

**技術報告**

## 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

新井 泰彦\*・横関 俊介\*\*・山田 朝治\*

\*関西大学工学部機械工学科 〒564 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 飯塚市大字川津 680-4

(1995年2月28日受付, 1995年6月5日受理)

### Improvement of Spatial Fringe Analysis Method Using Sampling Technique on Pixel of CCD

Yasuhiko ARAI,\* Shunsuke YOKOZEKI\*\* and Tomoharu YAMADA\*

\*Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kansai University,  
3-3-35, Yamate-cho, Suita 564\*\*Department of Mechanical System Engineering, Faculty of Computer Science and System  
Engineering, Kyushu Institute of Technology, 680-4, Kawazu, Iizuka 820

(Received February 28, 1995; Accepted June 5, 1995)

Spatial fringe analysis techniques that can analyze fringes with just one image have been studied and developed to deal with a dynamic event using interferometry. In this paper, the characteristic of spatial fringe analysis methods using a sampling technique for information on pixels of CCD (charge coupled device) camera is discussed concerning measurement accuracy. Consequently, new high accurate spatial fringe analysis methods are proposed. A few experiments are performed regarding the accuracy and the processing speed of the new methods. The methods can detect the phase of fringes as accurate as the fringe analysis method based on the FFT (fast Fourier transform) analyzing technique. The speed of processing is over hundred times faster than the fringe analysis with the FFT analysis method.

### 1. はじめに

干渉縞をはじめとする縞の解析は、物体の形状、屈折率分布の測定など工学の分野、特に高精度を要する分野において現在広く用いられている<sup>1,2)</sup>。1970年代初頭にBruningによって報告された縞走査法<sup>3)</sup>、一岡によるハイブリッド化された位相検出システム<sup>4)</sup>、1980年代に入ってから武田によるFFT (fast Fourier transform)を用いた縞解析法<sup>5)</sup>、Womackによる手法<sup>6)</sup>、また、TVカメラの画素を利用した空間的な解析法<sup>7)</sup>など、現在までに様々なサブプリング法が提案されてきている。このような位相検出技術は一般にtemporalな手法とspatialな手法とに大別できる<sup>2)</sup>。

Temporalな手法は空間的に同一な点で位相を測定す

ることができるので、一般には測定精度が高いといわれている。しかしこの手法は、ミラーを正確に移動させ複数枚の画像を採取する必要があるなど、データのサンプリングに時間を要する処理法である。すなわち、temporalな手法では動的に変化する物体の測定は行うことができない。一方、空間的な手法には1枚の画像で処理が行える利点があり、動的に変化する物体の測定も容易に行うことができる。しかしながら、空間的に広がるデータによって処理を行うために、測定精度は一般に低いと考えられている。この空間的な手法には、FFT技術を用いた手法をはじめとして上記の様々な処理技術が報告されている。なかでも、TVカメラのピクセル上のデータサンプリングによる手法は簡単な論理で高速に処理が行えるので、縞解析法としては非常に有効な手法であ

る。

本研究では、1980年代に筆者らが報告したTVカメラのピクセル上のデータ操作による手法の考え方が、ここ数年さかんに利用され、普及するに至っている状況<sup>8)</sup>に対して、この手法の問題点を検討するとともに、より測定精度の高い手法の開発を行っている。新しく提案した手法では、実験結果において測定精度の向上が確認されている。

2. Spatial synchronous detection method<sup>2)</sup>

2.1 モアレ縞成分の抽出

Fig. 1に示すトワイマングリーン干渉計において、参照光側のミラー2を微小角 $\delta$ だけ回転させると、光路

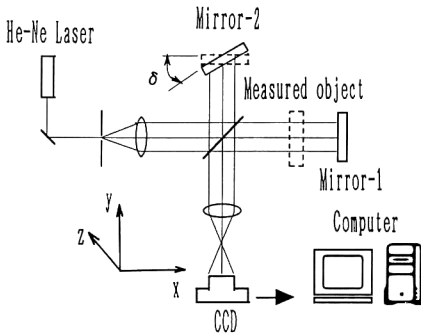


Fig. 1 Schematic of measurement system.

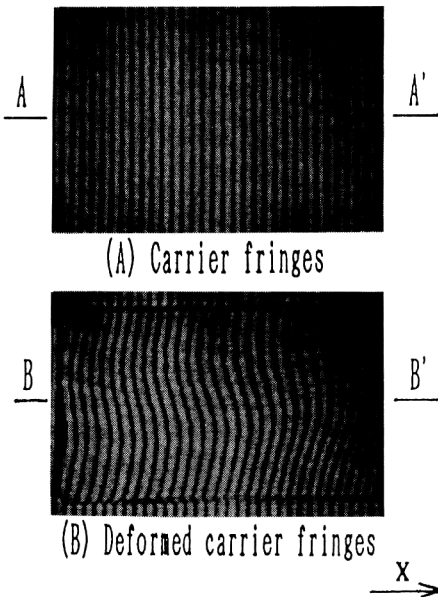


Fig. 2 Carrier fringes.

長の変化にともない Fig. 2(A)に示すような直線状の干渉縞が得られる。この干渉縞の空間周波数はミラーの回転角によって自由に設定することができる。この干渉縞のA-A'断面におけるx方向への強度分布 $I_c(x)$ は、Fig. 3(A)に示すようなプロフィールをもち、また式(1)によって表すことができる。

$$I_c(x) = A_c + B_c \cos(\omega_c x) \quad (1)$$

ここで、 $A_c, B_c$ は干渉縞のバイアス、コントラストに関係する係数であり、 $\omega_c$ は干渉縞の空間周波数である。

Fig. 2(A)に示した縞を通信理論で扱うキャリアーであると考え、Fig. 1に示すシステムの測定領域にスライドガラスのような位相物体を挿入すると、Fig. 2(B)はFig. 2(B)に示すように変形を受けることがわかる。このとき、Fig. 2(B)のB-B'断面における強度分布 $I_d(x)$ は式(2)として表すことができる。

$$I_d(x) = A_d + B_d \cos(\omega_c x + \phi_d) \quad (2)$$

ここで、 $\phi_d$ は縞の位相変調成分を示している。この式(2)に対して、式(1)に示すキャリアーとしての基準縞に対応する正弦波信号を式(3)として定義し、式(2)との積 $I_r \times I_d$ を式(4)として求める。この $I_r \times I_d$ を示したものがFig. 4(B)である。

$$I_r = \cos \omega_c x \quad (3)$$

$$I_r \times I_d = A_d \cos \omega_c x + B_d / 2 \cos(2\omega_c x + \phi_d) + B_d / 2 \cos \phi_d \quad (4)$$

ここで、ローパスフィルターによって式(4)の第3項を

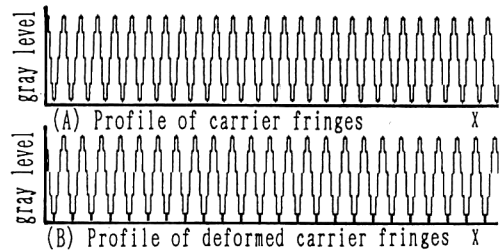


Fig. 3 Profile of carrier fringes.

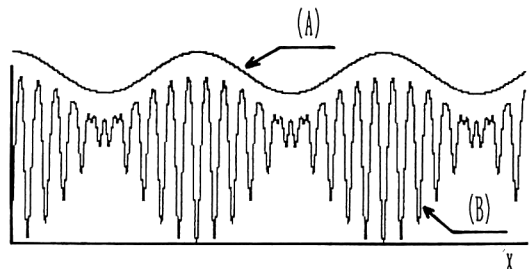


Fig. 4 Profile of moire fringes.

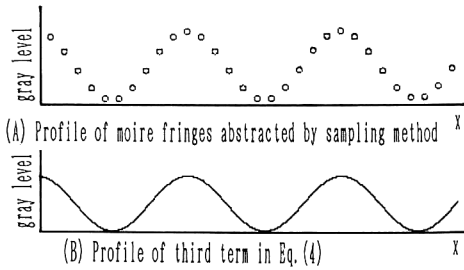


Fig. 5 Moire fringes abstracted by sampling technique.

抽出する。この第3項はモアレ縞解析で、一般にモアレ成分といわれる項であり、そのプロフィールは Fig.4(A) に示すものである。このモアレ成分を式(3)同様に位相が  $\pi/2$  rad シフトした  $\sin \omega_c x$  の基準格子を用いた場合にも求め、 $\cos$  と  $\sin$  とによってそれぞれ求めたモアレ縞強度の比を  $\tan^{-1}$  関数を用いて演算することによって位相  $\phi_a$  を求める手法が spatial synchronous detecting method である。すなわち、この手法は位相の異なったモアレを検出し、さらに演算処理することによって縞の位相を求める手法である。この考え方にもとづき、一岡の手法では、式(3)に対応する信号を発信機を用いて発生させ、掛算器、フィルターによってモアレ項を抽出している。一方、Womackの手法ではデジタル計算機によって上記のすべての演算が行われている。

このような演算は、TVカメラのピクセル上のデータ操作によっても行うことができる。

### 2.2 サンプリングによるモアレ縞の抽出

Fig.3(A)に示すキャリア縞の1周期が、CCD (charge coupled device)のピクセル4個分の長さになるように設定されているとすれば、変形後の Fig.3(B)の強度分布データをピクセル4個を1周期としてサンプリングしていくと、Fig.5(A)のようなプロフィールを得ることができる。これは Fig.4の(A)に示したモアレ縞のプロフィールにほかならない。すなわち、ピクセル上でのサンプリング操作で式(4)の第3項に示すモアレ縞成分を抽出することができる。さらに、サンプルする位置をシフトしていくと、位相の異なったモアレ縞プロフィールの検出も可能になる。たとえば、Fig.6に示すように、キャリア縞の周期がピクセル4個に対応して設定されている場合、 $4n$  番目(ただし  $n$  は整数)のピクセル上の変形縞の強度をサンプリングしていくと Fig.6(A)に示す0相のモアレ縞が抽出され、さらに  $4n+1$  番目のピクセル上の値をサンプリングしていくと Fig.6(B)

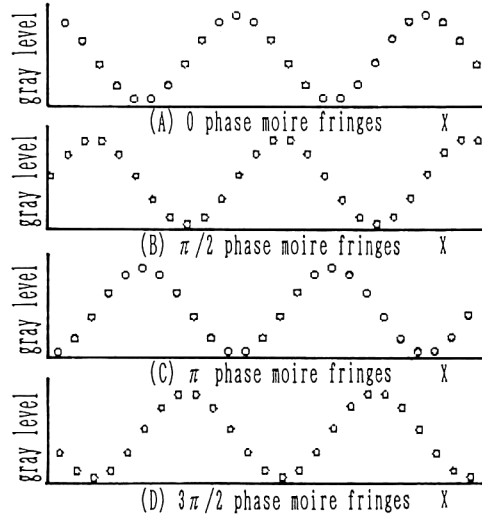


Fig. 6 Profiles of moire fringes with shifted phase.

に示す  $\pi/2$  相のモアレ縞が抽出できる。同様に、 $4n+2$  番目、 $4n+3$  番目のピクセル上の値をそれぞれサンプリングしたものが Fig.6(C), (D)であり、それぞれ  $\pi$  相、 $3\pi/2$  相のモアレ縞となっている。これらの結果から、1周期が4ピクセルに設定されている場合に、サンプリング点を1つシフトすることによって抽出されたモアレ縞は、 $\pi/2$  rad ずつ位相がシフトされていることになる。このようにして、サンプリング操作によって式(4)の第3項に示すようなモアレ縞プロフィールを、位相をシフトさせながら抽出することができる。

### 3. 干渉縞の位相検出

前章に示した手法によって、モアレ縞をTVカメラより抽出し、その結果を用いて位相を求めることができる。ここではその位相検出法について述べる。

#### 3.1 SPS (spatial-carrier phase shifting)法<sup>9)</sup>

Fig.6に示すように、サンプリング処理を適切に行うと  $\pi/2$  rad ずつ位相の異なったモアレプロフィールを得ることができる。そこで、変形縞1周期内で、バイアスも振幅も検出しようとしている位相も一定であると仮定すると、Fig.6(A)~(D)の結果より、位相  $\phi_a$  は式(5)によって求めることができる。

$$\phi_a = \tan^{-1} \frac{I_3 - I_1}{I_0 - I_2} \quad (5)$$

ただし、 $I_0$  は、0 rad 相のモアレ縞の強度(Fig.6では(A)に対応している)を示し、 $I_1$  は  $\pi/2$  rad 相のモアレ縞の強度を、 $I_2$  は  $\pi$  相、 $I_3$  は  $3\pi/2$  相のモアレ縞の強度

をそれぞれ示している。

この手法ではきわめて簡単な処理によって位相を検出することができる。しかしながら、上記の仮定が成り立たない場合には誤差が発生すると考えられる。

### 3.2 離散値データからの連続データの推定

SPS法では、有限の領域内で離散値データを用いて位相  $\phi_a$  を求めていた。したがって、バイアス、振幅、位相が変形縞1周期内で一定である条件を満足していなければならない。しかしながら、実際には縞のバイアス、振幅、位相は1周期内でも変化する。たとえば、測定物体によってキャリア縞は振幅変調も当然受けることになるから、振幅もバイアスも変化する。

このような状況に対して、検出された仮想のモアレ縞において緩やかにバイアスも振幅もさらに位相も変化していると仮定すると、Fig.6に示したような離散値データから連続なデータを推定することができる。これらの結果を用いると、同一点でのデータにもとづく位相検出処理を行うことが可能になる。この結果、測定精度の向上が期待できる。

#### 3.2.1 直線補間にもとづく仮想モアレ縞強度の推定

Fig.6に示すように、位相の異なったモアレ縞プロフィールは変形縞のサンプリング処理によって容易に求めることができる。さらに、モアレ縞プロフィールは連続し、かつ滑らかであると仮定すると、最も簡単な推定法として直線補間による推定が考えられる。

Fig.6から類推できるように、TVカメラのピクセル4個を1周期と仮定したキャリア縞の変形縞データはFig.7に示すようにピクセル上で  $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2, 0, \dots$  の順序で4種類のモアレプロフィールが混在し、連続して並んでいると考えられる。ここで、Fig.7のE点での位相を求める処理を考えてみる。

この場合、0相のデータはE点上に存在しているの、E点の値そのものを用いることができる。ところが、 $\pi/2$ 相のデータはE点には存在していない。そこで、E点における  $\pi/2$ 相のデータとして、B点とF点の値を用いて  $(I(B)+3I(F))/4$  という式で補間された値

を用いることにする。ここで、 $I(B)$ はB点における強度を示すものである。 $\pi$ 相、 $3\pi/2$ 相に対してもそれぞれ  $(I(C)+I(G))/2$ 、 $(3I(D)+I(H))/4$  として補間を行うと、それぞれの相に対する推定値を求めることができる。これらの値を用いて、E点での位相  $\phi_E$  は式(6)によって求めることができる。

$$\phi_E = \tan^{-1} \frac{3I(D) + I(H) - I(B) - 3I(F)}{4I(E) - 2I(C) - 2I(G)} \quad (6)$$

同様にして、他の点においても位相を演算することができる。この手法では推定データを用いているとはいえ、同一点での処理が行われているので、処理データの空間的相違による誤差の発生は小さくになると考えられる。

#### 3.2.2 Lagrange補間にもとづく仮想モアレ縞の強度の推定

前節に示した直線補間からさらに高次の関数による補間を行うと、より忠実に縞のバイアス、振幅、位相変調の変化に対応することのできる推定が可能になると考えられる。そこで、より滑らかな曲線で補間を行うために、Lagrange補間公式<sup>10)</sup>を用いることにした。Lagrange補間公式は  $n$ 次近似多項式として、 $f(x)$ が式(7)のように用意されている。

$$f(x) = \sum_{k=1}^n g(x_k) \times \frac{(x-x_1)(x-x_2)\cdots(x-x_{k-1})(x-x_{k+1})\cdots(x-x_n)}{(x_k-x_1)(x_k-x_2)\cdots(x_k-x_{k-1})(x_k-x_{k+1})\cdots(x_k-x_n)} \quad (7)$$

すなわち、一次近似で2点の離散値データから未知の1点の値が推定され、また、二次近似補間では3点の離散値データから未知の1点の値を推定できる。ここで問題となるのは、モアレプロフィールは滑らかな曲線であると仮定したものの、次数を上げていくとより多くの離散値データを必要とすることである。すなわち、推定しようとする点から遠くはなれた値を用いなければならず、空間的に誤差要因を広い範囲で考えなければならなくなる。一方、次数が小さい場合には局所的なデータで推定ができる反面、補間に用いる曲線が限られてくる問題がある。このような問題に対して、本研究では4点を用いて行う三次近似補間法を採用し、その特性を検討することにした。この次数の決定に関しては今後詳しい検討が必要であると考えられる。

位相検出時には前節の直線補間法と同様に、解析しようとする点における未知の値を、実在する近傍の0相、 $\pi/2$ 相、 $\pi$ 相、 $3\pi/2$ 相の値と、式(7)に示すLagrangeの補間公式を用いて推定し、最後に直線補間の場合と同様に  $\tan^{-1}$ 関数を用いて位相を求めている。

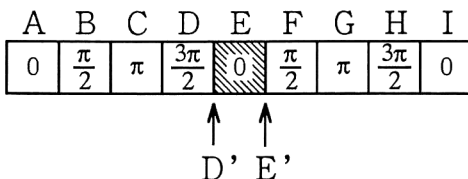


Fig. 7 Information on pixel of TV camera.

### 4. 結果と検討

本研究で新たに提案した補間を用いた手法の誤差解析を行う前に、筆者が1986年当時報告した手法について述べ、この手法と新たに提案した手法とを比較検討し、これらの手法の誤差解析をここでは並行して行う。

#### 4.1 単純平均にもとづく縞解析<sup>7)</sup>

1985年当時、CCDのピクセル上のデータサンプリングによって求める仮想のモアレ縞による位相検出法は、前節までに示したような考え方ではなく、直感にもとづく視覚的な説明によってなされていた。すなわち、「変形格子と基準格子とが重なり合ったとき発生するモアレ縞の強度分布は、基準格子の透明部分における変形格子の強度分布によって形成されている」と考えていた。実際の処理では、データが存在する点に対してはモアレ縞の強度分布としてその地点での変形格子の強度値を用い、データが存在しない点では基準格子の透明な部分に対応する地点の変形格子の強度分布の値を、その周辺のピクセル上の値の平均値を用いて定義していた<sup>11)</sup>。従来法をサンプリングの考え方で、かつ前節に合わせてできる限り同一点に近いデータを用いた処理となるように考慮して説明すると、従来法の0相のモアレ縞の強度分布はFig.7のE点とF点との値を単純に平均した値を用いていたことになる。さらに、 $\pi/2$ 相の値としてはFig.7のF点とG点との平均値  $((I(F)+I(G))/2)$  と、B点とC点との値を平均した結果  $((I(B)+I(C))/2)$  とをさらに平均した値  $((I(B)+I(C)+I(F)+I(G))/4)$  でE点での  $\pi/2$  相の値を定義していたことになる。

この解析法では、直感的には  $\pi/4$  rad 位相がシフトされたモアレ縞を用いて処理が行われていると考えられるが、しかし厳密には、0相の値はFig.7のE点とF点との中間点(E'点)の値となり、 $\pi/2$ 相の値はB点とC点およびF点とG点との中間点(D'点)の値となる。同様に、 $\pi$ 相はC点とD点およびG点とH点との中間点(E'点)の値となり、 $3\pi/2$ 相はD点とE点との平均値を用いるので、その中間点のD'点の値となる。すなわち同一点での値による処理とはなっていない。さらに、ピクセル間で平均化処理を繰り返す過程で、本来縞がもつ位相データの欠落が発生する問題もあると考えられる。

このような議論から、この手法は必ずしも精度の高い解析法であるとは考えられない。しかしながら、本報では前節までに示してきた手法と同時に上記の手法による解析も行い、サンプリング技術にもとづく空間的縞解析

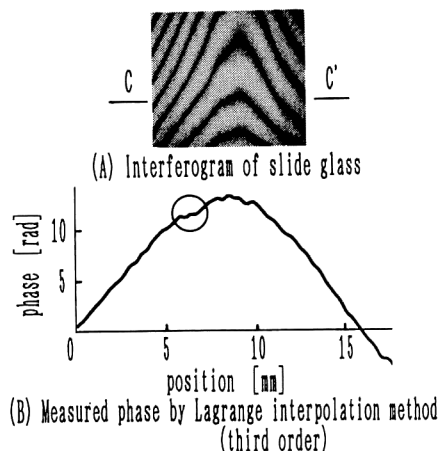


Fig. 8 Measured phase by this method.

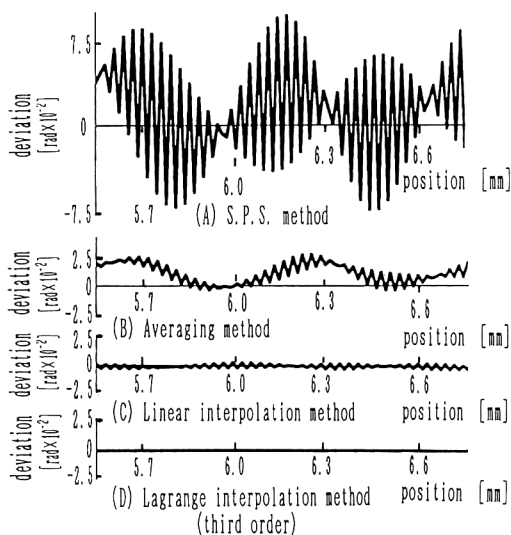


Fig. 9 Difference between results by each method and FFT method.

法全般の測定精度の検討を行うことにした。

#### 4.2 実験結果の検討

Fig. 8(A)に示すスライドガラスの干渉縞のC-C'断面のLagrange補間にもとづく手法によって求めた位相測定結果をFig. 8(B)に示す。ここで、Fig. 8(B)の○印で囲まれた比較的傾きが小さい領域について、SPS法、単純平均による手法、直線補間による手法、Lagrange補間による手法、FFT法による手法<sup>5)</sup>、それぞれの手法にもとづき同一画像を解析した結果を求めた。さらに、FFT法の結果は非常に測定精度が高いので、ここではFFT法による結果をそれぞれの手法によって求めた結

果から差し引いた値をそれぞれの縞解析の良否を問う指標として定義した。その結果を Fig. 9 に示す。

SPS 法と FFT 法との結果の差を Fig. 9(A) に示す。SPS 法ではキャリア縞 1 周期内でバイアス、コントラスト、位相変調成分は一定であるという仮定のもとに解析が行われている。ところが実際の干渉縞ではこの条件は満足させられていない。

この問題に対して、いくつかの実験によって定性的に以下に示す偏差が確認されている。すなわち、干渉縞のコントラストの変動が高い周波数成分(式(4)の第2項に対応するもので、キャリア縞の周波数の2倍の周波数成分)をもつ偏差を生じ、位相変調成分の変動がかたよりを生じる原因となることが確認されている。Fig. 9(A) を示す解析結果においても、それぞれの変動に応じた偏差が観察できる。

Fig. 9(B) に単純平均にもとづく従来法による結果と FFT 法との差を示す。この手法では、データを平均化していく過程で、厳密に同一点での処理が行われていない問題があるため、SPS 法と同様に FFT 法との結果の差として周期的な変動が発生している。

上記2つの手法に対して、離散値データから連続データを論理的に推定していく手法では、コントラストの変動、位相変調成分の変動が存在した場合でも同一点におけるデータの処理が行われているので、FFT 法との差が減少していることが Fig. 9(C), (D) において認められる。

直線補間による手法では、かたよりの FFT 法との周期的な偏差も小さくなっている。FFT 法との差の標準偏差は  $1.13 \times 10^{-3}$  rad であることより、この手法は FFT 法による結果と比較して約 1/5000 フリンジ程度の非常に小さな差で測定が可能であると考えられる。さらに、Lagrange 補間にもとづく手法では仮想のモアレ縞のプロファイルを高次の項で捉えているので、FFT 法との差はさらに小さくなっている。この場合の標準偏差は  $4.2 \times 10^{-5}$  rad であり、この手法はほぼ FFT 法と同じ精度をもっているものと考えられる。

モアレプロフィールは正弦波状の信号であることが知られているので、本研究で用いたような高次の式ではなく正弦波によって補間が行えればさらに高い測定精度が期待できる。しかしながら、正弦波によって補間ができるのであれば、その時点で位相変調成分が既知となっていることになり、処理に矛盾が生じることになる。しかし、このような議論は測定精度向上のために将来にわたって必要であると考えている。また、変形縞のバイアス

の変動、電気的なノイズなどは電気回路によるフィルタリングの技術で容易に除去できることがわかっている<sup>12)</sup>ので、空間的に突発して発生するノイズの影響を受けることなく、縞の位相検出は本研究において示した手法によって高速に行えるものと考えている。

## 5. おわりに

本研究では CCD 画素のサンプリング技術による空間的な縞解析の高精度化を図るために新しい手法を提案し、従来行われていた手法の測定精度を FFT 法による結果を尺度として検討した。

新しく提案した補間にもとづく手法では同一点での処理が行われているので、FFT 法による測定結果との差が標準偏差で  $4.2 \times 10^{-5}$  rad であることがわかり、FFT 法と同程度の測定が可能であることがわかった。また、本手法は FFT 処理を必要としないので、FFT 法に比べて約 1/100 の処理時間で解析が行えることが同時にわかった。

## 文 献

- 1) 谷田貝豊彦: "光干渉計測の最近の進歩", 精密機械, 51 (1985) 695-702.
- 2) D. Malacara: *Optical Shop Testing*, 2nd ed. (John Wiley & Sons, New York, 1992) pp. 501-598.
- 3) J. H. Bruning, D. R. Herriott, J. E. Gallagher, D. P. Rosenfeld, A. D. White and D. J. Brangaccio: "Digital wavefront measuring interferometer for testing optical surfaces and lenses," *Appl. Opt.*, 13 (1974) 2693-2703.
- 4) Y. Ichioka and M. Inuiya: "Direct phase detecting system," *Appl. Opt.*, 11 (1972) 1507-1514.
- 5) M. Takeda, 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.
- 6) K. H. Womack: "Frequency domain description of interferogram analysis," *Opt. Eng.*, 23 (1984) 396-400.
- 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) R. Gu, T. Yoshizawa and Y. Otani: "One-step shift 3-D surface profilometry with grating projection," *Opt. Lasers Eng.*, 21 (1994) 61-75.
- 9) M. Kujawinska: "Spatial techniques of automatic fringe pattern analysis," SPIE, 1991 International Symposium on Optical Applied Science and Engineering, Short Course Notes-77.
- 10) 数学ハンドブック編集委員会: 理工系のための数学ハンドブック(丸善, 東京, 1978) pp. 329-331.
- 11) 新井泰彦, 倉田忠雄: "走査モアレ法における画像2値化の一手法について", 精密工学会誌, 52 (1986) 1055-1060.
- 12) 森久泰英, 新井泰彦, 横関俊介, 山田朝治: "干渉縞の空間位相測定法における誤差要因とその除去法", 日本機械学会関西支部第69期定時総会講演論文集 944-4 (1994) pp. 136-139.