光学 38, 10 (2009) 529-538

技術報告 Received January 7, 2009; Accepted August 21, 2009

Carré アルゴリズムを基礎とするバーチャルスペックル パターンを用いた動的面外変形計測

新井 泰彦* · 堤 泰憲* · 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

Out-of-Plane Deformation Dynamic Measurement Method by Using Virtual Speckle Pattern Based on Carré Algorithm

Yasuhiko ARAI*, Yasunori TSUTSUMI* 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

Temporal carrier has been introduced to electronic speckle interferometry in order to produce virtual speckle patterns. Dynamic deformation measurement with a large deformation is performed by using virtual speckle patterns. However, it takes a long calculating time to produce virtual speckle patterns, because the method requires Fourier transform operation at each pixel of CCD. In the proposed method, virtual speckle patterns are produced by Carré algorithm without Fourier transform. As the results, it is confirmed that the calculating cost of virtual speckle patterns is improved remarkably, and that the new method also is equal to the ordinary methods in measurement accuracy.

Key words: ESPI, virtual speckle pattern, Carré algorithm, out-of-plane deformation measurement

1. はじめに

1970 年代初頭より、スペックルを用いた変形計測法と して TV カメラによる ESPI (electronic speckle pattern interferometry)¹⁻⁶⁾が利用され、さらに、現在では縞走査 技術を適用したコンピューター解析技術による高分解能面 外•面内変形計測が行われるに至っている⁴⁻⁹.

スペックル干渉計測による動的変形計測法には,電子ス ペックル干渉計測法¹⁻¹²⁾ にマルチカメラ技術¹³⁻²⁰⁾を導入 した光学系を用いたもの,空間的なキャリヤー情報を与え ることを目的として,測定対象に変形が発生する前に波面 を微小角傾けることによって得られるキャリヤー情報を利 用する3枚(変形前後の2枚の画像に加えて,キャリヤー 情報を与えるための画像1枚をあらかじめ変形前に光学的 に採取しておく手法)のスペックルパターンによる高分解 能な変形量解析法¹⁰⁻¹²⁾, temporal carrier^{21,22)}技術を用い た解析法, さらに, temporal carrier 技術を利用すること によってバーチャルスペックルパターンを製作し,それら を用いた動的かつ大変形計測のための手法²³⁻²⁶⁾などが提 案されている.

本研究では、大変形を伴う高分解能な動的変形計測が実施可能なバーチャルスペックルパターンを用いた編解析技術を簡便に利用可能にするために、当該技術を高速処理が可能な技術へと改善している.

バーチャルスペックルパターンを用いた技術²³⁻²⁶⁾では, 縞解析を高分解能に行うために変形計測過程において採取 された連続するスペックルパターンに含まれる光学的情報 を利用して,人工的にスペックルパターンをコンピュータ 一内部で作製し,この作製されたバーチャルスペックルパ ターンを用いて粗面をもつ物体の面外・面内変形計測が行 われている.

ところが,この手法を用いて大変形計測を行うために は,変形の状況に応じて変形過程内でバーチャルスペック

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



Fig. 1 Principle for producing virtual speckle patterns. (a) Speckle interferometry optical system, (b) Intensity of speckle in deformation process.

ルパターンを任意の時刻で作製しなければならない.しか しながら、従来法²³⁻²⁶⁾では、バーチャルスペックルパタ ーン作製時に多大の演算時間が求められ、適切なバーチャ ルスペックルパターン作製時刻が不明の中での編解析作業 においては、試行錯誤に伴う長時間にわたる解析作業が必 要とされる問題があった.

本研究では、短時間にバーチャルスペックルパターンを 作製することのできる新たな手法の開発を、位相シフト量 が未知の場合に利用される代表的な時間的縞解析法である Carré アルゴリズム^{1,27-32)}を用いることによって行って いる.

開発された手法では、従来法によるバーチャルスペック ルパターンの製作時に比べて、演算時間が約160分の1に 短縮されることが確認されている。また、本手法の測定精 度が従来法と同等のものであることも確認されている。さ らに、Carréアルゴリズムを本手法に用いる場合に発生し うる問題も検討され、加えて、空間的に凹凸分布をもつ大 変形面外計測においても本手法が利用可能であることを示 している。

バーチャルスペックルパターンを用いた縞解析技 術²³⁻²⁶⁾

Fig. 1 (a) に示す光学系において,測定対象(粗面-1) が連続して変形する場合には,Fig. 1 (b) に示すように採 取されたスペックルパターンの P₁ 点における強度は,変 形時の光路長の変化に伴い正弦波状に変化する.この性質 を用い,temporal carrier 手法^{21,22)}に基づいて強度分布の 変化に対応する位相変化をヒルベルト変換によって各ピク セルで求め,さらに特定の時刻にすべてのピクセルで求め た位相値を二次元に並べると変形過程におけるその時刻に 関するスペックルパターンの二次元位相分布 $\varphi(x, y)$ を 求めることができる.

この方法をもとにして異なった2つの時刻における二次 元位相分布を求め、その時刻間の位相変化量を各ピクセル において求めると変形に伴う二次元位相変化量分布を求め ることができる。しかしながら、このような temporal carrier 手法^{21,22)}による変形に伴う二次元位相変化量分布 の検出では、スペックルパターン内に unsolved speckle が存在しているために、測定対象内全域において必ずしも 高い測定精度をもつ変形に伴う二次元位相分布を求めるこ とができない問題がある²³⁾.

ところが、この状況下においても上記手法によって、変 形過程の任意の時刻におけるスペックルパターンの二次元 位相分布 $\varphi(x, y)$ を求め、さらに、ヒルベルト変換を用 いた演算時にスペックルパターンの低周波領域情報を用い てスペックルパターンのバイアス成分 A(x, y)を推定し、 かつヒルベルト変換結果を用いてスペックルパターンの振 幅成分 B(x, y)を推定すると、スペックルパターンの強 度分布モデルを用いることによって、変形過程における任 意の時刻におけるスペックルパターンを式(1)に示すよ うにコンピューター内に人工的に再構成することができ る.

$$I(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos(\varphi(x, y))$$
(1)

このとき,新たに再構成されるスペックルパターンに空間的位相情報を付加すると,空間的なキャリヤー情報をもつ人工的なスペックルパターンを作り出すことも式(2)に示すように可能となる.

$$I(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos \left(\varphi(x, y) + \omega_{c} \cdot x\right)$$
(2)

ここで, ω_c は空間的キャリヤー縞の角周波数である. このようにして作製された人工的なスペックルパターン がバーチャルスペックルパターンである²³⁻²⁶.

temporal carrier 法では各ピクセルのヒルベルト変換に よって求められた位相を最終的な二次元位相分布結果とし て利用しているので unsolved speckle が存在する場合に は、その地点の位相分布を正確に求めることができない。 しかしながら、バーチャルスペックルパターンを用いる縞

530 (36)

解析²³⁻²⁶⁾では,作製されたバーチャルスペックルパター ンと実際に採取されたスペックルパターンとの間で変形に 関する縞画像をまずスペックルグラムとして求め,その後 に,その縞画像に対して縞解析を行うので,この処理過程 では,従来のスペックル干渉計測法において通常行われて いるフィルター技術による変形縞としてのスペックルグラ ムに対する処理を施すと,各ピクセルの強度分布そのもの が直接問題となるのではなく,スペックルグラムとして発 生した二次元の縞画像を扱うことになるので,たとえ多数 の unsolved speckle がスペックルパターン内に存在して いたとしても,二次元に広がった縞情報を用いることによ って変形情報を高分解能に抽出することができる.したが って, unsolved speckle の影響を受けることなく変形に関 する二次元位相分布を高分解能に検出することができる.

さらに、Fig. 2 に示すようにバーチャルスペックルパタ ーンを用いた縞解析では、バーチャルスペックルパターン を作製した任意の時刻 T_vを挟む 2 つの領域(A),(B)で 変形に伴う位相分布をそれぞれ求めると、2 つの領域にお いてバーチャルスペックルパターンと実際のスペックルパ ターンとによって求められたスペックルグラムにおいて、 縞解析における変形に関する時間的な方向が逆方向となる ので、2 つの領域のトータルの変形量演算時には減算に基 づく処理が行われることになる。この結果、バーチャルス ペックルパターン内に存在するバーチャルスペックルパタ ーン製作時に発生した誤差を相殺することができる²⁴).

加えて、変形過程の任意の位置(変形過程の任意の時 刻)でバーチャルスペックルパターンは製作可能なので、 大変形を伴う解析では、必要に応じて複数個所でバーチャ ルスペックルパターンを作製することによって、一般のス ペックル変形解析において大変形ゆえに高分解能な縞解析 ができない状況下でのスペックル変形解析も、複数のバー チャルスペックルパターンを任意の複数位置で作製するこ とによって対処することができる利点がある²⁶.

以上のように、バーチャルスペックルパターンを用いた 縞解析法は、多くの利点を有する変形解析法である。しか しながら、前述のように従来は各ピクセルでヒルベルト変 換を用いた演算によってバーチャルスペックルパターンが 製作されていたために、その製作に当たっては、多大の演 算時間が求められていた。このために、大変形を伴う変形 解析において変形過程のどの時刻でバーチャルスペックル パターンを作製することが、効率的な変形解析につながる かを検討するような試行錯誤を伴う処理プロセスでは、多 くの演算時間が必要となるなどの問題を含んでいた。バー チャルスペックルパターンの変形過程における効率的な製



Fig. 2 Fringe analyzing process.

作時刻を一意的にいまだ特定することができない現状では、バーチャルスペックルパターンのもつ利点を十二分に 引き出すためには、その製作時の演算時間の短縮は必要不 可欠な重要な改善事項である.

3. Carré アルゴリズムに基づくバーチャルスペックル パターンの製作

Fig. 1 (a) に示すような電子スペックル干渉計において 粗面-1 が回転による面外変形を受ける過程で,粗面-2 が 圧電素子によって光軸に平行に移動すると,カメラの各ピ クセルでのスペックルパターンの強度は,粗面-1の変形 量に伴う位相変化と粗面-2の移動に伴う位相変化量との 相対的な位置関係に基づいて変化する.

前章までに示したように、この変形過程をヒルベルト変 換を用いて解析すると、temporal carrier 解析によって時 間的な位相変化量を求めることができる^{21,22)}。さらに、こ の解析結果を用いてバーチャルスペックルパターンを作製 し, Fig. 2 に示すように時間領域を分割してその隣り合う 領域間での位相演算を行うと,前章に示すように temporal carrier 解析よりもさらに高分解能な変形解析を実現 することができる23-26).本手法では、任意の時刻でバー チャルスペックルパターンを製作することができるので、 この性質を用いると、スペックル変形解析において問題と なる変形前後のスペックルの空間的な重なり合いを得るこ とができないほどの大変形計測であっても、そのトータル の変形量をスペックルの空間的な重なり合いの問題が生じ ない²⁴⁾ 微小変形のいくつかの領域に分割¹⁹⁾ することによ って、大変形計測を高分解能に実施することができる。し かしながら,この解析法では、二次元に広がるスペックル パターン画像の各ピクセルにおいて, ヒルベルト変換が必 要となるために多大の演算時間が必要とされていた。この 演算時間の問題を、本研究では、Carréアルゴリズム^{1,27)} を用いることによって解決する.

Carréアルゴリズムは,式(3)に示すような4つの縞 強度分布を採取することによって縞の位相を求める縞解析 法である^{1,27)}.



Fig. 3 Virtual speckle pattern based on Carré algorithm.

$$I_{1} = A + B \cos (\varphi - 3\alpha)$$

$$I_{2} = A + B \cos (\varphi - \alpha)$$

$$I_{3} = A + B \cos (\varphi + \alpha)$$

$$I_{4} = A + B \cos (\varphi + 3\alpha)$$
(3)

ここで、A(x, y)、B(x, y)は式(1)に示すものと同様 に、それぞれバイアス成分、編強度の振幅成分である。ま た、 φ は変形位相であり、 α は縞の位相シフト量である。

Carré アルゴリズムでは、式(3)に対して式(4)に示 すように変形位相量 φ を求めることができる¹⁾.

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{\{ [3(I_2 - I_3) - (I_1 - I_4)] [(I_1 - I_4) + (I_2 - I_3)] \}^{1/2}}{(I_2 + I_3) - (I_1 + I_4)} \right)$$
(4)

ただし、式(4)では、逆正接関数の主値の関係で、 - $\pi/2 < \varphi < \pi/2$ の範囲でしか位相を求めることができない。 さらに、Carréアルゴリズムでは、逆正接関数の変数 が平方根演算を含んでいるために、位相つなぎ処理で modulo- 2π を求める演算が複雑になることが知られている¹⁾。 この modulo- 2π を求める演算では Creath による演 算法がよく知られている³²⁾。したがって、本手法において もこの演算法を用いて- $\pi < \varphi < \pi$ の変形位相量を求めた。

本研究ではCarréアルゴリズムを用いるにあたって, Fig. 3に示す測定・解析過程を設定し, 縞解析を行っている.

すなわち,式(3)に示す4枚のスペックルパターンを 採取する間の微小変形(微小時間内の変形)を考える場合 には,測定対象に変形が生じるとともに基準粗面(Fig.1 (a)では粗面-2)は圧電素子によって位相がシフトされる 中で変形過程に関する画像採取が行われる.したがって, 式(3)が示すように,変形位相 φ と位相シフト α とを 分離して考えることは実際にはできない

この場合の微小時間内の変化は, Fig. 3 に示すようにそ の変形位相は $\Delta \varphi_{12}$, $\Delta \varphi_{23}$, $\Delta \varphi_{34}$ とそれぞれのサンプリン グ間隔内で発生し,そして,その総和が4枚の画像サンプ リング間に発生していることになる. ここで、縞解析を実施するために、以下の条件を仮定 する.

 Fig.1 (a) の位相シフトを行うための粗面-2の移動 は、測定対象の変形量よりもはるかに速くシフトされ るものと仮定する。この仮定のもとでは、位相シフト 量 α に対して変形位相量 Δφ は微小であると考えら れる。

さらに,

② 変形位相量が微小であり、かつ微小時間内に発生しているので、粗面-2の移動に伴う4枚の縞画像採取の微小時間内では時間に対して、変形が線形に生じていると仮定する。この第二の仮定に基づくと4画像採取内では各画像採取間の変形に関する位相変化量は等間隔に発生するものであると考えることができる。すなわち、式(3)を成立させるために、微小時間内では変形は線形に進むと仮定すると、 $\Delta \varphi_{12} = \Delta \varphi_{23} = \Delta \varphi_{34}$ (= $\Delta \varphi$)が成り立つことになる。

さらに、画像強度の採取は、粗面-2を等速に移動させることによって、時間間隔を一定として採取するバケット方式¹⁾ で行われる.この場合、上記のように位相シフト *α*と変形による位相量 *Δφ* の和が見かけ上の位相シフト量として検出されることになる.

したがって,現実には式(5)に示すような4つの式に 従った縞に対する縞解析が行われることになると考えら れる.

 $I_{1} = A + B \cos \left(\varphi_{0} - 3\left(\alpha + \varDelta \varphi/2\right)\right)$ $I_{2} = A + B \cos \left(\varphi_{0} - \left(\alpha + \varDelta \varphi/2\right)\right)$ $I_{3} = A + B \cos \left(\varphi_{0} + \left(\alpha + \varDelta \varphi/2\right)\right)$ $I_{4} = A + B \cos \left(\varphi_{0} + 3\left(\alpha + \varDelta \varphi/2\right)\right)$ (5)

ここで、微小変形内で4枚の画像が採取されていると考えると、位相シフト量が $\alpha \gg \Delta q/2$ であるとすれば、上記の仮定に従って変形位相を求めることができる.

本研究では、位相シフト量は未知の値である.このよう な場合にでもCarréアルゴリズムを用いると、縞解析を 実施することができる.本手法では、このCarréアルゴ リズムの性質を利用することによって、バーチャルスペッ クルパターンを作製している.

以上のように考えると,前報²³⁻²⁶⁾までに示したと同様 に式(3)において位相シフト量がゼロの場合の編強度分 布を想定すると,バーチャルスペックルパターンを式(1) に示すスペックルパターン数式モデルに従って作製するこ とができる²³⁾.

ここで、各ピクセルにおけるA(x, y) とB(x, y)は、

532 (38)



Fig. 4 Experimental apparatus.

式(3) に示す 4 つの式の間では同じものであると仮定し, かつ, Carré アルゴリズムでは式(3) に対して, φ は式 (4) より, また α は式(6) によって求められる¹⁾. 実際 には,式(2) としてスペックルパターンのモデルを考え ているので,式(6) で求める α には,すでに測定対象の 変形量 $\Delta \varphi$ が含まれていることになる.

$$\alpha = \tan^{-1} \left[\frac{3(I_2 - I_3) - (I_1 - I_4)}{(I_1 - I_4) + (I_2 - I_3)} \right]^{1/2}$$
(6)

ここで,式(3)に示す,4つの式のうちの2つの式に 式(4)と式(6)とによって求めた φ と α を代入する と,A(x, y)とB(x, y)に関する連立方程式を導くことが できる。これを解くことによって,各ピクセルにおける A(x, y)とB(x, y)を求めることができる。

さらに,前報までの temporal carrier 解析で用いたように²³⁻²⁶⁾,キャリヤー成分を従来法と同様に式(2)のように与えると,変形過程の任意の位置で4枚の縞画像を用いることによってキャリヤー成分を含んだバーチャルスペックルパターンを製作することができる.

このようにして,バーチャルスペックルパターンを定義 すると,前報までに行ってきた縞解析法²³⁻²⁶⁾と同じ手順 で,空間的縞解析法¹⁰⁻¹²⁾の利用によって高分解能に大変 形動的面外計測が可能となる.この場合には,前報²³⁻²⁶⁾ のようにヒルベルト変換を用いた temporal carrier 演算 を行わないので,演算コストをはるかに軽減することがで きる.

実験結果と検討

4.1 平面の回転による面外変位の測定

Fig. 4 に示す光学系において,測定対象としての粗面 (平面)を回転させることによって面外変位を与え,この



Fig. 5 Production of virtual speckle pattern by Carré algorithm. (a) Series of speckle patterns, (b) Virtual speckle pattern at $(i+1.5)^{\text{th}}$.

平面の変形計測の解析過程を用いて,本手法と従来法との 測定精度を比較検討した。

Fig. 4 に示すように、測定対象が連続して回転する間 に、1 秒間に 30 枚の画像をカメラのシャッタースピード を 1/120 s として 150 枚のスペックルパターンを採取し た.測定範囲は横 20 mm,縦 16 mm である。また、スペ ックルの大きさは、ここでは CCD 画素とほぼ同じ大きさ になるように設定した^{3,12)}.さらに、1/30 s の画像サンプ リング間に、位相シフトを行うための基準粗面を 62 nm 変位(移動速度は 1.86 μ m/s) させることによって位相シ フトを与えている。一方、測定対象は観測面の中心で 480 nm/s の速度で移動し、回転している。使用した光源は波 長が 532 nm の半導体励起固体レーザーである。計測時の 出力は 50 mW であり、その出力でのビームプロファイル を Fig. 4 に示す.

この 150 枚のうち, i 番目, i+1 番目, i+2 番目, i+3番目の 4 画像と式 (3) を用いると, Fig. 5 に示すように i+1 番目と i+2 番目の中間点 (i+1.5 番目) で (b) に示 す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.

ここで、i=74とした場合のバーチャルスペックルパタ ーン (VS₀)を式(2)に基づいて作製した結果を Fig. 6 に 示す. Fig. 6 に示すバーチャルスペックルパターンでは、 キャリヤー周波数を CCD 素子のピクセルサイズを物差し として 8 ピクセルー周期として与えている.

Fig. 6 に示すバーチャルスペックルパターンの A-A ラ イン上の強度分布ならびに、バーチャルスペックルパター ン作製時に用いた Carré アルゴリズムにより得た振幅分 布,バイアス分布,位相分布,ならびに位相シフト量分布 を Fig. 6 (b)~(f) に示す. (e) に示す位相分布は空間的 にランダムな値となっている. (b) に示すバーチャルスペ



Fig. 6 Virtual speckle pattern. (a) Virtual speckle pattern, (b) Intensity profile, (c) Amplitude profile [B], (d) Bias profile [A], (e) Phase profile $[\varphi]$, (f) Phase shift profile $[\alpha]$.

ックルパターンの強度分布は、Fig. 4に示す光源として用 いたレーザービームの強度分布に従って、中央部の強度が 強く、両サイドで強度が低くなっていることがわかる。同 様に、(d)のバイアス分布においても中央部で強度が強 く、周辺部では低くなっている。また、演算過程でゼロで 割るような処理が存在しているので、何箇所かのピクセル ではこれらの値は大きな値となっている。しかしながら、 このような大きな値は、スペックルグラムを演算する過程 でのフィルタリング処理によって除去され、最終的には誤 差要因にはならない。

(f) に示す位相シフト量は約0.7 rad である. ここでは, 位相シフトを行うための基準粗面を1/30 s 間に 62 nm 変 位させている.また,光学系としては,ダブルパスとなる ので,使用している光源の2分の1 波長(266 nm)が2 π rad に相当する.すなわち,1.46 rad(=62/266×2 π)が 1回のサンプリングにかかわる位相角(2 α)となる.した がって, α =0.7 radとなっていることは位相シフト量と して妥当な結果であると考えられる.このことより,位相 シフト量と変形量との速度比が約3.9 倍(≈1.86/0.48) である場合には,上記のサンプリングにかかわる仮定が成



Fig. 7 Relationship between phase shift (α) and reference plane speed. (a) Object speed: $1.44 \,\mu$ m/s, Reference plane speed: $1.86 \,\mu$ m/s, (b) Object speed: $1.44 \,\mu$ m/s, Reference plane speed: $2.79 \,\mu$ m/s, (c) Object speed: $1.44 \,\mu$ m/s, Reference plane speed: $3.72 \,\mu$ m/s, (d) Object speed: $1.44 \,\mu$ m/s, Reference plane speed: $5.58 \,\mu$ m/s.

り立つなかで変形量の影響を受けることなく計測が行われ ていることを示しているものであると考えられる.

ここで,測定対象の移動速度を1.44 μm/s(測定対象の 移動速度を3倍に設定)に高め,本縞解析において発生し うる位相シフト量に関する問題を検討した。

測定対象の移動速度が高くなると位相シフトのための基準粗面との相対速度が低下することになるので、移動速度が高くなる回転の先端部分では、30分の1秒内での変化量が小さくなり、結果的に Fig. 7 (a) にみられるように位相シフト量が減少し、位相シフト量の分布は右肩下がりとなる。この状況で位相シフトの基準粗面の移動速度を2.79 μ m/s (=1.5×1.86 μ m/s)とすると基準粗面の速度の増加分に見合ったシフト位相量(約0.4 rad)だけがFig. 7 (a)の状況から上昇することになる。実験では、0.45 rad 程度上部に Fig. 7 (a) に比べて(b) では平行移動していることが確認できる。(a)、(b)の条件では必ずしも測定対象と基準面との速度比は4倍にはなっていないものの、この条件下においても Carré のアルゴリズムを

用いてバーチャルスペックルパターンの作製が可能である ことを確認している.

次に、位相シフト量をさらに高めるために、基準粗面の 移動速度を3.72 µm/s (=2×1.86 µm/s) とすると, (a), (b) で観察されたような右肩下がりのシフト量分布を得る ことができなかった。この場合には、(b) に示したと同様 に、(b)の状況からさらに基準粗面の速度の増加分に見合 った位相量(約0.4 rad)だけが上昇することになり、ほ とんどの領域で位相シフト量は1.6 rad 近くになるはずで ある. すなわち、単純に計算すると $\pi/2$ rad を超えてしま うことになる。ところが、位相シフト量αの計算では、 式(6)に示すように逆正接関数の変数として平方根の演 算が含まれているので、逆正接関数の変数は常に正の符号 をもつ値となる。その結果,式(6)を用いて求めた位相 シフト量 α の演算は齟齬を生じ、位相分布 φ を求める演 算において Creath による判別法も利用できなくなる。結 果的に、Carréのアルゴリズムを用いてバーチャルスペッ クルパターンの作製ができなくなる.

この状況で、位相シフトをさらに与えるために基準粗面 の移動速度を5.58 μ m/s (=3×1.86 μ m/s) へと高める と、位相シフト分布の空間的傾きが右肩上がりとなること が確認できる。加えて、本来位相シフト量は基準粗面の速 度の増加分に見合った位相量(約0.8 rad)だけが(c)に 示す状態から上昇しなければならないにもかかわらず、逆 に(c)の状態から0.6 rad 程度低下し、 $\pi/2$ radを境にし て位相シフト分布のグラフが上下に鏡面のように折り返し てしまっていることがわかる。この現象は明らかに、逆正 接関数の平方根演算の問題による影響である。すなわち、 式(6)の α を求める演算は、位相角として第一象限でし か角度を求めることができない問題を含んでいることがわ かる。

このように、現在の Carré アルゴリズムを用いたバー チャルスペックルパターン製作プログラムでは、 α の値 が 1.57 rad ($\pi/2$)を超えないように移動速度、ならびに 測定対象の変形速度を設定しなければならない問題があ る. 今後、 α の値が $\pi/2$ radを超える可能性がある場合 を扱わなければならない条件下でも、本手法が利用できる ようにするために、 α の演算において、 φ の検出で用い ている Creath による演算法³²⁾のような判別条件を定義す る必要がある.

本手法では上記の問題があるので、ここでは、基準粗面 と測定対象の変形速度に関係する α がカメラのサンプリ ング間隔内で、演算に明らかに齟齬を生じない条件 (Fig. 4 に示した条件)のもとで、本測定原理の有効性を検討した。



Fig. 8 Deformed carrier fringe in frequency domain. (a) Spatial domain, (b) Frequency domain, (c) Spatial domain, (d) Frequency domain.

Fig. 6 (a) に示したバーチャルスペックルパターン (VS₀) と0番目の実際のスペックルパターン PRS₀,なら びに VS₀ と 150番目における実際のスペックルパターン PRS₁₅₀ との間で求めた2つのスペックルグラムの結果を Fig. 8に示す.Fig. 8 (a),(b) に0番目の実際のスペッ クルパターン PRS₀ とバーチャルスペックルパターンとに よる結果を示し,(c),(d) に 150番目における実際のス ペックルパターン PRS₁₅₀ とバーチャルスペックルパター ンとの結果を示している.また,Fig. 8 (a),(c) には空間 的情報としての縞画像を示し,Fig. 8 (b),(d) には Fig. 8 (a),(c) に示す縞画像をフーリエ変換することによって 得られた周波数領域での縞画像情報を示している.

Fig. 8 (b), (d) に示すように,太い黒矢印で描いたキ ャリヤー周波数 (x 方向に一周期が8ピクセル) 信号の位 置をはさんで変形キャリヤー縞が発生していることがわか る.ここで, Fig. 8 (b) に示す変形キャリヤー縞は, x 方 向に7.8ピクセルが一周期, y 方向に1024 ピクセルが一 周期の縞画像情報をもっている。一方, Fig. 8 (c) に示す 変形キャリヤー縞では, x 方向に8.3ピクセルが一周期, y 方向には負の周波数として1024 ピクセルが一周期の縞 画像情報をもっていることを確認することができる。この 結果より, Fig. 8 (b), (d) に示す変形キャリヤー縞が, キャリヤー周波数に対して周波数領域においておおよそ対 称の位置に存在していることがわかる。これらの結果は, 2つの変形区間でほぼ同等の変形位相量が変形キャリヤー 縞としてそれぞれの変形縞に記録されていることを示して いる.

Fig. 8(a),(c) に示す変形キャリヤー縞を空間的縞解 析法を用いて解析し,8ピクセルー周期の傾き成分を除去

38 巻 10 号 (2009)



Fig. 9 Phase maps of deformed carrier fringe. (a) Phase map of 0^{th} —virtual speckle pattern, (b) Phase map of virtual speckle pattern— 150^{th} .



Fig. 10 Total phase maps $(0^{th} \rightarrow 150^{th})$. (a) Specklegram, (b) Total phase map.

した位相分布結果を Fig. 9 (a), (b) にそれぞれ示す. こ こで, Fig. 2 に示したようにこれらの位相分布間の差を求 めることによって, バーチャルスペックルパターンの製作 時に生じる誤差要因を相殺することができる²⁴⁾. この処理 を用いて求めたトータルの変形位相分布を Fig. 10 (b) に 示す. x 方向の左右の位相差は B-B の中心ラインで 24.60 rad であり,本実験では回転による単調増加分布であるこ とより Fig. 10 (a) に示すトータルの変形に関するスペッ クルグラムの 4 編弱程度 (25.12=6.28×4) の変形量に測 定結果は対応していることがわかる.

Fig. 10(b) に示すトータルの変形位相分布から面外変

Standard deviation: 0.046 rad



Fig. 11 Error distribution of phase map.



形として与えた回転角に相当する位相成分を取り除いた本 来の回転変位との偏差分布を Fig. 11 に示す. この偏差分 布の標準偏差は,0.046 rad であった. この結果はダブル パスによって構成された本光学系では,波長に対して 270 分の1に相当する高分解能な面外計測が実施されているこ とを示すものである.

Fig. 12 に Fig. 10 (b) の B-B ライン上で、本手法の解 析に用いた同じ画像データを用いて、従来の 3 枚のスペッ クルパターン¹⁰⁻¹²⁾ を用いて求めた位相分布結果ならびに、 temporal carrier 解析によって求めたバーチャルスペック ルパターン²⁴⁻²⁶⁾ による結果との比較を示す.

この場合,3枚のスペックルパターンを用いた手法¹⁰⁻¹²⁾ との差の標準偏差は0.034 rad であり,temporal carrier 解析²⁴⁻²⁶⁾による結果との差の標準偏差は0.036 rad であ った。いずれの結果においても,波長に対して測定結果と 従来法による結果との偏差は340分の1以内に収まってい ることがわかる。また,本手法では,temporal carrier 解 析²⁴⁻²⁶⁾による解析過程に比べて約160 倍の高速解析が可 能であることもわかった。

この結果より、本手法は、従来法と同程度の測定精度を 有するものであり、かつ同じ条件下で得た同じデータを用 いた場合に、演算コストは約160分の1に軽減(具体的に は、本手法ではIntel Core 2 Duo CPU (クロック2.66 GHz)を用いて、100万ピクセルの画像情報に対して10s 程度の演算時間が現状では求められている)されているこ とが確認された.



Fig. 13 Phase map of measured object. (a) Measured object, (b) Specklegram, (c) Phase map.

以上の結果は、大変形計測において作製時刻が未知のな かで、バーチャルスペックルパターンを多数製作しなけれ ばならない状況下で、迅速かつ円滑に変形解析を行うこと ができる点において、本手法がきわめて有効な解析法であ ることを示している.

しかしながら、Carré アルゴリズムを利用する場合には 時として、設定した仮定 ($\alpha \gg \Delta \varphi/2$)が成り立たなくなる 場合が存在し、演算に齟齬が生じることもわかった。した がって、今後、測定対象の変形速度と基準粗面の移動速度 等の関係が測定結果にどのように影響を及ぼすのかを改め て検討する必要がある。

4.2 周囲を固定された円形平板の面外変形測定

次に,平面の回転のように変形位相が空間的に単調に増加・減少する現象を扱うのではなく,測定対象内で位相成 分が空間的に凹凸分布をもつ状況下で,本手法の有効性を 検討する.

Fig. 4 に示す光学系において, Fig. 13 (a) に示すように 直径 25 mm の円形の周囲を固定した銅板 (厚さ:0.2 mm)を圧電素子によって背部より押し出すことによる変 形過程を測定した.この実験における変形縞を Fig. 13 (b) に示す.

この場合にも150枚の変形過程を採取し、その画像採取 は前節に示した平面の回転による面外変形計測と同じ条件 で行われている。この面外変形計測では、150枚の変形過 程の中間点に当たる74番目、75番目、76番目、77番目 の4画像を用いて75番目と76番目の中間点(Fig.3に示 すように、本研究で求められるバーチャルスペックルパタ



Fig. 14 Comparison with other method.

ーンは画像サンプリング点で作製されるのではなく, Carré アルゴリズムに用いた縞画像の2番目と3番目との 間で作製されることになる)でバーチャルスペックル VS₁ を作製し, Fig. 2に示す要領で 150 枚の変形過程を解析 した.

Fig. 13 (c) に示す C-C 断面を従来法による解析結果と 比較したものが, Fig. 14 である。Fig. 12 において示した 3 枚のスペックルパターンを用いた縞解析法では, Fig. 14 に示す変形過程における 150 枚に及ぶ変形量があまりに大 変形であるために縞解析を実施することができなかった。 したがって, Fig. 14 では temporal carrier に基づくバー チャルスペックルパターンを用いた縞解析法のみによる測 定結果との比較を行った。

Fig. 14 に示す temporal carrier に基づくバーチャルス ペックルパターンを用いた縞解析法では、本手法との差の ばらつきの標準偏差は 0.123 rad であった.

本手法ならびに temporal carrier に基づく手法のいず れが正しいのかについては,現時点では十分に検討ができ ていない.しかしながら,その測定結果の断面の位相分布 が波長に対して 100 分の 1 以内に収まっていることより, 本手法によって従来法と同程度の測定精度で空間的に単調 増加・単調減少ではない位相分布をもつ面外変形計測も実 施可能であることがわかった.

5. おわりに

本研究では、時間的縞解析法として知られている Carré アルゴリズムを用いて、バーチャルスペックルパターンを 作製することのできる新たな手法を開発した。本手法で は、従来行われていたヒルベルト変換を用いた手法より も、演算時間を約160分の1に短縮することが可能である とともに、その測定精度は、平面の回転による面外変形計 測実験において従来法との差の標準偏差が波長に対して 340分の1以上であることより、従来法と同程度の計測が 実施可能であることが確認できた。さらに、空間的に単調 増加・単調減少ではない位相分布をもつ面外変形計測も従

38巻10号(2009)

来法と同程度の測定精度で実施可能であることがわかった.

しかしながら, Carré アルゴリズムを利用するに当たっ て変形速度ならびに基準粗面の移動速度の条件設定が十分 でない場合には,測定に齟齬が生じることも確認された.

すなわち、本手法をより一般的に利用できるようにする ために、縞のシフト量を考慮することなく変形速度ならび に基準粗面の移動速度の設定が行えるようにアルゴリズム を改良しなければならないこともわかった.

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. 395–476.
- B. J. Thompson: *Electronic Speckle Pattern Interferometry Principles and Practice* (SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, WA, 1996) pp. 1–518.
- 5) R. Jones and C. Wykes: "General parameters for the design and optimization of electronic speckle pattern interferometers," Optica Acta, **28** (1981) 949-954.
- A. Macovski, S. D. Ramsey and L. F. Schaefer: "Time-lapse interferometry and contouring using television system," Appl. Opt., 10 (1971) 2722-2727.
- 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. 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).
- S. Nakadate and H. Saito: "Fringe scanning specklepattern interferometry," Appl. Opt., 24 (1985) 2172-2180.
- 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:"空間的縞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設定",光学,30 (2001) 49-55.
- O. Y. Kwon: "Multichannel phase-shifted interferometer," Opt. Lett., 9 (1984) 59–61.
- 14) O. Y. Kwon, D. M. Shough and R. A. Williams: "Stroboscopic phase-shifting interferometry," Opt. Lett., 12 (1987) 855-857.

- Kjell J. Gasvik: *Optical Metrology*, 2nd ed. (John Wiley & Sons, New York, 1995) pp. 260–267.
- 16) R. Smythe and R. Moore: "Instantaneous phase measuring interferometry," Opt. Eng., 23 (1984) 361–364.
- L. Mertz: "Complex interferometry," Appl. Opt., 22 (1983) 1530–1534.
- 18) A. J. P. van Haasteren and H. J. Frankena: "Real-time displacement measurement using a multicamera phasestepping speckle interferometer," Appl. Opt., 33 (1994) 4137-4142.
- 19) 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.
- 20) Y. Arai, H. Hirai and S. Yokozeki: "High-resolution dynamic measurement using electronic speckle pattern interferometry based on multi-camera technology," Opt. Laser. Eng., 46 (2008) 733-738.
- 21) 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.
- 22) 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.
- 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)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.
- 25) 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.
- 26)新井泰彦,島村遼一,横関俊介:"バーチャルスペ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.
- 27) P. Carré: "Installation et utilisation du comparateur photoelectrique et interferentiel du bureau international des poids et measures," Metrologia, 2 (1966) 13–23.
- 28) P. K. Rastogi: "Modification of the Carré phase stepping method to suit four-wave holographic interferometry," Opt. Eng., 32 (1993) 190–191.
- 29) G. D. Lassahn, J. K. Lassahn, P. L. Taylor and V. A. Deason: "Multiphase fringe analysis with unknown phase shifts," Opt. Eng., 33 (1994) 2039–2044.
- 30) C. S. Vikram, W. K. Witherow and J. D. Trolinger: "Algorithm for phase-difference measurement in phase-shifting interferometry," Appl. Opt., 32 (1993) 6250–6252.
- B. H. Timmerman: "Error-compensating phase-calculation algorithm in rapid-switching double-pulsed holographic interferometry," Appl. Opt., 37 (1998) 753–758.
- 32) K. Creath: "Phase-shifting speckle interferometry," Appl. Opt., 24 (1985) 3053–3058.