

時間的情報を空間情報に置換することによる高分解能 ESPI

新井 泰彦^{*,†}・井上 拓也^{*}・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 Speckle Interferometry by Replacing Temporal Information with Spatial Information

Yasuhiko ARAI^{*,†}, Takuya INOUE^{*} 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 using virtual speckle patterns is a high resolution deformation measurement method. Usually, virtual speckle patterns have been produced by Hilbert transform or Carré algorithm. However, there are some problems concerning calculating time and quantity of deformation in the process of producing virtual speckle patterns. In proposed method, virtual speckle patterns are easily produced by replacing temporal information with spatial information on CCD without processing by Fourier transform or Carré algorithm. As the results, calculating cost of virtual speckle patterns is improved. It is confirmed that the new method is equal to ordinary methods in measurement accuracy.

Key words: ESPI, virtual speckle pattern, high resolution, high speed processing

1. はじめに

スペックル干渉計測法は、粗面をもつ測定対象の面外・面内変形計測法としてよく知られた計測技術である¹⁻³⁾。特に、TVカメラを用いた電子スペックル干渉計測法 (ESPI: electric speckle pattern interferometry)⁴⁻⁶⁾では、縞走査技術⁷⁻¹²⁾を導入することにより、高分解能な変形計測を実現している。

一般に、スペックル干渉計測の縞解析の対象となる縞画像は、測定物体の変形前後で記録された2枚のスペックルパターン間の演算により得られるスペックルグラムである。したがって、縞解析を行うためには、少なくとも2枚のスペックルパターン間でスペックルグラムを生成し、縞画像を得なければならない。さらに、このスペックルグラムを求める過程においては、スペックルパターン内の変形前後で空間的に対応するスペックルが重なり合わなければならない。このスペックルの重なりを得ることができない場合、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。加えて、unsolved speckle とよばれる変形位相情報

をもたないスペックルを取り扱わなければならない問題も、スペックル干渉計測における縞解析には存在している¹³⁾。

このようにスペックル干渉計測法には通常の干渉計測とは異なった独特の問題¹⁻³⁾が存在しているものの、変形量が小さい場合には、基準となる位相分布をあらかじめ採取し¹¹⁾、縞解析の二次元処理を行うことによって、時間的・空間的縞走査技術を用いた高分解能な縞解析が unsolved speckle の影響を受けることなく行われている¹⁻³⁾。ところが、変形量が大きくなると、変形前後で対応するスペックルが重なり合わなくなり、縞解析の実施は困難をきたすことになる。

この問題を解消し、高分解能な変形計測を行うためには、変形過程内で対応するスペックルが重なり合う条件を維持しつつ、基準となる位相分布をもつスペックルパターンを随時採集する作業が求められることになる。しかしながら、連続する測定対象の変形過程で計測を行うためだけに変形を停止し、基準となる位相分布をもつスペックルを

[†]E-mail: arai@kansai-u.ac.jp

あらためて採取することは、通常の変形計測では考えられない。

このような状況で、1990年代に入ると、高速度カメラを用いた動的変形解析が temporal carrier の考え方に基づき実施されるに至っている^{14,15)}。この解析方法では、変形過程全域で連続してスペックルパターンを高速に採取しつづけ、各ピクセルで連続的に採取された情報に対してフーリエ変換を施し、位相情報を抽出している。しかしながら、この解析法では、各ピクセルで時間に関しての一次元処理が行われているに過ぎないために、高い測定精度を得ることが困難であるとともに、いずれかのピクセルにおいて変形に伴いスペックルが移動し、それらが重なり合わなくなる問題、また unsolved speckle の問題¹³⁾が発生すると、一次元処理ゆえに解析の継続は困難となる。

以上のような従来法の問題の解消をはかるためには、一次元処理ではない二次元に広がる情報を有効に利用した解析方法の開発が求められる。

このような状況で、temporal carrier 技術^{14,15)}で得られた一次元処理に基づく位相分布を二次元処理が可能で情報へと発展させる技術として、バーチャルスペックルパターンを用いた temporal carrier 技術よりもさらに高分解能な縞解析法が提案されている^{13,16-18)}。この技術では、従来困難であった変形過程内での基準となる位相分布をもつスペックルパターン採取の問題を、変形過程の任意の位置¹⁷⁾でコンピューター内に仮想的にスペックルパターンをバーチャルスペックルパターンとして創成することによって解消し、二次元高分解能な縞解析を実現している^{13,16-19)}。

本研究では、このような二次元処理により高分解能な変形計測を行うために創成するバーチャルスペックルパターンを、従来行われていたフーリエ変換を用いる手法^{13,16-18)}、また縞走査技術として知られている Carré アルゴリズム^{20,21)}を用いた手法¹⁹⁾とは異なるフーリエ変換、連立方程式の解法等の数学的演算を用いない、データの置き換えだけでバーチャルスペックルパターンを短時間に創成することのできる手法を提案している。

変形過程内で複数のバーチャルスペックルパターンをオペレーターの経験に基づき、その作製位置を試行錯誤によって決定しなければならないような大変形解析過程^{17,18)}においては、バーチャルスペックルパターン作製時間の短縮化は、変形解析の高速化、効率化を促すために開発されなければならない必要不可欠な技術である。

本報では、シミュレーション結果ならびに実験結果において、新しいスペックル干渉縞解析法が、同じ演算環境下

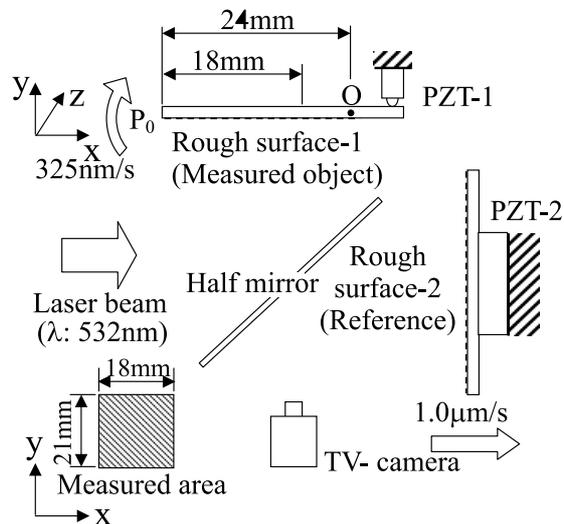


Fig. 1 Optical system.

で Carré アルゴリズムを用いた変形解析法よりも高速に縞解析を実施することが可能であること、さらにその解析結果が Carré アルゴリズムを用いた解析結果と同程度の測定精度を保持していることを示している。

これらの結果は、本報で提案するスペックル干渉計測法が、従来法よりもより実用に供するものであることを示している。

2. 縞解析原理

2.1 光学系とその光学系を用いて採取されたスペックルパターンの強度分布

新しい縞解析法を検討するために、Fig. 1 に示すようなスペックル干渉計^{19,22)}を構成した。この光学系は、参照平面（粗面-2）を移動させることによって、画像として得られるスペックルパターンの位相変化を制御することのできる機能を有している。この機能を用いると、測定対象（粗面-1）の面外変形計測時にスペックルパターンの位相を参照平面の移動によって制御することが可能となる。すなわち、Fig. 2 に示すように、参照平面を移動させつつ変形過程を連続して撮影すると、変形前および変形後のスペックルパターンとして SP_0 ならびに SP_1 、さらに任意の時刻 t_2 における SP_2 などを、位相を制御しつつ採取することができる。

ここで、Fig. 1 において、参照平面を測定対象の変形速度よりも高い速度で画像の位相が正になる方向に移動させることが可能であるとすれば、たとえ測定対象の変形方向において位相が負になるような変形が発生した場合でも、採取されたスペックルパターン内のスペックルの位相は常時増加していることになる。しかしながら、任意の時刻 t_2

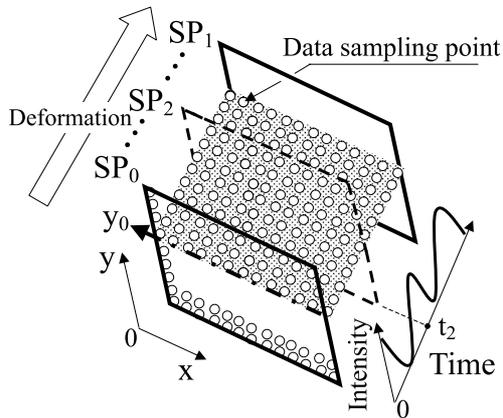


Fig. 2 Relationship of grabbed speckle pattern between temporal and spatial characteristics.

で採取したスペックルパターン SP_2 と変化前のスペックルパターン SP_0 との間で、式 (1) に示すようなスペックルグラムを求める演算を行い、各ピクセルでの変形前後の位相変化をそれぞれに求め、測定対象における二次元分布としての変形量を画像としてとらえたスペックルグラム SG_{02} を求めると、ここでは、測定対象の変形に伴う位相変化のみにかかわる縞模様としての画像が得られる。すなわち、参照平面の平行移動に伴う位相変化は、平行移動した平面間ではすべて同じ位相変化量となるので、空間的に、その位相変化は縞画像の形状変化としては観測することができない。この現象は、いうまでもなく、参照平面の位相が面内で一律に増加しているために生じる現象である。

$$SG_{02}(x, y, t_2 - t_0) = (SP_0(x, y, t_0) - SP_2(x, y, t_2))^2 \quad (1)$$

ここで、 $SP_0(x, y, t_0)$ 、 $SP_2(x, y, t_2)$ は、スペックルパターン SP_0 、 SP_2 の x - y 二次元座標ならびに、測定開始後の経過時間 t_0 、あるいは t_2 での強度分布を示すもので、さらに $t_2 - t_0$ は、測定開始後の経過時間 t_0 を基点とした t_2 までの時間変化を意味するものである。したがって、 $SG_{02}(x, y, t_2 - t_0)$ は、スペックルグラム SG_{02} の各測定点での測定における時間経過 $t_2 - t_0$ に関する強度分布を示すものである。

Fig. 1 の粗面 1 が回転 (面外変形) する過程において、連続してスペックルパターンを採取した場合の画像データの変化の様子を Fig. 2 において検討する。

Fig. 2 に示すように、変形過程を連続して撮影すると、その画像は、それぞれのサンプリング時刻において、水平方向の座標を x 、垂直方向の座標を y とした二次元に分布した採取点をもつスペックルパターンとしてサンプリングされることになる。たとえば、Fig. 2 において、1 枚目 (変形前) のスペックルパターンを SP_0 とすると、そのスペックルパターンは、水平方向の座標を x 、垂直方向の座

標を y とすることによって、 x - y 方向二次元にデータ採取点 (図中では \circ で表す) が存在する 1 枚の画像 SP_0 として得られることになる。さらに、次のサンプリング時刻では、 SP_0 と同様に新たに x - y 平面として 1 枚の画像を、二次元のスペックルパターンの情報として得ることができる。本研究では、このように順次スペックルパターンを採取することができる性質を用いて、簡便に縞画像解析が可能な手法を提案している。

2.2 測定対象の変形ならびに参照面の移動に伴う各測定点における強度分布

Fig. 2 に示すように、 x - y 座標をもつ平面とそれぞれのサンプリング時刻との三次元構造としてのデータを、実際の測定時には得ることができる。この三次元構造のデータにおいては、測定対象の変形量に比べて Fig. 1 に示す圧電素子 (PZT-2) による参照平面の平行移動量が多い場合には、前述のように、時間方向に対して各 x - y 平面としてのそれぞれのスペックルパターン内のスペックルの位相は、時間とともに単調に増加しているものと考えられる。この場合、それぞれのスペックルの位相には測定対象の変形情報ならびに、参照平面の平行移動に伴う位相変化情報が含まれている。したがって、Fig. 2 に示すように変形情報の影響を受けて少なからず周期は歪むものの、スペックルの位相が単調増加していることより、スペックルの強度は正弦波状に時間の経過に従って変化することになる。また、この強度分布としての正弦波状信号の周期は、Fig. 1 の光学系では、光源のレーザー波長の 2 分の 1 となる。

そこで、参照平面の圧電素子の移動速度を測定対象の変形量よりも大きく、かつカメラのサンプリング時間と粗面 2 を駆動する圧電素子の移動速度を光源の波長とカメラのサンプリング周期を考慮して適切に設定すると、何枚目かごとにスペックルパターンの強度分布が周期的に変化する状況を設定することができる。ただし、測定対象の変形に伴う位相変化が存在しているので、圧電素子 (PZT-2) の変形量だけで正確に周期的なスペックルパターンの時間的強度変化をつくりだすことはできない。しかしながら、実際には、測定対象の変形量に比べて、圧電素子 (PZT-2) の変形速度を大きく設定 (少なくとも 2 倍以上に設定) すれば、圧電素子 (PZT-2) の変形によって何枚目かごとにスペックルパターンの強度分布が周期的に変化する状況を設定することができる。

以上のような参照平面をもつ光学系を設置することによって、時間の変化に伴うスペックルグラムを、Fig. 1 に示すような x - y 座標の空間とカメラのサンプリング時間ならびに参照平面の移動速度との関係が同期した三次元デー

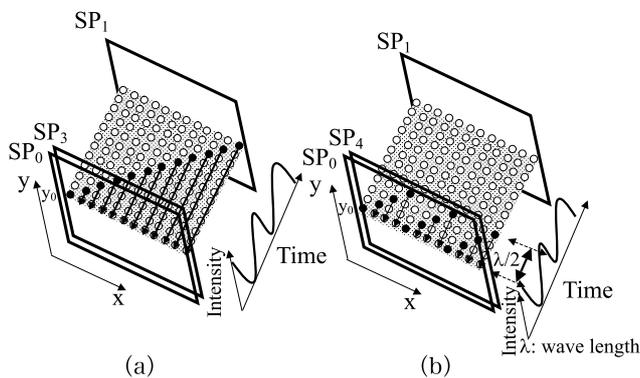


Fig. 3 Production of virtual speckle pattern. (a) Diagonal sampling, (b) saw-teeth sampling.

タとして採取することができる。

2.3 二次元画像としてのスペックルグラムにおけるキャリア縞の作製

Fig. 2において式(1)の演算を行うと、変形前のスペックルパターン SP_0 と変形過程におけるある時刻 t_2 でのスペックルパターン SP_2 とによる二次元画像としての、スペックルグラムが得られる。このスペックルグラムは、時間の経過とともに参照平面が移動し位相が変化しているにもかかわらず、前述のように時刻 t_2 では参照平面の移動に伴う位相変化が面内ですべて同じ位相変化となるので、圧電素子 (PZT-2) の変化に伴う位相の変化量にかかわらず、測定対象の変形量に応じた縞模様としての画像となる。

そこで、Fig. 2における一点鎖線で示す任意の y 座標 y_0 (Fig. 2の網掛けをした x 座標と時間とによる平面) において、ある任意の時刻におけるスペックルパターンを x 軸方向に SP_0 の面内で採取するのではなく、Fig. 3(a)に示すように網掛けをした平面内で x 軸に対して異なった時刻のスペックルパターンの強度を対角線上に採取し、異なった時刻の強度を同一時刻のスペックルパターン SP_3 として再構成する並び替えの処理を行う。このようにすると、得られたスペックルパターンは、参照平面の移動に伴い時間的に位相が異なる情報が同一空間に配置されたものとなる。

すなわち、このようにして得られたスペックルパターン SP_3 と変形前のスペックルパターン SP_0 との間で式(1)に従ってスペックルグラムを求めると、その縞画像には参照平面の移動に伴う位相変化が含まれているので、参照平面の移動に伴う位相変化を縞の形状に含んだ縞画像が観察されることになる。この場合、Fig. 1に示すような光学系を設置して、参照平面の移動に伴う位相変化を用いて発生させた縞をキャリア縞として利用すれば、前報¹⁹⁾までに示してきたバーチャルスペックルパターンと同じように取り扱うことのできるキャリア縞を発生させるための、

バーチャルスペックルパターンを創成することができる。ただし、この処理においては、参照平面の移動速度を光源の波長ならびにカメラのサンプリング時間を考慮したうえで適切に設定し、さらに、測定物体の変形計測時に連続してスペックルパターンを採取することが求められ、かつ、時間的なデータを空間的に並べ替える処理が必要となる。

このような処理によって創成したバーチャルスペックルパターンと、従来法に基づく処理によって作製されたバーチャルスペックルパターンとの相違点は、次のように考えられる。

従来の手法によるバーチャルスペックルパターンでは、バーチャルスペックルパターンを作製する時刻前後の時間的に限定された測定対象の変形に伴う位相変化のみが、バーチャルスペックルパターン内に最終的な位相解析結果への誤差要因として残存するのに比べて、ここで提案するバーチャルスペックルパターンの作製法では、時間的に測定対象の変形に伴う広い範囲での位相変化が最終的な位相解析結果への誤差要因となりうる問題を含んでいる違いが考えられる。したがって、新しい手法では、可能な限り短い時間内のデータでバーチャルスペックルパターンを作製することが肝要となる。

しかしながら、このような時間データと空間データとの並び替え処理によって、前報¹⁹⁾までに示してきた手法よりもはるかに短い演算時間でバーチャルスペックルパターンをつくりだすことができる利点を、新しい手法はもっている。

2.4 測定対象全域に対するバーチャルスペックルパターンの作製

Fig. 3(a)に示すようにしてバーチャルスペックルパターンを作製した場合、時間的な参照平面の移動に伴う位相変化を空間的に置き換えるためには、たとえば画像データが x - y 平面内で 1024×1024 画素存在しているとすれば、空間に情報を再配置するためには、時間的にも 1024 枚のスペックルパターンが必要になる。この場合、高速度カメラを用いて高いサンプリングレートでデータを採取すれば、問題なく画像データの採取は可能である。しかしながら、本研究では、そのような高速度カメラを用いることなく計測することを目的としている。したがって、処理を行うために参照平面の移動速度を圧電素子により自由に設定することが可能であることを前提として、参照平面が 2π rad 変化する時間に同期して、スペックルパターンを採取することのできる画像サンプリングシステムを構築し、スペックルパターンの採取を実施する処理法を提案している。

Fig. 3(b)に示すように、任意の y 座標 y_0 (網掛け平面

内)において考えると, Fig. 3 (a) のように対角要素をすべて利用することによって, バーチャルスペックルパターンを創成するのではなく, 圧電素子 (PZT-2) の移動に伴い得られた位相の変化が 2π rad 変化するまでの情報のみを用いて, 鋸波状にデータをサンプリングし, 空間に再配置することによっても, 新たにバーチャルスペックルパターン SP_4 を作製することができる. この手法を用いると, 短い時間内のデータでバーチャルスペックルパターンを作製することができる.

以上のように時間に依存するデータを空間のデータに置き換えることによって, 容易にバーチャルスペックルパターンを作製することができる. このような処理では, 前節で Fig. 3 (a) に示したような対角要素となるような変形過程全域における強度分布を用いないので, 変形に伴うキャリア縞への位相の影響も極力抑えることができる利点がある.

3. 測定結果の検討

3.1 シミュレーションによる解析原理の検討

上記の解析原理の有効性ならびにその測定精度を, シミュレーションによって検討する. シミュレーションでは, 位相変化が単調増加・減少ではない位相成分として凸情報をもつ Fig. 4 に示す変形前後での位相の変化量 ϕ_d を測定対象としている. この位相分布は, 式 (2) として表すことができる.

$$\phi_d = 6\pi \exp \left[- \left\{ \left(\frac{x-300}{150} \right)^2 + \left(\frac{y-300}{150} \right)^2 \right\} \right] \quad (2)$$

また, この位相分布をもつスペックルパターンの各時刻における強度分布モデル $I(x,y,t)^{16,19)}$ は, 式 (3) として示すことができる.

$$I(x,y,t) = A + B \times \cos(\phi_0(x,y) + V_s \times t + \phi_d \times t/T) \quad (3)$$

ここで, A, B はそれぞれスペックルパターンのバイアス成分, 振幅成分であり, $\phi_0(x,y)$ は各スペックルの初期位相である. t は変形開始時からの経過時間を表すもので, T は変形に要するトータルの時間 (シミュレーションではステップ数) を表すものである. また, V_s は参照平面の移動に伴う位相変化を表すパラメータで, 演算の 1 ステップ間における参照平面の位相の変化量を表すものである. さらに, t/T は, 式 (2) に示す位相分布に対して時間的な割合を与える係数である. すなわち, $\phi_d \times t/T$ は変形開始後からの経過時間 t における x - y 平面内の変形に伴う位相分布を表している. シミュレーションは, $A=2.0, B=1.0, V_s=2\pi/8, T=100$ と設定することによって行われている.

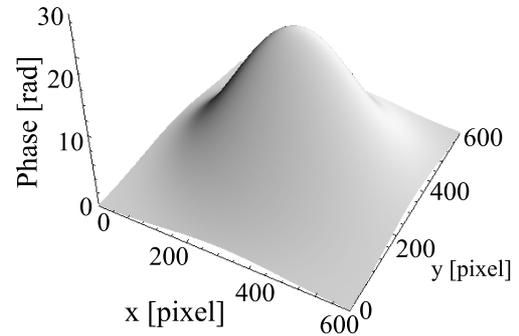


Fig. 4 Original phase distribution for simulation.

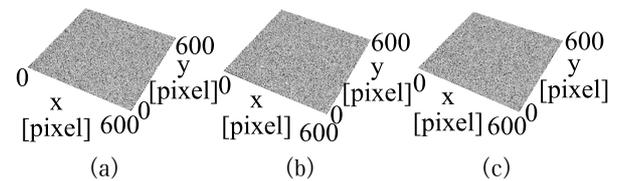


Fig. 5 Speckle patterns in simulation. (a) Before deformation (SP_{s-0}), (b) after deformation (SP_{s-1}), (c) virtual speckle pattern (SP_{s-v}).

Fig. 5 に, 変形前後 (SP_{s-0}, SP_{s-1}) と上記の手法により得られたスペックルパターン (SP_{s-v}) を示す. ここで, サフィクスとしての $s-0, s-1$ は, シミュレーションにおける変形前後の SP_0, SP_1 を意味するものである. 同様に, SP_{s-v} は, シミュレーションにおけるバーチャルスペックルパターンを表すものである.

ここで, Fig. 6 に, 変化前のスペックルパターン SP_{s-0} と変化後のスペックルパターン SP_{s-1} との間で, 式 (1) により求めたスペックルグラムを示す. Fig. 7 に, 変形前後のスペックルパターン SP_{s-0} ならびに SP_{s-1} と, 本手法によって求めたバーチャルスペックルパターンとの間で得られるスペックルグラムの中心付近の強度分布を示している. Fig. 7 (a) に示す上記測定原理に従って得られたバーチャルスペックルと, 変形前のスペックルパターンとの間で得られたスペックルグラムでは, x 方向の 496 ピクセル間に 62 本の直線的な縞が存在することを確認することができる. このことより, 8 ピクセルが 1 周期となるキャリア縞の存在を確認することができる. さらに, 変形後のスペックルパターンとの間で得られた Fig. 7 (b) では, キャリヤー縞が変形を受けていることがわかる. ここでは, 画像の中心付近で変形縞が 3 縞 (6π rad) 発生する間に, 100 枚のスペックルパターンが採取される条件のもとでシミュレーションを行った. また, 8 枚のスペックルパターンを

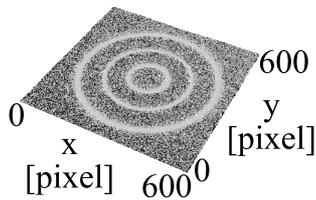


Fig. 6 Speckle gram by the before- and the after-deformation speckle patterns.

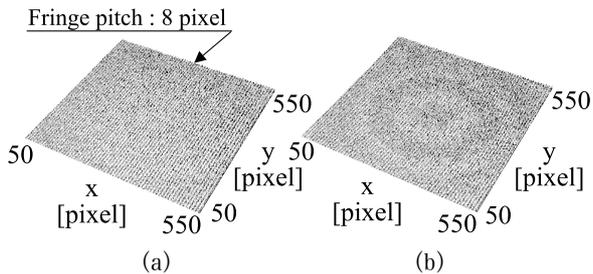


Fig. 7 Speckle grams as carrier fringes. (a) Before deformation-VSP, (b) VSP-after deformation.

採取する間に、圧電素子 (PZT-2) が光源の $1/2$ 波長移動するものとして設定がなされている。

SP_{s-v} と SP_{s-0} , ならびに SP_{s-v} と SP_{s-1} との間で式 (1) により求めたスペックルグラムをそれぞれフーリエ変換することによって、周波数領域での信号成分を観察した結果を Fig. 8 に示す。Fig. 8 (a) に示す SP_{s-v} と SP_{s-0} による縞画像では、 x 方向の周波数として 8 ピクセル 1 周期の位置に信号のピークが存在することより、Fig. 7 (a) で観察されるように 8 ピクセル 1 周期のキャリア縞が得られていることがわかる。

一方、Fig. 8 (b) に示す SP_{s-v} と SP_{s-1} によって得られた縞画像では、周波数領域においてリング状の縞情報を観察することができる。これら Fig. 8 (a), (b) に示すそれぞれの縞情報を、フーリエ変換を用いてフィルタリング²³⁾ した後に、空間的縞解析法によって位相分布を求め、 SP_{s-v} と SP_{s-1} によるスペックルグラムの位相分布から、 SP_{s-v} と SP_{s-0} によるスペックルグラムの位相分布を減算した結果を Fig. 9 に示す。Fig. 4 に示した本来の変形にかかわる位相分布と同様の位相分布をとらえることができています。ここで、Fig. 4 に示す位相分布との差を示したものが Fig. 10 である。リング状に若干の誤差を確認することができるものの、両者の差の標準偏差は 0.086 rad であった。これは、実寸法としては 7.3 nm に相当するものである。

以上のシミュレーション結果より、本手法が高分解能に縞解析を実施することのできる手法であることを確認した。

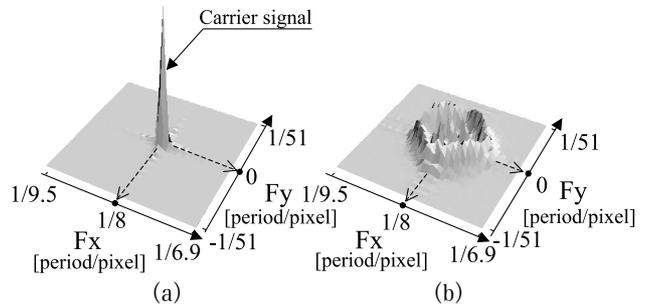


Fig. 8 Fringe signals in frequency domain. (a) Before deformation-VSP, (b) after deformation-VSP.

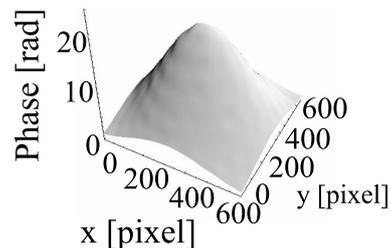


Fig. 9 Measured total phase map.

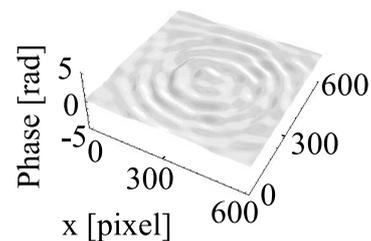


Fig. 10 Difference between original and measured phase maps.

3.2 実験結果による解析原理の検討

上記のシミュレーション結果に基づいて、つぎに、実験により測定精度の検討を行った。測定精度を検討するために、実験では、実際の変形量を正確に把握することのできる Fig. 1 に示した平面の回転に伴う面外変形を測定対象とした。

Fig. 1 に示す光学系において、測定領域の先端における測定対象の変形スピードを 325 nm/s、参照平面の移動速度を 1.0 μ m/s として、1 秒間に 30 枚の画像を採取することのできるカメラを用いて、変形過程を 150 枚のスペックルパターンとして採取し、 x - y 平面を 600 pixel \times 700 pixel (実対象として 18 mm \times 21 mm) の領域で行った。

Fig. 5 と同様に、変形前後のスペックルパターン SP_{m-0} , SP_{m-1} ならびに、変形開始後 8 枚のスペックルパターンを用いて、Fig. 3 (b) に示す鋸波状に時間データを採取し、空間に並び替えることによって得られたバーチャルスペック

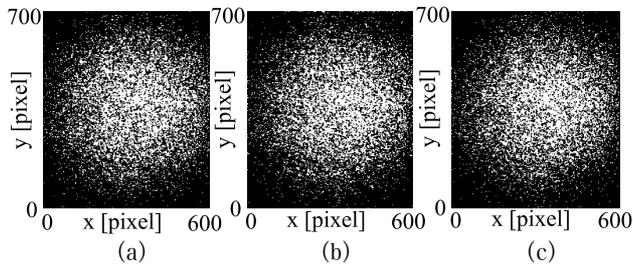


Fig. 11 Speckle patterns in experiment. (a) Before deformation (SP_{m-0}), (b) after deformation (SP_{m-1}), (c) virtual speckle pattern (SP_{m-v}).

ルパターン SP_{m-v} を Fig. 11 (c) に示す。ここで、Fig. 11 (a), (b) に示す SP_{m-0} , SP_{m-1} については、測定結果であることを示すためにサフィクスを $m-0$, $m-1$ として与え、測定時における変形前後のスペックルパターン SP_0 , SP_1 であることを示している。さらに、シミュレーションと同様にバーチャルスペックルパターンと変形前後のスペックルパターン間で求めたスペックルグラムによる縞画像を Fig. 12 に示す。Fig. 12(a) は、変形前後のスペックルパターン (SP_{m-0} , SP_{m-1}) を式 (1) に示す演算によって求めた測定対象の変形量に関する位相変化の縞画像である。一方、Fig. 12 (b), (c) に示すバーチャルスペックルパターンと変形前後のスペックルパターン間で求めたスペックルグラムにおいて、キャリア縞の発生状況を明確に示すために、 x 方向では、測定対象の中心付近の狭い範囲で縞画像情報を示している。これらの縞画像をフーリエ変換することにより得られた縞画像の周波数領域での状況を Fig. 13 に示す。この場合、測定対象が平面の回転により発生した位相分布であることから、Fig. 8 に示したような周波数領域での広がりはなく、Fig. 13 (a), (b) に示すそれぞれの縞画像は単独のピークをもつものとなっている。

ここでは、Fig. 12 (b) に示す変形前のスペックルパターンとバーチャルスペックルパターンとの間で得られたスペックルグラムの縞画像を、キャリア縞として利用している。

Fig. 13 (a) に示す周波数領域における信号成分をみる

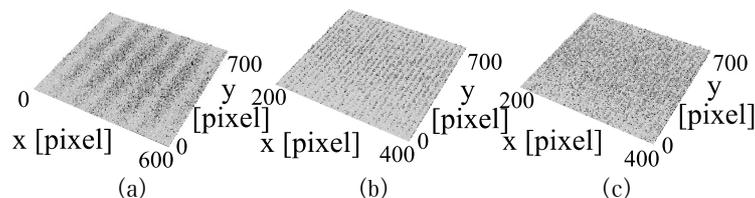


Fig. 12 Speckle grams. (a) Before-after, (b) before-VSP, (c) after-VSP.

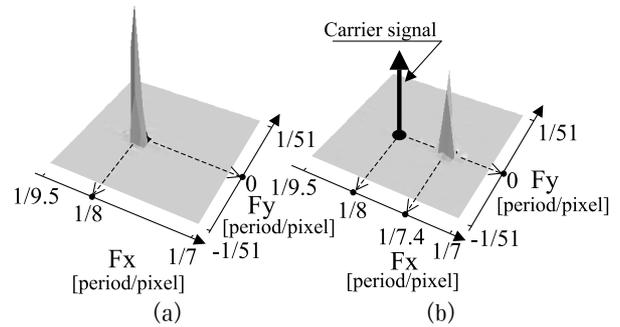


Fig. 13 Carrier and deformed carrier-fringes in frequency domain. (a) Before-VSP, (b) after-VSP.

と、測定原理に示したように、8 ピクセルが 1 周期となるような鋸波状に画像データを置き換えているので、キャリア縞の周期は 8 ピクセルが 1 周期となっている。

これらの結果に対して、空間的縞解析法¹²⁾により位相分布を求めた結果を等高線表示したものが Fig. 14 (a), (b) である。Fig. 14 (a) に示す変形前とバーチャルスペックルパターンとの間で得られた結果では、Fig. 13 (a) に示すようにキャリア縞はほとんど変調されておらず、Fig. 14 (a) に示す位相分布の等高線表示では、等高線 1 本あたりが 1 rad と設定されているので、測定範囲内で 1 rad 程度の位相変化が存在するにとどまっている。

一方、Fig. 14 (b) に示す変形後のスペックルパターンとバーチャルスペックルパターンとの間での位相変化は、ここでも等高線 1 本あたりが 1 rad になっていることより、測定範囲内では若干 y 方向に傾きをもちつつ、 x 方向に 35 rad 程度の位相変化が存在していることがわかる。Fig. 14 (a), (b) の A-A, B-B 断面における位相分布を Fig. 14 (c) に示す。

今回の実験では、変形開始直後のデータを用いてバーチャルスペックルパターンを創成しているため、Fig. 14 (c), A-A 断面が示すように、変形前とバーチャルスペックルパターンとの位相分布の変化は明らかに小さく、変形に伴う位相の変化の大半は、B-B 断面が示すように変形後とバーチャルスペックルパターンとの間に存在していることがわかる。さらに、変形後とバーチャルスペックルパ

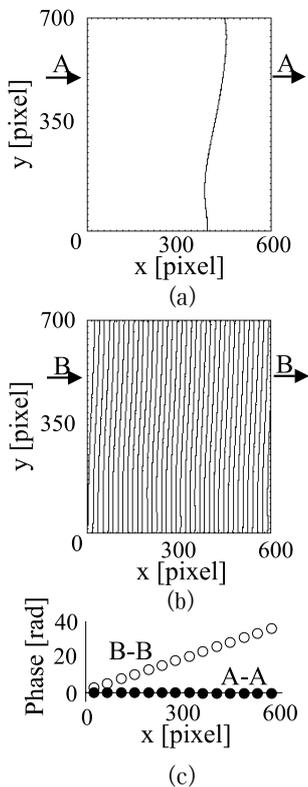


Fig. 14 Phase maps. (a) Before-VSP, (b) after-VSP, (c) sections.

ターンとの間の位相変化から、変形前とバーチャルスペックルパターンとの間の位相変化を引き算したトータルの位相変形結果を Fig. 15 に等高線表示によって示している。

ここで実施した Fig. 14 (a), (b) のそれぞれの領域での位相分布結果から、Fig. 15 を求める処理において行う引き算により、キャリア縞がもつ誤差要因を前報¹⁷⁾に示すように緩和することができる。すなわち、8ピクセルを1周期として得られた時間的な情報を鋸波状に置き換える本手法では、随時発生している測定対象の変形量は、本来変調成分をもたないはずのキャリア縞に変調成分を与える要因となる。このような変調成分の影響を、この引き算処理によって緩和している。

測定結果より、圧電素子によって実際に回転させた変形量分布を減算した結果を Fig. 16 に示す。Fig. 16 (a)において、位相分布は等高線表示によって示されている。ここでの等高線1本あたりの位相としての変化量は0.2 radである。さらに、Fig. 16 (b)に Fig. 16 (a)のD-D断面の状況を示している。

Fig. 16の結果におけるばらつき標準偏差は0.084 radである。本光学系がダブルパスになっていることを考えると、これは1/150波長に相当している。

また、Carréのアルゴリズムによって得られた結果¹⁹⁾と

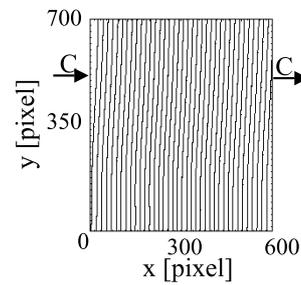


Fig. 15 Total phase map.

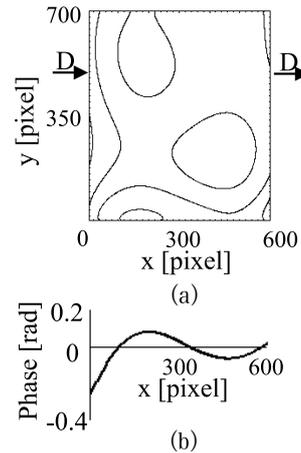


Fig. 16 Error distribution of measured result. (a) Contour, (b) section D-D.

の比較を、Fig. 15のC-C断面において行ったものがFig. 17である。両者の差の標準偏差は0.063 radであり、波長に置き換えると1/200波長(実寸法としては、2.6 nm)に相当している。この結果から、Carréのアルゴリズムをもとにした手法と、本手法とによって得られた測定結果は同等であるものと考えられることができる。Carréのアルゴリズムをもとにしたバーチャルスペックルパターンの作製では、それぞれのピクセルにおいて、位相情報、位相シフト情報、バイアス成分、振幅成分を求め、それらの結果に基づいてバーチャルスペックルパターンを合成しなければならない¹⁹⁾。一方、本手法では、単に画像情報の時間と空間を考慮した置換のみによって、バーチャルスペックルパターンを作製することができる。本手法によるバーチャルスペックルパターンの作製において、Carréのアルゴリズムをもとにした手法と、同じデータに対する処理を同じコンピューター(CPUはIntel CoreTM2Duo、クロックは2.4 GHz、32ビットオペレーションシステム)を用いて演算時間(CPUタイム)に関して比較をすると、約26分の1に演算時間を短縮できることがわかった。

以上の結果より、本報において提案した新しい編解析法

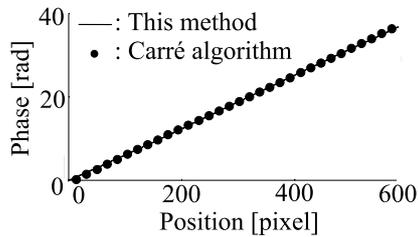


Fig. 17 Comparison of this method with the method by Carré algorithm.

は、高速処理が可能であるとともに、高い分解能を有する面外変形計測法であることがわかった。

4. おわりに

本報では、前報¹⁹⁾までに提案してきたバーチャルスベックルパターンの有効性を踏まえ、スベックルパターンのもつ性質を有効利用することによって、時間的な変化量を空間的な変化量に置き換えることによる、簡便なバーチャルスベックルパターン作製技術を提案した。

新しい手法では、シミュレーション結果より、凸の位相分布をもつ対象においても解析が可能であることを示すとともに、位相モデルとの差の標準偏差が 0.086 radであることを示した。また、解析過程において Carré のアルゴリズムを用いた手法で問題となっていた位相シフトの問題もなく、さらに、Carré アルゴリズムに基づく手法との比較において、解析時間が大幅に改善されていることがわかった。

平面の回転により発生した面外変形計測実験においても、従来法としての Carré アルゴリズムに基づく手法との比較において、両者の解析結果の差の標準偏差が、波長に置き換えると 1/200 波長であることがわかった。

これらの結果より、提案した手法が、従来どおりの高分解能な解析法であるとともに、Carré アルゴリズムに基づく手法よりも、さらに高速処理が可能なるもので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. 395-476.
- 4) B. J. Thompson: *Electronic Speckle Pattern Interferometry: Prin-*

- ciples and Practice* (SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, WA, 1996).
- 5) R. Jones and C. Wykes: "General parameters for the design and optimization of electronic speckle pattern interferometers," *Optica Acta*, **28** (1981) 949-954.
- 6) A. Macovski, S. D. Ramsey and L. F. Schaefer: "Time-lapse interferometry and contouring using television system," *Appl. Opt.*, **10** (1971) 2722-2727.
- 7) 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.
- 8) 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) pp. 457-518.
- 9) S. Nakadate and H. Saito: "Fringe scanning speckle-pattern interferometry," *Appl. Opt.*, **24** (1985) 2172-2180.
- 10) Y. Arai and S. Yokozeki: "In-plane displacement measurement using electronic speckle pattern interferometry based on spatial fringe analysis method," *Opt. Eng.*, **43** (2004) 2168-2174.
- 11) Y. Arai and S. Yokozeki: "Improvement of measuring accuracy of spatial fringe analysis method using a Kalman filter and its application," *Opt. Eng.*, **40** (2001) 2605-2611.
- 12) 新井泰彦, 横関俊介: "空間的編解析法を用いた電子的スベックル干渉法のパラメーター設定", *光学*, **30** (2001) 49-55.
- 13) 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ベックル干渉計測法の開発", *光学*, **36** (2007) 475-484.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) 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ベックル干渉計測法", *光学*, **37** (2008) 41-49.
- 17) 新井泰彦, 島村遼一, 横関俊介: "電子スベックル干渉計測におけるバーチャルスベックルパターンを用いた面内変形計測", *光学*, **37** (2008) 119-129.
- 18) 新井泰彦, 島村遼一, 横関俊介: "バーチャルスベックルパターンを用いた高分解能ダイナミック面内変形計測", *光学*, **37** (2008) 600-609.
- 19) 新井泰彦, 堤 泰憲, 横関俊介: "Carré アルゴリズムを基礎とするバーチャルスベックルパターンを用いた動的な面外変形計測", *光学*, **38** (2009) 529-538.
- 20) P. Carré: "Installation et utilisation du comparateur photoélectrique et interférentiel du Bureau International des Poids et Measures," *Metrologia*, **2** (1966) 13-23.
- 21) K. Creath: "Phase-shifting speckle interferometry," *Appl. Opt.*, **24** (1985) 3053-3058.
- 22) 新井泰彦, 横関俊介: "2次元空間的編解析法のスベックル干渉法への適用", *光学*, **29** (2000) 250-255.
- 23) 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ベ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.