

# 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

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

## In-Plane Deformation Measurement Based on ESPI by Using Virtual Speckle Pattern

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

\*\* Jyoko Applied Optics Laboratory, 2-32-1 Izumigaoka, Munakata 811-4142

A novel high resolution speckle interferometry for an in-plane displacement measurement which uses only information in a deformation process is proposed by introducing the high resolution out-of-plane displacement measurement technology to in-plane measurement methods. In this method, the new optical system is proposed with single camera for in-plane displacement measurements. Virtual speckle patterns with the information of the carrier signal are synthesized using the information of the deformation process by Hilbert transformation. As the experimental results, it is confirmed that this method can measure the in-plane displacement as well as the method as proposed before in high resolution.

**Key words:** in-plane displacement measurement, speckle interferometry, single camera, high resolution measurement, virtual speckle patterns

### 1. はじめに

スペックル干渉計測法は、粗面をもつ物体の変形計測法として有効な測定手法である<sup>1-4)</sup>。一般に、その変形解析過程では、変形前後のスペックルパターンが採取され、これらのスペックルパターン間の強度分布の差を求め、その二乗演算などを行うことによってスペックルグラムが求められている。この演算によって測定対象の変形量を縞画像として観察することができる。このスペックル干渉計測法は、電子技術の発展に伴い、TVカメラを用いてスペックルパターンを採取する電子スペックル干渉法 (electronic speckle pattern interferometry: ESPI) へと発展し、縞走査技術<sup>5)</sup>の導入によって、高分解能化がはかられてきている<sup>6-14)</sup>。

この高分解能化を目指すための縞走査技術の導入に当たっては、参照光の位相を制御することによる時間的縞解析法<sup>6-8)</sup>と参照光の波面を傾けることによってキャリア縞

を発生させる空間的縞解析法が用いられている<sup>9-12)</sup>。ところが、前者の縞解析技術では、少なくとも3枚の縞画像が必要となるために、ダイナミックに変形する測定対象の変形量を高分解能にとらえるためには、マルチカメラ技術を利用するなど、特殊な光学系<sup>13,14)</sup>が必要となっている。

一方、後者の空間的縞解析技術では、変形量が小さい場合には、変形前に変形測定の位相分布の基準となるスペックルパターンをあらかじめ採取しておき、変形前後の2枚のスペックルパターンを取得することによって、ダイナミックに変形する測定物体の変形解析を可能にしている<sup>9,10)</sup>。

さらに、このスペックル干渉計測法を、面内変位計測に適用する場合には、二光束による光学系が用いられている。この二光束スペックル干渉計測においても、縞走査技術を導入することによって高分解能に面内変形計測がなされるに至っている<sup>11,12)</sup>。

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

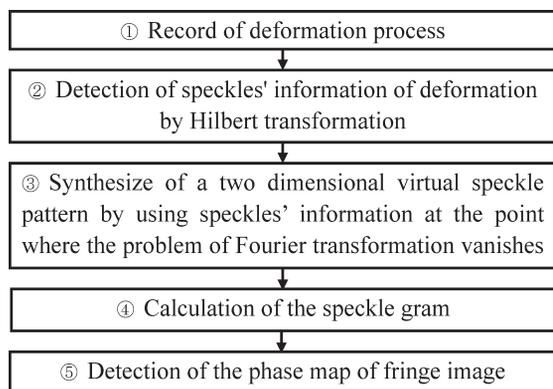


Fig. 1 Flow chart of fringe analysis with virtual speckle patterns.

しかしながら、面内変形計測において、変形量が大きくなるとスペックルパターン内のスペックルが、変形前後で空間的に重ならない問題が生じ、面内計測を行うことが困難になる状況が発生する。このような変形前後でスペックルが空間的に重ならないほどに大きく変形が進む状況下で、さらに、ダイナミック計測を行う場合を考えてみる。この場合には、上記のような変形前に変形測定の基本となるスペックルパターンをあらかじめ採取しておいても、変形によってスペックルパターン内のスペックルが空間的に重ならないため、スペックルグラムを求めても、解析の対象となる縞が発生しなくなり、面内変形計測の実施が困難になる。このような状況で、さまざまなダイナミック計測を行うための手法<sup>13-20)</sup>が提案されるとともに、さらに、TSPI (temporal speckle pattern interferometry)<sup>21,22)</sup>が報告されている。

TSPI では、解析過程で発生するフーリエ変換に伴う誤差によって、高精度な測定結果を得ることは一般にできない問題がある。

また、上記手法<sup>15-20)</sup>では、測定対象の変形に伴う縞の位相変化が単調増加であることが要求される。あるいは、縞の方向性を検出しなければならない等、実用において解決しなければならない問題を含んでいる。

このような問題に対して、面外変形計測を対象とした、仮想スペックルパターンを用いた縞解析法<sup>23,24)</sup>が提案されている。その手法では、Fig. 1 に示すように、はじめに① 順次変形する変形過程のスペックルパターンを連続して記録する。② スペックルパターン内の変形に伴うスペックルの強度変化の情報をヒルベルト変換<sup>25-29)</sup>によって検出する。次に、③ この検出されたスペックルの性質を用いて、人工的にキャリア情報が付加された仮想スペックルパターンを合成する。④ この仮想スペックルパター

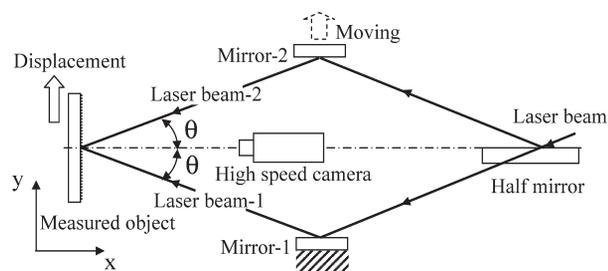


Fig. 2 Optical system.

ンと採取された実際のスペックルパターンとの間で変形キャリア縞としてのスペックルグラムを計算する。最後に、⑤ 変形キャリア縞から変形に関する位相情報を検出する。以上の手順で、高分解能スペックル干渉計測が実現している。

本報では、上記面外変位を対象とした仮想スペックルパターンを用いた計測技術<sup>23,24)</sup>を面内変形計測へ適用しようとしている。実験結果より、提案するスペックル干渉計測法によって、上記の大変形計測時の問題が面内変形計測においても解消可能であることを確認している。さらに、3枚のスペックルパターンを用いる従来法<sup>11,12)</sup>による結果との差のばらつきが、少なくとも30分の1波長以内に収まることを示している。

以上の結果より、変形過程内の情報のみを用いて、高分解能な縞解析が面内変位のダイナミック計測においても可能であることを示している。

## 2. 測定原理

### 2.1 仮想スペックルパターンによる縞解析

Fig. 2 に示す二光束スペックル干渉光学系を用いて、粗面をもつ測定対象が実線の矢印に示すように面内で移動する場合のスペックル強度の変化をはじめに検討した。Fig. 3 に示す回転に応じて面内変位を発生させることのできる面内変位発生装置を用いて、観察系の CCD 素子で定点の強度分布を変形時に連続して記録した。この結果において、Fig. 2 内のレーザービーム-1, -2 による散乱光間の干渉現象により発生するスペックルの強度分布は、レーザー光源の波長を  $\lambda$  とすると、 $\lambda / (2 \sin(\theta))$  を周期として、Fig. 4 (b) に示すように正弦波状に変化することがわかる。

この面内変位と  $\lambda / (2 \sin(\theta))$  を周期とする強度分布の変化の関係を用いることによって、縞画像 (スペックルグラム) として面内変位を視覚的に観察することができる。このようにして一般に、面内変形計測が行われている<sup>1-4)</sup>。

この現象を前報<sup>23,24)</sup>に示した面外変形計測における仮想

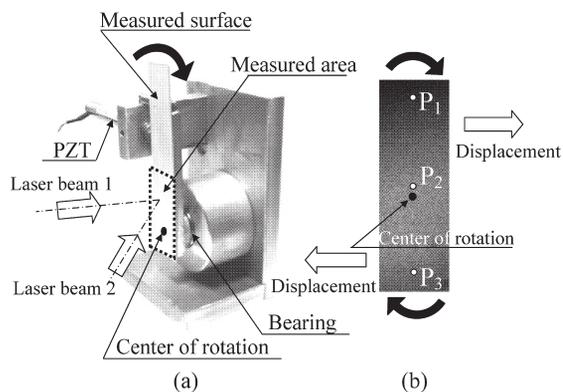


Fig. 3 Measured object. (a) Apparatus for generating displacement, (b) Measured surface.

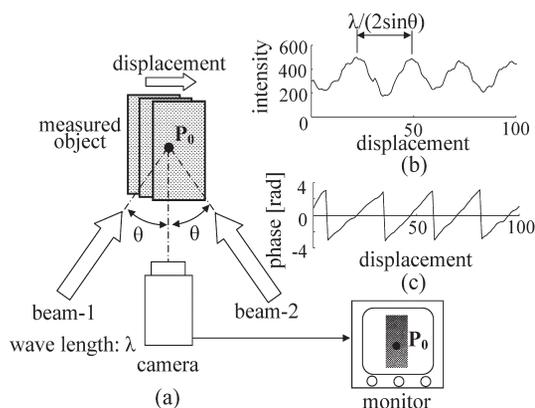


Fig. 4 Change of intensity of speckle by deformation. (a) Optical system, (b) Change of intensity at  $P_0$ , (c) Change of phase at  $P_0$ .

スペックルにもとづく演算法に適用すると、面内変形計測においても高分解能な大変形計測が実現可能となる。

Fig. 5 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。しかしながら、これらの情報をもとに TSPI のように、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、フーリエ変換時に発生する不確定さとしてのあいまいさが残存してしまう問題が生じる。そこで、本報における解析過程では、変形が十分に進み、ヒルベルト変換演算においても、演算のあいまいさが十分に解消された  $P_c$  点を基点として前報<sup>23,24)</sup> に示した演算によって、位相検出演算、振幅、バイアスの推定を行うことにした。

たとえば、Fig. 4 の  $P_0$  点において考えると、前報<sup>23,24)</sup> までに示した演算過程により、Fig. 4 (b) に示すすべての変形過程の強度分布を用いてヒルベルト変換<sup>25-29)</sup> を行い、さらに逆正接関数によってこの変形過程の位相分布を求めると、Fig. 4 (c) に示すような分布を得ることができる。このような処理を測定対象画像のすべての点で実施する

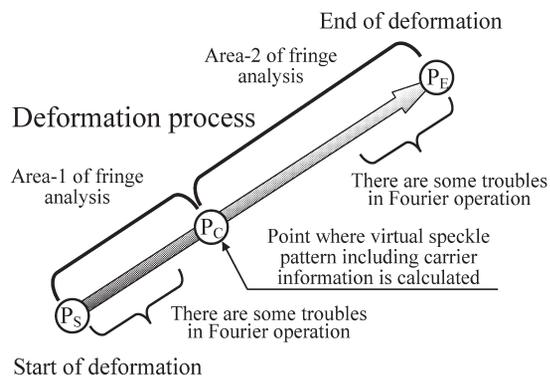


Fig. 5 Production of virtual speckle pattern.

と、時々刻々変形する面内変形にもとづくすべての点における位相分布を求めることができる。ここで、この情報を用いて、ある時刻での位相を二次元的に取りまとめると、その時刻における変形に伴う空間的な位相分布を求めることができる。

このような考え方にもとづき、Fig. 5 の  $P_c$  に相当する点を定めて（ここでは、 $P_s$  から  $P_e$  を 100 step として記録し、実験では  $P_c$  点を変形開始後 30 step 目として設定した）スペックルパターン上のすべての点で 30 step 後の位相値を求め、これを二次元に配列することによって、変形開始後 30 step 目における空間的な位相分布を求めた。

ここで、このヒルベルト変換演算時に低周波数成分のみを抽出し、これの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た。さらに、Fig. 4 (c) の位相演算時に用いた、位相が  $\pi/2$  rad 異なった信号を利用すると、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、この変形過程の振幅分布を推定することができる。これらの位相分布 ( $\phi(x)$ )、バイアス分布 ( $A(x)$ )、振幅分布 ( $B(x)$ ) を用いると、次に示す式 (1) の強度分布モデルより、面外変形計測と同様に仮想スペックルパターンの強度分布を合成することができる<sup>23,24)</sup>。

$$I = A(x) + B(x) \cos[\phi(x)] \quad (1)$$

このような考え方にもとづく面内変位計測の高分解能化に関する原理確認実験を、次に行った。

## 2.2 二光束スペックル干渉計測光学系において発生する縞の性質

Fig. 2 に示す二光束スペックル干渉計において、He-Ne レーザー（出力 30 mW、波長 632.8 nm）を光源として、測定対象に面内変位が発生した場合の測定対象面における強度分布の変化を Fig. 6 (a) に示す。Fig. 3 (b) に示す測

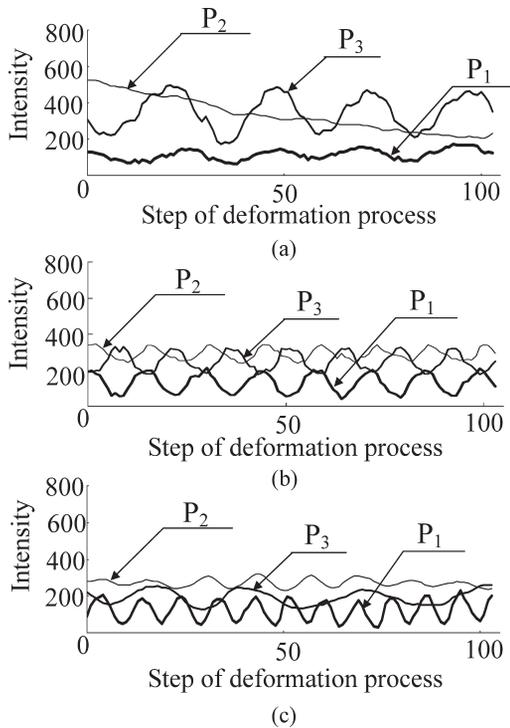


Fig. 6 Change of intensity of speckles by deformation. (a) In-plane displacement, (b) Carrier information, (c) Deformed carrier information.

定対象面上の  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  点において、回転中心近傍の  $P_2$  点では、面内変位に伴うスペックルの強度変化は単に減少している状況として観察できるのみである（ただし、ここで観察したスペックルが、たまたまこのような現象を示したに過ぎず、近傍の異なるスペックルでは、異なる強度変化を示す可能性もある。位相に関しては、ここに示したものと同様に変化するはずである。これは、 $P_1$ ,  $P_3$  点においても同様な状況にある）。また、 $P_1$  点においては、測定範囲では、4周期程度の強度分布の変化を観察することができる。しかしながら、スペックルパターンの強度分布そのものが暗くなっているため、その振幅成分は小さくかつバイアス成分も低くなっている。一方、 $P_3$  点では、4周期程度の強度分布の変化を観察することができる。この強度分布では、 $P_1$  点に比べて振幅もバイアス成分も大きくなっている。

ここで注意しなければならない問題点は、Fig. 6 (a) に示す面内変形において、 $P_1$  点と  $P_3$  点とでは変形方向が Fig. 3 (b) に示すように逆方向になっているにもかかわらず、その違いを表すことができていないことである。この問題を解決するために、本研究では Fig. 2 に示すミラー2を破線で示す矢印方向に移動することを提案している。このミラー2の移動によって、Fig. 6 (a) に示す変形過程に

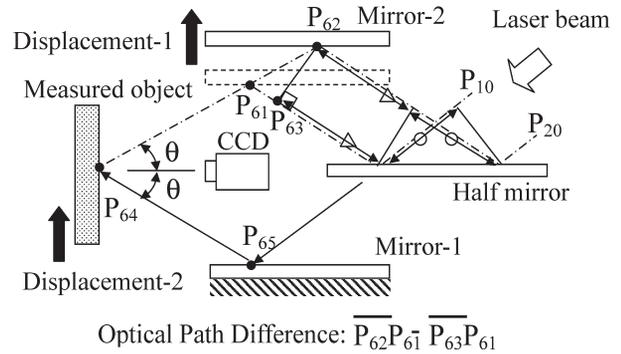


Fig. 7 Optical path difference of laser beam.

おける強度分布に、キャリア信号情報を与えることができるようになる。

Fig. 7 に示すように、ミラー2が移動しない場合を考えると、 $P_{10}$  から入射した光がハーフミラーを透過し、 $P_{65}$  で反射し、 $P_{64}$  に至る。また、ハーフミラーで反射した光は、 $P_{61}$  を経由して  $P_{64}$  に至っている。一方、ミラー2が移動した場合には、 $P_{10}$  から入射し、ハーフミラーを透過した光は、移動前と同じく  $P_{65}$  を経由して  $P_{64}$  に至っている。しかしながら、ミラー2からの  $P_{64}$  への光は、 $P_{10}$  から入射した光ではなく、 $P_{20}$  から入射した光となる。この場合には、それぞれの光路長を考えると、ミラー2の移動前に比べて  $\overline{P_{62}P_{61}} - \overline{P_{63}P_{61}}$  だけ光路長は長くなり、CCDカメラによって観察される強度分布では、その光路長の変化に応じた位相変化が発生することになる。これを実験的に確認したものが Fig. 6 (b) である。 $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  いずれの点においても、ミラー2の移動に伴い振幅とバイアスは異なるものの、同じ周期をもった信号が発生している。

この場合にさらに検討しておかなければならない問題は、ミラー2を移動することにより、新たな問題が発生しないかを検討することである。

Fig. 2 に示すような本来の二光束スペックル干渉計では、測定対象の面外変位には感度は存在していない。この状況がミラー2の動きによって影響されていないかどうかを Fig. 8 において検討した。

Fig. 8 (a) に示すように、ミラー2が移動しない場合、測定対象が面外に移動する場合を考えると、 $P_{10}$ ,  $P_{11}$  点から入射した光において、 $P_{70}$  から  $P_{71}$  への測定対象内の点の移動に伴う二光束間での光路長の変化は存在しないので、面外変位では、観察する縞の位相変化は発生しないことがわかる。また、ミラー2が変化した場合に測定対象が面外に移動しても、Fig. 7 を基本として考えると、Fig. 8 (b) に示すように、面外変位に伴う光路長の変化は存在せず、ミラー2の移動に伴う光路長の変化だけが存在するこ

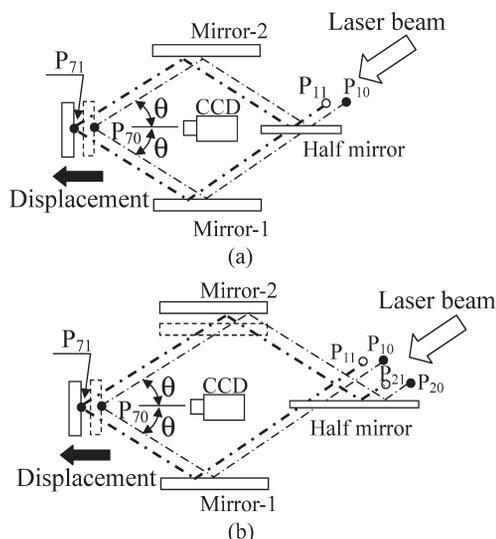


Fig. 8 Optical path difference of laser beam with movement of mirror-2. (a) Optical path difference in out-of-plane displacement, (b) Optical path difference in out-of-plane displacement with movement of mirror-2.

とがわかる。この状況を実験的に確かめたものが、Fig. 9 である。

Fig. 9 (a) に示すように、ミラー 2 が移動しない場合には、面外変位を与えても、Fig. 8 (a) に示すように  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  いずれの点においてもその強度は変化しない。しかしながら、Fig. 8 (b) に示すように、ミラー 2 が移動するとともに、測定対象が面外変位する場合には、Fig. 9 (b) に示すように、Fig. 6 (b) に示すミラー 2 のみが移動した場合と同じ状況を観察することができる。すなわち、面外変位の影響を受けることなく、キャリア情報をミラー 2 の動きによって与えることができる。

このようにして、ミラー 2 の動きによって、面外変位の影響を受けることなくキャリア情報を与えることができるので、Fig. 6 (a) に示したような面内変位を与えた場合に、その方向をとらえることができなかった問題を、キャリア情報を与えることによって解消できることが、次に示す結果からいえる。

Fig. 6 (c) にミラー 2 を移動させることによってキャリア情報を与えつつ、Fig. 6 (a) に示したのと同様の面内変形を  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  点に与えた場合の強度分布の変化を示している。

$P_2$  点では、本来の面内変位が微小なので、変形キャリア周波数は Fig. 6 (b) に示すキャリア周波数とほぼ同じものとなっている。しかしながら、 $P_1$  点では、右方向への面内変形による情報がキャリア周波数を変調し、変形キャリア情報として周波数を高めている。

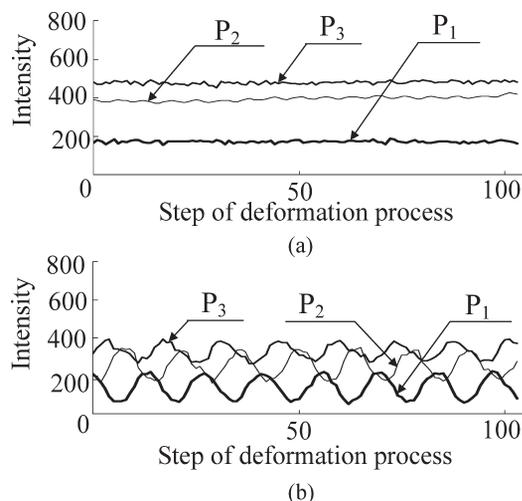


Fig. 9 Influence of speckle intensity by movement of mirror-2. (a) Out-of-plane displacement, (b) Out-of-plane displacement and carrier information.

一方、 $P_3$  点では、左方向への面内変形による情報がキャリア周波数を変調し、変形キャリア情報としては周波数が低くなっている。このように、キャリア情報を用いることによって、面内変形方向（面内変形が左右に増加あるいは減少している状況）の情報を維持した処理が可能になる。

### 3. 測定結果

Fig. 2 のミラー 2 を移動させることによって、Fig. 6 (c) に示すようにキャリア信号を面内変形情報で変調した信号を得ることができる。この場合に、Fig. 2 のミラー 2 を平行移動させることによって与えられたキャリア成分は、測定対象面上すなわち空間的な情報としては、すべての位置において同じだけ与えられているものである。したがって、このような面内変形成分として空間的な情報を考える場合には、ミラー 2 の平行移動に伴い新たに与えられたキャリア情報によって、空間的に測定結果に影響を及ぼすことはない。この情報を用いて 2 章 1 節に示したヒルベルト変換にもとづく演算を行うと、 $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  点において、Fig. 10 に示すように cosine 成分ならびに位相が  $\pi/2$  rad 異なる sine 成分を得ることができるので、それぞれの点において、Fig. 11 に示す各ピクセルにおける変形に対する位相分布を求めることができる。

ここで、前報<sup>23,24)</sup>と同様に、Fig. 5 に示すフーリエ変換時の演算結果における不確定の問題を回避することができると思われる  $P_c$  点において、Fig. 11 に示したような位相分布をスペクルパターンのすべてのピクセルで演算する。さらに、式 (1) にキャリア成分を与えた場合の一

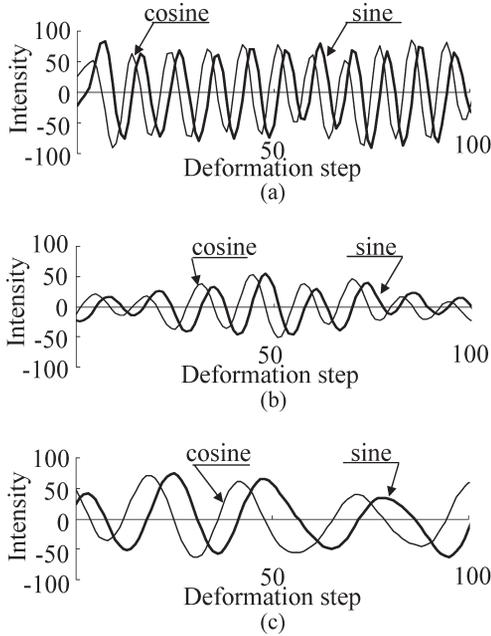


Fig. 10 Results by Hilbert transformation. (a) Sine and cosine profiles of speckle intensity by Hilbert transformation at  $P_1$ , (b) Sine and cosine profiles of speckle intensity by Hilbert transformation at  $P_2$ , (c) Sine and cosine profiles of speckle intensity by Hilbert transformation at  $P_3$ .

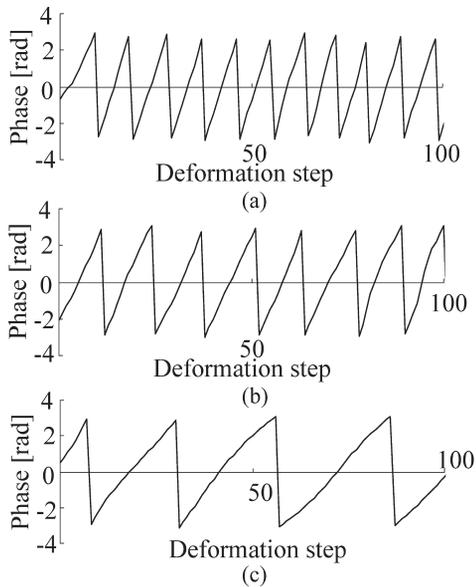


Fig. 11 Phase maps at points  $P_1$ ,  $P_2$ , and  $P_3$ . (a) Phase distribution at  $P_1$ , (b) Phase distribution at  $P_2$ , (c) Phase distribution at  $P_3$ .

次元強度分布を次に示す式 (2) として定義すると, Fig. 12 (c) に示すようなキャリア成分を含む仮想スペックルパターンを合成することができる. 本研究では, 後に利用する位相検出解析アルゴリズムに則したように, キャリヤ一周波数  $\omega c$  を 8 ピクセルが 1 周期になるような情報とし

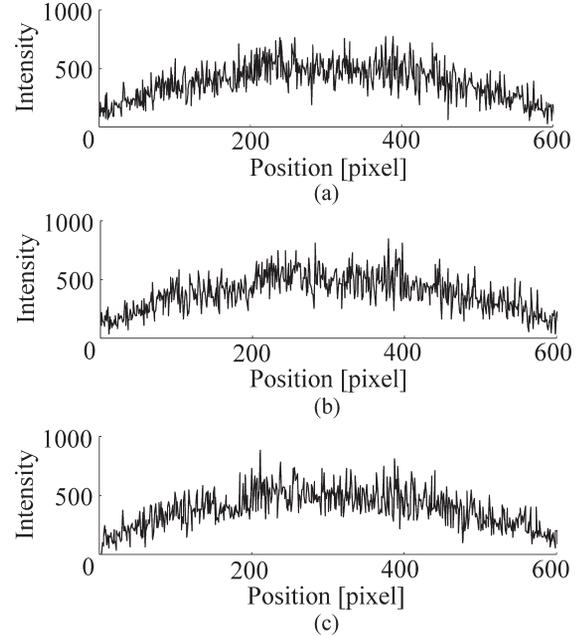


Fig. 12 Virtual speckle patterns. (a) Intensity of speckle pattern before deformation, (b) Intensity of speckle pattern after deformation, (c) Intensity of virtual speckle pattern including carrier information at 30th step.

て設定している. ただし,  $x$  はスペックルパターン画像の水平方向の位置の座標を示すものである.

$$I = A(x) + B(x) \cos[\phi(x) + \omega c \cdot x] \quad (2)$$

Fig. 12 (c) に示す仮想的に合成したスペックルパターンを用いて, Fig. 12 (a), (b) に示す実験データとしてのスペックルパターンとの間で, Fig. 5 の  $P_s$ ,  $P_E$  に相当するような状況に対してのスペックルグラムを二次元画像として求めると, Fig. 13 (c), (e) に示すようにそれぞれ変形キャリア縞画像を得ることができる. また, 仮想スペックルパターンと 30 step 目のスペックルパターンとの間の演算では, Fig. 13 (a) に示すようなキャリア縞画像を得ることができる. この信号成分は周波数軸上で, 8 ピクセル 1 周期に位置している. Fig. 13 (c), (e) の縞画像をフーリエ変換して周波数軸上で観察すると, Fig. 13 (b) に示すキャリア縞情報が面内変形に伴い, Fig. 13 (d), (f) に示すように, 画像信号のピークの位置が周波数軸上で, 矢印に示すようにキャリア一周波数の位置から移動していることがわかる.

Fig. 13 (c), (e) 画像から空間的縞解析法によってその位相成分を求めると, Fig. 14 (a), (b) としてそれぞれ位相分布を求めることができる. これらの結果からさらに, Fig. 5 に示した縞解析の状況を考慮すると, Fig. 14 (b) の位相分布より Fig. 14 (a) の位相分布を減算することによ

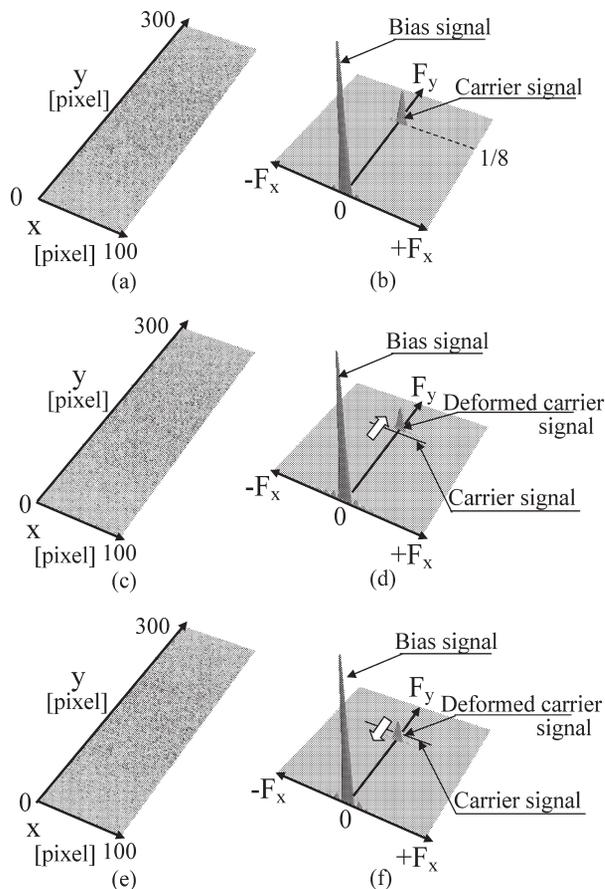


Fig. 13 Specklegrams as carrier and deformed carrier fringes. (a) Carrier fringe in spatial domain, (b) Carrier fringe in Fourier domain, (c) Deformed carrier fringe in spatial domain (0→30), (d) Deformed carrier fringe in Fourier domain (0→30), (e) Deformed carrier fringe in spatial domain (30→100), (f) Deformed carrier fringe in Fourier domain (30→100).

ってトータルの位相分布を求めることができる。その結果が Fig. 14 (c) に示す位相分布である。

本手法において仮想的に合成されたスペックルパターンには、位相分布に誤差が含まれる可能性が考えられる。こ

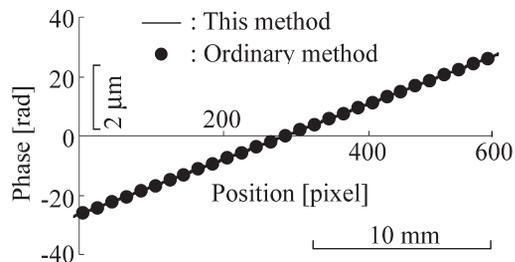


Fig. 15 Comparison of this method with ordinary method.

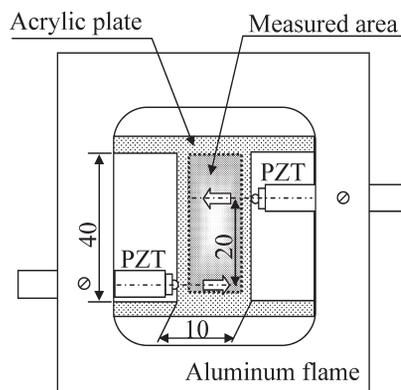


Fig. 16 Measured object.

のような位相に関する誤差は、本報に示すような位相間の減算処理によって緩和され、従来の TSPI などと比べて高分解能な解析結果をもたらす要因となっている。この点については、具体的に今後詳細に検討する必要がある。

Fig. 14 (c) の A-A 断面結果を 3 枚のスペックルパターンを用いて、解析を行う従来法にもとづいて求めた縞解析結果と比較したものが Fig. 15 である。両者の差の標準偏差は 0.012 rad であり、従来法と同等の高分解能な縞解析が実現されていることがわかる。

次に、Fig. 16 に示す H 型のアクリル板（幅：10 mm、長さ：40 mm、厚さ：2 mm）を圧電素子で左右（力点間

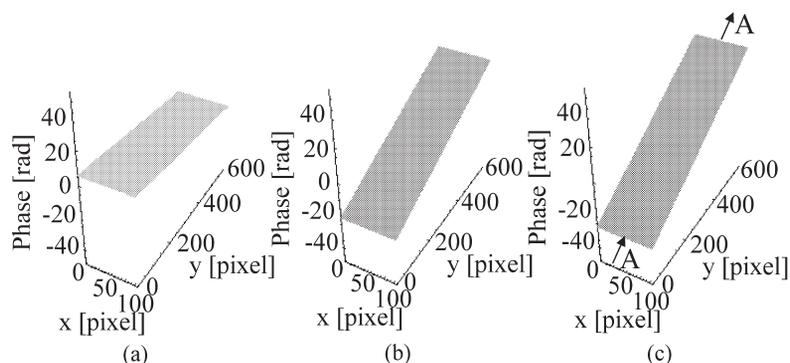


Fig. 14 Phase maps of deformation. (a) Phase map of Area-1, (b) Phase map of Area-2, (c) Phase map of total deformation.

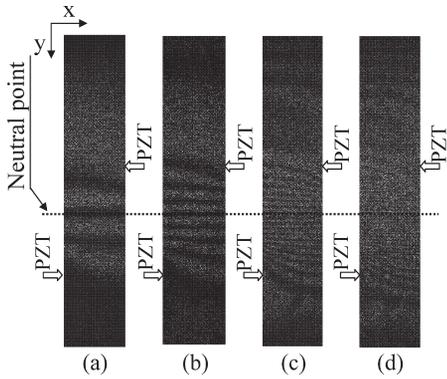


Fig. 17 Specklegrams in deformation process. (a) at 100th step, (b) at 200th step, (c) at 400th step, (d) at 600th step.

距離：20 mm) から力を加えることによって変形させた場合の面内変位を測定対象として実験を行った。ここでは、複雑な変形が発生するように、圧電素子による変形を上下非対称の位置で与えることにした。また、この変形過程を600 stepの面内変形過程として記録した。

変形前に採取したスペックルパターンと100, 200, 400, 600 stepで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、面内変形状況を調べたものがFig. 17である。面内変形が小さい場合には、圧電素子間では、左右方向の変形に伴い、変位が発生しない中立点が存在しつつ、ほぼ上下対称に面内変形が発生していることがわかる。最終的な変位を示す600 stepにおいて、下方の圧電素子では、圧電素子によって与えられた方向に、なだらかに面内変形が発生しているものの、上部の圧電素子では、圧電素子間に発生した変化率の大きな(縞の密度が高い)面内変形から、圧電素子よりも上部において、明らかに圧電素子間の面内変形とは異なる、ゆるやかに変形する面内変位が発生していることがわかる。この面内変形分布を対象として、本報で提案した手法の有効性を次に検討した。

100 step目において、Fig. 12と同様に式(2)を用いて、仮想スペックルパターンを作製し、キャリア縞をスペックルグラムとして求めた結果をFig. 18(a)に示す。さらに、このキャリア縞情報をフーリエ変換した結果をFig. 18(b)に示す。ここでは、8 pixelが1周期になるようにキャリア縞を設定した。Fig. 18(b)に破線で示すキャリア信号近傍を対象として、次に、変形キャリア縞の状況をFig. 19において検討する。

Fig. 17(d)に示すように、面内変形が大きくなると、Fig. 5に示すように、変形過程内のどこか1箇所、キャリア縞を発生させるための仮想スペックルパターンを

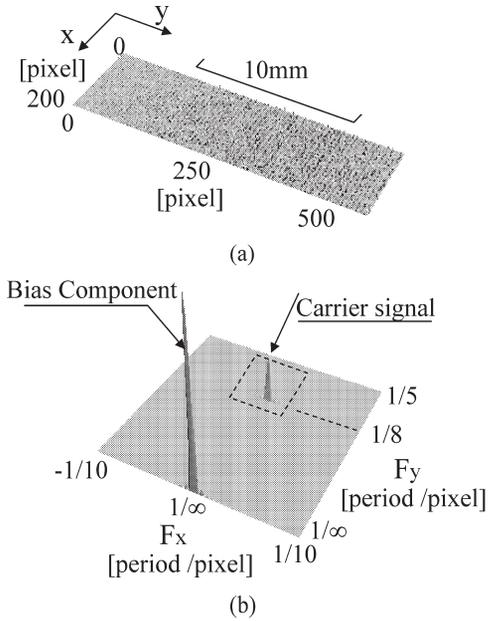


Fig. 18 Carrier fringe information. (a) Carrier fringes in spatial domain, (b) Carrier fringes in frequency domain.

創成するだけでは、変形過程全域での処理ができなくなる。Fig. 17(d)の面内計測を行うために、ここでは、6箇所(変形過程内の100, 230, 300, 400, 440, 500 step)で、キャリア縞を発生させるために仮想スペックルパターンを創成した。このように複数のキャリア縞を発生させるに当たっては、創成すべき仮想スペックルパターンの数、ならびに変形過程内のどの位置で創成すべきかは、変形過程の状況に大いに依存する。現状では、具体的に何種類の仮想スペックルパターンを変形過程内のどの位置に創成するのがよいのかの議論は行っていない。したがって、本稿解析では、縞解析過程において随時必要に応じて、仮想スペックルパターンを創成した。よって、必ずしも6箇所で本来仮想スペックルパターンを作る必要はない可能性もある。今後、仮想スペックルパターン創成に関して、その総数ならびに位置と測定精度との関係も踏まえて、仮想スペックルパターンの創成のあり方を議論する必要があると考えている。

本研究ではひとまず、Fig. 19にとして示すように変形開始後100 step, 200 step, 400 step, 600 step(変形終了時)の面内変形に伴う位相分布(変形量)を求めた。この解析を行うために、Fig. 19に示すような一連の連続した縞解析を実施した。

まず、変形開始( $P_s$ 点)から、100 step目で最初のキャリア縞を発生させるための仮想スペックルパターンを創成した。これを用いて、Fig. 19(a), (b)に示す変形キャ

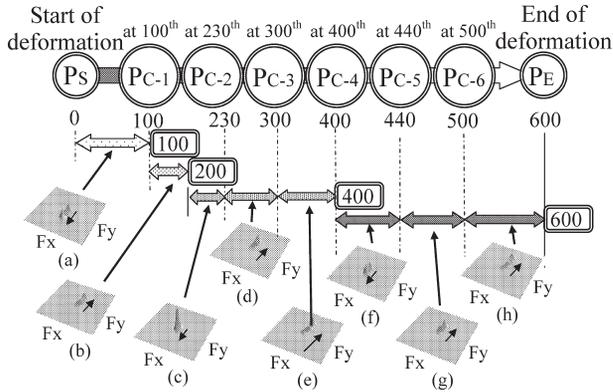


Fig. 19 Fringe analysis process in large deformation measurement.

リヤール縞信号を Fig. 13 同様にそれぞれ獲得した。図中の矢印は、キャリア縞の位置からの移動方向を示している。この結果を用いて、100 step 目の位相分布を、Fig. 18 (a) より求めたキャリア縞の位相分布から、周波数領域で Fig. 19 (a) に示す信号をもつ変形キャリア縞画像より求めた位相分布を減算することによって、Fig. 20 (a) を得た。また、200 step 目の位相分布は、周波数領域で Fig. 19 (a) に示す信号をもつ変形キャリア縞画像より位相分布を求め、同様に周波数領域で Fig. 19 (a) に示す変形キャリア縞信号より求めた位相分布を減算することによって、Fig. 20 (b) に示すように求めた。これらの演算は、Fig. 5 に示す、変形過程内の 1 箇所仮想スペックルパターンを創成することによる処理と同じものである。

ところが、400 step 目での、位相情報を得るには、100 step 目で創成した仮想スペックルパターンに加えて、230 step 目で新たな仮想スペックルパターンを創成しなければ、変形量が大きくなり、位相解析ができなくなっていた。このようにして、230 step 目で新たに創成した仮想スペックルパターンを用いることによって、200 番目と 230 番目ならびに 300 番目と 230 番目との間で変形キャリア縞をそれぞれ求めた Fig. 19 (c), (d) に示すような周波数情報としての変形キャリア縞信号を空間的に縞解析することにより位相分布を求め、200 step 目での変形分布に累積すると、300 step 目での位相分布を求めることができる。さらに、400 step 目で新たに仮想スペックルパターンを創成し、Fig. 19 (e) に示す 300 番目と 400 番目との間で変形キャリア縞を求め、その位相分布を用いると、最終的に Fig. 20 (c) に示す 400 step 目での位相情報を求めることができる。このように変形が進むと、小さく刻んだ縞解析が必要になる。

同様にして、600 step 目での変形量は、440 step ならび

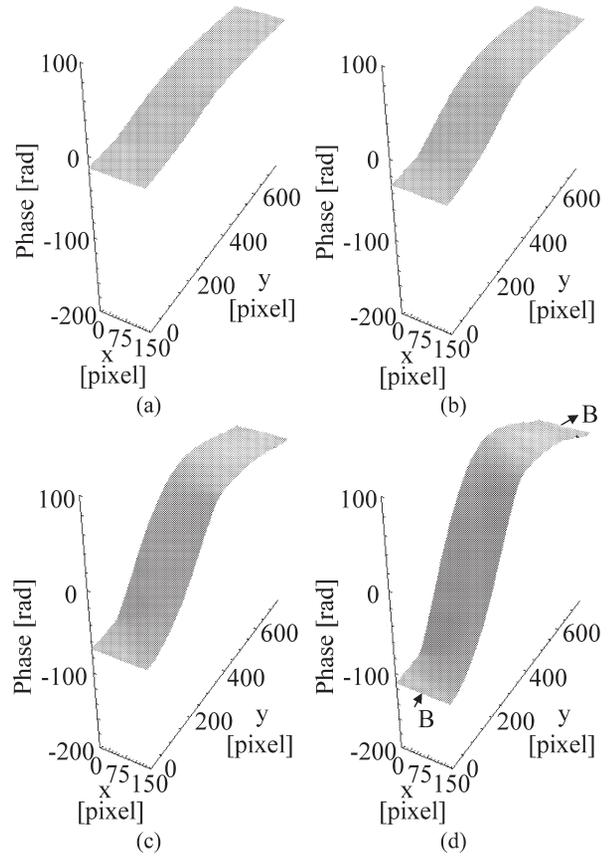


Fig. 20 Phase maps of deformation process. (a) at 100th step, (b) at 200th step, (c) at 400th step, (d) at 600th step.

に、500 step において新たに仮想スペックルパターンを創成することにより、Fig. 19 (f), (g), (h) に示すような周波数情報として表すことのできる変形キャリア縞信号を獲得し、それらを解析することによって、Fig. 20 (d) としてトータルの変形にもとづく位相分布が求められている。

Fig. 20 (c), (d) に示す 400 step, 600 step での面内変形では、Fig. 17 (c), (d) に示すように、上部圧電素子近傍で、面内変形の方向が変化するような状況を観察することができる。すなわち、本手法では、必ずしも変形に伴う位相変化（面内変形の変化）は、単調増加（単調減少）でなくても解析が可能であることがわかる。

Fig. 20 の B-B 断面を観察したものが、Fig. 21 である。明らかに、400 step, 600 step での面内変形では、変形量が単調増加とはなっていないけれども、ミラー 2 を移動させる手法を導入することによって、単調増加でない状況での計測が実現されている。

次に、本手法と従来法（3 枚のスペックルパターンを用いた手法）との測定結果の比較を行おうとした。しかしながら、従来法では、変形前にキャリア縞を与えるための

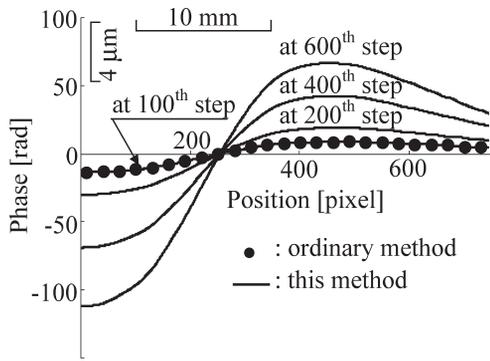


Fig. 21 Phase maps in deformation process on line B-B.

スペックルパターンをあらかじめ採取しているものの、このスペックルパターンを用いた解析では、変形量が大きくなる 200 step 目での縞解析を測定対象全域で行うことはすでにできなかった。そこで、本手法によって求めた 100 step 目の結果と、従来法によって求めた 100 step 目との結果の比較のみをここでは行った。Fig. 21 の黒丸でプロットしたものが従来法による結果である。本手法による結果とよく一致していることがわかる。ここで、両者の差の標準偏差を求めると、0.18 rad であることがわかった。これは、波長の約 35 分の 1 であり、この結果から、従来法と同程度の計測が新しい手法によって実現されているものであると考えることができる。

以上の結果より、本手法では、測定対象が必ずしも単調増加になっていない場合においても、面内変形過程のみの情報を用いて、従来法と同程度に高分解能な計測が実施可能であることを示すことができた。

今後、本手法を大変形を伴うダイナミック計測へ適用した場合について、検討する予定である。

#### 4. おわりに

本研究においては、以下の事柄について検討し、実験によりその有効性を示している。

- (1) 本報では、面外変形計測において提案されている仮想スペックルパターン創成による手法を、面内変形計測へ拡張するための議論がなされている。この議論のもとで、キャリア縞を発生させるための基準となる第 3 のスペックルパターンを記録する必要がない高分解能な面内変形計測法が新しく提案されている。また、この手法では、上記のように基準となるスペックルパターンの記録を必要としないので、原理的に大変形計測ならびにダイナミックに変形する面内変形計測も随時キャリア縞を発生させることのできる仮想ス

ペックルパターンを創成することによって実現している。

- (2) 面外変形計測において提案されていた仮想スペックルパターンを用いた手法を、面内変形計測へ適用するための光学系設定法ならびに解析過程が示されている。
- (3) 実験結果を用いた従来法との比較において、その測定精度が検討され、この結果より、従来法と同程度の測定精度が 1 台のカメラによって、かつ解析過程内の情報のみを用いて実現可能であることが示されている。
- (4) 従来法では解析が困難であった大変形面内変位計測においても、また、面内変形が単調増加（単調減少）しない場合においても、変形過程内の情報のみを用いて、本手法によって、高分解能な縞解析が従来法と同程度に実現可能であることを示している。

#### 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. 409-476.
- 4) 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.
- 6) 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.
- 7) P. Meinschmit, 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, Section-10, "Phase shifting"* (SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, WA, 1996) pp. 457-518.
- 8) S. Nakadate and H. Saito: "Fringe scanning speckle-pattern 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: "In-plane displacement measurement using electronic speckle pattern interferometry based on spatial fringe analysis method," *Opt. Eng.*, **43** (2004) 2168-2174.
- 13) Y. Arai and S. Yokozeki: "Electric speckle pattern interfer-

- ometry based on spatial fringe analysis method using multi camera,” Proc. SPIE, **6341** (2006) 63410k.
- 14) Y. Arai, H. Hirai and S. Yokozeki: “Electric speckle pattern interferometry based on spatial fringe analysis method using two cameras,” J. Mod. Opt., **55** (2008) 281-296.
  - 15) 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.
  - 16) 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.
  - 17) 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.
  - 18) 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.
  - 19) 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.
  - 20) J. A. Quiroga, M. Servin, J. L. Marroquin, J. A. Gomez-Pedrero: “An isotropic n-dimensional quadrature transform and its applications in fringe pattern processing,” Proc. SPIE, **5144** (2003) 259-267.
  - 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) Y. Arai, R. Shimamura and S. Yokozeki: “Composition of virtual speckle pattern for spatial fringe analysis method in ESPI by using single camera,” Proc. SPIE, **6616** (2007) 6616-11.
  - 24) 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.
  - 25) 谷田貝豊彦: 第二版応用光学光計測入門 (丸善, 2005) pp. 141-146.
  - 26) 三上直樹: はじめて学ぶデジタル・フィルターと高速フーリエ変換 (CQ出版, 2005) pp. 171-188.
  - 27) S. L. Hahn: *Hilbert Transforms in Signal Processing* (Artech House, Norwood, MA, 1996) pp. 3-396.
  - 28) S. Haykin: *Communication Systems* (John Wiley & Sons, New York, 2001) pp. 373-380 and pp. 723-725.
  - 29) J. Y. Stein: *Digital Signal Processing* (John Wiley & Sons, New York, 2000) pp. 279-288.