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

新井 泰彦*·島村 遼一*·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

Using Only Information in Deformation Measurement Process, High Resolution Speckle Interferometry under Unnecessary Condition of Monotonous Increase in Phase Distribution

Yasuhiko ARAI*, Ryouichi SHIMAMURA* 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

A novel high resolution speckle interferometry for dynamic measurement which uses only information in deformation process is proposed. In this method, the new optical system is proposed, then, only single camera is employed for the measurement. Furthermore, the condition of any phase monotonous increase in deformation process is not required. Virtual speckle patterns which include the information of carrier signal are synthesized using the information of deformation process by Hilbert transformation. As the experimental results, the comparison of this method with ordinary method shows that this method can measure as well as ordinary methods in high resolution.

Key words: speckle interferometry, single camera, high resolution measurement, dynamic measurement

1. はじめに

粗面をもつ測定対象の変形計測法として、スペックル干 渉計測法は有効な測定技術である¹⁻⁴⁾.また、これらの手 法は、縞解析技術の導入により、高分解能化がなされ現在 広く利用されている⁵⁻¹²⁾.さらに、ダイナミック計測にお いてこのような高分解能化をはかるために、さまざまな工 夫による新たな手法¹³⁻²²⁾も報告されている.このような 試みのひとつとして、マルチカメラ技術にもとづく特殊な 光学系を用いた時間的縞解析法^{18,21)}があり、また変化前後 に加えて、位相の基準を与えるためのスペックルパターン をもう1枚用いる計測法⁹⁾がある.これらの手法ではキャ リヤー信号を利用した空間的縞解析法⁹⁻¹²⁾が位相抽出に用 いられている.さらに、高速度カメラを用いて変形過程を 記録し、その記録をもとに縞解析を行う TSPI (temporal speckle pattern interferometry)^{19,20)}などの手法も報告さ

れている.

このような解析法を用いる場合に、時間的縞解析法によ るマルチカメラ技術では、光学系の複数のカメラの設定に 厳密な位置合わせが求められ、2台のカメラを用いた手 法^{18,21)}では高分解能なスペックル干渉計測が実現されてい るものの、依然として光学系の設定には困難が伴ってい る.また、変化前後のスペックル間でスペックルグラムを 得ることができないほどに変形が大きくなった場合には、 大変形をいくつかの小変形過程に分解し、それぞれの解析 結果を累算することによって、大変形過程の解析を行うこ とができる。しかしながら、このような手法では、累積演 算過程において、誤差が累積する問題が発生し、必ずしも 高分解能な縞解析を行うことはできない状況²¹⁾も発生し ている。また、TSPIでは縞解析にフーリエ変換を用いて おり、演算の始点と終点付近に誤差が生じる。このため、

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



Fig. 1 Optical system.

測定精度をある程度以上に高めることは困難である.

このような状況で, TSPIをさらに丁寧に処理すること のできる手法が提案されている^{22,23)}。この手法では, TSPIと同様に高速度カメラによって、変形過程を記録 し、フーリエ変換(ヒルベルト変換)によって変形過程の 位相分布が求められている。しかしながら、この手法で は、TSPIのように直接変形前後の位相差を求めてその変 化量をトータルの変形量とするのではなく,変形過程内の ある時点での位相分布を測定対象の画像全域で求め、この 位相分布に改めてキャリヤー信号情報を付加し、仮想スペ ックルパターンを合成することによって,空間的な位相解 析が行われている. このようにして合成されたスペックル パターンの位相分布には、TSPIと同じように演算時に演 算誤差が含まれている.しかしながら,このようにして求 めたスペックルパターンと変化前のスペックルパターン間 で従来の空間的縞解析法9-11)によって位相分布を求め、こ れを変形過程の前半の位相分布とし、同じく変形後のスペ ックルパターンと合成スペックルパターン間で求めた後半 の位相分布との間の演算において、合成スペックルパター ン内の演算誤差をキャンセルすることができるようにトー タルの変形位相分布を求めると、TSPI で求めた結果より も高い測定精度をもつ縞解析が実現する。

しかしながら,現在までに報告されたこのような縞解析 法は, ヒルベルト変換を行う際に, 変形過程の位相の変化 が単調増加(あるいは、単調減少)であることが求められ ている. このため、この手法は、変形時に測定対象内で、 ある部分では位相が増大し、またある部分では減少する, また位相の符号が正である、あるいは負であるような複雑 な変形分布をもつ変形計測には利用することができなかっ 1222,23)

本研究では、このようなローカルに変形が正・負に位相 変化しても対応することができるように、光学系を改良し た新しい縞解析技術を提案する.

本報においては, ローカルに変形位相が正・負に変化す る実験対象の計測結果を用いて、本手法の有効性を検討す る.

測定原理とその検討

2.1 被変形位相が単調増加(減少)を満足しなければな らない従来の解析法22,23)

本測定法では, Fig. 1に示すような光学系を用いる. Fig.1に示すスペックル干渉計は、マイケルソン干渉計と 同じ構成で、一方のアーム(Arm-1)が測定対象であり、 他方(Arm-2)が基準となる位相分布を与えるための粗面 となるように構成されている. レーザー光 (本研究では, 波長が 532 nm の半導体レーザーを使用している) はハー フミラーで分割され, Arm-1, Arm-2それぞれの粗面で 散乱する。それぞれの

相面に観察光学系の

焦点を合わせる ことによって、CCDカメラ(画素数は1024×1024ピクセ ル、出力の階調は1024 階調、サンプリングタイムは1/30 s、 シャッタースピードは1/1000s, ピクセルサイズは6.7 μm)からスペックルパターンが採取される。この場合 に、基準となる位相分布を与えるための粗面(Arm-2)を 固定して、測定対象を点Oを中心に回転(面外変位)させ ると、任意の測定対象表面上の点(ただし、点 O を除く) に対応する CCD のピクセルからの出力は,前報²³⁾ に示し たような unsolved speckle の問題が存在するものの、ス ペックル径と画像を記録する CCD のピクセルサイズとの 関係を考慮した対応によって、その強度分布は Fig. 2 (b) に示すような正弦波状の信号として観察することができ る. これは, Fig. 2 (a) に示すように, 測定対象が変位す ることによってレーザー光の光路長が変化するためであ る. ここで, Fig. 2 (b) の横軸は, 測定対象が変形する過 程を CCD カメラで撮影したときの 1/30 s ごとの駒送りを 変形の step として表したものである。この性質に従うと, Fig. 1の測定対象上の点 P₁では,変形に伴い Fig. 3(a) に示すように強度分布は変化することが観察できる. この 場合に、この強度分布の変化の位相が単調増加していると 仮定すると, Fig. 3 (b) に細い実線で示す位相が $\pi/2$ rad 変化したもうひとつの強度の変化分布をヒルベルト変 換²⁴⁻²⁸⁾ によって得ることができる。このような Fig. 3 (b) に示した強度の変化分布を逆正接関数によって処理する と,対象となるピクセルにおいて, Fig. 3 (c) に示す変形 に伴う位相分布を得ることができる。このようにして求め た位相分布を位相接続し,変形前後で位相の変化量を求め ると変形に伴う位相変化量を得ることができる。しかしな がら,このような演算では,フーリエ変換演算を用いたヒ

42 (42)



Fig. 2 Change of intensity of speckle in deformation process. (a) Schematic of changing intensity of speckle, (b) change of intensity in deformation.



Fig. 3 Phase map of deformation process in Area-a. (a) Original profile of speckle intensity in deformation process, (b) sine and cosine profiles of speckle intensity by Hilbert transformation, (c) phase map of speckle intensity in deformation process.

ルベルト変換の演算時に、変形開始直後ならびに変形終了 直前で、演算結果が変動するなどの曖昧さが生じるため に、高い分解能をもった測定結果を得ることができない。 さらに、大きな問題として、Fig. 1の測定対象上の点 P₂



Fig. 4 Phase map of deformation process in Area-b. (a) Original profile of speckle intensity in deformation process, (b) sine and cosine profiles of speckle intensity by Hilbert transformation, (c) phase map of speckle intensity in deformation process.

を考えた場合(Fig. 4 参照)には, Fig. 3 と同じ処理によ って変形に伴う位相分布(Fig. 4 (c))を求めることがで きるものの, Fig. 1 に示すように,点 P₁ でも P₂ でもヒル ベルト変換を行うためには,変形に伴い位相分布は,とも に単調増加(あるいは,単調減少),あるいはどちらかが, 単調増加で,他方が単調減少していることがあらかじめわ かっていなければならなくなる.現実問題として,画像上 でどこからどこまでが変形に伴う位相が単調増加でそれ以 外は単調減少しているかなどを一意的に決定することは困 難である.したがって,ヒルベルト変換を行う際に,ある 点では「単調増加」また,異なった点では「単調減少」等 を仮定することは,処理法としては,現実的ではない.

2.2 単調増加(減少)を解析条件としない新しい解析法

そこで、このような問題を解消するために、本研究では、Fig. 1 に示すように基準となる位相分布を与えるための粗面(Arm-2)を、圧電素子によって等速に平行移動させることを提案する.

変形を与えることなく、この粗面を平行移動のみさせる と、Fig. 5 に示すように、Fig. 1 の点 P_1 と P_2 において、 ともに粗面の平行移動に伴い、強度分布は正弦波状に変化 することを確認することができる。この現象を用いると、 測定対象の変形時にその変形よりも速度が大きい粗面 (Arm-2)の移動を実現することができれば、Fig. 1 の点 P_1

37巻1号 (2008)



Fig. 5 Profile of intensity in deformation process.

と P₂ のいずれにおいても、変形時の強度分布の変形量 は、位相が正の方向つまり単調増加として取り扱うことが できるようになる.

このような条件下で,採取した点 $P_1 \ge P_2$ における変形 に伴う強度変化を用いて処理を行うと,Fig. 3,Fig. 4に それぞれ示した P_1 , P_2 点における変形過程の位相解析 は,まず Fig. 6 (a),(d) としての強度分布を採取し,ヒ ルベルト変換により Fig. 6 (b),(e)を求め,さらに逆正 接関数によって,Fig. 6 (c),(f)に示すような位相分布と して求めることができる.

ところが,前述のようにヒルベルト変換時の演算の曖昧 さによって,これらの結果を直接利用すると必ずしも高い 測定精度をもった結果を得ることができない.

そこで,前報^{22,23)} に示した Fig. 7 に示すような演算法 を本研究においても用いた.



2.3 単調増加(減少)を解析条件としない高精度位相検 出法^{22,23)}

Fig. 7 に示すように、変形が P_s 点から P_E 点に進行す るものとする。そして、その過程における強度分布はサン プリングごとにすべて記録されるものとする。これらの情 報をもとにヒルベルト変換を行うと、 P_s 点直後と P_E 点 直前付近での演算結果には、演算時に発生する変動による 曖昧さが残存している。そこで、本報における解析過程で は、変形過程が十分に進み、ヒルベルト変換演算において も、曖昧さが十分に解消された P_c 点を基点として、位相 検出演算を行うことにした。

たとえば, Fig. 1の P1 点において考えると, 変形過程



Fig. 6 Phase maps of deformation process in new method. (a) Original profile of speckle intensity in deformation process at P_1 , (b) sine and cosine profiles of speckle intensity by Hilbert transformation, (c) phase map of speckle intensity in deformation process at P_1 , (d) original profile of speckle intensity in deformation process at P_2 , (e) sine and cosine profiles of speckle intensity by Hilbert transformation, (f) phase map of speckle intensity in deformation process at P_2 .



Fig. 8 Profile of virtual speckle patterns. (a) Virtual speckle pattern at 30th step in deformation process, (b) virtual speckle pattern added carrier information at 30th step in deformation process.

のすべての強度分布を用いて、ヒルベルト変換を行い、さらに逆正接関数によって位相分布をFig. 6 (c) のように求めることができる。このような処理を測定対象のすべての点で行う。すなわち、 P_c に対応する点を定めて(ここでは、 P_s から P_E を100 stepとして記録し、実験では適切な窓関数を用いても回避が困難なフーリエ変換時の始点と終点近傍における演算結果の曖昧さが、ほぼ消失することを実験的に確認することができている変形開始後30 step目を P_c 点として設定した)、スペックルパターン上のすべての点で変形開始後の30 step目での位相値を、Fig. 6 (c)に示すものと同様に求めた。

ここで、この各ピクセルにおいて変形過程を記録した強 度分布のヒルベルト変換演算時に低周波数成分のみを抽出 し、逆フーリエ変換によって求めた値を、この変形過程に おける強度分布のバイアス成分として定義しておく. さら に、Fig. 6 (b)、(e) のようにして求めた位相が $\pi/2$ rad 異なった信号を用いて、両者のそれぞれの二乗成分の和の 平方根を演算することによって、この変形過程の強度の振 幅分布とすれば、強度分布モデルを位相値 ($\phi(x)$)、振幅 (B(x))、バイアス (A(x))の3つの要素によって次に示 す式(1)のように、仮想スペックルパターンの強度分布 として合成することができる.

このような演算をスペックルパターンにおけるすべての ピクセル上で行うと、変形過程の P_c 点における仮想的な スペックルパターンを合成することができる. このように して求めた仮想スペックルパターンの強度分布を1ライン のみ抽出したものが、Fig. 8 (a) である. この演算時に、 上記のようにして求めた P_c 点上の位相分布に、さらに、



Fig. 9 Specklegrams. (a) Total deformed fringes, (b) deformed fringes in Area-1, (c) deformed fringes in Area-2, (d) deformed carrier fringes in Area-1, (e) deformed carrier fringes in Area-2.

式(2)に示すようなキャリヤー情報(キャリヤー周波数 を ω_c , xを水平方向の位置とする)が位置の関数として 付加されると Fig. 8 (b)のようにキャリヤー情報をもった 仮想スペックルパターンを合成することができる.

$$I_{\rm m}(x) = A(x) + B(x)\cos(\phi(x))$$
 (1)

 $I_{\rm C}(x) = A(x) + B(x)\cos(\phi(x) + \omega_{\rm C} x) \qquad (2)$

このようにして、合成された仮想スペックルパターンモ デル(式(1)を用いて得られたキャリヤー成分を含まな い仮想スペックルパターン)と P_s 、 P_E 点において採取し たスペックルパターンとの間で、強度分布の差を求め、二 乗演算を行うと、Fig. 9 (b)、(c)に示すようなスペック ルグラムを得ることができる.

この結果は、本来の変形情報をもつ P_s 、 P_E 点において 採取されたスペックルパターン間で求めたスペックルグラ ムが、Fig. 9 (a) に示すように、変形量としての縞数が 8 縞であるのに比べて、 P_s - P_c 間 (Fig. 7 の Area-1) では Fig. 9 (b) に示すように 2 縞であり、 P_c - P_E 間 (Fig. 7 の Area-2) では Fig. 9 (c) に示すように 6 縞となる。ここ で、両者の和としての総量は 8 縞となることより、トータ ルの変形量 (Fig. 9 (a) に示すように 8 縞) に等しい縞数 となることがわかる。

また,式(2)に従って求めた P_c 点でのキャリヤー情 報を含んだスペックルパターンと P_s , P_E 点において採取 したスペックルパターンとの間で,スペックルグラムを求 めると, Fig. 9 (d), (e)の結果を得ることができる.こ れらの結果は,いずれも変形に伴う位相変化によってキャ リヤー情報が変調された変形キャリヤー縞である.

37巻1号 (2008)



Fig. 10 Specklegrams in frequency domain. (a) Carrier fringes image in frequency domain, (b) deformed carrier fringes in Area-1, (c) carrier fringes, (d) deformed carrier fringes in Area-2.



Fig. 11 Phase maps. (a) Phase map of Area-1, (b) phase map of Area-2, (c) phase map of total deformation.

このような変形キャリヤー縞をフーリエ変換した結果 が、Fig. 10 である。Fig. 10 (a) は、式(1)、式(2) に よって求めた 2 枚の仮想スペックルパターン間でスペック ルグラムを求め、それをフーリエ変換したものであり、解 析過程におけるキャリヤー信号成分である。

ここで、周波数領域でキャリヤー周辺情報を Fig. 10 (a) から切り取ったものが、Fig. 10 (c) である. このキャリ ヤー情報の周波数領域での位置を基準にして、Fig. 7の Area-1、-2 において求めた Fig. 9 (d)、(e) の変形キャリ ヤー情報をフーリエ変換したものが、Fig. 10 (b)、(d) で ある. いずれの結果においても、Fig. 10 (c) に示したキ ャリヤー情報の位置から周波数領域で移動していることが



Fig. 12 Comparison of this method with ordinary method.

わかる. この移動量がキャリヤー信号の変調量である. こ れらの移動量を空間的縞解析法で位相成分として求めたも のが Fig. 11 (a), (b) である. ここでは,前報⁹⁾までに提 案してきた空間的縞解析法のアルゴリズムに即した解析プ ログラムを利用することを目的として,キャリヤー周波数 を8ピクセルが1周期になるように定義して, Fig. 9 (d), (e) から位相分布を求めた.

このようにして、変形過程を Pc 点で二分割し、それぞ れの領域での位相分布を求める場合には、Pc 点での仮想 スペックルパターン合成のための位相抽出過程で、演算誤 差が含まれる可能性がある。本解析法では、この問題を解 消するために、Fig. 11 (a)、(b) に示した位相分布間で (b) に示す Area-2 の結果から Area-1 の位相分布の結果を引 き算することによって、測定誤差となる要因の除去をはか った。

このようにして求めたものが, Fig. 11 (c) である. さらに, Fig. 11 (c) の A-A ライン上の位相分布と従来法⁹⁾ による 3 枚のスペックルパターンを用いた手法との比較を Fig. 12 に示す.

本手法で求めた結果は、上記3枚のスペックルパターン を用いた従来法⁹⁾の結果に非常によく一致したものである ことがわかる。この場合に、両者の差の標準偏差は0.056 radであり、使用したレーザーの波長が532 nm であるこ とを考えると、両者の差は実際の長さとして2.4 nm 程度 のばらつきに収まっていることがわかる。

以上のように、新しい光学系を用いたスペックル干渉計 測では、1台のカメラによって、必ずしも変形に関する位 相の変化が単調増加でなくても、変形過程内情報のみを用 いて従来法と同程度の高分解能な縞解析が実施可能である ことがわかる.

Fig. 11, Fig. 12 においては,平面の回転のような単純 な変形過程を測定対象として取り扱うことによって,位相 分布が正の方向ならびに,負の方向に変形した場合(両者 が同時に存在する場合)においても,本手法が縞解析可能 であることを示した.次に,より複雑に変形する測定対象



Fig. 13 Complex deformation of beam.

に、本手法を適用した場合を検討する.

3. 複雑な変形を伴う測定対象への適用

Fig. 13 (a) に示すように片持ち梁(厚さが0.2 mmの 銅板)が P_{00} 点において支持され、かつ P_{10} 点において圧 電素子によって力が加えられるような状況下での梁の変形 過程を検討した.

この場合, Fig. 13 (a) における Area-A では P_{10} に加え られた力によって,梁は上方にたわんでいる.また,点 P_{00} では,変位はないものの,傾きは発生している. Area-B では, Area-A のたわみに連続した下方へのたわみが発生 する.このたわみは P_{20} において梁が壁にビルトインされ ているので, Area-C では下方へのたわみが発生するもの の,その変形の傾きは Area-B とは異なったものとなる.

このような変形が発生すると考えられる梁において,圧 電素子によって変形を与えた場合の変形前後のスペックル パターンを Fig. 13 (b), (c) に示すように採取した. この 場合も Fig. 2 に示すように変形過程を $1/30 \, s$ ごとにスペ ックルパターンとして採取している. Fig. 13 (b), (c) に 示す変形前後のスペックルパターン間で強度分布の引き算 を行った後に,その二乗演算によってスペックルグラムを 求めた結果が Fig. 13 (d) である. Fig. 13 (d) において, P_{00} 点では,黒い縞となり変形が生じていないことが観察 できる.また,Area-B から Area-C に向かって梁が湾曲 していることもわかる.このことより,実際の梁において も Fig. 13 (a) に示すような変形が生じているものである と考えられる.

ここで、Fig.7に示したような P_c 点を設定して、Fig.11 と同様に変形を二分割して位相検出演算を行おうとしたも のの、Fig.7に示す Area-1の変形が大きく、Fig.7に示す



Fig. 14 Specklegrams with deformation information.

ような二分割では変形解析を行うことはできなかった。

そこで, Fig. 14 に示すように, Fig. 7 で行った 30 番目 での仮想スペックルパターン演算に加えて、50番目にお いて新たに第二の仮想スペックルパターン演算を行うこと によって変形過程を三分割にして変形解析演算を行うこと にした.この場合, Fig. 11の結果を求めた演算過程と同 様に、0~50 step における位相分布は、30 番目で創成し た仮想スペックルパターンを用いて行った。すなわち, 30~50 step 間の位相分布から 0~30 step 間の位相分布を 引き算することによって求めた.一方,50~100 step での 解析は、50番目で創成した仮想スペックルパターンを用 いて行った。ここでは、実験で得られた 50 番目のスペッ クルパターンと 50 番目で創成した仮想スペックルパター ンとの間でキャリヤー成分に関する位相分布を求め、この 位相分布を100番目のスペックルパターンと50番目で創 成した仮想スペックルパターンとの間で求めた位相分布か ら減算することによって、50~100 step 間の位相分布を求 めた。このような減算に基づく処理を行うと、30番目な らびに 50 番目で仮想的に創成したスペックルパターン内 にそれぞれ存在する位相に関する問題が解消されるものと 考えられる。それぞれの領域においてのスペックルグラム を Fig. 14 (a), (b), (c), (d) に示す. これらのスペック ルグラムから空間的縞解析法を用いてそれぞれの位相分布 を求めた。

Fig. 15 (a), (b) に, 0~30 step 間の位相分布ならびに 30~50 step 間の位相分布を示している.また, 50~100 step 間の位相分布については, キャリヤー成分に対する 位相分布をあらかじめ減算した結果を Fig. 15 (c) として 示している.

Fig. 15 (b) に示す 30~50 step 間の位相分布から Fig. 15 (a) に示す 0~30 step 間の位相分布を引き算すること



Fig. 15 Phase maps of specklegrams. (a) Phase map of specklegram between 0 and 30th deformation, (b) phase map of specklegram between 30th and 50th deformation, (c) phase map of specklegram between 50th and 100th deformation.

によって求めた 0~50 step 間の位相分布に, Fig. 15 (c) に示す 50~100 step 間の位相分布を加算することによっ てトータルの位相分布を求めることができる. このように して求めたトータルの位相分布を Fig. 16 に示す.

Fig. 16 の B-B 断面における位相分布を Fig. 17 に示す. また、本手法によって求めた変形過程においての 20 step ごとの変形状況の解析結果も同時に示している.この場合 に 3 枚のスペックルパターンを用いた従来法では、変形開 始後 20 step までは位相分布をすべての領域において求め ることができたものの、変形が大きくなるに従い、測定対 象全域での計測を行うことができなくなった.そこで、20 step において本手法との差のばらつきを求めると、その 標準偏差は約 0.11 rad であることがわかった.このこと より、本手法は複雑な変形過程をもつ対象においても従来 法と同程度の計測が可能であることがわかった.さらに、 変形終了後(100 step 目)において、従来法との比較を行 った場合には、本手法を用いた場合に解析が可能な大きく 変形する部分(0~200 pixel の範囲)では、従来法によっ





Standard deviation of difference between ordinary and this methods is 0.11 [rad] at 20th step of deformation



Fig. 17 Phase maps of deformation process.

て変形解析を行うことができなかった.そこで,従来法に よって解析可能な部分(比較的変形量が小さい部分)のみ を本手法と比較した場合のばらつきを検討した.この場合 に,両者の差のばらつきは,標準偏差として約0.20 rad であった.この結果において,本手法は従来法によって縞 解析が可能な部分では,同程度の変形解析が行えるととも に,従来法では測定できなかったような大変形に対しても 解析可能であることがわかった.

Fig. 16 に示した実験結果では,測定対象のマイナス方 向へのたわみ量はトータルで 30 rad 程度である. この場 合に,本実験で参照粗面の移動に使用しているストローク 100 μmの PZT では,変形と参照粗面の移動との間にタ イミングをとらなければならないような問題は発生しなか った.ただ,今後より大きく変形するような対象物を測定 する場合には,参照粗面の移動を計測時に,よりスムーズ に行うための工夫が必要であると考えている.

4. おわりに

本研究では、1台のカメラによって、かつ変形過程内の みの情報を用いて高分解能な計測を実現するための新しい 計測法を提案した.さらに、測定対象内で変形過程におい て位相分布が正・負になる場合においても解析可能である 光学系を提案した。また、従来の3枚のスペックルパター ンを用いた変形解析では処理することができなかったよう な大変形解析においても、変形過程を複数に分割すること によって、変形解析処理が可能であることを示した。

従来法では困難であったローカルに変形位相の符号が変 化する場合のみならず大変形過程の解析を,実験結果を用 いて検討し,3枚のスペックルパターンを用いて行ってい た従来法に基づく縞解析法と同程度の測定が可能であるこ とを示した.

文 献

- D. Malacara: Optical Shop Testing (John Wiley & Sons, New York, 1992) pp. 501-598.
- R. S. Sirohi: Speckle Metrology (Marcel Dekker, New York, 1993) pp. 99–234.
- G. Cloud: Optical Methods of Engineering Analysis (Cambridge University Press, New York, 1995) pp. 409-476.
- 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.
- 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.
- P. Meinlschmit, K. D. Hinsch, R. S. Sirohi and B. J. Thompson: "Selected papers on electronic speckle pattern interferometry principles and practice," *SPIE Milestone Series Volume MS* 132 (SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, WA, 1996) pp. 457-518.
- S. Nakadate and H. Saito: "Fringe scanning specklepattern 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:"空間的編解析法を用いた電子的スペ 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.
- 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.

- 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.
- 14) J. L. Marroquin, M. Servin and R. Rodriguez-Vera: "Adaptive quadrature filters and the recovery of phase from fringes pattern image," J. Opt. Soc. Am. A, 14 (1997) 1742-1753.
- 15) 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.
- 16) 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.
- 17) 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 III* (Munich, Germany, 2003), Proc. SPIE, **5144** (2003) 259–267.
- 18) 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), Proc. SPIE, **6341** (2006) 63410k.
- 19) 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.
- 20) 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.
- 21) Y. Arai, H. Hirai and S. Yokozeki: "Electric speckle pattern interferometry based on spatial fringe analysis method using two cameras," Mod. Opt., 55 (2008) 281–296.
- 22) Y. Arai, R. Shimamura and S. Yokozeki: "Composition of virtual speckle pattern for spatial fringe analysis method in ESPI by using single camera," *SPIE Europe Optical Metrology* (Munich, Germany, 2007), Proc. SPIE, 6616 (2007) 6616-11.
- 23)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.
- 24) 谷田貝豊彦:第二版 応用光学光計測入門(丸善, 2005) pp. 141-146.
- 25) 三上直樹:はじめて学ぶディジタル・フィルタと高速フーリ エ変換 (CQ 出版, 2005) pp. 171-188.
- 26) S. L. Hahn: *Hilbert Transforms in Signal Processing* (Artech House, Norwood, MA, 1996) pp. 3–396.
- 27) S. Haykin: *Communication Systems* (John Wiley & Sons, New York, 2001) pp. 373–380, pp. 723–725.
- J. Y. Stein: *Digital Signal Processing* (John Wiley & Son, New York, 2000) pp. 279–288.