像のすべてのピクセル情報を用いているために、膨大な演算時間が必要であることがわかった。今後、演算時間の短縮についても検討する必要があることがわかった。

文 献

- 1) D. Malacara: *Optical Shop Testing* (John Wiley & Sons, New York, 1992) pp. 501-598.
- 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. 409-476.
- 4) B. J. Thompson: *Electronic Speckle Pattern Interferometry Principles and Practice* (SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, WA, 1996) pp. 1-518.
- 5) 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.
- 6) J. Kato, I. Yamaguchi and Q. Ping: "Automatic deformation analysis by a TV speckle interferometer using a laser diode," *Appl. Opt.*, **32** (1993) 77-83.
- 7) P. Meinschmit, K. D. Hinsch, R. S. Sirohi and B. J. Thompson: "Section 10: Phase shifting," *Selected papers on electronic speckle pattern interferometry principles and practice, SPIE Milestone Series Volume MS 132* (SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, WA, 1996) 457-518.
- 8) S. Nakadate and H. Saito: "Fringe scanning speckle-pattern interferometry," *Appl. Opt.*, **24** (1985) 2172-2180.
- 9) 新井泰彦, 横関俊介: "2次元空間的縞解析法のスペックル干渉法への適用", *光学*, **29** (2000) 250-255.
- 10) 新井泰彦, 横関俊介: "空間的縞解析法を用いた電子のスペックル干渉法のパラメーターの設定", *光学*, **30** (2001) 49-55.
- 11) 新井泰彦, 藤本雅大, 横関俊介: "空間的縞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クレ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.
- 12) Y. Arai and S. Yokozeki: "Control of phase of fringes in speckle interferometry for application of fringe scanning method," *J. Mod. Opt.*, **52** (2005) 1355-1366.
 - 13) Y. Arai and S. Yokozeki: "Electric speckle pattern interferometry based on spatial fringe analysis method using multi camera," *Speckle 2006 International Conference* (Nimes, France, 2006) 63410k, Proc. SPIE, **6341** (2006).
 - 14) V. Madjarova, S. Toyooka, R. Widiastuti and H. Kadono: "Dynamic ESPI with subtraction-addition method for obtaining the phase," *Opt. Commun.*, **121** (2002) 35-43.
 - 15) J. L. Marroquin, M. Servin, R. Rodriguez Vera: "Adaptive quadrature filters and the recovery of phase from fringes pattern image," *J. Opt. Soc. Am. A*, **14** (1997) 1742-1753.
 - 16) J. L. Marroquin, R. Rodriguez-Vera and M. Servin: "Local phase from local orientation by solution of a sequence of linear system," *J. Opt. Soc. Am. A*, **15** (1998) 1536-1544.
 - 17) K. G. Larkin, D. J. Bone and M. A. Oldfield: "Natural demodulation of two-dimensional fringe patterns. I. General background of the spiral phase quadrature transform," *J. Opt. Soc. Am. A*, **18** (2001) 1862-1870.
 - 18) C. Joenathan, B. Ranze, P. Haible and H. J. Tiziani: "Speckle interferometry with temporal phase evaluation for measuring large-object deformation," *Appl. Opt.*, **37** (1998) 2608-2614.
 - 19) J. A. Quiroga, M. Servin, J. L. Marroquin and J. A. Gomez-Pedrero: "An isotropic n-dimensional quadrature transform and its applications in fringe pattern processing," *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection* (Munich, Germany, 2003) pp. 259-267, Proc. SPIE, **5144** (2003) 259-267.
 - 20) V. D. Madjarova, H. Kadono and S. Toyooka: "Dynamic electronic speckle pattern interferometry phase analyses with temporal Hilbert transform," *Opt. Express*, **11** (2003) 617-623.
 - 21) 谷田貝豊彦: 第二版応用光学光計測入門 (丸善株式会社, 2005) pp. 141-146.
 - 22) 三上直樹: はじめて学ぶデジタル・フィルターと高速フーリエ変換 (CQ出版, 2005), pp. 171-188.
 - 23) S. L. Hahn: *Hilbert Transforms in Signal Processing* (Artech House, Norwood, MA, 1996), pp. 3-396.
 - 24) S. Haykin: *Communication Systems* (John Wiley & Sons, New York, 2001) pp. 373-380 and pp. 723-725.
 - 25) J. Y. Stein: *Digital Signal Processing* (John Wiley & Son, New York, 2000) pp. 279-288.