

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精度向上

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

Improvement of Measurement Accuracy in Speckle Interferometry Using Only Two Speckle Patterns

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

The fringe analysis technology using only two speckle patterns before and after a deformation has been proposed. Furthermore, three dimensional deformation measurement system is constructed by using this novel speckle interferometry. However, when this system is applied to the measurement of deformation in buckling phenomenon, it is confirmed that there are some troubles by the multi-recording technology and the distribution of speckle noise. In this paper, the pre-treatment in speckle interferometry for reducing such errors is proposed by discussing the error sources of such troubles concerning measurement accuracy. The influence of the error source is reduced by the proposed method.

Key words: electronic speckle pattern interferometry (ESPI), improvement of measuring accuracy, noise reduction, multi-recording, speckle noise

1. はじめに

スペックルとは、レーザー光のような高い干渉性をもつ光線が粗面に照射された際に、散乱する光同士が複雑に干渉することにより発生する現象である¹⁻³⁾。このスペックルには、粗面から光が散乱する際に位相情報が記録されている。この情報を用いると、粗面の変形計測が可能となる⁴⁾。このような性質を利用したスペックル干渉計測法において、変形前後の2枚のスペックルパターンのみを用いたスペックル変形計測光学系⁵⁾が報告され、さらに、その光学系を組み合わせることによって、従来困難であった三軸方向に同じ測定感度をもつ三次元スペックル変形計測法が提案されている^{6,7)}。

この三次元スペックル変形計測法では、平面の回転による単調な変位(変形)の計測において、高い分解能をもつ測定結果が得られることが報告されている⁷⁾。しかし、梁の座屈における面内・面外変形計測のような微小かつ複雑

な変形分布の計測においては、2台のカメラを用いてそれぞれにスペックルパターンを撮影する光学系を用いた変形計測法では問題とならなかったようなスペックルノイズによる測定結果への影響が、この新しい手法を用いた場合には発生している^{6,8)}。この問題の発生は、スペックル干渉現象を用いた新たな三次元変形計測法において、誤差要因となる2つの大きな問題が存在しているからであると考えられる。

その第1の問題は、1台のカメラによって x, y, z 軸3方向の情報を取得しなければならない多重記録において発生する、スペックルパターンのSN比の劣化に由来するものである。また、第2の問題は、スペックル干渉計測が直面するスペックルノイズの問題である。

本研究では、それぞれの問題についてその所在を明確にし、編解析を行う前に問題の軽減に向けたスペックルパターンへの画像としての前処理法を提案している。この処

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

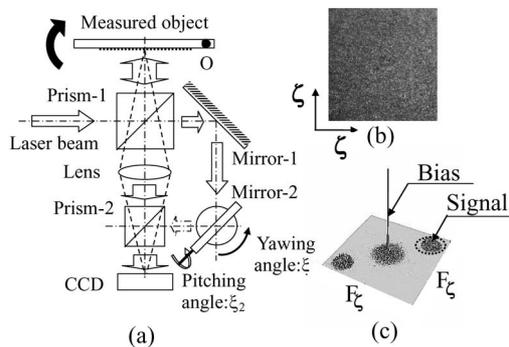


Fig. 1 Speckle interferometry using only two speckle patterns: (a) optical system, (b) speckle pattern, (c) signal of speckle pattern in frequency domain.

理法は、一般に実施されている汎用的な画像処理技術ではなく、干渉現象における物理現象に沿った処理技術であることより、問題を円滑に軽減することができる手法である。

2. 変形前後 2 枚のスペックルパターンのみで解析が可能な光学系と搞解析

2.1 スペックル干渉光学系

本研究で用いる三次元変形計測のための光学系の基本となるスペックル干渉光学系は、参照光を平面波とし、さらに物体光と角度をもたせた状態でこの2つの光波を干渉させる、Fig. 1 (a) に示すスペックル干渉計である⁵⁾。この干渉計を用いて撮影された Fig. 1 (b) に示すスペックルパターンの強度分布のフーリエ変換結果は、Fig. 1 (c) に示すように、バイアス成分から信号成分が分離されたものとなる。これは、軸外しデジタルホログラフィーにおける解析結果と同様の現象によるものである。この性質を用いると、前報⁵⁾ に示したように、変形前後の2枚のスペックルパターンのみを用いた高分解能な変形計測が可能となる。

また、三次元の3方向それぞれに、上記のスペックル干渉計を Fig. 2 に示すように3セット組み込んだ光学系を

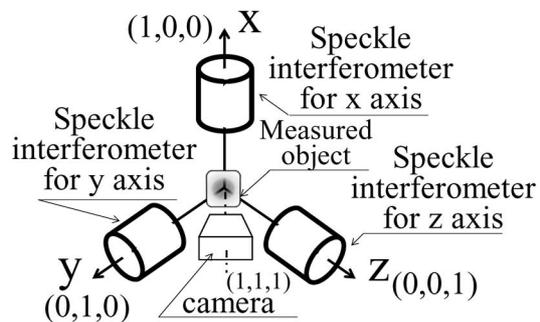


Fig. 2 Concept of proposed optical system and global coordinate system in the experiment.

用いると、三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な光学系として構成することができる⁷⁾。

この場合に、1台のカメラにより、 x, y, z 方向の情報が、各軸の参照光と物体光との交差角度を設定することによって、Fig. 3 (b) に示すような異なったキャリア信号のもとに、Fig. 3 (c) に示す周波数領域において分離された信号として、Fig. 3 (a) に示す1枚のスペックルパターン内に多重記録されている。本研究では、多重記録技術を利用するにあたって、画素ピッチが $1.6 \mu\text{m}$ 、画素数が $1024 \times 1024 \text{ pixel}$ ならびに 4096 階調のカメラを使用している。

上記の考え方に基づく Fig. 2 に示す光学系では、 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を $(1, 1, 1)$ 方向に設定し、 x, y, z 軸方向それぞれに Fig. 1 (a) に示すスペックル干渉計を配置した構成となっている。この三次元変形計測システムでは、Fig. 4 に示すように3つのレーザー光がグローバル座標としての x, y, z 三軸方向に平行に照射され、測定領域は三軸が交差する原点近傍として設定されている。また、原点近傍では、カメラの撮像素子上のローカル座標に対応するように、座標系が ζ, ξ として設定されている⁷⁾。

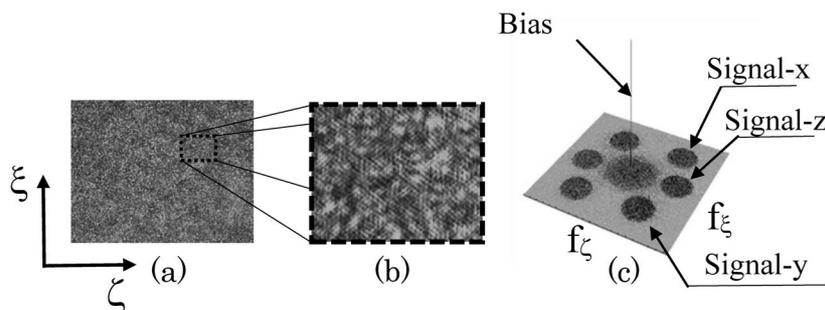


Fig. 3 Speckle pattern and signals in frequency domain: (a) speckle pattern grabbed by this optical system, (b) magnified detail of speckle pattern, (c) signals of deformation in frequency domain.

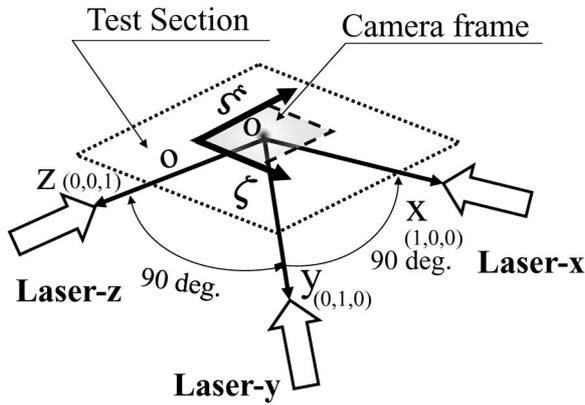


Fig. 4 Measuring area constructed by x-y-z axes.

2.2 基本的な縞解析

本研究の基本となる、1つのレーザーのみを用いたスペックル干渉計における縞解析の流れ⁵⁻⁷⁾をFig. 5に示す。実際の処理では変形前後のスペックルパターンに同じ処理を施すので、ここでは、変形前のスペックルパターンへの処理についてのみ説明する。

Fig. 5 (a)に示すスペックルパターンには、参照光を平面波として与えることでキャリア信号が付加されている。白く枠取りをした領域を拡大して観察すると、(b)に示すような縞信号が記録されていることがわかる。これがキャリア信号である⁷⁾。このスペックルパターンを、Fig. 5の②に示すようにハニング窓を利用してフーリエ変換すると⁹⁾、(c)に示すようにバイアス成分と分離された信号成分を観察することができる。この信号成分を二次元フィルターを用いて抽出し、③に示すように逆フーリエ変換すると、(d)に示すような変形に伴う信号によって変調されたキャリア縞を抽出することができる。さらに、ヘテロダインの考え方に従って、④に示すように変形前後のスペックルパターンから抽出された信号(d)との間で掛け算をすると⁵⁾、(e)に示すような変形成分を縞画像として抽出することができる。この信号をフーリエ変換して周波数領域で観察した結果が(f)である。変形に伴う信号成分が縞画像信号として周波数領域でピークをもっていることがわかる。

そして、この縞画像情報から空間的縞解析法¹⁰⁾に基づいて、(g)に示すような変形に関する位相情報を最終的に検出できる。ここで扱ったような平面を回転させることによって変位分布を与える実験⁷⁾では、与えた変形量は既知であるので、その値を取り除いた差の分布に対する標準偏差(SD)を求めると、0.068 radのばらつきが存在していることが確認できる。

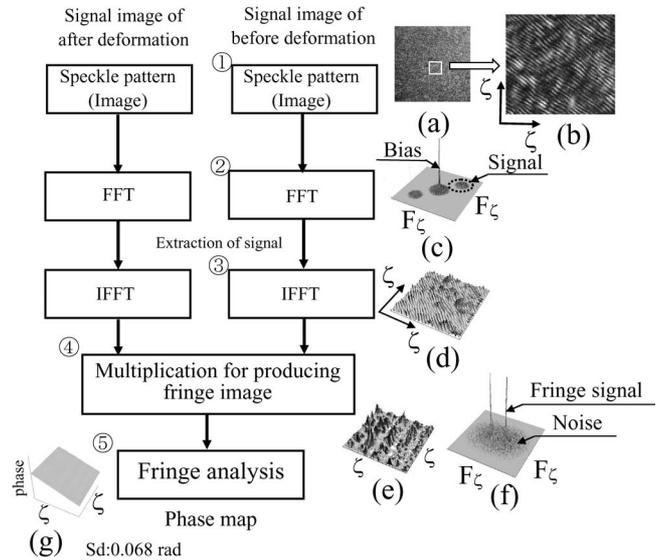


Fig. 5 Algorithm of fringe analysis: (a) speckle pattern, (b) magnified detail of speckle pattern, (c) speckle information in frequency domain, (d) extracted signal from speckle pattern, (e) fringe pattern concerning a deformation, (f) fringe pattern in frequency domain, (g) phase map concerning deformation. SD: standard deviation.

この演算過程において、すでに、(d)に示すゴツゴツとした不規則な信号、ならびに(f)に示すような信号成分の足下に広がるノイズ成分が、縞解析において問題を引き起こす原因となりうるということが考えられる。

3. 測定精度の劣化要因

3.1 複雑に変形する対象物の変形計測における測定精度の劣化

本研究で利用する光学系では、前報⁷⁾に示すような平面の回転に伴う単調な変位に対しては、三軸方向の測定感度が同じであることより、Fig. 5に示したように高い分解能を有することが確認されている。ところが、Fig. 6 (a)に示す厚さ0.08 mm、長さ22 mm、幅5 mmの銅の梁にPZT(圧電素子)によって力を加えた場合に発生する座屈における変形計測では、Fig. 6 (b)に示すようなスペックルグラムとして、面内と面外に変形が同時にかつ複雑に発生する対象物の変形を取り扱うことになる。その結果、Fig. 7に示す梁の座屈変形測定結果としての面内・面外変形測定結果では、Fig. 5 (g)に示すような平面の回転による単純な変位に対する計測ではみられないノイズの影響を強く受けることが経験されている⁸⁾。

特に、座屈現象では、Fig. 7 (b)に示す面内での変形量は微少なので、面内変形測定結果においてSN比の低下は測定結果に強く影響し、ゴツゴツとしたスペックルの影響

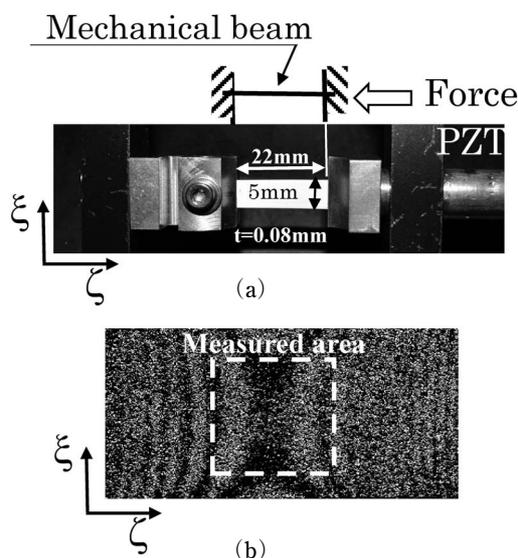


Fig. 6 Apparatus of buckling generator: (a) buckling generator, (b) specklegram of fringes of deformation at buckling.

を観察することになる。

本研究では、測定対象に強く影響を及ぼす要因として、1台のカメラによる多重記録時のスペックルパターン^{6,7)}のSN比の劣化を考えるとともに、スペックルパターンにおけるスペックルノイズの測定結果への影響を検討する。

3.2 多重記録によるスペックルパターンのSN比の劣化

Fig. 2に示すように、三軸方向に設置された光学系の x 方向のみのレーザー光源を用い、カメラの光軸周りの平面の回転に伴う面内変位計測⁷⁾を通して、多重記録における問題の所在を検討した。この計測時に記録されたスペックルパターンをフーリエ変換したものがFig. 8(a)である。また、 x 方向と y 方向の2つの光源を用いた場合、さらに、 x, y, z 方向を同時に記録し、フーリエ変換した結果がそれぞれFig. 8(b), (c)である。3方向の情報を1つのカメラで撮影した場合でも、前報⁷⁾に示すように x, y, z 方向の参照光が物体光に対して角度をもってカメラに入射

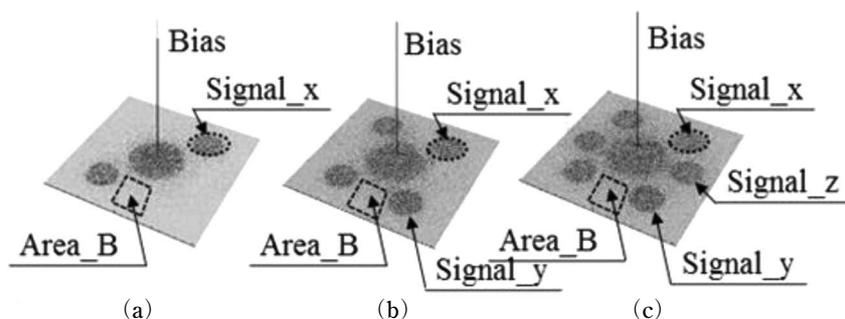


Fig. 8 Noise distribution at multi-recording in frequency domain: (a) only x direction beam, (b) x and y direction beams, (c) x, y , and z direction beams.

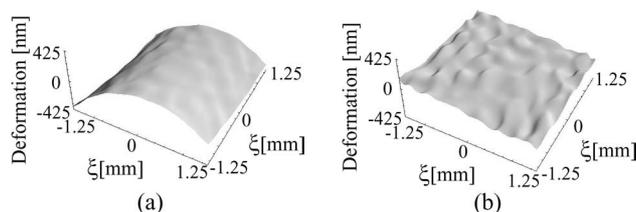


Fig. 7 Distribution of out-of-plane and in-plane deformation in buckling of beam: (a) out-of-plane deformation, (b) in-plane deformation.

していることより、 x, y, z 軸で異なったキャリア成分が与えられている。すなわち、周波数領域では、 x, y, z の情報は分離された形で記録されている。

ところが、 x 方向のみ、 x, y 方向、さらに x, y, z 3方向とレーザー光源（波長：532 nm）の数が増えるに従い、周波数領域における信号成分周辺のノイズ成分が増加し、全域が黒っぽくなっている様子をFig. 8において定性的に確認することができる。

さらに、Fig. 8(a), (b), (c)に共通するArea_Bの信号成分と x 方向の信号成分との間でそのばらつきについての比をそれぞれ計算し、デシベル表示をすると、Fig. 9に示すようにレーザー光源が増えるに従い、○に示すようにSN比が劣化していることがわかる。レーザー光源が3個になった場合には、単独の光源の場合に比べて20 dBも劣化が進んでいる。

このようなスペックルパターンに対してSN比の劣化が生じた場合の、 x 方向での位相検出結果のばらつきを調べると、Fig. 9の●に示すように、SN比の劣化に伴い、測定結果のばらつきが増大し、測定精度が劣化していることがわかる。

このことより、多重記録技術は1台のカメラにより3方向の情報を取得することができる有意義な測定技術である半面、周波数領域全般に存在するノイズ成分が、光源の数を増加させるごとに測定結果に影響を及ぼす誤差要因と

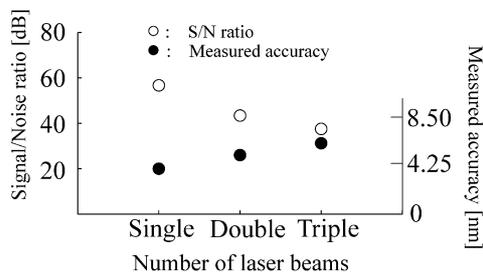


Fig. 9 SN ratio and measured accuracy.

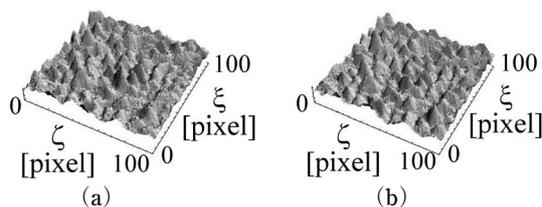


Fig. 10 Distribution of speckle intensity: (a) before deformation, (b) after deformation.

なっていることがわかる。

3.3 スペックルノイズの測定精度への影響

しかし、スペックル干渉計測においては、多重記録によるスペックルパターンへのSN比の劣化による影響とともに、より大きなノイズ源が存在している。その誤差要因は、スペックルノイズの存在である。

Fig. 5 に示すように、本手法では変形前後のスペックルパターンに対して、②に示すようにハンギング窓を用いたフーリエ変換によって、周波数領域において(c)に示す信号成分を抽出し、再びハンギング窓を用いて逆フーリエ変換することによって、(d)に示す信号成分を抽出している。この場合、(d)に示すように信号成分には、スペックルによるゴツゴツとした縞解析にとって不要な成分が存在している。

この成分は、Fig. 10 に示すようにスペックルパターンの強度分布を拡大して詳細に観察すると、ゴツゴツとしたスペックルの粒の分布が、変形前後のスペックルパターンに存在していることがわかる。さらに、それらのゴツゴツとした強度分布は、変形前後で若干ではあるが、形も、また空間的な存在位置も変化している。すなわち、変形前後でFig. 5 (d) に示すゴツゴツとした分布は、変形に伴い、存在位置もその強度分布も変化している。そのために、変形前後のスペックルパターン間で何らかの空間的な引き算を行っても、このスペックルのゴツゴツとした影響の除去は困難であるとともに、単純に引き算を行うと、スペックルのゴツゴツとした成分の影響はさらに空間的に広がる複雑な誤差要因となることが考えられる。すなわち、従来の

ように変形前後をひとつの連続した現象としてとらえ、単に変形前後のスペックルパターン間で引き算をしたのちに2乗するなどのような処理¹⁰⁾を行うと、変形前後で複雑に変化するスペックルの性質に伴い、スペックルノイズの処理がさらに複雑になるものと考えられる。したがって、このような問題が生じないように処理が、測定精度の向上への取り組みにおいて求められる。

4. 測定精度の改善のための縞解析におけるスペックルパターンへの前処理

4.1 縞解析におけるスペックルパターンへの前処理のあり方

本研究では、多重記録によるスペックルパターンのSN比の低下と、スペックルノイズに基づく両者による測定精度への影響を軽減させることを目的とした、新たな縞の解析手順を以下のように提案する。

Fig. 5 の④に示すように、変形前後のスペックルパターンからそれぞれ抽出された信号を掛け合わせることによって得られた、Fig. 5 (e) に示す変形成分に相当する縞情報をフーリエ変換すると、周波数領域でFig. 5 (f) に示すように縞情報の周辺にノイズ成分が存在していることがわかる。

平面の回転に伴う単調な変位分布であれば、可能な限り狭い通過帯域を周波数領域内に設定したうえで、かつ単一ピークとして変形情報が存在しているの、周波数領域で単調な信号分布に対してノイズ成分を丁寧に省きつつ抽出すれば、ノイズの影響を可能な限り受けることなく縞解析を行うことができる¹⁰⁾。

しかし、座屈解析のように複雑な変形が存在する場合には、周波数領域で変形情報が広がりを見せ、かつFig. 5 (f) に示すような縞情報にノイズ成分が混在していることより、ノイズ成分の除去は困難を極めることになる。結果として、Fig. 7 (b) に示すように、変形解析結果に誤差分布として残存してしまうことになる。

このように、変形に関する縞情報を、変形前後の2枚のスペックルパターンからの演算により一度形成すると、その状態からのノイズの除去は困難になる。したがって、スペックルの影響の除去に関する処理を変形前後のスペックルパターンの個々の段階で行うと、スペックルの影響を複雑化させることなく縞解析の実施が可能となる。そのため、縞解析を行う前のスペックルパターンに波形整形の前処理を行うことを本研究では提案している。

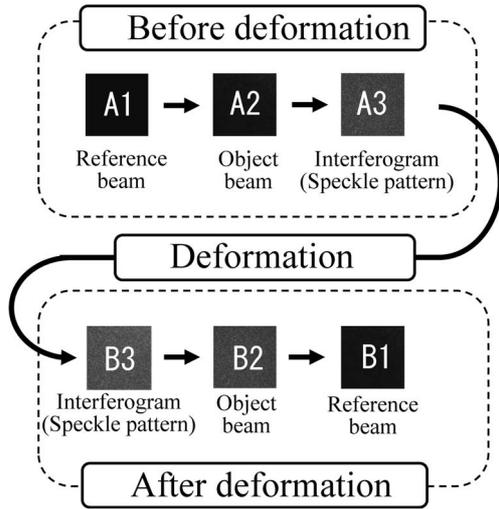


Fig. 11 Image sampling order.

4.2 スペックルパターンの多重記録によるSN比の劣化に対する処理

スペックルは、レーザー光のような高い干渉性をもつ光線が、粗面に照射されたときに散乱する光が互いに干渉し合い発生する現象であることより、多重記録によるSN比の劣化は、Fig. 9に示すように、レーザー光線の数の増加による周波数領域全般におけるノイズレベルの上昇が問題となっていると考えられる。

粗面からの散乱光間の干渉は、現実には複雑になされている。しかし、ここでは最も簡単なモデルとして、二光波の干渉現象を考えることからノイズレベルの上昇過程を検討する。

光学系の物体光と参照光の2つの光波を U_1, U_2 として定義する。

$$U_1 = a_1 \exp(i\theta_1) \exp(i\omega t) \quad (1)$$

$$U_2 = a_2 \exp(i\theta_2) \exp(i\omega t) \quad (2)$$

ここで、 a_1, a_2 はそれぞれの光波の振幅である。また、 θ_1, θ_2 は位相成分であり、 ω は角周波数である。この2つの光が干渉したと考えると、一般的な干渉縞が得られる。

$$|U_1 + U_2|^2 = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) \quad (3)$$

実際には、スペックルはより多くの光波間の干渉によって形成されていることから、より複雑な干渉現象が存在しているはずであるが、簡単なモデルとしてそのバイアス成分を次のようにして取り扱うことにした。

ここで、 U_1, U_2 を個別に記録しておくとする、それぞれは強度分布であるから、両者の和は

$$|U_1|^2 + |U_2|^2 = a_1^2 + a_2^2 \quad (4)$$

となる。したがって、式(3)と式(4)の差をとると、

$$|U_1 + U_2|^2 - |U_1|^2 - |U_2|^2 = 2a_1a_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) \quad (5)$$

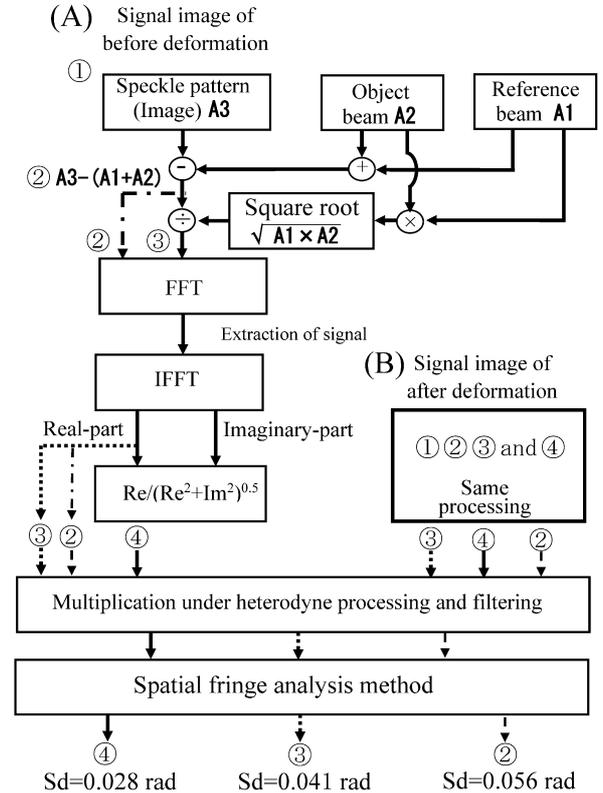


Fig. 12 Proposed processing for fringe analysis. ② is the process that removes only bias component. ③ is the process that removes bias component and amplitude of carrier fringe signal. ④ is the process that removes bias component and amplitude of carrier fringe signal, and the amplitude of carrier fringe is normalized. Sd: Standard deviation of error.

となり、バイアス成分の除去が考えられる。

さらに、 $|U_1|^2 \times |U_2|^2 = (a_1 a_2)^2$ であることより、

$$(|U_1 + U_2|^2 - |U_1|^2 - |U_2|^2) / \sqrt{(|U_1|^2 \times |U_2|^2)} = 2 \cos(\theta_1 - \theta_2) \quad (6)$$

として、干渉縞の振幅成分からも物体光、参照光の影響を除去することが可能となる。

このような処理を用いて、バイアス成分と振幅成分の影響を可能な限り除去し、スペックルパターンのSN比に関する誤差要因の除去を次に考える。

ノイズ成分の除去を実施するにあたって、Fig. 11に示すような順序で、変形前後において、参照光のみの画像(A1, B1)、物体光のみの画像(A2, B2)、そして物体光と参照光を干渉させた場合に発生するスペックルパターン(A3, B3)を記録し、その画像を用いてFig. 12に示すような処理を行う。

Fig. 12では、Fig. 5と同様に変形前後で同じ処理をスペックルパターンに施すことになるので、(A)に示した変形前のスペックルパターンに対する処理方法のみを説明する。(B)に示す変形後のスペックルパターンに対しても、

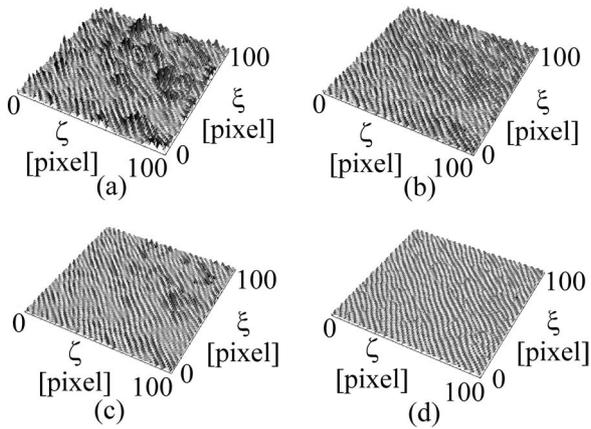


Fig. 13 Noise reduction in fringe signals: (a) original processing, (b) removal of bias component, (c) removal of bias and amplitude components, (d) fringes with normalized amplitude.

(A) と同様の処理を行うものとする。

Fig. 12 の ②, ③ は, Fig. 11 に示すように, 測定前に物体光 (A2) と参照光 (A1) を個別に撮影した情報を用いて干渉光としてのスペックルパターンを処理した結果である。すなわち, 変形前後で記録したスペックルパターンにおけるバイアス成分の除去結果 (式 (5) に対応する処理で, 具体的には ② として $A3 - (A1 + A2)$ の演算に基づき得られた結果) と, 振幅成分の除去結果 (式 (6) に対応する処理であり, 具体的には ③ として $(A3 - (A1 + A2)) / \sqrt{A1 \times A2}$ の演算結果) における SN 比の劣化による影響を軽減している。

これらの処理により, Fig. 5 (d) に示したスペックルパターンとしての信号成分は, Fig. 13 (b), (c) に示すように, Fig. 5 (d) に示したいかなる処理も行わない場合の結果としての Fig. 13 (a) と比べると, スペックルの影響が緩和されていることがわかる。さらに, Fig. 5 (f) に示したヘテロダインの考え方に従い, 算出した変形縞情報のフーリエ変換結果を比較すると, Fig. 14 (a), (b), (c) に示すように, スペックルパターンのバイアス成分の除去, 振幅成分の除去によって, 信号成分周辺のノイズ成分の分布が減少していることがわかる。

その結果, これらの処理を施した場合の Fig. 5 に示した縞解析では, 変位に関する位相分布の実際に与えた変位量と測定結果との差を求めると, Fig. 12 の ②, ③ のような処理を行わない場合には, Fig. 15 (a) に示すような誤差分布が存在し, その位相分布のばらつきは標準偏差 (SD) として 0.068 rad (実際の長さとして 5.8 nm) となる。これに対して, 式 (5) に基づいてバイアスのみを除去 (② の処理) した場合は, Fig. 15 (b) に示すような誤差分布が

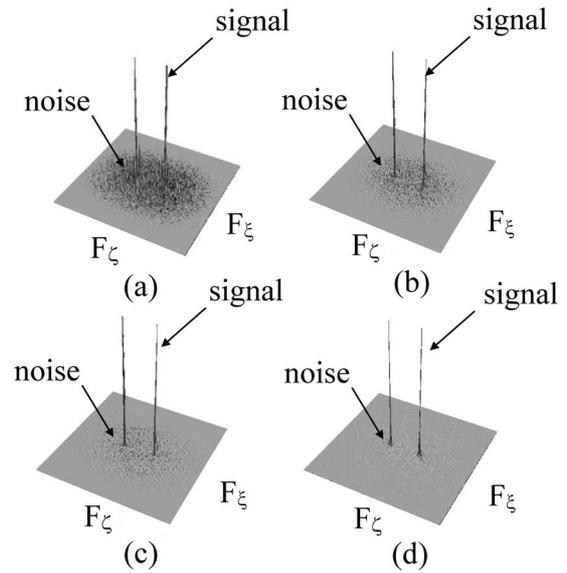


Fig. 14 Change of signal and noise in fringes by processing, (a) original processing, (b) removal of bias component, (c) removal of bias and amplitude components, (d) fringes with normalized amplitude.

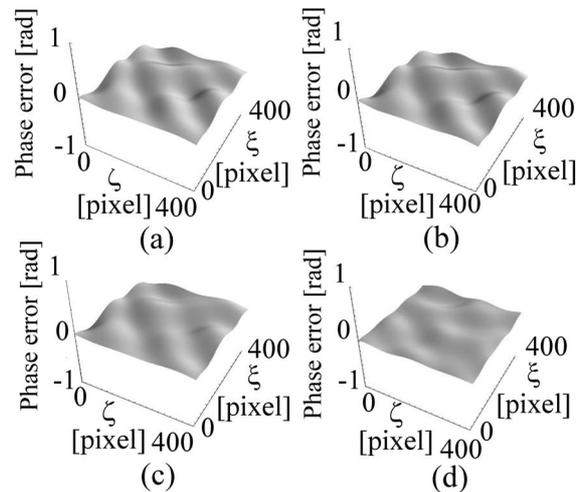


Fig. 15 Error distribution: (a) original processing (0.068 rad), (b) removal of bias component (0.056 rad), (c) removal of bias and amplitude components (0.041 rad), (d) fringes with normalized amplitude (0.028 rad).

求められ, この場合には, Fig. 12 の ② として示すように, 測定結果のばらつきは標準偏差 (SD) として 0.056 rad (4.7 nm) 程度に抑えられていることがわかる。同様に, 式 (6) に基づいた処理では, 振幅成分からもスペックルノイズの影響が除去 (③ に相当) されることになり, Fig. 15 (c) に示すような誤差分布となっている。この場合には, Fig. 12 の ③ として示すように, 標準偏差 (SD) として 0.041 rad (3.5 nm) と, そのばらつきはさらに減少することが確認できる。

4.3 スペックルノイズによる測定結果への影響の軽減

さらに、フーリエ変換により抽出された、スペックルパターンに記録された情報において、Fig. 5 (d) に示すようなスペックルのゴツゴツとした影響をより積極的に除去することを考える。その際に、スペックルパターンから必要な信号成分を抽出するために用いた逆フーリエ変換の結果の実部と虚部を用いて、キャリア縞の振幅が1となるように正規化する処理を行う。この処理結果を用いると、変形前後のスペックルパターンから抽出された信号は、Fig. 13 (d) に示すように、スペックルのゴツゴツとした分布をさらに緩和することができる。

この正規化処理の目的は、スペックル干渉変形計測法独特の変形過程におけるスペックルの移動に対する影響を緩和しようとするところにある。

スペックル干渉変形計測法では、物体光の波面は、本来の変形に伴う情報以外に、測定対象の変形に伴い発生するスペックルの移動による情報を含んでいる。したがって、③の処理により、式(6)に示す信号の振幅成分を処理した情報が得られるものの、この処理が変形前後の異なった位置に存在するスペックルを扱う2枚の画像間の情報により行われていることを考えると、スペックルの移動に伴う影響を除去しているものとは考えられない。本研究では、このスペックルの移動に伴うノイズ成分の影響の緩和を目指して、変形前後の2枚の画像情報における振幅の正規化を行っている。

この正規化処理を行うと、ヘテロダインの考え方によって算出した変形縞は周波数領域において、Fig. 14 (d) に示すように信号成分周りのノイズ成分がさらに減少していることがわかる。この結果、この処理を施した場合の最終的な位相分布のばらつきはFig. 15 (d) に示すような誤差分布となり、Fig. 12 の④に示すようにばらつきの標準偏差は0.028 rad (2.4 nm) まで緩和することが可能となる。

以上より、スペックルの影響を緩和することによって、測定精度の改善が可能であることがわかる。

5. 座屈発生時の梁の変形計測への提案手法の適用

以上の結果に従って、Fig. 6 に示した梁の座屈発生時の変形測定結果^{11,12)} と同じスペックルパターンの情報をもとに、あらかじめ撮影しておいた物体光と参照光を用い、Fig. 12 に示す④の処理を行った結果がFig. 16 である。ただし、スペックル干渉計測では、変形前後の相対的な変形量を測定することができるものの、絶対量を測定することは、基準となる点での変形量がわからない限り行うことはできない。ここでは、ひとまず面外変形結果においては梁

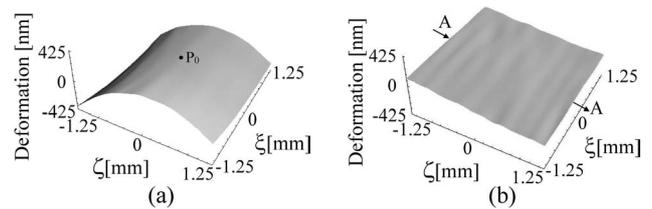


Fig. 16 Distribution of out-of-plane and in-plane deformation in buckling of beam using optimum fringe analysis method: (a) out-of-plane deformation, (b) in-plane deformation.

の中心線上の最大値を示す点 P_0 で、便宜上変位ゼロとしてグラフを描いている。また、面内変位結果では、同じ P_0 点の座標で変位をゼロとしてグラフを描いている。さらに、Fig. 7 では、Fig. 12 で得られた P_0 点と同じ座標で面内・面外ともに変位をゼロとしてグラフを描き、両者の結果を比較している。本研究で提案したスペックルパターンに対する前処理を用いることによって、座屈における変形計測においても Fig. 7 (b) に示したような面内変形結果における不規則な乱れを軽減できることがわかる。ここで、若干うねりが残存しているものの、スペックルノイズ等の影響を軽減することにより、ばらつきを抑制できた結果を用いて、前報⁶⁾ において実施した条件と同様の座屈発生時の梁に加わる荷重を次に検討する。

Fig. 16 (b) の面内変形結果において、面内変形の A-A 断面をみると、2.5 mm の範囲で 170 nm の面内変形の発生が確認できる。このことより、梁の面内方向でのひずみは 6.8×10^{-5} ($= 170/2.5 \times 10^{-6}$) として求めることができる。銅のヤング率は 110 GPa であり、かつ断面積が 0.4 mm^2 であることより、梁には 3.0 N ($= 6.8 \times 110 \times 0.4 \times 10^{-2}$) の荷重がかかっているものと推定することができる。

一方、Fig. 6 (a) に示す梁の座屈荷重は、 1.91 N ($= k \times \pi^2 \times E \times I / L^2$)、ただし、 k は末端条件係数、 E はヤング率、 I は梁の断面二次モーメント、 L は梁の長さ) であることがオイラー座屈の理論式¹¹⁾ より求められる。

この結果から、実際に座屈荷重よりも大きな力がかかっていることより、実験下での梁において座屈が発生しているものと推定することができる。このように、変形計測として高い分解能をもった非接触な計測が、スペックル干渉計測技術において、スペックルパターンに対する前処理を行うことによって実現され、微小な変形を対象とする座屈解析も実験的に定量的な評価が可能となるように改善されている。

今後、定量的な評価が可能な高分解能なスペックル干渉計測技術は、座屈解析の分野において重要な役割を果たすものと考えている。

6. おわりに

三軸方向に同じ測定感度をもつスペックル変形計測法では、平面の回転による単調な変形(変位)の計測では、高い分解能をもつ測定結果を得ることができている。しかし、1台のカメラによるスペックル干渉変形解析技術では、座屈発生時の初期の小さな面内・面外変形を扱う場合において、測定結果に大きなばらつきが確認されていた。

本研究では、この主たる現象が画像撮影時の多重記録によるスペックルパターンのSN比の劣化とスペックルノイズに由来するものであることを、実験データを用いて検討した。この検討過程において、誤差要因を縞解析プロセスで丁寧に排除することにより、三軸方向に同じ測定感度をもつスペックル変形計測法を用いた座屈の変形計測のような小さな面内・面外変形を対象とした計測であっても、スペックルパターンのSN比の劣化のみならず、スペックルノイズの影響を軽減可能であることを示した。

今後、高い分解能をもった、三軸方向に同じ測定感度をもつスペックル変形計測法において、本研究で提案した測定精度の向上を目指したスペックルパターンへの前処理技

術は、座屈解析において有効な測定技術として広く利用されるものと期待している。

文 献

- 1) G. Cloud: *Optical Methods of Engineering Analysis* (Cambridge University Press, New York, 1995) pp. 395-476.
- 2) D. Malacara (ed.): *Optical Shop Testing* (John Wiley & Sons, New Jersey, 1992).
- 3) R. S. Sirohi: *Speckle Metrology* (Marcel Dekker, New York, 1993).
- 4) B. J. Thompson: *Selected Papers on Electronic Speckle Pattern Interferometry Principles and Practice* (SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, 1996).
- 5) 新井泰彦, 横関俊介: 光学, **42** (2013) 256-265.
- 6) 新井泰彦, 横関俊介: 光学, **43** (2014) 570-579.
- 7) 新井泰彦, 横関俊介: 光学, **44** (2015) 400-460.
- 8) Y. Arai: *Opt. Eng.*, **54** (2015) 024102.
- 9) M. Takeda, H. Ina and S. Kobayashi: *J. Opt. Soc. Am.*, **72** (1982) 156-160.
- 10) 新井泰彦, 藤本雅大, 横関俊介: 光学, **31** (2002) 562-567.
- 11) F. Bleich: *Buckling Strength of Metal Structures* (McGraw-Hill, New York, 1952).
- 12) 福本昤士: 新体系土木工学9 構造物の座屈・安定解析 (技報堂出版, 1982).