

カルマンフィルターによる空間的縞走査法の測定精度の改善

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

Improvement of Measuring Accuracy of Spatial Fringe Analysis Method Using Kalman Filter

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

There are several problems in the case that the spatial fringe analysis method based on the moire technique is applied to a noisy fringe image, for example, a phase unwrapping process, an accuracy of analysis, and so on. In this paper, the digital filter technique and the filter based on the probability process are applied to the spatial fringe analysis method in order to solve these problems. By the simulation for the model of the fringe image, it is shown that the spatial fringe analysis method using the digital filter is strongly robust against noise, and that the method with the Kalman filter can smoothly and accurately detect the phase map for the object with a continuous phase distribution. Next, the model based on experimental results was analyzed by this method. The results suggest that the proposed method can fulfil the intended function in the practical use. The proposed method is expected as the technology which accelerates the use of the spatial fringe analysis method in the wide engineering fields.

1. はじめに

サブフリンジ縞解析法の適用により、干渉縞をはじめとする縞の解析精度は著しく向上してきている^{1,2)}。このサブフリンジ縞解析法は時間的な手法と空間的な手法とに大別することができる¹⁾。一般に、時間的な手法²⁾は数枚の位相の異なった縞画像を用いることによって、各測定点 (CCDの各ピクセルと考えてもよい) ごとに位相を求めることができるので、空間的に広がるランダムなノイズ (たとえば、光学的には測定表面性状に起因するスペックル等) の影響も受けることなく高精度な位相演算を行える利点がある。反面、演算時に数枚の画像を必要とするために、ダイナミックに変化するような現象を解析することは一般に困難である。一方、空間的な手法では、1枚の画像より位相検出演算が行えるので、時間的な手法では困難なダイナミックに変化する現象の解析も容易に行うことができる¹⁾。その結果、当然のこととして、産業界において広

くこの技術の確立が要望されている。しかしながら、空間的縞解析法は、測定点周りの空間的な情報を用いて演算が行われるので、測定点周りに空間的に広がるランダムなノイズ等の影響を受け、一般に時間的な手法に比べてその測定精度は高くないといわれてきた。また、このノイズによる影響は、測定精度のみならず位相繋ぎ処理においても問題となっている³⁾。特に、マイクロマシン計測のように数十 μm オーダーの微小領域での物体の挙動を計測する場合には、微小時間内での画像サンプリングが行われている。また、顕微鏡対物レンズ等を用いた測定システムにより画像が採取されているため、画像のコントラストの低下に起因するS/N比の低い縞画像の解析を行わなければならない状況にある。このような場合には、ノイズの影響を極力排除した縞解析が必要になる。

前報³⁾では、このようなノイズによる問題に対して、障害物の定義を行い、ノイズによる影響が測定領域全域に伝搬しないようにすることによってこの問題の解消を図ろうとした。しかしながら、ノイズを含む各画素では、ノイ

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

ズによる影響を除去あるいは軽減することができなかった³⁾。

この問題を解決するために、本報ではまずはじめに、FFT (fast Fourier transform) を用いた縞解析⁴⁾において行われているフィルタリングの技術をモアレ縞の考え方を基礎とした空間的縞解析法³⁾にも導入することによって測定精度の改善を図ることを考え、このフィルタリング処理により、ノイズを含む画像に対しても空間的縞解析が十分な精度をもって行えることをシミュレーション結果により示している。さらに、フィルタリング処理だけでは除去することのできないノイズ成分に対しては、確率過程の考え方によって対応する処理法⁵⁾を検討し、その結果、カルマンフィルター⁶⁾によるノイズ処理がS/N比の低い縞画像の空間的縞解析に有効であることを示している。

前報³⁾までに示してきた空間的縞解析法を実用化するためには、測定現場において問題となるノイズに対してのロバスト性を高めることが必要不可欠であると考えられ、この問題解決へのひとつのアプローチを本研究では示している。本研究で示す手法が、ダイナミックに変化する現象を容易に処理することのできる空間的縞解析法のより広い分野での利用を促すものであると考えている。

2. 原 理

2.1 モアレ縞の考え方による空間的縞解析法³⁾

前報に示した空間的縞解析法³⁾では、1枚の変形を受けたキャリア縞より、位相の異なった4枚のモアレ縞をTVカメラの走査線を利用することによって求め、このモアレ縞画像を用いて、 \tan^{-1} 関数によって縞の位相を求めた。このとき、位相つなぎを円滑に行うために、位相が π rad異なる結果をもうひとつの \tan^{-1} 関数を設定することにより求め、これを用いることにより \tan^{-1} 関数の 2π radの位相飛びの影響を容易に除去できることを示した。さらに、画像が障害物を含む場合についても、演算経路を有向グラフの考え方にもとづいて求める手法を示した。この結果として、画像にノイズが含まれる場合においてもS/N比の低い画素（以下、低変調画素と呼ぶ）を新たな障害物として定義することによって精度よく縞解析を行うことができた。ところが前報に示した手法をマイクロマシンの動特性測定等のような多くのノイズを含む画像に適用する実験を行った場合、この低変調画素の処理が不十分なために、演算精度が低下する、あるいは、位相マップそのものが乱されてしまう等の新たな問題を生じる場合があることがわかった。この問題について、次にその発生過程ならびに改善法を検討する。

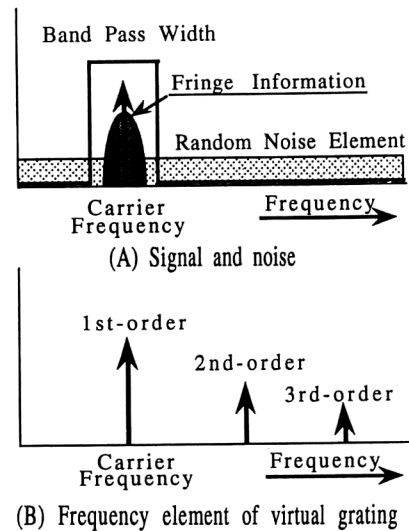


Fig. 1. Error source of spatial fringe analysis.

2.2 フィルタリングによる測定精度の改善

前報に示した手法³⁾には、広範囲にわたる周波数成分をもつノイズに対しての対応が難しい場合があることが実用上確認された。また、前報に示す手法は、走査線を仮想的な格子と考えることによるモアレ縞にもとづく高速縞解析法^{7,8)}を用いているので、仮想格子としての走査線がバイナリ格子のように高次にわたる高調波成分をもつ格子となり、そのために、Fig. 1(A)に示すランダムノイズ成分とFig. 1(B)に示す仮想格子の高次の周波数成分とが結びつき、演算誤差を生じることが考えられる。このような問題に対して、FFTを用いた縞解析⁴⁾で行われているように、演算に必要な縞画像の周波数成分だけをフィルタリングすることによる測定精度の改善法が考えられる。

空間的縞解析法では、Fig. 1(A)に示すようにキャリア縞の基本周波数近傍に情報が分布しているので、この周辺の情報のみをバンドパスフィルターによって取り出して演算を行えば、広域にノイズ成分が存在する場合においても精度よく位相を求めることができると考えられる。ここでは、まず第1段階の演算精度の改善法として計算機内にデジタルフィルターを構成して、上記に示す空間的縞解析法の問題点を検討し、ノイズによる影響の改善を図ることとした。

2.3 確率過程に基づく測定精度の改善

ところが、上記のバンドパスフィルターを用いたフィルタリング処理だけでは、Fig. 2においてハッチングによって示すバンドパスフィルターの通過帯域におけるノイズ成分を除去することは困難である。そのため、上記に示すフィルタリング処理だけでは測定精度の改善は十分に行うこ

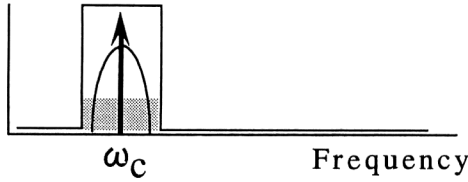


Fig. 2. Unremovable error source by band-pass filter.

とができない。そこで次にウィナーフィルターに代表されるモデルを用いた最適フィルターとして、カルマンフィルターにもとづくフィルタリング処理をこの問題解決のための手法として検討した⁶⁾。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が可能である。すなわち、バンドパスフィルターの通過帯域におけるノイズ成分に対するフィルタリング処理に加えて、前報^{3,9)}に示した低変調画素に対しては、『変化量のもっとも小さい隣接する画素からの位相演算処理』に代わって、カルマンフィルターにより推定した値を低変調画素の値に代えて利用する処理法を検討することにした。

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、滑らかに位相が変化するとした仮定にもとづいて、滑らかに変化する現象に対するモデルとしてのトレンドモデル⁵⁾を用いて状態モデルを形成することにした。

トレンドを推定する最も簡単な方法は、多項式回帰モデルを用いることである。多項式回帰モデルは時系列 y_n が多項式と残差の和によって $y_n = t_n + w_n$ と表現できると仮定したモデルである。ただし、 w_n は平均0、分散 σ^2 の正規白色雑音である。また、 t_n は x_n の多項式で $t_n = a_0 + a_1 x_n + \dots + a_m x_n^m$ と表せるものであり、係数 a_0, a_1, \dots, a_m は、最小2乗法に基づいて求められるものである。このように考えると、トレンドモデルによる状態モデルは信号過程に対して、所要の信号 x_n に対する式(1)に示す線形差分式と、測定過程としての観測量 y_n に対する式(2)によって表すことができる。

$$\mathbf{x}_n = \Phi_n \mathbf{x}_{n-1} + \Gamma_n \mathbf{v}_n \quad (1)$$

$$\mathbf{y}_n = \mathbf{H}_n \mathbf{x}_n + \mathbf{w}_n \quad (2)$$

ここで、 Φ_n, Γ_n は信号過程を示す時刻 n における変数行列であり、 \mathbf{H}_n は測定過程を示す時刻 n における信号 \mathbf{x}_n から観測量 \mathbf{y}_n への変換係数を示す遷移行列である。さらに、このモデルを用いると、信号 \mathbf{x}_n とその推定値 $\hat{\mathbf{x}}_n$ との差の2乗平均が最小となるように、次に示すカルマンフィルター⁶⁾を用いることによって \mathbf{x}_n を推定することができる。

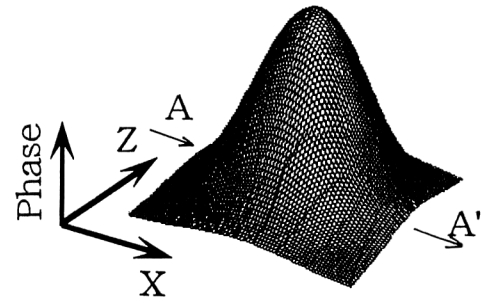


Fig. 3. Noise free phase model.

$$\hat{\mathbf{x}}_n = \hat{\mathbf{x}}_n + \mathbf{K}_n (\mathbf{y}_n - \mathbf{H}_n \hat{\mathbf{x}}_n)$$

$$\mathbf{K}_n = \mathbf{P}_n \mathbf{H}_n^T \mathbf{R}_n^{-1}$$

$$\mathbf{P}_n = \mathbf{M}_n - \mathbf{M}_n \mathbf{H}_n^T (\mathbf{H}_n \mathbf{M}_n \mathbf{H}_n^T + \mathbf{R}_n)^{-1} \mathbf{H}_n \mathbf{M}_n$$

$$\mathbf{M}_{n+1} = \Phi_n \mathbf{P}_n \Phi_n^T + \Gamma_n \mathbf{Q}_n \Gamma_n^T \quad (3)$$

ただし、 $\hat{\mathbf{x}}_n$ は \mathbf{x}_n の平均値であり、 \mathbf{Q}, \mathbf{R} は信号過程における外乱 \mathbf{v} と測定過程における測定誤差 \mathbf{w} に対する共分散をそれぞれ示し、それぞれの値は、トレンドモデル推定時に求めることができる。ここで、 \mathbf{K}_n は時刻 n における状態の推定値に対する誤差修正を行うカルマンゲインを示している。また、 \mathbf{P}_n は推定値、 $\hat{\mathbf{x}}_n$ と信号 \mathbf{x}_n との差の共分散行列を、 \mathbf{M}_n は \mathbf{x}_n の共分散行列をそれぞれ示している。

このカルマンフィルターを位相の変化率分布に適応してノイズの除去を行うとともに、低変調画素の処理として、欠損値の推定を位相分布に対して行うことを検討した。

実験は、文部省統計数理研究所において製作されたTIMSACを用いて行った。

3. 結果と検討

まずはじめに、上記の考え方に従って、Fig. 3に示す位相分布モデルに対して、式(4)に示すNSR (noise signal ratio)¹⁰⁾を変化させた場合のフィルタリングの有無による測定精度の違いを計算機シミュレーションによって検討し、本手法の有効性を調べた。

$$\text{NSR} = \left(\frac{b}{\sqrt{2} \sigma} \right)^{-1} \quad (4)$$

ただし、 b は縞画像の強度の振幅であり、 σ はノイズの標準偏差である。

ここで用いるフィルターはカイザー窓を用いたデジタルフィルターであり、阻止域減衰量は56 dBである。

結果をFigs. 4, 5に示す。ここで、図中の数値は、Fig. 3に示す基準位相との差のrmsを示している。NSR = 1.0, 2.2いずれの場合にもフィルタリングによりノイズの影響が軽減されていることが確認できる。これは、本手

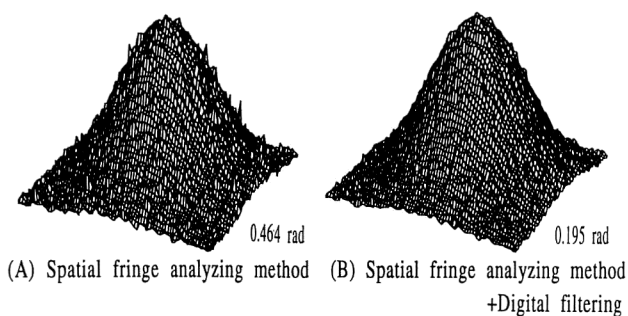


Fig. 4. Simulation results with digital filter ($NSR=1.0$).

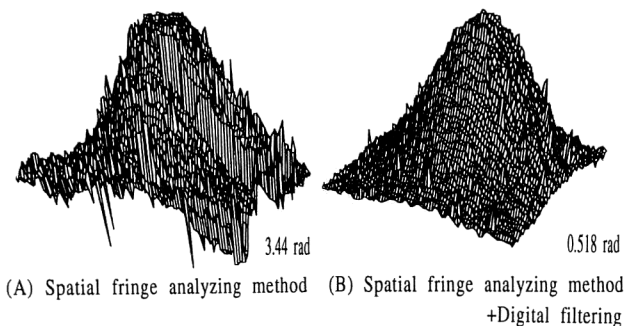


Fig. 5. Simulation results with digital filter ($NSR=2.2$).

法の基本的考え方による演算に必要な周波数成分のみを縞画像から抽出し、処理を行うことによって誤差の軽減がなされている結果である。位相検出演算が困難であると報告¹⁰⁾されている NSR が 1.7 を超えた 2.2 においても本手法では 12 分の 1 波長程度 (0.518 rad) で演算が行えることがわかった。このように本手法は大きな誤差要因としてのランダムノイズに対して容易に適用可能であり、かつ有効に機能する処理法であることがわかる。ところが、キャリア縞の基本周波数近傍に分布するノイズの影響をこのフィルタリング処理だけでは除去することはできない。たとえば、Fig. 5(B) に示す結果からさらにフィルタリングを行うことによって、Fig. 4 に示すような結果が得られるかといえそうではない。すなわち、キャリア縞の基本周波数近傍に分布するノイズの影響をこのフィルタリング処理だけでは除去することはできない。そこで、上記のような考え方にもとづいたカルマンフィルターによる新たな処理を行った。

現段階では、カルマンフィルター処理は 1 次元の演算として行うプログラムを作成しているにすぎない。そこで、まずはじめに、ここで示す問題に対して、カルマンフィルターが有効か否かを知るために、Fig. 3 に示す基準位相マップの A-A' 断面に対する 1 次元処理において、本手法の有効性を検討した。2 次元処理の場合には、前報⁹⁾ に示したように低変調画素を回避しつつ演算を行うことができる

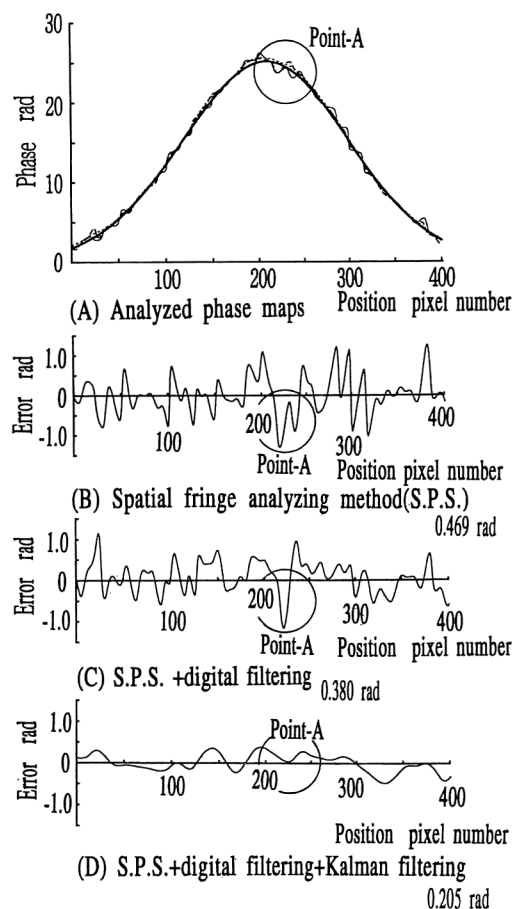


Fig. 6. Simulation results with Kalman filter ($NSR=1.0$).

ので、低変調画素の影響を広範囲に及ぼすことなく演算を行うことができた。しかし、1 次元処理法では、一方向への処理という考え方に基づいて、処理の方向性、経路そのものに選択性がないので、低変調画素の影響を広範囲に及ぼすことなく処理を行うことができない。その結果として低変調画素の影響は広範囲に及び、標準偏差の値はおのずから低下する。しかしながら新たに提案する手法の有効性を論じることは 1 次元処理の結果からでも行えるものと考えて、ここでは 1 次元処理を行った。

デジタルフィルター処理では十分に除去することのできないノイズ成分に対する有効性を知るために、デジタルフィルター処理が行われた画像 ($NSR=1.0$) に対して、1 次元カルマンフィルター処理を行った場合の結果を Fig. 6 に示す。デジタルフィルター処理を行っていない結果 (Fig. 6(B)) に比べて、デジタルフィルター処理を施した結果 (Fig. 6(C)) はなめらかとなり、Fig. 4, Fig. 5 同様に誤差の標準偏差も小さくなっている様子が見られる。

ところが、ここで示すデジタルフィルターのみによる処理に対して、Fig. 6(A) に示す Point-A のような位相

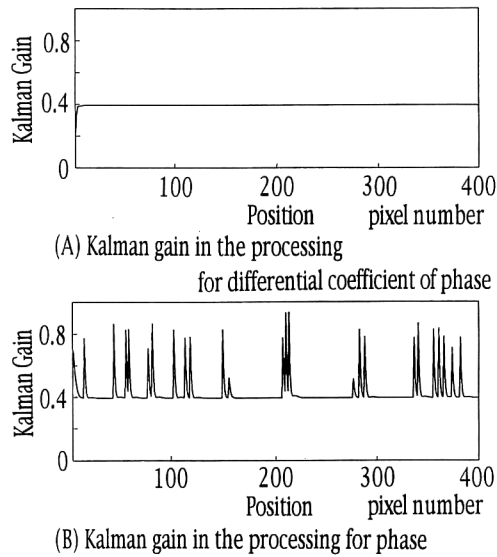


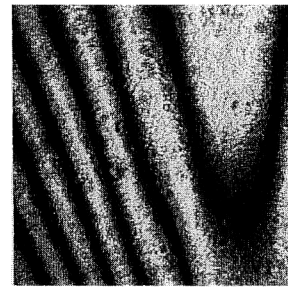
Fig. 7. Kalman gain.

分布が大きく乱れている低変調画素と考えられる画素周辺での位相演算処理結果について検討すると、フィルタリングのみでは低変調画素に対する対応が十分にはできておらず、単になめらかにスムージングされているに過ぎないことがわかる。そこで、Point-Aのような位相演算分布が大きく乱れている領域に対して、位相の変化率分布の乱れを指標として、前報³⁾に取り扱ったように位相の変化率がある値を超えるような画素は、データが欠損していると考え、カルマンフィルターによってこの点の値を推定する処理を位相マップに対して施すことにした。この推定の過程を経て求めた結果を Fig. 6(D) に示す。また、この場合のカルマンゲインの変化の様子を Fig. 7 に示す。ここで、Fig. 7(A) はカルマンフィルターの平滑作用を位相の変化率に対して施した場合のカルマンゲインを示している。また、Fig. 7(B) は、位相マップに対して施した推定過程の場合を示している。

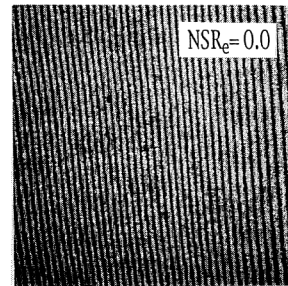
平滑作用を用いた処理では、低変調画素の定義を行うことなく全領域で同様の処理を行っているので、カルマンゲインは全領域で約 0.395 として取り扱われている。一方、推定過程では、低変調画素の定義にもとづき、欠損値の推定を行っているため、低変調画素近傍においてカルマンゲインは大きく変化していることがわかる。

これらの結果から、カルマンフィルターによる平滑作用、推定過程を用いた処理により Point-A における問題は軽減されていること（標準偏差において 0.205 rad（約 30 分の 1 波長）まで軽減されている）が確認できる。

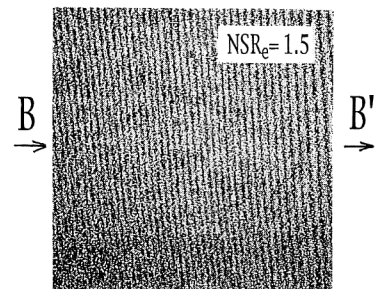
以上のシミュレーション結果にもとづいて、実際の干渉縞を用いた場合にも、シミュレーション結果と同様に、画



(A) Slide glass fringes image



(B) Deformed carrier fringes by slide glass



(C) Deformed carrier fringes by slide glass
with additional noise

Fig. 8. Real fringe images.

像ノイズの軽減が可能か否かについての検討を行った。

実験では、トワイマン・グリーン干渉計によるスライドガラスの測定結果に、人工的にノイズを付加した画像を製作し、この画像に対して、本手法の空間的編解析法を適用し、本手法の有効性を検討した。

測定に用いたスライドガラスの干渉縞を Fig. 8(A) に示す。Fig. 8(B) には、トワイマン・グリーン干渉計の一方のミラーを微小角回転させることにより得たキャリア縞を Fig. 8(A) に示すスライドガラスの位相分布で変調した干渉縞を示し、さらに、Fig. 8(C) には Fig. 8(B) に示す変調されたキャリア縞にノイズを付加した場合の縞画像を示している。ここで、ノイズの定量的な大きさを示すパラメータとして、 NSR_e に対応するようにキャリア縞の強度の平均的振幅 b_c に対して σ_e を設定したノイズ分布を用いて NSR_e を定義している。この Fig. 8(C) B-B' 断面の位相を求めた結果を Fig. 9 に示す。Fig. 9(D)

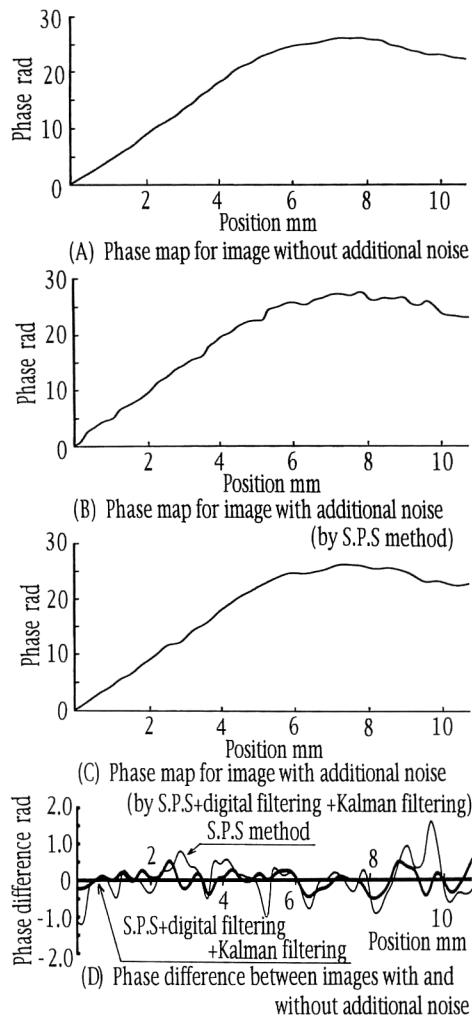


Fig. 9. Filtering results using Kalman filter for real fringe image.

は、ノイズを付加していない場合 ($NSR_e=0.0$) の位相分布解析結果 (Fig. 9(A)) とノイズを付加した場合 ($NSR_e=1.5$) の 2 種類の解析結果 (前報⁹⁾ までに示したフィルタリング処理を行っていない場合の図中細線で示した解析結果 (Fig. 9(B)) と太い実線で示した本手法による解析結果 (Fig. 9(C)) との差をそれぞれ示している。本手法に基づく結果において、差の標準偏差は、0.252 rad (25 分の 1 波長) であり、従来法による結果の 0.512 rad (12 分の 1 波長) に比べてノイズに対する影響が軽減されていることが確認できる。本手法を用いることによって、シミュレーション結果同様に実際の画像に対してもノイズの影響を軽減することが可能であることがわかった。

前述のように、本研究においては 1 次元処理を行っているに過ぎない。1 次元処理では、低変調画素の影響の伝搬をとどめることができない。したがって、全体的に前報までに行っていた 2 次元処理結果に比べて、驚異的な改善を

実現することはできなかった。しかしながら、本研究で示した改善結果より、本手法が 2 次元処理となった場合には、低変調画素の影響をコントロールしつつ処理が行えることを考えると、現状の 30 分の 1 波長にとどまらない改善が期待できるものと考えている。

以上のように、本研究で提案した手法は、急激な位相変化をもたない縞画像においては、縞画像が大幅なノイズを含む場合においても、ノイズの影響を軽減し、処理することのできる空間的縞解析法であることがわかった。

本研究で提案する確率過程に基づく処理は、前報³⁾において未解決となっていた低変調画素の処理を考える上でのひとつの指針を与えるものであると考えられるとともに、本手法で示した手法は、空間的縞解析法を単なる実験室レベルの解析法から、産業界において実用レベルで用いることのできる縞解析法へと変革する技術であると考えている。

さらに、Fig. 8(C) の解析処理結果をみると、スペックル干渉法における縞画像に対しても、本手法が適用可能ではないかと考えさせられる。この議論については、今後の課題として考えていきたい。

4. ま と め

空間的縞解析法におけるランダムノイズの影響を、演算に必要な周波数成分のみをデジタルフィルターを用いて抽出する処理、さらに、カルマンフィルターによる処理等を用いることによって、たとえ大幅なノイズを縞画像が含んでいたとしても、その影響を定量的に捉えつつ、測定精度の高い位相検出演算が行える手法を提案することができた。また、前報で問題となっていた異常値の取り扱いに対して、カルマンフィルターの推定機能を用いた処理により、さらなる測定精度の向上が可能であることがわかった。これらの処理により、大きな誤差要因と考えられる $NSR=1.0$ のランダムノイズにおいても約 30 分の 1 波長で位相を抽出することができた。本報において示した結果は、ダイナミックに変化する現象を容易に処理することのできる空間的縞解析法のより広い分野での利用を促すものであるといえる。

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。

文 献

- 1) M. Kujawinska: "Spatial techniques of automatic fringe pattern analysis," SPIE, 1991 International Symposium on

Optical Applied Science and Engineering, Short course Notes-77.

- 2) D. Malacara: Optical shop testing, 2nd ed. (John Wiley & Sons, New York, 1992) pp. 501-598.
- 3) Y. Arai, I. Ishihara and S. Yokozeki: "Automatic spatial fringe analysis method for two-dimensional fringe image including phase discontinuities by obstruction," J. Mod. Opt., **45** (1998) 2011-2023.
- 4) M. Takada, H. Ina and S. Kobayashi: "Fourier-Transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry," J. Opt. Soc.Am., **72** (1982) 156-160.
- 5) 北川源四郎: 次系列解析プログラミング (岩波書店, 1993), pp. 185-263.
- 6) 片山 徹: 応用カルマンフィルタ (朝倉書店, 1983), pp. 71-81.
- 7) 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.
- 8) 新井泰彦, 横関俊介, 白木万博, 山田朝治: "CCD 画像のサンプリング技術を用いた二次元空間的縞解析法", 光学, **25** (1996) 42-47.
- 9) 新井泰彦, 横関俊介, 山田朝治: "サンプリング技術を用いた CCD 画像の空間的縞解析法の改善", 光学, **24** (1995) 581-586.
- 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.