

空間的縞解析法を用いた電子的スペckル干渉法の パラメータ設定

新井 泰彦*・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

**九州工業大学情報工学部機械システム工学科 〒820-8502 飯塚市大字川津 680-4

Setting of Parameters in Electronic Speckle Pattern Interferometry Based on Spatial Fringe Analysis Method

Yasuhiko ARAI* and Shunsuke YOKOZEKI**

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

**Department of Mechanical System Engineering, Faculty of Computer Science and System Engineering, Kyushu Institute of Technology, 680-4, Kawazu, Iizuka 820-8502

The electronic speckle pattern interferometry based on the spatial fringe analysis method has been already reported. The relationship between the accuracy of this method and the speckle size is investigated using the Fourier analysis technology in a spatial frequency domain. It is found out that the relationship of the location between the distributions of noise element and of signal element of a fringe image in the spatial frequency domain is related to the measuring accuracy. Experimental results show that the accuracy of this method is maximized in the case that the speckle size is as large as the pixel size of charge coupled device.

1. はじめに

スペckルを用いた電子的スペckル干渉法（以下、ESPIと呼ぶことにする）が報告され現在計測の分野で広く用いられている¹⁾。このESPI技術に1枚の縞画像で解析を行うことのできる空間的縞解析法を導入した縞解析法を報告してきた²⁾。その過程で、スペckルサイズの大きさの変化が、測定精度に影響を及ぼすことを確認してきた。従来のスペckル画像を用いた縞走査技術^{3,4)}では、時間的縞解析法⁵⁾を用いることが一般的であり、そこではcharge coupled device（以下、CCDとよぶことにする）のピクセルサイズに比べて比較的大きなスペckルサイズが設定されている⁶⁾。また、線形処理ではないメディアンフィルター、平均化窓等^{3,4)}を用いた処理によってスペckルノイズの除去が行われている。したがって、ここで取り扱うような空間的縞解析法²⁾におけるスペckルサイズの測定精度への影響は十分に議論されていなかった。しかしながら、この測定精度への影響は、本研究で取り扱うモ

アレ縞の原理に基づく空間的縞解析法⁷⁾を用いたESPIだけではなく、関連するスペckルを用いた計測⁸⁾においても報告され、現在議論が始まりつつある⁹⁾。

一般には、スペckルサイズが観察系のCCDカメラのピクセルサイズよりも大きい場合には、画像のノイズ成分が増大し縞解析時に悪影響を及ぼす。一方、スペckルサイズが観察系のCCDカメラのピクセルサイズよりも小さくなると、ひとつのピクセル内に多数のスペckルが存在することとなり、結果的にひとつひとつのピクセルからの出力はそのピクセル内のスペckルの強度分布の平均値となり、その平均化作用の結果として理由は異なるもののスペckルサイズが大きい場合と同様に縞解析の精度の低下が発生すると考えられる。この現象は実験においても観察されるものであり、現在議論されようとしている⁹⁾。

このような状況において、前報²⁾に示したESPIに空間的縞解析法を用いた本手法の場合では、縞画像としてのスペckルグラムにバンドパスフィルター処理が施され、またモアレ縞の性質に基づく空間的な縞解析が行われているなど従来のメディアンフィルターなどを用いたESPIにお

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

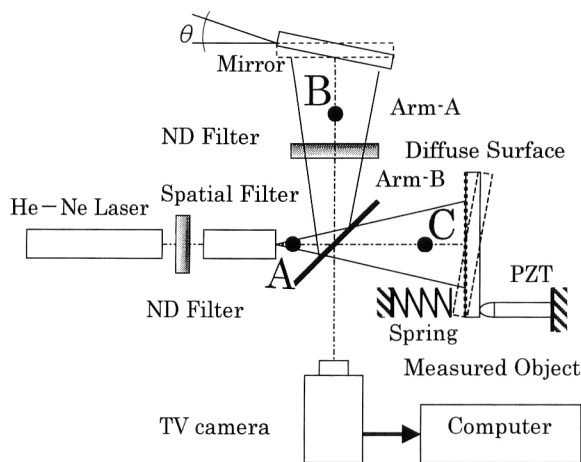


Fig. 1. Schematic diagram of measurement system.

ける特殊な処理とは異なった線形処理が行われているので、他の文献の結果と同様のノイズに対する影響が考えられるものの、他の文献での議論^{8,9)}ならびに結果をそのままなら考察することなく本手法で利用することはできない。そこで、空間的縞解析法では縞の周期などの空間的な周波数の変化が測定において重要な役割を果たすものであるから、本研究では、その解析を行うためにフーリエ変換技術を用いて、スペックルサイズの変化に伴うキャリア縞・変形キャリア縞の周波数領域でのノイズ成分と信号成分の変化また、その関係を観察し、その結果を用いてスペックルサイズの測定精度への影響を検討した。さらにこの結果を用いて高出力レーザー⁸⁾を用いることなく空間的縞解析法を基礎として測定を行うことのできるESPIの測定精度向上に向けてのパラメーター設定法を検討した。

2. 測定原理

2.1 縞解析原理

本研究では測定精度を厳密に検討するために高分解能 CCD カメラ、大出力レーザー、高精度位置決め装置、パワーメーター等を用いた Fig. 1 に示す ESPI システムを新たに構築したものの、前報²⁾ で用いた解析プログラムを新しい測定システムに対処できるように手直しをして用いている。したがって、ここで検討の対象となるモアレ縞現象を用いた空間的縞解析法は前報²⁾ に示した手法とまったく同一のものである。よって、縞解析原理の詳細は前報²⁾ に委ねるとして、その内容については再度ここでは言及しないことにした。

2.2 測定装置

Fig. 1 に示す ESPI システムを用いて前報同様に 3 枚のスペックルパターンを採取した²⁾。この光学系では 35 mW の He-Ne レーザーを光源として大面積の測定対象を前提

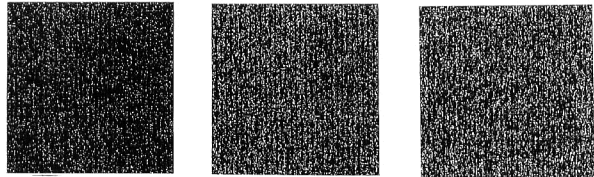
としてスペシャルフィルターにより発散光とし、ハーフミラーにより分割し Arm-A では ND (neutral density) フィルター (面精度 $1/4\lambda$) を介して参照光の強度をコントロールしている。また、回転角を制御することのできる平面鏡によって参照光を生成し、縞解析時に必要となるキャリア縞を生成することができるように設計している。一方、Arm-B では粗面をもつつや消しスプレーによって白色にペイントされた平面を測定対象にしてレーザー光を照射しスペックルを発生させている。この測定対象では PZT によって数 nm の精度で変位を与えることができるので平面を回転させ、この回転により発生する平面の変化量を測定対象とし、その平面の測定結果のばらつきをもって測定精度を検討した。このような光学系によって得られたスペックルパターンを 1024×1024 pixel (ピクセルサイズは $6 \times 6 \mu\text{m}$ である)、1024 階調の CCD カメラによって画像としてとらえ縞解析を行った。

この場合、参照光と物体光との強度比に伴う検討を行うために、スペシャルフィルター直後 (A の位置) のレーザー光強度と、ハーフミラーによって分割された後の光の強度を Arm-A では ND フィルター直後 (B の位置) で、一方、Arm-B では測定物体直前でそれぞれハーフミラーから等距離の位置 (C の位置) においてパワーメーターを用いて測定した。本システムでは Fig. 1 に示す構造をもっているために、上記の測定法では必ずしも参照光と物体光との強度比にはなっていない (参照光は再度 ND フィルターを通過する) もの、スペックル干渉時の二光束の強度比による測定精度への影響をおおよそ検討することができるものと考えて、上記の条件でのレーザー光パワーを測定した。また、スペックルパターン撮影時には 2 次元 CCD 素子の中心部においてそれぞれの条件での平均的な強度が実験を通して一定になるようにレーザー光強度をスペシャルフィルター入射前に設置した ND フィルターによってコントロールして実験を行った。

2.3 スペックルグラム²⁾の生成

スペックルパターンの採取は、前報に示したスペックルパターン採取法²⁾と同様に以下に示す手順に従って行った。

(1) Arm-A, -B において平面鏡、測定対象がともに光軸に垂直となるように設定し、1 枚目のスペックルパターン S_1 を記録する。次に、(2) キャリヤー縞を得るために Arm-A の平面鏡を回転させ 2 枚目のスペックルパターン S_2 を記録する。この状態で、(3) 測定対象を回転することによって変形キャリア縞画像を得るために 3 枚目のスペックルパターン S_3 を記録した。この 3 枚のスペックル



(A) 0.19 Speckle size/ Pixel size (B) 2.13 Speckle size/ Pixel size (C) 3.60 Speckle size/ Pixel size
Fig. 2. Specklegrams with different speckle sizes.

パターンを用いて前報と同様の演算²⁾を行い、3枚のスペックルパターンからキャリア縞画像 I_c 、変形キャリア縞画像 I_d を抽出した。

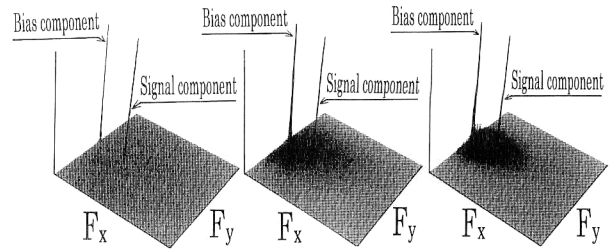
このようにして求めた縞画像に対して2次元デジタルフィルタによってバンドパスフィルタリング処理を施し、次に前報に示したと同一の縞解析を行い縞の位相分布を求め、測定物体の形状を求めた²⁾。

3. 結果と検討

3.1 スペックルサイズの測定精度への影響

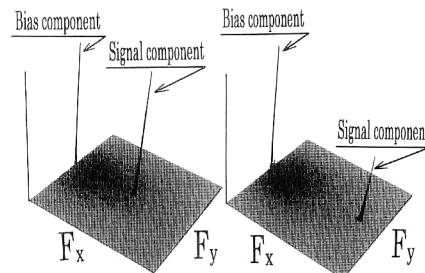
前報に示した空間的縞解析法を用いると、長さ 35 mm の梁に $1.8 \mu\text{m}$ の変位を与えた場合、梁の変形に伴うたわみ曲線を RMS で約 24 nm ($1/27\lambda$) の測定精度で計測することができた²⁾。この場合に、観察系のレンズの絞りを変化させることによって、スペックルサイズは変化する。このようなスペックルサイズの変化に伴うキャリア縞としてのスペックルグラムを Fig. 1 に示す測定システムを用いて撮影した結果を Fig. 2 に示す。スペックルサイズ (CCD ピクセルサイズとの比率でスペックルサイズを示している) が大きくなるに従い、キャリア縞としての画像においてキャリア縞そのものが不鮮明になることが確認できる。この現象をこれらの画像をフーリエ変換して周波数領域で観察したものが Fig. 3 である。

スペックルサイズが小さい場合にはノイズ成分が周波数には依存しないランダムノイズに近い状態として広い周波数帯域に分布していることがわかる。ところが、スペックルサイズが大きくなるに従い、ノイズ成分が低周波数領域へと移行、集中することが確認できる。本手法では、キャリア縞の変調成分の変化を検知することによって縞解析を行っているので、キャリア縞成分近傍にノイズ成分が多数分布するような状況は必ずしも測定精度によい結果をもたらさないと考えられる。したがって、上記の低周波へのノイズ成分の移行はキャリア縞信号の S/N 比の低下を招くと考えられ、この現象は測定精度の低下につながるものであると考えられる。ところが、大きなスペックルサイズを用いる手法では、ここでみられたのと同じ現象が生じていると考えられるものの、Burke の報告³⁾では測定精



(A) 0.19 Speckle size/ Pixel size (B) 2.13 Speckle size/ Pixel size (C) 3.60 Speckle size/ Pixel size

Fig. 3. Fourier analyzed results of specklegrams with different speckle sizes.



(A) 4 pixel/period (B) 2 pixel/period

Fig. 4. Fourier analyzed results of specklegrams with large speckle size.

度の向上がみられている。ノイズと信号成分との関係より基本的にはこのような結果は考えられないはずである。しかしながら、Burke の結果では 3 pixel を 1 周期としていることを考えると、Fig. 4 に示すようにスペックルサイズを大きくしてノイズ成分を低周波領域に集中させ、一方で、キャリア縞信号を周波数の高いところへ移動させることによって信号成分とノイズ成分との分離がなされ、その結果として S/N 比の改善が実現されているのではないかと考えられる。Fig. 4(B) では、キャリア縞を 2 pixel 1 周期にした場合の周波数領域でのノイズ成分とキャリア縞成分との関係を示している。この場合、明らかにキャリア成分は、ノイズ成分から分離されていることが確認できる。ところが、この考え方では、キャリア周波数が高くなるために、縞の空間的周期は小さくなり空気のゆらぎ、機械的振動等がより敏感に影響を及ぼすようになる。この結果としてキャリア縞周期とピクセルサイズとの関係で、キャリア縞の解像度が低下し、Fig. 4(B) のようにキャリア縞成分のピークはキャリア縞の周波数が低い場合に比べて低下してくる。さらに、キャリア縞成分のサイドローブが拡大し、若干の周波数帯域をもつキャリア縞を用いなければならなくなる。非常に安定した実験条件でのサイドローブの拡大であれば計測結果には影響は及ぼさないと考えられるが、前述のように問題が空

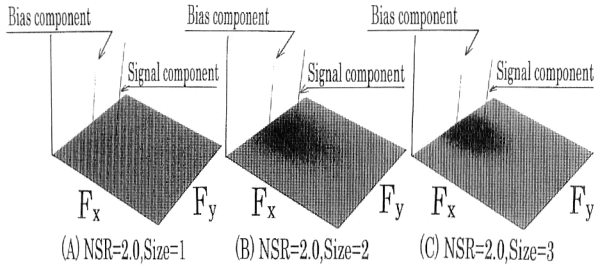


Fig. 5. Fourier analyzed results of carrier fringes using new noise model.

気のゆらぎ、機械的振動等によるサイドローブの拡大であるために測定条件が厳密な意味で時々刻々変化する状況のもとでは、結果的には測定精度の向上は期待できなくなる。本研究で行っているような精度の検討を行うために、用意した測定対象に比べて非常に大きな、熱源をもたない暗室を用意し、水平垂直方向の除振をはかり、かつ暗室外からリモートコントロールできるような実験室等の特殊な環境で、非常に狭い測定領域の計測であれば、このように非常に安定した計測条件を作ることのできるものの、実用段階で行うようなスペックル計測でこのような条件を満足させることは経済的にも困難を要するものと考えられる。そして、ノイズ成分を低周波領域へと移行させるために大きなサイズのスペックルを発生させるための最も大きな問題は、光の効率の低下が挙げられる。すなわち、実用段階での計測時には必ず高出力レーザーが必要となる。以上の検討結果より、スペックルサイズを拡大する考え方は実用を目指した一般的な測定改善法とは考えにくいものであるといえる。

一方、本手法では上記のスペックルサイズの拡大をはかり、信号成分とノイズ成分との分離によって測定精度の改善を目指すのではなく、バンドパスフィルターによってノイズ成分と信号成分との弁別を行うことによる精度の改善を目指している。すなわち、低周波領域にノイズが集中することによる信号成分とノイズ成分との関係においてS/N比が低下する現象の影響をできる限り回避し、加えて、バンドパスフィルターによる処理によって可能な限りのノイズ成分の除去を行い、かつ、カルマンフィルターを用いることによってバンドパスフィルター通過帯域内のノイズ成分の縞解析結果への影響の除去をはかり、測定精度向上のための条件を見いだそうとしている。

この処理過程において、スペックルサイズと画素の大きさ等の測定パラメーターが測定精度に影響していることが確認されている。この影響を次に示すシミュレーションによって検討した。

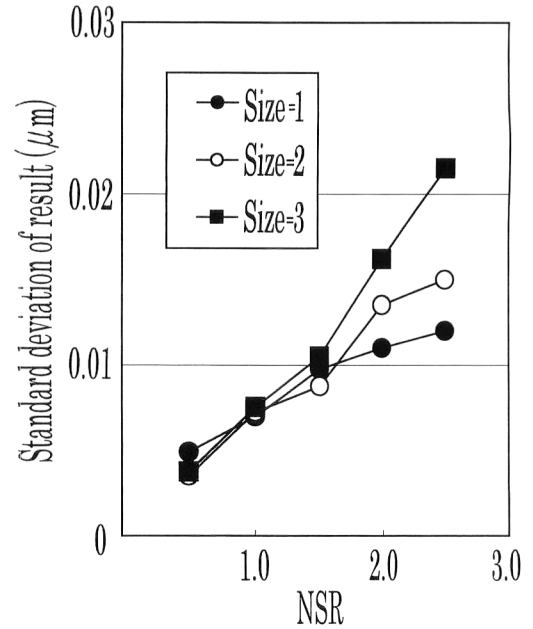


Fig. 6. Simulation results.

3.2 シミュレーションによる空間的縞解析法のノイズ成分の測定精度への影響の検討

前報²⁾までに用いてきた画像ノイズの画像信号に対する比率（以下、NSR¹⁰⁾とよぶことにする）をパラメーターとしたシミュレーションでは、ノイズの強弱を表現することができるものの、ノイズの空間的性質を取り扱うことはできない。この問題に対して本研究では、NSRとしてのパラメーターに加えて、ノイズの空間的な大きさ（ひとつのノイズの大きさを正方ピクセルとして領域をメッシュに切り、ノイズの空間的な大きさの定義を行っている。例えばノイズの大きさが 2×2 であれば4 pixelがひとつの塊としてノイズを表現していることになる。この場合の表現を、ここではSize=2として表している）を用いた新しいノイズモデルによってシミュレーションを行った。

Fig. 5にNSRとSizeの変化による新しいノイズモデルの周波数領域での解析結果を示す。Fig. 3に示す実際のスペックルグラムの周波数領域での解析結果との比較において、Fig. 5に示す周波数解析結果では、新しいノイズモデルはノイズ成分の分布等、実際のスペックルグラムを十分に表現することが可能なものであることが確認できる。このノイズモデルを用いて次にシミュレーションを行った。

Fig. 6にシミュレーション結果を示す。ノイズの空間的なサイズの変化はNSRが小さい領域（NSR=1.5程度まで）では測定精度に大きく影響を及ぼさないことがわかる。ところが、NSRが1.5を超えると（スペックルグラムの解析ではNSRの値は2.0を超えている）空間的なサ

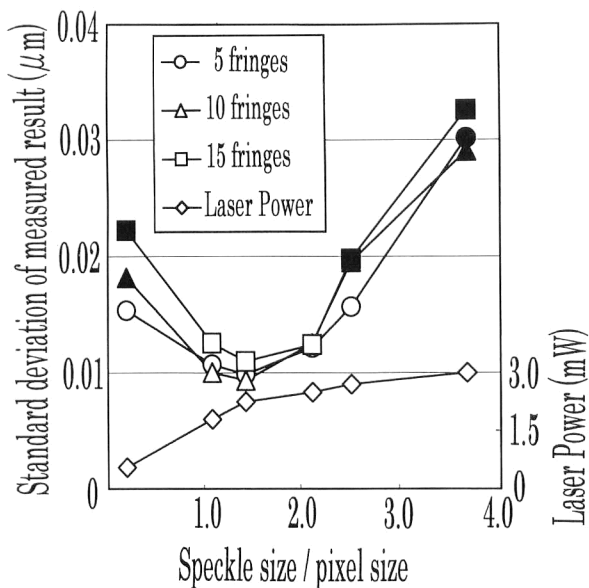


Fig. 7. Experiment results.

イズの影響が生じるようになる。すなわち、ノイズのサイズが小さいほど解析結果は良好であり、ノイズサイズが大きくなることは精度の低下をもたらすことを意味していると考えられる。これは上述のノイズサイズの拡大に伴い信号成分とノイズ成分との関係から信号成分のS/N比が低下することによる問題と同様の意味をもつものであると考えられる。

このことより、本手法ではノイズサイズ（スペックルサイズ）を大きくすることは、測定精度に対してよい結果を必ずしももたらすものではないと考えられる。

3.3 ESPI 実験における精度の検討

Fig. 1 に示す ESPI システムを用いてスペックルサイズの変化による測定精度の検討を行った。Fig. 7 に結果を示す。Fig. 1 の Arm-B に設定された粗面をもつ平面（測定領域：10×10 mm）を PZT を用いて回転させ、キャリア縞（8 pixel/period）を変調させた場合についての解析を行い、測定精度の検討を行った。この場合の変調量は横方向に 1024 pixel ある画像に対して縦縞として丸印が 5 縞、三角印が 10 縞、正方形印が 15 縞の場合をそれぞれ示している。すなわち、正方形印のほうが丸印よりも回転角が 3 倍大きなものとなっている。

縦軸は測定した平面の回転に伴う変化量の測定値のばらつき標準偏差であり、横軸はスペックルサイズの CCD カメラのピクセルの大きさとの比率を示している。また、黒塗りの点はデジタルフィルタリング処理だけでは低変調画素の存在により十分に解析を行うことができなかった測定点の結果であり、カルマンフィルタ処理²⁾を必要とした測定点である。また、白抜きの結果は、デジタルフ

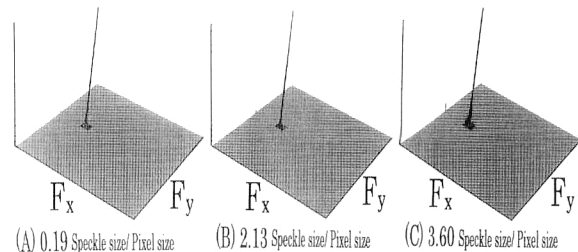


Fig. 8. Fourier analyzed results of band-pass filtered specklegrams with different speckle sizes.

ィルター処理のみによる測定結果である。標準偏差として 0.017 を境としてカルマンフィルタ処理が必要となっていることがわかる。

本研究で取り扱った変調量の範囲では、キャリア縞の変調量の影響は同程度に測定結果に反映していることがわかる。このことより、本手法では、ここで扱う程度の変調量の差異による測定精度への影響は認められない。

一方、スペックルサイズの影響は、スペックルサイズが小さいか大きい領域で測定精度の低下として確認できる。

スペックルサイズが大きい範囲では、シミュレーションにおいてみられたようにノイズ成分と信号成分の分離が十分に行うことができないために測定精度の低下が生じたものであると考えられる。このことは Fig. 8 に示すバンドパスフィルタ後の縞の周波数解析結果においても確認することができる。Fig. 8(A), (B) において、バンドパスフィルタの通過帯域では、ほとんどノイズ成分は確認することができない。しかしながら、Fig. 8(C) のスペックルがピクセルの 4 倍近くなると、バンドパスフィルタ通過帯域にノイズ成分を確認することができるようになる。この結果、低変調素子が画像の中に存在することとなり、結果的に、測定精度の低下が生じることになると考えられる。

一方、スペックルサイズが小さい領域では、従来問題とされている 1 pixel 内に多数のスペックルが存在する結果による画像の平均化に伴うビジビリティーの低下が S/N 比の低下をもたらしていることが考えられる。この現象は Burke の結果においてもみられるものであり、現在、スペックルの生成過程を踏まえた確率論による解明がなされようとしているものであり⁸⁾、今後検討しなければならない問題である。

以上のように、本研究における空間的縞解析法を用いた ESPI においては、スペックルサイズの大きさはピクセルサイズと同程度のスペックルサイズを用いた場合が最も高い測定精度をもたらすことがわかった。また、その場合の測定精度は約 55 分の 1 wave であることもわかった。

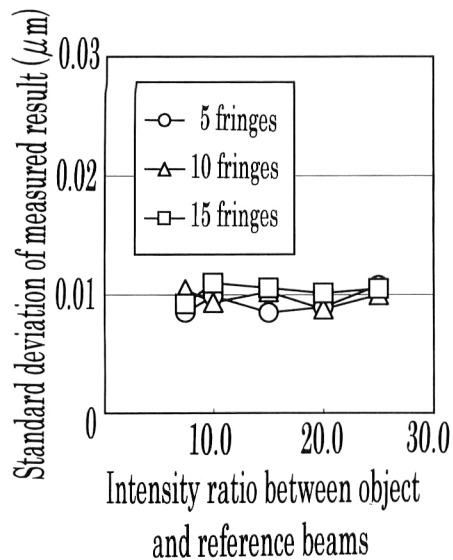


Fig. 9. Relationship between intensity ratio of beams and measurement accuracy.

空間的縞解析法では、前述のようにキャリア縞そのものがノイズの影響を受けてしまうために前報²⁾までに示してきたような単に縞画像からノイズ成分を除去するだけでは完全な測定精度の改善は困難であると考えられる。また、この場合、ピクセルサイズ、ノイズ成分、キャリア縞周波数、光学系の解像度などの影響から改善の限界が存在することになると考えられる。現状での55分の1 waveが測定の限界であるか否かは別として、よりいっそうの精度の向上を目指すためには、空間的縞解析法の精度におけるこれらの問題の相互関連などを含めたより詳細な検討が必要であると考えられる。

次に、Fig. 7において菱形印で示すように、スペックルサイズの増大に対してスペシャルフィルター直後のレーザー強度は増加している。本システムの場合に高い測定精度を得ることのできる領域では約2 mW程度で測定することが可能であることがわかる。ただし、ここでは10×10 mmの非常に狭い領域を測定しているにすぎない。したがって、測定対象の拡大に伴い当然の結果として高出力レーザーが必要となると考えられる。

Fig. 9に物体光と参照光との強度比に対する測定精度の影響をFig. 7において最も測定精度がよい結果を得ることのできた、スペックルサイズがCCDピクセルの1.5倍の場合について示す。ここでの物体光と参照光は上記のようにFig. 1のハーフミラーにより分割されたレーザー光をB点、C点において測定したレーザー光パワーである。Fig. 9においてスペックルサイズがCCDピクセルの1.5倍の場合には5, 10, 15本の直線縞の変調においてもまた、強度比の変化においても、測定精度にはほとんど影響

しないことが確認できる。

4. おわりに

本研究では、カルマンフィルターを用いた空間的縞解析法をESPIに適用した場合の光学システムにおけるパラメーターをフーリエ変換を用いた周波数領域での解析を通して検討した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) スペックルサイズを小さくすることはノイズとしてスペックルを考えた場合には有効であるものの、ESPIの測定原理においては必ずしもよい測定結果を期待できないことがわかった
- (2) スペックルサイズが大きい場合には、シミュレーション結果においてノイズとしての誤差要因が考えられ、実計測においても誤差を生じることが確認された
- (3) 測定時のスペックルサイズの決定については最適値が存在することが確認できる。また、その最適値はスペックルサイズとピクセルサイズとがほぼ同一になるように設定された場合であると考えられる
- (4) 本研究で行った範囲内では、参照光と物体光との強度比は測定精度には影響しないことがわかった

最後に、本研究で行ったように光学システムの測定精度の検討において、フーリエ変換を用いた解析技術は非常に有効なものであることがわかった。この基本的な考え方は、機械振動解析におけるスペクトル解析技術である。このように、今後さまざまな分野で現在用いられている有用な解析技術が光学の分野に導入され、現在問題となっている事柄の解明がなされるものであると信じている。

文 献

- 1) B. J. Thompson: *Electronic Speckle Pattern Interferometry Principles and Practice* (SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, Washington, 1996) pp. 1-518.
- 2) 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*, **7** (2000) 250-255.
- 3) S. Nakadate and H. Saito: “Fringe scanning speckle-pattern interferometry,” *Appl. Opt.*, **24** (1985) 2172-2180.
- 4) 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.
- 5) D. Malacara: *Optical Shop Testing, 2nd ed.* (John Wiley & Sons, New York, 1992) pp. 501-598.
- 6) H. Kadono, S. Toyooka and Y. Iwasaki: “Speckle-shearing interferometry using a liquid-crystal cell as a phase modulator,” *J. Opt. Soc. Am. A*, **8** (1991) 2001-2008.
- 7) Y. Arai, I. Ishihara and S. Yokozeki: “Automatic spatial fringe analysis method for two-dimensional fringes image including phase discontinuities by obstructions,” *J. Mod. Opt.*, **45** (1998) 2011-2023.
- 8) J. Burke and H. Helmers: “Performance of spatial vs.

- temporal phase shifting in ESPI," *Proceedings of SPIE 3744 Interferometry '99* (Pultusk, Poland, 1999) pp. 188-199.
- 9) E. Kolenovic, W. Osten and W. P. Juptner: "Influence of unresolved speckles in interferometric phase measurements," *Proceedings of SPIE 4101 Laser Interferometry X* (San Diego, USA, 2000) pp. 150-160.
- 10) M. Takeda and T. Abe: "Phase unwrapping by a maximum cross amplitude spanning tree algorithm: A comparative study," *Opt. Eng.*, **35** (1996) 2345-2351.