

## 2次元空間的縞解析法のスペックル干渉法への適用

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

### Application of Two Dimensional Spatial Fringe Analysis Method to Speckle Pattern Interferometry

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

A speckle pattern interferometry system based on a two dimensional spatial fringe analysis method is discussed. In order to detect precisely a phase map of a speckle interferogram generated from speckle patterns in the new system, a digital filtering and a prediction processing using the Kalman filter are employed in addition to the ordinary two dimensional spatial fringe analysis. The experiment for the measurement of static deflection of a cantilever is performed. The results show that the spatial fringe analysis method, which can readily measure the dynamic events, can be introduced into the measurement based on the speckle interferometry.

#### 1. はじめに

干渉縞画像解析<sup>1)</sup>は変位などの計測を高精度に行うことができるものの、実用段階での使用においては、計測対象が粗面であることが多く、このような対象物に対して適用することのできる技術の確立が重要となってきた。この要望に対しては、一般に、スペックル干渉法<sup>2,3)</sup>にもとづく計測技術が有効である。このスペックル干渉法において、干渉縞画像解析の特徴である高感度化をはかるために、時間的ならびに空間的縞解析原理<sup>2)</sup>にもとづく手法が数多く報告されている<sup>4-12)</sup>。しかしながら、時間的縞解析原理にもとづく手法では、位相の異なる数枚の画像が必要となり、この考え方にもとづく処理を行うためには位相の異なるさらに多くのスペックルパターンが必要となる。その結果として、時間的縞解析原理にもとづくスペックル干渉法によってダイナミックに変化する現象を捉えることは一般には困難となっている。

一方、現在報告されている空間的縞解析にもとづくスペックルグラム<sup>10-12)</sup>の解析では、1個のスペックルの中に空間的な位相分布をもたせるために、十数 $\mu\text{m}$ を超える粒

径の大きなスペックルを発生させ、かつそれらを観察するために空間的高分解能なカメラが用いられている。また、この手法では、空間的パターン1周期内では、位相は変化しない、さらに、縞のコントラストは一定であるなどの制約条件が存在する。この条件下では、通常利用される領域でのスペックルの大きさと測定精度との関係を議論することは困難となる<sup>12)</sup>とともに、大きなスペックルを発生させるために、画像採取において小さな開口絞りを利用する必要があり、結果的に大出力の光源が必要になっている。

また、従来のスペックルグラム解析過程においては、スペックルグラムに含まれるノイズ成分を除去するためにメディアンフィルターが一般に用いられている。メディアンフィルターを用いることは、容易にノイズ成分を軽減することができる。しかしながら、あくまでも画像処理技術としてのメディアンフィルターの有効性が利用されているにすぎないため、可視化技術等の画像の定性的特長抽出技術としては有効であるものの、縞走査技術の基本的立場である測定精度の高感度化といった定量的な処理としての立場からは、ノイズ成分そのものの性質に応じたもう一步踏み込んだ問題解決の議論はメディアンフィルター等画像処理技術を用いてノイズ成分の除去を行おうとする限り十分に

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

はできないはずである。

このようなスペックル干渉法における縞解析の状況に対して、本研究では前報<sup>13)</sup>に示したノイズを含む縞画像の縞解析法をスペックルグラム解析に適用し、メディアンフィルターに代表される画像解析アルゴリズムを用いることなく、スペックルグラムを信号情報として捉え、フーリエ解析に代表される信号解析技術にもとづく処理を行うことによって縞解析を行おうとしている。

この考え方にもとづいて、本報では、前報<sup>13)</sup>に示した手法をスペックルグラムへ適用する場合の解析の可能性、また、その場合の問題点について粗面をもつ梁の変位測定実験を通して検討している。

実験結果より、確率過程にもとづくモデルを用いた最適フィルターを適用した空間的縞解析法<sup>13)</sup>を用いることによって、縞画像としてのスペックルグラム中のノイズ成分の除去が可能であり、また、スペックル干渉計測における縞解析が容易に行えることを示している。このことは、従来報告されている1つのスペックル内に3個の画素が存在するように設定しなければならないような特殊条件下で実現されている空間的縞解析法にもとづくスペックルグラムの解析手法<sup>10-12)</sup>とは異なった通常の干渉縞解析で用いられている空間的縞解析法にもとづくスペックルグラムの解析が実現可能であることを示している。

スペックル干渉計測法における空間的縞解析法の利用が、スペックル干渉計測法の利用分野のさらなる拡大を促すものであると考えている。

## 2. 原 理

### 2.1 空間的縞解析法のカルマンフィルターを用いたフィルタリング処理<sup>13)</sup>

前報<sup>13)</sup>では、1枚の変形を受けたキャリアー縞を用いて行う空間的縞解析法<sup>14)</sup>に、デジタルフィルタリング処理、ならびに、確率過程にもとづくモデルを用いた最適フィルター（具体的には、カルマンフィルターにもとづくフィルタリング処理）を適用することによって、縞画像に含まれるノイズ成分の影響の軽減についての検討を行った。ここで、カルマンフィルターでは単なるフィルタリング処理に加えて欠損値の推定を行うことができる。すなわち、カルマンフィルターを用いると、前報<sup>15)</sup>で十分に解決することのできなかつたノイズにより生じるきわめてS/N比の低い画素（以下、低変調画素と呼ぶ）の処理に対しての「変化量の最も小さい隣接する pixel からの位相演算処理」に代わって低変調画素では信頼性の低い演算結果は用いないで、演算結果そのものが欠損していると仮定し、カ

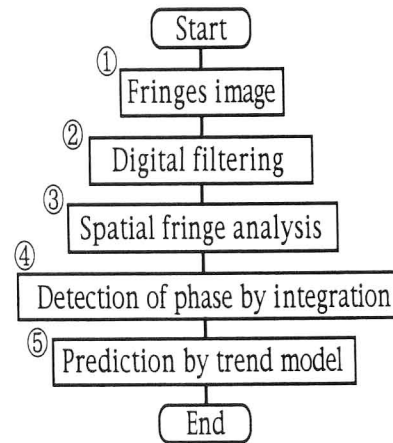


Fig. 1 Flow chart of the processing.

ルマンフィルターにより推定した値を低変調画素における演算結果に代えて用いる処理法が利用できる。この考え方に従えば、従来十分に対応することのできなかつたノイズの影響の問題を確率過程にもとづいて論理的に改善することが期待できる。

しかしながら、本研究においてノイズ処理を行うにあたって重要な役割を果たすカルマンフィルターを用いるためには、モデルとしての状態方程式が必要となる。ここでは、前報<sup>13)</sup>に示した処理法にもとづきトレンドモデル<sup>16)</sup>を用いて状態モデルを形成し、このモデルに従ってカルマンフィルターにもとづく空間的縞解析法によって縞画像の解析を行った。また、実験では前報<sup>13)</sup>と同様に文部省統計数理研究所において製作されたTIMSAC (time series analysis and control) をカルマンフィルターとして利用した。

### 2.2 縞解析アルゴリズム

スペックルグラム解析処理のフローチャートをFig. 1に示す。フローチャートに示す処理番号に従って以下説明する。

まずはじめに、①に示すようにESPI (electronic speckle pattern interferometry)<sup>2)</sup>にもとづくスペックルパターンの撮影を行い、各状態でのスペックルグラムを求める。ただし、処理の詳細は次節に示す。

次に、②に示すように本手法では、測定物体の変形に伴うキャリアー縞の変化前、変化後の各スペックルグラムに対して、それぞれ、キャリアー縞に垂直な方向に対しては、キャリアー周波数にもとづくバンドパスフィルターを、また、キャリアー縞に平行な方向に対しては、ローパスフィルターを用いて2次元デジタルフィルタリング処理がなされている。この場合の通過帯域のバンド幅の設定は、被測定対象表面が滑らかであるという仮定のもとに、

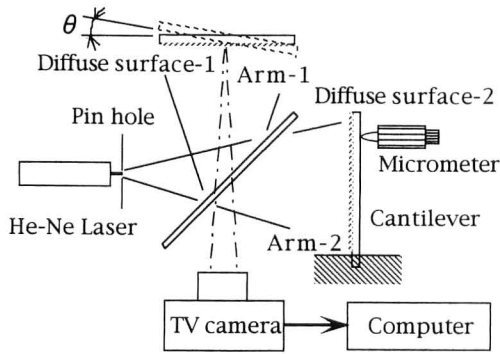


Fig. 2 Schematic diagram of speckle interferometer.

ここでは、キャリア周波数の10分の1の周波数を目途として設定している。この周波数の設定法についてはノイズ成分除去との関連を含めて、今後議論する必要があると考えている。

さらに、③に示すように上記の2次元フィルタリング処理を施された各スペックルグラムに対して前報<sup>14)</sup>に示したモアレ縞解析を基礎とした空間的縞解析処理が行われている。この処理では、ここに示すキャリア縞のような周期構造をもつ画像をTVカメラによって撮影した場合に、画像の周期的なパターンとカメラの走査線との間にモアレ縞が発生する現象<sup>17)</sup>ならびにそのモアレ縞の位相をコントロールすることのできる現象<sup>18)</sup>が用いられている。すなわち、周期構造をもつパターン画像から、走査線の代わりに、複数個のピクセルを1周期として画像データを収集すれば、データサンプリングの位置を制御することによって擬似的に計算機内部にモアレ縞を発生させることができる。このようにして得られた数枚の位相の異なったモアレ縞画像に対して、縞走査技術を適応すれば、縞の位相分布を求めることができる<sup>1)</sup>。しかしながら、このようにして得られた位相分布には逆正接関数の主値の定義域の問題により位相接続を行う必要性が生じる。この問題に対しては、逆正接関数の演算過程において位相の異なった2種類の位相分布を求め、逆正接関数固有の位相飛びの問題と画像中のノイズにより発生した位相飛びとの問題を可能な限り分離する処理によって対応することができる<sup>15)</sup>。さらに、画像中の低変調画素の位置を検出し、最終的な位相分布を求める過程における2次元演算経路決定時に、この低変調画素を回避しつつ<sup>13-15)</sup>位相接続処理を行っている。このようにして求められた位相分布には、デジタルフィルタリング処理が施されているとはいっても低変調画素そのものの、また、その影響が強く残っている。したがって、⑤に示すように、先に求められている低変調画素の位

置の位相の値に対して、この位置での値は欠損していると仮定し、ここで求めた位相分布に対してのトレンドモデルを定義することによって、低変調画素での位相の推定処理がカルマンフィルターを用いて実施されている<sup>13)</sup>。

以上に示す一連の処理によって、スペックル干渉縞に対する空間的縞解析を行った。ここでは、Fig. 1に示すフローチャートの処理番号を各処理結果に示している。

### 3. 結果と検討

Fig. 2に示すスペックル干渉計を構成し、実験を行った。初期状態として、Arm-1では光軸に垂直にアルミニウムの板に白色つや消しスプレーを塗布した粗面を設置し、Arm-2側では、厚さ0.5mm、幅30mm、長さ60mmの構造用鋼板の上に白色つや消しスプレーを塗布した片持ち梁を変位0の状態固定し、1枚目のスペックルパターン $S_1$ を撮影した。この場合のスペックルパターンの平均的粒径は $3.7\mu\text{m}$ である。

次に、Arm-1側の粗面を微小角 $\theta$ (キャリア縞の1周期がCCD pixel 8個分に相当するような角度)だけ回転し、片持ち梁の変位は0の状態キャリア縞を得るために2枚目のスペックルパターン $S_2$ を採取した。さらに、Arm-1の粗面を $\theta$ だけ回転した状態で、片持ち梁をマイクロメーターを用いて鋼板の固定端より35mmの位置を $1.8\mu\text{m}$ 変位させた場合のスペックルパターン $S_3$ を撮影した。

以上の3枚のスペックルパターン間で次の演算<sup>4)</sup>を行い、各状態でのスペックルグラムを求めた。それぞれの演算結果としての画像をFig. 3(処理番号①)に示す。

- (1) キャリア縞成分を示す画像: Image-1 (Fig. 3(A))

$$\text{Image-1} = (S_2 - S_1)^2$$

- (2) 片持ち梁のたわみによる位相変調を受けたキャリア縞画像: Image-2 (Fig. 3(B))

$$\text{Image-2} = (S_3 - S_1)^2$$

- (3) カンチレバーの傾きの情報のみをもつ画像: Image-3 (Fig. 3(C))

$$\text{Image-3} = (S_3 - S_2)^2$$

ここで、Image-1, -2をそれぞれFig. 1に示した手順で縞解析し、位相を求め、この位相に関して両者の差を求めることによって、片持ち梁のたわみ曲線を求めた。

それぞれの処理過程における結果を以下に示す。また、以下の信号解析では、Fig. 3の白枠で示した領域(画像解析領域は幅25mm、長さ40mmである)の処理を行った。

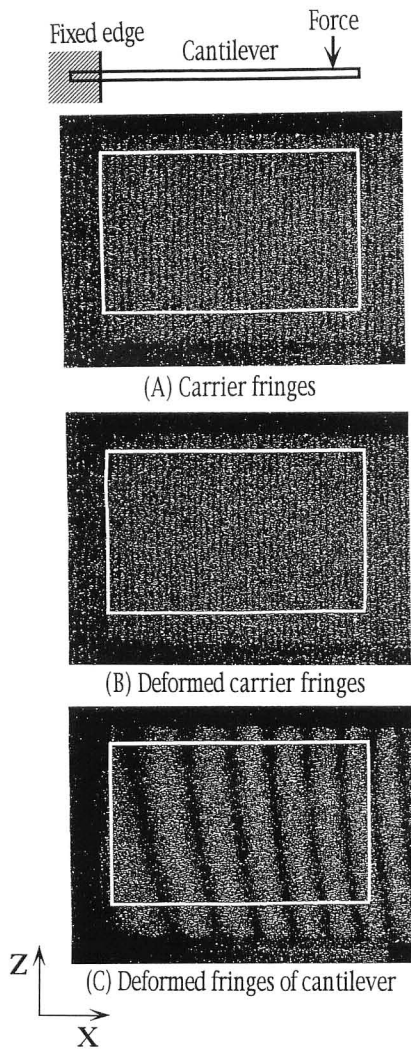


Fig. 3 ESPI interferograms.

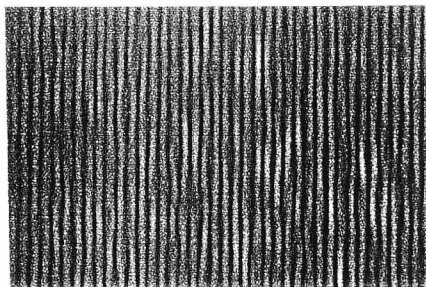


Fig. 4 Carrier fringes after digital filtering.

Fig. 4 (処理番号②) に Fig. 3(A) に示したキャリア一縞としてのスペックルグラムを2次元フィルタリング処理された結果を示す。2次元デジタルフィルタリングにより、スペックルグラムに含まれるノイズ成分が大幅に除去されていることが確認できる。

Fig. 5 (処理番号③) には、Fig. 4 に示したキャリア一縞より求めた4種類 ( $0$ ,  $\pi/2$ ,  $\pi$ ,  $3\pi/2$  rad) の異なった位相をもつモアレ縞を示す。このモアレ縞画像よりキャリ

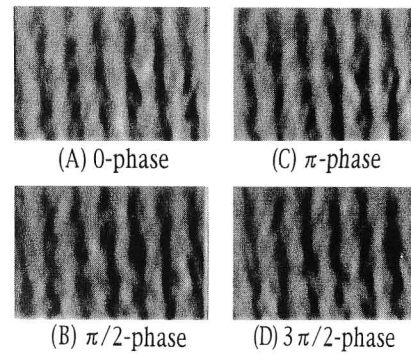
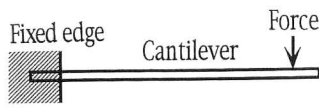


Fig. 5 Images of virtual moire fringes from carrier fringes.

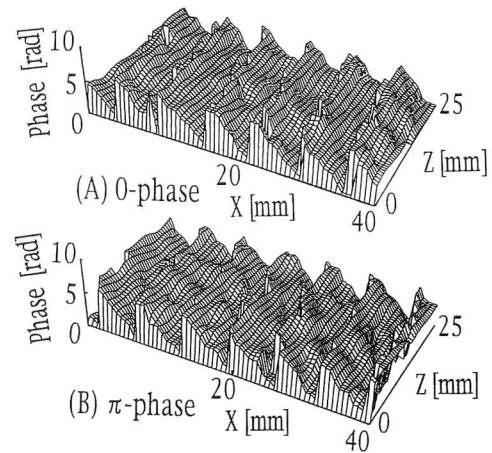


Fig. 6 Phase maps of virtual moire fringes from carrier fringes.

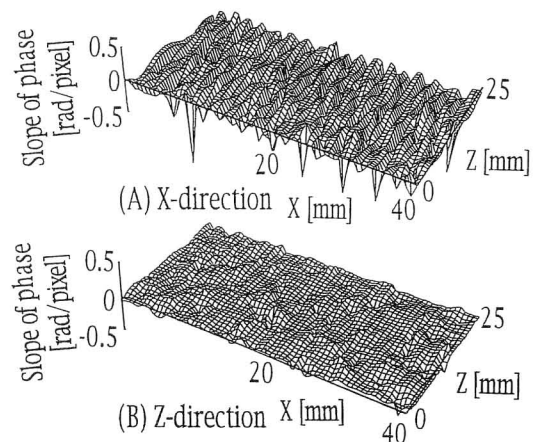


Fig. 7 Distribution of slope of phase of carrier fringes.

ヤーが1周期8 pixel に正確には設定されていないことがわかる。しかしながら、このような状況においても以下に示す解析を行うことができた。このことは、キャリア一縞が必ずしも1周期8 pixel に正確に設定される必要はないことを意味している。

次に、このモアレ縞より求めた Fig. 6 (処理番号③)

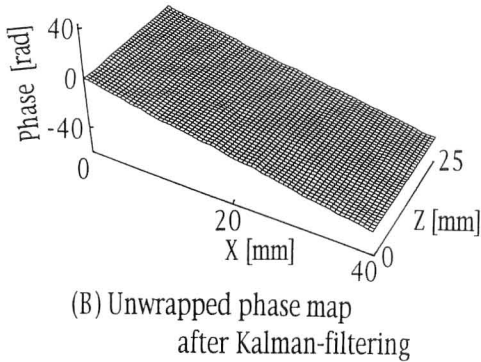
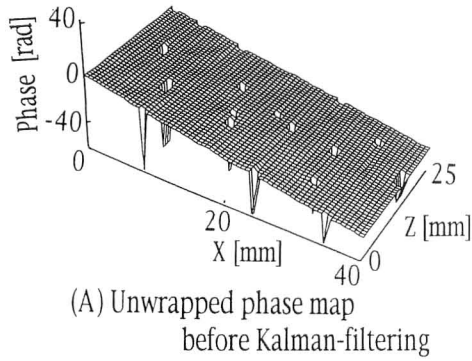


Fig. 8 Unwrapped phase maps of carrier fringes.

に示す 0 相,  $\pi$  相の位相接続されていない位相分布を用いて,  $x$ ,  $z$  方向の位相変化率分布 (Fig. 7 (処理番号③)) を求め, ノイズによる障害物を回避する積分路に従って求めた位相分布を Fig. 8(A) (処理番号④) に示す. ここで,  $x$  方向の変化率は  $z$  方向の変化率よりも変動が大きく, 測定精度の向上に向けての議論の中で, 位相接続処理において今後検討すべき余地があることがわかる.

Fig. 8(A) では, ノイズによる低変調画素 (図中, 穴が開いているように見える点) では位相値が存在しないと定義されているので, この点における位相値を次にカルマンフィルターを用いて推定した.

以上すべての処理を施した結果を Fig. 8(B) (処理番号⑤) に示す. 同様に, Fig. 3(B) に示した変形後のキャリヤー縞より位相分布を求め, 変化前と変化後との位相分布の差を求めた結果を Fig. 9 に示す. この Fig. 9 に示す位相分布こそが梁の変形を示すものである. この Fig. 9 に示す位相分布を, He-Ne レーザーの波長に対応させることによって, Fig. 9 の A- $\bar{A}$  断面に対応する梁のたわみ曲線を次に求めた. その結果を Fig. 10 に示す. Fig. 10 の実線は梁のたわみ  $\delta$  を式 (1)<sup>19)</sup> にもとづいて求めた結果である.

$$\delta = \frac{Fb^2}{6EI}(3a-b) \quad (1)$$

ただし,  $E$  はヤング率,  $I$  は梁の断面二次モーメント,

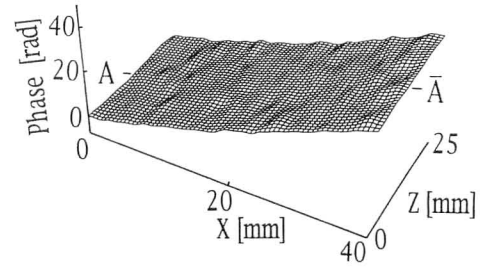


Fig. 9 Phase map of deformed cantilever.

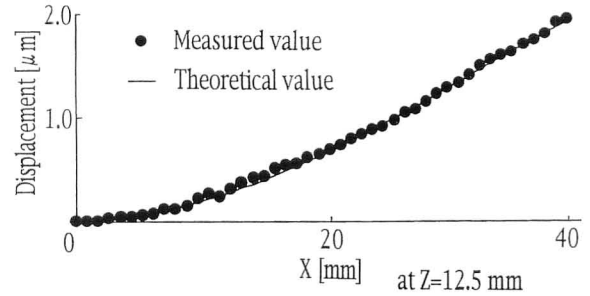


Fig. 10 Displacement of deformed cantilever.

$b$  は梁の固定端から先端へ向けての座標である. また, 式 (1) によりたわみ曲線を求める場合には, 荷重点と固定端との距離を  $a$  ( $=35$  mm) とし,  $a$  におけるたわみ量 (マイクロメーターの読み:  $1.8 \mu\text{m}$ ) を用いることにより, 荷重  $F$  を逆算し, この結果を用いて各点におけるたわみ量を計算した.

Fig. 10 では, 黒丸で示す実験結果は若干のうねりはあるものの, 式 (1) に示すたわみの式により求めた計算値とはよく対応していることがわかる. この場合の計算結果と測定結果との差の標準偏差は  $24.4$  nm ( $=0.039 \lambda$ ) である.

以上の結果より, 前報に示した空間的縞解析に確率過程を考慮したモデルを用いた手法を利用することによって, スペックル干渉計により求められた縞画像から高精度に位相検出が可能であることを確認することができた.

測定精度向上に向けて, 従来スペックル干渉法において議論されてきた CCD ピクセルとスペックルの大きさとにおける最適条件, ならびにスペックルの大きさとキャリヤー縞の周期との関連<sup>9)</sup> などの問題を, ノイズ成分の性質を考慮しつつ今後十分に処理過程における問題として議論していかなければならないと考えている.

#### 4. ま と め

本研究では, 空間的縞解析法にノイズの影響を軽減するためのフィルター処理として, デジタルフィルタリングならびに, カルマンフィルタリングを施す手法を用いて,

通常の干渉計測で用いられている一般的な空間的縞解析が、スペックル干渉計測において実施可能であることを示した。

梁の変形測定実験において、空間的縞解析法をスペックルグラムに適用することにより高精度な計測が可能であることを確認することができた。

最後に、トレンド処理を行うにあたって利用した TIM-SAC をご提供いただきました文部省統計数理研究所の田村義保先生に深く感謝いたします。また、本研究は、平成10年度関西大学学術研究助成金によって行った。

## 文 献

- 1) D. Malacara: *Optical Shop Testing*, 2nd ed. (John Wiley & Sons, New York, 1992) pp. 501-598.
- 2) G. Cloud: *Optical Methods of Engineering Analysis* (Cambridge Univ. Press, New York, 1995) pp. 395-491.
- 3) S. Nakadate, T. Yatagai and H. Saito: "Electronic speckle pattern interferometry using digital image processing techniques," *Appl. Opt.*, **19** (1980) 1879-1883.
- 4) S. Nakadate and H. Saito: "Fringe scanning speckle-pattern interferometry," *Appl. Opt.*, **24** (1985) 2172-2180.
- 5) K. Creath: "Phase-shifting speckle interferometry," *Appl. Opt.*, **24** (1985) 3053-3058.
- 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) A. J. P. van Haasteren and H. Frankena: "Real-time displacement measurement using a multicamera phase-stepping speckle interferometer," *Appl. Opt.*, **33** (1994) 4137-4142.
- 8) G. Pedrini and H. J. Tiziani: "Double-pulse electronic speckle interferometry for vibration analysis," *Appl. Opt.*, **33** (1994) 7857-7863.
- 9) T. Takatsuji, B. F. Oreb, D. I. Farrant and J. R. Tyrer: "Simultaneous measurement of three orthogonal components of displacement by electronic speckle-pattern interferometry and the Fourier transform method," *Appl. Opt.*, **36** (1997) 1438-1445.
- 10) T. Bothe, J. Burke and H. Helmers: "Spatial phase shifting in electronic speckle pattern interferometry: Minimization of phase reconstruction errors," *Appl. Opt.*, **36** (1997) 5310-5315.
- 11) J. Burke, H. Helmers, C. Kunze and V. Wilkens: "Speckle intensity and phase gradients: Influence on fringe quality in spatial phase shifting ESPI-systems," *Opt. Comm.*, **152** (1998) 144-152.
- 12) J. Burke and H. Helmers: "Performance of spatial vs. temporal phase shifting in ESPI," *Proc. SPIE*, **3744** (1999) 188-198.
- 13) 新井泰彦, 横関俊介: "カルマンフィルターによる空間的縞解析法の測定精度の改善", *光学*, **7** (1999) 384-390.
- 14) Y. Arai, S. Yokozeki and T. Yamada: "High precision two-dimensional spatial fringe analysis method," *J. Mod. Opt.*, **44** (1997) 739-751.
- 15) 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.
- 16) 北川源四郎: 時系列解析プログラミング (岩波書店, 東京, 1993) pp. 185-263.
- 17) 谷田貝豊彦: "走査モアレ法と三次元形状の自動計測", *応用物理*, **47** (1978) 370-375.
- 18) 新井泰彦, 倉田忠雄: "縞走査干渉計の手法による高速かつ高分解能なモアレトポグラフィ法", *光学*, **15** (1986) 402-406.
- 19) 日本機械学会編: 機械実用便覧 (丸善, 東京, 1997) pp. 109-118.